

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Etude et caractérisation d'un transformateur
de puissance vis-à-vis aux signaux non
sinusoïdaux et charges non linéaires**

Présenté par :

ZEGHIB OKBA

Soutenu le : 03 Juin 2015

Devant le jury composé de :

Mr. HAMOUDI MOHAMED YACINE	M.A.A	Président
Mr. ALLAG ABDELKARIM	Professeur	Encadreur
Mr. MOHAMMEDI MESSAOUD	M.A.A	Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Etude et caractérisation d'un transformateur
de puissance vis-à-vis aux signaux non
sinusoïdaux et charges non linéaires**

Présenté par:

ZEGHIB OKBA

Avis favorable de l'encadreur:

ALLAG ABDELKARIM

signature

Avis favorable du Président du Jury

HAMOUDI MOHAMED YACINE

Signature

Cachet et signature

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Thème :

**Etude et caractérisation d'un transformateur
de puissance vis-à-vis aux signaux non
sinusoïdaux et charges non linéaires**

Proposé par : **ZEGHIB OKBA**

Dirigé par : **ALLAG ABDELKARIM**

Résumés (Français et Arabe)

Le transformateur constitue l'un des plus important partie du système électro énergétiques dans la partie de transport ou de distribution. Notre mémoire s'inscrit dans la cadre d'un projet pour l'étude et l'analyse des transformateurs de puissance monophasé et triphasé vis-à-vis à la charge non linéaire, saturation du noyau magnétique ainsi que l'alimentation non sinusoïdale.

Le travail mené consiste à traiter le comportement du transformateur de puissance de point de pratique et par simulation à l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink pour les différentes cas mentionnés précédemment et particulièrement l'analyse du courant du transformateur. L'apparition des courants harmoniques dans les transformateurs ont des effets néfastes non seulement pour la source électrique mais aussi sur les transformateurs eux-mêmes à travers des échauffements supplémentaires qu'elles peuvent réduire la durée de vie des transformateurs. Une partie de notre étude est de diminuer l'influence de ces effets sur les

transformateurs et sur l'alimentation par l'association des filtres pour améliorer la qualité de l'alimentation ainsi que le comportement du transformateur.

تعتبر محولات الطاقة واحدة من أهم مكونات النظام الكهربائي سواء في النقل أو التوزيع. الأطروحة تدرج في دراسة آثار الحمولة غير الخطية،التشبع في الدارة المغناطيسية و كذلك التزويد غير أليبي على محولات الطاقة أحادية وثلاثية الطور.

هذا العمل يعالج سلوك محول الطاقة عمليا و بالمحاكاة باستعمال MATLAB/Simulink من اجل الحالات الثلاث السابقة و بالخصوص معرفة التيار الذي يمر في المحول. هذا التيار يتركب من تيار أساسي(مفيد) وتيارات توافقية (غير مفيدة). مرور التيارات التوافقية بالمحولات لديه عواقب وخيمة ليس فقط على الشبكة الكهربائية وإنما على المحول في حد ذاته من خلال ارتفاع درجات الحرارة التي من شأنها أن تقلص من مدة صلاحية المحول. للحد من تأثير هذه العواقب على المحولات و على منبع التزويد بالطاقة،تصفية التيارات التوافقية باحترام حدود مدروسة من شأنه أن يحسن في جودة التزويد بالطاقة وكذلك تحسين تصرف المحول.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma belle-mère ;

À mon très cher père ;

À mes proches de mes frères et mes sœurs, chacun à son nom ;

À mon meilleur ami Hamidani Bilal ;

À toute la famille ;

*À tous mes chers amis et mes collègues de l'Université de
Biskra ;*

À tous mes chers enseignants qui ont enseigné moi ;

Remerciements

Je remercie **ALLAH**, le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et le courage pour poursuivre mes études.

Je remercie mon adorable professeur *Allag Abdelkarim* d'avoir accepté d'encadrer ce mémoire. Sans ses orientations et ses suggestions les plus inestimables, ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour.

Je tiens également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Nos remerciements vont à l'Université d'el Oued pour sa contribution significative à la réalisation de ce mémoire et en particulier le côté pratique d'elle.

Je remercie vivement mon inoubliable ami et collègue Hamidani Bilal, pour ses discussions très intéressantes au cours de l'élaboration de ce travail, de ses commentaires sur le contenu. Je lui dis : «bonnes réussites à venir. L'université de Biskra aura besoin de toi, ne la quitte pas ».

Un grand merci à tous mes collègues et amis de la l'Electrotechnique à l'université de Biskra pour leurs précieuses aides et orientations.

Je suis reconnaissant à mes proches, parents et amis, qui ont su rester à mes côtés pendant toute cette période de formation. Ainsi que l'ensemble des enseignants de l'université de Biskra qui a contribué à mon formation.

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Grandeurs du circuit magnétique.....	5
Tableau I.2. Analogie entre les paramètres (grandeurs) électriques et magnétiques.....	6
Tableau I.3. Essai à vide.....	14
Tableau I.4. Essai en court-circuit.....	15
Tableau III.1 comparaison entre filtre passif et filtre actif.....	38
Tableau IV.1 résultats de l'essai à vide.....	40
Tableau IV.2 résultats de l'essai en court circuit.....	40
Tableau IV.3 condition du transformateur monophasé ; alimentation sinusoïdale et charge linéaire.....	41
Tableau IV.4. condition du transformateur monophasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	42
Tableau IV.5. condition du transformateur monophasé; alimentation non sinusoïdale et charge linéaire.....	44
Tableau IV.6. paramètres du transformateur triphasé.....	46
Tableau IV.7 condition du transformateur triphasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	47
Tableau IV.8. condition du transformateur triphasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	48
Tableau IV.9. condition du transformateur monophasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire avec filtrage.....	56
Tableau IV.10. condition du transformateur triphasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	59

Liste des figures

Fig.I.1 Différents types des transformateurs.....	4
Fig.I.2. Noyau magnétique	5
Fig I.3 Analogie entre circuit électrique (a) et circuit magnétique (b).....	6
Fig.I.5 Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé.....	8
Fig.I.6. Symbole d'un transformateur.....	8
Fig.I.7 Types de noyau des transformateurs de puissance triphasés.....	10
Fig.I.8 Couplage étoile.....	10
Fig.I.9 Couplage triangle.....	11
Fig.I.10 Couplage zig-zag.....	11
Fig.I.11 Modèle sans saturation.....	12
Fig.I.12 Modèle avec pertes fer, sans saturation.....	13
Fig.I.13 Modèle avec saturation.....	13
Fig.I.14 Modèle avec pertes fer, sans saturation.....	13
Fig.II.1 Décomposition d'un signal périodique.....	18
Fig.II.2 Le spectre des harmoniques d'un signal déformée.....	20
Fig.II.3 Représentation vectorielle de la puissance apparente.....	21
Fig.III.1 Transformateur de mise à la terre.....	28
Fig.III.2 Utilisation des transformateurs déphaseurs pour éliminer 5 ^{ième} et 7 ^{ième} harmoniques....	29
Fig.III.3 Raccordement du filtre passif.....	30
Fig.III.4 Filtre passif résonant.....	31
Fig.III.5 Filtre passif amorti.....	32
Fig.III.6 Types de filtre amorti.....	32
Fig.III.7 Principe de fonctionnement du filtre actif.....	33
Fig.III.8 Filtre actif série.....	34
Fig.III.9 Filtre actif parallèle.....	35
Fig.III.10 Conditionneur universel de la qualité d'onde.....	35
Fig.III.11 Filtre hybride parallèle.....	36
Fig.III.12 Filtre hybride série.....	37

Fig.IV.1 Image réelle du transformateur monophasé utilisé dans l'expérimental.....	39
Fig.IV.2 L'allure de courant du transformateur(alimentation sinusoïdale et charge linéaire).....	40
Fig.IV.3 Le spectre des harmoniques du courant du transformateur(alimentation sinusoïdale et charge linéaire).....	41
Fig.IV.4 L'allure du courant du transformateur(alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)	41
Fig.IV.5 Le spectre des harmoniques du courant du transformateur(alimentation sinusoïdale et charge non linéaire).....	42
Fig.IV.6 L'allure de la tension d'alimentation du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	43
Fig.IV.7 L'allure du courant primaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	43
Fig.IV.8 Le spectre des harmoniques du courant primaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	43
Fig.IV.9 L'allure du courant secondaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	44
Fig.IV.10 Le spectre des harmoniques du courant secondaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	44
Fig.IV.11 Le schéma de simulation du transformateur lors du saturation.....	45
Fig.IV.12 L'allure de courant lors le transformateur monophasé en saturation.....	45
Fig.IV.13 Le spectre des harmoniques de courant saturé du transformateur monophasé.....	45
Fig.IV.14 Le cycle d'hystérésis du transformateur monophasé.....	46
Fig.IV.15 L'allure du courant du transformateur triphasé(alimentation sinusoïdale et charge linéaire).....	47
Fig.IV.16 Le spectre des harmoniques du courant du transformateur triphasé (alimentation sinusoïdale et charge linéaire).....	47
Fig.IV.17 L'allure du courant du transformateur triphasé(alimentation sinusoïdale et charge non linéaire).....	48
Fig.IV.18 Le spectre des harmoniques du courant du transformateur triphasé (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire).....	48
Fig.IV.19 Schéma de manipulation du transformateur monophasé pour charge non linéaire.....	49
Fig.IV.20 Le courant réel du transformateur(alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)...	50
Fig.IV.21 Le spectre des harmoniques du courant réel du transformateur (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire).....	50
Fig.IV.22 La tension réelle d'alimentation du transformateur.....	51
Fig.IV.23 Le courant primaire réel du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	51

Fig.IV.24 Le spectre des harmoniques du courant primaire réel du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	51
Fig.IV.25 Le courant secondaire réel du transformateur(alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	52
Fig.IV.26 Le spectre des harmoniques du courant secondaire réel du transformateur(alimentation non sinusoïdale et charge linéaire).....	52
Fig.IV.27 Courant réel de saturation pour que la tension est 30V.....	53
Fig.IV.28 Courant réel de saturation pour que la tension est 95V.....	53
Fig.IV.29 Courant réel de saturation pour que la tension est 140V.....	53
Fig.IV.30 Courant réel de saturation pour que la tension est 170V.....	53
Fig.IV.31 Courant réel de saturation du transformateur.....	54
Fig.IV.32 Le spectre des harmoniques du courant réel de saturation du transformateur.....	54
Fig.IV.33 Le cycle d'hystérésis réel du transformateur.....	55
Fig.IV.34 L'allure du courant du transformateur monophasé avec filtrage (charge non linéaire).....	56
Fig.IV.35 Le spectre des harmoniques du courant du transformateur monophasé avec filtrage (charge non linéaire).....	56
Fig.IV.36 L'allure du courant du transformateur monophasé avec filtrage (lors du saturation du transformateur).....	57
Fig.IV.37 Le spectre des harmoniques du courant du transformateur monophasé avec filtrage (lors du saturation du transformateur).....	57
Fig.IV.38 L'allure du courant du transformateur triphasé avec filtrage (charge non linéaire).....	58
Fig.IV.39 Le spectre des harmoniques du courant du transformateur triphasé avec filtrage (charge non linéaire).....	58

Liste des abréviations et nomenclatures

\mathfrak{F}:	Force magnétomotrice (fmm)
H:	Intensité de champ magnétique
B:	Densité de champ magnétique
μ:	Perméabilité
ϕ:	Flux
λ:	Flux de liaison
L:	Inductance
\mathfrak{R}:	Reluctance
Λ:	Perméance
μ_0:	Perméabilité de l'air
μ_r:	Perméabilité relative de matériau ferromagnétique
L:	Longueur du noyau
N:	Nombre de spires
S:	Section de noyau
E:	Intensité de champ électrique
V:	Tension
I:	Courant
D:	Densité de champ électrique
R:	Résistance
σ:	Conductivité
I₁:	Courant primaire du transformateur
I₂:	Courant secondaire du transformateur
m:	Rapport de transformation
C:	capacité
ω:	Pulsation angulaire
a,b:	Coefficients de la série de Fourier
F_{dis}:	Facteur de distorsion
F_p:	Facteur de puissance
f:	Fréquence
f_r:	fréquence de résonance

P:	Puissance active
Q:	Puissance réactive
S:	Puissance apparente
D:	Puissance déformante (de distorsion)
n:	Rang harmonique
t:	Temps
T:	Période
η:	Rendement du transformateur
eff:	Valeur efficace
φ:	Déphasage entre la tension et le courant
φ_1:	Déphasage entre la tension et le courant fondamental
R_m:	Résistance de fuite
X_m:	Réactance magnétisante
$R_{1,2}$:	Résistance de primaire, secondaire
$X_{1,2}$:	Réactance de primaire, secondaire
THD:	Total Harmonic Distortion
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FAS:	Filtre actif série
FAP:	Filtre actif parallèle
MLI :	Modulation de largeur d'impulsion
UPQC:	Unified Power Quality Conditionner
FPP:	Filtre passif parallèle
Y-Y:	Couplage étoile-étoile

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I: Considérations fondamentales sur les transformateurs

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Circuit Magnétique.....	4
I.4 Equations Magnétiques.....	5
I.4.1 Loi d'Hopkinson.....	5
I.4.2 Loi de Lenz.....	6
I.5 Transformateur.....	6
I.5.1 Constitution des transformateurs monophasés.....	7
I.5.2 Principe de fonctionnement.....	7
I.5.3 Symbole d'un transformateur.....	8
I.5.4 Rapport de transformation dans le cas idéal.....	8
I.6 Transformateur triphasé.....	9
I.6.1 Forme des noyaux des transformateurs triphasés.....	9
I.6.2 couplage des enroulements de transformateur.....	10
I.7 Modélisation des transformateurs.....	11
I.7.1 Transformateur monophasé linéaire sans saturation.....	12
I.7.2. Transformateur monophasé avec saturation.....	13
I.7.3. Transformateur monophasé avec saturation et perte fer.....	13
I.8. Essais sur transformateur.....	14
I.8.1. Essai à vide.....	14
I.8.2 Essai en court-circuit.....	14
I.9 Bilan d'énergie.....	15
I.10 Conclusion.....	16

chapitre II: Généralités sur les harmoniques

II.1. Introduction.....	17
II.2 Harmoniques et inter harmoniques.....	17
II.3 Décomposition d'un signal périodique.....	17
II.4 Grandeurs caractéristiques.....	18
II.4.1 Grandeur harmonique.....	18
II.4.2 Rang de l'harmonique.....	18
II.4.3 Série de Fourier.....	18

II.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	19
II.4.5 Taux de distorsion.....	19
II.4.6 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	20
II.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP.....	20
II.6 Génération des harmoniques.....	22
II.6.1 Charges non linéaire.....	22
II.6.2 Transformateur.....	23
II.6.3 Machines tournantes.....	24
II.6.4 Alimentation à découpage.....	24
II.7 Effets des perturbations harmoniques.....	24
II.8 Normes et recommandations.....	26
II.9 Conclusion.....	27

Chapitre III: Moyens de mitigation contre la pollution harmonique

III.1 Introduction.....	28
III.2 Surdimensionnement du neutre.....	28
III.3 Transformateurs spéciaux.....	28
III.3.1 Transformateur de mise à la terre.....	28
III.3.2 Transformateurs déphaseurs.....	28
III.4 Filtrage d'harmoniques.....	29
III.4.1 Filtrage passif.....	30
III.4.1.1 Principe de fonctionnement.....	30
III.4.1.2 Classification des filtres passifs.....	30
III.4.2 Filtrage actif.....	33
III.4.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif.....	33
III.4.2.2 Classification des filtres actifs.....	34
III.5 Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif.....	37
III.6 Conclusion.....	38

Chapitre IV: Simulations et résultats pratiques

IV.1 Introduction.....	39
IV.2 Caractérisation du transformateur.....	39
IV.3. Résultats de simulation du transformateur monophasé.....	40

IV.3.1 Alimentation sinusoïdal et Charge linéaire.....	40
IV.3.2 Alimentation sinusoïdal et Charge non linéaire.....	41
IV.3.3 Alimentation non sinusoïdal et Charge linéaire.....	42
IV.3.4 Saturation du transformateur monophasé.....	45
IV.4 Résultats de simulation du transformateur triphasé.....	46
IV.4.1 Alimentation sinusoïdale et charge linéaire.....	47
IV.4.2 Alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	48
IV.5 Résultats expérimentaux du transformateur monophasé.....	49
IV.5.1 Alimentation sinusoïdal et Charge non linéaire.....	49
IV.5.2 Alimentation non sinusoïdale et charge linéaire.....	50
IV.5.3 Saturation réel du transformateur monophasé.....	52
IV.6 filtrage des harmoniques du courant.....	55
IV.6.1 transformateur monophasé.....	55
IV.6.1.1 alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	55
IV.6.1.2 saturation du transformateur monophasé.....	56
IV.6.2 transformateur triphasé.....	58
IV.7 Comparaison entre les résultats pratiques et celle de simulation.....	59
IV.8 Conclusion.....	60
Conclusion générale et Perspectives.....	61
Bibliographie.....	63

Annexe A: Equations du cycle d'hystérésis

A.1 L'équation de la densité du champ magnétique B.....	64
A.2 L'équation de l'intensité du champ magnétique H.....	65
A.3 Application.....	66

Annexe B: Norme IEEE 519 1992

B.1 Niveaux de perturbations.....	67
B.2. Norme IEEE 519 1992.....	67

Annexe C: Caractéristiques de filtrage des harmoniques

C.1 Propriétés du filtrage du transformateur monophasé.....	69
C.1.1 filtrage des harmoniques pour une alimentation sinusoïdale du transformateur monophasé et charge non linéaire.....	69
C.1.2 filtrage des harmoniques lors du saturation du transformateur.....	69
C.2 Propriétés du filtrage du transformateur triphasé.....	70



Introduction Générale



Introduction générale

Les transformateurs sont des appareils électriques largement utilisés dans l'industrie de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique, ainsi que dans beaucoup d'autres secteurs fonctionnant avec l'énergie électrique. Le transformateur industriel a été inventé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883 et qu'il a eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique [1]. Un transformateur est un appareil électrique ayant au moins deux enroulements bobinés sur un même noyau magnétique [2].

En raison de l'évolution technologique importante où il est impliqué une utilisation accrue des dispositifs d'électronique de puissance moderne dans diverses applications, comme la commande électrique des moteurs, les alimentations à secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées la traction électrique, la compensation des harmoniques, etc. Cette multiplication de charges non linéaires, tel que les redresseurs à arc, contrôle de phase électronique, cyclo-convertisseurs, les alimentations à découpage, largeur d'impulsion modulée lecteurs, etc... entraînent une dégradation significative de la qualité de l'énergie [3].

Le transformateur conçu pour fonctionner à la fréquence nominale et alimenter des charges linéaires qui sont progressivement remplacés avec des charges non-linéaires qui injectent des courants harmoniques. Ces courants harmoniques vont augmenter les pertes, les pertes de chauffage supplémentaires, plus courte durée de vie de l'isolation, plus de contraintes de la température et de l'isolation qui réduisent le facteur de puissance, la productivité, l'efficacité, la capacité et le manque de performance du système. [4].

Le principal effet de courants harmoniques sur les transformateurs est la chaleur supplémentaire générée par les pertes causées par les harmoniques alimentant les charges non linéaires. Il existe trois effets qui se traduisent par une augmentation du chauffage du transformateur lorsque le courant de charge comprend des composantes harmoniques.

1. courant efficace : Si le transformateur est dimensionné seulement pour les exigences de la charge nominale, des courants harmoniques peuvent entraîner le courant efficace du transformateur d'être supérieur à sa capacité.
2. Les pertes par courants de Foucault: Ces courants sont induits dans un transformateur causé par les flux magnétiques.

3. Pertes du noyau (fer) : L'augmentation des pertes dans le noyau non linéaires dans la présence d'harmoniques seront dépendants sous l'effet des harmoniques sur la tension appliquée et la conception du noyau de transformateur [4,5].

Ces conditions nécessitent toujours de diagnostiquer les problèmes provoquant de l'apparition des harmoniques.

Dans ce mémoire on a traité le comportement du transformateur en se basant sur la signature du courant vis-à-vis à la non-linéarité de la charge du transformateur, du transformateur lui-même (transformateur saturé) et de l'alimentation du transformateur (alimentation non sinusoïdale. Le problème de filtrage du courant est aussi analysé a pour but d'augmenter d'avantage l'efficacité du transformateur.


Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres:

Le chapitre I expose une présentation générale d'un transformateur de puissance, le magnétisme, les deux essais pour l'estimation de ses paramètres et les modèles du transformateur.

Le chapitre II est consacré à une généralité sur les harmoniques, causes, effets ainsi que les normes des limitations des harmoniques

Le chapitre III est dédié particulièrement aux moyens et les solutions pour la réduction des effets d'harmoniques

Le Chapitre IV est consacré à la présentation des résultats expérimentaux et de simulation réalisées pour connaître le comportement du transformateur de puissance vis-à-vis une charge non linéaire, alimentation non sinusoïdale et le problème de saturation.



Chapitre I: Considérations fondamentales sur les transformateurs

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Circuit Magnétique.....	4
I.4 Equations Magnétiques.....	5
I.4.1 Loi d'Hopkinson.....	5
I.4.2 Loi de Lenz.....	6
I.5 Transformateur.....	6
I.5.1 Constitution des transformateurs monophasés.....	7
I.5.2 Principe de fonctionnement.....	7
I.5.3 Symbole d'un transformateur.....	8
I.5.4 Rapport de transformation dans le cas idéal.....	8
I.6 Transformateur triphasé.....	9
I.6.1 Forme des noyaux des transformateurs triphasés.....	9
I.6.2 couplage des enroulements de transformateur.....	10
I.7 Modélisation des transformateurs.....	11
I.7.1 Transformateur monophasé linéaire sans saturation.....	12
I.7.2. Transformateur monophasé avec saturation.....	13
I.7.3. Transformateur monophasé avec saturation et perte fer.....	13
I.8. Essais sur transformateur.....	14
I.8.1. Essai à vide.....	14
I.8.2 Essai en court-circuit.....	14
I.9 Bilan d'énergie.....	15
I.10 Conclusion.....	16



I.1 Introduction

Le réseau électrique est constitué de plusieurs composants pour assurer une bonne transmission de l'énergie vers différents utilisateurs. Parmi ces composants, on trouve le transformateur. Ce dernier doit être dimensionné selon le besoin et selon les évènements rencontrés.

Le transformateur sera créé pour fonctionner à une tension, courant et une fréquence bien définie. Si la fréquence est augmentée, la condition du transformateur sera changée.

Ce chapitre est consacré à une présentation générale d'un transformateur de puissance. Après une brève historique sur les transformateurs de puissance, on donne quelques notions de base sur le magnétisme, le principe, la construction et la modélisation des transformateurs. Pour obtenir les paramètres du transformateur on décrit brièvement les deux essais à vide et en court-circuit. Par ailleurs, nous présenterons le bilan énergétique du transformateur

I.2 Historique

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur véhiculant un courant générait un champ magnétique. Quelques années plus tard, en 1830, Josef Henry donna corps aux notions d'induction et de self-induction. Entre les mois d'août et de novembre 1831 l'anglais Michael Faraday procéda à une série d'expériences avec un appareil constitué d'un anneau de fer et d'enroulements de fil de cuivre isolé.

En 1882 Lucien Gaulard (1850-1888), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la Société Française des Electriciens un "générateur secondaire", dénommé depuis transformateur. Devant le scepticisme de ses compatriotes, il s'adresse à l'anglais Gibbs et démontre le bien-fondé de son invention à Londres [6].

En 1883, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2000 Volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres.

En 1884 Lucien Gaulard met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2000 Volts et allant de Turin à Lanzo et retour (80 km). On finit alors par admettre l'intérêt du transformateur qui permet d'élever la tension délivrée par un alternateur et facilite ainsi le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension. La reconnaissance de Gaulard interviendra trop tardivement.

Entre-temps, des brevets ont été pris aussi par d'autres. Le premier brevet de Gaulard en 1882 n'a même pas été délivré en son temps, sous prétexte que l'inventeur prétendait pouvoir faire "quelque chose de rien" ! [7]

Gaulard attaque, perd ses procès, est ruiné, et finit ses jours dans un asile d'aliénés. Le transformateur de Gaulard de 1886 n'a pas grand-chose à envier aux transformateurs actuels, son circuit magnétique fermé (le prototype de 1884 comportait un circuit magnétique ouvert, d'où un bien médiocre rendement) est constitué d'une multitude de fils de fer annonçant le circuit feuilleté à tôles isolées [6,7].

Ainsi, en 1885, les Hongrois Károly Zipernowsky, Miksa Déry et Otto Titus Blàthy mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest [6,7].

Dans le même temps aux USA, W. Stanley développe également des transformateurs. Actuellement les transformateurs sont très développés soit du côté de construction soit de conception (750/400 kV, 400/220 kV, 220/60 kV, 60/10 ou 30 kV, 10 ou 30kV/380 V).

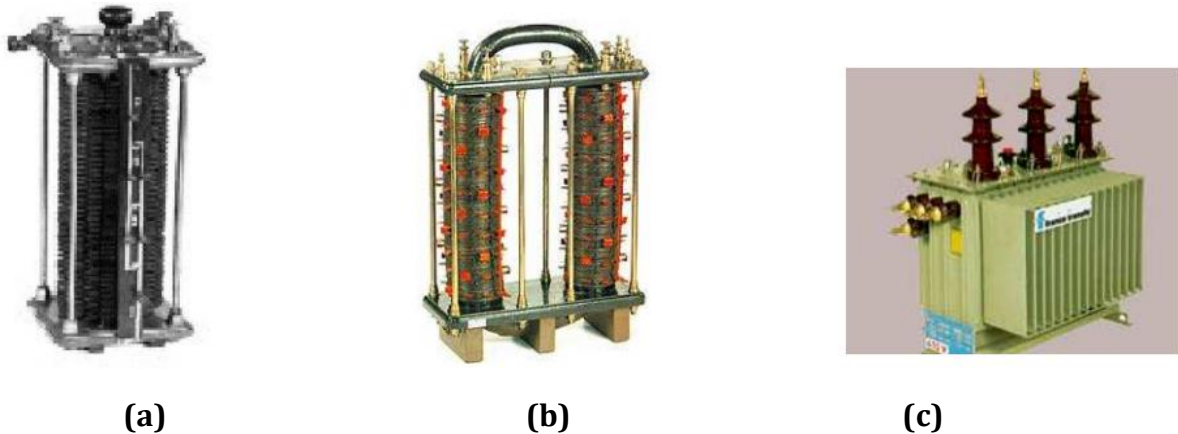


Fig.I.1 Différents types des transformateurs.

(a) Transformateur linéaire de Lucien Gaulard [6].

(b) Transformateur Lucien Gaulard (1886) à circuit magnétique fermé [6].

(c) Transformateur de distribution moderne [7].

I.3 Circuit Magnétique

Un circuit magnétique est un circuit généralement réalisé en matériau ferromagnétique au travers duquel circule un flux de champ magnétique. Le champ magnétique est généralement créé soit par des enroulements enserrant le circuit magnétique et traversés par des courants, soit par des aimants contenus dans le circuit magnétique. Le concept du circuit magnétique est de confiner le flux produit par des enroulements [7]. La figure I.2 représente un noyau magnétique.

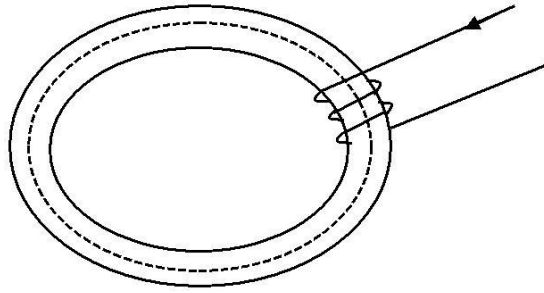


Fig.I.2. Noyau magnétique

I.4 Equations Magnétiques

Les principales formules de magnétisme sont représentées dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Grandeurs du circuit magnétique.

Nom	symbole	Equation
Force magnétomotrice (fmm)	\mathfrak{F} [A.t]	\mathfrak{F}
Intensité de champ magnétique	H [A.t/m]	$H = nI/l$
Densité de champ magnétique	B [T] [Wb/m ²]	$B = \mu H$
Perméabilité	μ [Wb/A. m]	$\mu = \mu_0 \mu_r$
Flux	ϕ [Wb]	$\phi = BS$
Flux de liaison	λ [Wbt][V.s]	$\lambda = n \phi$
Inductance	L [H]	$L = \gamma/I = n^2/\mathfrak{R} = n^2\Lambda$
Reluctance	\mathfrak{R} [A. turns/ Wb] [H ⁻¹]	$\mathfrak{R} = 1/\Lambda$
Perméance	Λ [H]	$\Lambda = \mu_0 \mu_r S/l$

μ_0 : $4\pi 10^{-7}$ Perméabilité de l'air.

μ_r : Perméabilité relative de matériau ferromagnétique (comprise entre 10^3 et 10^5).

l : Longueur du noyau.

n : Nombre de spires.

S : Section de noyau.

I.4.1 Loi d'Hopkinson

La formule d'Hopkinson est une équation d'électromagnétisme qui permet de calculer la force magnétomotrice dans un générateur électrique

$$\mathfrak{F} = nI = \mathfrak{R}\phi \quad (1.1)$$

1.4.2 Loi de Lenz

Un courant sinusoïdal dans -spires bobinées sur un matériau magnétique fermé crée un flux magnétique sinusoïdal. Dans ce cas on a :

$$\phi(t) = \frac{ni(t)}{\mathfrak{R}} \quad (1.2)$$

Une variation de flux magnétique dans une spire provoque l'apparition d'une tension (f.e.m) créant un courant dont les effets s'opposent au flux. C'est la loi de Lenz :

$$u(t) = -n \frac{d\phi}{dt} \tag{1.3}$$

Donc :

$$u(t) = \frac{n^2}{\mathfrak{R}} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \tag{1.4}$$

L: l'inductance de la bobine.

Le tableau I.2 montre une similitude entre les grandeurs magnétiques et électriques.

Tableau I.2. Analogie entre les paramètres (grandeurs) électriques et magnétiques	
Paramètres électriques	paramètres magnétiques
Intensité de champ électrique E , [v/m]	Intensité de champ magnétique H , [A.t/m]
Tension V , [V]	Force magnétomotrice ℱ , [A.t]
Courant I , [A]	Flux magnétique ϕ , [Wb]
Densité de champ électrique D , [v/m ²]	Densité de champ magnétique B , [Wb/m ²]
Résistance R , [Ω]	Reluctance ℜ , [A. turns/ Wb]
Conductivité σ , [1/ Ω.m]	Perméabilité μ , [Wb/A. m]
Loi d'ohm V=RI	Loi d'Hopkinson ℱ= nI = ℜϕ

La figure I.3 explique cette analogie entre les deux circuits magnétique et électrique.

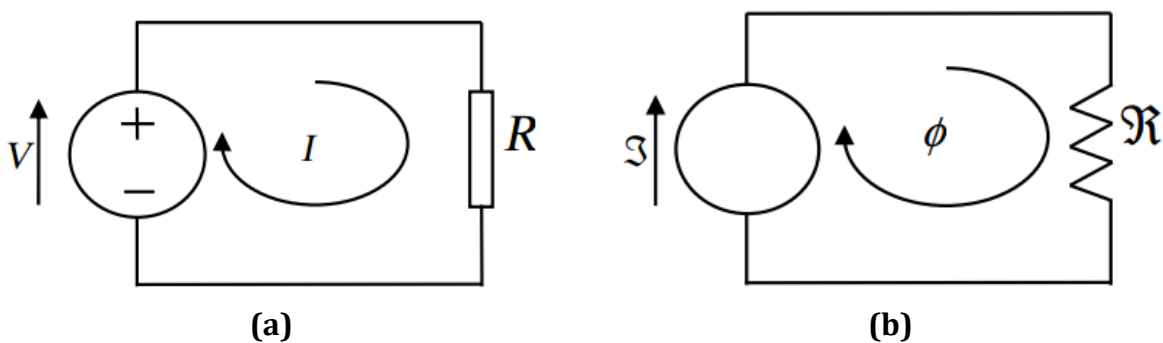


Fig I.3 Analogie entre circuit électrique (a) et circuit magnétique (b)

I.5 Transformateur

Un transformateur est une machine statique qui assure la conversion d'une tension alternative à une autre tension alternative mais de même fréquence. Il se compose d'un ou plusieurs enroulements de fil enroulés autour d'un noyau ferromagnétique commun. Habituellement, ces enroulements ne sont pas reliés électriquement. Ils sont reliés par le flux

magnétique commun confiné dans le noyau. Les transformateurs sont généralement monophasés ou triphasés [7].

I.5.1 Constitution des transformateurs monophasés

Comme montré dans la figure I.4 un transformateur monophasé est constitué :

- d'un circuit magnétique fermé (noyau). La taille du noyau dépend du niveau de la tension et du courant qui passe dans les enroulements (donc de la puissance).
- de deux circuits électriques séparés électriquement, enroulés autour du circuit magnétique. Le circuit électrique lié au générateur est appelé le circuit primaire, celui qui est lié au récepteur est appelé le circuit secondaire [7].

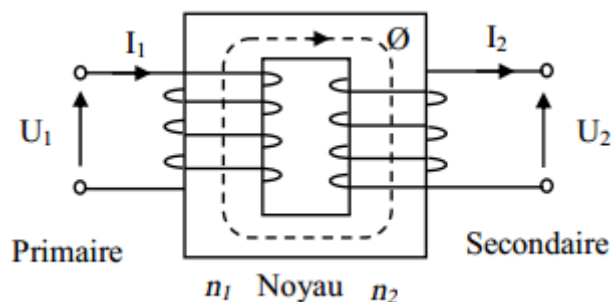


Fig.I.4. Structure d'un transformateur monophasé.

Si la tension primaire U_1 est inférieure à la tension secondaire U_2 , le transformateur est dit élévateur, dans le cas contraire il est dit abaisseur.

I.5.2 Principe de fonctionnement

L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale. Il est donc traversé par un courant sinusoïdal et donne naissance à travers le circuit magnétique à un flux sinusoïdal. Ce flux engendre alors une force électromotrice induite E_1 dans l'enroulement primaire et E_2 dans l'enroulement secondaire. Au niveau des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdale de même fréquence que celle du primaire, mais d'une amplitude différente comme il est montré dans la figure I.5.

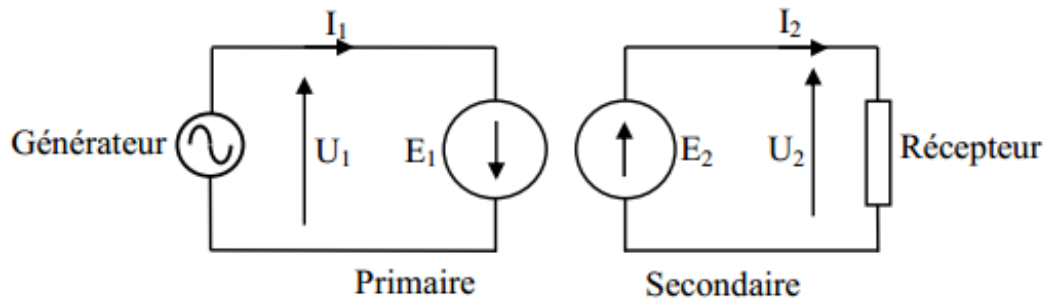


Fig.I.5 Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé.

La force électromotrice maximale au primaire et au secondaire est donnée par l'équation I.5

$$\begin{aligned} E_1 &= \pi\sqrt{2} n_1 f \phi_{\max} \\ E_2 &= \pi\sqrt{2} n_2 f \phi_{\max} \end{aligned} \tag{I.5}$$

Les lois qui régissent le fonctionnement du transformateur sont données par la loi de Lenz et la loi d'Hopkinson montrées dans les équations (I.1) et (I.2).

$$u_1(t) = - E_1 = - n_1 \frac{d\phi(t)}{dt} \tag{I.6}$$

$$u_2(t) = E_2 = n_2 \frac{d\phi(t)}{dt}$$

$$n_1 i_1 = n_2 i_2 = \mathfrak{R} \cdot \phi_m \tag{I.7}$$

I.5.3 Symbole d'un transformateur

La figure I.6 montre le symbole de transformateur

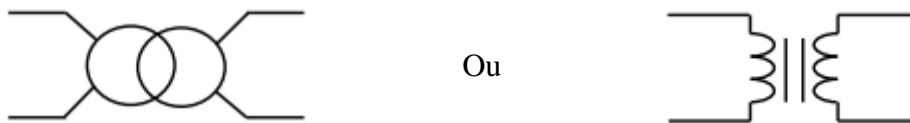


Fig.I.6. Symbole d'un transformateur.

I.5.4 Rapport de transformation dans le cas idéal

Le rapport de transformation est donné sous la forme :

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = -m \tag{I.8}$$

Si l'on remplace les valeurs temporelles de la tension par des valeurs efficaces, donc l'équation (I.8) devient :

$$\frac{U_1}{U_2} = m \quad (\text{I.9})$$

On a aussi dans le cas idéal $\mathfrak{R} = 0$ et $\phi_m = 0$

Donc l'équation (I.8) peut s'écrire comme suit :

$$n_1 i_1 = n_2 i_2 \quad 0 \Rightarrow \frac{i_2}{i_1} = -\frac{n_1}{n_2} = -m \quad (\text{I.10})$$

On remplace les grandeurs temporelles par des grandeurs efficaces, on aboutit à la relation :

$$\frac{I_2}{I_1} = m \quad (\text{I.11})$$

I.6 Transformateur triphasé

Un transformateur monophasé est destiné seulement à un système monophasé. Mais le transport ou la distribution de l'électricité se fait en triphasé. Le circuit magnétique d'un tel transformateur triphasé comporte ordinairement trois colonnes disposées dans un même plan. Chaque colonne porte un enroulement primaire et un enroulement secondaire et peut être considérée comme un transformateur monophasé. Les trois enroulements, primaires et secondaires, sont connectés en étoile, en triangle ou en zig-zag de sorte que le transformateur comporte trois bornes primaires et trois bornes secondaires seulement. [7]

1.6.1 Forme des noyaux des transformateurs triphasés

Il existe deux types d'une configuration de noyau des transformateurs: noyau cuirassé et noyau à colonne. La figure 1.7 montre différentes structures disponibles pour les transformateurs triphasés.

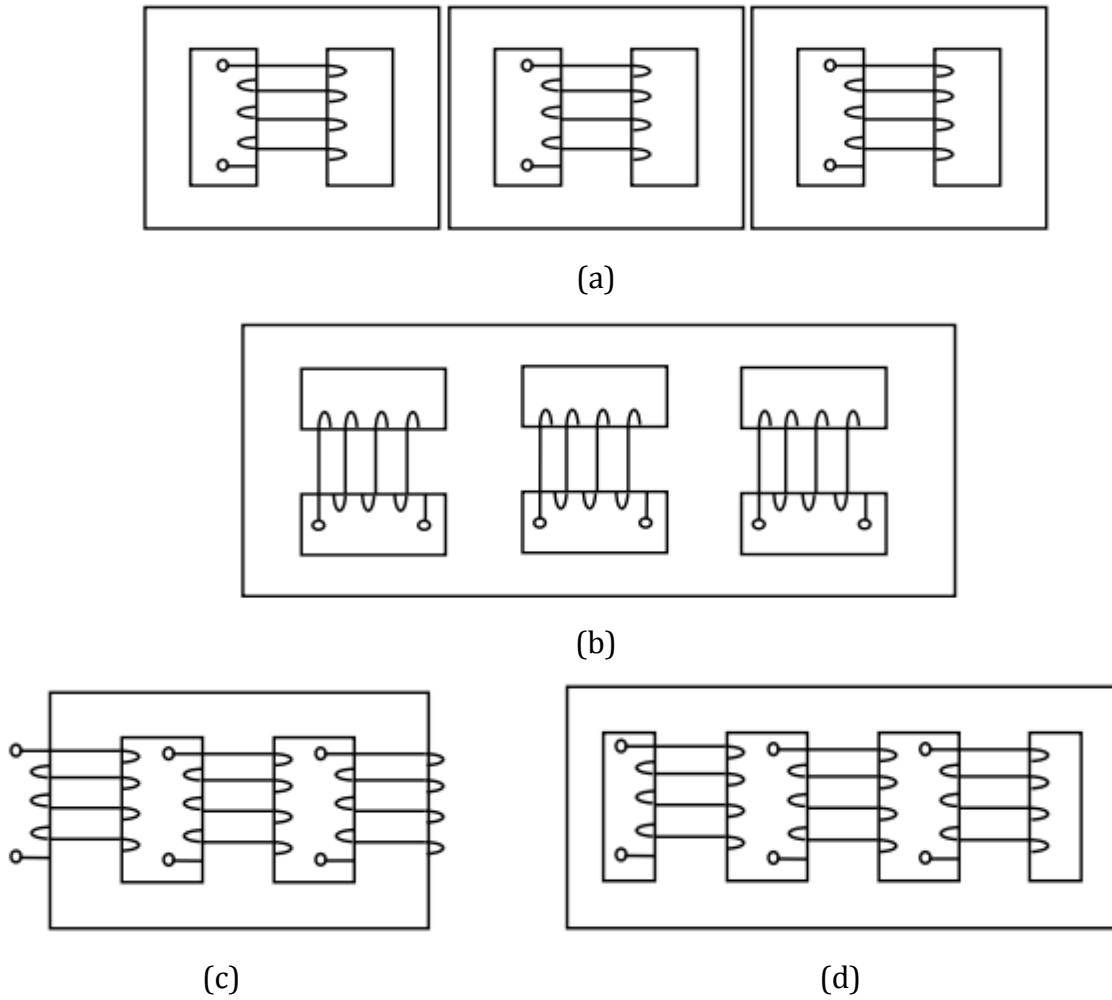


Fig.I.7 Types de noyau des transformateurs de puissance triphasés.

(a) noyau triplex, (b) noyau cuirassé. (c) noyau à trois colonnes, (d) noyau à cinq colonnes.

I.6.2 couplage des enroulements de transformateur

a) couplage étoile

Il permet la sortie du point neutre, deux tensions sont disponibles : tension simple et tension composée.

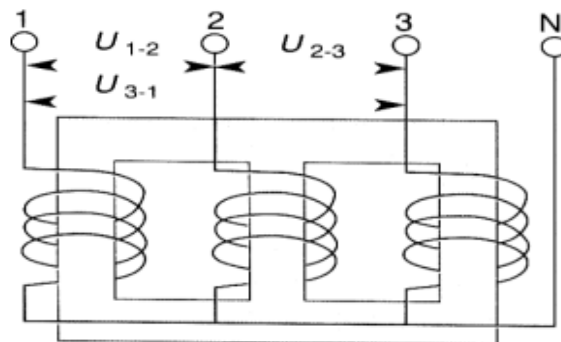


Fig.I.8 couplage étoile

b) couplage triangle

Il nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile, il n'y a pas de neutre possible.

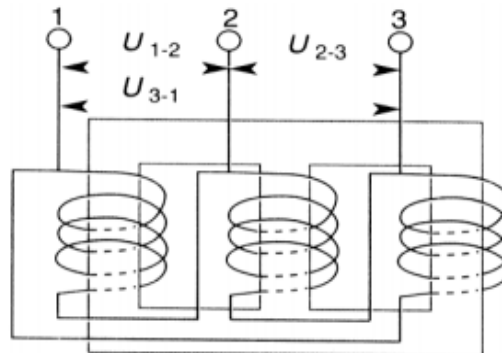


Fig.I.9 couplage triangle

c) Couplage zig-zag

Chaque enroulement comprend deux demi bobines placées sur des noyaux différents ; les sorties de la deuxième demi bobine sont inversées. Les f.é.m. de chaque demi-bobine sont déphasées de 120° .

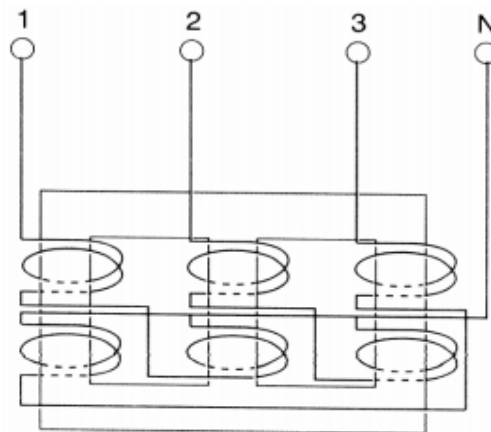


Fig.I.10 couplage zig-zag

I.7 Modélisation des transformateurs

Comme pour tout composant d'un réseau électrique, sa modélisation dépend du type de phénomène à étudier, c'est-à-dire de la gamme de fréquences concernée.

Il est connu que l'impédance des composantes inductives augmente avec la fréquence, alors que, inversement, l'impédance des composantes capacitatives diminue avec la fréquence :

$$Z_L = \omega * L$$

$$Z_C = \frac{1}{\omega * C} \quad (\text{I.12})$$

Ainsi, avec l'augmentation de la fréquence considérée, l'importance des composantes inductives s'amenuise et celle des composantes capacitives croît. Autrement dit, à basse fréquence, Z_C est très grand, le composant capacitif peut être considéré comme un circuit ouvert.[7]

I.7.1 Transformateur monophasé linéaire

Un transformateur présente un comportement non linéaire dû principalement à la caractéristique de l'inductance. Lorsque le fonctionnement du transformateur se situe dans la zone linéaire de cette caractéristique, alors la modélisation devient simple. Celle-ci se traduit par un schéma équivalent (figure I.11) où l'on représente ses impédances linéaires et son rapport de transformation m .

L'impédance linéaire est composée, pour chaque enroulement, d'une inductance modélisant le flux magnétique de fuite et d'une résistance modélisant les pertes par effet Joule. Il faut aussi ajouter une branche parallèle pour représenter l'inductance de magnétisation. On a donc le schéma classique suivant :

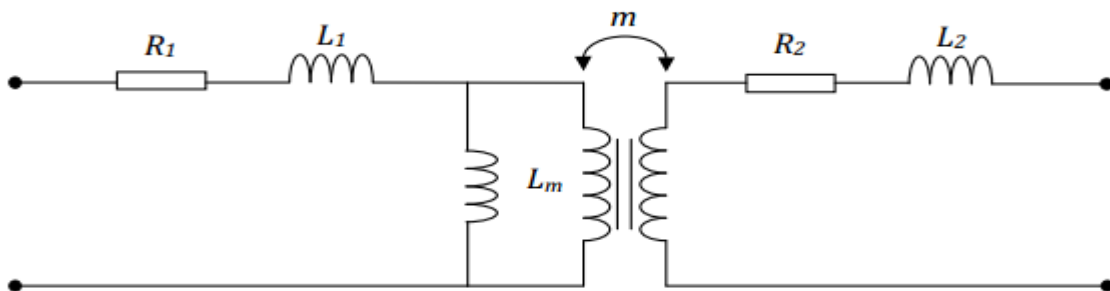


Fig.I.11 Modèle sans saturation.

Avec :

- ❖ R_1, L_1 : Résistance et inductance de l'enroulement primaire.
- ❖ R_2, L_2 : Résistance et inductance de l'enroulement secondaire.
- ❖ L_m : Inductance de magnétisation du circuit magnétique.

Il existe éventuellement des pertes à vide, nous pouvons les représenter au moyen d'une résistance R_m en parallèle (figure I.12):

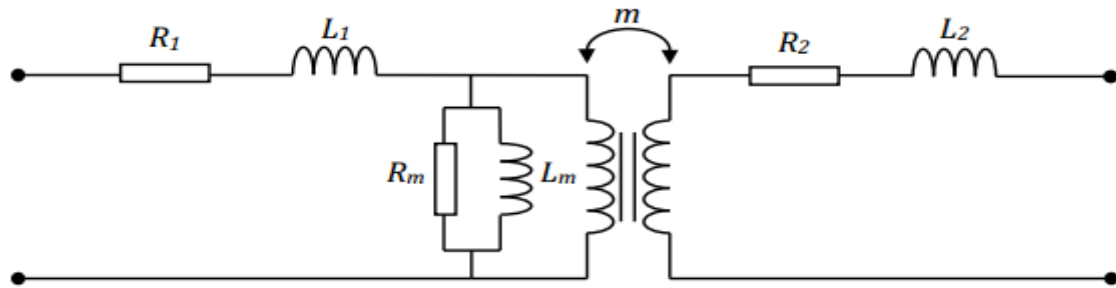


Fig.I.12 Modèle avec pertes fer, sans saturation.

❖ R_m : Résistance qui représente les pertes fer dans le circuit magnétique.

I.7.2. Transformateur monophasé avec saturation

Dans ce modèle l'inductance L_m est remplacée par une inductance non linéaire dont la caractéristique de saturation est donnée par une courbe du flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant inductif (Figure. I.13).

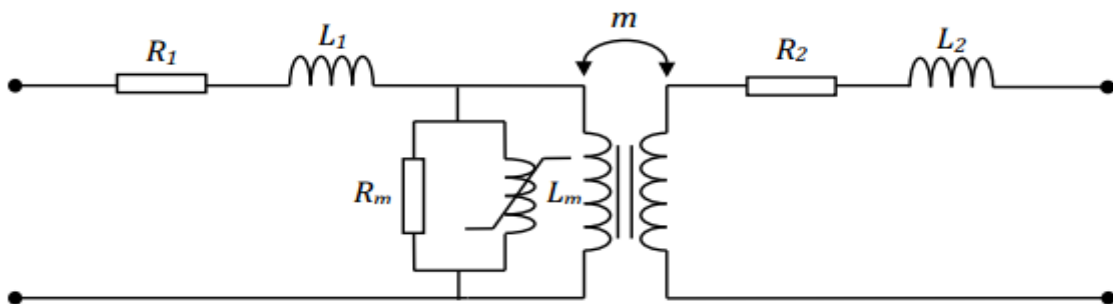


Fig.I.13 Modèle avec saturation.

I.7.3. Transformateur monophasé avec saturation et perte fer :

Dans ce modèle la résistance R_m est remplacée par une résistance non linéaire dont la caractéristique est donnée par la courbe de la tension à vide en fonction du courant magnétisant résistif (Figure I.14).

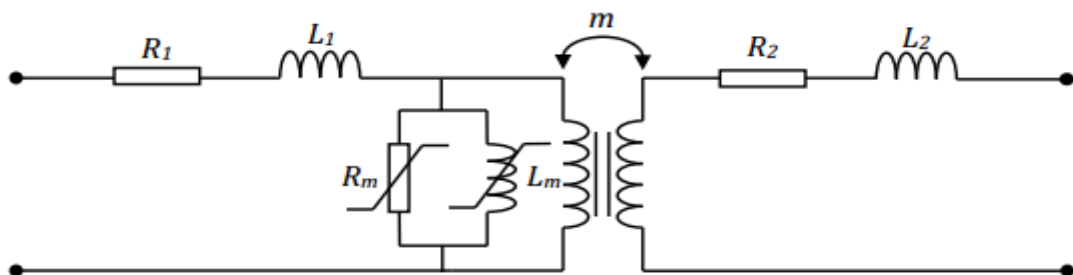


Fig.I.14 Modèle avec pertes fer, avec saturation.

I.8. Essais sur transformateur

A partir de ces essais on peut déterminer les paramètres du circuit équivalent du transformateur représenté dans la figure I.14. Il s’agit des essais suivants :

I.8.1. Essai à vide

L’essai à vide consiste à appliquer la tension nominale au primaire en gardant le secondaire à vide. La mesure du courant, de la puissance et de la tension permet la détermination des paramètres shunts du circuit équivalent. La méthode de calcul de ces paramètres et le montage de mesure utilisé sont résumés dans le tableau 1.3.

Tableau I.3. Essai à vide.

	Cas monophasé	Cas triphasé
Circuit de test		
Facteur de puissance	$\cos(\varphi_0) = \frac{P_0}{V_0 I_0}$	$\cos(\varphi_0) = \frac{P_0}{\sqrt{3} V_0 I_0}$
Résistance shunt	$R_m = \frac{V_0}{\cos(\varphi_0) I_0}$	$R_m = \frac{V_{0-phase}}{\cos(\varphi_0) I_{0-phase}}$
Réactance shunt	$X_m = \frac{V_0}{\sin(\varphi_0) I_0}$	$X_m = \frac{V_{0-phase}}{\sin(\varphi_0) I_{0-phase}}$

I.8.2 Essai en court-circuit

L’essai en court-circuit consiste à appliquer la tension réduite (valeur minimale) au primaire en gardant le secondaire en court-circuit. Puis on augmente la tension primaire jusqu’à le courant secondaire atteint sa valeur nominale. On mesure la tension, le courant et la puissance de court-circuit.

Tableau I.4. Essai en court-circuit.

	Cas monophasé	Cas triphasé
Circuit de test		
Facteur de puissance	$\cos(\varphi_{cc}) = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{cc}}$	$\cos(\varphi_{cc}) = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} I_{cc}}$
L'impédance équivalente	$R_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \cos(\varphi_{cc})$	$Z_{eq} = \frac{V_{cc-phase}}{I_{cc-phase}}, R_{eq} = \frac{V_{cc}}{3I_{cc}^2}$
Réactance série	$X_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \sin(\varphi_{cc})$	$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$

Les paramètres équivalents séries peuvent être calculés en les ramenant au côté primaire ou secondaire.

I.9 Bilan d'énergie

◆ **Puissance absorbé**

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \tag{I.13}$$

◆ **Puissance utile**

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 \tag{I.14}$$

◆ **Pertes dans transformateur**

- **Les pertes cuivre** : pertes dans les enroulements primaire et secondaire. Elles dépendent essentiellement de la valeur efficace du courant du transformateur.

On peut les mesurer en faisant un essai en court-circuit du transformateur : la puissance délivrée par le primaire se réduit alors aux pertes cuivre (car les courants sont forts).

- **les pertes fer** : pertes dans le matériau lui-même. On peut les mesurer en faisant un essai « à vide » du transformateur : la puissance délivrée au primaire se réduit alors aux pertes fer (car les courants sont faibles). Elles se décomposent en deux pertes:

→ **Pertes par hystérésis**

Ces pertes sont dues à des courants de Foucault résultant des variations locales d'induction provoquées par l'évolution de la structure magnétique (mouvement des parois essentiellement). Ces pertes seront d'autant plus importantes que la structure cristallographique comporte des impuretés qui perturbent le processus d'aimantation. On modélise souvent la puissance dissipée par ces pertes par :

$$P_{\text{hystérésis}} = K_h \cdot v_f \cdot B^S \cdot f \quad (\text{I.15})$$

→ **Pertes par courants de Foucault**

Les pertes par "courants de Foucault", sont dues à la fréquence de l'excitation. On modélise souvent la puissance dissipée par ces pertes par :

$$P_{\text{Foucault}} = K_f \cdot v_f \cdot e_f \cdot B^2 \cdot f^2 \quad (\text{I.16})$$

Dans celle-ci, les coefficients K_h et K_f dépendent des particularités de fabrication du noyau mais également de la fréquence et de la valeur de l'induction. Les coefficients v_f et e_f représentent respectivement le volume du noyau et l'épaisseur de tôles ferromagnétiques, tandis que S est l'exposant de Steinmetz (1.7 à 2). [6]

◆ **Rendement**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_{fer}} \quad (\text{I.17})$$

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné quelques généralités et notions de base sur un transformateur de puissance. Ainsi que la modélisation du transformateur sans et avec pertes fer et sans et avec saturation du circuit magnétique. Les essais à vide et en court-circuit nous permet de trouver les paramètres du transformateur dernièrement ont vu le bilan énergétique et les pertes par hystérésis qui dépend de la fréquence et les pertes par courant de Foucault qui dépend de la fréquence au carré; donc les pertes augmente avec l'apparition des harmonique une généralité sur les harmonique sera l'objet de deuxième chapitre.



Chapitre II: Généralité sur les harmoniques

II.1. Introduction.....	17
II.2 Harmoniques et inter harmoniques.....	17
II.3 Décomposition d'un signal périodique.....	17
II.4 Grandeurs caractéristiques.....	18
II.4.1 Grandeur harmonique.....	18
II.4.2 Rang de l'harmonique.....	18
II.4.3 Série de Fourier.....	18
II.4.4 Valeur efficace d'un grandeur alternative.....	19
II.4.5 Taux de distorsion.....	19
II.4.6 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	20
II.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP.....	20
II.6 Génération des harmoniques.....	22
II.6.1 Charges non linéaire.....	22
II.6.2 Transformateur.....	23
II.6.3 Machines tournantes.....	24
II.6.4 Alimentation à découpage.....	24
II.7 Effets des perturbations harmoniques.....	24
II.8 Normes et recommandations.....	26
II.9 Conclusion.....	27



II.1. Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

L'utilisation croissante des équipements de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la détérioration de la tension d'alimentation. En effet, ces charges dites déformantes sont non linéaires et appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement [8]. Dans ce deuxième chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposés. Par suite, les normes et la réglementation en vigueur seront présentées.

II.2 Harmoniques et inter harmoniques

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de fréquence fondamentale.

Les inters harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inters harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.[9]

II.3 Décomposition d'un signal périodique

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques. Les courbes de la figure II.1 nous montrent la décomposition d'un signal périodique en série de Fourier.

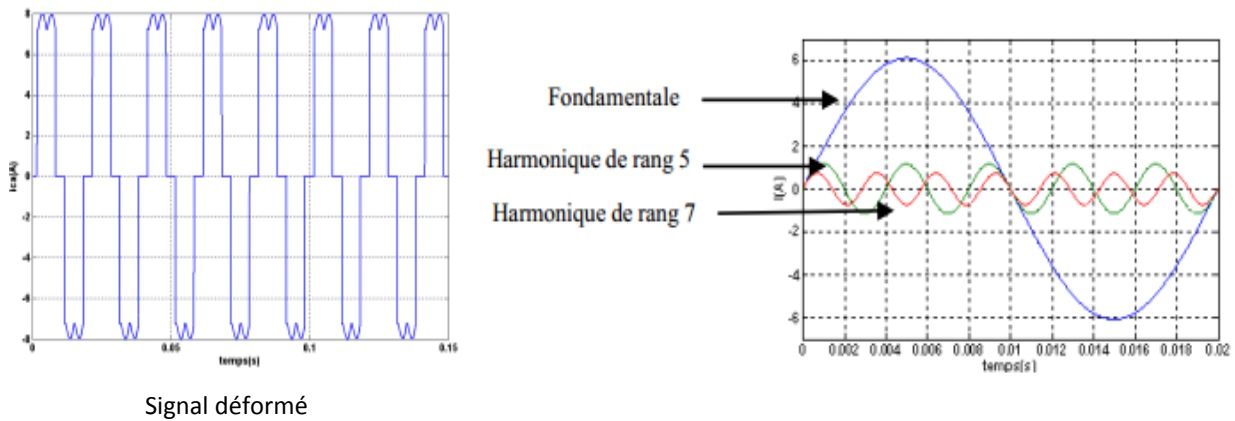


Fig.II.1 Décomposition d'un signal périodique[9]

II.4 Grandeurs caractéristiques

II.4.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [9].

II.4.2 Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{II.1})$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un [9].

II.4.3 Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signaux, périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{II.2})$$

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

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

$$\begin{aligned}
 a_n &= \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int y(t) \cdot \cos n\omega t \\
 b_n &= \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int y(t) \cdot \sin n\omega t
 \end{aligned}
 \tag{II.3}$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

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

II.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative

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

$$Y_{eff} = \sqrt{Y_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (Y_n)^2} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}
 \tag{II.4}$$

Cette définition est valable aussi bien pour les tensions que pour les courants. Il est à noter que pour une grandeur purement sinusoïdale, la valeur efficace correspond à sa valeur maximale divisée par la racine carrée de deux.[3]

II.4.5 Taux de distorsion

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (en %) de l'amplitude de l'harmonique au rang h ramenée à celle du fondamental :

$$T_{aux(n)} = 100 \cdot \frac{Y_{n,eff}}{Y_{1,eff}} (\%)
 \tag{II.5}$$

La notion la plus couramment usitée est le taux global de distorsion harmonique THD (Total Harmonic Distorsion) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique [3]. C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul (norme IEC 61000-2-2) :

$$THD = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} (\%) \quad (\text{II.6})$$

Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les harmoniques entre le rang 2 et 25.

II.4.6 Spectre d'harmonique (de fréquence)

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme (figure (II.2)) [9].

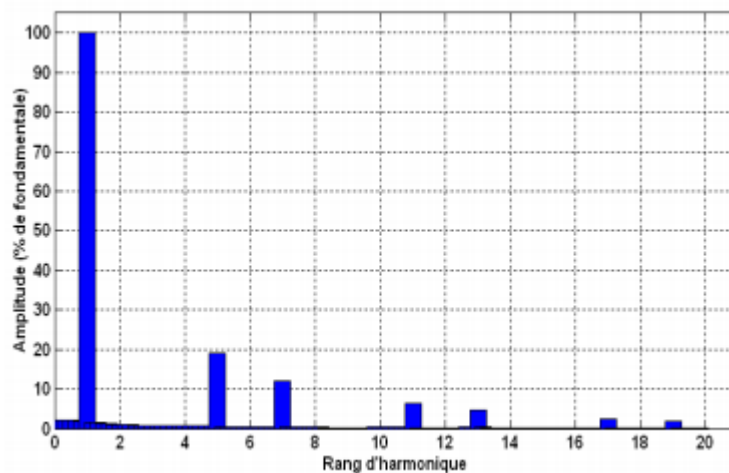


Fig.II.2 Le spectre des harmoniques d'un signal déformée

II.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

Pour une charge non linéaire, alimentée par une source de tension $v(t)$ et parcourue par un courant $i(t)$, dont les expressions s'écrivent respectivement :

$$\begin{aligned} v(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n \cdot \omega t) \\ i(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n \cdot \omega t - \varphi_n) \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

est le siège d'une puissance instantanée :

$$P(t) = m \cdot v(t) \cdot i(t) \quad \text{avec } m \text{ nombre de phase} \quad (\text{II.8})$$

Dans ce cas, le calcul de la puissance instantanée comporte des produits de fonctions sinusoïdales de fréquences différentes. Par contre, seules les composantes de même

fréquence contribuent à l'élaboration de la puissance moyenne ou puissance active P effectivement consommée et exprimée en Watt (W) :

$$P = m. \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n \quad (\text{II.9})$$

L'expression de la puissance réactive Q est définie comme la somme pondérée des réactions associées à chaque rang harmonique, à la différence de la puissance active. Elle s'exprime en Volt Ampère Réactif (VAR) :

$$Q = m. \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \sin\varphi_n \quad (\text{II.10})$$

En ce qui concerne la puissance apparente S , elle se calcule à l'aide du produit des valeurs efficaces de la tension et du courant et n'est plus la résultante de $\sqrt{P^2 + Q^2}$ comme en régime purement sinusoïdal. Son unité est le Volt Ampère (VA) :

$$S = m. V_{eff} \cdot I_{eff} = m. \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{II.11})$$

La contribution des produits des rangs harmoniques engendre une puissance déformante 'D', exprimée en Volt Ampère Déformant (VAD) et peut s'écrire sous la forme :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{II.12})$$

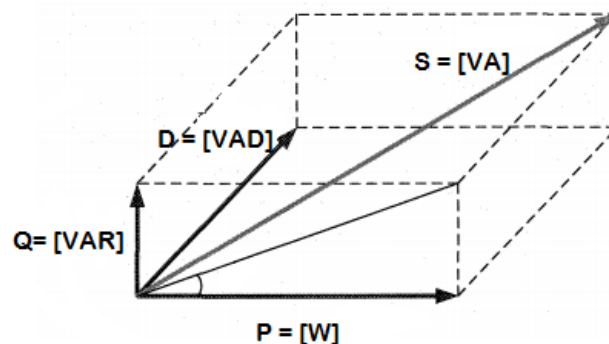


Fig.II.3. Représentation vectorielle de la puissance apparente[8]

Le facteur de puissance F_p est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente. Il caractérise le dimensionnement d'un système électrique puisqu'il représente

la puissance utile consommée par rapport à la puissance apparente au niveau de la source.

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (\text{II.13})$$

Le cas particulier, où la source de tension est considérée comme parfaitement sinusoïdale (réseau de distribution idéal) conduit à une simplification des écritures. En effet, la tension $v(t)$ s'écrit :

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t)$$

D'où les nouvelles expressions des puissances :

$$\begin{aligned} P &= m \cdot V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \\ Q &= m \cdot V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

Avec $\cos \varphi_1$ qui est le facteur de déplacement fondamental à la source. En ce qui concerne le facteur de puissance il devient :

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (\text{II.15})$$

Ce qui peut s'écrire aussi sous la forme :

$$Fp = F_{dis} \cdot \cos \varphi_1 = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (\text{II.16})$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

II.6 Génération des harmoniques

Les principales causes de distorsion harmonique dans le système d'alimentation sont les suivants:

II.6.1 Charges non linéaire

Les charges non linéaires représentent de nombreux équipements industriels et domestiques et se répartissent dans de nombreux secteurs industriels. Ces appareils possèdent en entrée un système de conversion d'énergie sous une forme donnée en une autre

forme en adéquation avec l'utilisation voulue.[3] C'est des convertisseurs statiques qui sont mis en œuvre et qui peuvent être répertoriée en quatre familles:

- Convertisseurs AC-DC, cela représente l'ensemble des redresseurs,
- Convertisseurs DC-DC, hacheurs et alimentations à découpage,
- Convertisseurs DC-AC, onduleurs de tension ou de courant,
- Convertisseurs AC-AC, gradateurs, convertisseurs de fréquences.

Ces dispositifs polluants sont classées en fonction des puissances et donc du niveau de perturbations qu'ils entraînent. Ainsi, les charges industrielles arrivent logiquement en première position et il est possible de recenser les applications suivantes :

- ❖ Systèmes utilisant des redresseurs à diodes ou à thyristors tels que les variateurs des moteurs électriques (à courant continu, asynchrones, synchrones), les fours à induction, les chargeurs de batterie, les électrolyseurs, les alimentations de secours,...
- ❖ Les récepteurs utilisant l'arc électrique : fours à arc ou soudure à arc,
- ❖ Les variateurs de lumières à base de gradateurs,
- ❖ Les ballasts électroniques : lampes fluorescentes, à décharge ou à vapeur métallique (sodium, mercure),

Pour les charges électrodomestiques les plus couramment rencontrées sont :

- ❖ Téléviseurs et éléments périphériques,
- ❖ Micro-informatique,
- ❖ Four à micro-ondes,
- ❖ Aspirateurs,
- ❖ Robots ménagers.
- ❖ ...

II.6.2 Transformateur

Le circuit magnétique dans les transformateurs et les machines tournantes fonctionnant dans des conditions variables de saturation est une source de produire des harmoniques du réseau électrique. Généralement un transformateur de courant magnétisant contient petite 3ème, 5ème et 7ème composantes harmoniques. Normalement transformateurs sont conçus pour fonctionner au point de coude de saturation, mais dans des conditions de saturation magnétique le contenu harmonique du courant magnétisant peut augmenter de façon

spectaculaire. Équipements contenant des réacteurs saturables, qui exploitent délibérément le phénomène de saturation magnétique, sera donc probablement filtrage des harmoniques. Flux résiduel dans le noyau du transformateur peut persister pendant de longues durées, et en déplaçant la courbe B-H peut entraîner l'asymétrie de magnétisation et même harmoniques dans le courant de magnétisation.[4]

II.6.3 Machines tournantes

Les machines tournantes sont également considérés comme une source d'harmoniques dans le réseau de système d'alimentation parce que généralement leurs enroulements sont intégrés qui ne sont pas parfaitement sinusoïdale distribué et FMM est déformé. Ce problème est présent presque dans toutes sorte de machines tournantes. Moteur asynchrone se comporte comme une charge non linéaire et est largement utilisé dans l'industrie avec l'application de petite à grande échelle.[4]

II.6.4 Alimentation à découpage

Très répandues (micro-ordinateurs, TV, électroménager,...), elles utilisent en circuit d'entrée un pont de diodes suivi d'un condensateur de filtrage qui génère des courants harmoniques importants. [10]

II.7 Effets des perturbations harmoniques


De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements et donc des pertes supplémentaires aussi bien en courant qu'en tension, ainsi qu'un étalement spectral provoquant des vibrations et des fatigues mécaniques.

Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types [3] :

Les effets instantanés ou à court terme :

- dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ...),
- pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation,...),

- vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques,
- vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques,
- Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie,
- déclenchement intempestif des circuits de protection,
- Effets de papillotement (flicker) au niveau des éclairages et des affichages des appareils électroniques.

 **Les effets à long terme :**

- vieillissement prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor,
- échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipement entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements,
- surchauffe du neutre. Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire[3]. En effet, les courants homopolaires des harmoniques de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble neutre.
- échauffements supplémentaires condensateurs par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage,
- surcharge des condensateur ($\cos\varphi$); en présence d'une charge non linéaire.
l'impédance du condensateur diminue en fonction de l'augmentation de la fréquence. Il est donc probable que le condensateur supporte de très forts courants harmoniques et des dégâts peuvent en résulter s'ils n'ont pas été conçus pour les supporter. [11].
- pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique qui sont décroît en fonction de l'augmentation de la fréquence.
- fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatoires,
- distorsion de la tension; Lorsqu'un courant harmonique est produit à partir de l'alimentation, il crée une chute de tension harmonique proportionnelle à l'impédance

de la source au point de branchement et au courant. Comme le réseau d'alimentation est généralement inductif, son impédance augmentera en fonction de la fréquence. La tension est déformée à cause des courants harmoniques produits par les autres utilisateurs et à cause des distorsions inhérentes au niveau des transformateurs. [11]

→ risque d'excitation de résonance : Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peuvent entraîner des destructions. [4]

II.8 Normes et recommandations

De nombreux organismes nationaux et internationaux imposent des limites sur l'injection des courants harmoniques afin d'assurer une qualité du réseau de distribution. D'autres ne précisent que les niveaux de courant des harmoniques exprimés en pourcentage du fondamental à ne pas dépasser. Les équipements électriques doivent fonctionner sans dégradation face à des phénomènes perturbateurs, en particulier ceux de basses fréquences tels que les harmoniques de tension du réseau. Pour garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant et une bonne cohabitation entre les sources "pollueuses" et les charges "polluées", l'ensemble des distributeurs et des utilisateurs est amené à respecter plusieurs normes et recommandations qui définissent les règles relatives à la Compatibilité Electromagnétique (CEM) [3]:

- au niveau international par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) ou IEC (International Electrotechnical Commission),
- au niveau européen par la CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique),
- au niveau nord Américain par le standard IEEE 519.

La CEM correspond à la capacité d'un dispositif, équipement ou système, à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables.

Il est à noter que tout appareil doit être conforme aux normes d'immunité et d'émission avant d'être mis en vente sur le marché européen et doit porter la marque CE (Communauté Européenne).

II.8.1 IEEE 519 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems – USA)

L'IEEE définit les exigences et recommandations pratiques pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Ces normes spécifient les limites de distorsion en tension que les fournisseurs doivent respecter (tableau B.1) ainsi que les limites de distorsion en courant que les usagers (tableau B.2), avec leurs charges polluantes, doivent respecter.[8] Cette norme sera utilisé dans le présent projet.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu, en premier lieu, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources, leurs conséquences et effets néfastes qui peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction de ces équipements.

Heureusement que face à cette dégradation de la qualité électrique du réseau, des experts et scientifiques ont imposé des normes d'immunité et d'émission pour non seulement protéger les consommateurs mais aussi les producteurs et distributeurs d'énergie.

Dans le prochain chapitre, nous examinerons les principaux moyens de mitigation contre les harmoniques.



Chapitre III: Moyens de mitigation contre la pollution harmonique

III.1 Introduction.....	28
III.2 Surdimensionnement du neutre.....	28
III.3 Transformateurs spéciaux.....	28
III.3.1 Transformateur de mise à la terre.....	28
III.3.2 Transformateurs déphaseurs.....	28
III.4 Filtrage d'harmoniques.....	29
III.4.1 Filtrage passif.....	30
III.4.1.1 Principe de fonctionnement.....	30
III.4.1.2 Classification des filtres passifs.....	30
III.4.2 filtrage actif.....	33
III.4.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif.....	33
III.4.2.2 Classification des filtres actifs.....	34
III.5 Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif.....	37
III.6 Conclusion.....	38



III.1 Introduction

Diverses méthodes sont employées afin de réduire la pollution harmonique sur les réseaux de distribution. Parmi ces méthodes, citons: le surdimensionnement des éléments composant le réseau, l'utilisation de transformateurs spéciaux, le filtrage passif et le filtrage actif. Les deux derniers moyens de mitigation mentionnés sont les plus répandus.

III.2 Surdimensionnement du neutre

Comme nous l'avons mentionné à la section II.7, les courants homopolaires des harmoniques s'additionnent dans le conducteur de neutre. Afin d'éviter l'usure prématurée du conducteur de neutre, il peut s'avérer avantageux de sur dimensionner ce dernier. Cette solution consiste à doubler, voire même tripler les conducteurs de neutre [8].

III.3 Transformateurs spéciaux

III.3.1 Transformateur de mise à la terre

Afin d'éviter le passage des courants harmoniques par le conducteur de neutre, l'ajout d'un transformateur de mise à la terre créant un neutre artificiel est une solution efficace. Ce type de transformateur fournit un chemin de faible impédance pour les courants harmoniques qui sont déviés dans son propre neutre. C'est donc dire, que seul le neutre du transformateur doit être en mesure de supporter ces courants.

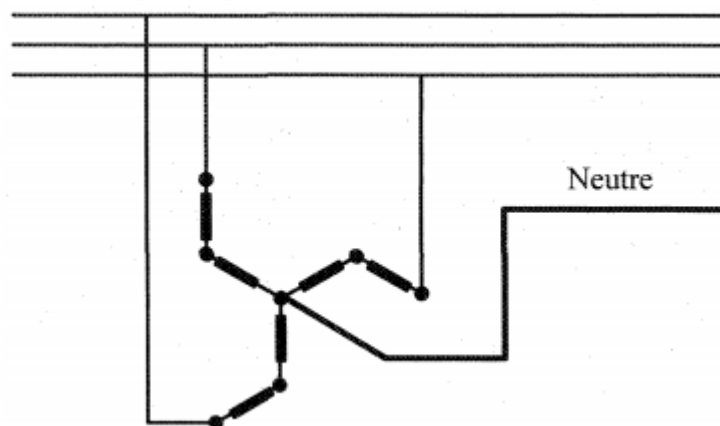


Fig.III.1 Transformateur de mise à la terre[8]

III.3.2 Transformateurs déphaseurs

Une autre solution pour la réduction des courants harmoniques est l'utilisation de transformateurs déphaseurs (figure3.2). L'utilisation du transformateur triangle-triangle et du

transformateur triangle-étoile pour alimenter les deux charges non linéaires identiques a pour effet d'éliminer les courants du 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques produits par ces charges. L'élimination de ces courants harmoniques est due au 30° de déphasage entre les connexions des deux transformateurs. Si les charges non linéaires sont identiques, les courants de 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques sont éliminés au point commun de raccordement. Dans le cas contraire, un résidu de ces courants harmoniques sera toujours présent sur le réseau. D'autres connexions de transformateurs déphaseurs peuvent être employées pour éliminer des harmoniques de rangs plus élevés.[8]

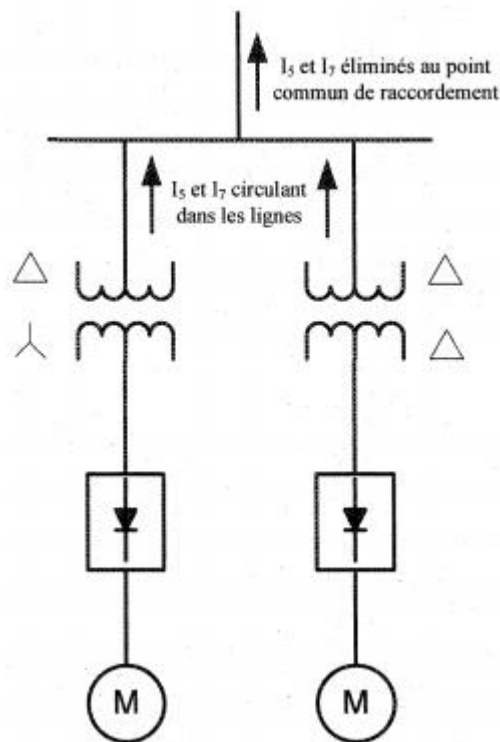


Fig.III.2 Utilisation des transformateurs déphaseurs pour éliminer 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques

III.4 Filtrage d'harmoniques

Les transformateurs déphaseurs et les transformateurs de neutre ne constituent pas les moyens les plus efficaces et usuels pour éliminer les harmoniques. En effet, ces montages ne fonctionnent que pour des charges qui sont équilibrées. La méthode la plus employée et efficace est celle du filtrage.

III.4.1 Filtrage passif

III.4.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné.

Afin de concevoir ce type de filtre, une connaissance précise des caractéristiques et du comportement du réseau sous l'effet des harmoniques est nécessaire. La figure 3.3 illustre le principe du filtrage passif.

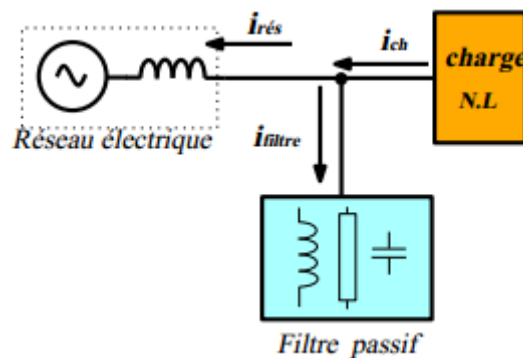


Fig.III.3 raccordement du filtre passif [3]

III.4.1.2 Classification des filtres passifs

a) Filtre résonant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure III.4, son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}{jC\omega} \quad (\text{III.1})$$

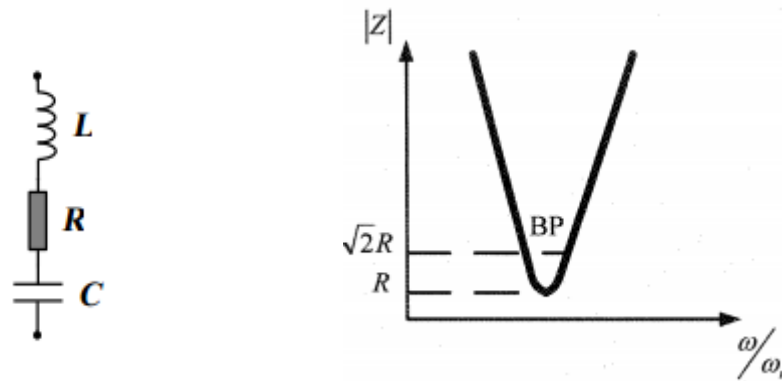


Fig.III.4 filtre passif résonant

La pulsation de résonance du filtre est:

$$\omega_r = 2\pi \cdot f_r = 1/\sqrt{LC} \quad (\text{III.2})$$

Le filtre résonant a pour caractéristique une impédance très faible à un courant harmonique de rang déterminé. Le facteur de qualité (Q) détermine la précision du réglage de l'harmonique correspondant ainsi que son efficacité à l'éliminer. Ce qui implique un facteur de qualité élevé pour ce type de filtre. Le filtre résonant fournit une partie de la puissance réactive au convertisseur par ses capacités.

L'inconvénient de ce type de filtre est la variation des éléments L et C due à leur vieillissement et à leur qualité. Ces facteurs ont pour effet de créer un désaccord de l'ensemble. l'ajout de ce type de filtre peut causer des résonances parallèles avec l'impédance du réseau. Il y a également Risque de résonance si deux filtres résonants ajustés à la même fréquence sont présents sur un même réseau.

b) Filtre amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure 3.5, Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \quad (\text{III.3})$$

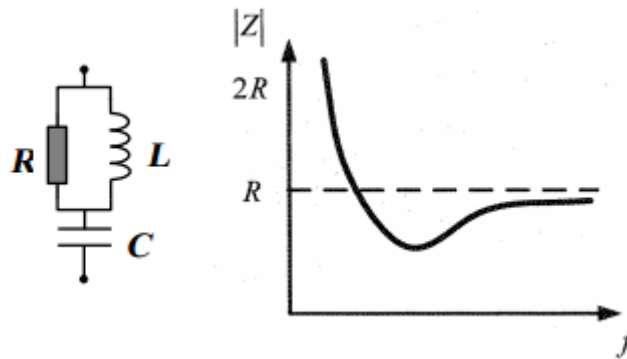


Fig.III.5 filtre passif amorti

On distingue trois types de filtre amorti

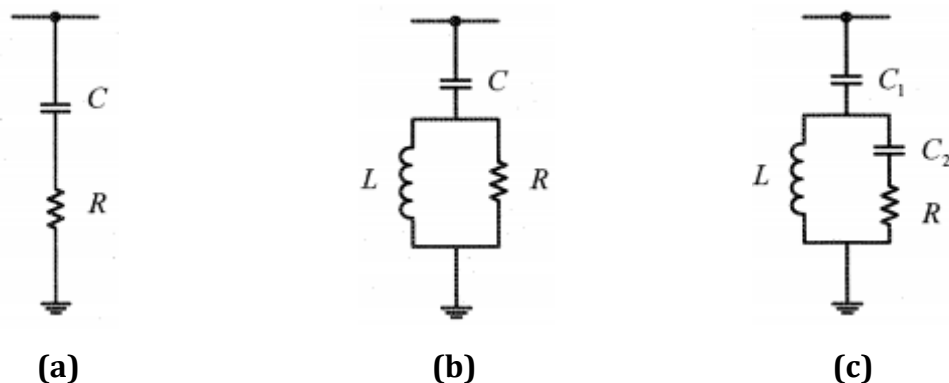


Fig.III.6 Types de filtre amorti [8]

- (a) filtre amorti de premier ordre
 (b) filtre amorti de second ordre
 (c) filtre amorti de troisième ordre

Les filtres amortis offrent plusieurs avantages:

- ❖ Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composants, etc.
- ❖ Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.
- ❖ L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable.

Les principaux désavantages du filtre amorti sont les suivant:

- ❖ Pour atteindre des performances similaires au filtre résonant, le filtre amorti doit être conçu pour un taux de puissance apparente (S) élevé, bien que dans la plupart des cas de bonnes performances peuvent être obtenues avec la limite requise pour la compensation du facteur de puissance.
- ❖ Les pertes dans la résistance sont généralement élevées.

III.4.2 filtrage actif

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatif aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance.

III.4.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs[3]. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal. Le filtre actif peut être connecté au réseau en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

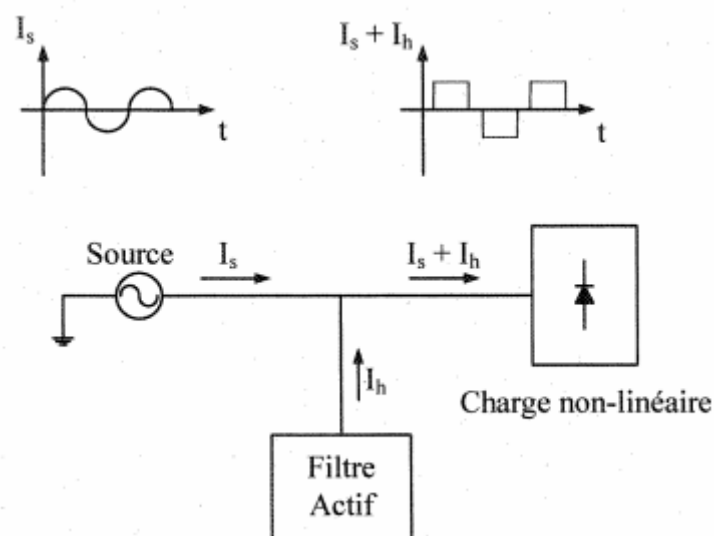


Fig. III.7 Principe de fonctionnement du filtre actif[8]

III.4.2.2 Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en série, en parallèle ou mixtes[9].

a) Filtre actif série

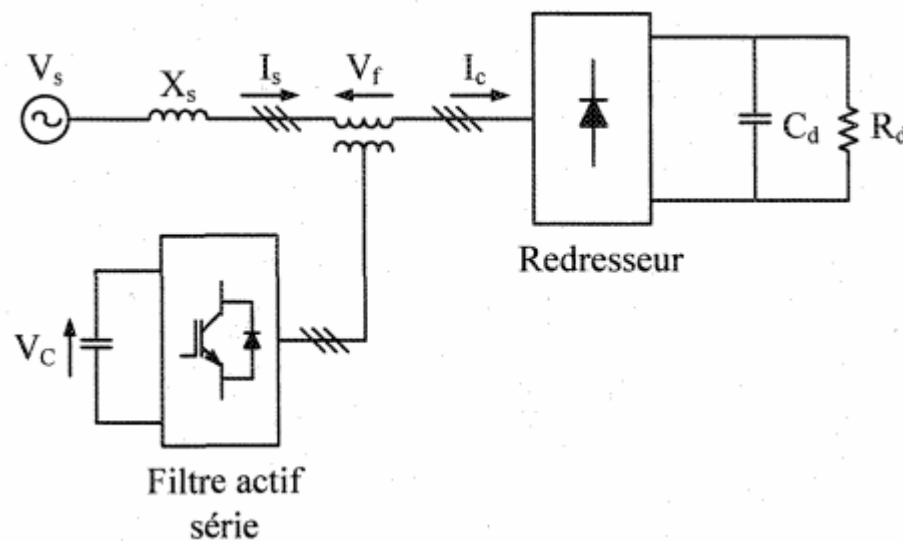


Fig.III.8 Filtre actif série

Le but du filtre actif série (FAS) est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.[3]

b) Filtre actif parallèle

Contrairement au FAS, le filtre actif parallèle (FAP) est surtout utilisé pour éliminer les courants harmoniques engendrés par les charges génératrices de courants harmoniques. Le FAP est un onduleur modulé en largeur d'impulsion (MLI) qui est placé en parallèle avec la charge dans le but d'injecter un courant harmonique de même amplitude et de phase

opposée que celui de la charge. Le FAP agit comme une source de courant harmonique réglable

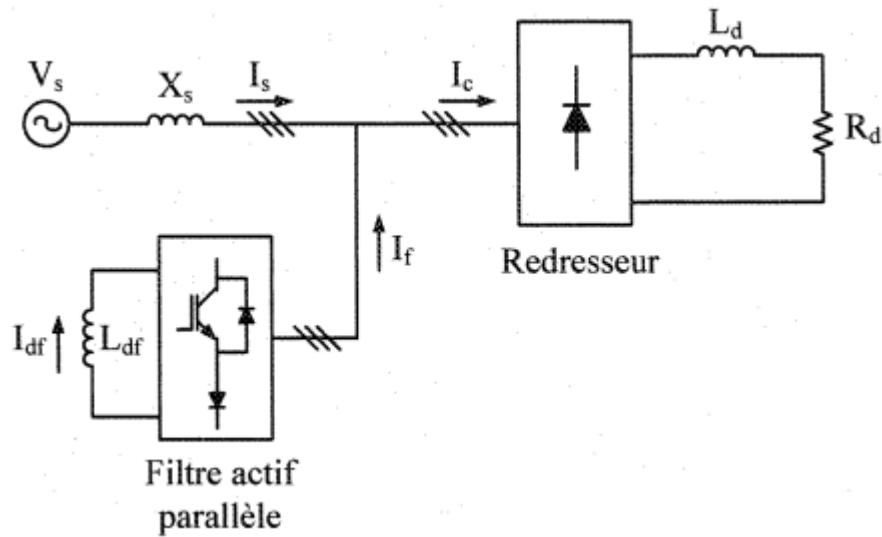


Fig.III.9 Filtre actif parallèle

c) Conditionneur universel de la qualité d'onde

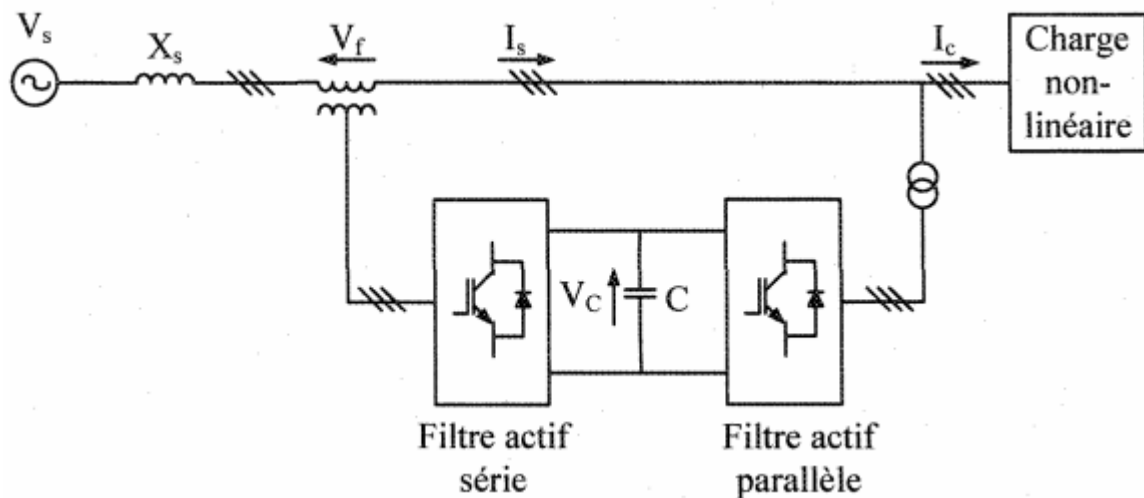


Fig.III.10 Conditionneur universel de la qualité d'onde

La combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle se nomme: conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC), de son origine anglaise, «Unified Power Quality Conditionner». Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement

de puissance. Cependant, son prix important et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques

d) Filtre hybride

Également, il y a l'association d'un filtre actif avec un filtre passif que l'on appelle filtre hybride. Le rôle du filtre actif est de maintenir et d'améliorer les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau, tandis que le filtre passif s'occupe de la compensation d'une bonne partie des harmoniques. On distingue deux type de filtre hybride.

d.1) Filtre hybride parallèle

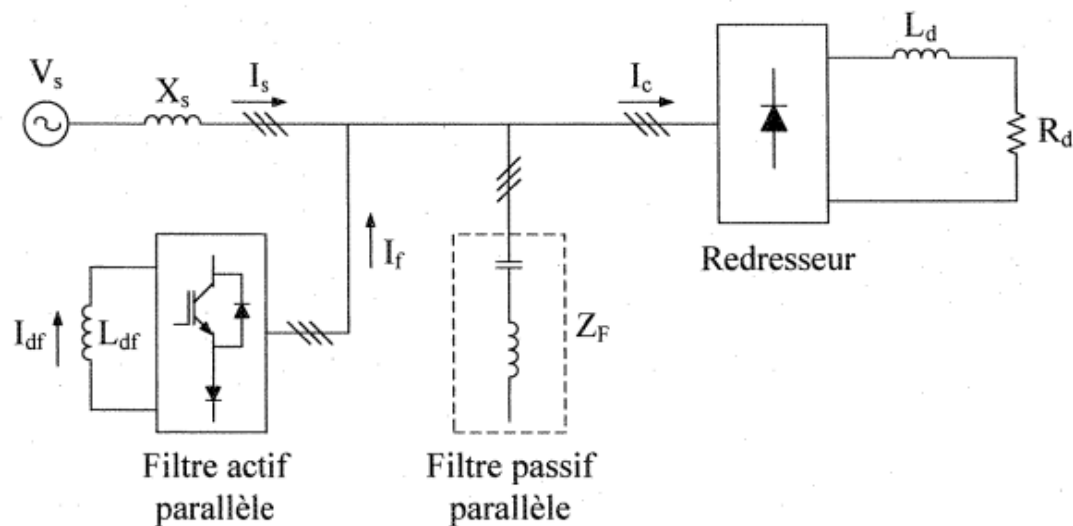


Fig.III.11 filtre hybride parallèle

Dans cette topologie, le filtre passif parallèle (FPP) est davantage approprié pour la compensation d'harmoniques de faible rang (5^{ème} et 7^{ème} rangs par exemple). Pour ce qui est du FAP, il est davantage approprié pour la compensation des harmoniques de rang élevé. En outre, le FAP peut être utilisé pour éliminer la résonance entre l'impédance de source et le FPP.

d.2) Filtre hybride série

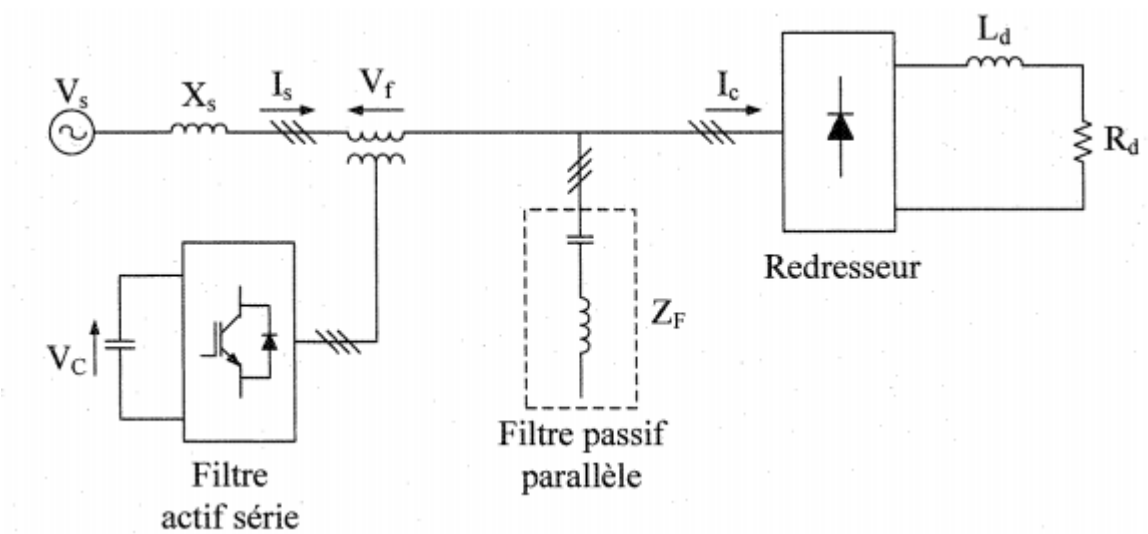


Fig.III.12: filtre hybride série

Le filtre hybride série est composé d'un FAS et d'un FPP. Le FAS est utilisé pour éliminer les problèmes (comme la résonance et l'influence de l'impédance de source) engendrés par le FPP et améliorer les performances de compensation. Le FPP a pour rôle de dévier les courants harmoniques par sa capacité de modifier localement l'impédance du réseau[3].

III.5 Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif

Le tableau ci-dessous illustre les différents avantages et inconvénients majeurs des deux types de dispositif de filtrage:

Tableau III.1 comparaison entre filtre passif et filtre actif

caractéristiques	Filtre passif	Filtre actif
Adaptation à l'évolution de la charge et du réseau	Non	Oui, se fait automatique
Limite de compensation de rang harmonique	-Le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois. -Le filtre amorti compense dans la limite de sa bande passante.	Compense dans la limite de sa bande passante qui est déterminée par la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs de son onduleur.
Risque de résonance entre le filtre et le réseau	Oui	Non
Compensation de puissance réactive	Oui	Oui, mais à coût plus élevé que pour le filtre passif.
Possibilité de surcharge lorsque le courant harmonique dépasse le dimensionnement du filtre	Oui	Non
Compensation dans les réseaux haute puissance	Oui	Oui, mais à coût très élevé

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents moyens de mitigation contre la pollution harmonique. Le surdimensionnement des éléments composant le réseau, le transformateur de mise à la terre, les transformateurs déphaseurs, le filtrage passif et le filtrage actif sont toutes des méthodes qui sont utilisées pour minimiser les harmoniques et certaines de leurs conséquences. Le filtrage passif ainsi que le filtrage actif se sont clairement démarqués dans le monde industriel lors des dernières décennies. Le dernier chapitre a été destiné pour des résultats de simulation et pratique du transformateur vis-à-vis charge non linéaire, saturation du transformateur et aussi alimentation non sinusoïdale avant d'appliquer le filtrage des courants harmoniques due aux trois cas précédents.



Chapitre IV: Simulation et résultats pratiques

IV.1 Introduction.....	39
IV.2 Caractérisation du transformateur.....	39
IV.3. Résultats de simulation du transformateur monophasé	40
IV.3.1 Alimentation sinusoïdal et Charge linéaire.....	40
IV.3.2 Alimentation sinusoïdal et Charge non linéaire.....	41
IV.3.3 Alimentation non sinusoïdal et Charge linéaire.....	42
IV.3.4 Saturation du transformateur monophasé.....	45
IV.4 Résultats de simulation du transformateur triphasé.....	46
IV.4.1 Alimentation sinusoïdale et charge linéaire.....	47
IV.4.2 Alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	48
IV.5 Résultats expérimentaux du transformateur monophasé.....	49
IV.5.1 Alimentation sinusoïdal et Charge non linéaire.....	49
IV.5.2 Alimentation non sinusoïdale et charge linéaire.....	50
IV.5.3 Saturation réel du transformateur monophasé.....	52
IV.6 filtrage des harmoniques du courant.....	55
IV.6.1 transformateur monophasé.....	55
IV.6.1.1 alimentation sinusoïdale et charge non linéaire.....	55
IV.6.1.2 saturation du transformateur monophasé.....	56
IV.6.2 transformateur triphasé.....	58
IV.7 Comparaison entre les résultats pratiques et celle de simulation.....	59
IV.8 Conclusion.....	60



IV.1 Introduction

Le transformateur de puissance est un élément indispensable dans les réseaux électriques. L'apparition des composantes de l'électronique de puissance malgré qu'il possède plusieurs avantages, a des effets néfastes sur le transformateur. Si le transformateur est saturé, des courants non sinusoïdaux apparaissent dans le circuit électrique de transformateur.

Le présent chapitre vise plusieurs objectifs. D'abord, Les paramètres du transformateur sont obtenus par deux essais (à vide et en court-circuit). En effet ces derniers sont utilisés dans la simulation et les courants ainsi que la condition de transformateur pour trois cas (alimentation sinusoïdale, saturation du transformateur et charge non linéaire) sont obtenus à partir de l'environnement MATLAB/simulink pour transformateur monophasé et triphasé. Pour les mêmes cas les résultats pratiques sont représentés pour un transformateur monophasé. Finalement on applique le filtrage des courants des transformateurs monophasé et triphasé en respectant la norme IEEE 519, et d'avoir les principaux ces effets sur le comportement de transformateur

IV.2 Caractérisation du transformateur

Le transformateur utilisé dans l'expérimental est un transformateur monophasé 500VA, 50HZ 220V/127V. Le transformateur a été fabriqué par DELORENZO.



Fig.IV.1 Image réelle du transformateur monophasé utilisé dans l'expérimental

Tableau IV.1 résultats de l'essai à vide

$V_{10}(V)$	$V_{20}(V)$	$I_{10}(A)$	$P_{10}(W)$
50	30	0.03	1
100	60	0.04	3.4
150	90	0.06	7.1
220	132	0.11	15

Tableau IV.2 résultats de l'essai en court-circuit

$V_{1cc}(V)$	$I_{1cc}(A)$	$P_{1cc}(W)$	$I_{2cc}(V)$
13	2.1	24	3.5

A partir de deux essais à vide et en court-circuit, on peut trouver les paramètres du transformateur monophasé qui sont les suivants:

- ✓ $R_m = 3226.67\Omega$
- ✓ $X_m = 2548.7\Omega$
- ✓ $R_1 = 2.8\Omega$
- ✓ $R_2 = 1.1\Omega$
- ✓ $X_1 = 1.47\Omega$
- ✓ $X_2 = 0.53\Omega$

Ces paramètres sont utilisés dans la simulation du transformateur en utilisant l'environnement MATLAB/Simulink

IV.3 Résultats de simulation du transformateur monophasé utilisant l'environnement MATLAB/Simulink

IV.3.1 Alimentation sinusoïdal et Charge linéaire

Dans cette essai le transformateur est alimenté par une tension sinusoïdale de 50HZ, ce dernier alimente une charge purement résistive ($R=100\Omega$).

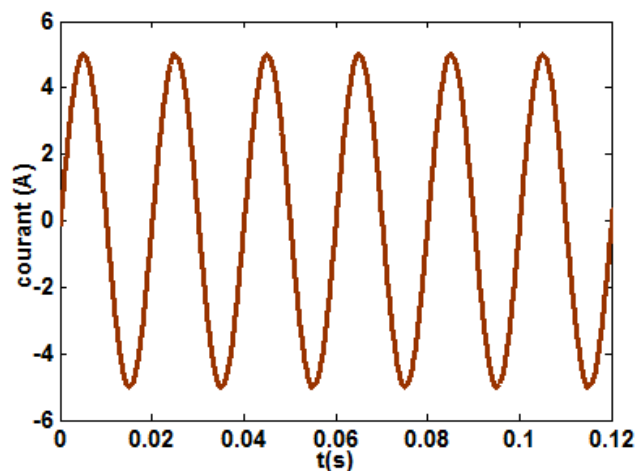


Fig.IV.2 l'allure de courant secondaire du transformateur (alimentation sinusoïdale et charge linéaire)

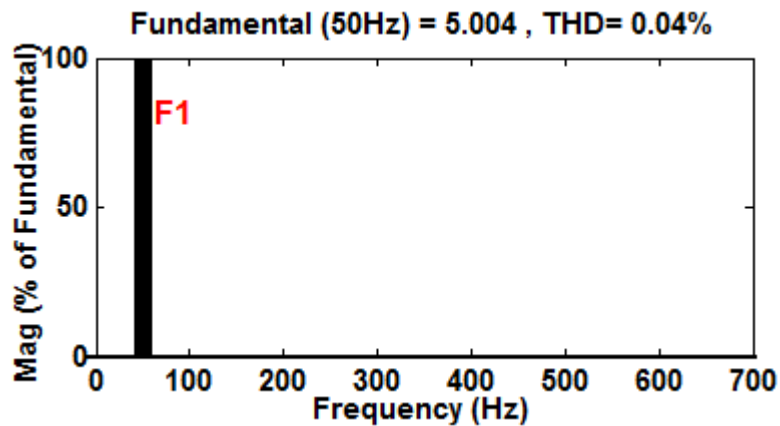


Fig.IV.3le spectre des harmoniques du courant du transformateur (alimentation sinusoïdale et charge linéaire)

Tableau IV.3condition du transformateur monophasé ; alimentation sinusoïdale et charge linéaire

V ₂	V ₁	I ₁	I ₂	P ₁	P ₂	P _{perdes}	η%	THD _i %	FP
127	207.6	1.98	3.54	449.1	410.4	8.6	91	0.04	0.999

Pour une tension d'alimentation sinusoïdale 50HZ du transformateur monophasé avec une charge linéaire, le courant de transformateur est sinusoïdale (THD_i = 0.04%) et correspond à la norme des harmoniques de courant. Dans ce cas le transformateur fonctionne dans des conditions nominales parce qu'il conçu pour fonctionner dans ce cas (Tension sinusoïdale 50HZ et une charge linéaire).

IV.3.2 Alimentation sinusoïdal et Charge non linéaire

Pour ce mode on alimente le transformateur par une tension sinusoïdale de 50HZ et la charge est un pont redresseur monophasé avec une charge inductive (R=100Ω et L=1.4H). L'allure du courant est comme suivant:

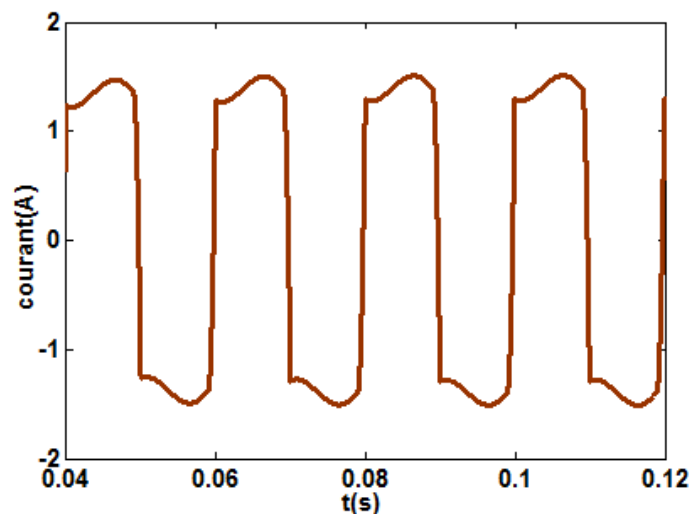


Fig.IV.4 l'allure du courant primaire du transformateur (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)

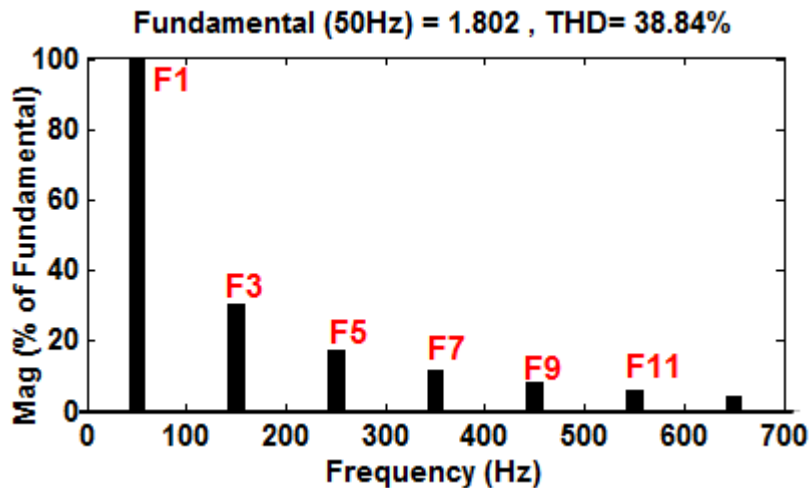


Fig.IV.5 le spectre des harmoniques du courant du transformateur (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)

Tableau IV.4. condition du transformateur monophasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire

V ₂	V ₁	I ₁	I ₂	P ₁	P ₂	P _{pertes}	η%	Thd _i %	FP
127	208.6	1.8	3.26	371.6	339.5	32.1	91	38.84	0.90

Malgré la tension d'alimentation est sinusoïdale de 50HZ, le courant de transformateur est ne plus sinusoïdale en présence de la charge non linéaire.

La distorsion globale de courant de transformateur monophasé est: $THD_i = 38.84\%$, ce courant dépasse les limites de distorsion des courant suivant la norme utilisé ($38.84\% > 5\%$). Le facteur de puissance du transformateur est diminué à cause de l'existence de la puissance déformante. Ainsi que les pertes augmentent par rapport le cas précédent car aux pertes fer augmente avec la fréquence et les pertes par effet joule dépend de la valeur efficace du courant qu'elle décompose dans ce cas du courant fondamental avec des courants des harmoniques.

IV.3.3 Alimentation non sinusoïdal et Charge linéaire

Pour ce cas, la charge du transformateur est linéaire (résistive pure), la tension non sinusoïdale représente tout pollution peut avoir sur la tension d'alimentation tel que les creux de tension, les surtensions et les coupures brèves...

La tension utilisée est un créneau de 50HZ fournie par un hacheur abaisseur (Buck), le hacheur est alimenté par une tension continue de 60V, le rapport cyclique vaut 1/2.

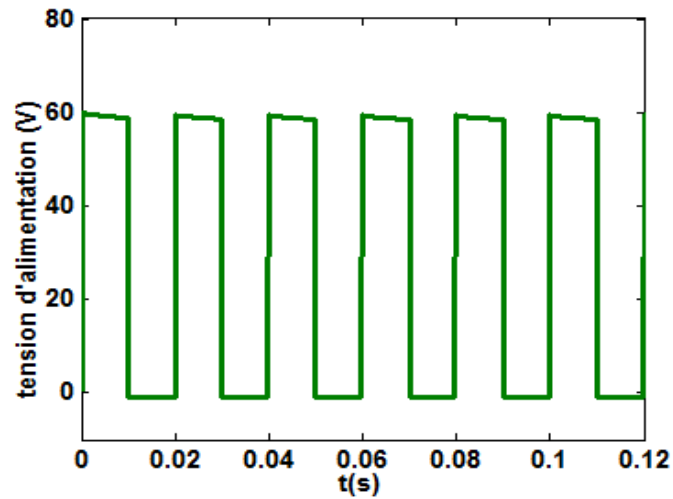


Fig.IV.6 l'allure de la tension d'alimentation du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

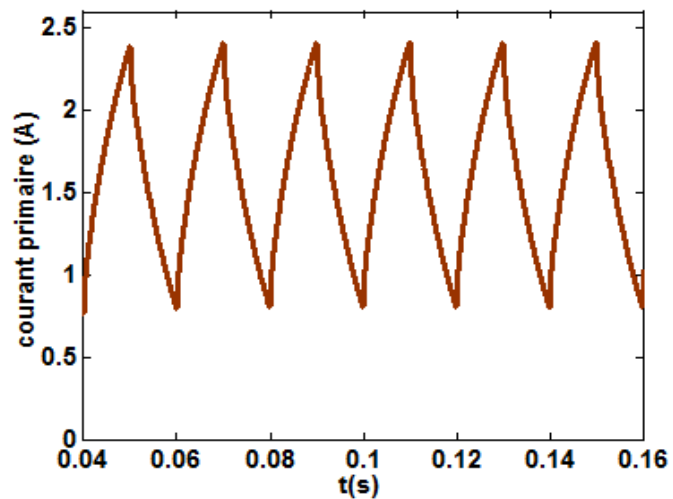


Fig.IV.7 l'allure du courant primaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

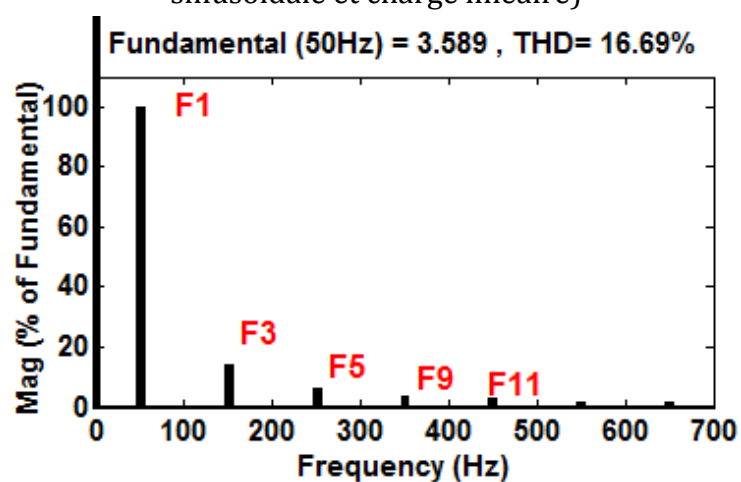


Fig.IV.8 le spectre des harmoniques du courant primaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

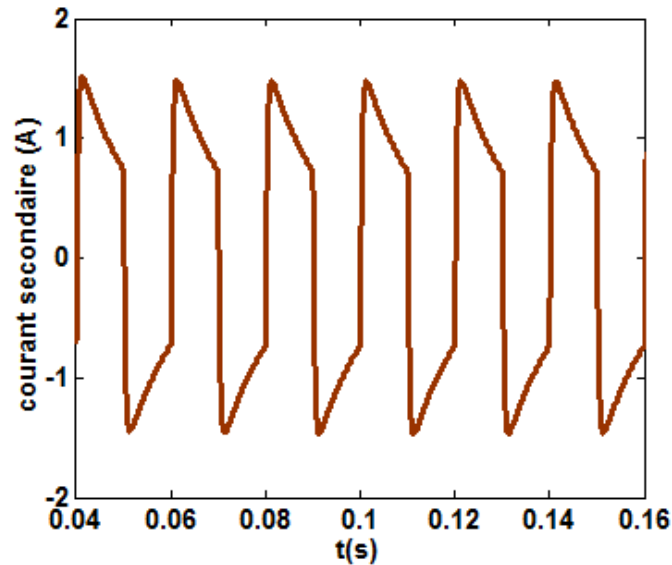


Fig.IV.9 l'allure du courant secondaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

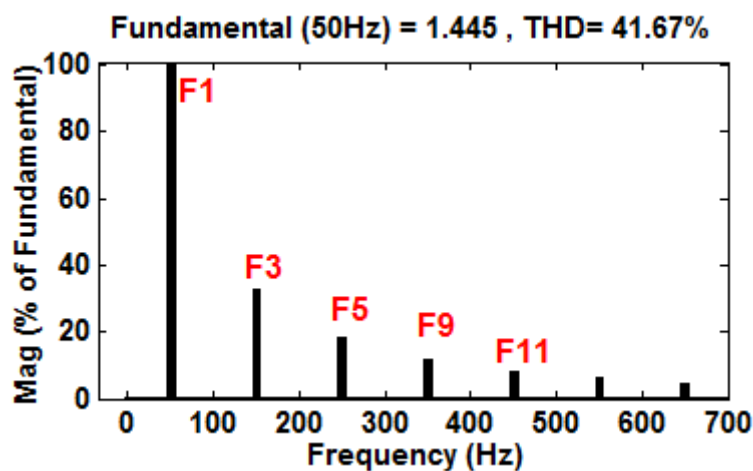


Fig.IV.10 le spectre des harmoniques du courant secondaire du transformateur monophasé (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

Tableau IV.5. condition du transformateur monophasé; alimentation non sinusoïdale et charge linéaire

V ₂	V ₁	I ₁	I ₂	P ₁	P ₂	P _{pertes}	η%	Thd _i	Thd _v	FP
11.07	41.73	1.44	1.107	29.74	10.44	19.3	35	41.67	49.71	0.06672

Le spectre des harmoniques du courant du transformateur monophasé, pour une charge linéaire et de tension d'alimentation de 50HZ mais non sinusoïdale, indique que le $THD_i = 41.67\%$ due cette fois à l'alimentation non sinusoïdale. Le facteur de puissance est très faible puisque à l'augmentation de puissance déformante. Même pour le rendement qu'il est $\eta = 35\%$ due à l'augmentation des pertes avec la fréquence et aussi la conversion de l'énergie du primaire vers le secondaire est faible lorsque l'alimentation est non sinusoïdale.

IV.3.4 Saturation du transformateur monophasé

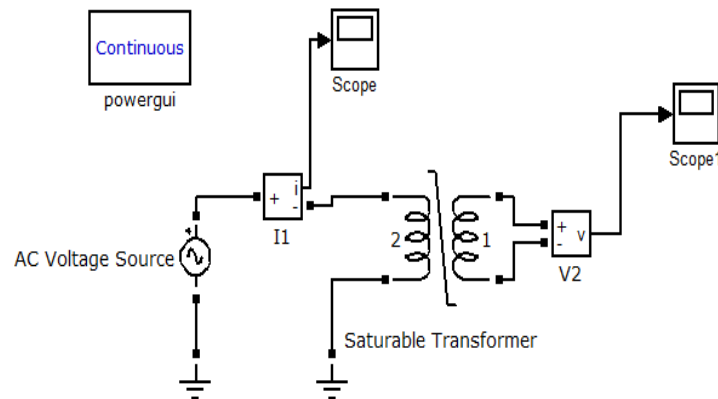


Fig.IV.11 le schéma de simulation du transformateur lors de la saturation

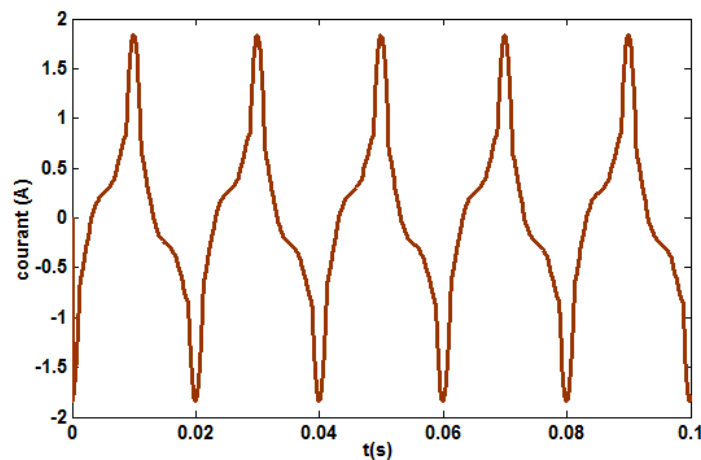


Fig.IV.12 l'allure de courant primaire lors le transformateur monophasé en saturation

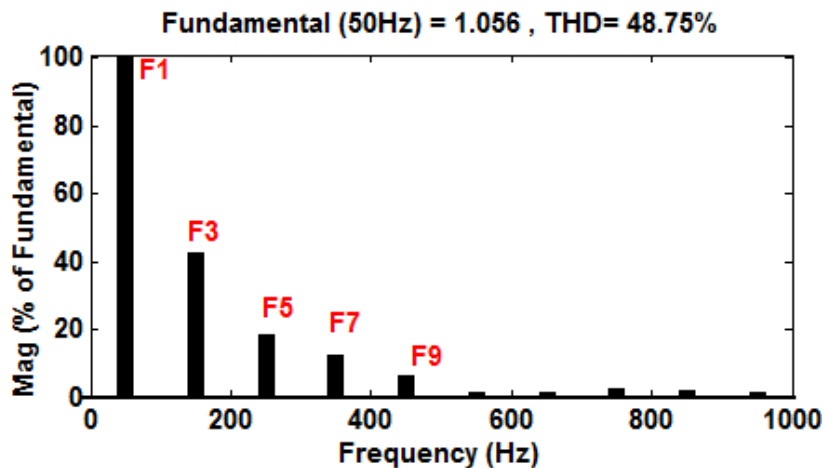


Fig.IV.13 le spectre des harmoniques de courant saturé du transformateur monophasé

Pour visualiser le cycle d'hystérésis $B=f(H)$, il faut passer à plusieurs étapes commençant du courant et tension revenant à B et H. L'annexe A montre ces étapes. Les relations de la densité et l'intensité du champ magnétique par rapport la tension intégrée et courant sont:

$$B_{\max} = 0.0385 \cdot I_{\max}$$

$$H_{\max} = 1391 \cdot I_{\max}$$

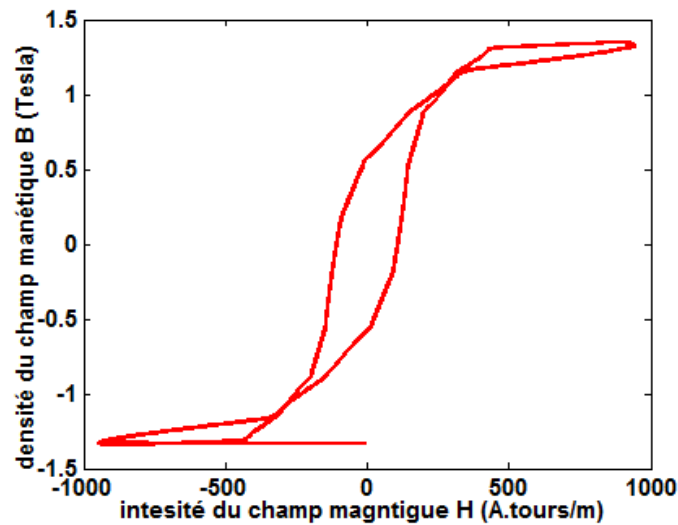


Fig.IV.14 le cycle d'hystérésis du transformateur monophasé

Si le transformateur est alimenté par une tension sinusoïdale de 50HZ et il alimente une charge linéaire, leur courant n'est pas sinusoïdale s'il fonctionne en zone de saturation où le $THD_i = 48.75\%$ qu'il est trop grande par rapport au limites de distorsion de la norme IEEE 519. La déformation du courant due cette fois à la saturation du circuit magnétique du transformateur monophasé.

IV.4 Résultats de simulation du transformateur triphasé

Le transformateur utilisé dans la simulation est un transformateur triphasé couplé en Y-Y.

Les paramètres du transformateur triphasé sont les suivantes:

Tableau IV.6.paramètres du transformateur triphasé

Paramètres	Valeurs
S (VA)	1500
V1 /U1 (V)	220/380
V2/U2 (V)	127/220
f (Hz)	50
R_m (Ω)	3226.2
X_m (Ω)	2548.7
R_1 (Ω)	2.8
R_2 (Ω)	1.1
X_1 (Ω)	1.47
X_2 (Ω)	0.53

IV.4.1 Alimentation sinusoïdale et charge linéaire

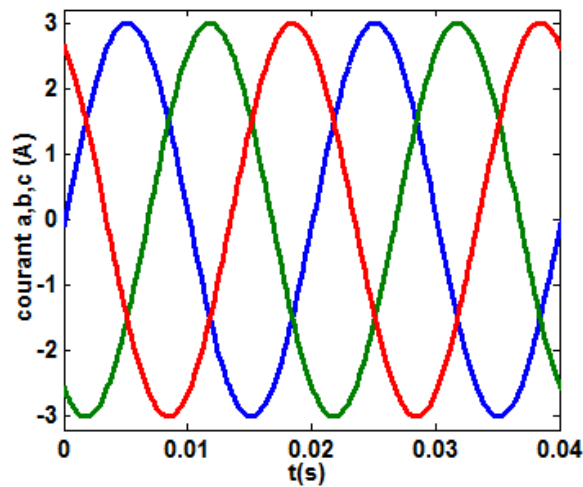


Fig.IV.15 l'allure du courant du transformateur triphasé (alimentation sinusoïdale et charge linéaire)

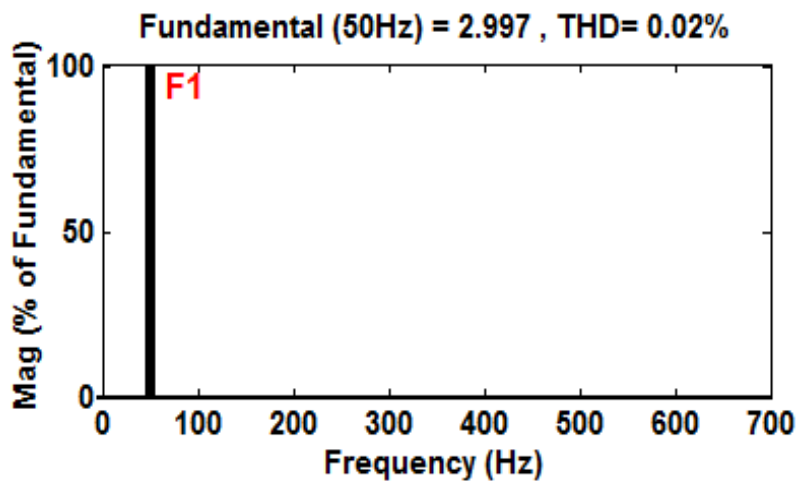


Fig.IV.16 le spectre des harmoniques du courant du transformateur triphasé (alimentation sinusoïdale et charge linéaire)

Tableau IV.7 condition du transformateur triphasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire

V_2	V_1	I_1	I_2	P_1	P_2	P_{pertes}	$\eta\%$	Thd_i	FP
127	212	2.12	3.8	1442	1349	93	93.55	0.02	0.99

Le transformateur triphasé est alimenté par une tension sinusoïdale triphasé de 50HZ, il alimente une charge linéaire triphasé, le courant du transformateur est sinusoïdale (Fig.IV.15) de THD_i vaut 0.02% (Fig.IV.16). Le facteur de puissance est élevé à cause de l'absence de la puissance déformante. Ainsi que le rendement est $\eta = 93.55\%$ car au transformateur conçu pour fonctionner dans ce mode(les conditions nominales).

IV.4.2 Alimentation sinusoïdale et charge non linéaire

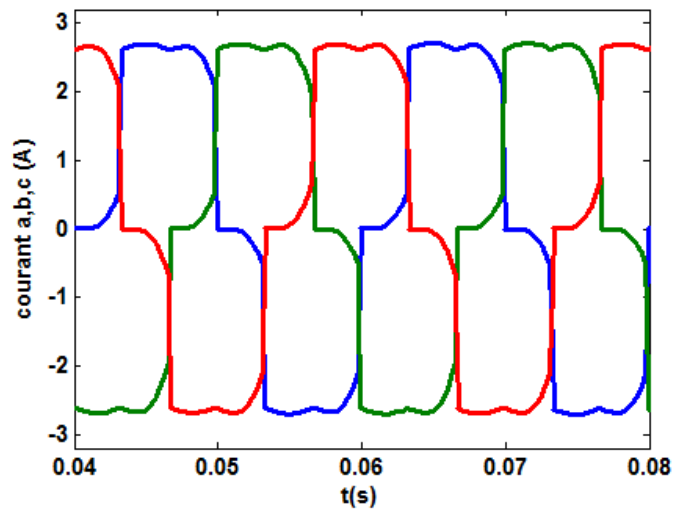


Fig.IV.17 l'allure du courant du transformateur triphasé (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)

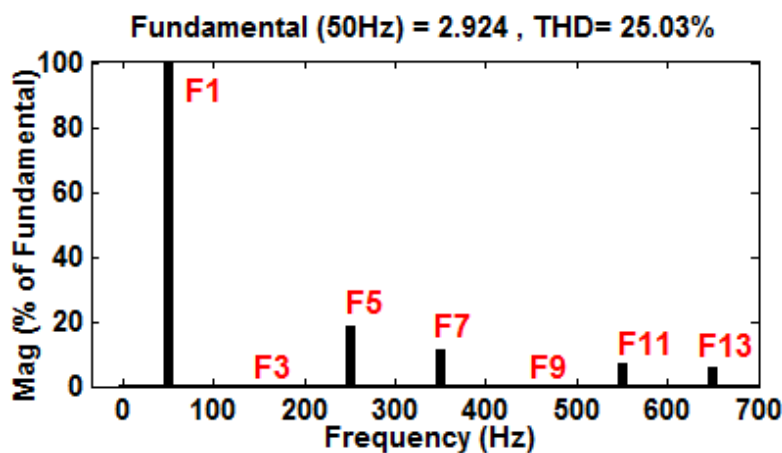


Fig.IV.18 le spectre des harmoniques du courant du transformateur triphasé (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)

Tableau IV.8. condition du transformateur triphasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire

V ₂	V ₁	I ₁	I ₂	P ₁	P ₂	P _{pertes}	η%	Thd _i	FP
127	150.5	2.55	4.5	1370	1025	345	74.8	25	0.80

Le courant du transformateur triphasé alimenté par une tension sinusoïdale de 50HZ avec une charge non linéaire (pont redresseur triphasé avec charge inductive R=100Ω et L=1.4H)à une forme non sinusoïdal (Fig.IV.17) à cause des effets de la charge non linéaire. Malgré le courant du transformateur est de THD_i = 25.03% (Fig.IV.18) et ne respecte la norme utilisé, le transformateur triphasé offre un avantage important par rapport au celle monophasé (THD_i = 38.88%) qu'il est d'éliminer les harmoniques des courants 3 et multiple de 3. Le

rendement est diminué par rapport au cas d'une charge linéaire, parce que les pertes dans le transformateur (perte fer et perte par effet joule) augmentent s'il y a des harmoniques de courant. (Pertes fer dépendent de f et perte joule a une relation directe avec la valeur efficace du courant; $P_{\text{joule}} = R \cdot I^2$)

IV.5 Résultats expérimentaux du transformateur monophasé

Malgré le développement des logiciels de simulation, toujours il y a des erreurs de ces résultats par rapport aux manipulations pratiques. Les résultats pratiques du transformateur monophasé sont obtenus vis-à-vis au charge non linéaire et saturation du transformateur et pour une alimentation non sinusoïdale.

IV.5.1 Alimentation sinusoïdal et Charge non linéaire

La figure IV.19 représente un schéma réel de transformateur alimenté en tension sinusoïdale de 50HZ avec une charge non linéaire, un pont redresseur monophasé avec une résistance $R=100\Omega$ et inductance $L=1.4H$

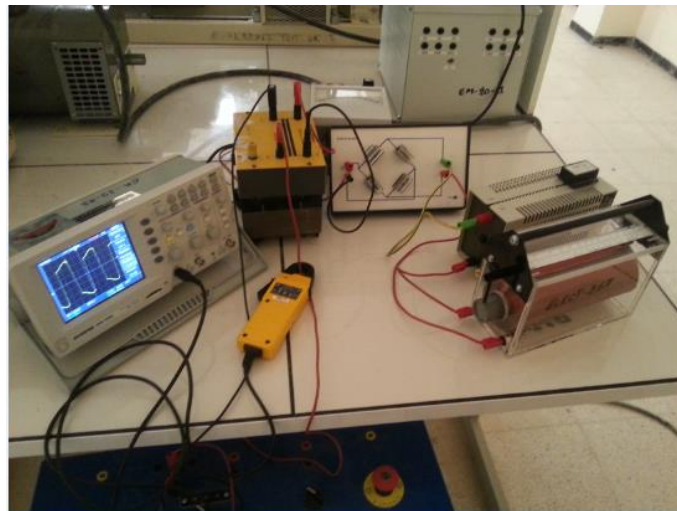


Fig.IV.19 schéma de manipulation du transformateur monophasé pour charge non linéaire

L'allure de courant réel du transformateur lorsque la tension d'alimentation est sinusoïdale et une charge non linéaire a été représenté dans la figure IV.20.

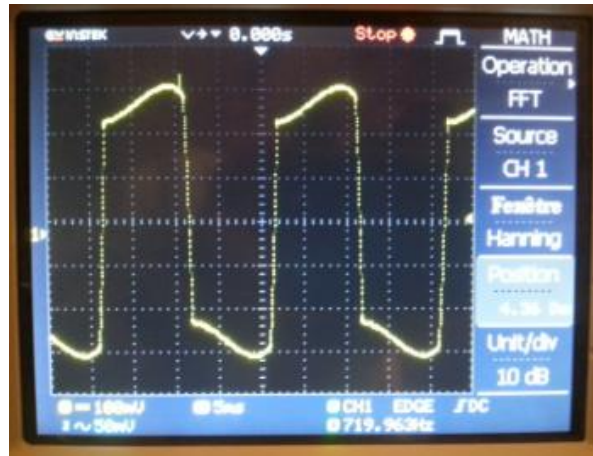


Fig.IV.20 le courant réel du transformateur (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)

Le spectre des harmoniques de courant réel du transformateur (pour une alimentation sinusoïdale et charge non linéaire) est montré dans la figure IV.21

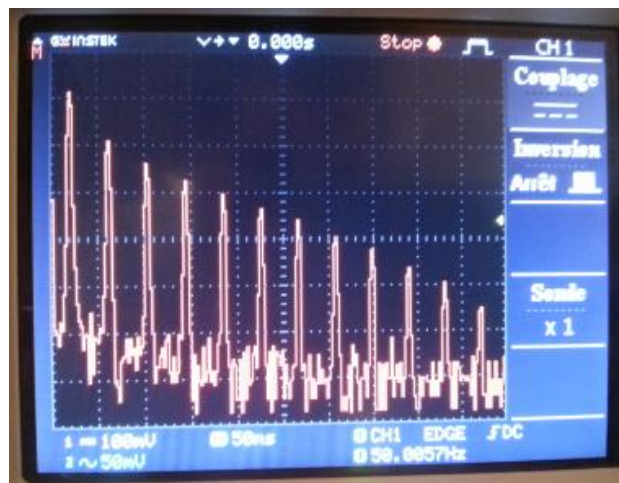


Fig.IV.21 le spectre des harmoniques du courant réel du transformateur (alimentation sinusoïdale et charge non linéaire)

IV.5.2 Alimentation non sinusoïdale et charge linéaire

L'alimentation du transformateur utilisé dans ce cas est une tension en créneau de valeur maximale 60V, qu'elle fournit à partir d'un hacheur Buck (abaisseur). Le transformateur alimente une charge linéaire (résistive pure).

L'allure de la tension d'alimentation ainsi que les courants primaire et secondaire du transformateur monophasé avec les spectres des harmoniques pour les deux courants sont représentés dans les figures suivantes:

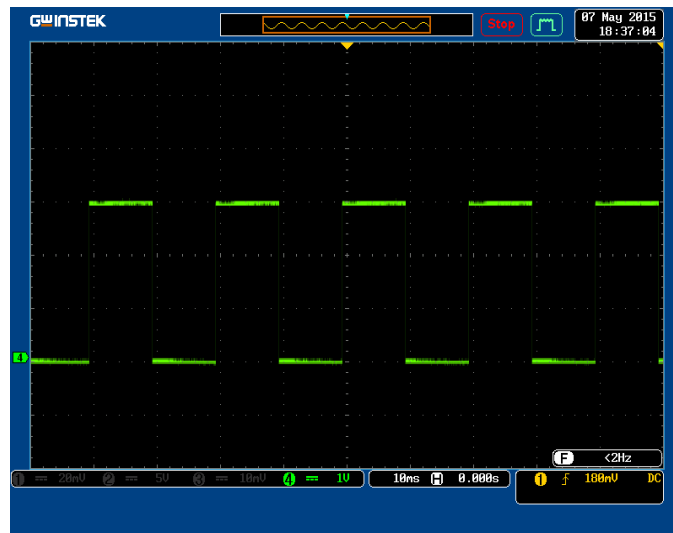


Fig.IV.22 la tension réelle d'alimentation du transformateur

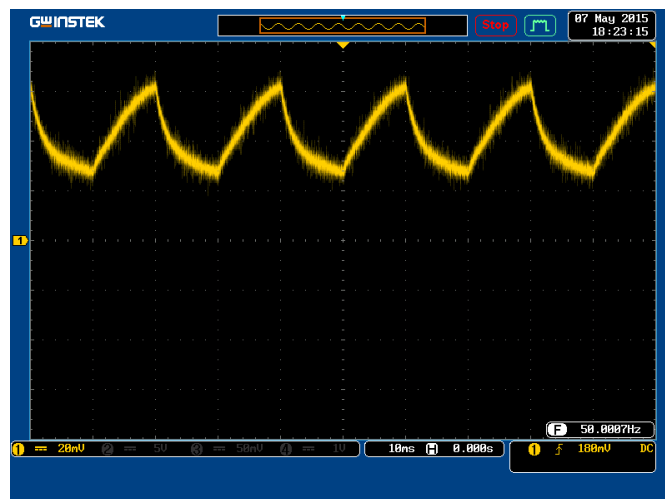


Fig.IV.23 le courant primaire réel du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

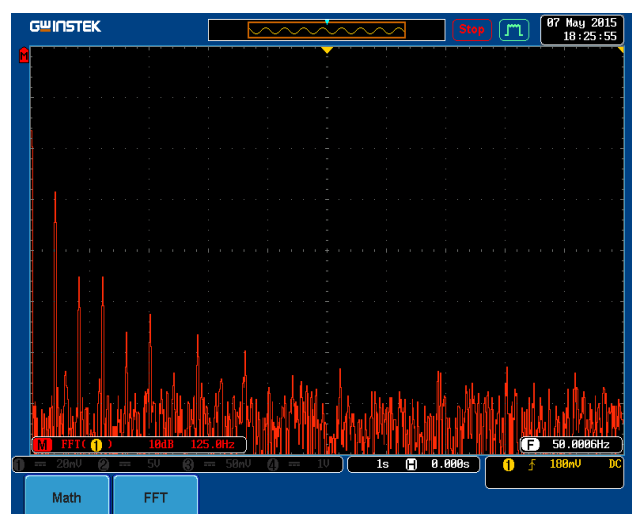


Fig.IV.24 le spectre des harmoniques du courant primaire réel du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

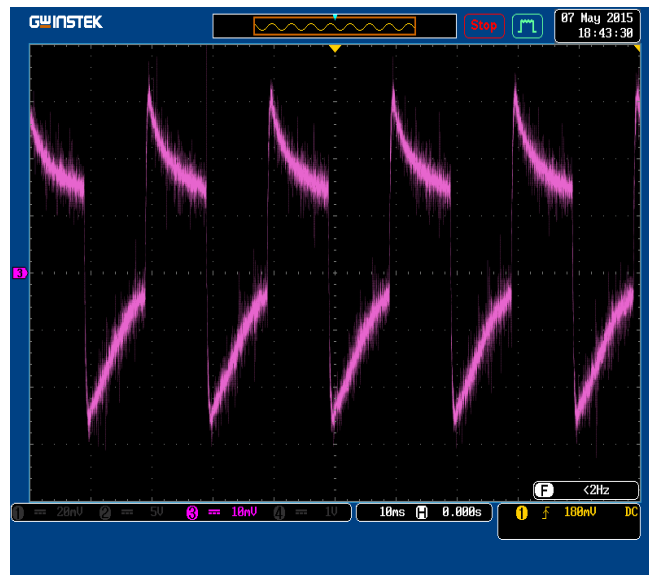


Fig.IV.25 le courant secondaire réel du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

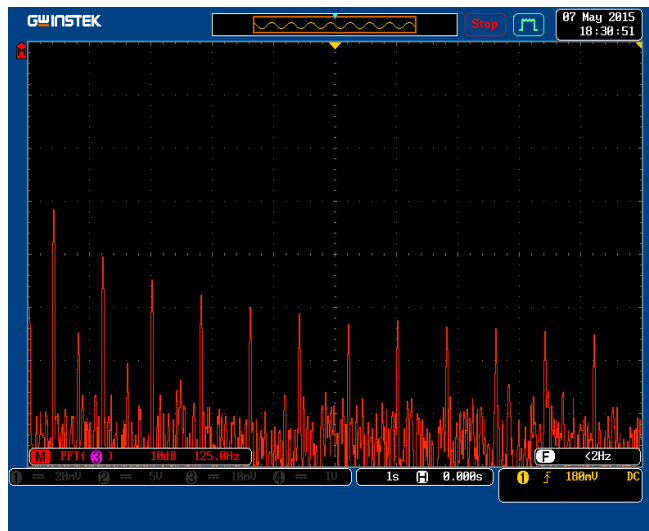


Fig.IV.26 le spectre des harmoniques du courant secondaire réel du transformateur (alimentation non sinusoïdale et charge linéaire)

IV.5.3 Saturation réel du transformateur monophasé

Pour que le transformateur fonctionne dans la zone de saturation, l'augmentation de tension est suffisante. Les figures suivantes représentent la déformation de courant du transformateur pour plusieurs de tension d'alimentation.

Remarque: Le transformateur a été alimenté par le bobinage secondaire.

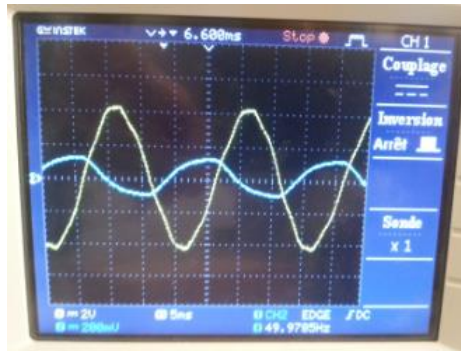


Fig.IV.27 courant réel de saturation pour que la tension est 30V

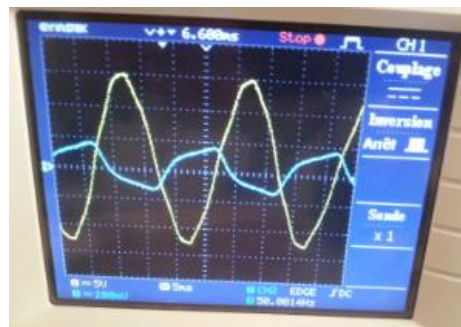


Fig.IV.28 courant réel de saturation pour que la tension est 95V

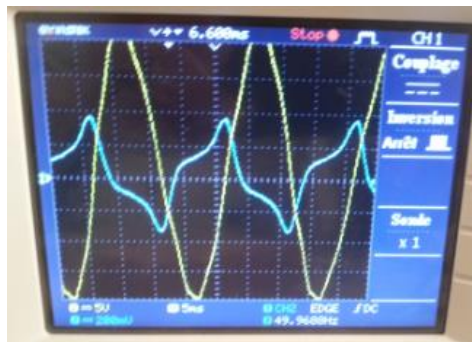


Fig.IV.29 courant réel de saturation pour que la tension est 140V

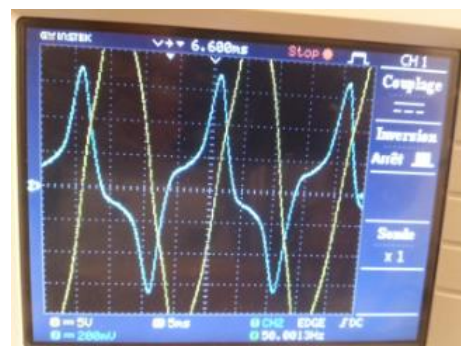


Fig.IV.30 courant réel de saturation pour que la tension est 170V

Les figures IV.31 et IV.32 représentent le courant réel du transformateur saturé et le spectre des harmoniques de ce courant respectivement

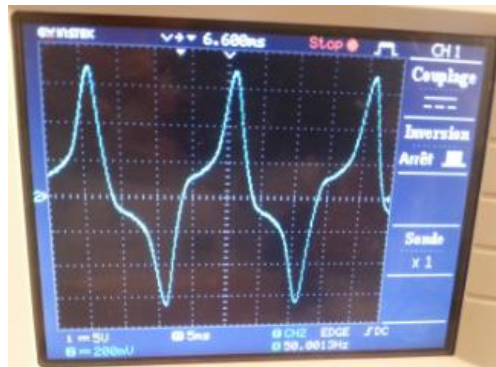


Fig.IV.31 courant réel de saturation du transformateur



Fig.IV.32 le spectre des harmoniques du courant réel de saturation du transformateur

Le cycle d'hystérésis de la figure IV.33 est obtenu à partir d'un oscilloscope met le courant de saturation qu'il correspond l'intensité du champ magnétique H en mode X avec la tension primaire du transformateur intégrée correspond à la densité du champ magnétique B en mode Y.

Remarque: la tension primaire est intégrée à partir d'un circuit RC en parallèle, où $R=22e^4\Omega$ et $C = 0.1e^{-6} F$.

Les relations de la densité et de l'intensité du champ magnétique B et H sont les suivants:

- **$B_{max} = 0.0385 E_{max}$**
- **$H_{max} = 1391 I_{max}$**

Les deux équations sont montrés dans l'annexe A

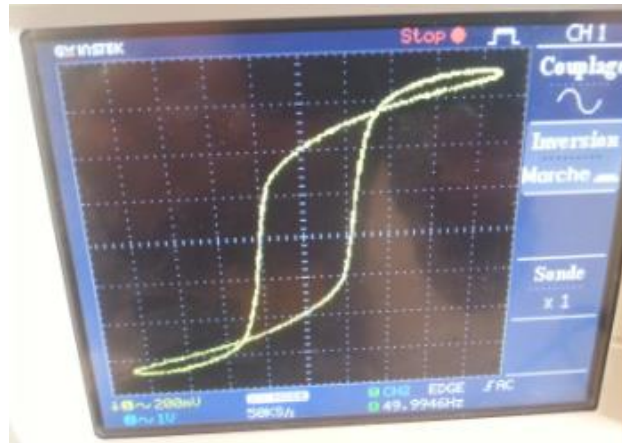


Fig.IV.33 le cycle d'hystérésis réel du transformateur

IV.6 filtrage des harmoniques du courant

Pour tous les cas précédents, (charge non linéaire, saturation du transformateur et alimentation non sinusoïdale) le courant du transformateur a été déformé. Cette déformation du courant a des effets défavorables non seulement pour le réseau, mais il influe sur le transformateur lui-même (échauffements supplémentaires, facteur de puissance réduite,...) .

Le principe du filtrage est de réduire les courants harmoniques dans le côté réseau. Suivant la norme IEEE 519 1992 : la distorsion globale du courant ne dépasse **5%**. Cette limitation a été prise en considération.

Remarque: à cause de la complexité du filtre actif et car à l'extrémité du temps on utilise le filtrage passif seul.

IV.6.1 transformateur monophasé

IV.6.1.1 alimentation sinusoïdale et charge non linéaire

Pour ce cas on utilise trois filtres passifs parallèles pour les rangs harmoniques 3,5 et 7 pour que le courant du transformateur corresponde à la norme IEEE 519.

L'allure du courant après le filtrage et leur spectre des harmoniques ont été donnés dans les figures IV.34 et IV.35 respectivement.

Le schéma du filtrage ainsi que les paramètres du filtrage sont donnés dans l'annexe C

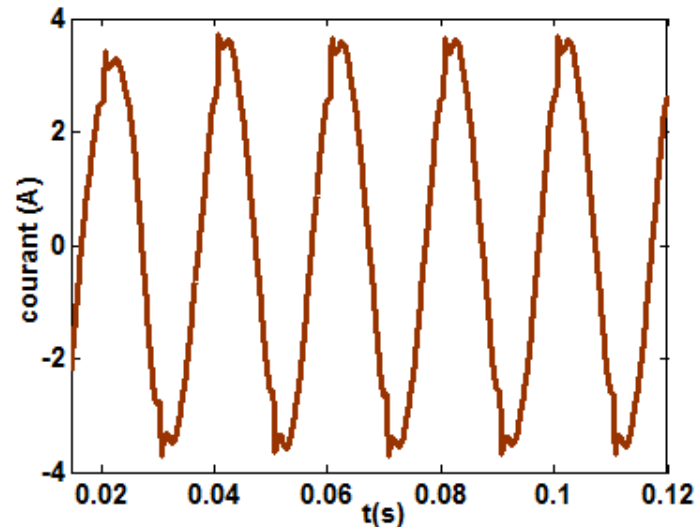


Fig.IV.34 l'allure du courant du transformateur monophasé avec filtrage (charge non linéaire)

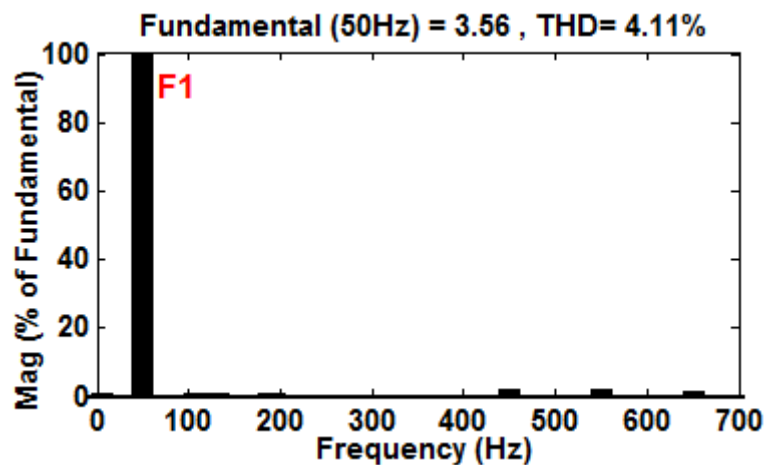


Fig.IV.35 le spectre des harmoniques du courant du transformateur monophasé avec filtrage (charge non linéaire)

Tableau IV.9. condition du transformateur monophasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire avec filtrage

V_2	V_1	I_1	I_2	P_1	P_2	P_{pertes}	$\eta\%$	THD _i %	FP
127	211.3	1.83	3.23	372.2	337.5	34.7	91.04	4.11	0.9678

Le filtrage du courant du transformateur influe sur le comportement du transformateur à travers l'amélioration du facteur de puissance de presque 6%. Le THD_i devient 4.11% après le filtrage du courant du transformateur après qu'il est été 38.8%.

IV.6.1.2 saturation du transformateur monophasé

Le filtrage du courant de saturation du transformateur monophasé se fait à travers deux filtres passifs parallèles le pour le 3^{ème} et 5^{ème} rang harmonique.

L'annexe C contient le schéma du filtre passif et ces paramètres pour filtrer le courant de saturation du transformateur monophasé.

Les figures IV.36 et IV.37 représente le courant filtré dans ce cas avec leur spectre des harmoniques respectivement.

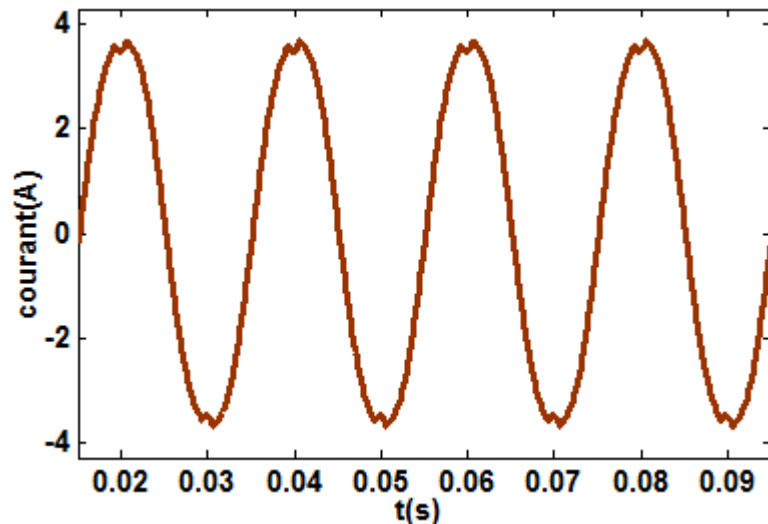


Fig.IV.36 l'allure du courant du transformateur monophasé avec filtrage (lors de la saturation du transformateur)

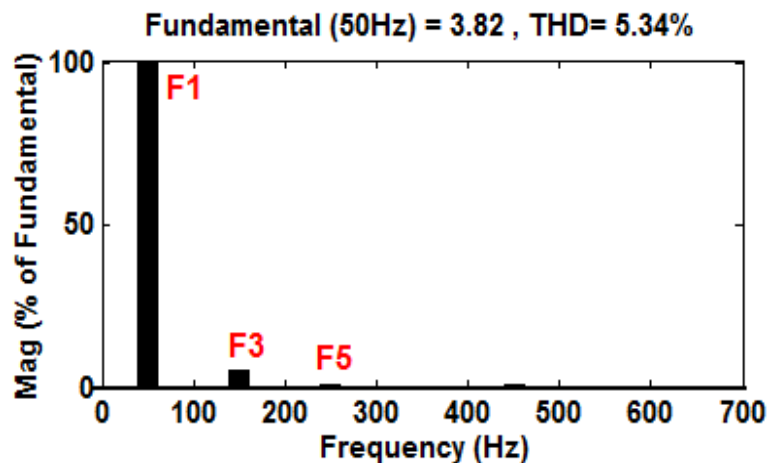


Fig.IV.37 le spectre des harmoniques du courant du transformateur monophasé avec filtrage (lors de la saturation du transformateur)

Le THD_i avant le filtrage est 48.75%, après l'utilisation des filtres passifs pour les rangs harmoniques 3 et 5 le THD_i devient presque 5% qui correspondent à la norme appliquée.

IV.6.2 transformateur triphasé

Sans filtrage le montage triphasé permet d'éliminer les harmoniques multiple de 3, ceci facilite et diminue le prix de filtrage. Dans notre cas un seul filtre passif parallèle de rang 5 est suffisant de rapporter les limitations de la norme IEEE 519.

Les caractéristiques de filtrage et le schéma du transformateur triphasé avec le filtre passif parallèle sont indiqués dans l'annexe C.

L'allure des courants du transformateur après l'utilisation d'un filtre passif parallèle de rang 5 est comme suit :

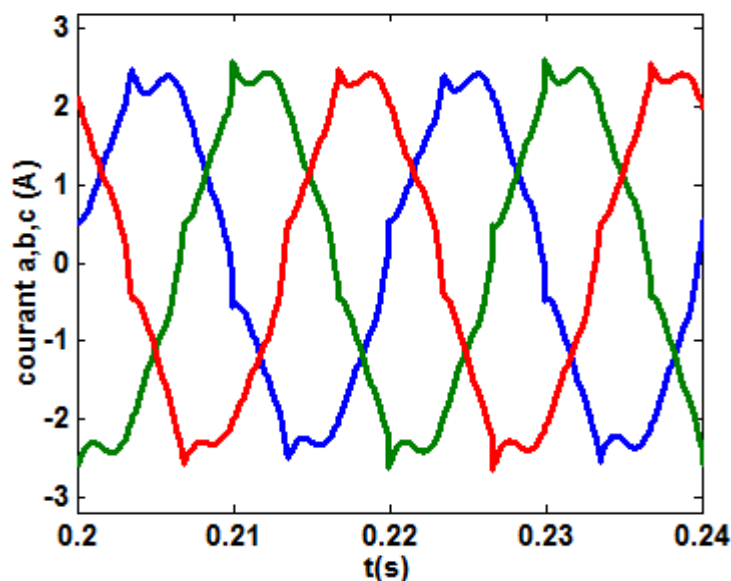


Fig.IV.38 l'allure du courant du transformateur triphasé avec filtrage (charge non linéaire)

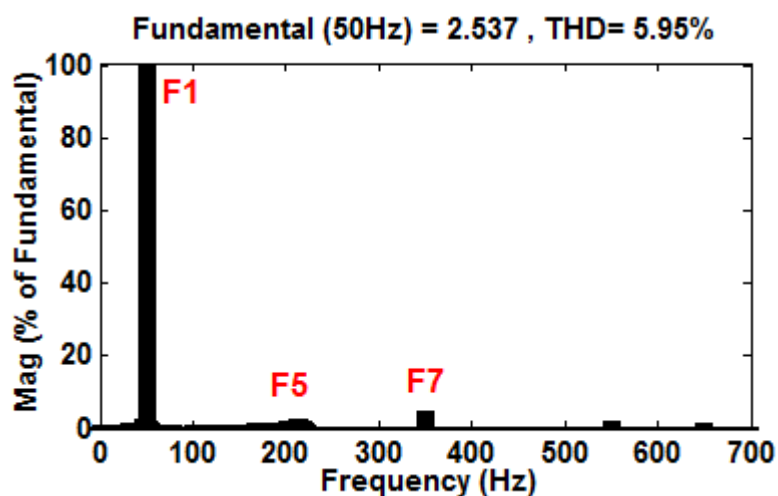


Fig.IV.39 le spectre des harmoniques du courant du transformateur triphasé avec filtrage (charge non linéaire)

Tableau IV.10. condition du transformateur triphasé ; alimentation sinusoïdale et charge non linéaire

V ₂	V ₁	I ₁	I ₂	P ₁	P ₂	P _{pertes}	η%	Thd _i %	FP
127	166	1.95	3.5	1236.3	929.1	307.5	75.15	5.95	0.93

Le comportement du transformateur triphasé a été amélioré avec l'utilisation d'un filtre passif parallèle à travers le facteur de puissance (+13%) qui possède une relation directe avec le THD_i et aussi de diminuer les pertes globales du transformateur (pertes fer et pertes joule).

IV.7 Comparaison entre les résultats pratiques et celle de simulation

Le modèle du transformateur saturé et non saturé, la charge linéaire et non linéaire et l'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale ont été construits dans MATLAB/Simulink. Les résultats ont été imprimés et elles ont montré que l'augmentation des harmoniques provoque une augmentation des pertes du transformateur. Les résultats obtenus dans MATLAB montrent de meilleures performances que celles de l'expérience en raison du fait que MATLAB œuvre dans ces formules mathématiques sans tenir compte de l'environnement dans lequel l'expérience a été menée.

Les erreurs dans l'identification des paramètres de transformateur qui est due à l'évolution des conditions de l'expérience; tel que la tension de réseau qui peut être affectée par le nombre d'utilisateurs connectés au réseau au moment de la conduite l'expérience. Les conditions de transformateur telles que la température peuvent également affecter les résultats de l'expérience.

IV.8 Conclusion

A partir du présent chapitre on peut conclure les points suivants:

- ✦ L'utilisation d'une charge non linéaire à la sortie de transformateur a des effets néfastes sur le comportement du transformateur et particulièrement le courant du transformateur par l'apparition des courants harmoniques s'ajoutant au courant fondamental.
- ✦ Si la tension d'alimentation du transformateur ne plus sinusoïdale, le courant du transformateur aussi va déformer et le comportement du transformateur est plus mauvais dans ce cas à cause de deux facteurs : l'apparition des harmonique de tension et de courant qui influe sur le facteur de puissance et la conversion d'énergie est diminué avec l'écartement de la tension sur la forme sinusoïdale.
- ✦ Même la tension d'alimentation du transformateur est sinusoïdale et ce dernier alimente une charge linéaire l'apparition de courant déformé peut avoir si le transformateur est en zone de saturation.
- ✦ Le bénéfice du transformateur triphasé est moins des harmoniques du courant que celle monophasé car a 'élimination des harmoniques multiple de 3. Ceci facilite le filtrage et réduire ce cout.
- ✦ Les limitations des harmoniques ont des avantages non seulement pour le réseau, mais influe sur le comportement du transformateur à partir de l'amélioration du facteur de puissance.



Conclusion générale et perspectives



Conclusion générale et Perspectives

Les pertes joules ainsi que les pertes fer peuvent augmenter dans un transformateur de puissance cela sont dues à présence des courants harmoniques circulant dans le transformateur. La plus part de ces courants harmoniques au niveau de transformateur sont due à l'augmentation d'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance et ne sont pas liées à la saturation du transformateur.

Dans le cadre de ce projet nous avons fait un scan sur les transformateurs de puissances, la modélisation, les essais d'identification des paramètres ainsi que le bilan énergétique et la relation des pertes du transformateur dues aux harmoniques. En effet des généralités sur les harmoniques, causes, effets à court et long terme, avec des recommandations et des limitations des harmoniques des tensions et courants harmoniques. Plusieurs moyens de réduction des harmoniques et de ces effets ont été discutés et mentionnés.

Les résultats pratiques que nous avons faits au niveau de notre laboratoire (LMSE) sur un transformateur monophasé sont : Premièrement une alimentation non sinusoïdale, deuxièmement application d'une charge non linéaire inductive et finalement le problème de saturation du circuit magnétique qui sont ensuite comparés avec des résultats obtenus par simulation sous l'environnement du logiciel MATLAB/Simulink/et Sim Power Systems. Le résultat le plus intéressant c'est l'analyse du courant du transformateur et leur déformation (THD_i) pour les trois cas indiqués.

Les effets néfastes des courants harmoniques sur le transformateur et sur le réseau électrique peuvent être réduits à partir du filtrage correspond à la norme 519 1992 qu'elle limite le THD_i inférieur à 5%. Pour notre cas on a utilisé le filtrage passif parce qu'il est plus facile et moins couteux pour le transformateur triphasé car l'élimination complète des composantes harmoniques multiples de trois. Le filtrage permet de réduire les pertes ainsi que l'augmentation du facteur de puissance dans le transformateur.

Cette étude peut être complétée par les perspectives suivantes :

- Utilisation des différentes charges non linéaires inductives et capacitives et des charges plus génératrices des courants harmoniques.
- Utilisation des transformateurs monophasés et triphasés pour plusieurs couplages de avec une conception spéciale.
- L'utilisation du filtrage actif pour la réduction des courants harmoniques par simulation et pratiquement.
- Application des moyens de compensation de l'énergie réactive.



Bibliographie



Bibliographie

- [1] BERNARD MULTON “ modèles électriques du transformateur électromagnétique “
antenne de Bretagne de l'école normale supérieure de caban, décembre 1997.
- [2] ZAHRA AMINI “ mesure et identification des paramètres de divers configuration de
transformateurs triphasé et étude des courants magnétisants “ pour diplôme de maîtrise ès
sciences, école polytechnique du Montréal, aout 2011.
- [3] ABDELMAJID BOUCHAOUI “ filtrage actif triphasé pour charges non linéaires “ thèse
du doctorat, université Ferhat Abbas - Sétif, octobre 2010.
- [4] AHMED EL BARRAWI “ experimental study and comparative analysis of transformer
harmonic behavior under linear and non linear load conditions “ mémoire master, graduate
school of applied sciences of near east university , Nicosia 2012.
- [5] SOUMYA RANJAN MOHANTY “ modeling and analysis of transformer under non-
sinusoidal current excitation “ mémoire master, national institute of technology Rourkela,
Odisha, India, mai 2012.
- [6] TOUFIK SMAIL “ modélisation des éléments non linéaires “ mémoire de magister,
université de Batna.
- [7] YAHIOU ABDELGHANI “ contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans
les transformateurs de puissance: cas du courant d'appel “ mémoire de magister en
électrotechnique, université Ferhat Abbas – Sétif, juin 2012.
- [8] STEEVE BEAULIEU “ étude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue
d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique “ mémoire d'ingéniera, université Québec à
Chicoutimi, mai 2007.
- [9] “ cours électronique de puissance avancée “ université d'el OUED, site: elearning.univ-eloued.dz/courses/.../Cours_Master2_ChapitreII.pdf.
- [10] ROLAND CALVAS “ cahier technique nr 141: Les perturbations électriques en BT “
rapport technique, Schneider Electric, mai 2001.
- [11] DAVID CHAPMAN “ harmoniques causes et effets “ guide qualité de l'énergie, juillet
2012.



Annexes



Annexe A

Pour obtenir le cycle d'hystérésis $B=f(H)$ du transformateur il faut réaliser le schéma de la figure (A.1)

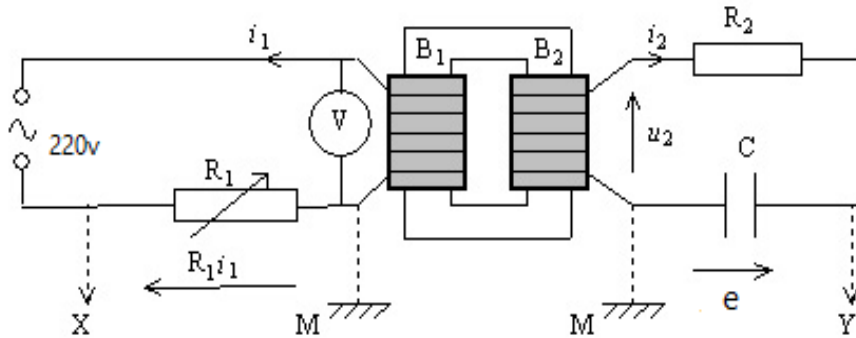


Fig. A.1. schéma de principe pour visualiser le cycle d'hystérésis $B= f(H)$ d'un transformateur

A.1 L'équation de la densité du champ magnétique B

$$U_1 = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(N_1 B S)}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt}$$

$$U_1 = V_m \sin(\omega t)$$

$$B(t) = B_m \sin(\omega t + \varphi); \varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$V_m = N_1 S B_{max} \omega_0 = 2\pi f_0 N_1 S B_{max}$$

$$U_{1eff} \sqrt{2} = V_{1max} = 2\pi f N_1 S B_{max}$$

$$U_{1eff} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 S B_{max}$$

$$U_{1eff} = 4.44 f N_1 S B_{max} \dots\dots\dots (A.1)$$

On fait la comparaison avec

$$e = E(p), u_1 = U_1(p)$$

$$\frac{E(p)}{U_1(p)} = \frac{1/cp}{R + 1/cp} = \frac{1}{1 + Rcp} \approx \frac{1}{Rcp}$$

$$Rcp E(p) = U_1(p)$$

$$Rc \frac{de}{dt} = u_1$$

$$Rc \omega_0 E_{max} = U_{1max} = U_{1eff} \sqrt{2}$$

$$U_{1eff} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_0 Rc E_{max}$$

$$U_{1eff} = 4.44 f Rc E_{max} \dots\dots\dots (A.2)$$

D'après l'équation (A.1) et (A.2) on a :

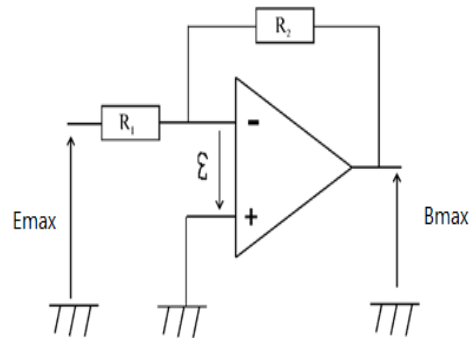
$$4.44 f N_1 S B_{max} = 4.44 f Rc E_{max}$$

$$Rc E_{max} = N_1 S B_{max}$$

$$B_{max} = \frac{Rc}{N_1 S} E_{max} = a. E_{max} \quad \text{où} \quad a = \frac{Rc}{N_1 S}$$

$$B_{max} = a. E_{max}$$

$$B_{max} = \frac{R_2}{R_1} E_{max} \quad \text{avec} \quad \frac{R_2}{R_1} = a$$



A.2 L'équation de l'intensité du champ magnétique H

$$H_{max} L_{moy} = N_1 I_{max}$$

$$H_{max} = \frac{N_1}{L_{moy}} I_{max}$$

$$H_{max} = b I_{max} \quad \text{avec} \quad b = \frac{N_1}{L_{moy}}$$

A.3 application

$$L_{moy} = (6.2 + 9.9) * 2 = 32.2cm = 0.32m$$

$$S = (5.1 + 2.5) = 12.75 cm^2 = 12.75 * 10^{-4} m^2$$

$$N_1 = 448 \text{ spires}$$

$$R = 22 * 10^4 \Omega$$

$$C = 0.1 * 10^{-6} F$$

Donc

$$B_{max} = \frac{Rc}{N_1 S} E_{max} = \frac{(22 * 10^4) * (0.1 * 10^{-6})}{448 * 12.75 * 10^{-4}} E_{max} ; \mathbf{B_{max} = 0.0385 E_{max}}$$

$$H_{max} = \frac{N_1}{L_{moy}} I_{max} = \frac{448}{0.32} I_{max} ; \mathbf{H_{max} = 1391 I_{max}}$$

Annexe B

B.1 Niveaux de perturbations

Un positionnement des différentes définitions en fonction du niveau de perturbation est illustré sur le graphique de la figure B.1.

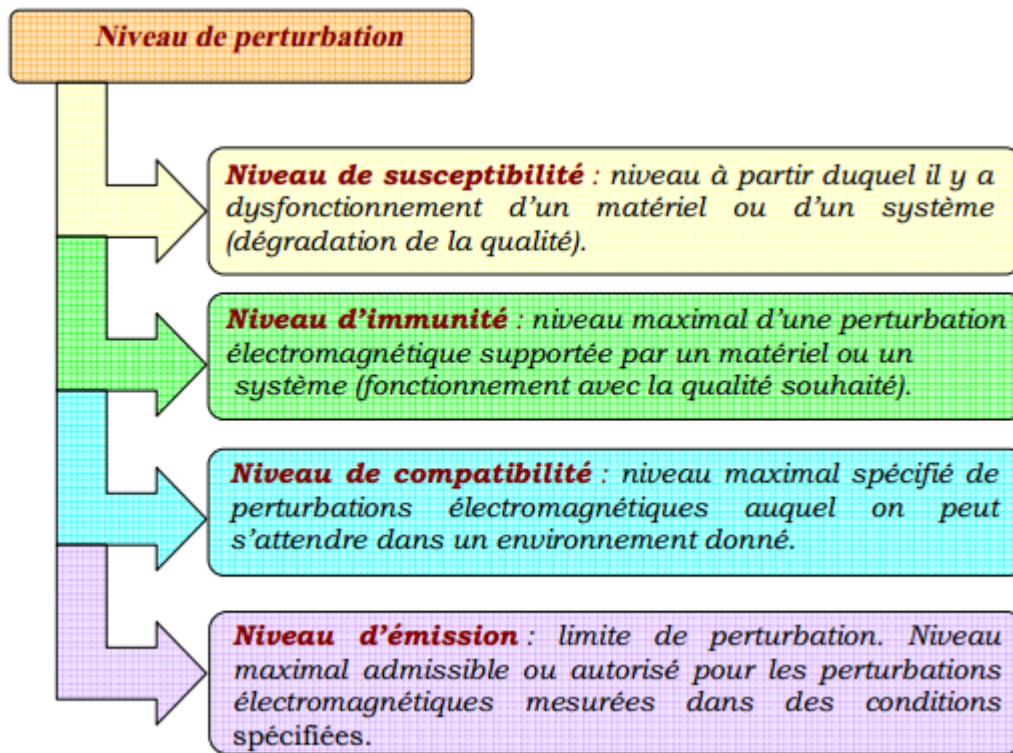


Fig.B.1 Les différents niveaux de perturbations [3].

Les principales normes en matière de pollution harmonique sont au niveau international la CEI 61000, au niveau européen la NF EN 50160, au niveau Français la NF C15-100 et au niveau nord-américain par le standard IEEE 519.

B.2. IEEE 519 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems – USA

La norme IEEE Std 519 1992 contient des recommandations qui ont pour but de contrôler le taux de pollution harmonique présent sur les réseaux électriques. Ces normes spécifient les limites de distorsion en tension que les fournisseurs doivent respecter ainsi que les limites de distorsion en courant que les usagers, avec leurs charges polluantes, doivent respecter.

Tableau B.1: Limites de distorsion de tension pour les fournisseurs

Niveau de tension	Taux de distorsion individuel de tension (%)	Taux de distorsion global de tension (%)
≤ 69 kV	3.0	5.0
≥ 69.001 kV et ≤ 161 kV	1.5	2.5
≥ 161.001 kV	1.0	1.5

Tableau B.2: Limites de distorsion de courant pour les systèmes généraux de distribution (120V à 69000V)

Distorsion maximale du courant harmonique en pourcentage de I_L						
ordre harmonique individuel (harmoniques impairs)						
I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	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	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Les harmoniques paires sont limitées à 25% des limites des harmoniques impaires définis ci-dessus.
 I_L : demande maximale du courant de charge.
 I_{sc} : courant de court-circuit maximal.
TDD : taux de distorsion global du courant

Annexe C

C.1 Propriétés du filtrage du transformateur monophasé

C.1.1 filtrage des harmoniques pour une alimentation sinusoïdale du transformateur monophasé et charge non linéaire

A cause du courant du transformateur est enclore plusieurs harmoniques (THDi = **38.8%**) on utilise un trois filtres passifs résonnants pour filtrer les courants du 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} rang harmonique.

Tableau C.1. paramètres du filtre passif pour une charge non linéaire

Type de filtre	Rang harmonique n	Paramètres du filtre	
Filtre passif parallèle	n=3	$Cf3 = 12e^{-6} F$	$Lf3 = 0.094H$
Filtre passif parallèle	n=5	$Cf5 = 15e^{-6} F$	$Lf5 = 0.027 H$
Filtre passif parallèle	n=7	$Cf7 = 5e^{-6} F$	$Lf7 = 0.04 H$

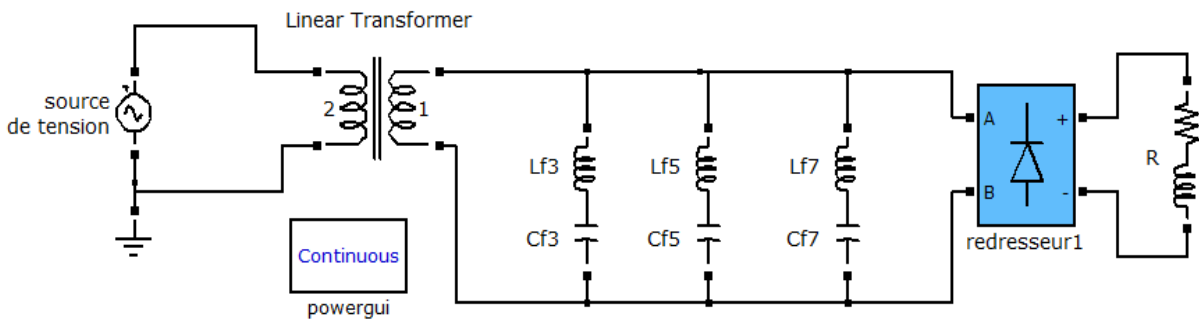


Fig.C.1schéma de la simulation du transformateur monophasé avec charge non linéaire associé avec un filtre

C.1.2 filtrage des harmoniques lors de la saturation du transformateur

Il est connu que la saturation du transformateur est une source des harmonique pour notre cas le $THDi = 48\%$ donc on utilise deux filtre passif parallèle l'un pour le rang harmonique $n=3$ et l'autre pour le rang harmonique $n=5$.

Tableau C.2. paramètres du filtre passif pour la saturation du transformateur

Type de filtre	Rang harmonique n	Paramètres du filtre	
Filtre passif parallèle	n=3	$Cf3 = 6.5e^{-6} F$	$Lf3 = 0.173H$
Filtre passif parallèle	n=5	$Cf5 = 5e^{-6} F$	$Lf5 = 0.008 H$

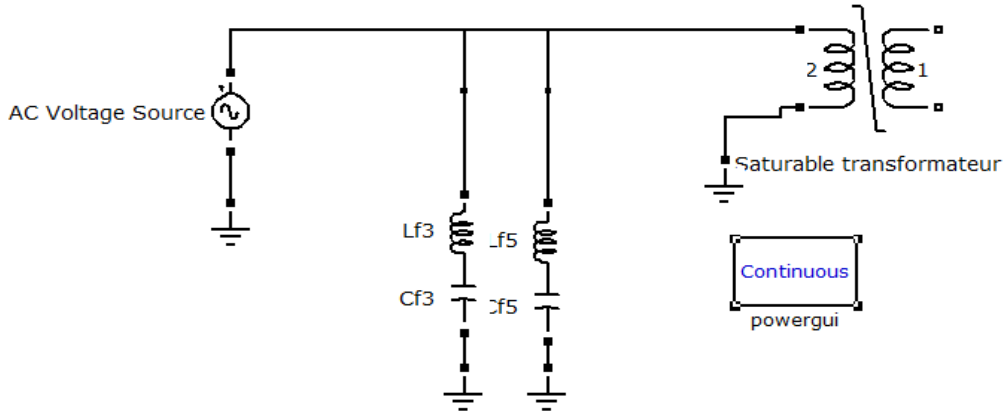


Fig.C.2 Schéma de la simulation du transformateur monophasé lors de la saturation associée avec un filtre

C.2 Propriétés du filtrage du transformateur triphasé

Le principale avantage du montage triphasé est: que les harmoniques multiples de trois sera disparu est donc facilite de filtrage. Pour notre cas (le transformateur triphasé avec une charge non linéaire) le **THD_i = 25%**. Un filtre passif parallèle de rang harmonique n=5 triphasé est satisfaisant pour filtrer le **THD_i ≈ 5%**.

Tableau C.2. paramètres du filtre passif du transformateur triphasé pour une charge non linéaire

Type de filtre	Rang harmonique n	Paramètres du filtre	
Filtre passif parallèle triphasé	n=5	Cf5 = 33e ⁻⁶ F	Lf5 = 0.0123 H

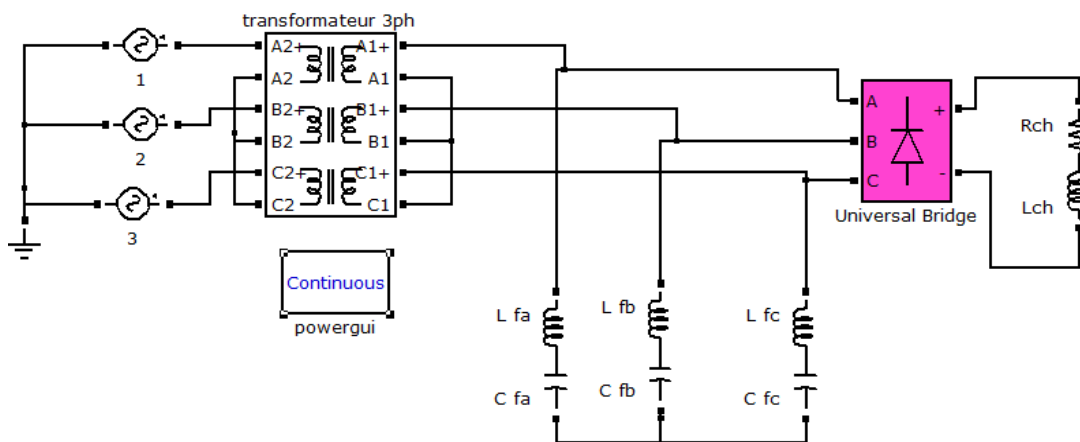


Fig.C.3 Schéma de la simulation du transformateur triphasé avec charge non linéaire associée avec un filtre