



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

Aymen CHELABI

Et

Oussama YAHY

Thème

Étude de l'effet de la charge sur le cycle d'hystérésis d'un transformateur monophasé sous un régime transitoire

Soutenu le : 03/07/2023

Devant le Jury composé de :

Mr.: Ali BOUHEDDA	M.A. A	Univ. Bouira	Président
Mr : Abdelghani YAHIOU	M.C. A	Univ. Bouira	Rapporteur
Mme : Nora KIRIECHE	M.C. A	Univ. Bouira	Examineur



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد (ة) ياسين أليم الصفة: طالب، استاذ، باحث

الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 4053 19 496 والصادرة

بتاريخ: 26/03/2023

المسجل (ة) بكلية / معهد العلوم والتكنولوجيا قسم الهندسة الالكترونية

والمكلف (ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة
دكتوراه).

عنوانها: Etude de l'effet de la charge sur le cycle
d'hystérésis d'un transformateur monophasé sous un régime
transitoire.

تحت إشراف الأستاذ (ة):

YAHIAO Abdelghoni

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة
الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 06/07/2023

توقيع المعني (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



Turnitin

%

16

النسبة:

الامضاء:



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد (ة) هاج أسامة الصفة: طالب، استاذ، باحث

الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 1.0.8.2.5.8025 والصادرة

بتاريخ: 14/03/2018

المسجل (ة) بكلية / معهد العلوم والعلوم التطبيقية قسم الهندسة الكهربائية

والمكلف (ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة

دكتوراه).

عنوانها: Etude de l'effet de la charge sur le cycle

d'hysteresis d'un transformateur monophasé sous un régime transitoire

تحت إشراف الأستاذ (ة):

..... يحيى عبد الغني

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة
الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/07/01

توقيع المعني (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



%

16

النسبة:

الامضاء:

Dédicaces 1

*A toutes les personnes qui me sont chères ; mes très chers parents
pour leurs sacrifices, soutien et amour. Je leurs serai
éternellement reconnaissant.*

*À ma mère, la perle la plus chère qui m'a entouré avec sa
tendresse et qui n'a cessé de prier pour moi.*

*À mon cher père, la base de toute ma carrière qui m'a appris que
la patience est le secret du succès.*

À mes chers et précieux frères et sœurs.

*Ce mémoire de master est le fruit de mon travail acharné et de
ma passion pour la connaissance.*

Merci du fond du cœur.

Oussama YAHI

Dédicaces 2

À tous ceux qui ont contribué à mon parcours académique et m'ont soutenu tout au long de cette aventure, Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance

À mes professeurs, dont la passion pour leur domaine D'expertise a su m'inspirer et me guider

À ma famille et mes amis, qui m'ont encouragé et soutenu, même dans les moments les plus difficiles

À mes collègues et camarades de classe, avec qui j'ai partagé des moments d'apprentissage, de collaboration et d'amitié, Votre esprit d'équipe et votre désir de réussir m'ont poussé à me dépasser

Enfin, à moi-même, pour avoir fait preuve de détermination, de discipline et de résilience

Ce mémoire de master est le fruit de mon travail acharné et de ma passion pour la connaissance.

Merci du fond du cœur.

Aymen CHELABI

Remerciements

Avant tout nous remercions le DIEU de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté pour atteindre notre objectif et présenté cet humble travail.

Un grand merci à toute notre famille et plus particulièrement nos parents, pour nous avoir soutenue et aidé tout au long de nos études.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre promoteur Monsieur YAHIOU Abdelghani ; qui nous a aidé et orienté pendant toute cette étude.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Un grand merci à tous nos enseignants qui par leurs éducations et leurs enseignements qu'ils nous ont donnés ont fait de nous ce que l'on est aujourd'hui.

Enfin nous remercions toutes personnes de près ou de loin qui ont participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

ملخص

مشروع التخرج هذا مخصص لدراسة تأثير الحمل على دورة التباطؤ لمحول أحادي الطور. تم تقديم دراسة عامة للخصائص الكهرومغناطيسية لمحول أحادي الطور ثم إجراء محاكاة باستخدام برنامج ATP_EMTP لتمكيننا من تصور العلاقة بين دورة التباطؤ والحمل في الحالة الانتقالية. يترتب على هذه العلاقة انخفاض في المساحة وتحرك دورة التباطؤ مع انخفاض الحمل.

الكلمات المفتاحية: الحمل، محول أحادي الطور، دورة التباطؤ، الحالة الانتقالية، ATP / EMT

Résumé

Ce mémoire de master est consacré pour l'étude de l'influence de la charge sur le cycle d'hystérésis de transformateur monophasé. Une étude générale des caractéristiques électromagnétiques d'un transformateur monophasé est présentée, ensuite une simulation est réalisée à l'aide du programme ATP_EMTP pour pouvoir visualiser la relation entre le cycle d'hystérésis et la charge dans le régime transitoire. Cette relation se traduit par une diminution de la surface et un déplacement du cycle d'hystérésis suivant la diminution de la charge.

Mots-clés : Charge, transformateur monophasé, cycle d'hystérésis, régime transitoire, ATP/EMTP.

Abstract

This master's thesis is dedicated to studying the influence of the load on the hysteresis cycle of a single-phase transformer. A general study of the electromagnetic characteristics of a single-phase transformer is presented, followed by a simulation conducted using the ATP_EMTP program to visualize the relationship between the hysteresis cycle and the load in the transient regime. This relationship results in a decrease in the surface area and a displacement of the hysteresis cycle as the load decreases. **Keywords:** load, single phase transformer, hysteresis loop, transient regime, ATP/EMTP

Table des Matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Table des Matières.....	III
Liste des Figures.....	VI
Liste des Tableaux.....	VIII
Listes des Acronymes et Symbole.....	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs

I.1 . Introduction.....	3
I.2 . Définition	3
I.3 . Historique.....	3
I.4 . Constituant de transformateur.....	4
I.4.1 . Enroulement.....	4
I.4.1.1 . Enroulement primaire	4
I.4.1.2 . Enroulement secondaire.....	4
I.4.2 . Circuit magnétique (le noyau)	4
I.4.3 . Isolation.....	5
I.5 . Fonctionnement du transformateur	5
I.5.1 . Principe du fonctionnement	5
I.5.2 . Fonctionnement à vide.....	5
I.5.3 . Fonctionnement en charge	6
I.6 . Schéma électrique équivalent	6
I.7 . Circuit simplifié dans l'hypothèse de KAPP.....	7
I.8 . Modélisation du transformateur.....	8
I.8.1 . Transformateur monophasé à basse fréquence.....	8
I.8.2 . Model électrique du transformateur à haute fréquence.....	10
I.8.2.1 . Modèle universel EMTP	10
I.8.2.2 . Modèle du RESEL	10
I.9 . Transformateur idéal.....	11
I.10 . Transformateur réel.....	12
I.11 . Essai sur le transformateur.....	13

I.11.1 . Essai à vide	13
I.11.2 . Essai en court-circuit.....	14
I.12 . Pertes dans un transformateur	14
I.12.1 . Pertes par effet joule	15
I.12.2 . Pertes magnétiques.....	15
I.12.2.1 . Pertes par hystérésis	15
I.12.2.2 . Pertes par courants de Foucault	15
I.13 . Types des transformateurs	15
I.14 . Conclusion	16

Chapitre II : Courant magnétisant d'appel et cycle d'hystérésis

II.1 . Introduction	17
II.2 . Régime permanent et régime transitoire.....	17
II.2.1 . Régime permanent.....	17
II.2.2 . Régime transitoire.....	18
II.3 . Magnétisation du transformateur	18
II.3.1 . Champ magnétique	18
II.3.2 . Intensité du champ magnétique	18
II.3.3 . Champ magnétique rémanent	19
II.3.4 . Courant magnétisant	20
II.3.4.1 . Facteurs qui influencent sur l'amplitude et la durée de courant magnétisant ...	20
II.4 . Courant d'appel	20
II.4.1 . Définition.....	20
II.4.2 . Apparition de courant d'appel	21
II.4.3 . Effets du courant d'appel	21
II.4.4 . Réduction du courant d'appel.....	21
II.5 . Flux rémanent	22
II.5.1 . Définition.....	22
II.5.2 . Origine du flux rémanent.....	22
II.5.3 . Création du flux rémanent	23
II.5.4 . Effets du flux rémanent	23
II.5.5 . Calcul analytique du flux rémanent.....	23
II.6 . Hystérésis.....	24
II.6.1 . Courbe de première aimantation – B(H)	25

II.7 . Courant d'appel et Flux rémanent	26
II.8 . Coupure d'un courant en régime établi	29
II.9 . Saturation magnétique dans les transformateurs	29
II.10 . Mise sous tension d'un transformateur	30
II.11 . Effets de l'instant de commutation sur le courant d'appel	31
II.12 . Conclusion	32

Chapitre III : Simulation de l'influence de la charge sur le cycle d'hystérésis

III.1 . Introduction	33
III.2 . L'ATP-EMTP.....	33
III.3 . Matériels utilisés	34
III.4 . Model de transformateur utilisé	34
III.5 . Identification des paramètres du transformateur d'essai	34
III.5.1 . Essai à vide.....	35
III.5.2 . Essai en court-circuit	36
III.6 . Saturation des branches magnétisantes	38
III.7 . Simulation de courant d'appel et le cycle d'hystérésis	39
III.7.1 . Premiers cas : Transformateur à vide	40
III.7.2 . Deuxième cas : transformateur en charge	42
III.7.2.1 . Une charge purement résistive	42
III.7.2.2 . Une charge RL	45
III.7.2.3 . Une charge RLC.....	48
III.7.2.4 Charge RL (L non linéaire)	51
III.8 . Conclusion.....	53
Conclusion generale.....	54
Références bibliographiques.....	55

Liste des Figures

Figure I.1. Transformateur à vide.....	6
Figure I.2. Transformateur en charge.....	6
Figure I.3. Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel.....	7
Figure I.4. Schéma électrique équivalent d'un transformateur en charge.	8
Figure I.5. Schéma simplifié de KAPP.	8
Figure I.6. Modélisation d'un transformateur monophasé sans pertes fer, sans saturation.	9
Figure I.7. Modélisation d'un transformateur monophasé avec pertes fer, sans saturation.	9
Figure I.8. Schéma d'un transformateur monophasé avec saturation et pertes fer.	9
Figure I.9. Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP	10
Figure I.10. Représentation de circuit électrique.	11
Figure I.11. Représentation de circuit magnétique.....	11
Figure I.12. Transformateur parfait.....	12
Figure I.13. Schéma équivalente d'un essai à vide.	13
Figure I.14. Schéma équivalent d'un essai en court-circuit.	14
Figure II.1. Régime continu, association générateur récepteur.....	17
Figure II.2. Régime continu et variables du courant de ligne.	18
Figure II.3. Cycle d'hystérésis.	19
Figure II.4. Cas typique d'un enclenchement aléatoire –courant d'appel.....	21
Figure II.5. Processus d'hystérésis.....	25
Figure II.6. Points clés le long d'une boucle d'hystérésis normale.	25
Figure II.7. Courbe de première aimantation.	26
Figure II.8. Flux et courant magnétisant en régime établi Régime permanent $\lambda < \lambda_S$	27
Figure II.9. Flux et courant magnétisant en régime transitoire $\lambda > \lambda_S$	27
Figure II.10. Deux régimes sur la courbe de saturation.	28
Figure II.11. Flux et courant à la mise hors tension.	29
Figure II.12. B(H) typique ou boucle d'hystérésis d'un Matériau magnétique doux.	30
Figure II.13. Courant d'appel pour un instant de commutation égal à 0.3048s.	31
Figure III.1. Model de transformateur utilisé dans l'étude.	34
Figure III.2. Montage de l'essai à vide du transformateur monophasé.....	35
Figure III.3. Montage de l'essai en court-circuit d'un transformateur monophasé.....	36
Figure III.4. Caractéristique de la résistance de branche magnétisant.	39
Figure III.5. Courbe de saturation de l'inductance magnétisante.	39

Figure III.6. Représentation du transformateur à vide sur ATP-EMTP.....	40
Figure III.7. Régime permanent à vide.	40
Figure III.8. Régime transitoire à vide.	41
Figure III.9. Cycle d'hystérésis en régime permanent à vide.....	41
Figure III.10. Cycle d'hystérésis en régime transitoire à vide.	42
Figure III.11. Transformateur avec une charge résistive.	43
Figure III.12. Forme d'onde du courant primaire avec une charge résistive.	43
Figure III.13. Cycle hystérésis en charge purement résistive.....	44
Figure III.14. Cycle hystérésis en charge purement résistive (3 cycles).....	44
Figure III.15. Transformateur avec une charge RL.....	45
Figure III.16. Forme d'onde du courant primaire avec une charge RL.....	46
Figure III.17. Cycle hystérésis en charge RL.....	47
Figure III.18. Cycle hystérésis en charge RL (3 cycles).	47
Figure III.19. Transformateur avec une charge RLC.	48
Figure III.20. Forme d'onde du courant primaire avec une charge RLC.	49
Figure III.21. Cycle hystérésis en charge RLC.	50
Figure III.22. Cycle hystérésis en charge RLC (3 cycle).	50
Figure III.23. Charge RL (L non linéaire).....	52
Figure III.24. Cycle hystérésis en charge RL (L non linéaire).....	53
Figure III.25. 3 Premières Cycle hystérésis en charge RL (L non linéaire).....	53

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Paramètre de schéma électrique équivalent.	7
Tableau III.1. Données de la plaque signalétique du transformateur.	34
Tableau III.2. Résultats de l'essai à vide.	35
Tableau III.3. Résultats du l'essai court-circuit.	36
Tableau III.4. Caractéristiques calculées en valeurs.	38
Tableau III.5. Caractéristiques calculées en valeurs.	52

Listes des Acronymes et Symbole

● Acronymes

EMTP	Electromagnétique Transient Program
ATP	Alternative Transient Program
HTA	Haute tension A
HTB	Haute tension B
f.é.m.	Force électromotrice
RLC	Charge contient (résistance + inductance + capacité)
RL	Charge contient (résistance + inductance)
HT	Haute tension
THT	Très haute tension

● Symboles

P_1	Puissance primaire
P_2	Puissance secondaire
N_1	Nombre de spires des enroulements primaire
N_2	Nombre de spires des enroulements secondaire
I_1	Courant primaire
I_2	Courant secondaire
I_{1n}	Courant nominale primaire
I_{2n}	Courant nominale secondaire
V_1	Tension primaire
V_2	Tension secondaire
V_{1n}	Tension nominale primaire
V_{2n}	Tension nominale secondaire
I_0	Courant à vide
E_1	Tension à vide idéales primaire.
E_2	Tension à vide idéales secondaire.
R_1	Resistance primaire
R_2	Resistance secondaire
L_1	Inductance de fuites des enroulements primaire.
L_2	Inductance de fuites des enroulements secondaire.
R_m	Pertes fer
X_m	Impédance magnétisante
V_{20}	Tension secondaire à vide
m	Rapport de transformation
R_{eq}	Résistance équivalent
L_{eq}	Inductance équivalent
\Re	Réductance
φ_1	Flux dans l'enroulements primaire.
φ_2	Flux dans l'enroulements secondaire.

f	Fréquence
B	Induction magnétique
H	Champ magnétique
μ_r	Perméabilité relative
ρ	Résistivité
A	Ampère
I_m	Courant magnétisante (A)
I_r	Courant réactif
I_a	Courant actif
I_{10}	Courant de branche magnétisante
L_m	Inductance magnétisante
V_{max}	Valeur maximale de la tension
V_{eff}	Valeur efficace de la tension
P_{10}	Puissance active à vide (W)
P_{1cc}	Puissance active en court-circuit
P_J	Perte joule (W)
P_h	Perte par hystérésis
B_{max}	Valeur maximale de la densité de flux
K	Constante qui dépend du matériau,
P_f	Perte fer
φ	Flux
μ	Perméabilité
φ_r	Flux rémanent
H_m	Champ magnétique
w	Vitesse angulaire (rad/s)
λ_s	Flux de saturation
λ	Flux
W	Watt
V	Volt
R_s	Résistance ramenant au primaire
X_s	Réactance ramenant au primaire
l	Longueur du trajet magnétique en mètre.
S	Surface de bobine
Φ_{max}	Valeur maximale de flux
H_{max}	Valeur maximale de Champ magnétique
T	Période
t_0	Temps primaire

Introduction générale

Les transformateurs sont des dispositifs électriques utilisés pour modifier ou transformer les niveaux de tension entre deux circuits. Cependant, la puissance transférée entre les circuits reste inchangée, à l'exception d'une perte généralement négligeable qui se produit lors du processus. Ce transfert de puissance se produit uniquement en présence d'un courant alternatif ou de conditions électriques transitoires. Les transformateurs sont considérés comme l'un des éléments non-linéaires les plus couramment utilisés dans les systèmes d'alimentations. Cette non-linéarité est due aux caractéristiques de magnétisation du noyau de fer du transformateur.

Les transformateurs de puissance sont l'une des unités les plus importantes du réseau électrique, dans la production, le transport et la distribution, car ils permettent de convertir la tension en différents potentiels, il peut réduire le courant sur la ligne de transmission en augmentant la tension et réduire la perte et la taille du conducteur.

Le fonctionnement du disjoncteur peut entraîner des transitoires sur le transformateur de puissance. Lorsque le disjoncteur se ferme de manière incontrôlée sur un transformateur à vide, cela peut générer un courant à forte composante continue, connu sous le nom de "courant d'appel". L'amplitude de ces courants peut atteindre la valeur maximale du courant de court-circuit. La principale raison de l'apparition de ces courants est le flux magnétique agité qui existe généralement dans le noyau magnétique lorsque le transformateur de puissance est déconnecté et que le noyau ferromagnétique est saturé.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence de la charge sur le cycle d'hystérésis d'un transformateur monophasé de 2 kVA. Cette étude a été réalisée en utilisant un circuit de simulation à vide et en charge sous le logiciel ATP/EMTP (Alternative Transient Program).

En raison du fonctionnement du disjoncteur, le transformateur de puissance peut subir des régimes transitoires.

Pour réaliser cette étude, le présent travail contient trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le transformateur électrique monophasés, leur modélisation à haute fréquence et à basse fréquence, son principe de fonctionnement et fonctionnement à vide et en charge, les lois fondamentales électriques, magnétiques constituant, différents types, leurs pertes (pertes magnétiques et pertes joules).

Le deuxième chapitre est consacré pour l'étude du régime transitoire et permanent. Ensuite une présentation des quelques notions de courant d'appel (définition, caractéristiques et leurs effets sur les transformateurs), des lois et connaissances de base de magnétisation des matériaux, avec la non-linéarité des matériaux et le courant d'appel, avec la non-linéarité des circuits

Le troisième chapitre sert à identifier les paramètres du transformateur à l'aide de l'essai à vide et en court-circuit, les caractéristiques de la branche magnétisante (l'inductance et la résistance), une simulation sera effectuée pour aboutir à une étude spécifique de l'influence de la charge sur la surface et la position du cycle d'hystérésis d'un transformateur monophasé à l'aide du logiciel ATPDraw. En vue d'observer les changements de la forme et de l'emplacement du cycle d'hystérésis causés par les différents types de charge (R, RL et RLC) suit à une variation de valeur de cette charge, ensuite terminer ce travail par une conclusion générale qui résume les conséquences et résultats obtenus.

Chapitre I :

Généralités sur les transformateurs

I.1. Introduction

Le transformateur est un composant électrique essentiel dans les réseaux électriques, car il permet la transmission de l'énergie électrique à différents niveaux de tension, présents dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité.

Ce chapitre abordera des généralités sur les transformateurs. Où il commence par définir le transformateur, retracer son historique et description sa structure. Ensuite, examine son fonctionnement à vide et en charge, ainsi que l'étude de la modélisation des transformateurs à basses fréquences et hautes fréquences. Nous traiterons également des divers types de transformateurs existants.

I.2. Définition

Le transformateur est une machine électrique statique conçue pour convertir une tension (ou un courant) alternative en une autre tension (ou courant) alternative de même fréquence, mais d'amplitude différente, afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation. On peut également le considérer comme un convertisseur statique à induction comportant deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et conçus pour convertir les paramètres (tension, intensité de courant, fréquence, nombre de phases) de l'énergie électrique en courant alternatif par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique. [1]

I.3. Historique

En 1831, Michael Faraday a créé l'élément de base du premier transformateur, mais il ne l'a utilisé que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique, sans envisager les futurs usages de cette invention. Ce n'est qu'en 1881 que Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs ont présenté le premier générateur secondaire, qu'ils ont ensuite vendu à la société américaine Westinghouse. Ce dispositif pourrait avoir été le premier transformateur de puissance jamais mis en pratique. Leur invention a été adoptée comme système d'éclairage électrique à Turin en 1884, mais les premiers appareils utilisaient un noyau ouvert de fer qui a rapidement été remplacé par un noyau circulaire plus efficace doté d'un circuit magnétique fermé. William Stanley, ingénieur chez Westinghouse, a ensuite construit le premier appareil pratique en 1885, après que George Westinghouse ait acquis les brevets de Gaulard et Gibbs. Ce transformateur utilisait des plaques de fer enclenchées en forme de E pour former le noyau. Cette version a été commercialisée pour la première fois en 1886. En 1885, les ingénieurs hongrois Károly Zipernowsky, Ottó Bláthy et Miksa Déri ont créé un modèle très

efficace basé sur celui de Gaulard et Gibbs pour la société Ganz de Budapest. Enfin, en 1889, l'ingénieur russe Mikhail Dolivo-Dobrovolsky a développé le premier transformateur triphasé. [2]

I.4. Constituant de transformateur

Pour assurer son bon fonctionnement, un transformateur de puissance est constitué de plusieurs composants. Des éléments de base et des accessoires variés visant à améliorer ses performances. Les éléments de base du transformateur comprennent :

I.4.1. Enroulement

Les enroulements d'un transformateur sont constitués de bobinages qui ont des dimensions précises, afin d'éviter les effets des contraintes. Ces bobinages peuvent être réalisés à partir de feuillards ou de fils ronds, en méplat de cuivre ou d'aluminium. [4]

Le transformateur se compose d'un enroulement primaire et d'un enroulement secondaire, qui assurent la transmission de la puissance par des phénomènes électromagnétiques.

I.4.1.1. Enroulement primaire

L'enroulement primaire a pour rôle de générer un champ magnétique alternatif. La tension à ses bornes est élevée, tandis que l'intensité du courant qui le traverse est faible, ce qui nécessite une petite section de conducteur et un grand nombre de spires. [5]

I.4.1.2. Enroulement secondaire

L'enroulement secondaire, quant à lui, est responsable de la production du courant induit. Celui-ci se caractérise par une forte intensité, ce qui impose une section des conducteurs relativement importante et un nombre de spires limité. [5]

I.4.2. Circuit magnétique (le noyau)

Le noyau d'un système magnétique est constitué d'un circuit magnétique, qui est un agencement de tôles d'acier magnétique isolées les unes des autres. L'objectif de ce circuit est de canaliser le flux magnétique à travers le système. Les matériaux magnétiques utilisés pour construire ce circuit doivent avoir une perméabilité relative élevée, être capables de tolérer des niveaux élevés d'induction à saturation, et présenter des pertes acceptables à des fréquences de travail données. En pratique, cela signifie que ces matériaux doivent avoir une résistivité suffisamment élevée pour limiter les pertes par courants de Foucault, d'autant plus importante que la fréquence de travail est élevée. [6]

I.4.3. Isolation

Le transformateur composé d'un système d'isolants cellulaires, tels que les papiers isolants, et d'huile. Ces matériaux ont des propriétés complémentaires qui permettent d'assurer l'isolation entre les différentes spires, les bobinages ainsi que l'isolation entre les bobinages et la masse, tout en conférant à l'ensemble une résistance mécanique suffisante pour supporter les contraintes mécaniques et évacuer les pertes de chaleur générées dans les enroulements en cuivre.

Pour garantir une isolation diélectrique fiable, qu'elle soit solide ou liquide, le système d'isolation doit permettre au transformateur de résister à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour cela, il est essentiel que le champ électrique soit homogénéisé à travers le transformateur. [7]

I.5. Fonctionnement du transformateur

I.5.1. Principe du fonctionnement

Le transformateur est constitué de deux enroulements l'un jouant le rôle de primaire et l'autre de secondaire. Le primaire est alimenté par une tension variable qui génère un flux magnétique variable dans le circuit magnétique. Ce dernier conduit de manière optimale les lignes de champ magnétique créées par le primaire dans les spires du secondaire, conformément à la loi de Faraday. Ainsi, un flux magnétique variable induit une force électromotrice dans le secondaire du transformateur. Il convient de noter que le transformateur ne peut pas fonctionner si alimenté par une tension continue, la tension primaire doit donc être variable pour induire une f.é.m. au secondaire. Il est possible de reverser le rôle de chaque bobinage, et le transformateur peut être utilisé comme un élévateur ou un abaisseur de tension. [8]

I.5.2. Fonctionnement à vide

Lorsqu'aucune charge n'est connectée au secondaire, le transformateur fonctionne à vide. Le circuit correspondant est le suivant :

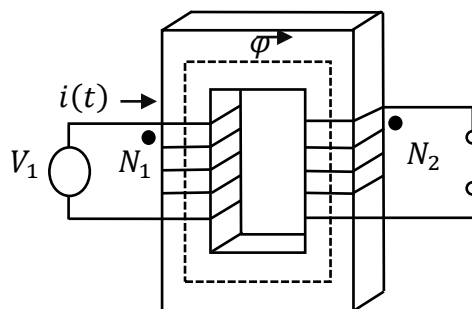


Figure I.1. Transformateur à vide

Ainsi, le courant dans le bobinage secondaire sera nul, tandis que le bobinage primaire sera soumis à un courant faible I_0 , appelé courant à vide, représentant généralement de 2 à 10% du courant nominal. Ce courant est responsable de l'alimentation des pertes fer telles que l'hystérésis et les pertes par courants de Foucault dans le noyau, ainsi que d'une quantité très faible de pertes de cuivre dans le bobinage primaire. [5]

I.5.3. Fonctionnement en charge

Lorsqu'on branche une charge au secondaire, avec une source sinusoïdale, on obtient le circuit suivant figure I.2

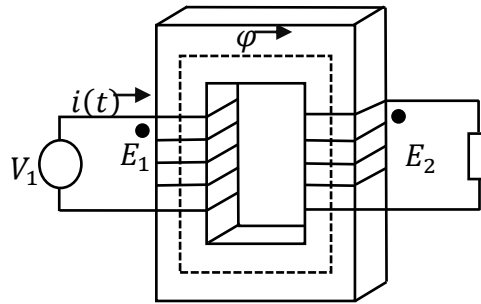


Figure I.2. Transformateur en charge.

Le courant traversé par le secondaire transmet alors un champ magnétique opposé au champ magnétique généré par le primaire. Cela augmente le courant dans le primaire, la puissance produite par le secondaire est presque égale à la puissance consommée par l'enroulement primaire. Strictement parlant, il y a une certaine perte entre la puissance consommée par l'enroulement primaire et la puissance consommée par l'enroulement secondaire, mais au moins en théorie, on peut dire :

$$P_1 = P_2 \quad (\text{I. 1})$$

Les flux magnétiques générés par les courants primaires et secondaires s'annulent. Le flux magnétique produit par la bobine est proportionnel au courant et au nombre de spires, ce qui peut être compris comme : [5]

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (\text{I. 2})$$

I.6. Schéma électrique équivalent

Un transformateur réel, monophasé, peut être électriquement modélisé selon la Figure I.3

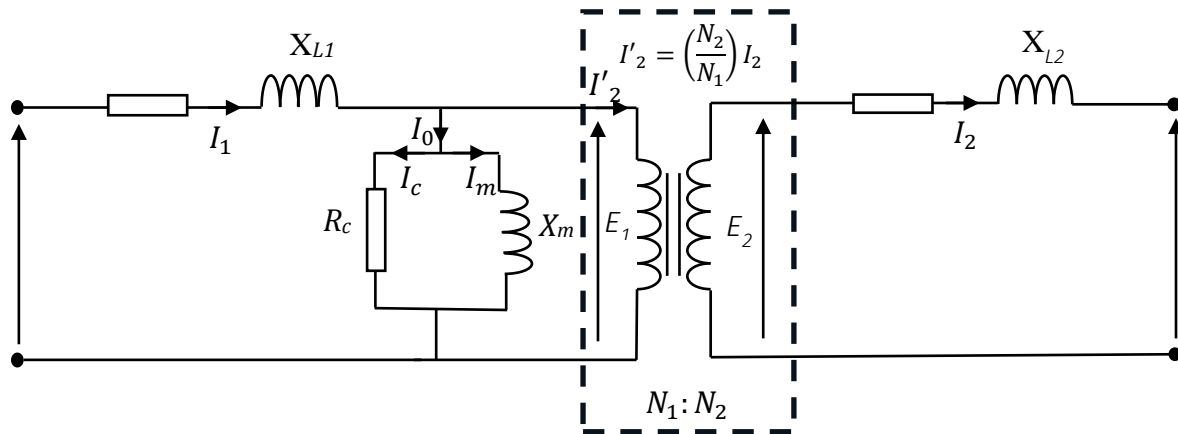


Figure I.3. Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel.

Les paramètres de schéma sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau I.1. Paramètre de schéma électrique équivalent.

V_1 Et V_2	Tension primaire et secondaire
I_1 Et I_2	Courant primaire et secondaire
I_0	Courant à vide
E_1 Et E_2	Tension à vide idéales primaire et secondaire
N_1 Et N_2	Nombre de spires des enroulements primaire et secondaire
R_1 Et R_2	Résistance des enroulements primaire et secondaire
L_1 Et L_2	Inductance de fuites des enroulements primaire et secondaire
R_m	Pertes fer
X_m	Réactance magnétisante

Les valeurs typiques de ces paramètres varient en fonction de la conception spécifique d'un transformateur donné. Les éléments V_1 , V_2 , N_1 et N_2 déterminent les tensions nominales et le rapport de transformation à vide. Les éléments R_1 et R_2 sont les résistances électriques des enroulements, et les pertes Joule sont principalement causées par le passage des courants I_1 et I_2 de charge dans ces résistances. Les réactances L_1 et L_2 correspondent aux flux de fuite de chaque enroulement. [9]

I.7. Circuit simplifié dans l'hypothèse de KAPP

L'hypothèse de KAPP, simplifie le modèle du transformateur en supposant que la résistance et la réactance magnétisante sont négligeables. En conséquence, les tensions primaires et secondaires à vide sont proportionnelles au rapport de transformation m . Même le courant d'aimantation I_m est négligeable. En conséquence, les courants primaires et secondaires I_1 et I_2 sont également proportionnels, avec un rapport de transformation m . [5]

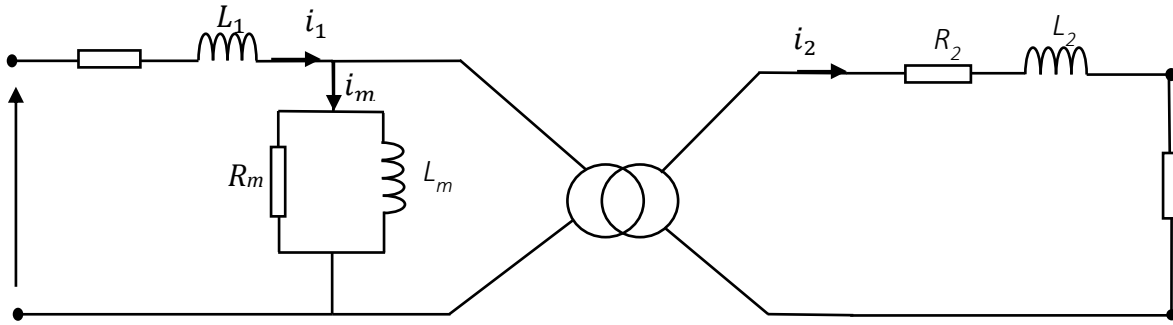


Figure I.4. Schéma électrique équivalent d'un transformateur en charge.

Il est également possible de simplifier le schéma du transformateur en ramenant toutes les branches à un circuit RL série au secondaire, ce qui permet de montrer que le secondaire se comporte comme une source de tension de f.é.m. [5]

$$V_{20} = mV_1 \quad (\text{I. 3})$$

En série avec une résistance

$$R_{eq} = R_2 + m^2 R_1 \quad (\text{I. 4})$$

Et une inductance

$$L_{eq} = L_2 + m^2 L_1 \quad (\text{I. 5})$$

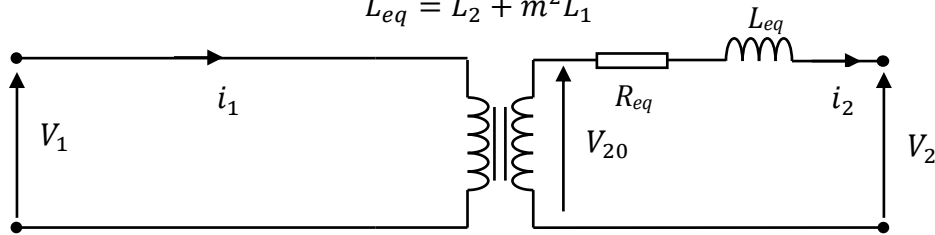


Figure I.5. Schéma simplifié de KAPP.

I.8. Modélisation du transformateur

I.8.1. Transformateur monophasé à basse fréquence

La modélisation d'un transformateur monophasé à basse fréquence repose sur différents principes. L'un de ces principes est de prendre en compte l'état du circuit magnétique, en tenant compte de la présence ou de l'absence de pertes. Lorsque le transformateur monophasé fonctionne dans la zone linéaire sans pertes, le schéma équivalent comprend des impédances linéaires et un rapport de transformation, comme indiqué dans la figure I.6 Chacun de ces composants à sa propre représentation dans le schéma équivalent. [4]

- L'inductance L_1 modélise le flux magnétique de fuite au niveau du circuit primaire.
- L'inductance L_2 modélise le flux magnétique de fuite au niveau du circuit secondaire.
- La résistance R_1 modélise les pertes par effet joule et les pertes supplémentaires au primaire.

- La résistance R_2 modélise les pertes par effet joule et les pertes supplémentaires au primaire.
- L'inductance de magnétisation représentée par la branche parallèle indique le flux magnétique canalisé.

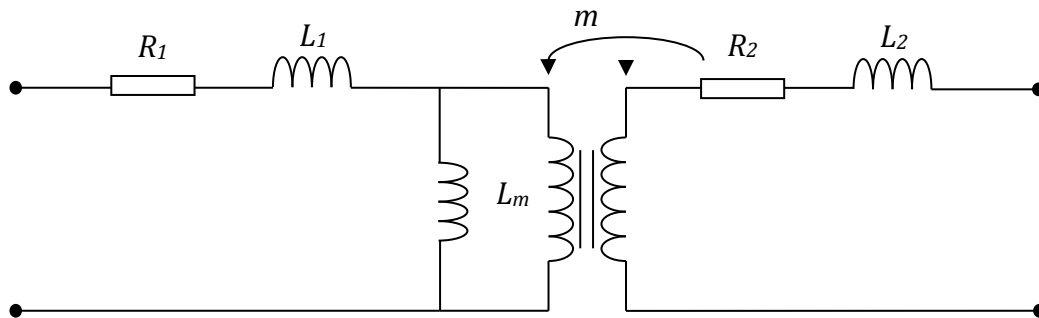


Figure I.6. Modélisation d'un transformateur monophasé sans pertes fer, sans saturation.

L'existence de pertes fer impose une résistance magnétisante qui doit être branchée en parallèle avec l'inductance magnétisante comme c'est montré dans la figure suivante.

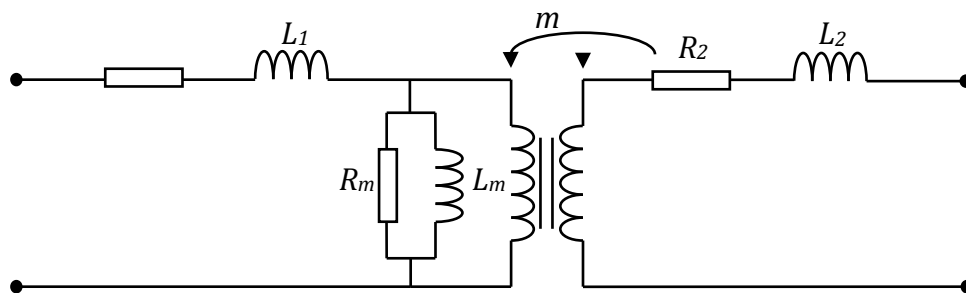


Figure I.7. Modélisation d'un transformateur monophasé avec pertes fer, sans saturation.

Cependant, si le transformateur est saturable, le modèle de base adapté à tous les phénomènes transitoires qui peuvent apparaître comprend essentiellement une inductance magnétisante non-linéaire branché en parallèle avec une résistance non-linéaire qui modélise les pertes fer. [4]

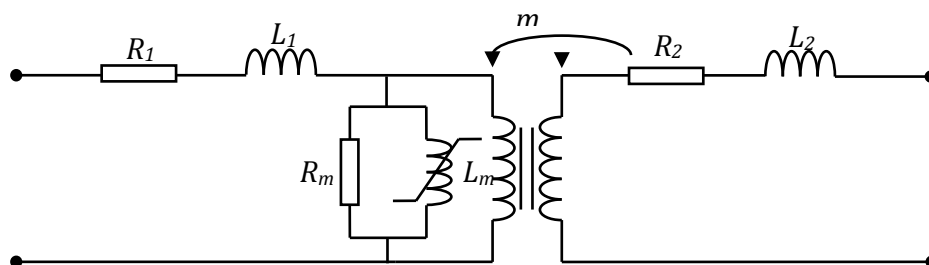


Figure I.8. Schéma d'un transformateur monophasé avec saturation et pertes fer.

I.8.2. Model électrique du transformateur à haute fréquence

I.8.2.1. Modèle universel EMTP

Le code informatique EMTP (Electromagnétique Transient Program) est largement utilisé pour simuler le comportement du réseau électrique en régime transitoire. Ce code est un standard dans la recherche de temps et de fréquence. Il est souvent utilisé pour simuler le comportement d'un transformateur, qui peut être représenté à l'aide de schémas électriques équivalents, dont :

- Transformateur parfait ;
- La branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer ;
- Inductance de fuite de groupe (couche ou bobine) ;
- Enfin, la résistance d'enroulement et le condensateur de couplage. [10]

L'un des principaux avantages de l'utilisation du modèle EMTP réside dans la possibilité d'effectuer des études d'interaction du transformateur avec le réseau dans des configurations quasi-réelles, en prenant en compte la présence de protections et d'autres équipements. En effet, outre les éléments linéaires tels que les résistances et les inductances, ce modèle permet également de prendre en compte les éléments non-linéaires, tels que les parafoudres. De cette manière, il est possible d'obtenir des résultats plus précis et plus représentatifs des conditions réelles du système étudié. [10]

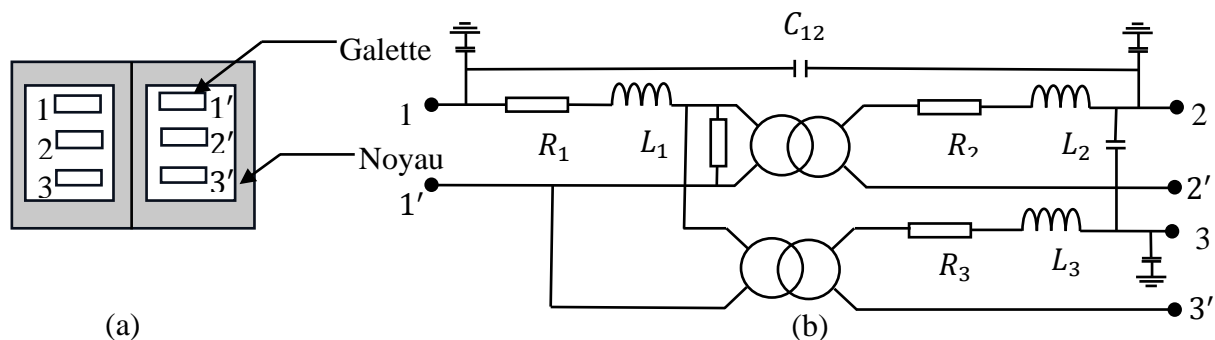


Figure I.9. Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

a) Coupe transversale du transformateur.

b) Circuit équivalent.

I.8.2.2. Modèle du RESEL

Le programme conversationnel RESEL a été développé pour faciliter l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques, avec un premier objectif qui était l'étude des phénomènes dans les transformateurs. La configuration de modélisation utilisée se fonde sur la représentation du comportement électrique ainsi que du comportement magnétique. [4]

- Le circuit électrique comporte des forces électromotrices, et plusieurs résistances et capacités.
- Le circuit magnétique se compose d'un réseau de ré reluctances et de forces magnétiques.

Les deux circuits sont interconnectés de manière que les sources du circuit électrique soient associées à la variation de flux du circuit magnétique, tandis que les sources du circuit magnétique sont associées aux courants dans les enroulements. [4]

Les figures suivantes illustrent la modélisation d'un transformateur à deux colonnes à l'aide de RESEL.

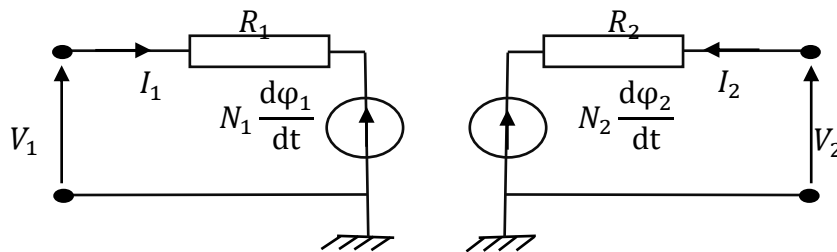


Figure I.10. Représentation de circuit électrique.

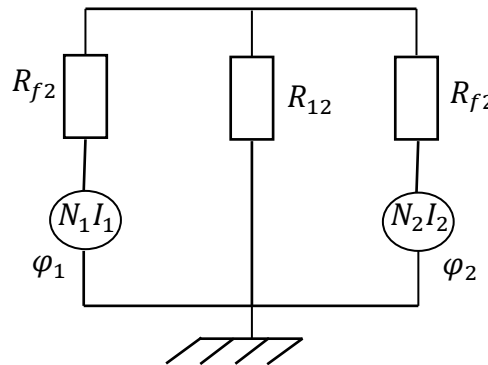


Figure I.11. Représentation de circuit magnétique.

I.9. Transformateur idéal

Le transformateur idéal ne présente aucune perte joules ($R_1 + R_2 = 0$) et dont le circuit magnétique est parfait, sans fuites magnétiques ($L_1 + L_2 = 0$) et avec une ré reluctance nulle ($\mathfrak{R}) = 0$. Dans ce cas, le circuit magnétique canalise parfaitement les lignes de champ et il n'est plus nécessaire de distinguer entre le flux de fuite et le flux commun à toutes les spires. Nous utiliserons la notation φ pour désigner le flux à travers une section droite du circuit magnétique. [11]

Les équations de fonctionnement deviennent alors :

$$V_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{I. 6})$$

$$V_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{I. 7})$$

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (\text{I. 8})$$

En désignant par $m = \frac{N_1}{N_2}$ le rapport de transformation du transformateur, ces équations se réduisent à

$$V_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{I. 9})$$

$$\frac{V_1}{V_2} = -m \quad (\text{I. 10})$$

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{1}{m} \quad (\text{I. 11})$$

Le symbole du transformateur parfait est donné par figure I.12

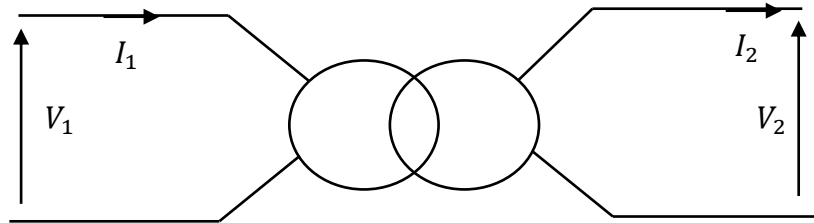


Figure I.12. Transformateur parfait.

I.10. Transformateur réel

Le transformateur réel ne présente pas les caractéristiques parfaites du transformateur idéal. Il faut donc tenir compte de certaines limites :

- Le noyau magnétique a une caractéristique $B(H)$ non-linéaire avec hystérésis, et une perméabilité non-finie ($\mu_r \neq \infty$).
- Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ($\rho \neq 0$).

En raison de ces caractéristiques, plusieurs sources de pertes sont déduites dans le transformateur, telles que :

- Étant donné que la perméabilité du noyau n'est pas infinie, la réluctance du noyau ne sera pas nulle, ce qui entraîne des fuites de flux :
 - Au primaire
 - Au secondaire

Il y a des pertes par hystérésis et des pertes par courants de Foucault.

La résistivité des bobines de cuivre crée une résistance interne au primaire et au secondaire.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

- Le rendement du transformateur est inférieur à 100%.
- Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours. La tension au secondaire variera également en fonction de la charge. [5]

I.11. Essai sur le transformateur

Pour déterminer les paramètres du schéma équivalent, et ainsi pouvoir prévoir le fonctionnement du transformateur en fonction de sa charge, on doit réaliser principalement deux essais.

I.11.1. Essai à vide

La bobine du secondaire du transformateur est déconnectée (ou "ouverte") du circuit électrique. Pour éviter un appel de courant important en régime transitoire, la tension d'entrée est progressivement augmentée de 0 jusqu'à sa valeur nominale de fonctionnement.

L'essai à vide permet le calcul des paramètres shunt (l'inductance et la résistance magnétisantes). [6]

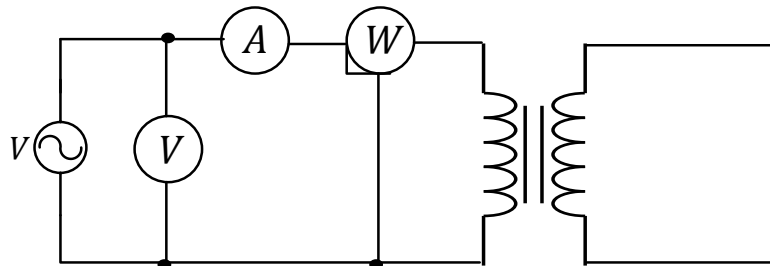


Figure I.13. Schéma équivalente d'un essai à vide.

Pour cet essai, on suppose les pertes Joules négligeables car en l'absence de charge, le courant appelé en régime permanent reste faible (courant magnétisant uniquement). La puissance mesurée par le Wattmètre correspond donc aux pertes fer.

On a $I_2 = 0$ allure $I'_1 = mI_2 = 0$ $I'_1 = I_{10} = I_{0a} + I_{0r}$ (courant magnétisant)

Et $V_1 = U_1 N$ $V_{20} = E_2$

Donc : $P_{10} = P_f$

$P_{10} = V_1 I_{0a} = V_1 I_0 \cos(\varphi_0)$ Et $Q_{10} = V_1 I_{0r} = V_1 I_0 \sin(\theta_0)$

Donc en remplaçant on aura :

$$R_m = \frac{V_1}{I_{0a}} = \frac{V_1}{I_0 \cos(\theta_0)} = \frac{V_1^2}{P_{10}} = \frac{V_1^2}{P_f} \quad (\text{I.12})$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_{0r}} = \frac{V_1}{I_0 \sin(\theta_0)} = \frac{V_1^2}{Q_{10}} \quad (\text{I.13})$$

$$L_m = \frac{U_1^2}{\omega \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2}} \quad (\text{I.14})$$

I.11.2. Essai en court-circuit

L'essai en court-circuit consiste à appliquer une tension réduite au primaire tout en gardant le secondaire court-circuité. Ensuite, la tension primaire est progressivement augmentée jusqu'à ce que le courant dans le secondaire atteigne sa valeur nominale. À ce stade, la tension, le courant et la puissance de court-circuit sont mesurés. [12]

Pour cet essai on détermine les paramètres série R_s et X_s résistance et l'inductance soit on les ramenant au primaire ou bien au secondaire.

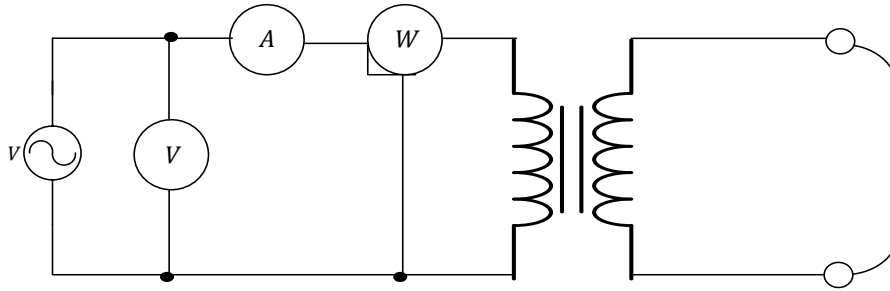


Figure I.14. Schéma équivalent d'un essai en court-circuit.

La tension d'entrée étant faible, on suppose les pertes fer négligeables (elles peuvent tout de même être prises en compte si on a fait un relevé de ces pertes en fonction de la tension d'entrée). [6].

On à $V_2 = 0$ et $P_f = 0$ donc $P_j = P_{1cc}$

$$P_{1cc} = R_s I_{2cc}^2 \Rightarrow R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} = \frac{m^2}{I_{1cc}^2} P_{1cc} \quad (\text{I.15})$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \Rightarrow X_s = \sqrt{\left(\frac{mV_{1cc}}{I_{2cc}}\right)^2 + R_s^2} \quad (\text{I.16})$$

I.12. Pertes dans un transformateur

La conversion de l'énergie dans un transformateur s'accompagne de diverses pertes qui déterminent le niveau de l'échauffement et le rendement.

I.12.1. Pertes par effet joule

Les pertes par effet joule dans les enroulements sont appelées également pertes cuivre, elles dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant. [6]

$$P_J = \sum_i R_i I_i^2 \quad (\text{I.17})$$

R_i : Résistance de l'enroulement i ($i = 1, 2$),

I_i : Intensité du courant qui le traverse.

I.12.2. Pertes magnétiques

Les pertes magnétiques se réfèrent à la quantité d'énergie perdue sous forme de chaleur lorsqu'un matériau magnétique est exposé à un champ magnétique alternatif. Ces pertes sont dues à deux mécanismes principaux : les pertes hystériques et les pertes par courants de Foucault.

I.12.2.1. Pertes par hystérésis

La surface du cycle d'hystérésis s'exprime en joule /m³. Elle correspond à un échauffement du matériau dû aux frottements des moments magnétiques.

Ainsi la puissance perdue par hystérésis est donnée par :

$$P_h \approx f V S_h \approx f V (B_{max})^2. \quad (\text{I.18})$$

Où

- f : est la fréquence de l'excitation magnétique
- V : est le volume de fer subissant le cycle
- S_h : est la surface du cycle qu'on admet être proportionnelle à $(B_{max})^2$.

On essaie de diminuer ces pertes en choisissant un matériau de surface S_h la plus faible possible.

I.12.2.2. Pertes par courants de Foucault

Les courants de Foucault sont induits dans la masse du matériau ferromagnétique, lorsque ce matériau est soumis à un champ d'induction variable. Ces courants provoquent par effet joule une dissipation d'énergie. Pour les réduire, on feuillette et on empile les tôles isolées entre elles. [13]

I.13. Types des transformateurs

Le domaine d'utilisation des transformateurs est extrêmement vaste, et les caractéristiques de construction des appareils varient en fonction de leur domaine

d'application. Cependant, le principe de fonctionnement reste identique pour tous les types de transformateurs. Divers types de transformateurs existent, parmi lesquels on peut citer : [14]

- Les transformateurs de puissance destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.
- L'autotransformateur destiné au réglage de la tension et à mettre en marche des moteurs alternatifs.
- Les transformateurs de mesure de tension et de courant.
- Les transformateurs de phase destinés à alimenter les installations à convertisseurs statiques (redresseurs...).
- Les transformateurs d'essais HT, THT.
- Les transformateurs de puissance spéciaux pour l'alimentation de fours, postes de soudage.
- Transformateur d'isolement qui crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire et il sert à assurer la sécurité d'une installation. Ces transformateurs ont le même nombre de spires au primaire et au secondaire.

I.14. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de rappeler les concepts généraux et les notions fondamentales du transformateur. Nous allons aborder sa définition, sa composition, les différentes pertes ainsi qu'une vue d'ensemble des principaux éléments qui le composent, tels que le circuit magnétique, l'enroulement et l'isolation. Nous examinerons également la modélisation du transformateur à basse fréquence et à haute fréquence, les différents types des transformateurs, le fonctionnement du transformateur à vide et en charge, ainsi que les essais réalisés sur le transformateur à vide et en court-circuit.

Chapitre II :

**Courant magnétisant d'appel et cycle
d'hystérésis**

II.1. Introduction

La mise sous tension d'un transformateur génère généralement des transitoires de courte durée, mais qui peuvent néanmoins entraîner un effet important et dangereux pour le transformateur.

Le développement d'un modèle précis de transformateur peut être très complexe en raison de la grande variété de conceptions de noyau et du fait que plusieurs paramètres du transformateur sont non linéaires.

Ces paramètres comprennent le noyau et l'enroulement, les inductances propres et mutuelles entre les enroulements, l'hystérésis et les pertes de courant de Foucault dans le noyau, les flux de fuite, les effets de peau et de proximité entre les enroulements, la saturation magnétique du noyau, ainsi que les effets capacitifs.

Ce chapitre présente de manière générale les paramètres nécessaires pour caractériser un transformateur de puissance.

II.2. Régime permanent et régime transitoire

II.2.1. Régime permanent

Le régime permanent est défini comme étant celui dans lequel les grandeurs électriques (courants et tensions) d'un circuit sont indépendantes du temps. Dans cette situation particulière, les inductances se comportent comme des courts-circuits, tandis que les condensateurs se comportent comme des circuits ouverts. Ainsi, dans le cas du courant continu, seules les résistances agissent en tant que récepteurs linéaires.

Les caractéristiques à retenir des régimes continus, en particulier en ce qui concerne l'aspect énergétique, peuvent être résumées par la représentation classique de l'association "générateur/récepteur", comme illustré dans la figure II.1. [15]

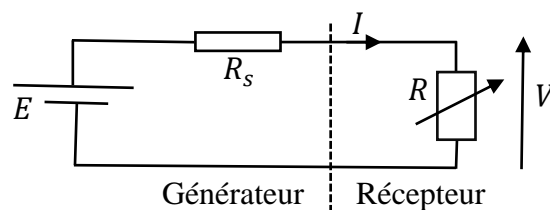


Figure II.1. Régime continu, association générateur récepteur

$$P = E * I \quad (\text{II.1})$$

$$P = V * I = R * I^2 \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Si } R = 0, \quad I_{\max} = \frac{E}{R_s}$$

$$\text{Si } R = \infty, \quad V_{\max} = E$$

Si $R = R_S$, $P_{max} = \frac{E^2}{4R_S}$

R : Charge.

R_S : Résistance de sortie du générateur.

II.2.2. Régime transitoire

Les évolutions particulières des grandeurs électriques se manifestent lors de modifications brusques des caractéristiques d'un circuit électrique. En général, ces événements ne se produisent pas de manière répétée, sinon on parlerait de régime entretenu périodique. [15]

On représente ci-dessous le relevé du courant de ligne lors de la mise sous tension d'un transformateur.

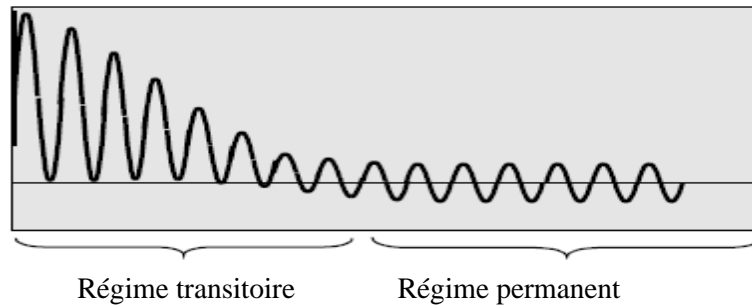


Figure II.2. Régime continu et variables du courant de ligne.

II.3. Magnétisation du transformateur

II.3.1. Champ magnétique

Le champ magnétique, symbolisé par le vecteur \vec{H} créé dans le vide soit par le déplacement de charges électriques ou soit par un aimant permanent. Le champ magnétique \vec{H} est entièrement déterminé par la source et s'exprime en unité d'ampères par mètre (A/m). Le calcul précis du champ magnétique fait appel à l'application du théorème d'Ampère [16] :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum N \cdot I \quad (\text{II.3})$$

N : nombre de spires.

I : le courant (A).

H : intensité du champ magnétique (A/m).

l : longueur du trajet magnétique en mètre.

II.3.2. Intensité du champ magnétique

Un matériau placé dans un champ magnétique externe génère une force. En conséquence, il s'aligne dans la direction du champ magnétique. Cette force magnétique

produite dans matériau est appelée aimantation induite. La force du champ magnétique est quantifiée par le champ magnétisant (H). L'intensité du champ magnétique est également appelée force magnétisante, notée H et mesurée en ampères par mètre carré (A/m²). L'équation qui décrit l'intensité du champ magnétique est la suivante [17] :

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{mmf}{l} \quad (\text{II.4})$$

II.3.3. Champ magnétique rémanent

Il est bien établi que lorsqu'un courant (I) circule dans une bobine entourant un noyau magnétique, la densité de flux (B) à l'intérieur du circuit magnétique augmente en fonction du champ magnétique (H). Si le flux initial est nul, cette augmentation suit la courbe (b) de la figure II.3, et la densité de flux atteint la valeur B_m pour un champ magnétique H_m .

Lorsque le courant (I) diminue et donc le champ magnétique (H) sont réduits jusqu'à disparaître, la densité de flux ne suit plus la même courbe, mais une courbe située au-dessus de (b). En effet, lorsque le champ est ramené à zéro, les domaines magnétiques qui ont été orientés sous l'influence du champ H_m ont tendance à conserver cette orientation. Cela est connu sous le nom de phénomène d'hystérésis. Ainsi, lorsque le champ magnétique H atteint zéro, une densité de flux subsiste et conserve une valeur B_r , appelée densité de flux rémanente.

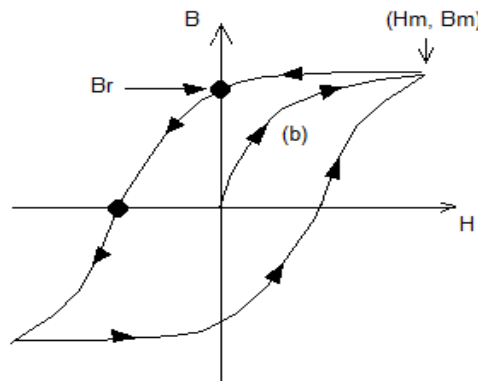


Figure II.3. Cycle d'hystérésis.

Revenons maintenant au cas du transformateur de puissance. Lorsqu'il est mis hors tension, son noyau conserve un état magnétique rémanent. Si le transformateur n'est pas complètement démagnétisé après la mise hors tension, cet état magnétique persiste jusqu'au moment de la remise sous tension, ce qui peut engendrer des phénomènes transitoires. [18]

II.3.4. Courant magnétisant

Le courant magnétisant est la composante réactive du courant à vide qui sert à exciter le circuit magnétique d'un transformateur. En régime linéaire, il existe sous une forme non sinusoïdale mais avec une valeur acceptable pour le fonctionnement du transformateur, sans contraintes particulières. Cependant, en régime transitoire, lorsque les paramètres du transformateur, tels que l'inductance, varient, le courant magnétisant peut atteindre une valeur de crête très élevée en cas de dépassement du flux lors d'une remise sous tension non contrôlée. Cette valeur exerce une influence sur le fonctionnement du transformateur. [19]

II.3.4.1. Facteurs qui influencent sur l'amplitude et la durée de courant magnétisant

Les facteurs qui influencent l'amplitude et la durée du courant magnétisant sont multiples [21] :

- La forme d'onde de tension au moment de la fermeture de disjoncteur.
- La valeur de flux magnétisant résiduel.
- Le signe de flux magnétisant résiduel
- La constitution du noyau de transformateur.
- La densité de flux de saturation.
- L'impédance totale du circuit d'alimentation.

II.4. Courant d'appel**II.4.1. Définition**

Lorsque le transformateur est mis hors tension, il génère peu de transitoires. Les transitoires se produisent principalement lors de la mise sous tension, c'est-à-dire lors de l'enclenchement aléatoire des transformateurs peuvent entraîner des courants d'appel de formes asymétriques, d'amplitudes très élevées, comme illustré dans la figure II.4. Ces courants sont riches en harmoniques et présentent une composante apériodique. [18]

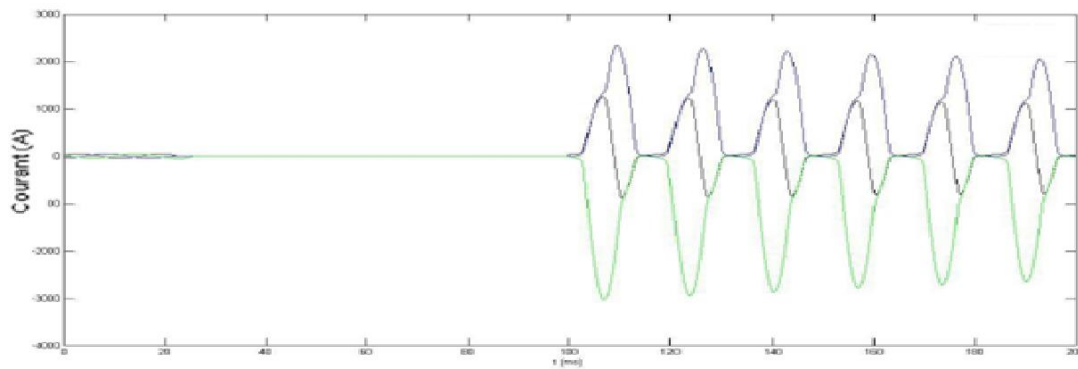


Figure II.4. Cas typique d'un enclenchement aléatoire –courant d'appel.

II.4.2. Apparition de courant d'appel

Lors de la mise sous tension d'un transformateur de puissance à vide, un phénomène transitoire appelé courant d'appel peut se produire au niveau du circuit primaire. L'excitation du circuit magnétique par le courant à vide fourni par la source d'alimentation génère un courant magnétisant et un flux dans le noyau. Ce courant et ce flux ont une forme sinusoïdale, avec une valeur inférieure à celle du flux de saturation.

Lorsque le noyau de fer atteint la saturation, un dépassement de flux se produit, ce qui correspond à l'existence d'une valeur de flux rémanent. Cela entraîne une augmentation très importante du courant magnétisant, qui est observée par le premier pic. [19]

II.4.3. Effets du courant d'appel [20]

- Injection de distorsion et de bruit dans l'alimentation principale.
- L'arc électrique (le courant électrique passe d'une connexion à l'autre) et la défaillance des composants du circuit comme les interrupteurs.
- Fonctionnement interrompu dans le fusible.
- Perturbation du courant et harmoniques dans le système et baisse des caractéristiques de qualité de l'énergie.
- Distribution irrégulière de la tension le long des enroulements du transformateur.
- Vibrations mécaniques et électriques le long des enroulements du transformateur.

II.4.4. Réduction du courant d'appel

Pour garantir une bonne qualité de l'énergie électrique transportée ou consommée, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour réduire le courant d'appel. Parmi ces techniques, on peut citer, par exemple [19] :

- Utilisation des résistances et des inductances de pré-insertion à l'ouverture et surtout à la fermeture des disjoncteurs HT.

- Utilisation d'un système qui se base sur la commande des instants de la remise sous tension.
- Utilisation des appareils supplémentaires pour effectuer la démagnétisation du noyau magnétique de transformateur.
- L'insertion des intervalles d'air dans le circuit magnétique du noyau pour réduire la perméabilité magnétique du noyau de fer.
- Insertion des résistances neutres : cette technologie propose des résistances de mise à la terre dont la connexion se fait avec le neutre de l'enroulement triphasé.
- Utiliser une technique qui consiste à enclencher la transformatrice triphasée phase par phase tout en sélectionnant avec soin l'instant d'enclenchement des trois phases.

II.5. Flux rémanent

II.5.1. Définition

La notion de flux est définie comme la quantité de propriété qui traverse une unité de surface. Elle est représentée par un vecteur. Les flux se manifestent sous la forme de lignes dans l'espace, connues sous le nom de lignes de flux ou de force. Ces lignes décrivent la direction et l'intensité du champ magnétique en chaque point. Le symbole utilisé pour représenter le flux magnétique est φ . [17]

II.5.2. Origine du flux rémanent

Lorsque le bobinage primaire, composé d'une bobine comportant N_1 spires et enveloppant le tore magnétique, est alimenté en courant, la densité de flux augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur d'aimantation correspondant à la saturation.

$$\varphi = B * S * \cos \theta \quad (\text{II.5})$$

Où :

φ =Flux (Wb).

B : induction magnétique (T)

S = Surface de bobine (m²).

θ = Angle entre la bobine et les lignes de champ en degré.

$$B = \mu * H \quad (\text{II.6})$$

$$B = \mu_0 * \mu_r * H \quad (\text{II.7})$$

μ : Perméabilité.

μ_r : Perméabilité relative.

μ_0 : Perméabilité de l'air.

Lorsque l'intensité du champ magnétique diminue jusqu'à atteindre zéro, la densité de flux diminue également et tend vers une valeur différente de zéro. Ce phénomène est dû au déplacement des parois de Bloch, qui ne se produit pas instantanément. Ainsi, il n'y a pas un retour complet à la situation initiale, mais un certain niveau d'induction subsiste, connu sous le nom d'induction rémanente. Dans les matériaux ferromagnétiques doux, cette valeur est généralement assez faible. [19]

II.5.3. Création du flux rémanent

Après le déclenchement de transformateur le réenclenchement peut entraîner un courant d'appel en raison de la valeur de flux rémanent. Le calcul de cette valeur se fait en utilisant différentes méthodes adaptées à diverses conditions. [5]

II.5.4. Effets du flux rémanent

Le flux rémanent dans un transformateur peut entraîner la génération de courants d'appel extrêmement élevés, ce qui crée une charge inutile sur le transformateur. Lorsqu'un transformateur est remis sous tension, un courant d'appel peut se produire, dépassant souvent le courant nominal. Si un flux rémanent persiste dans le circuit magnétique du transformateur, le premier courant de crête peut même atteindre le niveau du courant de court-circuit. Ces courants élevés peuvent avoir divers effets indésirables tels que des déformations mécaniques dans les enroulements, le déclenchement de fausses alarmes dans les dispositifs de protection, une augmentation du niveau de tension sur l'isolation.[21]

II.5.5. Calcul analytique du flux rémanent

L'équation suivante représente l'expression de flux imposé dans le circuit magnétique [6] :

$$\varphi(t) = \left[\frac{V\sqrt{2}}{N\omega}\right]\cos(\omega t + \alpha) + [\varphi_r - (V\sqrt{2})/n\omega\cos(\alpha)]e^{-t/\tau} \quad (\text{II.8})$$

$$t = \frac{L}{R} \quad (\text{II.9})$$

Le flux rémanent et l'angle de déphasage varient sous les deux cas suivants qui traduisent

Si $\varphi_r = \varphi_{\max}$ et $\alpha = 0$ sont remplacées dans l'équation (II.8), l'expression de flux devient sous l'expression suivante, en entraînant un appel de courant important. Alors ce cas est défavorable

$$\varphi(t) = \left[\frac{V\sqrt{2}}{N\omega}\right]\cos(\omega t) + [\varphi_{\max} - (V\sqrt{2})/n\omega]e^{-t/\tau} \quad (\text{II.10})$$

Si $\varphi_r = 0$ et $\alpha = \frac{\pi}{2}$ sont remplacées dans l'équation (II.10) comme c'est montré ci-dessous, il n'aura plus de phénomènes transitoires qui va apparaître.

$$\varphi(t) = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega\cos(\omega t + \pi/2)} \quad (\text{II.11})$$

φ_r : Le flux rémanent.

L : l'inductance de l'enroulement primaire.

α : L'instant de fermeture sur l'onde de tension.

II.6. Hystérésis

L'hystérésis, comme son nom l'indique, fait référence au fait que l'état actuel d'un matériau ferromagnétique dépend de son historique magnétique précédent. Cela est généralement représenté à l'aide d'un diagramme B(H).

En supposant un échantillon totalement démagnétisé et augmentant le champ magnétique à partir de zéro, le matériau suivra la courbe initiale comme illustré dans la figure II.5a. Cette courbe peut être poursuivie jusqu'à la saturation, notée B_0 . Si à un certain point le long de la courbe initiale, le champ est inversé et réduit, le matériau suivra une boucle d'hystérésis normale, comme indiqué dans la figure II.5b.

Si le champ magnétique est cyclé à plusieurs reprises entre $\pm H_{\max}$, le matériau continuera à suivre une boucle d'hystérésis normale déterminée par H_{\max} . Il existe toute une famille de telles boucles, comme indiqué dans la figure II.5c. La boucle principale, qui se produit lorsque B_{\max} atteint B_s , est la plus grande boucle. Ces boucles sont symétriques par rapport à l'origine. Si à un certain point le long d'une boucle normale, à l'exception des points extrêmes, le champ est inversé et cyclé à travers un cycle plus petit jusqu'à sa valeur d'origine avant que l'inversion ne se produise, une boucle mineure ou incrémentielle est tracée, comme indiqué dans la figure II.5d. En tenant compte des nombreuses autres possibilités d'inversion du champ, les trajectoires d'hystérésis résultantes peuvent devenir assez compliquées.

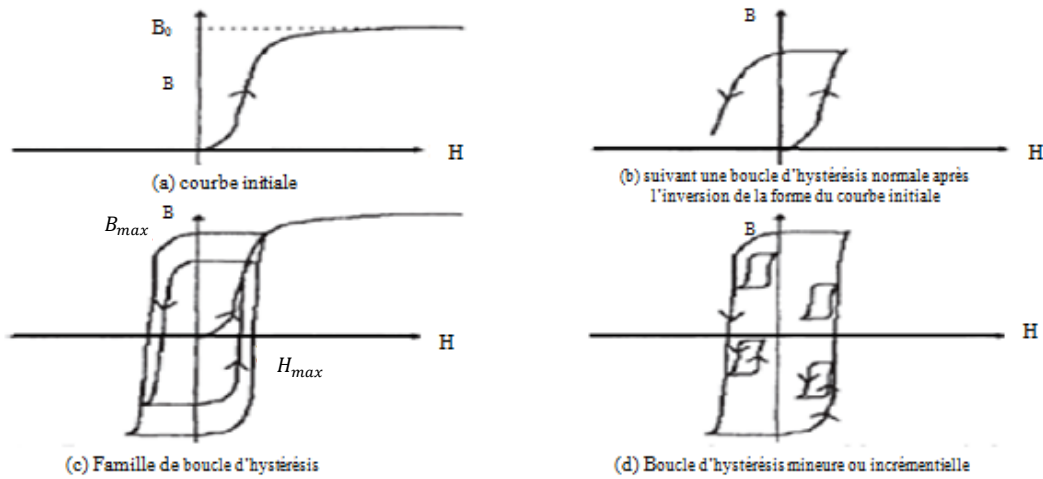


Figure II.5. Processus d'hystérésis.

Le chemin magnétique le plus important peut-être une boucle d'hystérésis normale, car elle est tracée lors d'un processus de magnétisation cyclique sinusoïdal. Plusieurs points clés le long d'un tel chemin sont illustrés dans la figure II.6. Lorsque le champ est réduit de H_{max} à zéro, l'induction magnétique restante est appelée rémanence B_r . Lorsque le champ est ensuite réduit dans la zone négative, la valeur absolue du champ à laquelle l'induction revient à zéro est appelée coercivité H_c . Comme la boucle est symétrique par rapport à l'origine, il existe des points correspondants sur les branches négatives. À n'importe quel point le long du chemin de magnétisation, le rapport de B à H est appelé perméabilité, tandis que la pente de la courbe $B(H)$ à ce point est appelée perméabilité différentielle. D'autres types de perméabilité peuvent également être définis. L'aire de la boucle d'hystérésis représente l'énergie magnétique dissipée par cycle et par unité de volume dans les processus d'hystérésis. [22]

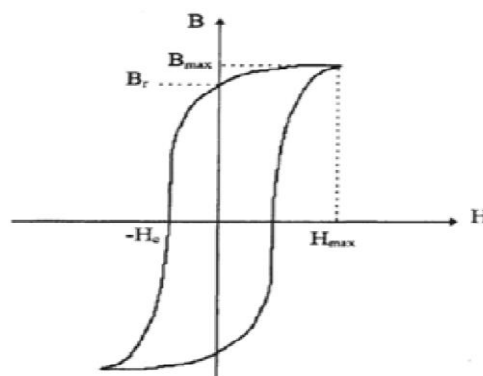


Figure II.6. Points clés le long d'une boucle d'hystérésis normale.

II.6.1. Courbe de première aimantation – $B(H)$

Si un matériau ferromagnétique n'a jamais été aimanté, cela signifie que les valeurs de l'induction magnétique (B) et du champ magnétique (H) sont toutes deux égales à zéro.

Lorsque ce matériau est soumis à une excitation magnétique croissante, une courbe $B(H)$ de première aimantation se forme :

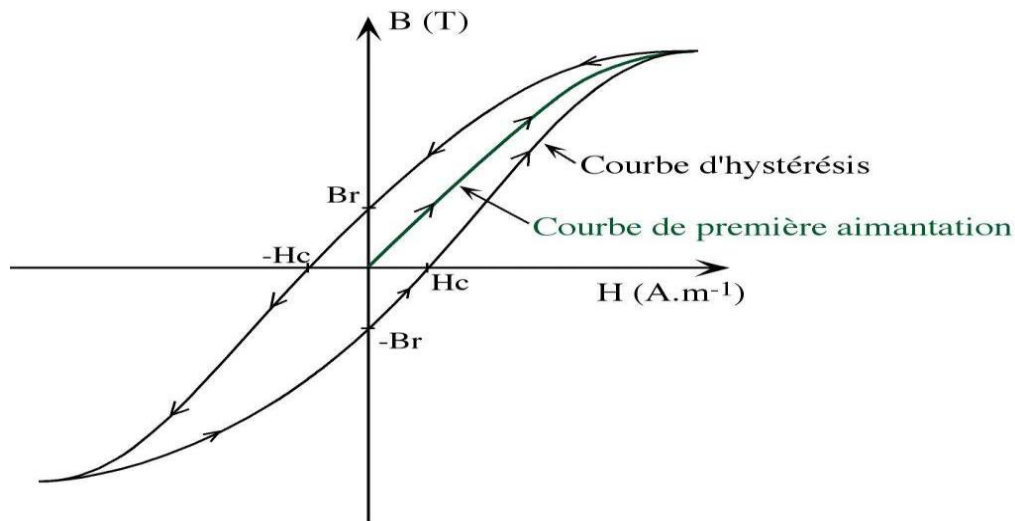


Figure II.7. Courbe de première aimantation.

Lorsque le champ magnétique (H) devient très grand, un phénomène de saturation se produit dans un matériau ferromagnétique, ce qui signifie que l'induction magnétique (B) ne varie presque plus. Il est important de noter que la perméabilité d'un matériau ferromagnétique réel, qui représente la relation entre le champ magnétique (H) et l'induction magnétique (B), n'est pas constante.

Il convient également de mentionner qu'il est parfois tracé la courbe $\varphi(i)$ des ferromagnétiques, qui est une courbe de flux magnétique en fonction du courant électrique (i). Cette courbe peut être reliée à la courbe $B(H)$ par un simple changement d'échelle en raison des relations $\varphi = BS$ (flux magnétique) et $HL = Ni$ (relais de l'inductance magnétique). Il est donc possible de représenter les caractéristiques magnétiques d'un matériau ferromagnétique à la fois à travers la courbe $B(H)$ et la courbe $\varphi(i)$, en fournissant une compréhension plus complète de son comportement magnétique.) [23]

II.7. Courant d'appel et Flux rémanent

La saturation du noyau magnétique d'un transformateur est la principale cause d'un transitoire de courant d'appel. Cela se produit en raison d'un changement soudain de tension dans le système, qui peut être causé par des commutations transitoires, le courant d'appel peut atteindre son niveau le plus élevé, et le flux dans le noyau peut atteindre une valeur théorique maximale de deux à trois fois le flux nominal de crête. [24]

Les figure II.8 et figure II.9 illustre la relation entre le flux et le courant en régime établi et en régime transitoire.

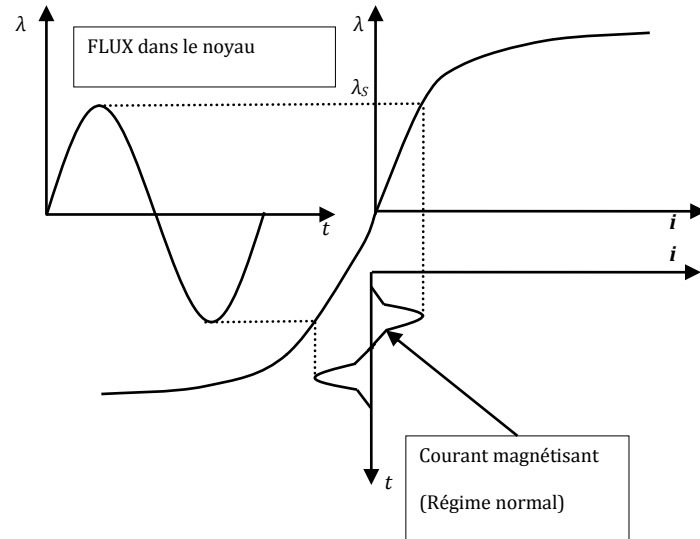


Figure II.8. Flux et courant magnétisant en régime établi Régime permanent $\lambda < \lambda_s$.

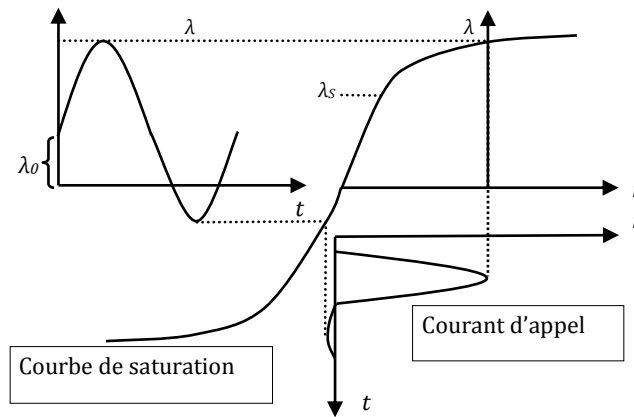


Figure II.9. Flux et courant magnétisant en régime transitoire $\lambda > \lambda_s$.

En régime établi, il est connu que le transformateur fonctionne à des niveaux de flux inférieurs au flux de saturation comme indiqué dans la figure II. 8.

Lorsque le transformateur est réenclenché après avoir été mis hors tension, il est possible que le flux dynamique atteigne des valeurs supérieures au flux de saturation. Dans ce cas, le courant maximal peut être considérablement plus élevé que sa valeur crête en régime établi, comme le montre la courbe du flux et du courant du transformateur dans la figure II.9. Ce dépassement du flux peut être expliqué par la présence du flux rémanent, qui pousse le transformateur dans la zone de saturation, comme illustré dans la figure II.10. C'est donc la source du courant d'appel.

Mathématiquement, en considérant que φ_{max} représente la valeur crête du flux pour un transformateur en régime établi, V_{max} la tension crête, nous pouvons exprimer la relation $V(t) = V_{max}\sin(\omega t)$ et $V_{max} = w\varphi_{max}$. Soit T la période du signal de tension, t_0 l'instant de

la mise hors tension du transformateur, nous cherchons à calculer la valeur instantanée du flux à demi-période.

$$\varphi\left(\frac{T}{2}\right) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^{\frac{T}{2}} d\varphi = \varphi(t_0) + \frac{V_{max}}{\omega}(1 + \cos(\omega t_0)) \quad (II.12)$$

Les cas extrêmes sont alors :

$t_0 = \frac{T}{4}$, $\varphi(t_0) = 0$, nous avons $\varphi\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{V_{max}}{\omega}$ c'est le cas de la coupure à zéro de flux, donc sans flux rémanent, la mise sous tension reste en zone linéaire.

$t_0 = 0$, $\varphi(t_0) = \frac{V_{max}}{\omega}$, nous avons $\varphi\left(\frac{T}{2}\right) = 2\frac{V_{max}}{\omega} = 2\varphi_{max}$ c'est le cas de la coupure au maximum de flux, la mise sous tension atteint la zone saturée. [25]

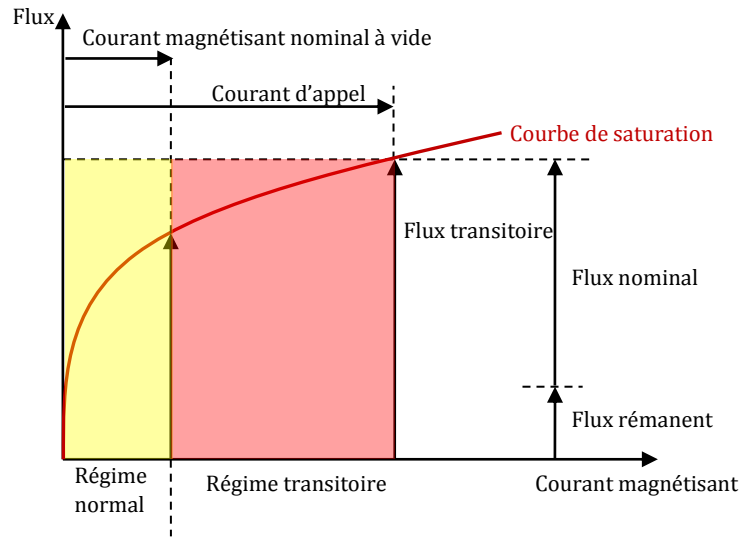


Figure II.10. Deux régimes sur la courbe de saturation.

Effectivement, en régime établi, les transformateurs fonctionnent généralement dans une plage de fonctionnement linéaire où la magnétisation nécessite peu de puissance (c'est-à-dire une faible force magnétomotrice et un faible courant magnétisant). Cependant, dans certains régimes de fonctionnement, le transformateur peut se trouver dans une plage au-delà de la zone linéaire, appelée la zone de saturation. Dans cette zone, les limites du matériau ferromagnétique sont atteintes et la magnétisation requiert beaucoup plus de puissance (c'est-à-dire un courant plus élevé).

En effet, en zone saturée, l'amplitude du courant magnétisant peut atteindre plusieurs fois celle du courant nominal, même lorsque le transformateur est à vide. Le rapport entre le courant magnétisant en zone saturée et le courant nominal dépend de la puissance du transformateur. Dans le cas des transformateurs de grande taille, le courant d'appel peut

atteindre une valeur d'environ 7 à 10 fois le courant nominal, avec des constantes de temps de quelques secondes. [18]

II.8. Coupure d'un courant en régime établi

Le courant magnétisant d'un transformateur à vide est généralement de faible amplitude en régime établi. Pour la plupart des transformateurs de puissance modernes, il se situe entre 0,1% et 0,5% du courant nominal. La forme d'onde de ce courant n'est pas sinusoïdale, et sa valeur crête \hat{i} atteint généralement 2,5 fois la valeur efficace (ou valeur RMS). Le disjoncteur est capable de supporter ce courant, même à son niveau maximum. La figure II.11 présente la forme typique du flux et du courant magnétisant dans ce cas. L'instant de l'ouverture est noté t_0 . Le transformateur n'est pas complètement démagnétisé, et le noyau du transformateur conserve un état magnétique, d'où provient la notion de flux rémanent. La valeur de flux rémanent dépend de la courbe d'hystérésis du matériau magnétique, de l'instant de la mise hors tension, ainsi que des conditions spécifiques du réseau électrique à cet instant précis. [5]

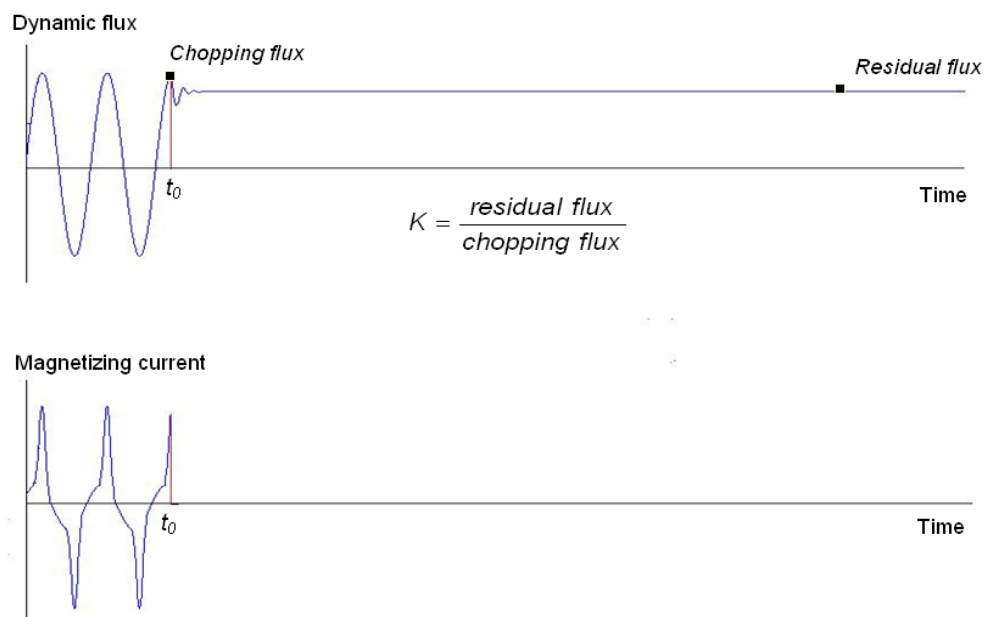


Figure II.11. Flux et courant à la mise hors tension.

II.9. Saturation magnétique dans les transformateurs

Une boucle d'hystérésis typique d'un matériau magnétique doux est représentée dans la Figure II.12. Lorsque la force magnétisante atteint des valeurs élevées, on atteint un point où une augmentation supplémentaire de H ne produit pas d'augmentation significative de B . Ce point est appelé le point de saturation de ce matériau. Les lignes en pointillé dans la figure

indiquent la densité de flux de saturation B_s , et la force magnétisante requise H_s , pour saturer le noyau. [26]

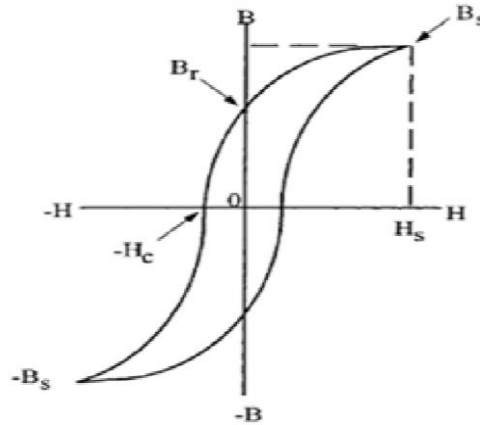


Figure II.12. B(H) typique ou boucle d'hystérésis d'un Matériau magnétique doux.

II.10. Mise sous tension d'un transformateur

Le fait d'appliquer brusquement la tension nominale au primaire d'un transformateur entraîne un régime transitoire qui génère une surintensité, pouvant parfois déclencher les dispositifs de protection.

En choisissant l'origine des temps au moment de la mise sous tension, la différence de potentiel appliquée au primaire peut être exprimée comme suit :

$$V = V_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta) \quad (\text{II.13})$$

En négligeant les chutes de tension au primaire, le flux est forcé. Celui-ci peut être obtenu par intégration, en tenant compte du fait qu'au moment de la mise sous tension, le flux initial est donné par φ_r , qui dépend de l'utilisation antérieure du circuit magnétique, et en introduisant l'amplitude φ_{max} du flux en régime permanent :

$$\varphi = \varphi [\sin(\omega t + \theta) - \sin\alpha] + \varphi_r \quad (\text{II.14})$$

La valeur maximale du flux est atteinte lorsque le sinus vaut 1 :

$$\varphi_{max} = \varphi(1 - \sin\theta) + \varphi_r \quad (\text{II.15})$$

Le cas le plus défavorable (la valeur la plus élevée) se produit lorsque l'enclenchement a lieu au passage par zéro de la tension. Dans ce cas, on a :

$$\varphi_{max} = 2\varphi M + \varphi_r \quad (\text{II.16})$$

Ce flux, qui atteint presque le double de sa valeur normale, conduit inévitablement à la saturation du matériau magnétique. En conséquence, la force magnétomotrice correspondante est bien supérieure au double de sa valeur.

Les variations s'amortissent progressivement en raison des pertes importantes qui se produisent pendant ce régime transitoire. L'intensité appelée au primaire peut être déterminée en écrivant :

$$I_1 = mI_2 + I_0 \quad (\text{II.17})$$

En raison de la valeur élevée de la force magnétomotrice résultante, une surintensité assez élevée peut apparaître. Sa valeur dépend fortement de l'instant de la mise sous tension par rapport à la sinusoïde du secteur. Cela explique pourquoi, dans certains cas, on peut observer le déclenchement des protections, alors que dans la plupart des cas, tout se passe bien. [27]

II.11. Effets de l'instant de commutation sur le courant d'appel

Une simulation a été effectuée par ATP/EMTP sur un modèle électrique d'un transformateur monophasé avec les paramètres de la plaque signalétique (la tension primaire nominale : $V_{1n} = 220\text{V}$, la tension secondaire nominale : $V_{2n} = 25\text{ V}$, la puissance apparente : $S_n = 2000\text{ VA}$, la fréquence : $f = 50\text{ HZ}$, $I_{1n} = S_n / V_{1n} = 2000 / 220 = 9,1\text{ A}$, $I_{2n} = S_n / V_{2n} = 2000 / 25 = 80\text{ A}$)

Selon la figure II.13 après diverses tentatives comprenant plusieurs moments de commutation, on constate qu'à l'instant 0.3048s, le courant d'appel atteint sa valeur maximale de 26.4847(A).

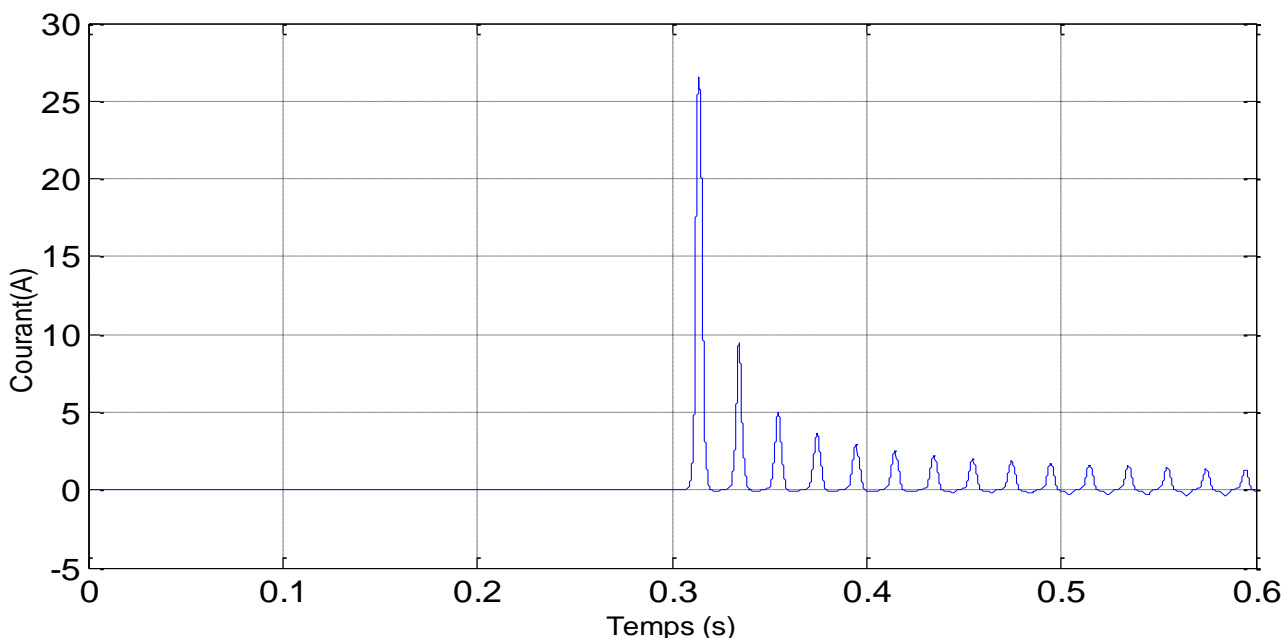


Figure II.13. Courant d'appel pour un instant de commutation égal à 0.3048s.

Dans le chapitre III, cet instant de commutation sera utilisé pour examiner l'impact de la charge sur le cycle hystérésis.

II.12. Conclusion

Ce chapitre présenté le régime permanent et transitoire, ensuite parlons de magnétisation, courant d'appelle, flux et cycle d'hystérésis du transformateur. Avec une présence de la relation entre le courant d'appelle et flux rémanent, le saturation et mise sous tension de transformateur.

La principale raison de l'apparition de courants d'appel est le flux magnétique résiduel qui subsiste généralement dans le noyau de fer lorsque le transformateur est éteint, ainsi que la saturation du noyau de fer.

Une simulation a été effectuée à l'aide d'un modèle de transformateur sur ATPDraw pour obtenu le point d'instantanéité de la mise sous tension du transformateur qui donne le maximum valeur de courant d'appel.

Chapitre III :
Simulation de l'influence de la charge
sur le cycle d'hystérésis

III.1. Introduction

Le cycle d'hystérésis est l'un des principaux paramètres qui définissent les caractéristiques de matériaux utilisés dans la conception de transformateur. Ce paramètre est fortement influencé par le régime transitoire et ce qui exerce une grande influence sur le point de fonctionnement.

Ce chapitre commence par une description de montage utilisé, ses composants et présenter la procédure de calcul des paramètres de transformateurs, Ensuite, la mesure et la simulation du courant d'appel et du cycle d'hystérésis sont présentées afin d'observer la relation entre la variation de la surface d'hystérésis et la valeur de charge entraînés dans le régime transitoire.

III.2. L'ATP-EMTP

ATP/EMTP est considéré comme le programme le plus largement utilisé pour la simulation numérique des phénomènes transitoires de nature électromagnétique et électromécanique dans les systèmes d'alimentation électrique. Il a été continuellement développé grâce à des contributions internationales.

Le programme ATP calcule les variables d'intérêt au sein des systèmes d'alimentation électrique en fonction du temps, généralement déclenchées par certaines perturbations. Fondamentalement, la méthode d'intégration trapézoïdale est utilisée pour résoudre les équations différentielles des composants du système dans le domaine temporel. Les conditions initiales non nulles peuvent être déterminées automatiquement par une solution de phasor en régime permanent, ou elles peuvent être saisies par l'utilisateur pour certains composants. ATP/EMTP dispose de nombreux modèles, tels que des machines tournantes, des transformateurs, des parafoudres, des lignes de transmission et des câbles. Avec ce programme numérique, des réseaux complexes de structure arbitraire peuvent être simulés. L'analyse des systèmes de contrôle, des équipements électroniques de puissance et des composants avec des caractéristiques non linéaires comme les arcs et la couronne est également possible. Des perturbations symétriques ou asymétriques sont autorisées, telles que des défauts, des surtensions ou tout type d'opérations de commutation, y compris la commutation de vannes. Le calcul de la réponse en fréquence des réseaux de phasors est également pris en charge. [6.5]

ATPDraw est une interface utilisateur Windows standard. Il prend en charge plusieurs documents et offre à l'utilisateur la possibilité de travailler sur plusieurs circuits simultanément, avec la possibilité de copier des informations entre les circuits. La taille de la

fenêtre du circuit est beaucoup plus grande que l'écran réel, comme indiqué par les barres de défilement présentes dans chaque fenêtre de circuit. [5]

III.3. Matériels utilisés

- Transformateur monophasé.
- Source d'alimentation alternative (Autotransformateur).
- Appareils de la mesure : Voltmètre, Ampèremètre, Wattmètre, Câbles de raccordement

III.4. Model de transformateur utilisé

La figure si dusse représente le transformateur monophasé utilisé dans si simulation est un transformateur, fabriqué par l'entreprise DELORENZO, Italie, et votre plaque signalétique supplément avec un tableau présenté les défirént démontions de si transformateur.



Figure III.1. Model de transformateur utilisé dans l'étude.

(a) plaque signalétique de transformateur

(b) transformateur réel

Tableau III.1. Données de la plaque signalétique du transformateur.

Puissance	Fréquence	Nombre de phase	Rapport de Tension	Rapport de spire	Rapport de courant	Classe d'isolation
2 kVA	50 Hz	1	220/25 (V)	330/37	9.1/80 (A)	E

III.5. Identification des paramètres du transformateur d'essai

Les données des essais classiques, à vide et en court-circuit, permettent de calculer les paramètres linéaires du circuit équivalent du transformateur représenté dans la figure III.1

III.5.1. Essai à vide

La résistance (R_m), la réactance de magnétisation (X_m) et le rapport de transformation (m), peut déterminer avec l'utilisation d'essai à vide.

Dans cette configuration où le secondaire du transformateur est ouvert, une tension nominale de 220 V est appliquée au côté primaire, les appareils de mesure permettent de relever les valeurs de tension V_{10} , courant I_{10} et puissance active P_{10} . Ces mesures sont effectuées sur le côté primaire du transformateur,

La figure III.2 montre un schéma explicatif du montage réalisé au laboratoire. [12]



Figure III.2. Montage de l'essai à vide du transformateur monophasé.

Le tableau suivant représente les résultats de mesure, pour l'essai à vide :

Tableau III.2. Résultats de l'essai à vide.

	V_1	V_{20}	P_{10}	$\cos \varphi_{10}$	I_{10}
Essai à vide	220	25	17	0.2	0.369

La puissance absorbée P_{10} représente les pertes fer du circuit magnétique à vide.

$$P_{10} = I_{10} V_{10} \cos(\varphi_{10}) \quad (\text{III. 1})$$

$$\cos(\theta_{10}) = \frac{P_{10}}{I_{10} * V_{10}} = \frac{17}{220 * 0.369} = 0.20 \quad (\text{III. 2})$$

Le facteur de puissance à vide égale à 0.20

Le courant à vide I_{10} se divise dans la branche magnétisant en deux composantes :

Composante active I_{10a} et la Composante réactive I_{10r} les relations de ces derniers sont comme suit :

$$I_{10a} = I_{10} * \cos(\varphi_{10}) \quad (\text{III. 3})$$

$$I_{10r} = I_{10} * \sin(\varphi_{10}) \quad (\text{III. 4})$$

Résistance shunt R_m :

$$R_m = \frac{V_1}{I_{10a}} = \frac{V_1}{I_{10} * \cos(\varphi_{10})} \quad (\text{III. 5})$$

$$R_m = 2847,05 \, \Omega.$$

Réactance shunt X_m :

$$X_m = \frac{V_1}{I_{10r}} = \frac{V_1}{I_{10} * \sin(\varphi_{10})} \quad (\text{III. 6})$$

$$X_m = 609,72 \, \Omega.$$

III.5.2. Essai en court-circuit

La résistance R_1 et l'inductance L_1 (enroulement primaire), avec la résistance R_2 et l'inductance L_2 (enroulement secondaire, peut déterminer avec l'utilisation de l'essai en court-circuit.

Dans cette configuration où le secondaire du transformateur est ouvert, une tension nominale de 220 V est appliquée au côté primaire, les appareils de mesure permettent de relever les valeurs de tension V_{10} , courant I_{10} et puissance active P_{10} . Ces mesures sont effectuées sur le côté primaire du transformateur.

La figure III.2 montre un schéma explicatif du montage réalisé au laboratoire. [12]

A l'aide d'un autotransformateur, on alimente le transformateur sous une tension très réduite V_{1cc} qui nous permet d'avoir le courant secondaire nominal.

La figure III.3 montre l'expérience effectuée et le montage réalisé au laboratoire. [12]



Figure III.3. Montage de l'essai en court-circuit d'un transformateur monophasé.

Le tableau suivant représente les résultats de mesure, pour l'essai court-circuit

Tableau III.3. Résultats du l'essai court-circuit.

V_{1cc} (V)	I_{1cc} (A)	P_{1cc} (W)	I_{2cc} (A)
---------------	---------------	---------------	---------------

Essai Court-circuit	22	9.1	87	80
---------------------	----	-----	----	----

R_{eq1} La résistance équivalente du primaire.

$$\text{On a:} \quad P_{1cc} = R_{eq1}(I_{1cc})^2 \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Alors :} \quad R_{eq1} = P_{1cc}(I_{1cc})^2 \quad (\text{III.8})$$

$$R_{eq1} = 3,48 \Omega$$

En pratique, la résistance et la réactance de primaire égale à celles du secondaire ramené au primaire ou bien le contraire, donc pour l'obtention de ces deux paramètres on peut utiliser la méthode suivante :

$$R_1 = \frac{R_{eq}}{2} = \frac{3.48}{2} = 1,74\Omega \quad (\text{III.9})$$

$$m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{25}{220} = 0,11 \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Et :} \quad \frac{R_2}{m^2} = \frac{R_{eq1}}{2} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Alors :} \quad R_2 = m^2 * R_1 \quad (\text{III.12})$$

$$R_2 = (0,11364)^2 * 1.74 = 0,02246 \Omega$$

On a:

$$V_{1cc} = Z_{eq1} * I_{1cc} \quad (\text{III.13})$$

Donc :

$$Z_{eq1} = \frac{V_{1cc}}{I_{1cc}} \quad (\text{III.14})$$

$$Z_{eq1} = \frac{22}{9.1} = 2.41 \Omega$$

La réactance équivalente au primaire :

$$X_{eq1} = \sqrt{(Z_{eq1})^2 - (R_{eq1})^2} \quad (\text{III.15})$$

$$X_{eq1} = 2,69248 \Omega$$

Par la même méthode appliquée pour obtenir les résistances on peut introduire la réactance primaire et secondaire

$$X_1 = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (\text{III.16})$$

$$X_1 = \frac{2,69248}{2} = 1,34624 \Omega$$

$$\text{Et :} \quad \frac{X_2}{m_2} = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (\text{III.17})$$

Alors :

$$X_2 = m^2 * X_1 \quad (\text{III.18})$$

$$X_2 = (0,11364)^2 * 1,34624 = 0,0178 \Omega$$

Après les essais :

La résistance magnétisante : $R_m = 2847.06\Omega$

La réactance magnétisante : $X_m = 609.72\Omega$

La résistance équivalent : $R_{eq} = 3.48\Omega$

La réactance équivalent : $X_{eq} = 2.69\Omega$

III.6. Saturation des branches magnétisantes

Nous avons présenté la méthode de modélisation de la branche magnétisante du circuit équivalent du transformateur de puissance. Cette branche est non linéaire, et le tableau suivant représente les valeurs caractéristiques de la branche magnétisante [14].

Tableau III.4. Caractéristiques calculées en valeurs.

V_{max} (V)	i_r (A)	λ (V.S)	i_l (A)
0	0	0	0
14.001	0.0036	0.0446	0.0061
44.2649	0.0113	0.1409	0.0139
95.0352	0.0276	0.3025	0.0237
152.596	0.0393	0.4857	0.045
215.954	0.0622	0.6874	0.1271
274.4989	0.0965	0.8738	0.4319
311.127	0.124	0.9903	0.7668
359.6345	0.1863	1.0156	0.8384
376.3222	0.2169	1.1448	1.4873
389.7573	0.2451	1.1979	1.7384
404.7479	0.2717	1.2406	2.0274
431.7594	0.3139	1.2884	2.3863
447.5986	0.3376	1.3343	2.947
461.7407	0.3866	1.3743	3.6569
476.0243	0.6496	1.4248	5.0491
		1.4698	8.9502
		1.5152	20.7086

Les résultats du tableau III.4 seront représentés graphiquement sous forme de courbes. La figure III.4 représente la variation de la tension V_{max} en fonction du courant actif i_r qui traverse la résistance de la branche magnétisante R_m . Cette courbe $v = f(i_r)$ illustre la résistance non linéaire du modèle de la branche magnétisante. D'autre part, la figure III.5 représente la variation du flux de liaison magnétique λ en fonction du courant i_l qui traverse la

bobine. Cette courbe $\lambda = f(i_l)$ représente l'inductance non linéaire du modèle de la branche magnétisante.

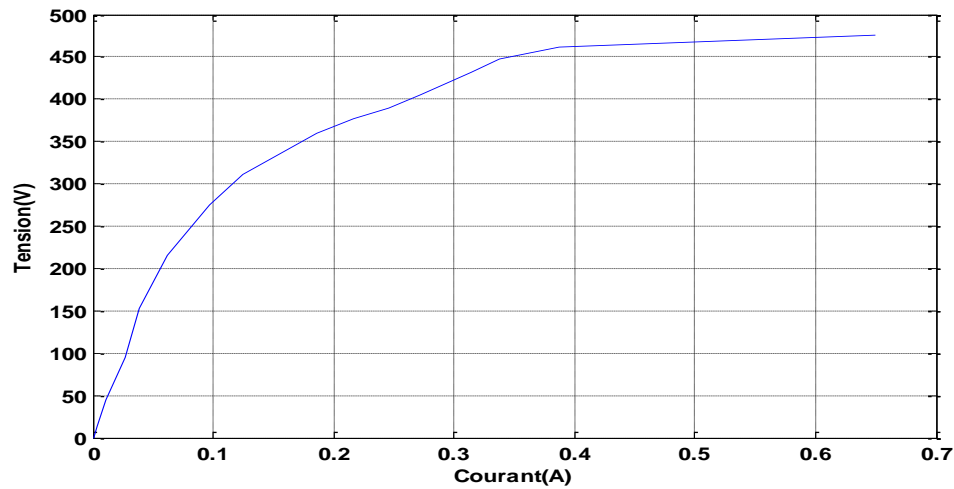


Figure III.4. Caractéristique de la résistance de branche magnétisant.

Cette courbe illustre la relation entre la tension et le courant actif dans la résistance magnétisante. On observe que la variation de la courbe se stabilise à un courant de 0,4 A, correspondant à une tension d'environ 475 V.

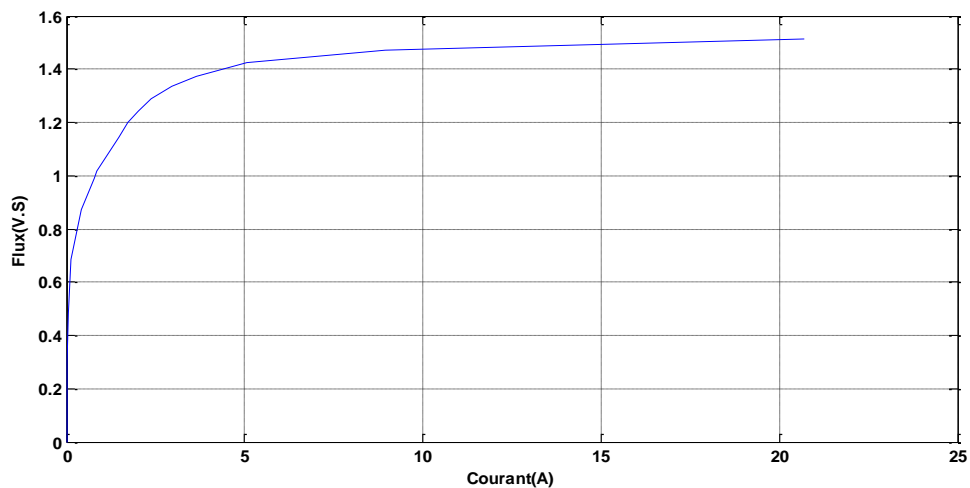


Figure III.5. Courbe de saturation de l'inductance magnétisante.

Ce graphique représente l'augmentation du flux en fonction du courant réactif dans l'inductance magnétisante. On observe que ce flux reste pratiquement constant à 1,5 V.S pour une valeur de courant de 5 A.

III.7. Simulation de courant d'appel et le cycle d'hystérésis

Nous avons implanté notre modèle élaboré dans un circuit électrique pour observer le comportement du transformateur pour les deux cas.

III.7.1. Premiers cas : Transformateur à vide

Le but est de visualiser le cycle d'hystérésis à vide et ça forme en régime transitoire et régime permanent.

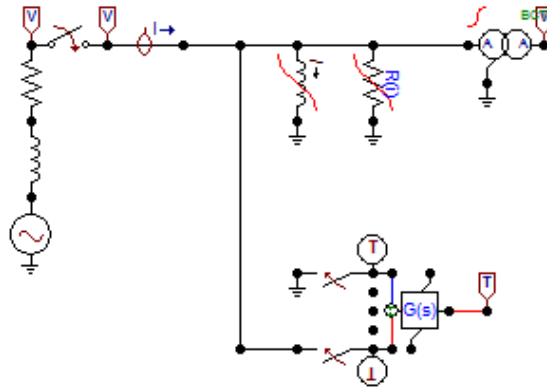


Figure III.6. Représentation du transformateur à vide sur ATP-EMTP.

En régime établi, lors de l'utilisation d'une source de tension au primaire du transformateur d'essai avec le secondaire en circuit ouvert, nous obtenons la courbe de courant magnétique simulée qui est présentée dans la figure III.7.

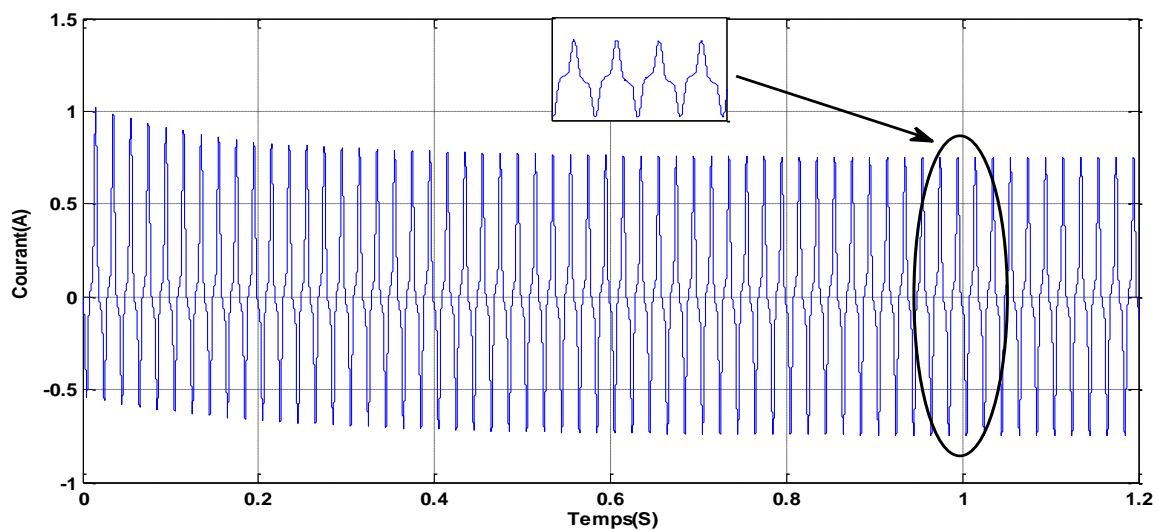


Figure III.7. Régime permanent à vide.

En remarque que la forme d'onde de courant dans le régime établi à vide est non sinusoïdale déformé due aux harmoniques causées par la non-linéarité de noyau du transformateur.

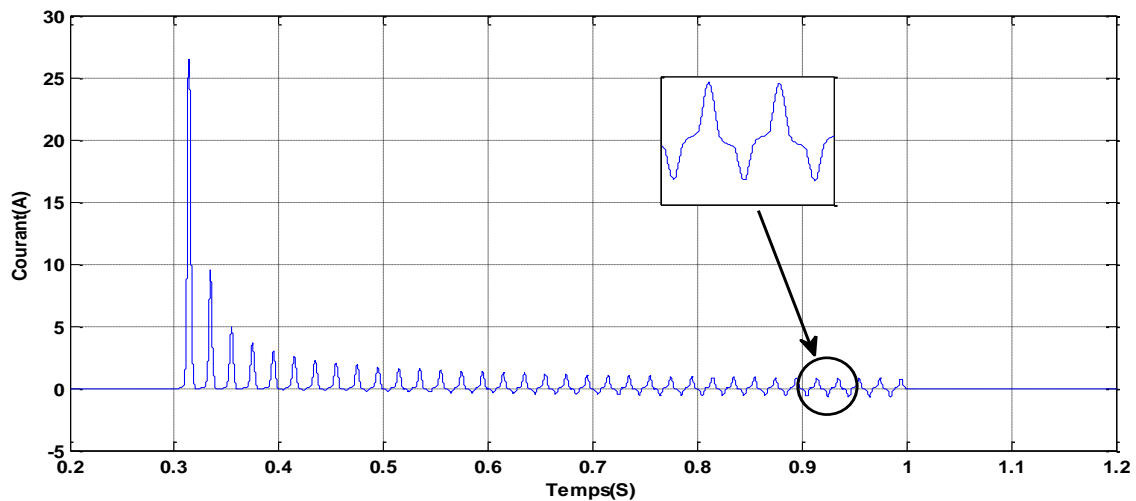


Figure III.8. Régime transitoire à vide.

Une observation importante est que le courant pendant le régime transitoire est beaucoup plus élevé que pendant le régime permanent. Ces simulations mettent en évidence le caractère non sinusoïdal des courants pendant le régime transitoire, ainsi que pendant le régime permanent à vide, en raison de la présence d'harmoniques. Ces harmoniques sont le résultat du comportement non linéaire du circuit magnétique du transformateur.

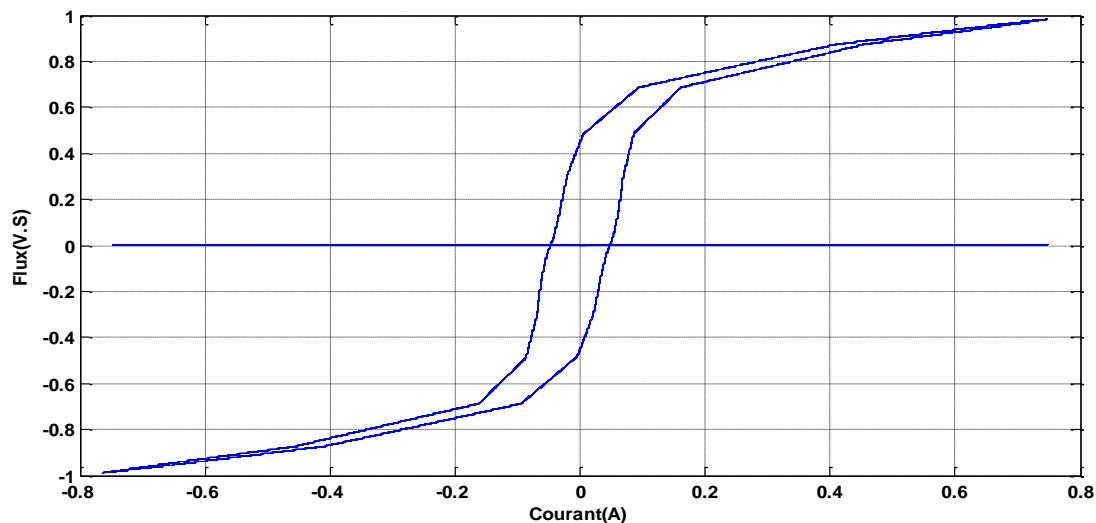
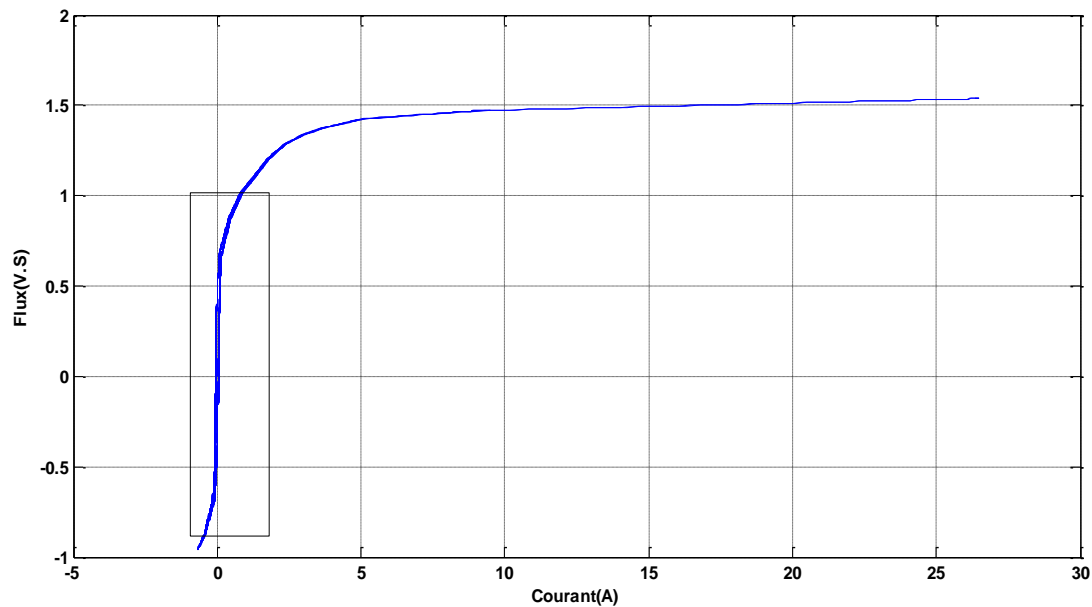


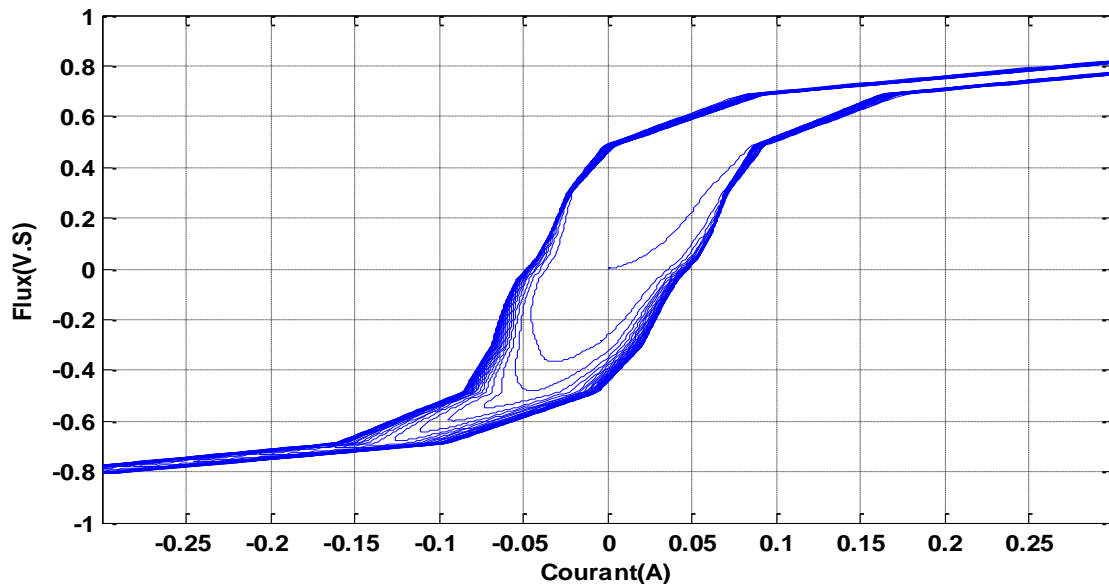
Figure III.9. Cycle d'hystérésis en régime permanent à vide.

La figure III.9 représente la variation du flux en fonction du courant dans le régime établi à vide. La surface occupée par ce cycle est approximativement bornée de -0.78 à 0.78(A) au-delà de cet intervalle on rentre en phase de saturation. Cette surface représente l'énergie perdue dans le noyau (pertes fer).



(a)

Après avoir agrandir la partie indiquée en rectangle on obtient le graphe ci-dessous



(b)

Figure III.10. Cycle d'hystérésis en régime transitoire à vide.

(a) Représente les cycles hystérésis en régime transitoire.

(b) Représente un zoom de la partie encadrée dans (a).

Dans la figure III.10 Le cycle d'hystérésis est déformé, asymétrique par rapport à l'origine du repère et la phase de saturation dans la partie positive.

III.7.2. Deuxième cas : transformateur en charge

Le but est d'appliquer différentes charges avec différentes valeurs pour observer l'influence de cette variation sur le régime transitoire de transformateur.

III.7.2.1. Une charge purement résistive

La simulation a été effectuée avec 4 valeurs de charge pour un $\cos(\varphi) = 1$

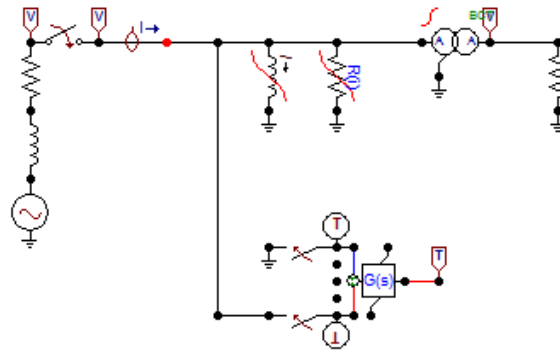


Figure III.11. Transformateur avec une charge résistive.

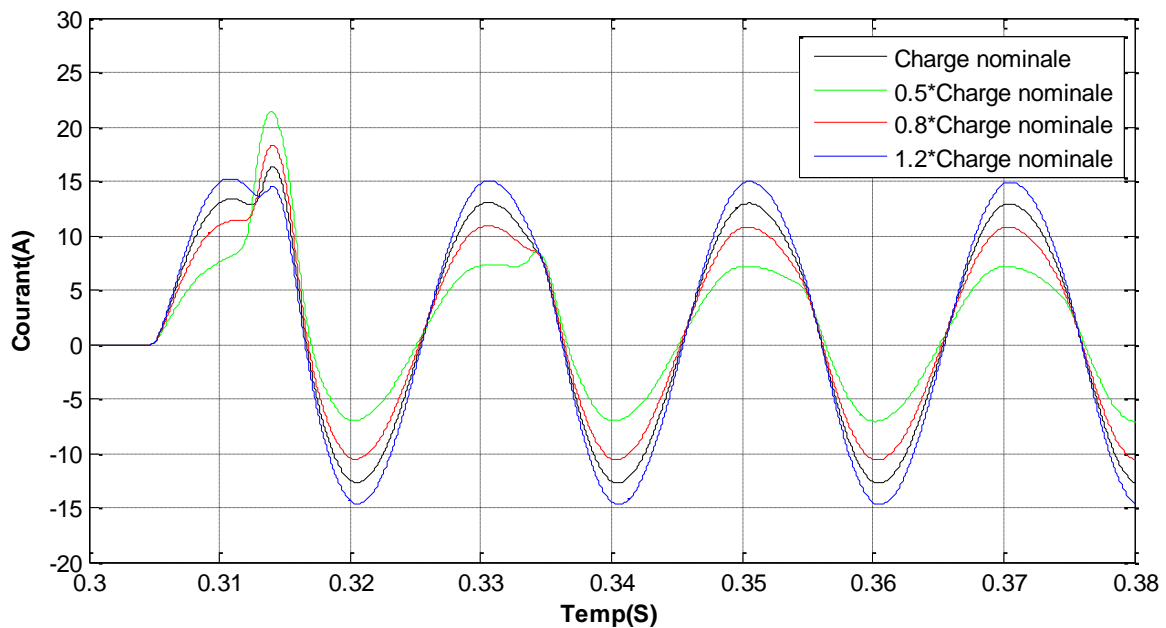


Figure III.12. Forme d'onde du courant primaire avec une charge résistive.

La figure III.12 montre une comparaison entre les formes d'ondes et les valeurs de courant dans le régime transitoire et le régime permanent après l'application d'une charge résistive avec différents valeurs (la charge nominale est multipliée par 0.5 et 0.8 et 1.2).

Si la charge est nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 16.37(A). Et 12.87 (A) dans le régime permanent.

Si la charge est 0.5 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 21.39(A). Et 7.128 (A) dans le régime permanent.

Si la charge est 0.8 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 18.35(A). Et 10.72 (A) dans le régime permanent.

Si la charge est 1.2 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à

15.25(A). Et 14.86 (A) dans le régime permanent.

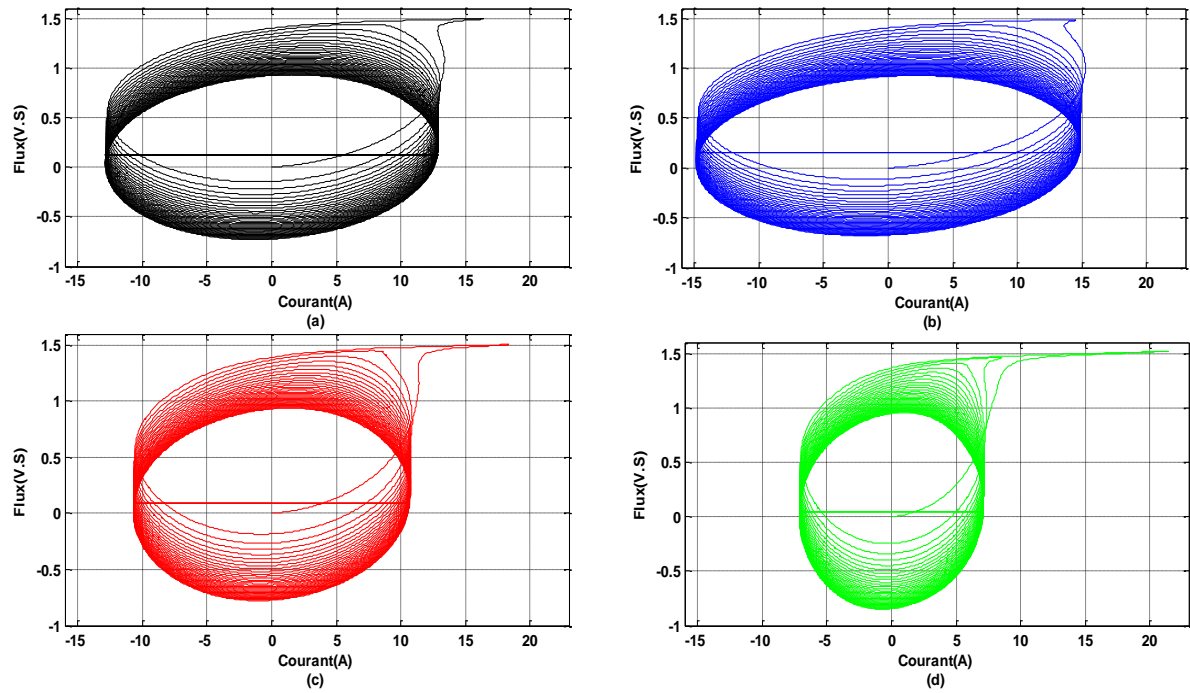


Figure III.13. Cycle hystérésis en charge purement résistive.

(a) : Charge nominal.

(b) : 120% de la Charge nominal.

(c) : 80% de la Charge nominal.

(d) : 50% de la Charge nominal

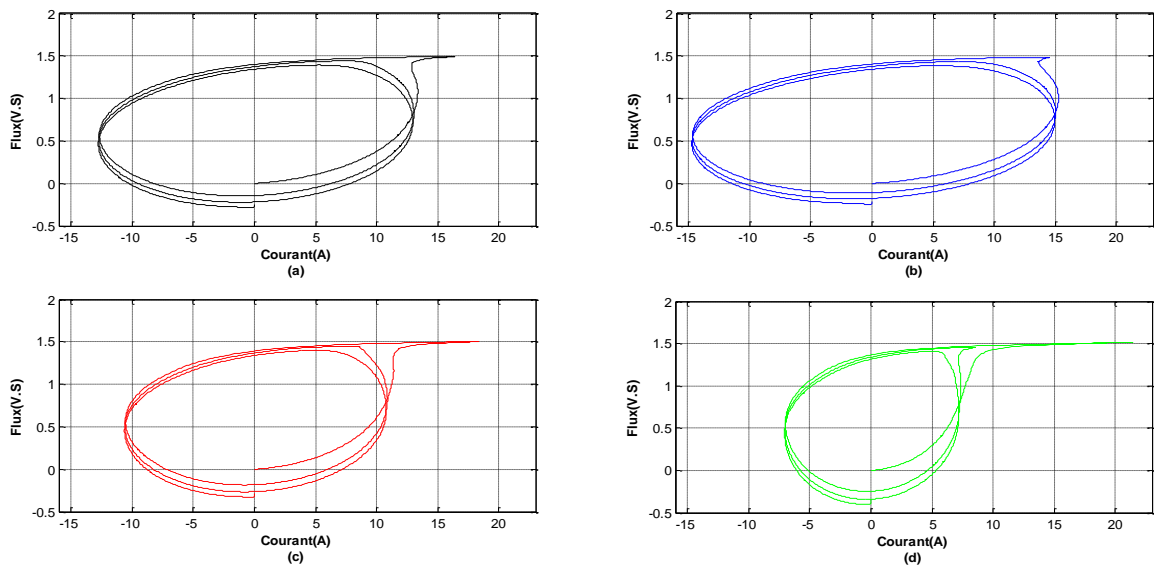


Figure III.14. Cycle hystérésis en charge purement résistive (3 cycles).

(a) Charge nominal.

(b) 120% de la Charge nominal.

(c) 80% de la Charge nominal.

(d) 50% de la Charge nominal.

(a) : Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (16.37A) correspondant à une valeur de flux (1.49 V. S)

(b): 120 de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (15.25A) correspondant à une valeur de flux (1.4851 V.S)

(c): 80 de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (18.35A) correspondant à une valeur de flux (1.5044 V.S)

(d): 50 de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (21.39A) correspondant à une valeur de flux (1.5173 V.S)

III.7.2.2. Une charge RL

La simulation a été effectuée avec 4 valeurs de charge pour un $\cos(\varphi) = 0.8$

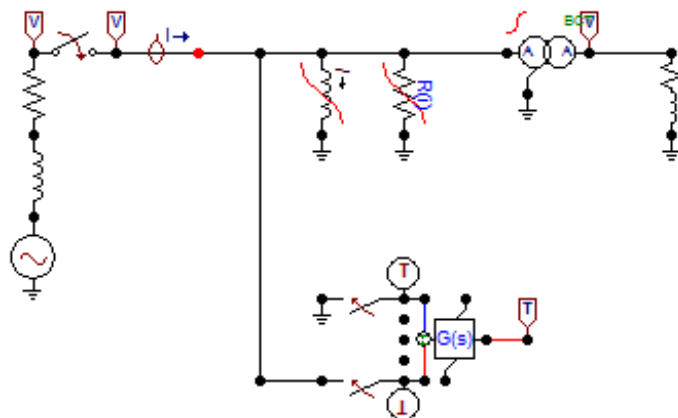


Figure III.15. Transformateur avec une charge RL.

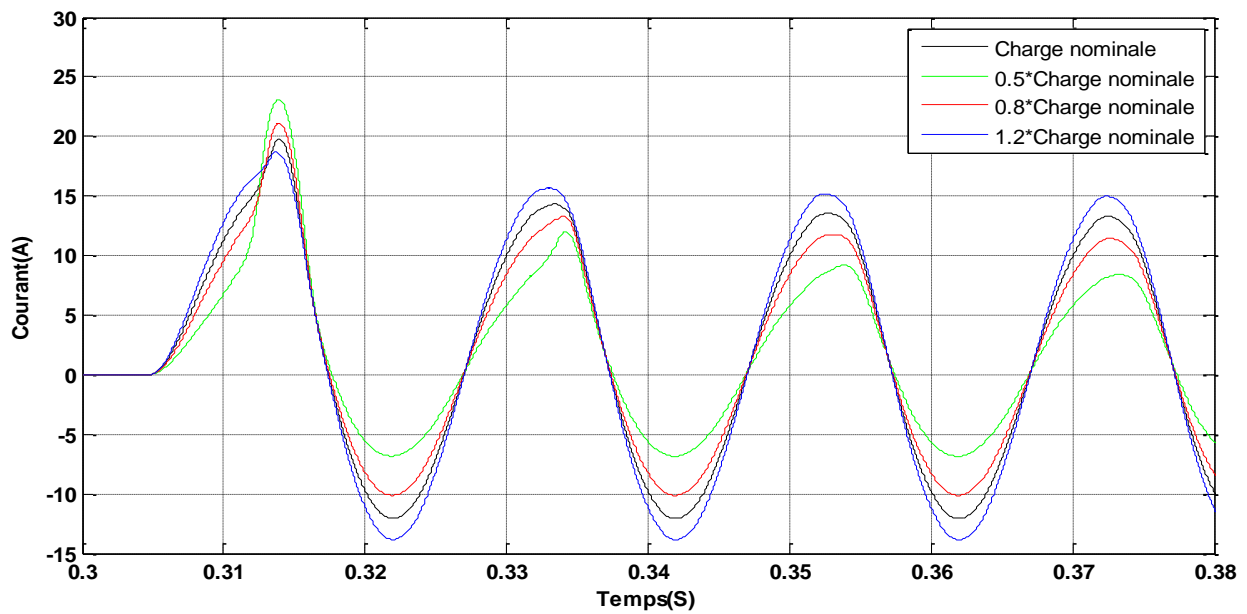


Figure III.16. Forme d'onde du courant primaire avec une charge RL.

La figure III.16 montre une comparaison entre les formes d'ondes et les valeurs de courant dans le régime transitoire et le régime permanent après l'application d'une charge RL avec différents valeurs (la charge nominale est multipliée par 0.5 et 0.8 et 1.2).

Si la charge est nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 19.81(A). Et 12.14 (A) dans le régime permanent.

Si la charge est 0.5 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 23.13(A). Et 6.91(A) dans le régime permanent.

Si la charge est 0.8 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 21.15(A). Et 10.2(A) dans le régime permanent.

Si la charge est 1.2 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 18.69(A). Et 13.91(A) dans le régime permanent.

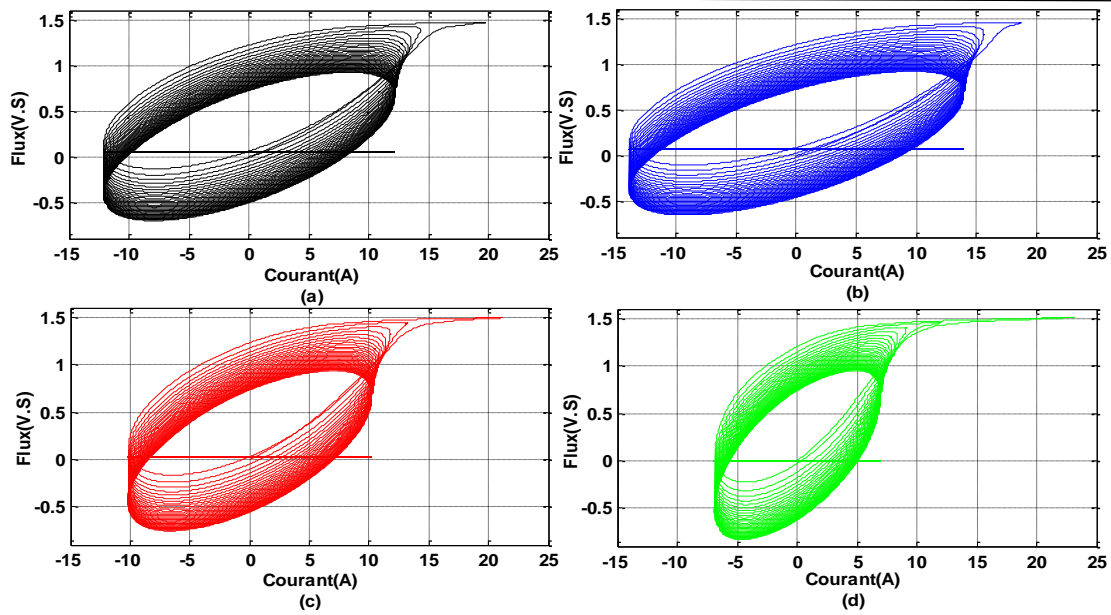


Figure III.17. Cycle hystérésis en charge RL.

a) Charge nominale.

b) 120% de la Charge nominal.

c) 80% de la Charge nominal.

d) 50% de la Charge nominal.

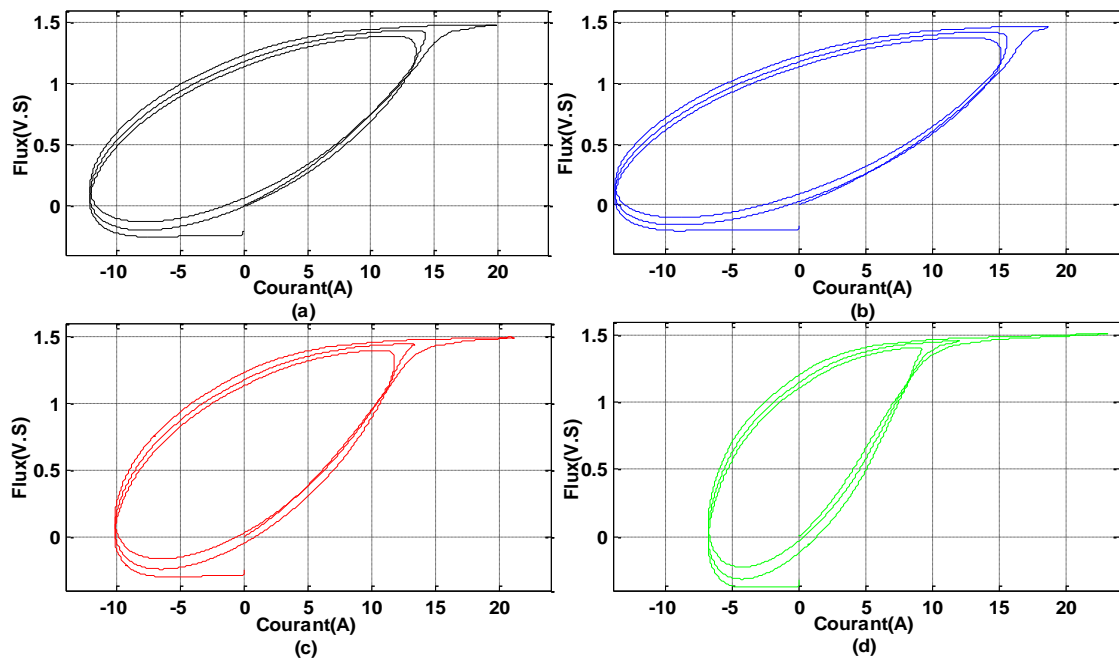


Figure III.18. Cycle hystérésis en charge RL (3 cycles).

(a) Charge nominale.

(b) 120% de la Charge nominal.

(c) 80% de la Charge nominal.

(d) 50% de la Charge nominal.

(a): Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis déformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (19.81A) correspondant à une valeur de flux (1.4824V. S)

(b) : 120% de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis déformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (23.13 A) correspondant à une valeur de flux (1.4706 V.S)

(c) : 80% de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis déformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (21.15A) correspondant à une valeur de flux (1.4937 V.S)

(d) : 50% de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis déformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (18.69A) correspondant à une valeur de flux (1.5103 V.S)

III.7.2.3. Une charge RLC

La simulation a été effectuée avec 4 valeurs de charge pour un $\cos(\varphi) = 0.8$

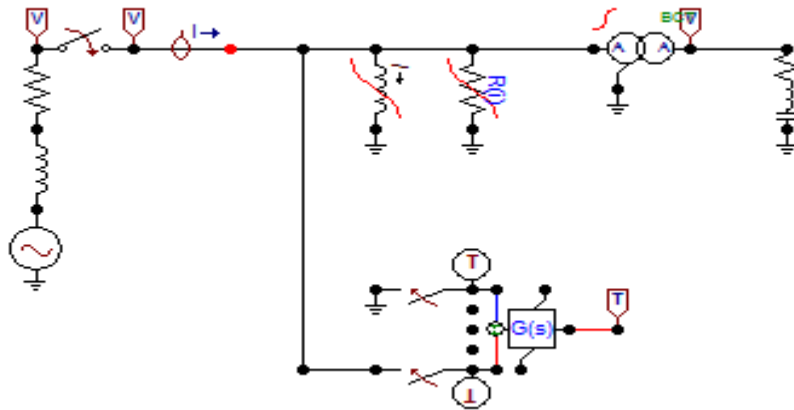


Figure III.19. Transformateur avec une charge RLC.

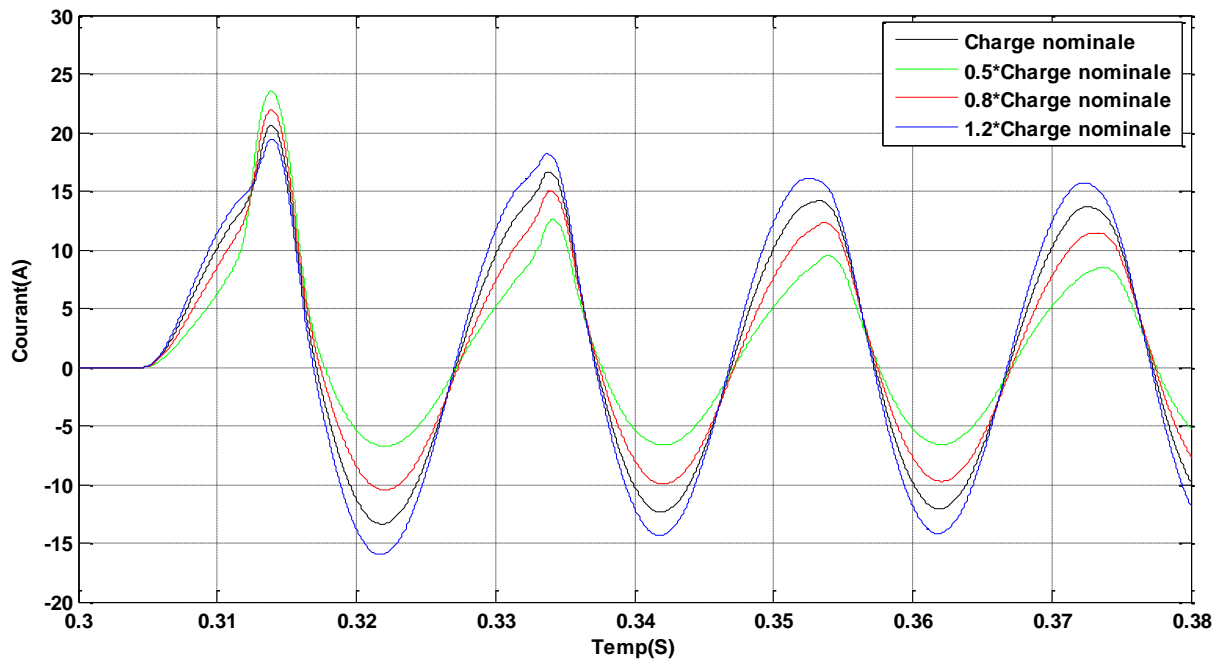


Figure III.20. Forme d'onde du courant primaire avec une charge RLC.

La figure III.20 montre une comparaison entre les formes d'ondes et les valeurs de courant dans le régime transitoire et le régime permanent après l'application d'une charge RLC avec différents valeurs (la charge nominale est multipliée par 0.5 et 0.8 et 1.2).

Si la charge est nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 20.69 (A). Et 12.14 (A) dans le régime permanent.

Si la charge est 0.5 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 23.53 (A). Et 6.58(A) dans le régime permanent.

Si la charge est 0.8 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 21.84 (A). Et 9.93(A) dans le régime permanent.

Si la charge est 1.2 charge nominale le pic de courant dans régime transitoire égal à 19.28 (A). Et 14.88(A) dans le régime permanent.

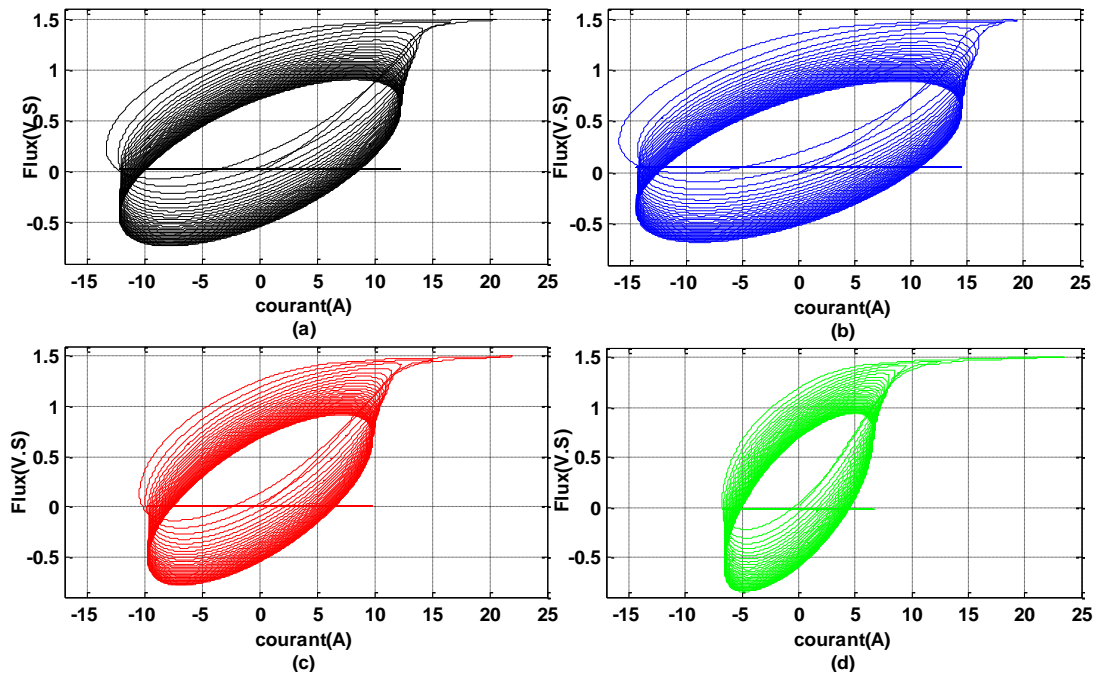


Figure III.21. Cycle hystérésis en charge RLC.

(a) Charge nominal.

(b) 120% de la Charge nominal.

(c) 80% de la Charge nominal.

(d) 50% de la Charge nominal.

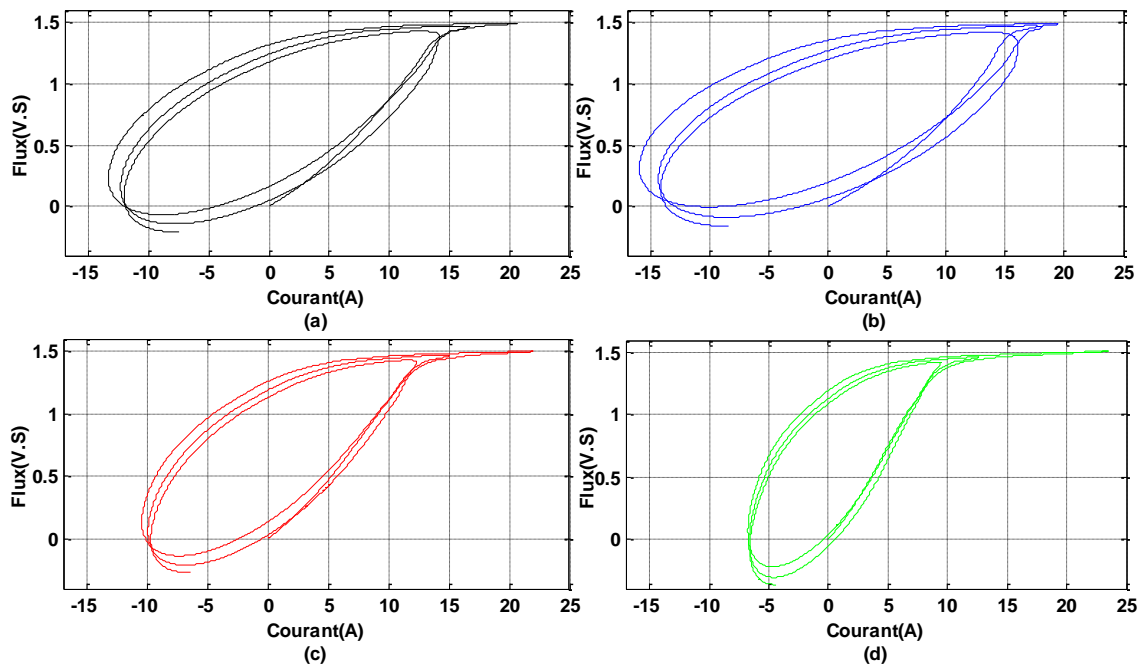


Figure III.22. Cycle hystérésis en charge RLC (3 cycle).

(a) Charge nominal.

(b) 120% de la Charge nominal.

(c) 80% de la Charge nominal.

(d) 50% de la Charge nominal.

(a) : Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (20.69A) correspondant à une valeur de flux (1.49 V.S)

(b): 120 de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (19.28A) correspondant à une valeur de flux (1.4851 V.S)

(c): 80 de la Charge nominal

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (21.84A) correspondant à une valeur de flux (1.5044 V.S)

(d): 50 de la Charge nominal

Ces simulations montrent que la mise sous tension de transformateur à vide provoque des transitoire à grandes amplitudes, avec un courant de forme d'onde non sinusoïdale, ce dernier est causé par l'effet de la non linéaire du circuit magnétique du transformateur.

Dans le régime transitoire le cycle hystérésis difformé avec une phase de saturation positive suit le pic de courant d'appel (23.53A) correspondant à une valeur de flux (1.5173v.s)

En appliquant différents types des charges à différentes valeurs, on remarque que chaque fois que la valeur de la charge est réduite, le régime transitoire augmente, entraînant une diminution de la surface du cycle.

Cela suggère que la charge du transformateur exerce une influence directe sur la forme d'onde du cycle d'hystérésis.

III.7.2.4 Charge RL (L non linéaire)

Le schéma suivant représente la simulation avec un inductance non linéaire pour un $\cos(\varphi) = 0.8$

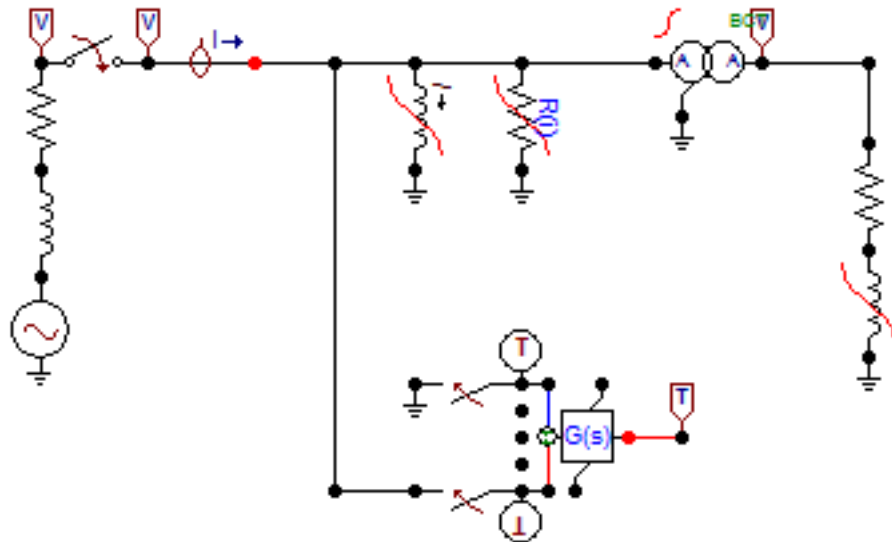


Figure III.23. Charge RL (L non linéaire)

Le tableau suivant représente les valeurs caractéristiques de de l'inductance non linéaire.

Tableau III.5. Caractéristiques calculées en valeurs.

Courant i_l (A)	Flux λ (V.s)
0	0
0.0236	0.0012
0.0537	0.0037
0.0916	0.0078
0.1738	0.0126
0.491	0.0178
1.6685	0.0226
2.9622	0.0257
3.2388	0.0263
5.7456	0.0297
6.7157	0.031
7.8321	0.0322
9.2186	0.0334
11.3846	0.0346
14.1271	0.0356
19.5053	0.0369
34.5758	0.0381

La figure III.24 présente le cycle d'hystérésis de charge inductive avec une inductance non linéaire et valeur de charge nominale, la forme du cycle penche vers l'intérieur des deux côtés.

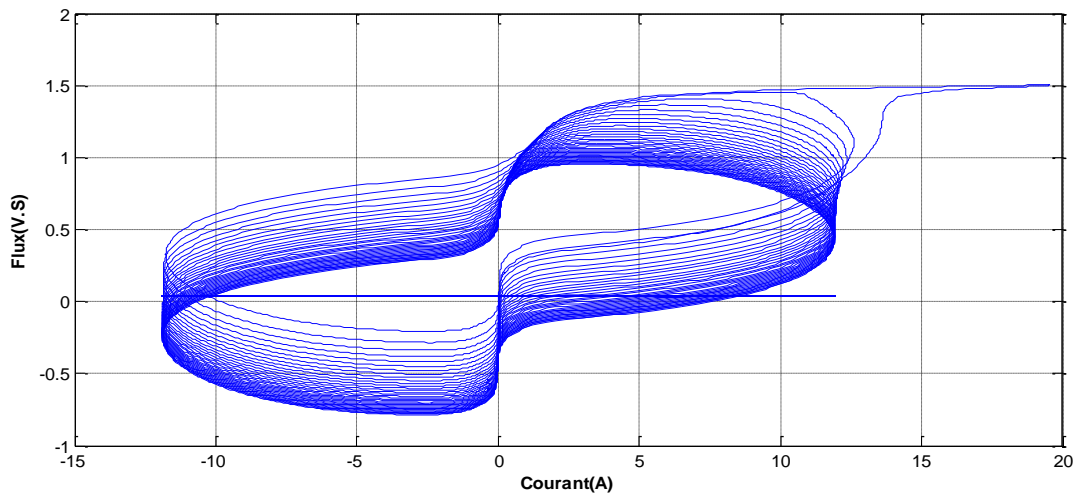


Figure III.24. Cycle hystérésis en charge RL (L non linéaire).

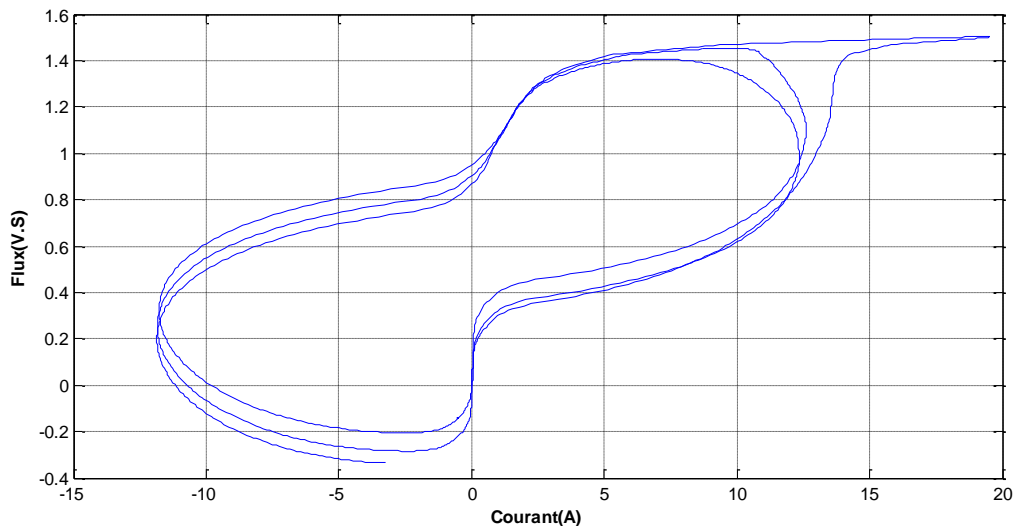


Figure III.25. 3 Premières Cycle hystérésis en charge RL (L non linéaire).

III.8. Conclusion

Le transformateur de puissance peut être fonctionné de plusieurs manières, à vide, chargé avec différentes valeurs. Ces modes de charge influent sur le cycle d'hystérésis. Dans l'objectif de mieux comprendre cette influence, une simulation a été effectuée sur un modèle de transformateur par l'ATPdraw. Les résultats de ces simulations montrent que la valeur de la charge entraînée a une influence sur la surface et le positionnement du cycle d'hystérésis.

Les résultats de la simulation effectuée dans ce chapitre montrent qu'à chaque fois qu'on augmente la valeur de la charge on a une augmentation sur la surface du cycle d'hystérésis.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le développement des transformateurs de puissance suscite un fort intérêt, car ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'électricité sur des longues distances et dans sa distribution aux consommateurs. Il n'est généralement pas envisageable d'utiliser d'autres méthodes pratiques pour réaliser ces tâches, ce qui renforce encore l'importance des transformateurs de puissance.

Les transformateurs présentent des pertes notables, parmi lesquelles on trouve les pertes par courant de Foucault, les pertes par hystérésis, ainsi que d'autres pertes négligeables dues au courant à vide dans l'enroulement primaire.

Ce travail présente l'influence de la charge sur le cycle d'hystérésis d'un transformateur. Pour visualiser cette influence et après la détermination des paramètres de ce transformateur et à l'aide du programme ATP, plusieurs essais ont été effectués, en variant le type de charge et la valeur de chaque type à partir de valeur nominale. Il est bien clair que la charge affecte directement le cycle d'hystérésis, et cela s'explique par la restriction et le décalage de ce cycle, Cette relation se traduit par une diminution de la surface et un déplacement du cycle d'hystérésis suivant la diminution de la charge.

Cette étude peut être complétée par les perspectives suivantes :

- Il serait intéressant d'appliquer les résultats de cette étude dans un environnement de laboratoire afin de réaliser des expériences et de comparer les résultats de simulation avec les résultats expérimentaux. Cela permettrait de valider les modèles et les méthodes utilisés et d'identifier d'éventuelles différences ou erreurs.
- Les résultats obtenus pourraient être extrapolés et appliquer aux transformateurs de la plus grande capacité, ce qui serait d'un grand intérêt dans le domaine de l'ingénierie des systèmes électriques à grande échelle.

En menant ces perspectives supplémentaires sur les transformateurs est nécessaire d'approfondir nos connaissances sur les modèles et les méthodes de conception et de performance.

Références bibliographiques

- [1] N. MEZARI, " Diagnostic des transformateurs de puissances ", Mémoire de magister, Université de MOULOU D MAMMERI de Tizi-Ouzou, Algérie, Juillet 2011.
- [2] Y. LAMINE, "ETUDE PAR SIMULATION DE LA SATURATION D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE", Mémoire de MASTER, Université MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie, 25 septembre 2018.
- [3] N.GAHFIF/M.GASMI, "Impact de la surtension atmosphérique sur les enroulements du transformateur de puissance", Mémoire de Fin d'Etudes, Université MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie, 08 décembre 2014.
- [4] N. DJELLAOU I, H. OUAHAB, "Etude du courant d'appel sympathique dans les réseaux électriques (transformateurs en parallèles) ", Mémoire de Master, Université AKLI MOHAND OULHADJ, Bouira, Algérie.
- [5] M. ABID / A. CHATBI, « Etude de l'influence de la charge sur le régime transitoire pour un transformateur monophasé (ATP-EMTP) », Mémoire de Master, université AKLI MOHAND OULHADJ, BOUIRA, 30 /10/2021
- [6] A. Ouadi Merabet, M. R'gueyeg, "Etude de l'influence du régime transitoire sur le cycle d'hystérésis d'un transformateur monophasé (ATP-EMTP) ", Mémoire de master, Université AKLI MOHAND OULHADJ, Bouira, Algérie, 30/10/2021.
- [7] N. KASMI, A. MESBAHI, "Etude du comportement du transformateur de puissance en régime impulsionnel ", Mémoire de fin d'étude, Université MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie, 28 septembre 2014.
- [8] Z.KHALDOUNE/W.SEDJAL, "Modélisation par la méthode des éléments finis d'un transformateur en vue de la détection des différentes défaillances de son bobinage ", Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, Algérie, 2017/2018.
- [9] A.DEMANE/A.ALILI, "Amélioration de la protection d'un transformateur de puissance", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie, 2017/2018.
- [10] A. RAKOTOMALALA, " Contribution a la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences ", Thèse de doctorat, L'ECOLE CENTRALE DE LYON, France, 1996.
- [11] N. BOUBOUZAL, "Influence de régime du neutre sur les surtensions et les surintensités dans le réseau électrique", Mémoire de magister, Université MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie.
- [12] A. YAHIOU, " Contribution to study and simulation of transients in power transformers", Thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie, 2021.
-

- [13] A. Lounis, L. Seggar, "Impact de changement de l'épaisseur de la tôle magnétique sur le dimensionnement d'un transformateur triphasé 630 KV-30KV/400V", thèse de Master professionnel, Université de MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, Algérie, 2012-2013.
- [14] D. MEDJOUTI, "Dimensionnement et réalisation d'un transformateur triphasé hermétique de puissance 400 kVA – 30 kV/400 V", Mémoire de Fin d'Etudes, Université MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie, 26 juin 2014.
- [15] Wildi Théodore, Gilbert Sybille, "Électrotechnique" 4eme édition. Bruxelles, SainteFoy, Québec De Boeck université, Presses de l'université Laval, 2005.
- [16] Nait Djoudi Amel, F. Bitam-Megherbi, « Impact du changement de l'épaisseur de la tôle magnétique sur le dimensionnement d'un transformateur triphasé 630 kVA – 30 kV/ 400 V », Mémoire de Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2013.
- [17] Patel, Kunal J, "Effects of transformer inrush current Courses", ENG4111 and ENG4112.
- [18] T. LIU, " Manoeuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent ", Thèse de doctorat, L'École supérieure d'électricité, Gif-sur-Yvette, France, 2011.
- [19] DJELLAOUÏ Nacira, OUAHAB Hala, « Etude du courant d'appel sympathique dans les réseaux électriques (transformateurs en parallèles) », Mémoire de Master, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de BOUIRA –ALGERIE, 2018.
- [20](<https://tameson.fr/pages/courant-d-appel-du-transformateur> Consulter le 07/05/2023.)
- [21] Sridhar Shenoy, « L'importance de la démagnétisation du circuit magnétique d'un transformateur », OMICRON Energy Solution Private Limited.
- [22] Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra Ahuja, "Transformer Design Principles : With Applications to Core-Form Power Transformers", 2^{eme} édition, CRC PRESS, 2002
- [23] Dutertre, M, Electrotechnique-Cours.
- [24] Didier Cavallera, « Contribution au renvoi de tension et à la reconstitution du réseau. Identification des paramètres d'un réseau. Estimation des flux rémanents dans un transformateur », thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [25] A. YAHIOU, " Contribution to study and simulation of transients in power Transformers", Thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie, 2021.
- [26] WM. T. MCLYMAN, « TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK », 3^{eme} édition, Idyllwild U.S.A, 2004, 532 p.
- [27] Pierre Mayé, « Aide-mémoire Electrotechnique », Dunod, Paris, 2006.
-