



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Réalisé par :

Ouadi Merabet Abderaouf

Et

R'gueyeg Mohamad Salem

Thème

**Etude de l'influence du regime transitoire sur le cycle
d'hysteresis d'un transformateur monophasé (ATP-EMTP)**

Soutenu le: **30/10/2021**

Devant la commission composée de :

| | | | | |
|-----|-------------------|-------|--------------|------------|
| Dr. | BERRAG Amine | M.C.B | Univ. Bouira | Président |
| Dr. | YAHIOU Abdelghani | M.C.B | Univ. Bouira | Rapporteur |
| Dr. | BENSAID Smir | Prof. | Univ. Bouira | Examineur |

Remerciements

Avant tout nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné la bonne santé, la force, la patience, la volonté et le courage pour achever notre travail.

Nous exprimons tous nos sincères remerciements à notre chère Promoteur, Mr. YAHIOU Abdelghani de nous avoir encadré, pour ses conseils et orientations ainsi que pour sa disponibilité derrière nous Jusqu'à la fin de ce modeste travail.

Notre reconnaissance va particulièrement de nous avoir honoré de leur présence comme jury.

Un grand merci à tous nos enseignants qui, par l'éducation et l'enseignement qu'ils nous ont donné on fait de nous ce que l'on est aujourd'hui.

Nous remercions vivement toutes les personnes qui nous ont aidé, soutenu dans la joie comme dans la peine, dans le meilleur et le pire, de près ou de loin à réaliser ce travail surtout.

Dédicaces 1

À l'aide de DIEU, le tout puissant, ce travail est achevé ;
Je le dédie à toutes les personnes qui me sont chères ; mes très
chers

Parents pour leur sacrifice, leur soutien et leur amour. je serai à
eux reconnaissant pour toujours.

A ma mère, la perle la plus précieuse qui m'entourait, une source
Tendresse, et ceux qui n'ont pas cessé de prier pour moi.

A mon cher père, que Dieu lui fasse miséricorde et le place dans
ses vastes jardins, l'exemple dans la vie qui m'a appris que

La patience est le secret du succès.

A mes chers et chers frères

Pour mes deux chères sœurs

Frères, sœur, je vous remercie pour votre générosité et votre
affection.

Votre soutien moral et financier et pour tous les sacrifices que
vous avez consentis pour moi.

Tous mes amis

A tous mes camarades du réseau électrique.

ABDERAOUF

Dédicaces 2

À l'aide de DIEU, le tout puissant, ce travail est achevé ;
Je le dédie à 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

Mes frères, mes sœurs merci pour votre générosité, votre
affection,
votre soutien moral et financier et pour tout le sacrifice que vous
donnez pour moi.

À mon cher binôme qui m'a accepté de lui rejoindre dans ce
travail.

À tous mes amis

À tous mes camarades de réseaux électrique.

À tous ceux qui me connaissent de loin ou de près

MOHAMEDSALE

Résumé

Ce mémoire a pour but de traiter l'influence du régime transition sur le cycle d'hystérésis du transformateur électrique monophasé. Premièrement une étude général des caractéristiques électromagnétiques du transformateur monophasé seront présentées, ensuite on passe à une simulation à l'aide du programme ATP_EMTP pour pouvoir visualiser la relation entre le cycle d'hystérésis et le courant d'appel magnétisant dans le regime transitoire. Cette relation se traduit par une diminution de la surface et un déplacement du cycle d'hystérésis suivant l'augmentation du pic de courant d'appel magnétisant.

Mots clés : transformateur électrique monophasé, courant d'appel magnétisant, régime transitoire, cycle hystérésis, ATP_EMTP.

Abstract

The purpose of this thesis is to deal with the influence of the transition regime on the hysteresis cycle of the single-phase electric transformer. First a general study of the electromagnetic characteristics of the single-phase transformer will be presented, then we move on to a simulation using the ATP_EMTP program to be able to visualize the relationship between the hysteresis cycle and the magnetizing inrush current in the transient state. This relationship results in a decrease in the area and a shift in the hysteresis cycle following the increase in the magnetizing inrush current peak.

Key words: single-phase electrical transformer, magnetize inrush current, transient regime, hysteresis cycle, ATP_EMTP.

المخلص

الغرض من هذه الأطروحة هو التعامل مع تأثير النظام الانتقالي على دورة التخلف للمحول الكهربائي أحادي الطور. أولاً ، سيتم تقديم دراسة عامة للخصائص الكهرومغناطيسية للمحول أحادي الطور ، ثم ننتقل إلى محاكاة باستخدام لنكون قادرين على تصور العلاقة بين دورة التباطؤ والتيار التدفق الممغنط في الحالة العابرة. ATP_EMTP برنامج تؤدي هذه العلاقة إلى انخفاض في المنطقة وتحول في دورة التباطؤ بعد الزيادة في ذروة تيار الاندفاع الممغنط .
الكلمات المفتاحية: محول كهربائي أحادي الطور , ATP_EMTP, تيار تدفق ممغنط ، نظام عابر ، دورة التباطؤ

Table des Matières

| | |
|--|------|
| Remerciements | I |
| Résumé | II |
| Table des Matières | III |
| Liste des Figures..... | VI |
| Liste des Tableaux..... | VII |
| Listes des Acronymes et Symboles | VIII |
| Introduction Générale..... | 1 |

Chapitre I : Généralité sur transformateur électrique monophasé

| | |
|---|----|
| I.1 Introduction | 4 |
| I.2 Définition de transformateur monophasé..... | 4 |
| I.3 Constitution | 5 |
| I.3.1 Circuit magnétique | 5 |
| I.3.2 Enroulements | 5 |
| I.3.3 Isolation | 6 |
| I.4 Utilisation de transformateur | 6 |
| I.5 Principe de fonctionnement | 6 |
| I.6 Schéma électrique équivalent | 7 |
| I.7 Equations Magnétiques | 8 |
| I.7.1 Loi de Lenz-Faraday | 8 |
| I.7.2 Loi d'Hopkinson | 8 |
| I.7.3 Formule de Boucheront | 9 |
| I.8 Rapport de transformation | 10 |
| I.9 Transformateur monophasé idéal | 10 |
| I.9.1 Equations électriques | 10 |
| I.9.2 Puissance d'un transformateur parfait | 11 |
| I.10 Transformateur monophasé réelle | 11 |
| I.11 Chute de tension au secondaire | 12 |
| I.12 Pertes d'un transformateur | 12 |
| I.12.1 Pertes fer | 12 |
| I.12.1.1 Pertes par hystérésis | 13 |
| I.12.1.2 Pertes par courants de Foucault | 13 |
| I.12.2 Pertes joule | 14 |

| | |
|--|----|
| I.13 Transformateur de mesure | 14 |
| I.13.1 Transformateur de tension | 14 |
| I.13.2 Transformateur de courant | 15 |
| I.15 Essais du transformateur | 15 |
| I.15.1 Essai à vide | 15 |
| I.15.2 Essai en court-circuit | 16 |
| I.16 Protection des transformateurs..... | 17 |
| I.17 Conclusion | 17 |

Chapitre II : Courant d'appel magnétisant et régime de transformateur

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction | 19 |
| II.2 Régime permanent et Régime transitoire | 19 |
| II.3 Champs magnétique et induction magnétique | 20 |
| II.4 Force magnétomotrice F.m.m..... | 20 |
| II.5 Caractéristiques du circuit magnétique d'un transformateur..... | 20 |
| II.5.1 Circuit magnétique homogènes linéaires | 20 |
| II.5.2 Circuits hétérogènes linéaires | 21 |
| II.5.3 Circuits non-linéaires..... | 21 |
| II.5.3.1 Forme du courant..... | 22 |
| II.5.4 Circuits magnétiques en régime alternatif sinusoïdal..... | 22 |
| II.5.4.1 Cas d'un matériau linéaire idéal | 22 |
| II.5.4.2 Cas d'un matériau réel non-linéaire | 22 |
| II.6 Courant d'appel magnétisant | 23 |
| II.6.1 Flux rémanent | 23 |
| II.6.2 Effet de flux rémanent | 23 |
| II.6.3 Courant magnétisant | 24 |
| II.6.4 Effet de courant d'appel | 24 |
| II.6.5 Courant d'appel et Flux rémanent | 25 |
| II.7 Mise sous tension d'un transformateur | 28 |
| II.8 Modélisation de transformateur de puissance | 29 |
| II.8.1 Transformateur monophasé linéaire sans saturation | 29 |
| II.8.2 Transformateur monophasé avec saturation | 30 |
| II.8.3 Transformateur monophasé avec saturation et perte fer | 33 |
| II.9 Saturation magnétique dans les transformateurs | 33 |
| II.10 Conclusion | 33 |

Chapitre III : simulation de l'influence de courant d'appel sur Cycle d'hystérésis

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction | 35 |
| III.2 Cycle hystérésis | 35 |
| III.3 L'ATP-EMTP..... | 36 |
| III.4 Détermination des paramètres de transformateur d'essai | 37 |
| III.5 Caractéristiques de la branche magnétisante | 38 |
| III.6 Simulation de courant d'appel et le cycle d'hystérésis | 41 |
| III.6.1 régime établi | 41 |
| III.6.2 régime transitoire | 42 |
| III.7 Conclusion | 48 |
| Conclusion Générale | 49 |
| Références | 50 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 Symbole de transformateur monophasé.. | 4 |
| Figure I.2 Schéma d'un transformateur monophasé.. | 4 |
| Figure I.3 Enroulements de transformateur.. | 5 |
| Figure I.4 Figure représente le Principe de fonctionnement. | 7 |
| Figure I.5 Schéma électrique monophasé. . | 7 |
| Figure I.6 Circuit électrique équivalent d'un transformateur idéal. | 11 |
| Figure I.7 Schéma équivalent d'un transformateur réel. | 12 |
| Figure I.8 représenté feuilletage de matériau. | 14 |
| Figure I.9 transformateur de tension. | 14 |
| Figure I.10 Transformateur de courant. | 15 |
| Figure I.11 représente l'essai à vide. | 15 |
| Figure I.12 représente l'essai en court-circuit. | 16 |
| Figure II.1 Représentation d'un circuit magnétique homogène linéaire. | 21 |
| Figure II.2 Courbe du Φ en fonction de I $\Phi(I)$. | 22 |
| Figure II.3 représentation d'un circuit magnétique en régime alternatif. | 23 |
| Figure II.4 Cycle d'hystérésis. | 24 |
| Figure II.5 Flux et courant magnétisant en régime établi. | 27 |
| Figure II.6 Flux et courant d'appel après ré-enclenchement. | 27 |
| Figure II.7 Courbe de saturation du Flux on fonction Courant (en valeur crête). | 28 |
| Figure II.8 modèle sans saturation. | 30 |
| Figure II.9 modèle avec perte fer sans saturation. | 31 |
| Figure II.10 modèle avec saturation. | 31 |
| Figure II.11 Inductance non linéaire simplifiée avec deux pentes. | 32 |
| Figure II.12 modèle avec perte fer et saturation. . | 33 |
| Figure III.1 Cycle hystérésis | 36 |
| Figure III.2 modèle de simulation de transformateur monophasé à vide | 37 |
| Figure III.3 Transformateur d'essai monophasé..... | 38 |
| Figure III.4 Caractéristique de la résistance magnétisant..... | 40 |
| Figure III.5 Courbe de saturation de l'inductance magnétisante..... | 40 |
| Figure III.6 Forme d'onde du courant en régime établi à vide..... | 41 |
| Figure III.7 Cycle d'hystérésis en régime établie à vide..... | 42 |
| Figure III.8 Courbe de courant d'appel $i(t)$ a $t_f=0.5808s$ | 42 |

| | |
|--|----|
| Figure III.9 Cycle d'hystérésis a $t_f=0.5808s$ | 44 |
| Figure III.10 Courbe de courant d'appel à $t_f=0,5828s$ | 44 |
| Figure III.11 Courbe de cycle d'hystérésis à $t_f=0,5828s$ | 46 |
| Figure III.12 Courbe de courant d'appel à $t_f=0,5848s$ | 46 |
| Figure III.13 forme d'onde global Courbe de cycle d'hystérésis a $t_f=0,5848s$ | 48 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableaux I.1 : Analogie entre les paramètres électriques et magnétiques. | 9 |
| Tableau III.1 : Données de la plaque signalétique du transformateur | 39 |
| Tableau III.2 : Essai à vide et en court-circuit | 39 |
| Tableau III.3 : Caractéristiques calculées en valeurs | 40 |

Listes des Acronymes et Symboles

EMTP : Electromagnetic Transient Program

ATP : Alternative Transient Program

BPA : Bonneville Power Administration.

EPRI : Electric Power Research Institute.

\mathfrak{F} : Force magnétomotrice.

H : Intensité de champ magnétique.

H_c : Intensité de champ magnétique coercitif.

B_r : Densité de champ rémanent.

B : Densité de champ magnétique.

μ : Perméabilité.

Φ : Flux élémentaire.

Φ_r : Flux rémanent.

\mathfrak{R} : Reluctance.

L : Inductance.

R : Résistance.

C : Condensateur.

X : Réactance.

R_s : Résistance ramenée au secondaire.

X_s : Réactance ramenée au secondaire.

R_f : Résistance de branche magnétisante.

X_m : Réactance de branche magnétisante.

μ_0 : Perméabilité de l'air.

μ_r : Perméabilité relative.

N, n : Nombre de spires.

A : Section de noyau (surface).

m : Rapport de transformation.

ω : Pulsation angulaire.

l : Longueur du noyau

f : Fréquence.

Z_L : Impédance inductive.

Z_C : Impédance capacitive.

U, V, v : Tension.

I, i : Courant.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

S : Puissance apparent.

P_h : Pert hystérésis.

P_f : Pert fer.

E : Intensité de champ électrique.

D : Densité de champ électrique.

σ : Conductivité.

T : Période.

t : Temps.

t_f : Temps de ferméteur.

Introduction Générale

Le transformateur est une sorte de convertisseur "AC-AC". Sa fonction est de changer l'amplitude de la variable AC (tension, courant) tout en gardant la fréquence et la forme d'onde inchangées, de sorte que le récepteur (charge) puisse être utilisé dans la puissance la grille. Les transformateurs sont des machines statiques à l'efficacité exclusive. Leur utilisation est vitale pour la transmission de l'énergie électrique. Ils assurent que la tension entre l'alternateur (source) et le réseau de transport augmente puis diminue la tension du réseau entraînée par l'utilisateur. Les transformateurs de puissance sont l'une des unités les plus importantes du réseau énergétique, que ce soit dans la production, le transport ou la distribution. Ils constituent une partie importante du réseau énergétique car ils permettent de convertir la tension en différents potentiels. Par exemple, un transformateur élévateur peut réduire le courant sur la ligne de transmission en augmentant la tension, et pour la même raison, réduire la perte et la taille du conducteur. Les transformateurs sont des composants très coûteux. En termes d'investissement, ils représentent près de 60 % du coût total des postes. Toute interruption de ces composants due à différentes perturbations affectera la fiabilité de l'ensemble du réseau et aura un impact économique considérable sur le système. Par conséquent, la fiabilité et la rentabilité de ces composants sont fortement recherchées. La modélisation des transformateurs représente un moyen de description du fonctionnement qui dépend essentiellement de la gamme de fréquence.

En raison du fonctionnement du disjoncteur, le transformateur de puissance peut subir des transitoires. La fermeture incontrôlée du disjoncteur sur le transformateur à vide va générer un courant à forte composante continue, appelé « courant de choc », et l'amplitude de ces courants peut atteindre la valeur maximale du courant de court-circuit. La raison principale de ces courants est le flux magnétique agité qui existe généralement dans le noyau magnétique lorsque le transformateur de puissance est coupé et que le noyau de fer est saturé.

Le transformateur est l'un des éléments non linéaires les plus courants dans les systèmes d'alimentation. La non-linéarité est causée par la caractéristiques de magnétisation du noyau de fer du transformateur, et c'est une partie fondamentale du génie électrique et est très important dans le réseau électrique (transmission et distribution d'énergie électrique), et sa recherche constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Goulard et John-Dixon Gibbs en 1831. Il a joué un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique, notamment le développement du courant alternatif. Son essor fut immédiat, les puissances réalisées augmentèrent très rapidement (quelques 100 kVA en 1900 et quelque MVA en 1910). Les transformateurs se différencient selon leurs fonctionnements, à leurs construction et utilisation.

D'après ces différents types de convertisseur statique, on va traiter dans ce travail l'étude des transformateurs électriques monophasés.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de régime transitoire sur cycle d'hystérésis, à l'aide du programme ATP (Alternative Transient Program)

Ce travail est décomposé en trois chapitres

Le premier chapitre présente des généralités sur le transformateur électrique monophasé, sa construction, son principe de fonctionnement, les lois fondamentales électriques, magnétiques et ces différents types des pertes.

Le deuxième chapitre est consacré pour l'étude du régime transitoire et permanent. Ensuite une présentation des lois et connaissances de base de magnétisation des matériaux et le courant d'appel, avec la non-linéarité des circuits et une modélisation d'un transformateur à basse fréquence.

Et dans le troisième chapitre une simulation sera effectuée pour aboutir à une étude spécifique de l'influence du régime transitoire et de courant d'appel sur la forme et la position du cycle d'hystérésis. Cette simulation sera réalisée à l'aide du programme ATP (Alternative Transient Program) en vue d'observer les changements de la forme et de l'emplacement du cycle d'hystérésis causés par les différentes amplitudes de courant d'appel suite à une variation de temps d'ouverture du disjoncteur, ensuite terminer ce travail par une conclusion générale qui résume les conséquences et résultats obtenus.

Chapitre I
Généralité sur
transformateur électrique
monophasé

I.1 Introduction

Le transformateur est un équipement électrique très important dans le réseau électrique car c'est la machine de base pour la transmission de l'énergie électrique pour différents niveaux de tension.

Les transformateurs peuvent modifier la tension et le courant dans le circuit. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée de manière économique sur de longues distances et distribuée aux consommateurs. Ce chapitre présente des généralités, des définitions et quelques lois fondamentales de l'électromagnétisme.

I.2 Définition de transformateur monophasé

Un transformateur monophasé est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à élever ou abaisser le niveau de tension en gardant la même puissance et fréquence, en assurant une isolation galvanique (aucune liaison électrique entre les enroulements primaires et secondaires) [1].

a. Symbole de transformateur

symboles international d'un transformateur monophasé



Figure.I.1 Symbole de transformateur monophasé[5].

b. Schéma de transformateur

la figure.I.2. représente les paramètres primaires, secondaires et la canalisation du flux magnétique

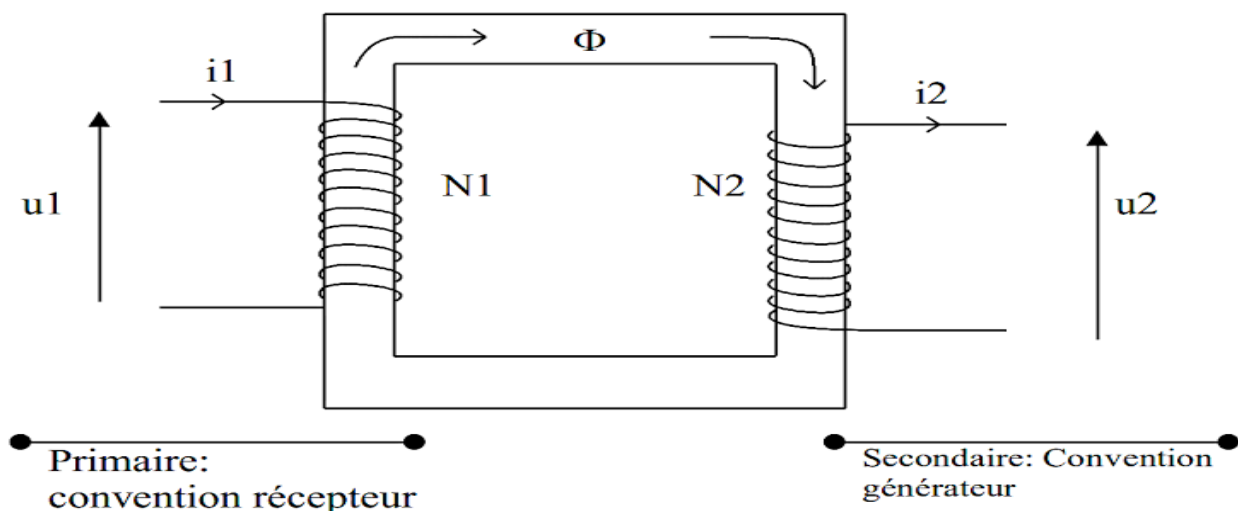


Figure.I.2 Schéma d'un transformateur monophasé[5].

u_1 : tension primaire

u_2 : tension secondaire

i_1 : courant primaire

i_2 : courant secondaire

N_1 : Nombre de spires de l'enroulement primaire.

N_2 : Nombre de spires de l'enroulement secondaire.

Φ : Le flux magnétique

I.3 Constitution

I.3.1 Circuit magnétique

Un circuit magnétique est un assemblage de tôles d'acier magnétique isolées les unes des autres, pour diminuer les pertes par courants de Foucault, destiné à canaliser le flux. [2].

Le rôle du circuit magnétique est de canaliser les lignes de champ. Les matériaux magnétiques utilisés doivent présenter une perméabilité relative élevée, accepter parallèlement un niveau d'induction à saturation important et être le siège de pertes acceptable aux fréquences de travail, ce qui se traduit par une résistivité d'autant plus grande que la fréquence est importante [3].

I.3.2 Enroulements

Un transformateur présente 2 enroulements, le primaire et le secondaire. L'enroulement primaire est la bobine qui reçoit l'énergie. Il est formé, bobiné et façonné autour du noyau de fer. L'enroulement secondaire est la bobine qui décharge l'énergie sous une tension transformée ou modifiée. Lorsqu'un courant instable ou alternatif est appliqué sur l'enroulement primaire, ce courant primaire produit un champ magnétique « instable » dans le noyau de fer. Ce champ instable traverse la bobine secondaire et induit une tension dépendant du nombre de conducteurs dans la bobine secondaire par lignes magnétiques.

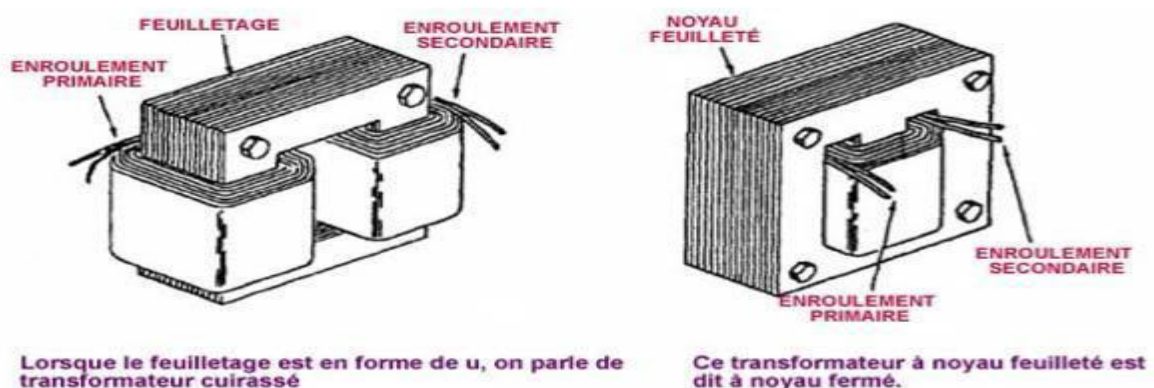


Figure I.3 Enroulements de transformateur[4]

I.3.3 Isolation

Les enroulements étant soumis à des tensions électriques il faut les isoler pour assurer leur bon fonctionnement et la sécurité des utilisateurs.

Les fils ronds ou les méplats sont recouverts d'une couche de vernis cuit constituant un émail.

La tension entre couche présentant un risque de claquage est contrée par la mise en place d'un isolant sous forme de ruban mince et ceci systématiquement entre enroulements. L'ensemble du bobinage, voire le transformateur tout entier, est immergé dans un vernis, par gravité ou sous vide et pression, pour être ensuite passé dans une étuve afin d'être recuit.

Pour toute isolation une température maximale à ne pas dépasser est définie. Au-delà la durée de vie du matériau diminue rapidement. [4]

I.4 Utilisation de transformateur

Le transformateur monophasé a deux rôles : d'une part, il assure l'isolement entre le secteur monophasé et un circuit d'utilisation, et d'autre part, il adapte les valeurs efficaces des tensions aux niveaux souhaités. Par exemple, il est nécessaire d'abaisser la tension dans certains appareils pour des raisons de sécurité.

I.5 Principe de fonctionnement

Le primaire alimenté par une source de tension alternative, est parcouru par un courant alternatif qui crée un flux magnétique variable dans le noyau, le secondaire est alors le siège d'une force électromotrice induite.

Si le circuit est fermé sur un récepteur, il apparaît un courant qui donne une force magnétomotrice s'opposant à celle du primaire. Comme le flux est imposé par la tension de la source alternative, la force magnétomotrice résultante est inchangée et le primaire appelle un courant qui permet le maintien de l'état magnétique du noyau. On peut ainsi transférer une puissance du primaire vers le secondaire sans aucun contact électrique. Dans son principe, l'appareil est réversible, l'un des enroulements (n'importe lequel) pouvant être choisi comme primaire. En pratique, le rôle des deux bobines est cependant bien défini [1].

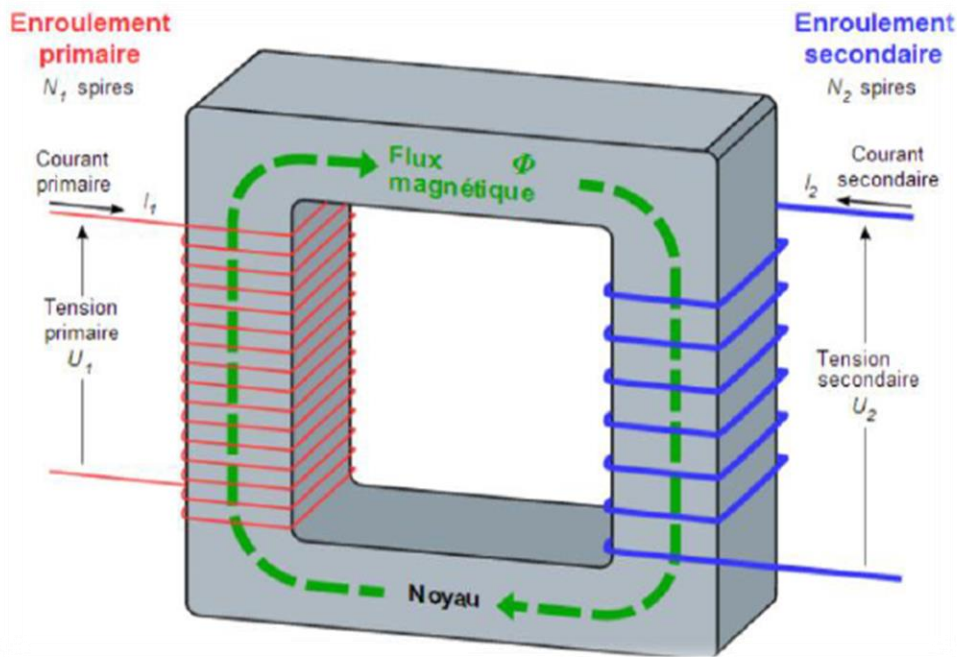


Figure I.4 Figure représente le Principe de fonctionnement[1].

Le transformateur ne peut pas fonctionner en régime de tension continue puis que les forces électromotrices dans les bobinages sont induites par les variations de flux.[16]

Le transformateur est réversible ; chaque bobinage peut jouer le rôle du primaire ou secondaire.

I.6 Schéma électrique équivalent

Malgré le comportement et la description du fonctionnement du transformateur sont différente selon l'application : transformateur de courant, transformateur de tension, transformateur de puissance, ces transformateurs peuvent être représentés par le même. La figure.I.5 montre une représentation schématique d'un transformateur monophasé à deux enroulements où :

- Le circuit magnétique est réalisé avec un matériau à haute perméabilité mais non infinie.
- Le milieu (l'air, l'huile, enroulements n'a pas une perméabilité nulle. Il en résulte qu'il y a des fuites magnétiques.

La figure ci-dessous représente le schéma électrique monophasé de transformateur réel [6].

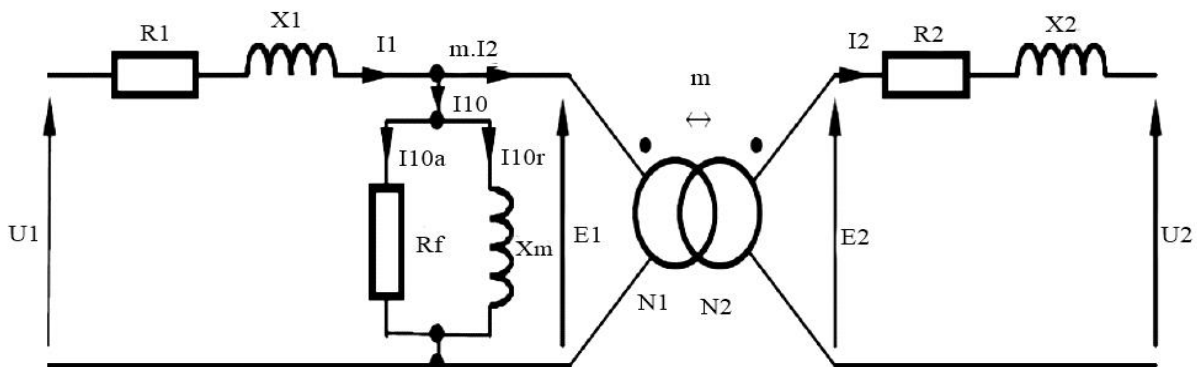


Figure I.5 Schéma électrique monophasé.[6]

Chapitre I : Généralité sur transformateur électrique monophasé

Les forces électromotrices respectives sont données ci-dessous :

$$E_1 = \pi\sqrt{2}N_1\Phi_{max} \quad (\text{I.1})$$

$$E_2 = \pi\sqrt{2}N_2\Phi_{max} \quad (\text{I.2})$$

N_1 : Nombre de spires de l'enroulement primaire.

N_2 : Nombre de spires de l'enroulement secondaire.

Φ_{max} : Le flux magnétique maximal.

R_1 et R_2 signifient respectivement les résistances des enroulements primaires et secondaire.

X_1 et X_2 signifient respectivement les réactances des enroulements primaires et secondaire.

I_1 et I_2 représentent respectivement le courant primaire et celui du secondaire.

R_f et X_m signifient respectivement la résistances et la réactance de la branche magnétisante.

I.7 Equations Magnétiques

I.7.1 Loi de Lenz-Faraday

Le phénomène d'induction transforme une variation de flux magnétique en tension :

Loi de Lenz-Faraday

$$u(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{I.3})$$

La spéculation de courant sinusoïdal dans N spires bobinées sur un matériau magnétique fermé crée un flux magnétique sinusoïdal

$$\phi(t) = \frac{ni(t)}{\mathfrak{R}} \quad (\text{I.4})$$

donc :

$$u(t) = \frac{n^2}{\mathfrak{R}} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I.5})$$

L : l'inductance, et donné par :

$$L = \frac{n^2}{\mathfrak{R}} \quad (\text{I.6})$$

I.7.2 Loi d'Hopkinson

Loi d'Hopkinson permet de calculer la force magnétomotrice dans un générateur électrique.

Donné

$$\mathfrak{S} = ni = \mathfrak{R}\Phi \quad (\text{I.7})$$

Chapitre I : Généralité sur transformateur électrique monophasé

I.7.3 Formule de Boucherot

La formule de Boucherot établit un lien entre la tension sinusoïdale aux bornes d'un enroulement bobiné autour d'un circuit magnétique et le champ magnétique dans ce circuit.

$$v = 4.44NfBS \quad (\text{I.8})$$

v : l'expression de la tension efficace aux bornes d'un enroulement.

B : l'amplitude du champ magnétique variable.

S : la section du circuit magnétique autour duquel l'enroulement est bobiné.

N : le nombre de spire de l'enroulement.



f : la fréquence de la tension appliquée à l'enroulement.

Détermination de l'amplitude du champ magnétique dans le circuit magnétique permet de vérifier la non saturation du matériau (si saturation, la tension secondaire ne sera plus sinusoïdale).

L'augmentation de la fréquence permet de diminuer S , donc de réduire la taille du circuit magnétique[7].

Le tableau ci-dessous représente la correspondance entre les paramètres électriques et magnétiques.

Le Tableau 1.1 Analogie entre les paramètres électriques et magnétique[7].

| parameters électriques | parameters magnétiques |
|---|--|
|  |  |
| Intensité de champ électrique E , (V/m) | Intensité de champ magnétique H , (A.tur/ m) |
| Tension V , (V) | Force magnetomotrice \mathfrak{F} , (A.turns) |
| Courant I , (A) | Flux magnétique Φ , (Wb) |
| Densité de champ électrique D , (V/m ²) | Densité de champ magnétique B , (Wb/m ²) |
| Resistance R , (Ω) | Reluctance \mathfrak{R} . (A.turns/ Web) |
| Conductivite σ , (1/Ω.m) | Permeabilite μ , (Web/A. m) |
| Loi d'Ohm $V=R.I$ | Loi d'Hopkinson $\mathfrak{F} = nI = \mathfrak{R}\Phi$ |

I.8 Rapport de transformation

C'est le rapport du nombre de spires au secondaire sur le nombre de spires au primaire, s'ils sont traversés par le même flux :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{I.9})$$

On distingue :

- Si $m > 1$ alors $U_1 > U_2$: le transformateur est abaisseur;
- Si $m < 1$ alors $U_1 < U_2$: le transformateur est élévateur;
- Si $m = 1$ alors $U_1 = U_2$: le transformateur est utilisé comme isolateur.

I.9 Transformateur monophasé idéal

Un transformateur idéal ou parfait est un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances.

Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux sont négligées, perméabilité magnétique du matériau ferromagnétique presque infinie de sorte que la valeur de la réluctance soit nulle

Le rapport du nombre de spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine totalement le rapport de transformation du transformateur. $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{I_1}{I_2}$

Comme on néglige les pertes, la puissance est transmise intégralement, c'est pourquoi l'intensité du courant dans le secondaire sera dans le rapport inverse soit près de 19 fois plus importante que celle circulant dans le primaire [3].

I.9.1 Equations électriques

D'après la loi de mailles du schéma électrique équivalent

$$\text{on aura } V_1(t) = -e_1(t) \text{ Avec } e_1(t) = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{I.10})$$

$$\text{et } V_2(t) = e_2(t) \text{ Avec } e_2(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{I.11})$$

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0 \quad \text{On aura : } \frac{V_1(t)}{V_2(t)} = - \frac{e_1(t)}{e_2(t)} = - \frac{N_1}{N_2} = - \frac{i_2(t)}{i_1(t)} \quad (\text{I.12})$$

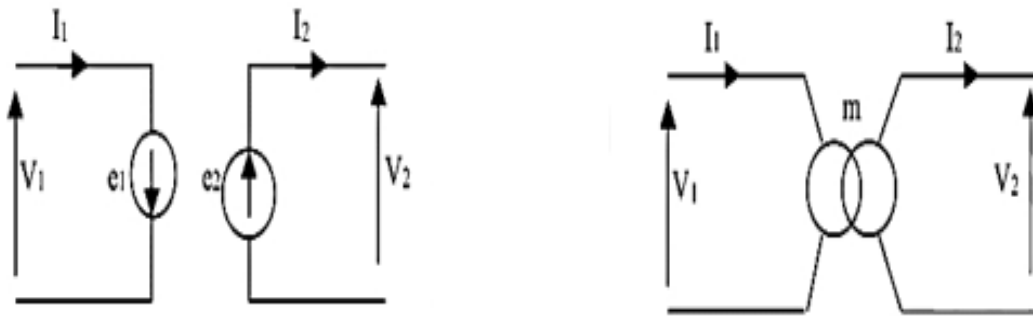


Figure I.6 Circuit électrique équivalent d'un transformateur idéal[3].

I.9.2 Puissance d'un transformateur parfait

Le principe de fonctionnement d'un transformateur parfait est le passage d'un niveau de tension, courant à un autre de tel sorte que les pertes soient négligeables, et la puissance reste conservée.

$$\text{Puissance apparente: } S_1 = V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \quad \text{donc } S_1 = S_2$$

$$\text{Puissance active: } P_1 = P_2 = S_1 \times \cos \varphi_1 = S_2 \times \cos \varphi_2$$

$$\text{Puissance réactive : } Q_1 = Q_2 = S_1 \times \sin \varphi_1 = S_2 \sin \varphi_2$$

Remarque :

Le rendement d'un transformateur parfait est égal à 1 (pas de pertes). Les puissances absorbées par le primaire seront absorbées par la charge connectée au secondaire.

I.10 Transformateur monophasé réelle

Le transformateur réel ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

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

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire plusieurs sources de pertes dans le transformateur :

1. Puisque la perméabilité du noyau est non-infinie, la reluctance du noyau ne sera pas nulle.

Il y a par conséquent des fuites de flux au primaire et aux secondaire

2. On a déjà vu qu'il existe des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.

3. La résistivité des fils de cuivre implique 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 aussi en fonction de la charge[8].

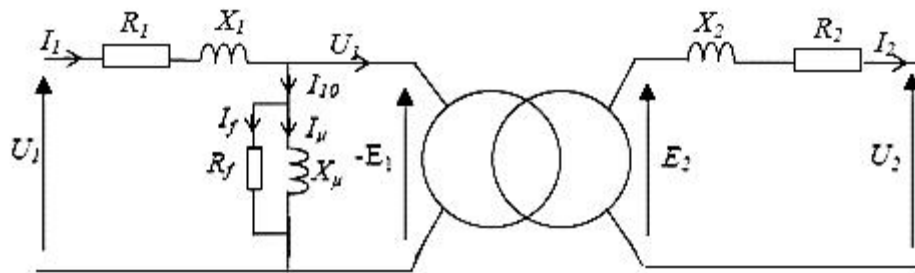


Figure I.7 Schéma équivalent d'un transformateur réel[8].

I.11 Chute de tension au secondaire

Contrairement à un transformateur parfait, pour un transformateur réel, la tension U_2 en charge est différente de la tension à vide U_{20} . U_2 diminue lorsque l'intensité I_2 du courant débité au secondaire augmente. La différence entre U_{20} et U_2 est la chute de tension au secondaire du transformateur. Cette chute de tension est due aux résistances des enroulements et aux fuites magnétiques.[9]

La chute de tension dépend du déphasage de la charge au secondaire φ_2 .

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2$$

$$\Delta U_2 = R_S I_2 \cos \varphi_2 + X_S I_2 \sin \varphi_2$$

I.12 Pertes d'un transformateur

I.12.1 Pertes fer

Les pertes dans le circuit magnétique, également appelées « pertes fer » échauffent le matériau elles dépendent de la fréquence et de la tension d'alimentation. À fréquence constante, on peut les considérer comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation. Ces pertes ont deux origines physiques :

I.12.1.1 Pertes par hystérésis

On montre qu'un élément de matériau magnétique absorbe et dissipe, chaque fois qu'il décrit un cycle d'hystérésis, une énergie proportionnelle à l'aire A de ce cycle et au volume de matériau.

$$A = k \cdot B_m \cdot H_m \quad (\text{I.13})$$

Si le champ alternatif est à fréquence donnée f , la puissance P_h absorbée par les pertes sera de la forme

$$P_h = k \cdot f \cdot F(B_m) \quad (\text{I.14})$$

où $F(B_m)$ est une fonction de l'induction maximale B_m .

En pratique, On adopte en général (formule de Steinmetz) : $P_h = k \cdot f \cdot B_m^2$ (I.15)

P_h s'exprime en watts/kilogramme. L'ordre de grandeur actuel est voisin de 0,5.

Pour montrer comment ces pertes se produisent. On suppose les pertes Joule négligeables et on considère le trajet du point représentatif sur le cycle d'hystérésis

en pratique, les pertes sont de la forme : $P_h \sim \eta \cdot V \cdot f \cdot B_{max}^2$ (I.16)

Les pertes sont, de façon évidente, proportionnelles à la fréquence f . [10]

I.12.1.2 Pertes par courants de Foucault

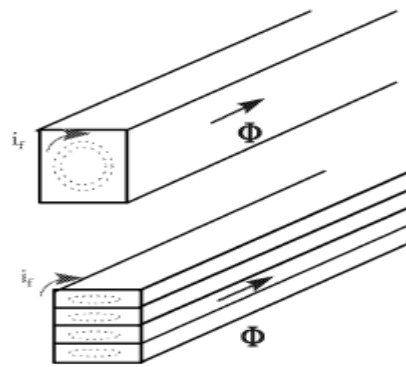
Les matériaux ferromagnétiques utilisés sont généralement conducteurs de courant en même temps, même si leur résistivité est mauvaise. Par conséquent, dans le cas des champs alternatifs, ils sont le siège de courants induits appelés courants de Foucault. Les lignes de ces courants sont formées à l'intérieur de la masse du matériau magnétique.

Afin de limiter l'intensité de ces courants et la chaleur générée par effet Joule, la résistivité du matériau est augmentée en remplaçant les pièces volumineuses par des tôles, conservant efficacement la magnétorésistance. En effet, cette disposition se traduit par une légère diminution de la section prévue pour le passage du flux magnétique.

Ces feuilles de circuits dites laminées sont isolées électriquement les unes des autres. On peut également réduire les pertes en faisant appel à des matériaux isolants (ferrites). [10]

On constate que ces pertes P_f , avec les matériaux actuels, sont sensiblement proportionnelles entre autres au carré de la fréquence et de l'induction maximale :

$$P_f \sim K_f V e^2 B_{max}^2 f^2 \quad (\text{I.17})$$



Feuilletage des tôles destiné à limiter les courants de Foucault

Figure I.8 représenté feuilletage de matériau[10]

I.12.2 Pertes 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. Elles sont représentées par une résistance R_s (au secondaire) traversée par le courant I_2 [10].

I.13 Transformateur de mesure

I.13.1 Transformateur de tension

Les transformateurs de tension sont des transformateurs de haute précision dont le rapport de transformation varie très peu avec la charge. De plus, la tension secondaire est en phase avec la tension primaire à une fraction de degrés près.

Les transformateurs de tension sont utilisés sur les lignes de haute tension pour alimenter les appareils de mesure (voltmètres, wattmètres, etc.) ou de protection (relais, disjoncteurs, etc.). [11]

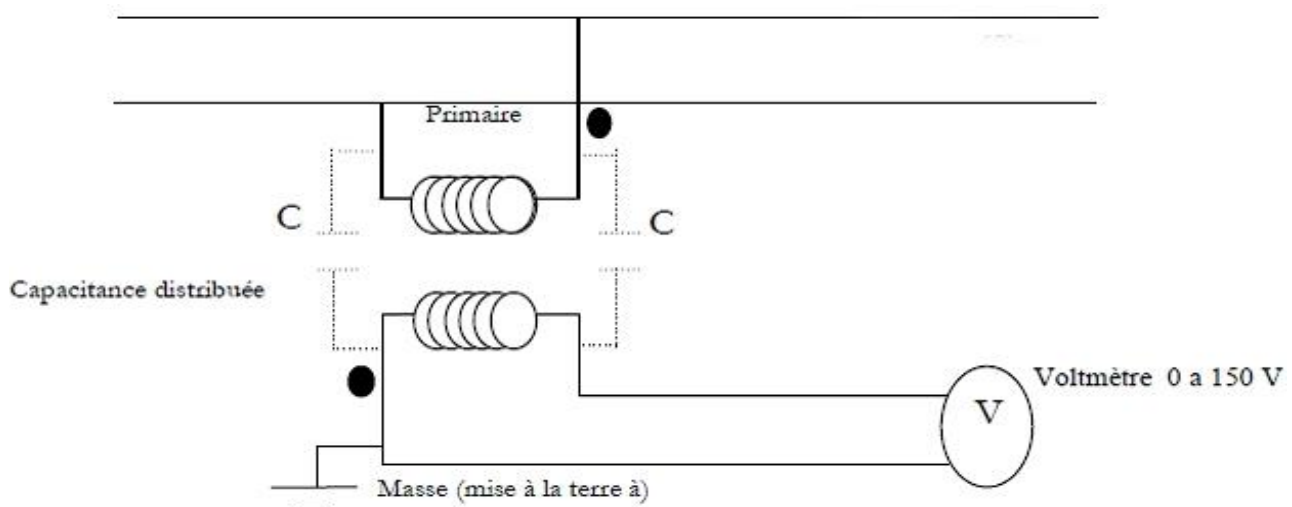


Figure I.9 transformateur de tension. [11]

I.13.2 Transformateur de courant

Un transformateur de courant est un appareil utilisé pour la mesure de forts courants électriques. Il sert à faire l'adaptation entre le courant élevé circulant dans un circuit électrique (jusqu'à quelques milliers d'ampères) et l'ampèremètre, qui lui est prévu pour mesurer des courants de l'ordre de 1 Ampère. [11]

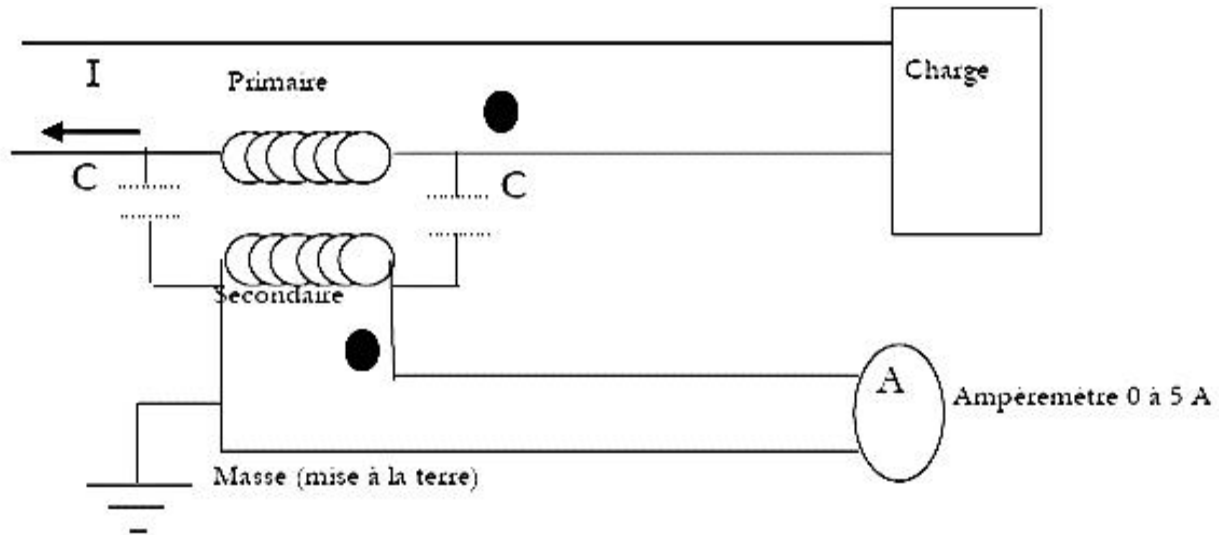


Figure I.10 Transformateur de courant. [11]

I.15 Essais du 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.15.1 Essai à vide

Le secondaire du transformateur est ouvert (on caractérise donc une bobine à noyau de fer). On applique la tension d'entrée en l'augmentant progressivement de 0 jusqu'à la valeur de fonctionnement pour éviter un risque de fort appel de courant en régime transitoire.[12]

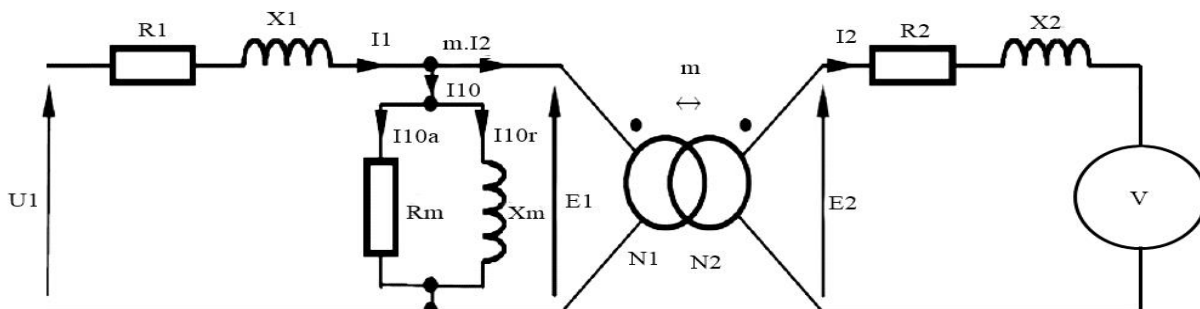


Figure I.11 représente l'essai à vide.[6]

Chapitre I : Généralité sur transformateur électrique monophasé

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. [12]

$$\text{on à } I_2 = 0 \text{ allure } I'_1 = mI_2 = 0 \quad I_1 = I_{10} = I_{0a} + I_{0r} \text{ (courant magnétisant)}$$

$$\text{et } U_1 = U_{1N} \quad U_{20} = E_2$$

$$\text{donc : } P_{10} = P_f$$

$$P_{10} = U_1 I_{0a} = U_1 I_0 \cos \varphi_0 \text{ et } Q_{10} = U_1 I_{0r} = U_1 I_0 \sin \varphi_0$$

Donc en remplaçant on aura :

$$R_m = \frac{U_1}{I_{0a}} = \frac{U_1}{I_0 \cos \varphi_0} = \frac{U_1^2}{P_{10}} = \frac{U_1^2}{P_f} \quad (\text{I.18})$$

$$X_m = \frac{U_1}{I_{0r}} = \frac{U_1}{I_0 \sin \varphi_0} = \frac{U_1^2}{Q_{10}} \Rightarrow L_m = \frac{U_1^2}{\omega \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2}} \quad (\text{I.19})$$

I.15.2 Essai en court-circuit

Cet essai est réalisé en mettant le secondaire du transformateur en court-circuit. Il doit être réalisé sous tension primaire U_1 faible (moins du dixième de la tension nominale en général) avec un courant secondaire nominal (à contrôler !). [12]

Pour cet essai on détermine les paramètres R_s et X_s résistance et l'inductance ramenés au secondaire.

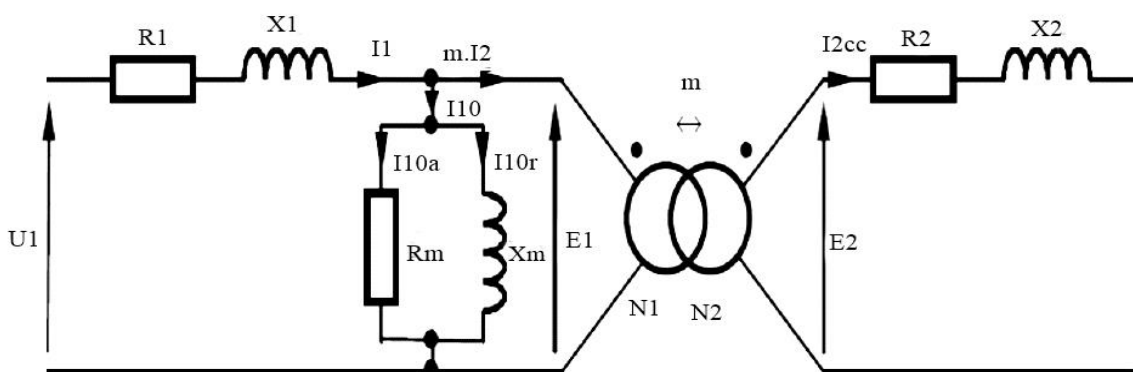


Figure I.12 représente l'essai en court-circuit. [6]

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).

On à $U_2 = 0$ et $P_{fcc} \rightarrow 0$ donc $P_{Jcc} = P_{1cc}$

$$P_{1cc} = R_s \cdot I_{2cc}^2 \Rightarrow R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} = \frac{m^2}{I_{1cc}^2} P_{1cc} \quad (\text{I.20})$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \Rightarrow X_s = \sqrt{\left(\frac{mU_{1cc}}{I_{2cc}}\right)^2 + R_s^2} \quad (\text{I.21})$$

I.16 Protection des transformateurs

- Au primaire contre les courts-circuits, le calibre est choisi en fonction de l'intensité nominale au primaire.
- Au secondaire contre les surcharges et court-circuit, le calibre est choisi en fonction de l'intensité débitée par le secondaire.
- L'élévation anormale de la température des enrôlements.
- Les défauts d'isolement. [13]

I.17 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur le transformateur électrique monophasé :diffintion, les deffirentes pertes, et on a donner un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent (circuit magnitique,enroulement,isolation), leur rôle et leur importance dans cette machine statique, à la fin un rappеле sur les notions de base du transformateur tel que les relations de puissance,Loi d'Hopkinson, et Formule de Boucherot.

Chapitre II

**Courant d'appel
magnétisant et régime de
transformateur**

II.1 Introduction

Pendant son fonctionnement, les transformateurs passent par différents régimes. Chaque un de ces régimes a ses propres phénomènes électriques. Parmi ces phénomènes, il y'en a qui peuvent perturber le fonctionnement normal du transformateur.

Lorsque le transformateur est mis sous tension, des valeurs de courant transitoire peuvent atteindre 10 à 15 fois le courant nominal du transformateur. La pire situation de surintensité se produit lorsque l'enroulement primaire est connecté instantanément près du passage par zéro de la tension primaire pur, et si la polarité du cycle demi-tension a la même polarité que le noyau, la polarité de rémanence est la même.

Ce chapitre est consacré pour l'étude du régime transitoire du transformateur, et ces principales causes tel que la mise sous tension de façon aléatoire, et la saturation du noyau magnétique.

II.2 Régime permanent et Régime transitoire

Un système électrique tel que le transformateur fonctionne en régime permanent lorsque les amplitudes de ses tensions et courants atteignent leurs valeurs de fonctionnement normal. Néanmoins, lors des mises sous tension ou des modifications de structure des systèmes électriques, il se produit des phases de transitions qu'on appelle régimes transitoires et qui n'obéissent pas forcément aux règles du régime permanent. L'étude du régime transitoire est souvent nécessaire afin de déterminer si les tensions et les courants qui en découlent ne présentent pas des évolutions dangereuses.

Dans le cas de transformateurs de distribution d'énergie, le courant de démarrage peut atteindre jusqu'à 20 fois la valeur nominale. Il est donc impératif de prévoir cette valeur pour y adapter les organes de protection. Il est donc utile de savoir prédéterminer ces régimes, au moins dans les cas assez simples, tel que le cas du courant transitoire (courant d'appel) d'enclenchement du transformateur, car l'alimentation du primaire d'un transformateur, sous sa tension nominale, s'accompagne d'un régime transitoire pendant lequel l'intensité du courant appelé de rappel peut prendre des valeurs très supérieures à celles de l'intensité nominale, suivant l'instant d'appréciation de la tension et de l'induction rémanente du circuit magnétique. D'où la nécessité de prédéterminer à travers l'étude du régime transitoire la valeur approximative de ce courant d'appel qui peut être supérieur ou égal à plusieurs fois le courant du transformateur.

Puisque ce courant s'amortit au bout de quelques périodes. Donc le transformateur de puissance opérationnel dans un réseau de distribution doit être impérativement doté d'un appareil de protection pour éviter tout déclenchement intempestif. Pour cela des relais différentiels numériques avec déclencheurs de type D ou K (fort appel de courant) sont utilisés.[14]

II.3 Champs magnétique et induction magnétique

Lorsqu'un champ magnétique H circule dans un matériau ferromagnétique, il se crée, dans le matériau, une induction magnétique B , dont la variation suit la relation :

$$B = \mu H \quad (\text{II.1})$$

Avec B : induction magnétique en Tesla

H : Champ magnétique en (A/m)

μ : la perméabilité magnétique du matériau. On définit la perméabilité relative comme suit : $\mu_r = \mu/\mu_0$.

avec : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$: perméabilité de vide

II.4 Force magnétomotrice F.m.m

La force magnétomotrice est la cause qui engendre le flux magnétique. Elle est égale à $N.I$, avec : N est le nombre de spires

I est le courant traversant les spires [15].

II.5 Caractéristiques du circuit magnétique d'un transformateur

II.5.1 Circuit magnétique homogènes linéaires

Il est constitué d'un assemblage de pièces en matériaux ferromagnétiques ou ferrimagnétiques car ils permettent d'obtenir des flux élevés. En effet, dans l'air ou un matériau quelconque, les lignes de champ produites par un bobinage parcouru par un courant ne sont pas canalisées et le flux produit ne prend que des valeurs très faibles. Par contre, dans le fer, les lignes de champs sont "concentrées" dans la matière ce qui produit de grandes valeurs du flux. Il peut comprendre un entrefer (petit espace d'air dans le circuit) [16].

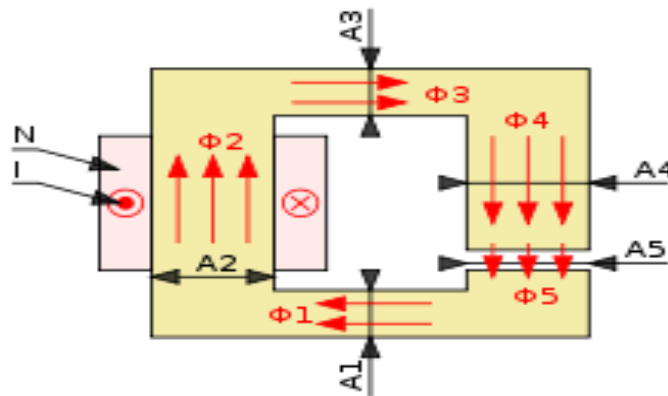


Figure II.1 Représentation d'un circuit magnétique homogène linéaire[16].

Le théorème d'Ampère s'écrit : $\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int H \cdot dl = NI$ (II.2)

Donc : $L.H = NI$

On peut écrire : $B = \mu.H = \frac{\mu NI}{L}$

Il est alors possible de faire intervenir la grandeur appelée "Réductance" et notée \mathfrak{R} satisfaisant à la relation d'Hopkinson : $NI = \mathfrak{R}\Phi$

En résumé, les relations ci-dessous, caractérisent toutes les grandeurs dans un circuit magnétique homogène linéaire: $\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu S}$

II.5.2 Circuits hétérogènes linéaires

Un circuit est dit hétérogène dès lors qu'il est constitué de matériaux différents ou de Géométries à sections variables .

II.5.3 Circuits non-linéaires

Lorsqu'il est impossible de négliger la saturation magnétique dans un circuit, il y a des relations qui ne sont propres qu'en régime linéaire. Et des relations qu'il est toujours possible d'utiliser sont :

- Le théorème d'Ampère : $N.I = H.L$
- $B.S = \Phi$

Il est nécessaire d'écrire : $B = \mu(H). H$

En pratique, à champ magnétique H constant, on va se référer à la "courbe d'aimantation $B (H)$ " du matériau pour y faire correspondre la valeur de l'induction B .

Donc, on se réfère à la courbe $\Phi(I)$, qui possède la même allure que la courbe $B (H)$, et dont on présente un exemple ci-dessous :

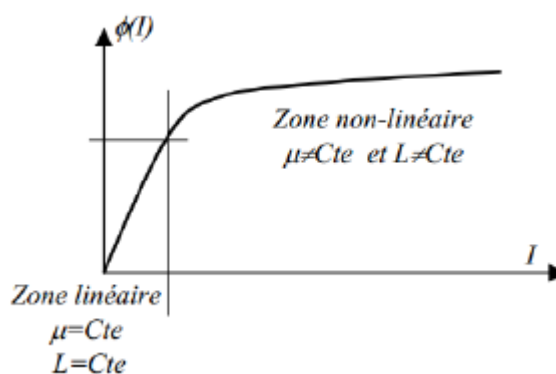


Figure II.2 Courbe du Φ en fonction de I $\Phi(I)$. [17]

II.5.3.1 Forme du courant

Du fait de la non-linéarité du circuit magnétique, le courant dans la bobine n'est pas sinusoïdal. Une construction graphique sur le cycle d'hystérésis du matériau permet de tracer la forme du courant en fonction du temps à partir de la forme du flux sinusoïdal dans l'hypothèse de Kapp . Le courant est une fonction périodique de même fréquence que la tension aux bornes de la bobine. Elle est décomposable en série de Fourier. [1] Du fait de la symétrie de glissement que présente la courbe, il n'y a pas d'harmoniques de rang pair :

$$i = I_1\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_1) + I_3\sqrt{2} \cos(3\omega t + \varphi_3) + \dots \quad (\text{II.3})$$

II.5.4 Circuits magnétiques en régime alternatif sinusoïdal

Considérons le circuit ci-dessous en régime alternatif sinusoïdal

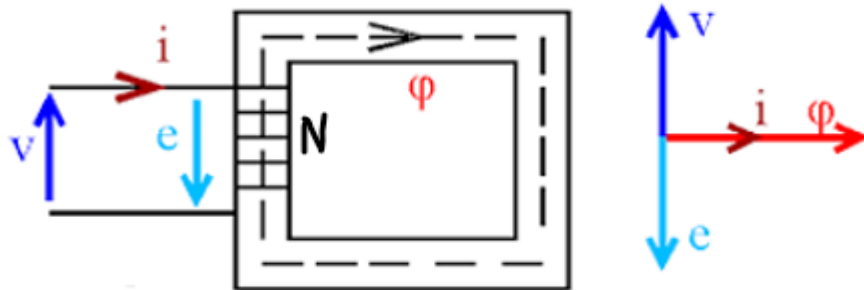


Figure II.3 représentation d'un circuit magnétique en régime alternatif [5].

La différence de potentielle $v(t)$ variable imposé crée un courant variable $i(t)$ dans le circuit électrique d'où la variation de flux dans le circuit magnétique selon la loi de Lenz s'écrit :

$$v(t) = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.4})$$

II.5.4.1 Cas d'un matériau linéaire idéal

Si le matériau possède une courbe $B(H)$ linéaire, la perméabilité et l'inductance sont constantes.

a partir de là, on écrit : $v(t) = N \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$, et la bobine est une inductance pure.

II.5.4.2 Cas d'un matériau réel non-linéaire

Le matériau réel possède une courbe $B(H)$ qu'on caractérise en basse fréquence sur un cycle, ce qui fait apparaître un phénomène d'hystérésis :

Il est connu que si l'on fait circuler un courant I dans une bobine entourant un tore magnétique, la densité de flux B dans le circuit magnétique augmente avec le champ magnétique H .

Si le flux initial est nul, cette augmentation suit la courbe (b) de la Figure II.4 la densité de flux atteint la valeur B_m pour un champ magnétique H_m .

Si, maintenant, on fait décroître le courant I , et donc le champ H jusqu'à l'évanouissement, la densité de flux ne suit plus la même courbe, mais une courbe située au-dessus de (b). En effet quand on réduit le champ à zéro, les domaines que l'on vient d'orienter sous l'influence du champ H_m tendent à conserver cette orientation : c'est le phénomène d'hystérésis. Donc, lorsque le champ H devient nul, une densité de flux subsiste et conserve une valeur B_r que l'on appelle densité de flux rémanent [18].

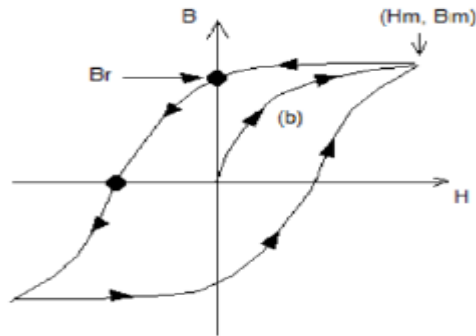


Figure II.4 Cycle d'hystérésis [18].

II.6 Courant d'appel magnétisant

II.6.1 Flux rémanent

Le flux rémanent joue un rôle de base dans l'apparition du courant d'appel dans les transformateur de puissance à vide. Il représente une valeur de flux continue qui persiste dans le circuit magnétique, qui peut générer un courant d'appel si le transformateur n'est pas complètement démagnétisé après la mise hors tension [19].

II.6.2 Effet de flux rémanent

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

$$\Phi(t) = \left[\frac{u\sqrt{2}}{n\omega} \right] \cos(\omega t + \alpha) + [\Phi_r - \left(\frac{u\sqrt{2}}{n\omega} \right) \cos(\alpha)] e^{-t/\tau} \quad (\text{II.5})$$

$$\tau = L/R$$

L : l'inductance de l'enroulement primaire.

Φ_r : Le flux rémanent.

Le flux rémanent et l'angle de déphasage varient sous les deux cas suivants qui traduisent respectivement l'apparition et l'absence de courant d'appel .[20]

- Si $\Phi_r = \Phi_{max}$ et $\alpha = 0$ sont remplacées dans l'équation (II.5), l'expression de flux devient sous l'expression suivante, entraînant un appel de courant important. Alors ce cas est défavorable.

$$\Phi(t) = \left[\frac{u\sqrt{2}}{n\omega} \right] \cos(\omega t) + [\Phi_{max} - (u\sqrt{2})/n\omega] e^{-t/\tau} \quad (\text{II.6})$$

- Si $\Phi_r = 0$ et $\alpha = \pi/2$ sont remplacées dans l'équation (II.5) comme c'est montré ci-dessous, il n'aura plus de phénomènes transitoires qui va apparaître.

$$\Phi(t) = (u\sqrt{2})/[n\omega \cos(\omega t + \pi/2)] \quad (\text{II.7})$$

II.6.3 Courant magnétisant

Le courant magnétisant représente la composante réactive du courant à vide, qui sert à exciter le circuit magnétique. En régime linéaire, il existe sous une forme non sinusoïdale, d'une valeur admissible au fonctionnement du transformateur (pas de contraintes). Par contre en régime transitoire lorsque les paramètres du transformateur (l'inductance) sont variables, il possède une valeur pic très élevée qui provient d'un dépassement de flux lors d'une remise sous tension non vérifiée. Cette valeur influence sur le fonctionnement du transformateur. Le courant d'appel est causé par la saturation d'un transformateur de puissance en raison des variations de la tension magnétisante .[21]

Lors la mise sous tension d'un transformateur de puissance à vide, il peut apparaître au niveau de circuit primaire un phénomène transitoire dit courant d'appel. L'excitation du circuit magnétique par le courant à vide injecté par la source d'alimentation engendre un courant magnétisant, et un flux dans le noyau. Ceci est sous forme sinusoïdal, ainsi d'une valeur inférieure au flux de saturation. Lors de la saturation du noyau de fer, il y a un dépassement de flux qui sera constaté, et qui correspond à l'existence de valeur de flux rémanent.

II.6.4 Effet de courant d'appel

L'influence de courant d'appel sur le fonctionnement du transformateur n'est pas immédiate, mais elle est sur le long terme pour les transformateurs affectés successivement. Parmi les différents types on cite :

- Les contraintes mécaniques comme le transformateur peuvent subir des déplacements des bobines.
- Dégradation accélérée du transformateur provoquée par des efforts électromagnétiques importantes au niveau du bobinage .
- Le fonctionnement involontaire de système du relais de protection [22].

II.6.5 Courant d'appel et Flux rémanent

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.5. Or, pour un réenclenchement du transformateur après la mise hors tension, il est possible que le flux dynamique ait des valeurs supérieures au flux de saturation, le maximum du courant peut être largement plus grand que sa valeur crête en régime établi selon la courbe du flux en fonction de courant du transformateur comme indiqué dans la figure II.6. Ce dépassement du flux peut être expliqué par la présence du flux rémanent qui pousse la mise sous tension dans la zone de saturation comme montré sur la figure II.7, d'où l'origine du courant d'appel.

Mathématiquement, en considérant que Φ_c est la valeur crête du flux pour un transformateur en régime établi, V_c la tension crête, nous avons $v(t) = V_c \sin(\omega t)$ et $V_c = \omega \Phi_c$. Pour des raisons économiques, les transformateurs sont conçus avec une valeur de flux crête opérationnelle aussi proche que possible de la valeur de saturation. 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.

$$\Phi\left(\frac{T}{2}\right) = \Phi(t_0) + \int_{t_0}^{T/2} d\Phi = \Phi(t_0) + \frac{V}{\omega} (1 + \cos \omega t_0) \quad (\text{II.8})$$

Les cas extrêmes sont alors :

- $t_0 = T/4$, $\Phi(t_0) = 0$, nous avons $\Phi(T/2) = \frac{V_c}{\omega}$, c'est le cas de la coupure à zéro de flux, donc sans flux rémanent, la mise sous tension reste en zone linéaire.
- $t_0 = 0$, $\Phi(t_0) = \frac{V_c}{\omega}$, nous avons $\Phi(T/2) = 2 \frac{V_c}{\omega} = 2\Phi_c$, c'est le cas de la coupure au maximum de flux, la mise sous tension atteint la zone saturée.

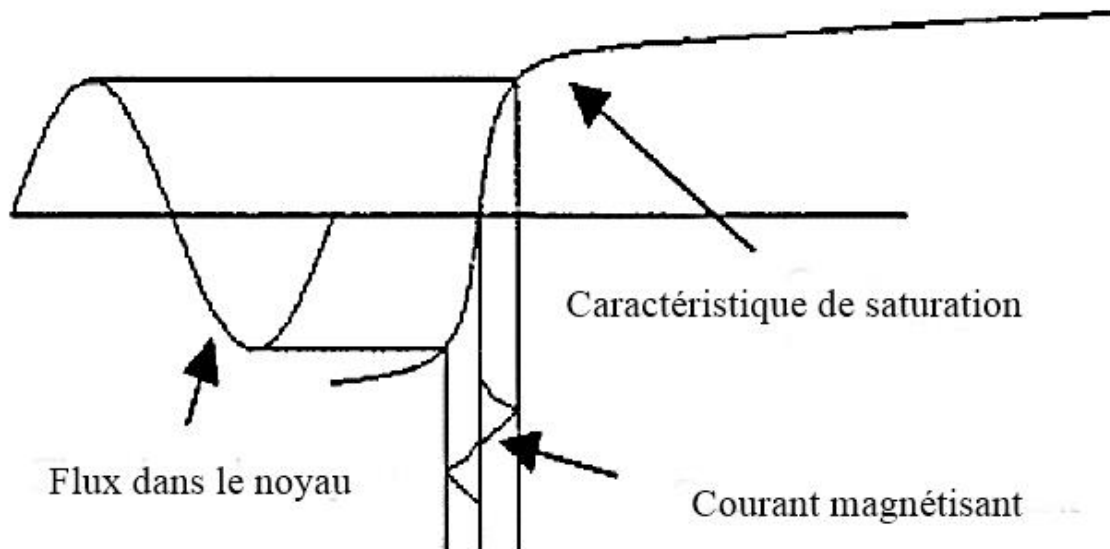


Figure II.5 Flux et courant magnétisant en régime établi [19]

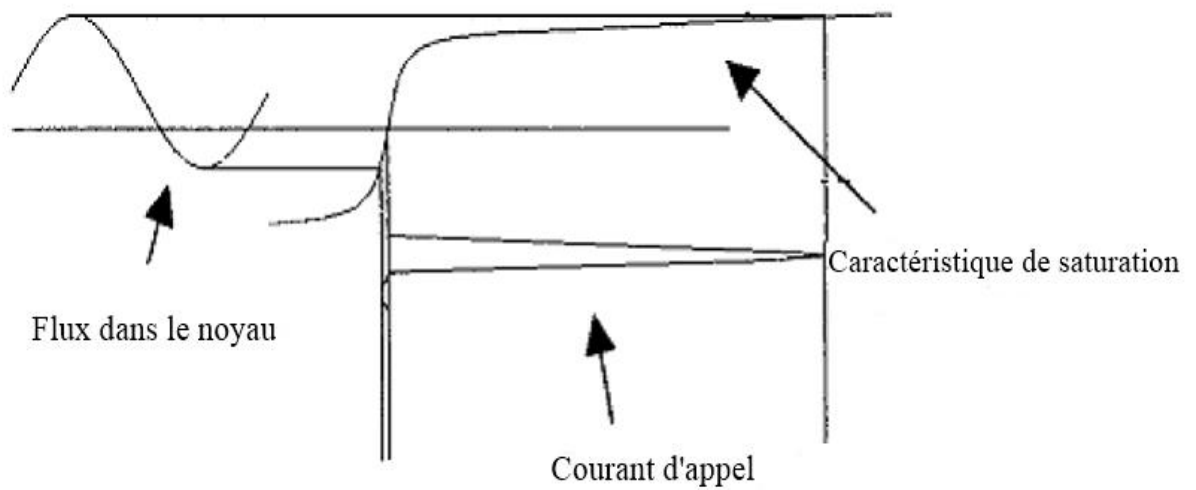


Figure II.6 Flux et courant d'appel après ré-enclenchement [19]

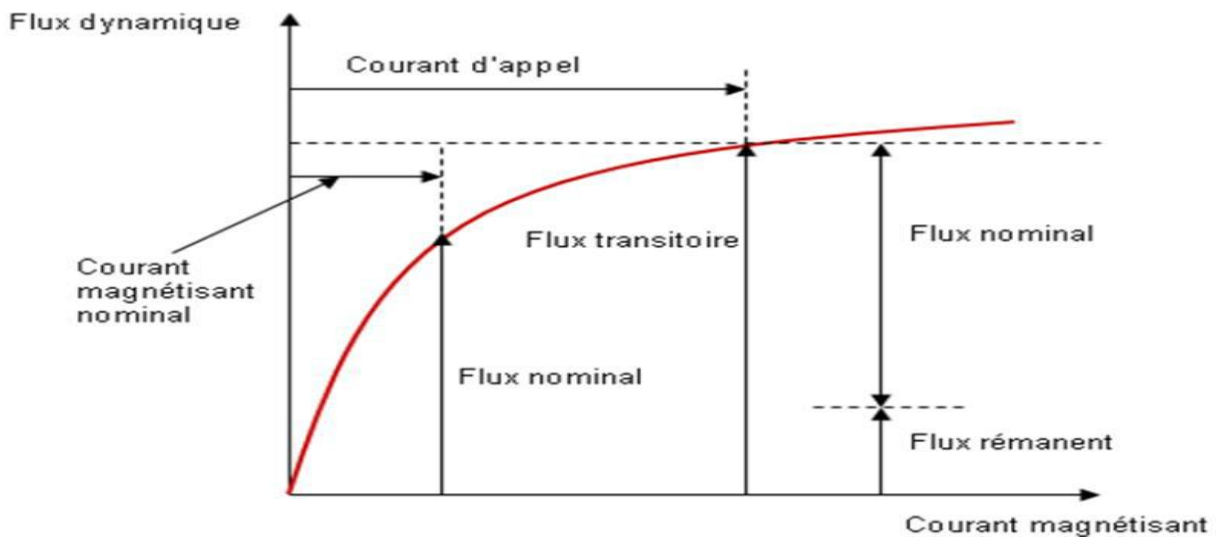


Figure II.7 Courbe de saturation du flux en fonction de courant (en valeur crête) [19]

En effet, en régime établi, les transformateurs fonctionnent dans une zone dite linéaire où la magnétisation ne demande que peu de puissance (peu de force magnétomotrice, peu de courant). En revanche, certains régimes sollicitent une zone au-delà de la zone linéaire, dite zone saturée, où on atteint les limites du matériau ferromagnétique où la magnétisation demande beaucoup plus de puissance (de courant).

Ainsi, l'amplitude du courant magnétisant peut atteindre en zone saturée (alors que le transformateur est à vide) plusieurs fois celle du courant nominal. Le rapport du courant magnétisant en zone saturée sur le courant nominal dépend de la puissance des transformateurs.

En pratique, pour les gros transformateurs, le courant d'appel peut atteindre une valeur de l'ordre de 7 à 10 fois le courant nominal avec des constantes de temps de quelques secondes.

Il n'existe à l'heure actuelle pas de dispositifs de démagnétisation à installer à l'intérieur du transformateur pour supprimer le flux rémanent après la mise hors tension.

Conceptuellement, les enroulements du transformateur pourraient remplir un tel rôle. En théorie, il faudrait réduire la tension alternative graduellement à zéro ou injecter un courant alternatif suffisant et en réduire graduellement l'amplitude. Mais en pratique, les conditions d'exploitation sur site ne le permettent pas à cause de la nécessité des installations supplémentaire en interne.

Par conséquent, la fermeture non contrôlée peut générer des courants d'appel très importants, pouvant atteindre les niveaux des courants de défaut des transformateurs dans le cas extrême. Ces courants non sinusoïdaux vont contraindre les enroulements à créer des tensions harmoniques prolongées qui vont dégrader la qualité de la fourniture électrique et provoquer des fonctionnements intempestifs des protections par suite des déséquilibres de courant de neutre. L'effet le plus nocif est

lié aux contraintes électrodynamiques exercées dans les enroulements du transformateur, qui a pour conséquence une réduction de sa durée de vie.

Or le transformateur de puissance constitue l'équipement le plus dispendieux dans un poste. Pour augmenter la disponibilité et la fiabilité des sources d'énergie en dépit d'un réseau vieillissant à l'heure actuelle, il est nécessaire d'opérer le transformateur via les disjoncteurs et surtout de maîtriser le ré-enclenchement du transformateur. [19]

II.7 Mise sous tension d'un transformateur

Le fait d'appliquer brusquement la tension nominale au primaire d'un transformateur entraîne un régime transitoire qui provoque une surintensité conduisant parfois au déclenchement des dispositifs de protection.

En choisissant l'origine des temps au moment de la mise sous tension, la différence de potentiel appliquée au primaire peut s'écrire :

$$u_1 = U_1\sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha) \quad (\text{II.9})$$

En négligeant les chutes de tension au primaire, le flux est forcé. Ce dernier s'obtient par intégration, en tenant compte qu'à la mise sous tension, le flux et le flux rémanent Φ_r , fonction de l'usage antérieur du circuit magnétique, et en introduisant l'amplitude Φ_M du flux en régime permanent :

$$\Phi = \Phi_M[\sin(\omega t + \alpha) - \sin \alpha] + \Phi_r \quad (\text{II.10})$$

le maximum est atteint lorsque le sinus vaut 1 :

$$\Phi_{max} = \Phi_M(1 - \sin \alpha) + \Phi_r \quad (\text{II.11})$$

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

$$\Phi_{max} = 2\Phi_M + \Phi_r \quad (\text{II.12})$$

Ce flux, proche du double de sa valeur normale, amène obligatoirement la saturation du matériau magnétique. De ce fait, la force magnétomotrice correspondante est beaucoup plus élevée que le double de sa valeur.

Les variations s'amortissent progressivement du fait des pertes importantes qui se produisent lors de ce régime transitoire. On peut déterminer l'intensité appelée au primaire en écrivant :

$$i_1 = mi_{i_2} + i_0 \quad (\text{II.13})$$

Du fait de la valeur importante prise par la force magnétomotrice résultante, une surintensité assez élevée peut apparaître. Sa valeur dépend fortement de l'instant de mise sous tension par rapport à la sinusoïde du secteur. C'est ce qui explique que l'on peut observer un déclenchement des protections dans certains cas alors que tout se passe bien la plupart du temps. [1]

II.8 Modélisation de transformateur de puissance

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

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

$$Z_L = w * L \quad (\text{II.14})$$

$$Z_C = \frac{1}{w * C} \quad (\text{II.15})$$

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

II.8.1 Transformateur monophasé linéaire sans saturation

Un transformateur présente un comportement non linéaire dû principalement à la caractéristique de l'inductance. Lorsque le fonctionnement du transformateur se situe dans la zone linéaire de cette caractéristique, alors la modélisation devient simple. Celle-ci se traduit par un schéma équivalent (figure II.8) où l'on représente ses impédances linéaires et son rapport de transformation m . [21]

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

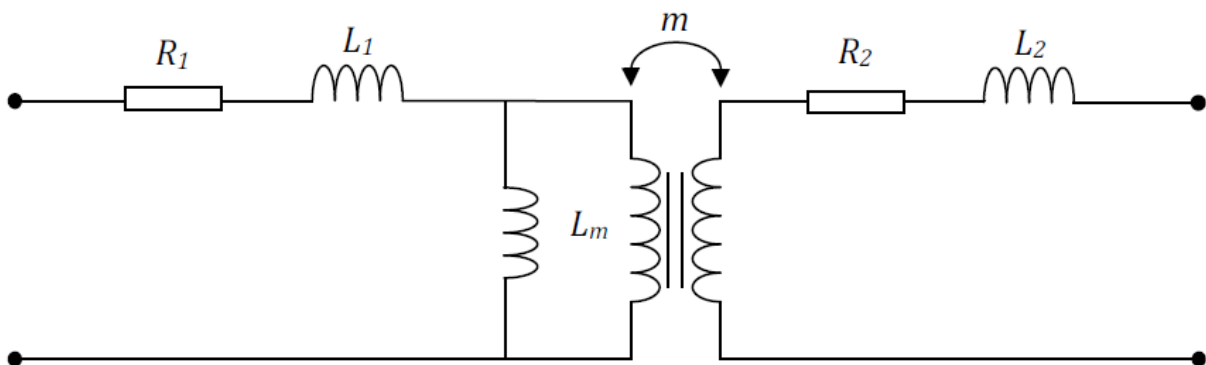


Figure II.8 modèle sans saturation [21]

Avec:

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

Il existe éventuellement des pertes à vide, nous pouvons les représenter au moyen d'une résistance R_m en parallèle (figure II.9) :

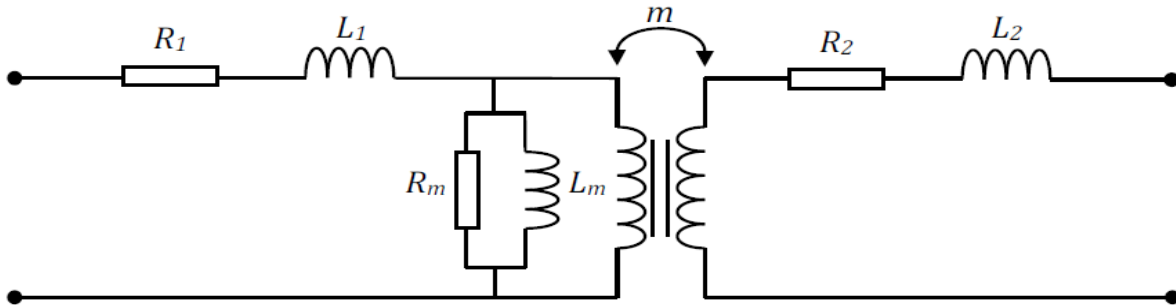


Figure II.9 Modèle avec perte fer sans saturation [21]

- L_m : Résistance qui représente les pertes fer dans le circuit magnétique.

II.8.2 Transformateur monophasé avec saturation et perte fer

La caractéristique de saturation donnée par une courbe de flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant est représentée par une inductance non linéaire (Figure II.10).

Notons que l'inductance non linéaire peut être placée indifféremment côté primaire au côté secondaire tant que le rapport de transformation est respecté.

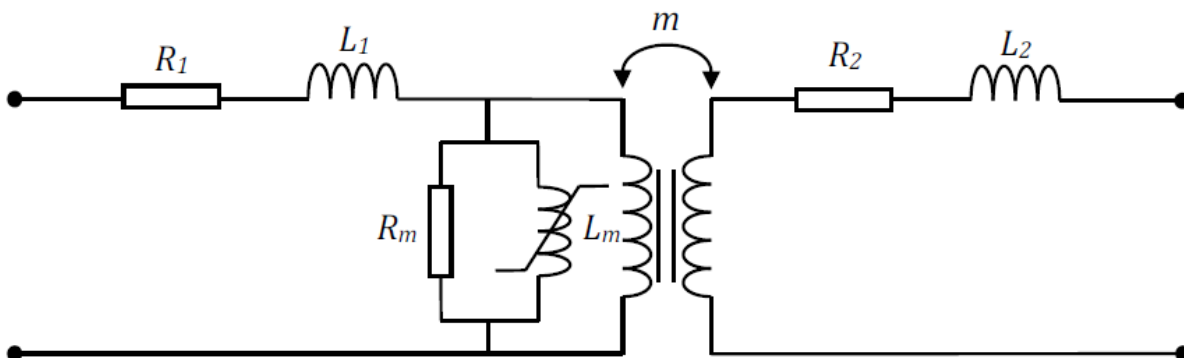


Figure II.10 modèle avec saturation et perte fer [21]

A partir de ce modèle, il est possible de retrouver la forme du courant d'appel par un calcul analytique. Soient v_p , v_s les tensions au primaire et au secondaire, i le courant au primaire et Φ le flux traversant la bobine. Quand le transformateur est alimenté du côté primaire avec côté secondaire à vide, soit $v_p = V_m (\sin \omega t + \theta_0)$ avec ω la pulsation angulaire, V_m la tension de source nominale en valeur crête et θ_0 la phase initiale, l'équation décrivant le comportement du noyau saturable est :

$$v_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (\text{II.16})$$

$$v_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\Phi(t)}{dt} \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Dans le cas où la résistance de magnétisation est très grande, le courant dans le noyau du transformateur peut être approximé par le courant au primaire i . $d\Phi(t)/dt$ peut être ainsi représenté par une inductance égale à la pente de la fonction $\Phi(i)$. L'équation (II.16) peut être réécrite comme :

$$v_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + L_{\text{noyau}}(\Phi) \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.18})$$

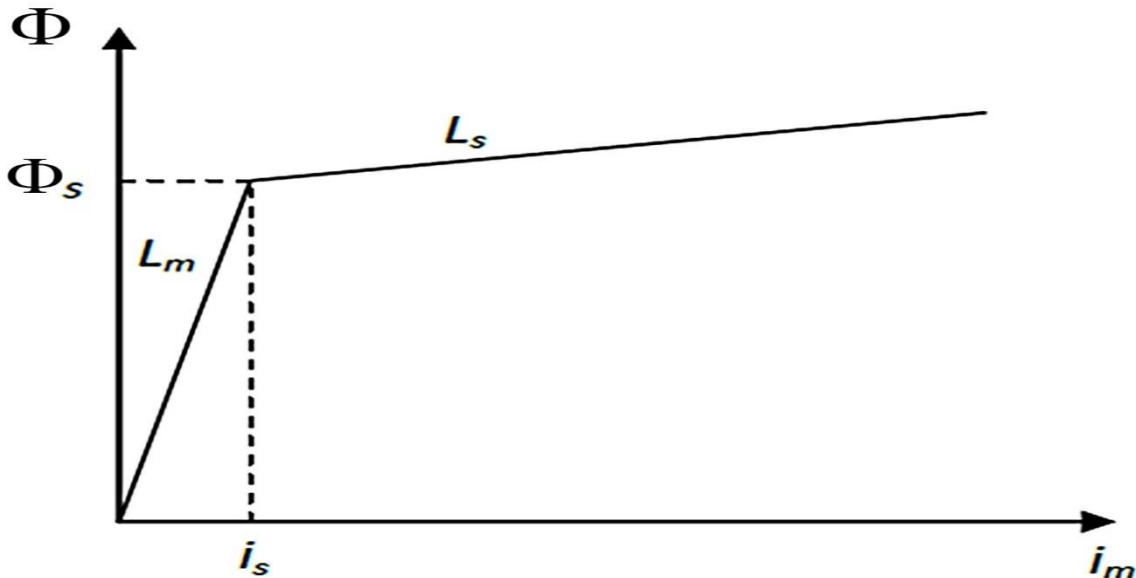


Figure II.11 : Inductance non linéaire simplifiée avec deux pentes [19]

$L_{\text{noyau}}(\Phi)$ est représenté par un modèle simplifié de la figure II.12 avec L_m sa pente en zone linéaire et L_s sa pente en zone saturée.

Généralement, le flux initial (ou le flux rémanent) dans la bobine est inférieur au niveau de saturation Φ_s . Quand le transformateur est alimenté, l'instant de saturation t_s peut être calculé

comme la durée nécessaire pour que la somme de l'intégrale de la tension de source avec le flux initial Φ_0 atteigne le flux de saturation Φ_s .

$$\Phi_s = \int_0^{t_s} V_m \sin(\omega t + \theta_0) dt + \Phi_0 \quad (\text{II.19})$$

Quand le transformateur est alimenté du zéro de tension, $\theta_0 = 0$, nous avons alors

$$t_s(\Phi_0) = \frac{1}{\omega} \cos^{-1}(1 - (\Phi_s - \Phi_0)/\Phi_n) \quad (\text{II.20})$$

Φ_n est le flux nominal en valeur crête

A $t \leq t_s$, $L_{noyau}(\Phi) = L_m$ à $t > t_s$, $L_{noyau}(\Phi) = L_s$ sachant qu'il existe un courant initial de saturation i_s . Nous avons ainsi :

$$i(t) \begin{cases} A_1 e^{-t/\tau_1} + B_1 \sin(\omega t - \theta_1) & t \leq t_s \\ (i'_s + A_2) e^{\frac{t-t_s}{\tau_2}} + B_2 \sin(\omega t - \theta_2) & t > t_s \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$B_1 = \frac{V_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega(L_m + L_1))^2}} ; \quad B_2 = \frac{V_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega(L_s + L_1))^2}}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega(L_m + L_1)}{R_1}\right) ; \quad \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega(L_s + L_1)}{R_1}\right)$$

$$A_1 = B_1 \sin(\theta_1) ; \quad A_2 = B_2 \sin(\theta_2 - \omega t_s)$$

$$\tau_1 = \frac{L_m + L_s}{R_1} ; \quad \tau_2 = \frac{L_s + L_1}{R_1} \quad \text{et} \quad i'_s = \frac{i_s}{\Phi_0} = (1 - \Phi_0/\Phi_s)$$

II.8.3 Transformateur monophasé avec saturation et perte fer

Dans ce modèle la résistance R_m est remplacée par une résistance non linéaire dont la figure II.12 montre le modèle.

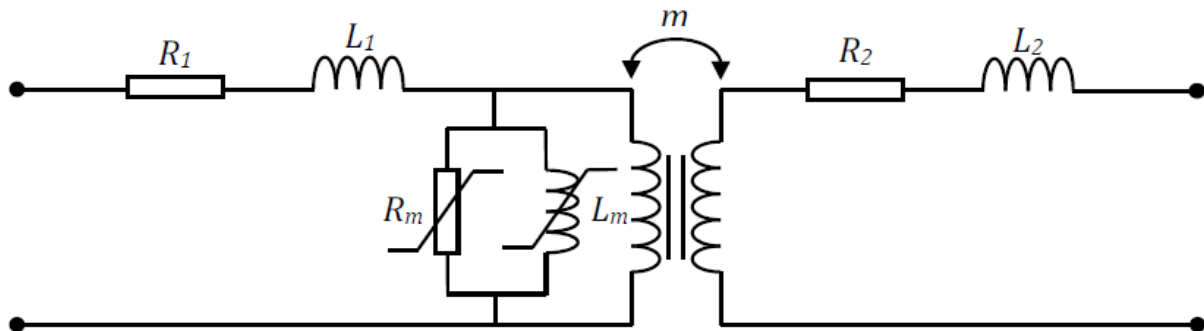


Figure II.12 modèle avec perte fer et saturation[21]

II.9 Saturation magnétique dans les transformateurs

Le coefficient μ reliant le champ magnétique et l'induction magnétique n'est pas constant, et diminue plus ou moins brutalement avec l'induction selon la nature du matériau. La saturation résulte du nombre fini de particules dans le matériau qui peuvent être orientées. La saturation en pratique est fréquemment locale, la saturation augmente fortement les fuites magnétiques puisque μ_r se rapproche de l'unité (vers 2.5 T pour le fer). De même, à induction élevée la réluctance du matériau augmente. Dans l'hypothèse de la saturation l'inductance L d'un enroulement après la saturation reste constante. [23]

II.10 Conclusion

Le chapitre deux présente deux modes de fonctionnement, les caractéristiques magnétiques, la saturation du transformateur, ses causes et les phénomènes transitoires spécifiques au transformateur. La raison principale de ces courants est le flux magnétique résiduel qui existe généralement dans le noyau de fer lorsque le transformateur est éteint et la saturation du noyau de fer.

Le chapitre suivant étudiera la relation entre le courant d'appel magnétisant et la période d'hystérésis, et l'influence de l'état transitoire du transformateur monophasé par simulation.

Chapitre III

Simulation de l'influence de courant d'appel 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 du transformateur. En fait, ce dernier a une grande influence sur le point de fonctionnement du transformateur. Selon la théorie classique, l'hystérésis et les pertes par courants de Foucault constituent ensemble une perte à vide. Les pertes causées par le courant sans charge circulant dans l'enroulement primaire sont négligeables. Sous la condition de la densité de flux magnétique nominale à vide, puisque la majeure partie du flux magnétique est confinée dans le noyau magnétique, les pertes dans les composants structurels sont négligeables. Étant donné que la source de tension sinusoïdale excite l'inversion continue de l'aimantation dans le noyau de fer à une fréquence spécifique f (période/seconde), une hystérésis et une perte de courant de Foucault se produiront.

Dans cette partie du travail, nous verrons la relation entre le changement de la surface d'hystérésis et l'amplitude du courant d'appel dans le régime transitoire.

III.2 Cycle hystérésis

Lorsque le matériau magnétique subit un cycle complet de magnétisation et démagnétisation, les résultats sont illustrés à la figure III.1. Cela commence par un matériau magnétique neutre traversant la boucle $B-H$ à l'origine X. Au fur et à mesure que H augmente la densité de flux B augmente le long de la ligne en pointillés jusqu'au point de saturation B_s . Lorsque H est maintenant diminué et B est tracé la boucle $B-H$ traverse un chemin vers B_r où H est nul et le noyau est toujours magnétisé. Le flux à ce point est appelé flux rémanent et a une densité de flux B_r . La force magnétisante H est maintenant inversée en polarité pour donner une valeur négative. La force magnétisante nécessaire pour réduire le flux B_r à zéro s'appelle la force coercitive H_c . Lorsque le noyau est forcé après saturation la rémanence B_{rs} est le flux restant après saturation et la coercivité H_{cs} , est la magnétisation, force nécessaire pour remettre à zéro. Le long de la courbe de magnétisation initiale au point X, la ligne pointillée sur la figure III.1, B augmente à partir de l'origine de manière non linéaire avec H jusqu'à ce que le matériau se sature. En pratique l'aimantation d'un noyau dans un transformateur excité ne suit jamais cette courbe car le noyau n'est jamais dans l'état totalement démagnétisé, lorsque la force magnétisante est appliquée pour la première fois. La boucle d'hystérésis représente l'énergie perdue dans le noyau. La meilleure façon d'afficher la boucle d'hystérésis est d'utiliser un courant continu, car l'intensité de la force magnétisante doit être modifiée si lentement qu'aucun courant de Foucault sont générés dans le matériau. Ce n'est que dans cette condition que la zone à l'intérieur de la boucle fermée $B-H$ indique l'hystérésis. La zone fermée est une mesure de

l'énergie perdue dans le matériau du noyau au cours de ce cycle. En courant alternatif applications ce processus est répété en continu et la perte totale d'hystérésis dépend de la fréquence. [24]

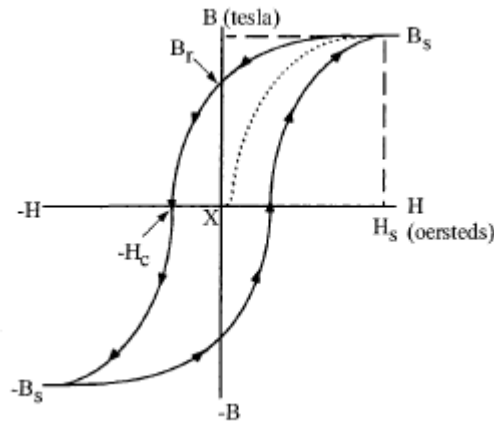


Figure III.1 : Cycle hystérésis. [24]

III.3 L'ATP-EMTP

L'Alternative Transient Program (ATP) est considérée comme l'un des programmes les plus utilisés système de programme universel pour la simulation numérique des phénomènes transitoires de l'électromagnétisme ainsi que la nature électromécanique dans les systèmes d'alimentation électrique. Avec ce programme numérique, complexe des réseaux et des systèmes de contrôle de structure arbitraire peuvent être simulés. ATP a une modélisation étendue capacités et fonctionnalités supplémentaires importantes en plus du calcul des transitoires.

Le programme sur les transitoires électromagnétiques (EMTP) a été développé dans le domaine public au Bonneville Power Administration (BPA) de Portland, Oregon avant l'initiative commerciale en 1984 par l'EMTP Développement Coordination Group et l'Electric Power Research Institute (EPRI) de Palo Alto, Californie. La naissance de l'ATP remonte au début de 1984, lorsque les Drs. Meyer et Liu n'a pas approuvé la commercialisation proposée de l'EMTP de BPA et le Dr Meyer, en utilisant son personnel, a commencé un nouveau programme à partir d'une copie de l'EMTP du domaine public de BPA. Depuis le programme ATP a été continuellement développé grâce aux contributions internationales des Drs. W. Scott Meyer et Tsu-huei Liu, les coprésidents du groupe canadien/américain d'utilisateurs EMTP. Plusieurs experts du monde entier ont contribué à l'EMTP à partir de 1975 et plus tard à ATP en étroite coopération avec les développeurs de programmes à Portland, aux États-Unis. Alors que le travail de BPA sur EMTP reste dans le domaine public par la loi américaine, ATP n'est pas dans le public domaine et l'octroi d'une licence est requis avant que l'accès aux matériaux exclusifs ne soit accordé. La licence est, cependant, disponible gratuitement pour toute personne dans le monde qui n'a pas participé volontairement dans la vente ou la tentative de vente de tout programme de transitoires électromagnétiques, (ci-après dénommé « EMTP Commerce »).

ATPDraw est un préprocesseur graphique piloté par la souris pour la version ATP du Programme des transitoires électromagnétiques (EMTP). Dans ATPDraw, l'utilisateur peut construire le modèle du circuit à simuler à l'aide de la souris et en sélectionnant des composants prédéfinis parmi une palette étendue, de manière interactive. ATPDraw utilise un post processeur appelé plotXY. L'ATP prédit les variables d'intérêt du réseau électrique comme étant fonction du temps, typiquement initié par des perturbations. Principalement, la règle d'intégration trapézoïdale est utilisée pour la résolution des équations différentielles du système dans le domaine temporel. Les conditions initiales non nulles peuvent être déterminées automatiquement en utilisant les solutions du régime permanent ou peuvent être données par l'utilisateur pour des composants simples.[25]

La figure ci-dessous représente le modèle de simulation dans ATP, de transformateur monophasé à vide qui va être utilisé dans cette partie.

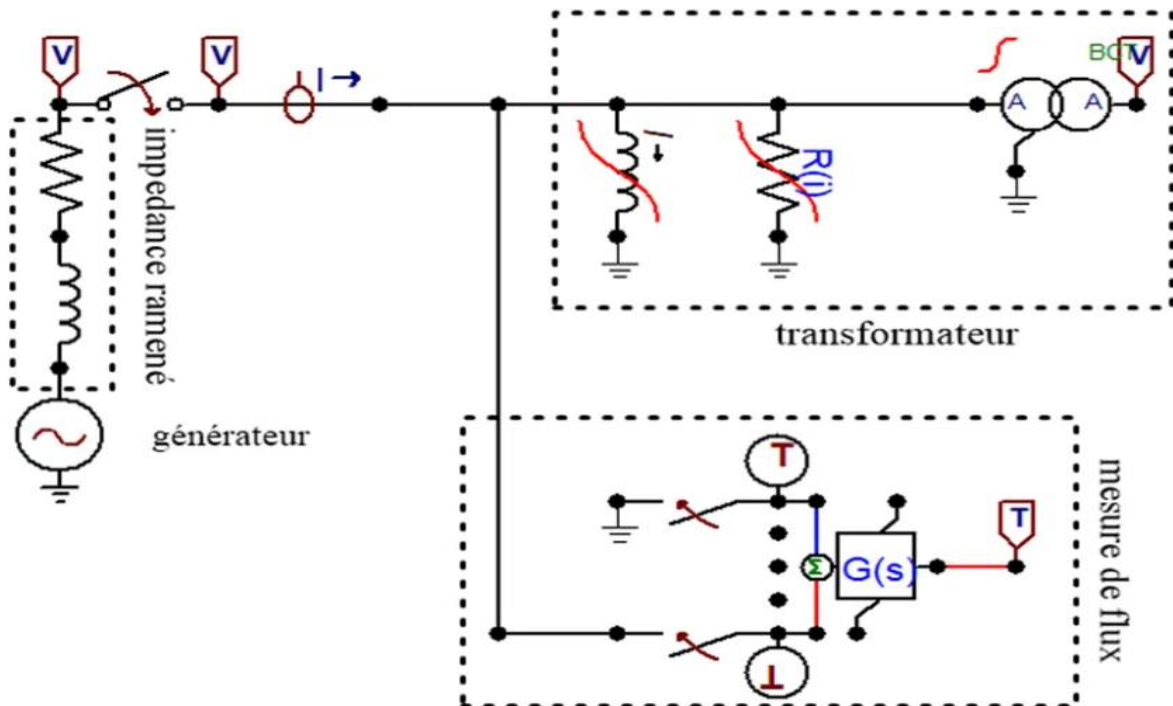


Figure III.2 modèle de simulation de transformateur monophasé à vide.

III.4 Détermination des paramètres de transformateur d'essai

La figure ci-dessous représente le transformateur monophasé utilisé dans cette simulation. Il s'agit d'un transformateur fabriqué par l'entreprise DELORENZO, Italie, et sa plaque signalétique est complétée avec un tableau présentant les différents démontages de ce transformateur.



Figure III.3 Transformateur d'essai monophasé [21]

Tableau III.1. Données de la plaque signalétique du transformateur. [21]

| 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 |

Tableau III.2 : Essai à vide et en court-circuit. [21]

| | Essai à vide | Essai en court-circuit |
|-------------|--------------|------------------------|
| Tension (V) | 220 | 22 |
| Courant (A) | 0.369 | 5 |
| Pertes (W) | 17 | 80 |

D'après cette essai les équation (I.18), (I.19), (I.20), (I.21) on calcule la valeur de résistance et l'inductance magnétisant, résistance et l'inductance ramené

La résistance magnétisant : $R_m = 2847.06\Omega$

La réactance magnétisant : $X_m = 609.72\Omega$

La résistance équivalent : $R_{\acute{e}q} = 3.48\Omega$

La réactance équivalent : $X_{\acute{e}q} = 2.69\Omega$

III.5 Caractéristiques de la branche magnétisante

Nous avons présenté la manière avec laquelle nous pouvons modéliser la branche magnétisante du circuit équivalent du transformateur de puissance, cette branche est non linéaire, le tableau suivant va représenter les valeurs de caractéristique de branche magnétisante.

Tableau III.3 : Caractéristiques calculées en valeurs. [21]

| V_{max} (V) | i_r (A) | λ (V.s) | i_l (A) |
|---------------|-----------|-----------------|-----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.0036 | 14.001 | 0.0061 | 0.0446 |
| 0.0113 | 44.2649 | 0.0139 | 0.1409 |
| 0.0276 | 95.0352 | 0.0237 | 0.3025 |
| 0.0393 | 152.5936 | 0.045 | 0.4857 |
| 0.0622 | 215.9504 | 0.1271 | 0.6874 |
| 0.0965 | 274.4989 | 0.4319 | 0.8738 |
| 0.124 | 311.127 | 0.7668 | 0.9903 |
| 0.1863 | 359.6345 | 0.8384 | 1.0156 |
| 0.2169 | 376.3222 | 1.4873 | 1.1448 |
| 0.2451 | 389.7573 | 1.7384 | 1.1979 |
| 0.2717 | 404.7479 | 2.0274 | 1.2406 |
| 0.3139 | 431.7594 | 2.3863 | 1.2884 |
| 0.3376 | 447.5986 | 2.947 | 1.3343 |
| 0.3866 | 461.7407 | 3.6569 | 1.3743 |
| 0.6496 | 476.0243 | 5.0491 | 1.4248 |
| | | 8.9502 | 1.4698 |
| | | 20.7086 | 1.5152 |

Les résultats du tableau III.3 seront représentées graphiquement sous forme de courbes. D'une part, la figure III.4 représente la variation de tension V_{max} en fonction du courant actif i_r qui passe à travers la résistance de la branche magnétisante R_m . Cette courbe $v = f(i_r)$ représente 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 de courant électrique i_l qui traverse la bobine. Cette courbe $\lambda = f(i_l)$ représente l'inductance non linéaire du modèle de la branche magnétisante.

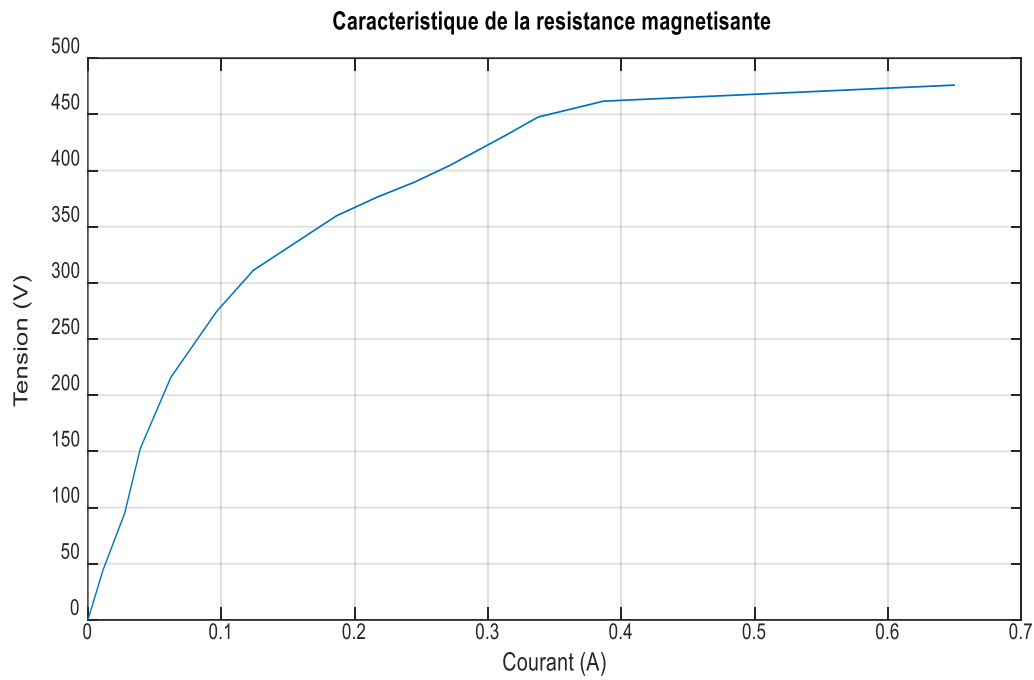


Figure III.4 Caractéristique de la résistance de branch magnétisant.

Cette courbe représente la variation de la tension en fonction du courant actif présent dans la résistance magnétisante, la variation de cette courbe se stabilise à un courant de 0.4A correspondant à une tension approximative 475V.

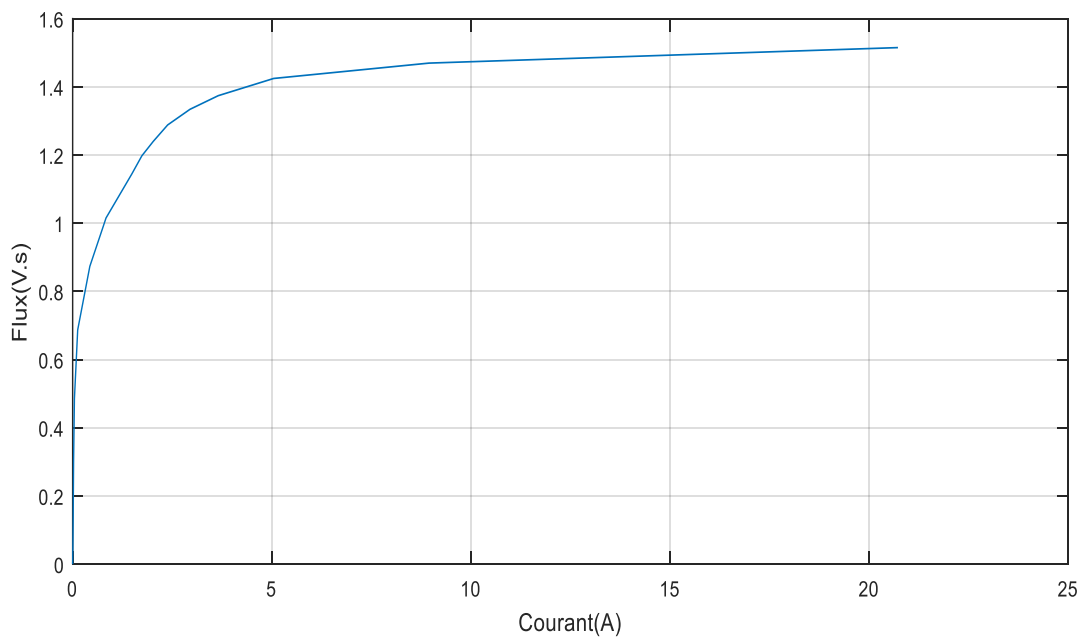


Figure III.5 Courbe de saturation de l'inductance magnétisante.

Ce graphe illustre l'augmentation du flux en fonction du courant reactif dans l'inductance magnetisante , ce flux reste quasiment constant (1.5v.s) pour une valeur de courant 5A.

III.6 Simulation de courant d'appel et le cycle d'hystérésis

III.6.1 régime établi

En régime établi, on utilise une source de tension au primaire du transformateur d'essai avec le secondaire mis en circuit ouvert, on obtient la courbe de courant magnétique simulée montrée dans la figure III.6 et la courbe de cycle hystérésis représentée dans la figure III.7.

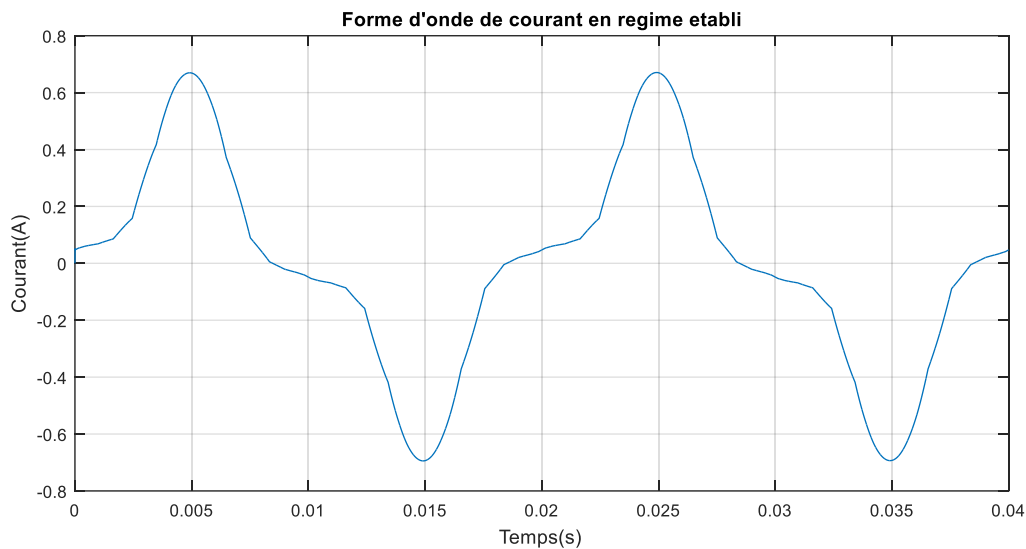


Figure III.6 Forme d'onde du courant en régime établi à vide

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

La figure III.7 représente la variation du flux en fonction du courant dans le régime établi à vide, on remarque que le cycle d'hystérésis est symétrique par rapport à l'origine du repère. La surface occupée par ce cycle est approximativement bornée de -1.2 à 1.2(A) au-delà de cet interval on rentre en phase de saturation. Cette surface représente l'énergie perdue dans le noyau (pertes fer).

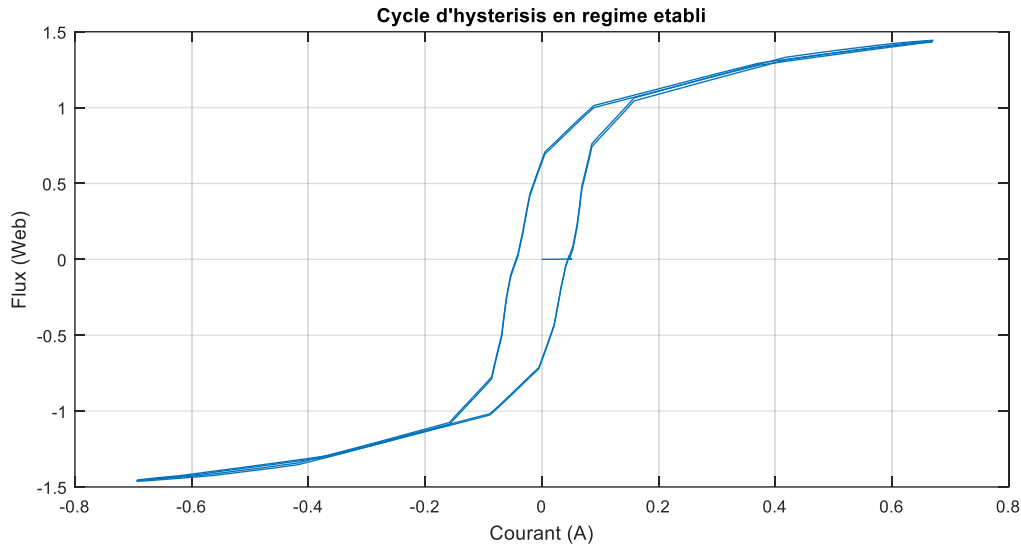


Figure III.7 : Cycle d'hystérésis en régime établie à vide.

III.6.2 régime transitoire

Dans cette essai on fixe le temps de simulation à 2s, et on utilise un disjoncteur pour varier à chaque fois le temps de fermeture et voir la première crête du courant d'appel et son atténuation jusqu'au courant magnétisant en régime établi.

- Pour la fermeture du disjoncteur a : $t_f=0.5808$ s.

A l'instant de la fermeture du disjoncteur a $t_f=0.5808$ s on constate un pic de courant de valeur 2.25A puis décroît pour atteindre la valeur du courant en régime établi.

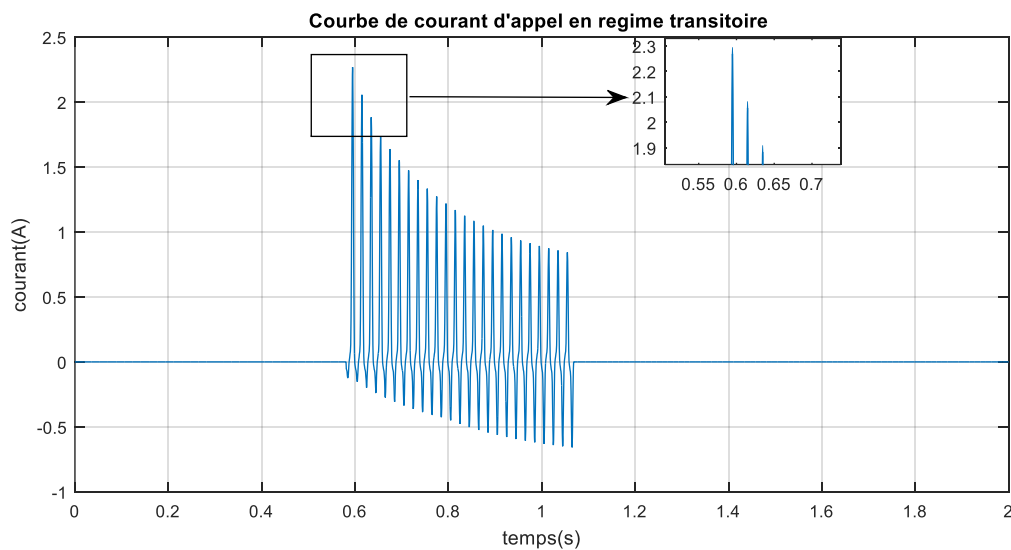
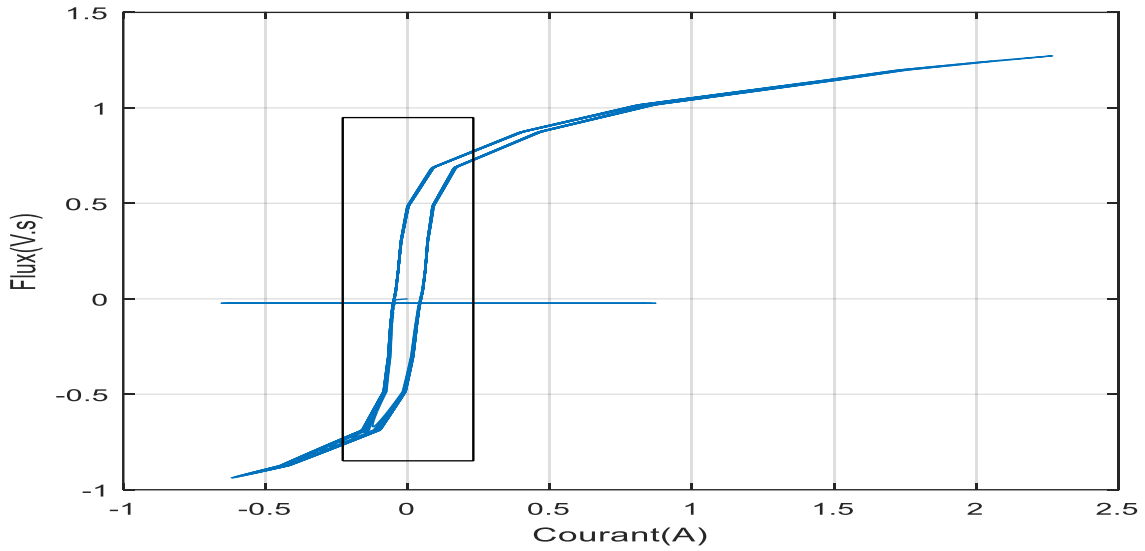


Figure III.8 Courbe de courant d'appel $i(t)$ a $t_f=0.5808$ s.

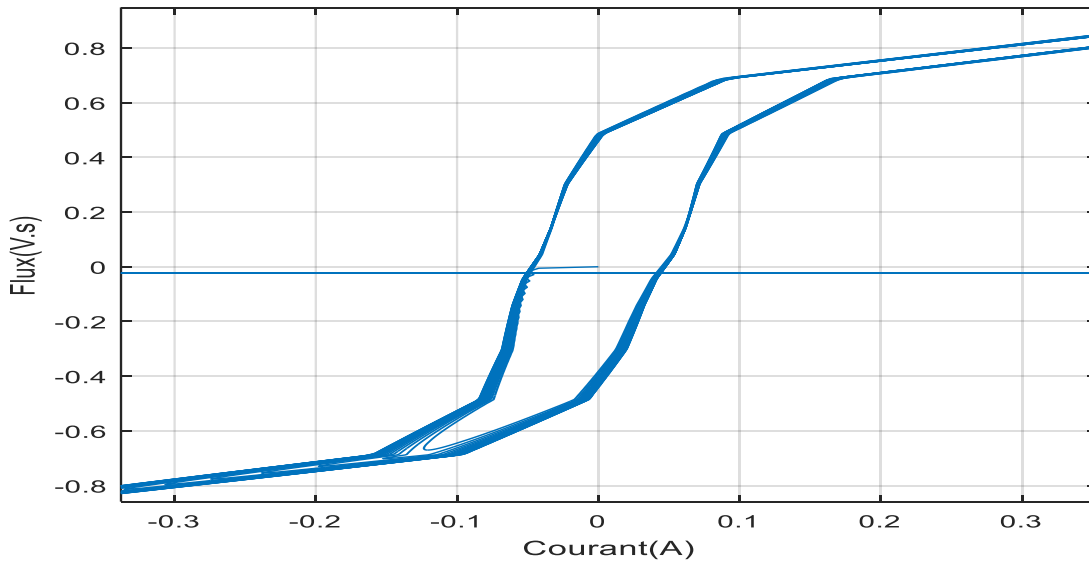
Chapitre III :simulation de l'influence de courant d'appel sur Cycle d'hystérésis

Le cycle d'hystérésis est déformé, asymétrique par rapport à l'origine du repère et la phase de saturation dans la partie positive suit le pic de courant d'appel (2.25A) correspondant à une valeur de flux 1.26(v.s) tandis que celle de la partie négative ne dépasse pas la valeur (-0.7A, 1.26v.s).

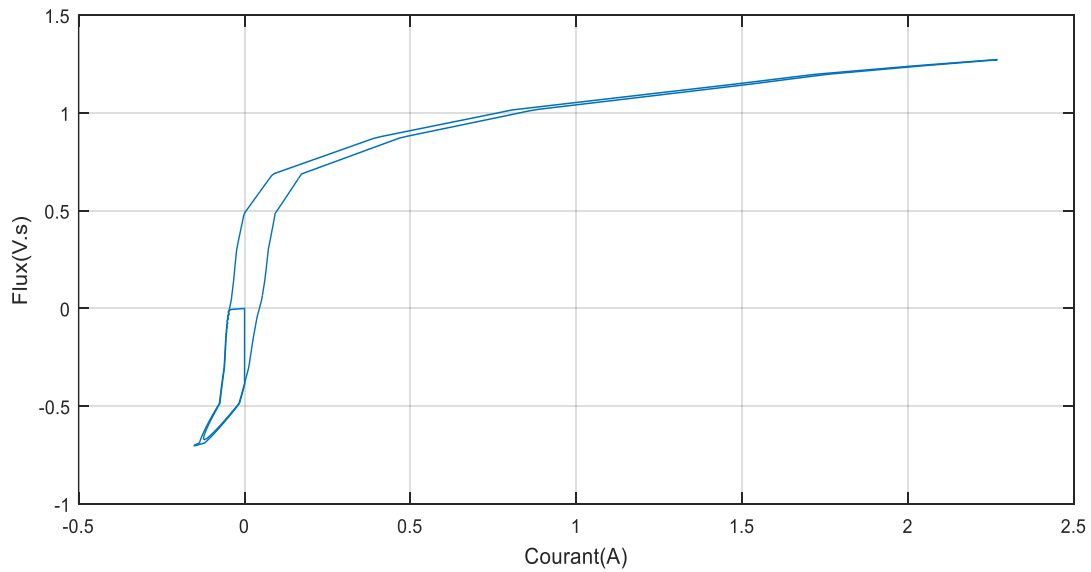


(a)

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



(b)



(c)

Figure III.9 Cycle d'hystérésis a $t_f=0.5808s$.

(a) Représente les cycles hystérésis en régime transitoire.

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

(c) Représente le premier cycle hystérésis.

- Pour la fermeture du disjoncteur a : $t_f=0,5828s$.

A l'instant de la fermeture du disjoncteur a $t_f=0.5828s$ on constate un pic de courant très élevé par rapport au régime permanent de valeur 18.72A.

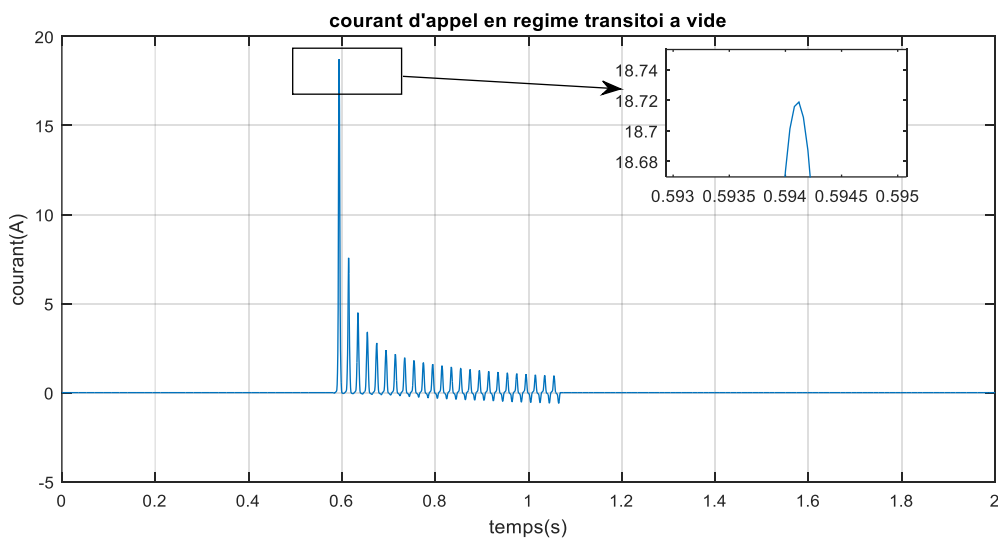
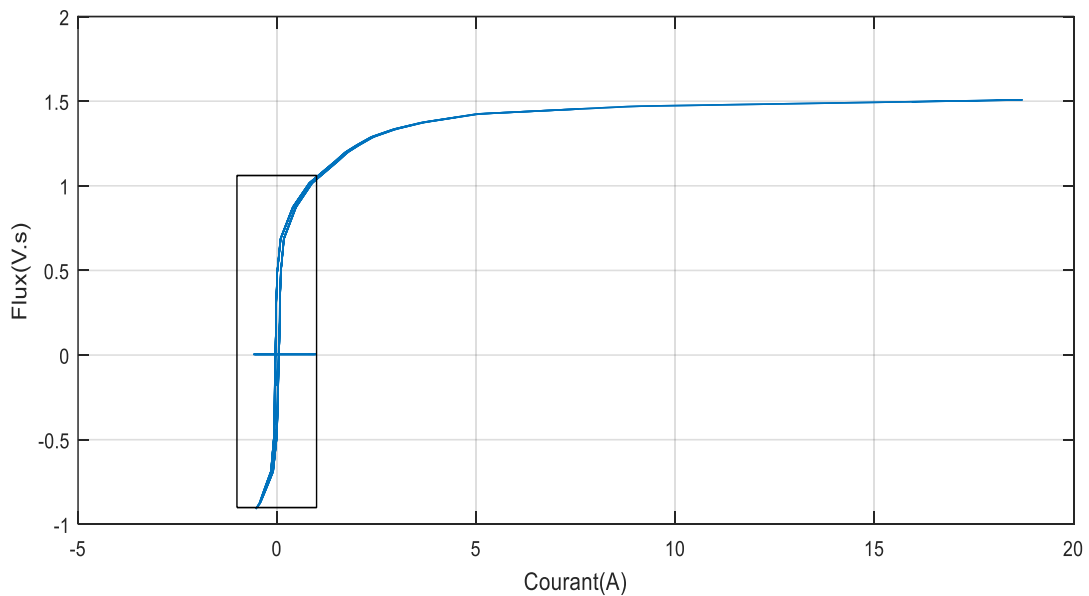


Figure III.10 Courbe de courant d'appel à $t_f=0,5828s$.

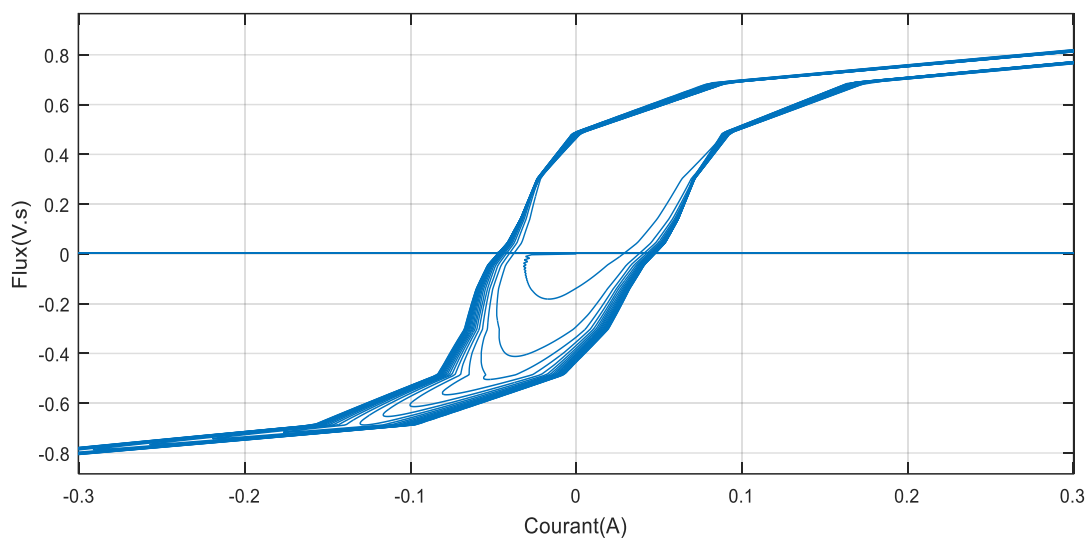
Cycle d'hysteresis :

Le pic de courant est bien important à cet instant alors le cycle d'hystérésis migre vers la partie positive. A une valeur de 4(A), le flux se stabilise et reste constant,et garde toujours une petite partie négative a une valeur de courant près de -0,8(A) correspondante a -0,9(v.s) .

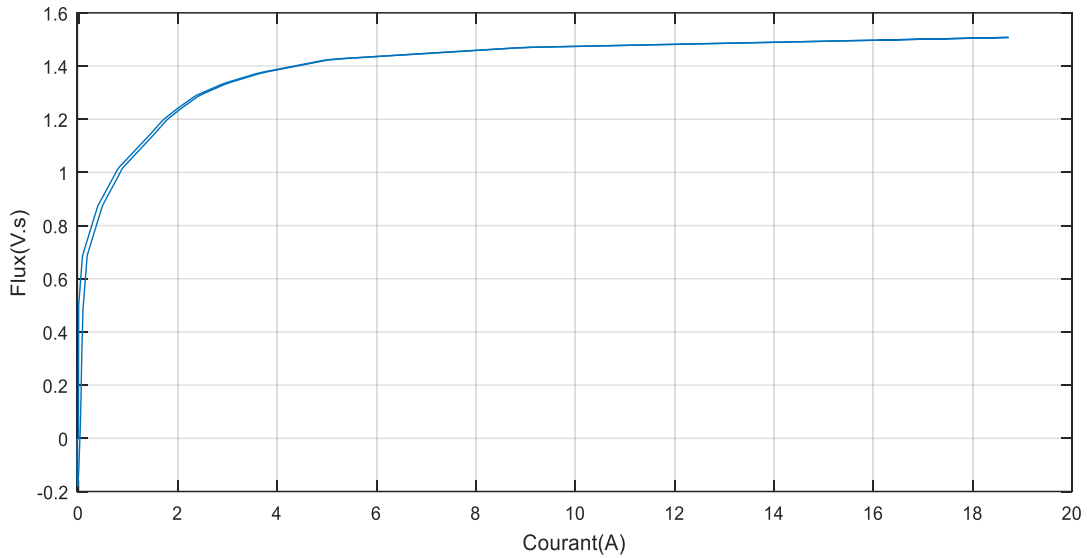


(d)

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



(e)



(f)

Figure III.11 Courbe de cycle d'hystérésis à $t_f=0,5828s$.

(d) Représente les cycles hystérésis en régime transitor.

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

(f) Représente le première cycle hystérésis.

- Pour la fermeture du disjoncteur a : $t_f=0,5848s$.

On constate que la plus grande amplitude du courant d'appel est à cet instant de fermeture du disjoncteur une valeur de 26.5A.

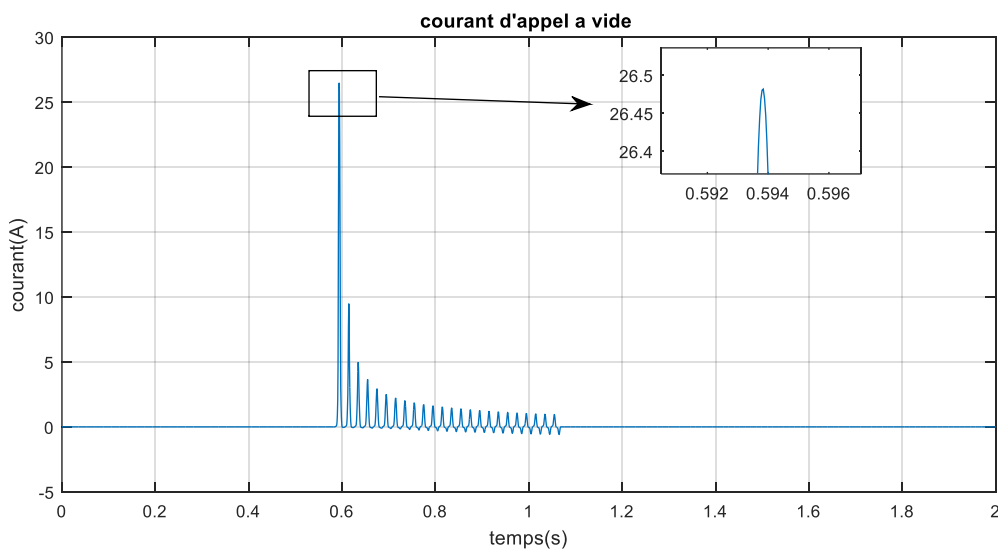
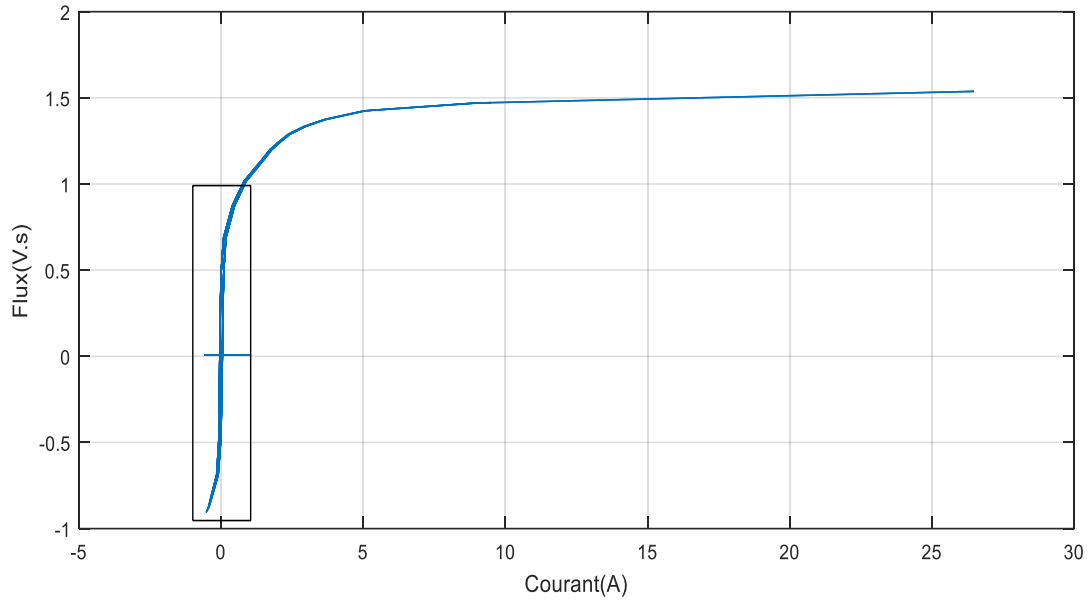


Figure III.12 Courbe de courant d'appel à $t_f=0,5848s$.

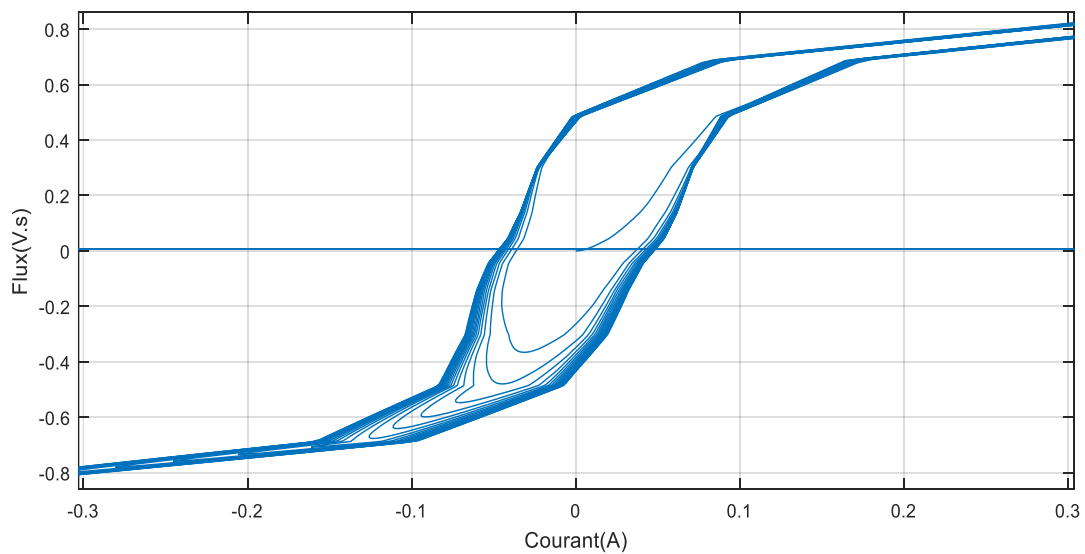
Cycle d'hysteresis :

Cet instant de fermeture du disjoncteur correspond à la présence du pic de courant d'appel maximal et le cycle d'hystérésis a une épaisseur assez réduite, et tend à se décaler selon le pic de courant d'appel.

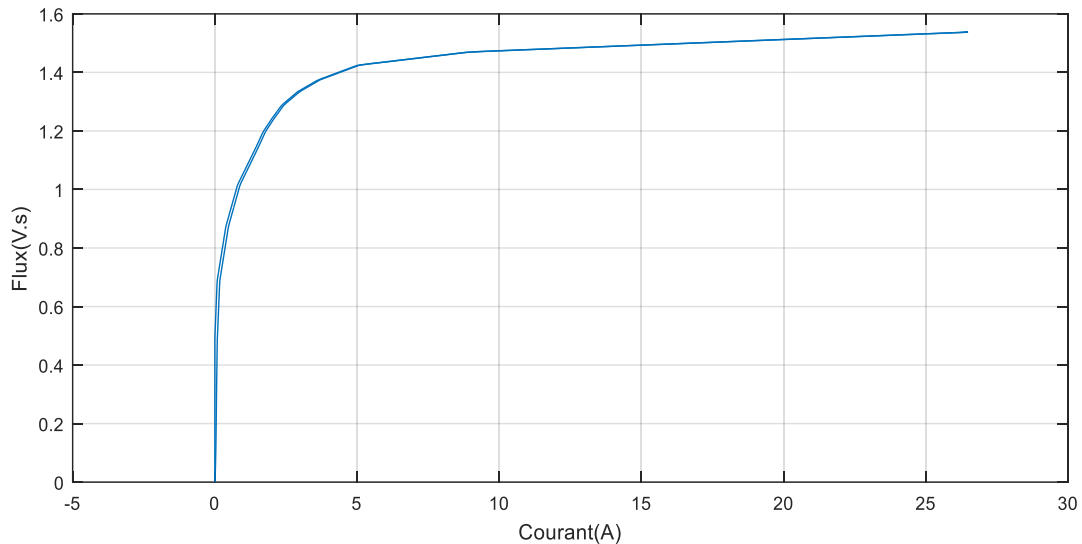


(g)

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



(h)



(i)

Figure III.13 forme d'onde globale courbe de cycle d'hystérésis a $t_f=0,5848s$.

(g) Représente les cycles hystérésis en régime transitoir.

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

(i) Représente le première cycle hystérésis.

D'après les résultats obtenus des différents essais de la simulation on peut en déduire que le courant d'appel transitoire du transformateur influence directement la forme d'onde du cycle d'hysteresis, cet impact se traduit par une diminution de la surface de ce cycle selon l'augmentation du pic de courant, donc les pertes fer réduites. En plus un décalage de cycle d'hysteresis est bien remarquable vers le régime de saturation, c'est-à-dire que le cycle d'hysteresis se décale vers la valeur du pic de courant d'appel.

III.7 Conclusion

Le courant d'appel transitoire du transformateur peut dépasser le courant nominal, et peut atteindre la valeur de considération du courant de court-circuit. L'amplitude diminue très lentement et atteint son équilibre courant magnétisant quelques secondes plus tard. Courant de surtension transitoire avec composante élevée DC et riche en 1ère et 2ème harmoniques affecte la qualité du signal. Les résultats de la simulation effectuée dans ce chapitre montrent que :

L'amplitude du courant d'appel dans le régime transitoire a une influence sur la surface et le positionnement du cycle d'hystérésis.

Cette influence se manifeste par un déplacement du cycle d'hysteresis vers la valeur de courant d'appel et sa surface devient plus étroite. Le cycle d'hysteresis du transformateur qui représente les pertes fer s'influence d'une manière franche par l'augmentation de courant d'appel transitoire.

Conclusion Générale

Le transformateur est le circuit le plus grand, le plus lourd et généralement le plus cher élément. La géométrie du circuit magnétique est tridimensionnelle. Cette caractéristique a une limitation fondamentale sur la réduction du transformateur. Les caractéristiques des matériaux disponibles limitent la réduction de poids, le coût élevé des transformateurs est dû à la normalisation peu pratique, les matériaux requis et leur procédé de fabrication. Les problèmes liés à l'utilisation d'équipements magnétiques peuvent être mineurs ceci est réalisé grâce à l'utilisation de pratiques d'application astucieuses.

Grâce à lui, l'électricité peut être transportée de manière économique sur de longues distances et distribuée aux usines et aux foyers. Il n'est généralement pas possible de faire correspondre d'autres manières pratiques, les gens sont très intéressés par le développement des transformateurs de puissance.

Un transformateur présente des pertes fameuses, considérables qui sont l'hysteresis, les pertes par courant de Foucault et d'autres négligeables causées par le courant à vide dans l'enroulement primaire.

Ce travail présente l'influence du régime transitoire sur le cycle d'hysteresis d'un transformateur monophasé à vide. Pour visualiser l'influence du régime transitoire sur le cycle d'hysteresis d'un transformateur monophasé à l'aide du programme ATP, plusieurs essais ont été effectués, en variant le temps d'ouverture du disjoncteur jusqu'à atteindre le temps d'ouverture correspondant à l'amplitude la plus grande du courant d'appel transitoire, il est bien clair que le courant d'appel magnétisant affecte directement le cycle d'hysteresis, et cela s'explique par la restriction et le décalage du cycle d'hysteresis causé par le courant d'appel magnétisant.

Références bibliographiques

- [1] Pierre Mayé, « Aide-mémoire Electrotechnique » Dunod ,2006
- [2] Kostenko, M., and L. Piotrovski. "Machine électrique, Tome I: machine à courant continu et transformateurs." Edition Mir Moscou, Technique soviétique, (1976).
- [3] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur de puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance). consulté le 25/08/2021.
- [4] TOTAL, Manuel de formation cours, « Exploration et Production Les Equipements Les Transformateurs », Support de cours EXP-PR-EQ170-FR Dernière version : 31/05/2007.
- [5] [http://sti2d.ecolelamache.org/transformateur monophasé](http://sti2d.ecolelamache.org/transformateur_monophasé), consulté le 05/09/2021
- [6] A. Chellali, « Génération d’harmoniques par transformateur de puissance sous condition de saturation », Département d'Electrotechnique, Mémoire de Master, UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF, ALGERIE, 2015.
- [7] S.Amizian, «Cours Machines Electriques Approfondies», Master réseaux électrique, Bouira, 2019/2020.
- [8] <http://www.scribd.com/document/chap8>, consulté le 25/09/2021.
- [9] JEAN DUPUY, « les transformateurs monophasés », lycée des matières de l’industrie, France, 2019.
- [10] Jean. Pierre FANTON, « ELECTROTECHNIQUE », ISBN 2-7298-1113-3, Paris, 2002.
- [11] Mr. BOUDIAF tarer / Mr. LAKHLEF abdelhak, « Protection des transformateurs de puissance et leur identification paramétrique en vue du diagnostic de leurs défauts », département d'électrotechnique. Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Algérie,2008/2009.
- [12] S.Bensaid,«Coure électrotechnique fondamentale», Bouira, 2017 /2018.
- [13] <http://www.electrotechnique-fr.com> , consulté le 15/08/2021.
- [14] Mr. Rahal Samir/Mr. Gouadma Fateh, « Effets des harmoniques sur les transformateurs de puissance en régime transitoire et sous protection numérique », Mémoire de fin d’étude, département d’électrotechnique, Algérie, 27/06/2012.
- [15] Christian G.H. MAENNEL, « Régulateur secteur à noyau saturable », Mai 2014.
- [16] Amari Mansour, « COURS D’ELECTROTECHNIQUE, Institut Supérieur des etudes technologiques de Nabeul », Janvier 2014.

-
- [17] www.schneider-electric.fr (Transformateurs de Courant : comment les spécifier, 2001)
Consulté le 20/08/2021.
- [18] Luc Lasne, J.CGianduzzo, Didier Geoffroy : Support de cours Electrotechnique ,
Université Bordeaux1 , 07 /09 /2007.
- [19] TIAN Liu, « Manoeuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent
»Thèse de doctorat en spécialité physique, Ecole doctorale, France, 2011.
- [20] CAVALLERA Didier, « 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 en génie électrique, Ecole doctorale Electronique,
Electrotechnique, Automatique et traitement de signal, Novembre 2001
- [21] YAHIOU Abdelghani, « Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans
les transformateurs de puissance : Cas du courant d'appel », Thèse de magister en
électrotechnique, Université de FERHAT ABBAS, SETIF, Juin 2012
- [22] N.DJELLAOUI et H.OUAHAB , « Etude du courant d'appel sympathique dans les
réseaux électriques (transformateurs en parallèles) », Mémoire de Master, Université
AKLI MOHAND OULHADJ, BOUIRA,2018.
- [23] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde, « Transformer and Inductor Design Handbook »,
(Electrical and Computer Engineering), CRC Press, Marcel Dekker (2004).
- [24] Laszlo Prikler, Hans Kristian Høidalen, « ATPDRAW version 5.6 for Windows
9x/NT/2000/XP/Vista », November 2009.