

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة أكلي محند أولحاج البويرة

UNIVERSITÉ AKLI MOHAND OULHADJ — BOUIRA

UAMOB (ALGERIE)

Faculté des sciences et sciences appliquées.



Mémoire de Master

Présenté au département de Génie Electrique.

Pour obtenir le diplôme

De Master en réseaux Electriques

Par :

DJELLAOUI Nacira

OUAHAB Hala

Thème

Etude du courant d'appel sympathique dans les réseaux électriques (transformateurs en parallèles)

Soutenu le devant la commission d'examen composée de :

Mr.	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Président
Mr. YAHIOU Abdelghani	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Rapporteur
Mr. HOUASSINE Hamza	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Co-Rapporteur
Mr.	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Examineur
Mr.	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Examineur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents que j'aime beaucoup pour leur soutien moral et leurs aides précieuses pendant les longues années d'étude dont je suis reconnaissante, que Dieu me les protégé.

Mes très chers beaux parents ;

Mes chers frères: Amar, Sedik, Abdelhak et Ali;

Mes chères sœurs: Nacira, Sabah, Nouara et Halima;

Mon marié : Hamza ;

Mes belles sœurs : Asma, Meriem et Aicha ;

Mes beaux frères: Aissa, Nourdine, Ali, Yahia et Yakoub ;

Mes nièces et nouveaux;

Tous mes Amis(es) sans exception;

Tous ce qui me sont chers;

Toute la promotion de réseaux électriques 2017/2018.

Hala

Remerciement

Avant tout chose nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoirs donnée le courage, la patience et la volonté pour atteindre notre objectif et présenter cet humble travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur YAHYOU Abdelghani et notre co-encadreur Monsieur HOUASSINE Hamza ; pour leurs précieux conseils et leurs aide durant tout la période de travail.

Nos remerciement vont également au membre du jury pour l'intérêt, qu'ils sont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Egalement à tous nous enseignants durant les années des études.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciement à nos familles et nos amis qui par prière et leurs encouragement

Merci à tous et à tous.

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

CHAPITRE I

GENERALITES FONDAMENTALES SUR LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE	3
--	---

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition du transformateur de puissance	3
I.3. Principe de fonctionnement.	3
I.4. Transformateur idéal.....	4
I.5. Constitution de transformateur de puissance	5
I.6. Etude des pertes dans les transformateurs	6
I.6.1. Pertes fer.....	6
I.6.2. Pertes cuivre	7
I.6.3. Pertes magnétiques	7
I.7. Type de transformateur	7
I.7.1. Transformateur monophasé.....	8
I.7.2. Transformateur triphasé	8
I.7.3. Transformateur à huile	9
I.7.4. Transformateur secs	10
I.8. type de protection	10
I.9. Modélisation électrique de transformateur	11
I.9.1. Transformateur monophasé à basse fréquence.....	11
I.9.2. Modèle électrique de transformateur à haute fréquence	12
I.9.2.1. Model universel EMTP	12
I.9.2.2. Model de RESEL	13
I.10. Conclusion	14

CHAPITRE II

ETUDE DE PHENOMENES TRANSITOIRES	15
--	----

II.1. Introduction	15
II.2. Courant d'appel	15
II.2.1. Flux rémanent	15
II.2.2. Origine de flux rémanent	15
II.2.3. Effet de flux rémanent	15
II.2.4. Identification de flux rémanent.....	16
II.2.5. Courant magnétisant	16
II.2.6. Apparition de courant d'appel.....	19

II.2.7. Effet de l'impédance du système	20
II.2.8. Effet de courant d'appel	21
II.2.9. Réduction de courant d'appel	22
II.3. Courant sympathique	22
II.3.1. Transformateurs connectés en parallèle	22
II.3.2. Apparition de courant sympathique	23
II.3.3. Interaction sympathique entre les transformateurs	23
II.3.4. Réduction de l'interaction sympathique	23
II.3.5. Facteurs influençant sur le phénomène sympathique	23
II.3.5.1. Effet de la résistance de système	23
II.3.5.2. Effet de flux résiduel	24
II.4. Conclusion	24

CHAPITRE III

DETERMINATION DES PARAMETRES D'UN TRANSFORMATEUR	25
III.1. Introduction	25
III.2. partie expérimental	25
III.2.1. Matériel utilisé	25
III.2. 2. Procédé d'identification des paramètres de transformateur	26
III.2. 2.1. Essai à vide sous tension nominal	26
III.2. 2.1.1. Valeurs de mesure	27
III.2. 2.1.2. Calcule	27
III.2. 2.2. Essai en court-circuit à courant secondaire nominal sous tension réduite	28
III.2. 2.2.1. Mesure	28
III.2. 2.2.2. Identification des paramètres	29
III.3. Simulaion	29
III.4. Model du noyau (flux-courant)	31
III.5. Conclusion	32

CHAPITRE IV

REDUCTION DE COURANT D'APPEL SYMPATHIQUE	33
IV.1. Introduction	33
IV.2. Etude de mode opératoire	33
IV.2.1. Matériel utilisé dans laboratoire	33
IV.2.2. Montage réalisé	33

IV.3. Commutation aléatoire.....	34
IV.4. Commutation contrôlée.....	36
IV.4.1. Procédure de la commutation contrôlée.....	36
IV.4.2. Définition de la commutation contrôlée	36
IV.4.3. Stratégie de contrôle.....	39
IV.4.4. Résultats de la commutation contrôlée	41
VI.5. Conclusion	44

Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé	3
Figure I.2 : Constitution d'un transformateur de puissance.....	6
Figure I.3 : Cycle d'hystérésis	7
Figure I.4 : transformateur monophasé	8
Figure I.5 : Transformateur triphasé à flux forcé.....	9
Figure I.6 : transformateur immergé à refroidissement par diélectrique liquide.	10
Figure I.7 : Modélisation d'un transformateur monophasé sans pertes fer, sans saturation	11
Figure I.8 : Modélisation d'un transformateur monophasé avec pertes fer, sans saturation.....	12
Figure I.9: schéma d'un transformateur monophasé avec saturation et pertes fer	12
Figure I.10 : Model d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP.....	13
Figure I.11 : Représentation de circuit magnétique	13
Figure I.12 : Représentation de circuit électrique	14
Figure II.1 : Circuit de simulation utilisé dans l'étude	17
Figure II.2 : Schéma du bloc explicatif.....	17
Figure II.3 : forme de courant magnétisant dans la zone linéaire	18
Figure II.4 : forme de courant d'appel lors la mise sous tension du transformateur.....	18
Figure II.5 : Le courant magnétisant dans le régime linéaire.....	19
Figure II.6 : le courant magnétisant dans le régime transitoire.....	20
Figure II.7 : Amplitude de courant d'appel et courant sympathique pour $R=26 \Omega$	20
Figure II.8 : Amplitude de courant d'appel et de courant sympathique pour $R= 25\Omega$	21
Figure II.9 : Amplitude de courant d'appel et de courant sympathique pour $R= 80\Omega$	21
Figure II.10 : Système considéré pour l'étude de courant sympathique.....	23
Figure III.1 : Plaque signalitique d'un transformateur monophasé	26
Figure III.2 : montage d'un essai à vide d'un transformateur monophasé.	26
Figure III.3 : Montage réalisé en essai en court circuit.....	28
Figure III.4 : Montage explicatif du circuit de simulation réalisé à vide.....	29
Figure III.5 : Circuit de simulation réalisé pour étudier l'essai à vide.....	30
Figure III.6 : Montage explicatif du circuit de simulation réalisé en court-circuit.....	30
Figure III.7: Circuit de simulation réalisé pour étudier le cas de court-circuit.....	31
Figure III.8 : Courbe de saturation de transformateur.	31
Figure IV.1 : Photo du montage réalisé dans le laboratoire.....	33
Figure IV.2 : Interface du système d'acquisition de données (ControlDesk).....	34
Figure IV. 3 : Résultat obtenu par la mesure pour le cas aléatoire	35
Figure IV.4 : Résultat obtenu par la simulation pour le cas aléatoire.....	35

Figure IV.5 : Temps d'enclenchement optimal	38
Figure IV.6 : Stratégie de mesure et de contrôle	39
Figure IV.7 : Circuit de simulation qui sert à contrôler la commutation	40
Figure IV.8 : Schéma explicatif du circuit de simulation.....	40
Figure IV.9 : Mesure des surintensités transitoires pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$	41
Figure IV.10 : Simulation de surintensités transitoires pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$..	42
Figure IV.11: Mesure des surintensités transitoires pour $\alpha = \frac{5\pi}{6}$	43
Figure IV.12: Résultats obtenus par la simulation en cas de $\alpha = \frac{5\pi}{6}$	43

Tableau III.1 : Résultats de l'essai à vide.....26

Tableau III.2 : Résultats de l'essai en court circuit.....27

E_1 : Force électromotrice créée au niveau de bobinage primaire.

E_2 : Force électromotrice créée au niveau de bobinage secondaire.

φ_{max} : Flux max.

N_1 : Nombre de spire primaire.

N_2 : Nombre de spire secondaire.

U_1 : Tension simple induit primaire.

U_2 : Tension simple induit secondaire.

R_1 : Résistance d'enroulement primaire.

R_2 : Résistance d'enroulement secondaire.

μ : Perméabilité.

P_{fer} : Pert fer.

M : Rapport de transformation.

I_1 : Courant primaire.

I_2 : Courant secondaire.

B : Densité de champ magnétique.

H : Intensité de champ magnétique.

μ_r : Perméabilité relative.

μ_0 : Perméabilité de l'air.

L : Inductance.

φ_r : Flux rémanent.

T_1 : Transformateur 1.

T_2 : Transformateur 2.

Ω :	Home.
V_{1n} :	Tension primaire nominale.
V_{2n} :	Tension secondaire nominale.
S :	Puissance apparente.
F :	Fréquence.
I_{1n} :	Courant primaire nominal.
I_{2n} :	Courant secondaire nominal.
A :	Ampère.
P :	Puissance active.
Q :	Puissance réactive.
λ :	Flux de liaison.
K :	Constant d'intégrale.
A.N:	Application numérique.

Introduction Générale

Les réseaux électriques comportent plusieurs dispositifs, chacun est destiné à satisfaire un besoin spécifique selon sa construction ainsi son principe de fonctionnement. Ils fonctionnent sous une stratégie d'enchaînement afin d'obtenir une énergie électrique de qualité à consommer soit au niveau des installations importantes ou des usines, ou bien au niveau des installations domestiques. La production d'énergie électrique est localisée dans les centrales de production, mais les consommateurs sont situés de près ou loin de ces installations. Alors il faut y avoir des éléments efficaces qui permettent de transporter et distribuer cette énergie électrique.

Le transformateur de puissance est l'un de ces dispositifs. Il fait partie des équipements les plus importants et les plus coûteux sur le plan financière. C'est un appareil qui n'effectue qu'un transfert d'énergie électrique par voie électromagnétique, tout en modifiant les niveaux de tension ou de courant, mais sans jamais varier de fréquence [1]. Dans les réseaux de distribution, le transformateur permet de minimiser les pertes d'énergie par effet joule, ainsi de réduire les chutes de tension. Il se trouve sous différents types dont le regroupement se fait selon le fonctionnement, ou bien selon la structure du noyau magnétique.

La modélisation des transformateurs représente un moyen de description du fonctionnement qui dépend essentiellement de la gamme de fréquence [2].

Le but des exploitants des transformateurs de puissance est de garantir une meilleure continuité et qualité de service, qui s'accompagnent à un coût d'investissement minimum le plus possible. Pour cela, il faut faire un diagnostic bref afin d'assurer une connaissance et une compréhension de différents phénomènes transitoires qui peuvent influencer négativement sur le fonctionnement du transformateur. Ces phénomènes sont de natures et de formes multiples. L'un de ces phénomènes est le courant d'appel qui est une perturbation qui se compose de multiples harmoniques dangereuses notamment celle du rang 2 [2]. Il se produit à cause de saturation de circuit magnétique en raison d'un décalage continu dans le flux. Il dépend d'instant de fermeture ainsi de la densité de flux rémanent estimé à l'aide des méthodes bien déterminées [3].

L'impact de courant d'appel sur les transformateurs peut être réduit en utilisant des solutions, par exemple l'utilisation des disjoncteurs manœuvrés qui sont équipés d'une chambre auxiliaire avec des résistances de pré- insertion.

Dans les postes de livraison d'énergie électrique, les transformateurs sont couplés en parallèle en générant un phénomène dit courant d'appel sympathique .C'est une surintensité transitoire qui se produit lorsqu'un transformateur est mis sous tension sur un réseau d'alimentation contenant un autre

transformateur déjà mis sous tension. Il persiste pendant une durée beaucoup plus longue que le courant d'appel produit dans le cas de transformateur connecté seul à la source d'alimentation [4]. Pour réduire les effets de ce phénomène, il faut bien choisir que soit la résistance du système, l'angle d'allumage et le magnétisme résiduel.

L'enclenchement aléatoire des disjoncteurs placés dans un réseau de distribution agit négativement sur la qualité d'énergie et sur les transformateurs notamment sur ceux qui se couplent en parallèle. Pour réduire ce risque, il faut y avoir un contrôle d'ouverture et de fermeture tout en appuyant sur le choix optimal d'instant d'enclenchement et de ré-enclenchement.

La réduction de courant sympathique qui est l'objectif principale de ce travail est réalisée en utilisant un circuit de simulation et un système de teste de laboratoire. La commande utilisée dans le système se fait à travers d'un montage qui contient deux transformateurs de 2 KVA connectés en parallèle. Les signaux délivrés sont acquis simultanément par un oscilloscope numérique et une carte d'acquisition de données dSPACE connectée à un PC. La fiabilité de cette commutation peut être vérifiée à travers les résultats obtenus.

Ce travail est réalisé en suivant cette organisation :

- Le premier chapitre expose des généralités sur les transformateurs de puissance pour représenter les connaissances de base liées au fonctionnement du transformateur.
- Le deuxième chapitre est consacré à étudier les deux surintensités qui peuvent y avoir lieu lors d'ouverture et la fermeture non contrôlée des disjoncteurs. Le courant d'appel va apparaître dans l'utilisation d'un seul transformateur de puissance. Dans le cas des transformateurs branchés en parallèle avec ce transformateur affecté, il y a un courant qui va apparaître : C'est le courant d'appel sympathique.
- Le troisième sert à étudier la procédure d'estimation des paramètres du transformateur.
- Les dernier chapitre est dédié à réduire l'intensité de courant sympathique en utilisant une commutation contrôlée à travers deux procédures.

Chapitre I

**Généralités fondamentales sur les
transformateurs de puissance**

I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à étudier des généralités sur les transformateurs de puissances qui sont des machines statiques qui se trouvent au sein des réseaux de transport et de répartition d'énergie électrique. On commence tout d'abord par une définition de transformateur de puissance associé de son principe de fonctionnement, ainsi ses différentes composantes. Puis l'étude de différents types de transformateur suivie par modélisation des transformateurs en basse et en haute fréquence.

I.2. Définition de transformateur de puissance

Selon la commission électrotechnique internationale, un transformateur de puissance définit comme un appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et de courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeur généralement différentes, de même fréquence [IEC 60076-1] [1]. Ses enroulements sont regroupés généralement sous deux circuits séparés électriquement et reliés magnétiquement à travers d'un circuit magnétique fermé, en fer et feuilleté. Il peut être élévateur ou abaisseur de tension ou de courant selon le nombre de spires du l'enroulement primaire par rapport à celui du secondaire.

I.3. Principe de fonctionnement

Le transformateur comporte un circuit magnétique à faible réluctance qui couple le bobinage primaire avec le bobinage secondaire tout en assurant une meilleure canalisation des lignes de champ. L'alimentation de la partie primaire par une source alternative engendre un flux variable dont l'amplitude dépend de la tension appliquée et de nombre de spire du bobinage primaire N_1 . Ce flux engendre des forces électromotrices dans les enroulements primaires et secondaires respectivement. Si la partie secondaire est fermée sur un récepteur, elle apparait une tension sinusoidale de même fréquence que celle du primaire [5].

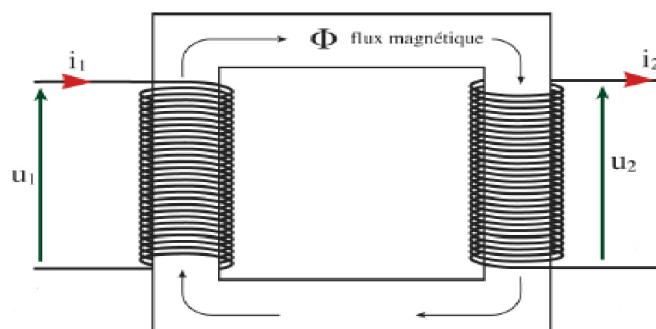


Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé.

- Les forces électromotrices respectives sont données ci-dessous :

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

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

- Selon la loi de Lenz, les tensions induites sont comme suit :

$$u_1(t) = \frac{N_1 d\phi_1}{dt} \quad (I.3)$$

$$u_2(t) = \frac{N_2 d\phi_2}{dt} \quad (I.4)$$

$u_1(t)$ et $u_2(t)$ signifient respectivement les tensions induites en primaire et en secondaire.

N_1 : Nombre de spires de l'enroulement primaire.

N_2 : Nombre de spires de l'enroulement secondaire.

ϕ_1 : Le flux magnétique crée au niveau du circuit primaire.

ϕ_2 : Le flux magnétique crée au niveau du circuit secondaire.

En appliquant la d'Ohm, on obtient :

$$u_1(t) = (R_1 I_1) + \frac{N_1 d\phi_1}{dt} \quad (I.5)$$

$$u_2(t) = (R_2 I_2) + \frac{N_2 d\phi_2}{dt} \quad (I.6)$$

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

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

I.4. Transformateur idéal

C'est un transformateur utilisé pour modéliser les transformateurs réels. Il se caractérise par les hypothèses de base mentionnées ci-dessous.

$$\mu_{fer} = \infty \quad (I.7)$$

$$R_1 = R_2 = 0 \quad (I.8)$$

$$P_{fer} = 0 \quad (I.9)$$

μ_{fer} : La perméabilité magnétique du noyau de fer.

P_{fer} : Les pertes fer.

Le rapport de transformateur dans ce cas est de telles expressions :

$$M = \frac{u_1}{u_2} \quad (\text{I.10})$$

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

I.5. Constituant de transformateur de puissance

Un transformateur de puissance possède plusieurs composantes pour garantir son rôle. Une partie représente les éléments de base, et les autres sont considérées comme divers accessoires qui assurent une meilleure performance au transformateur. Les éléments de la première partie sont :

- Les enroulements : se sont des bobinages qui ont des dimensions précisées afin d'éviter les effets des contraintes. Ils peuvent être feuillards ou rond, en méplat de cuivre ou d'aluminium [1].
- Le noyau magnétique : c'est un lien qui doit être constitué d'un matériau ferromagnétique de type doux qui se caractérise par une très haute perméabilité et une induction à saturation élevée [6]. Il se compose de tôles en matériaux ferromagnétiques empilés et séparés entre elles par des vernis. Les tôles peuvent être soit d'acier laminé à froid pour les transformateurs modernes, ou bien d'acier laminé à chaud pour les transformateurs anciens [2].
- La cuve contient les enroulements et le noyau placés dans un diélectrique qui est généralement l'huile. Elle assure la protection des personnes et des biens.
- Les bornes de traversées basses et hautes tension permettent le transit de la puissance.
- Les changeurs de prises de tension.

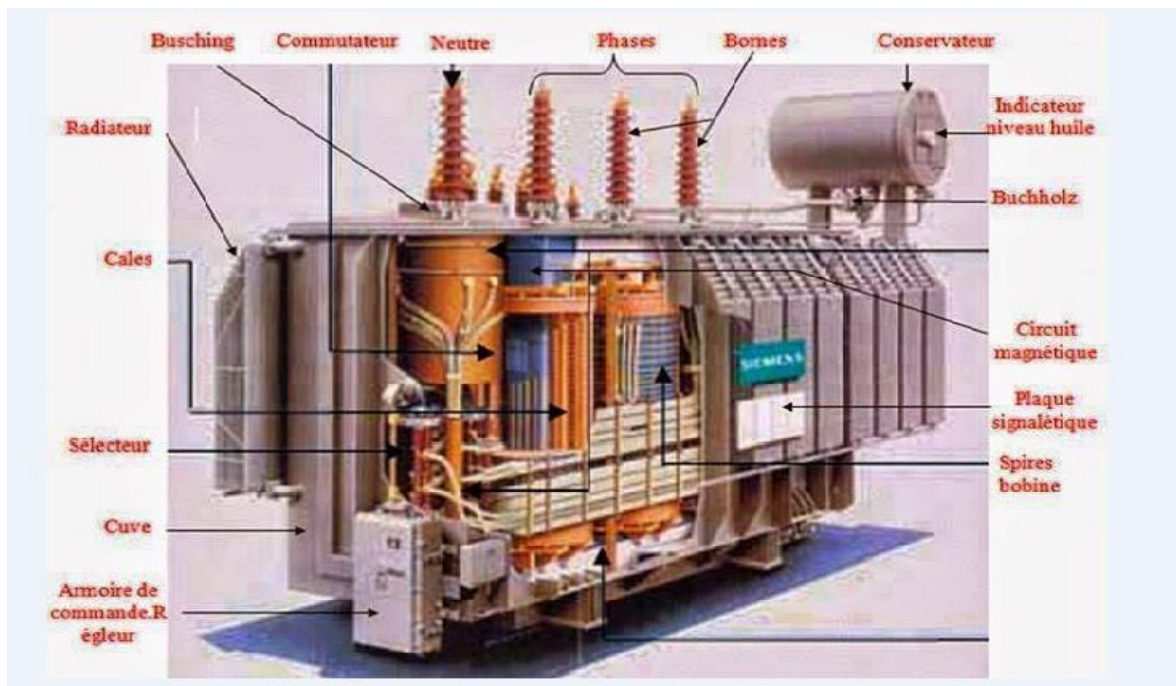


Figure I.2 : Constitution d'un transformateur de puissance [1].

I.6. Etude des pertes dans les transformateurs

Les pertes dans le transformateur existent sous trois catégories dont chaque type a ses caractères.

I.6.1. Pertes fer

Ce type de pertes apparaît dans le circuit magnétique. Elles dépendent de la tension d'alimentation appliquée et de la fréquence. Elles se trouvent de même valeur lorsque le transformateur est à vide ou en charge, sous deux types qui sont l'hystérésis et les pertes par courant de Foucault. L'hystérésis est proportionnelle à la surface de sa boucle qui représente l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur [7]. Elle doit être plus étroite possible pour minimiser les pertes magnétiques [8].

La perte par courant de Foucault est produite par les tensions induites dans les tôles en réponse à un flux alternatif qui est proportionnel au carré de la valeur efficace de la densité de flux [9].

La mesure de ces pertes se fait lors de fonctionnement à vide du transformateur dont les pertes par effet joule sont négligeables d'une sorte à obtenir que l'énergie absorbée au primaire égale aux pertes fer. Ces pertes interviennent en permanence dans le rendement, donc il faut les réduire le plus possible par un meilleur choix de noyau magnétique associé d'une limitation de la taille de courant de Foucault.

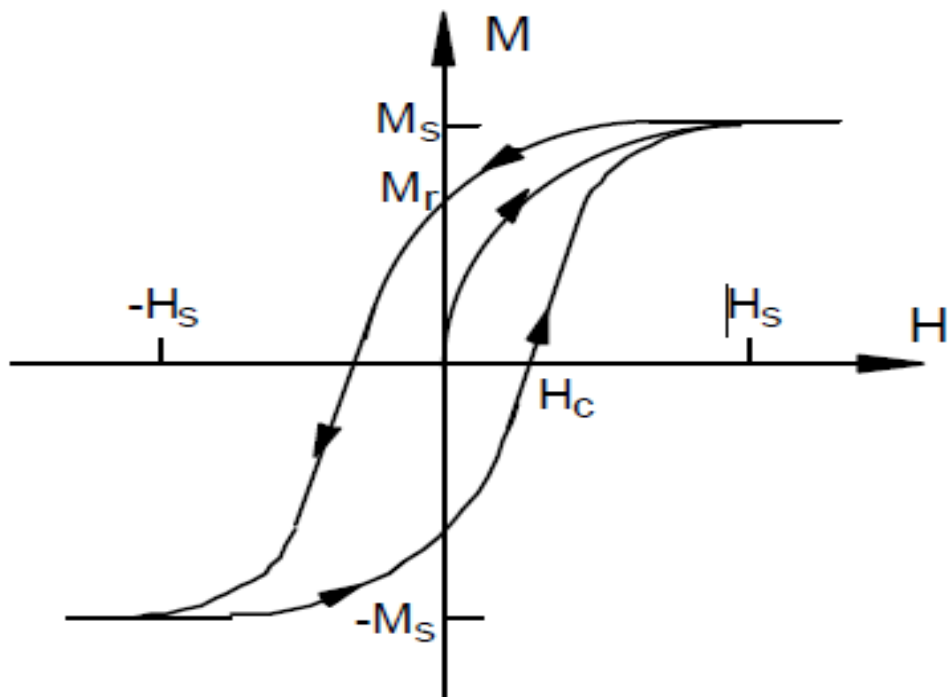


Figure I.3 : Cycle d'hystérésis.

I.6.2. Pertes cuivre

Les pertes cuivre sont dues au passage de courant dans les enroulements primaire et secondaire (effet Joule). Elles sont proportionnelle au carré du courant qui circulent dans les résistances, donc elles sont proportionnelles à la charge.

La mesure de ces pertes s'effectue en court-circuit dont les pertes fer sont négligeables à cause de la tension nominale utilisée qui doit être réduite.

Ces pertes peuvent provoquer une augmentation de température localisée associée par un phénomène d'échauffement qui génère une dégradation d'isolement.

I.6.3. Pertes magnétiques

Lorsque les lignes de champ magnétique sont canalisées dans le noyau du transformateur, il ya une partie de flux qui va disparue sous forme de flux de fuite. Cette dernière cause des pertes par courant de Foucault dans les enroulements et la cuve.

I.7. Type de transformateur

Les transformateurs de puissance sont regroupés selon leur construction et leur type de refroidissement sous les catégories suivantes.

I.7.1. Transformateur monophasé

C'est un transformateur qui se compose d'un circuit magnétique sur lequel deux bobinages sont enroulés d'une manière à avoir une partie primaire qui reçoit de l'alimentation, et une autre partie dite secondaire qui sert à alimenter le récepteur. Il peut être élévateur ou abaisseur soit de tension ou de courant.

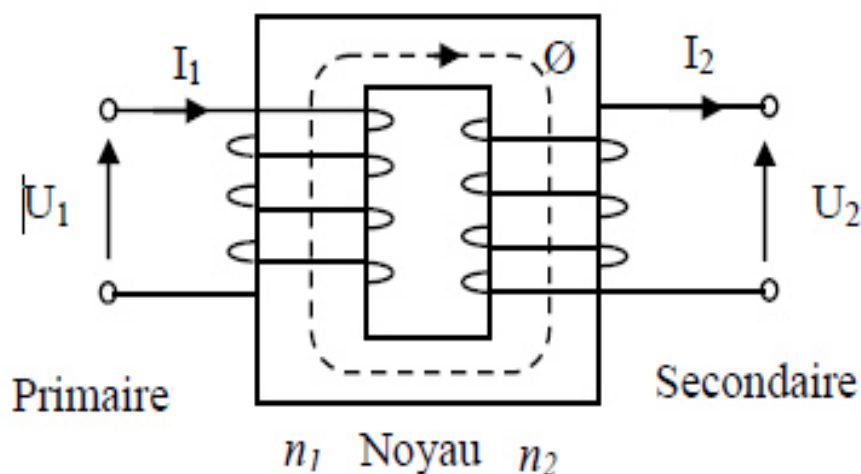


Figure I.4 : Transformateur monophasé.

I.7.2. Transformateur triphasé

Les transformateurs triphasés sont les plus fréquents dans les réseaux d'énergie électrique. Ils peuvent être composés de trois unités monophasées, ou bien d'un groupe de couplage dont le circuit magnétique comporte généralement trois colonnes, sur chaque colonne un enroulement primaire est imbriqué avec un enroulement secondaire. Le circuit magnétique réalisé dans la première configuration est à flux libre. Les flux magnétiques obtenus sont équilibrés, indépendants et leur somme vectorielle ou complexe est nulle à chaque instant. Par contre, dans la deuxième configuration le transformateur est à flux forcé. Les réluctances des trois colonnes ne sont pas identiques. Par conséquent il y aura un déséquilibre des courants à vide. Les enroulements sous conditions spécifiques, sont couplés de cette manière :

- Les enroulements primaires sont couplés soit en étoile, soit en triangle.
- Les enroulements secondaires sont couplés soit en étoile, en triangle ou bien en zig-zag .

Le couplage entre le primaire et le secondaire du transformateur est distingué sous les trois types suivant :

- Couplage étoile-étoile : C'est un couplage utilisé dans les transformateurs qui assurent le lien entre le réseau haut tension et basse tension.
- Le couplage triangle- étoile : C'est un couplage utilisé dans les transformateurs destinés à la distribution d'énergie électrique.
- Le couplage zig-zag : Ce type de couplage assure la tenue en régime déséquilibré.

Fonctionnement sur charge asymétrique est usuel pour les transformateurs de distribution dont les enroulements BT sont couplés en étoile.

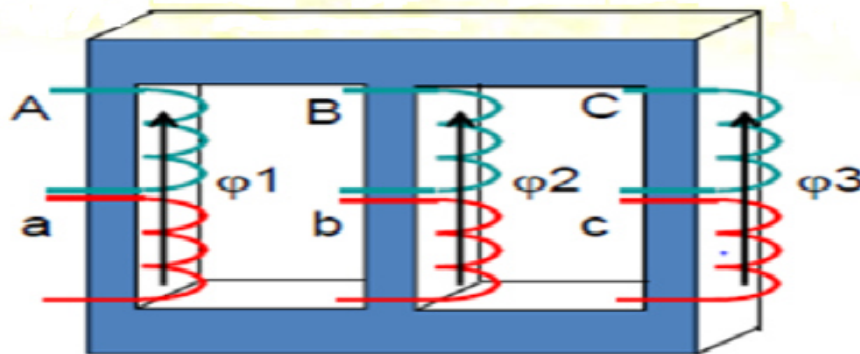


Figure I.5 : Transformateur triphasé à flux forcé.

I.7.3. Transformateurs à huile

C'est un type de transformateur de puissance de distribution d'énergie électrique dont la cuve est remplie de l'huile qui joue un rôle d'isolant en assurant le refroidissement des bobines en cas d'échauffement. L'huile utilisée peut être soit minérale, végétale ou celle de synthèse. Sa dégradation est principalement causée par le champ électrique, la température, l'humidité et l'oxygène qui entraîne de l'oxydation. Cette dégradation affecte le rendement du transformateur. Alors l'isolant doit assurer le plus possible ces caractéristiques [10] :

- Une haute rigidité diélectrique.
- Une faible viscosité et un bas point d'écoulement pour assurer sa circulation.
- Un point d'éclair élevé.
- Une bonne stabilité chimique essentiellement vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de la décomposition.

Le transformateur immergé provoque moins de nuisance sonore, et l'analyse de son huile permet de faire un diagnostic à moindre de cout. Mais il présente des risques d'incendie et de pollution à la suite d'une fuite de diélectrique.



Figure I.6 : transformateur immergé à refroidissement par diélectrique liquide.

I.7.4.Transformateurs secs

Celui qui parle d'un transformateur sec, il parle souvent d'un transformateur qui refroidit par l'air. Il se trouve essentiellement dans les environnements de risque d'incendie élevé. Il ne provoque aucun risque de fuite ou de pollution, mais il présente ces inconvénients [10] :

- Nécessité d'une surveillance ou d'un entretien régulier.
- Nécessité d'un dépoussiérage fréquent.
- Mise en œuvre d'une ventilation appropriée.
- Son cout est plus élevé que celui d'un transformateur immergé.

I.8.Type de protection

Les protections disponibles qui assurent le bon fonctionnement du transformateur afin d'assurer une bonne qualité d'énergie sont liées aux types de défaut. Pour un transformateur HT/BT on les trouve selon cet ordre :

- Un thermostat placé en amont pour se protéger contre l'élévation de la température.
- Buchholz : c'est un relais de protection qui détecte tout dégagement gazeux lorsque le défaut d'isolement se manifeste sous forme d'un arc électrique qui va décomposer l'huile [11].

- La protection masse cuve : permet de détecter tout défaut interne entre le transformateur et la masse. Elle est utilisée pour protéger les personnes et les biens.

I.9. Modélisation électrique de transformateur

I.9.1. Transformateur monophasé à basse fréquence

La modélisation d'un transformateur monophasé à basse fréquence se fait en s'appuyant sur différents principes. L'un de ces derniers consiste à prendre en considération l'état de circuit magnétique associé par la présence ou l'absence des pertes. Lors de fonctionnement du transformateur monophasé dans la zone linéaire sans pertes, le schéma équivalent contient des impédances linéaires et un rapport de transformation comme c'est montré dans la figure (fig.I.7).Chacun de ses composants a sa propre représentation [2].

- 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.

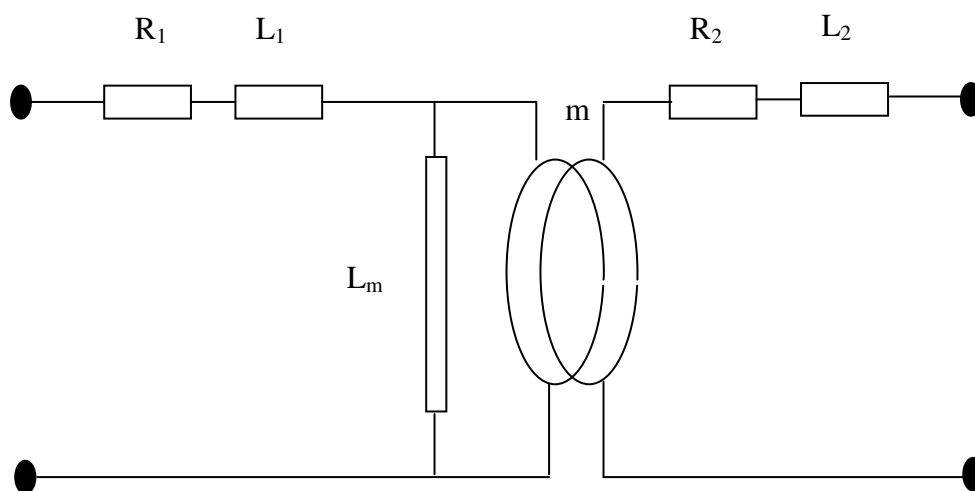


Figure I.7 : Modélisation d'un transformateur monophasé sans pertes fer, sans saturation.

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

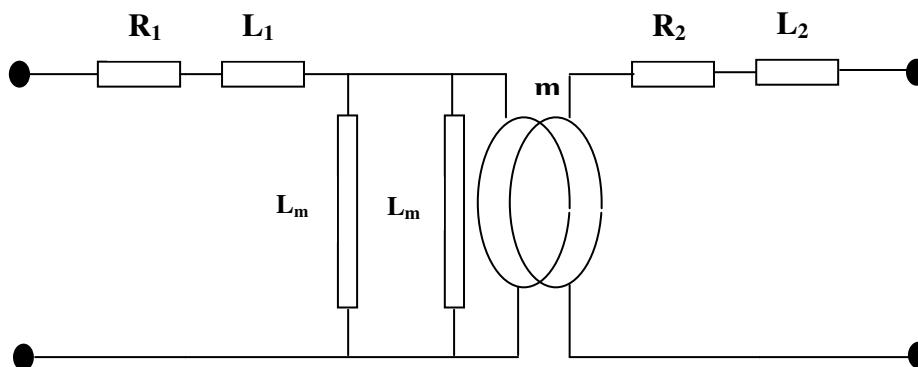


Figure I.8 : Modélisation d'un transformateur monophasé avec pertes fer, sans saturation.

Par contre, si le transformateur est saturable le model de base adapté à tous les phénomènes transitoires qui peuvent apparaitre contient essentiellement une inductance magnétisante non-linéaire branchée en parallèle avec une résistance non-linéaire qui modélise les pertes fer [5].

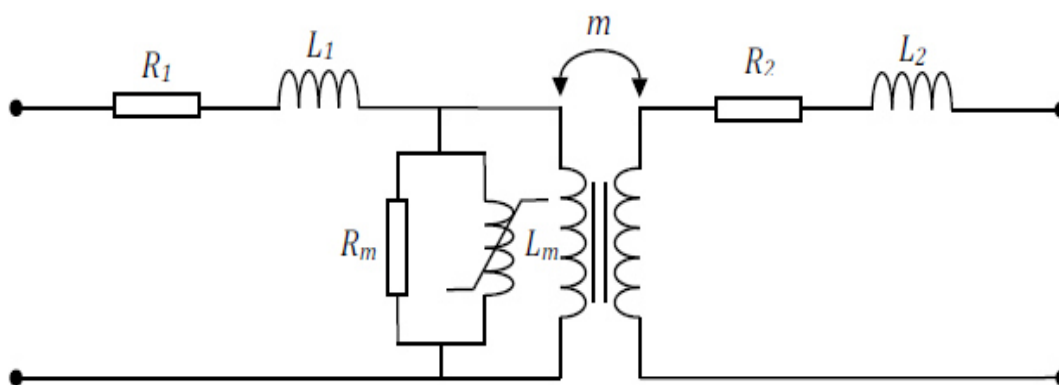


Figure I.9 : Schéma d'un transformateur monophasé avec saturation et pertes fer.

I.9.2. Model électrique de transformateur à haute fréquence

La modélisation des transformateurs à haute fréquence se fait sous plusieurs configurations dont le principe de la méthode adaptée joue un rôle de base. Parmi ces modèles on trouve :

I.9.2.1. Modèle universel EMTP

Le code de calcul EMTP (Electromagnétique Transients Program) est adapté en régime transitoire pour schématiser le transformateur en utilisant des résistances, des capacités, des inductances de fuite, une branche magnétisante ainsi un transformateur parfait. Chacun de ces composants possède sa propre signification. Ce modèle est bien adapté pour faire une structure globale du transformateur en s'appuyant les interactions avec le réseau électrique sans prendre en considération les études internes de transformateur [12].

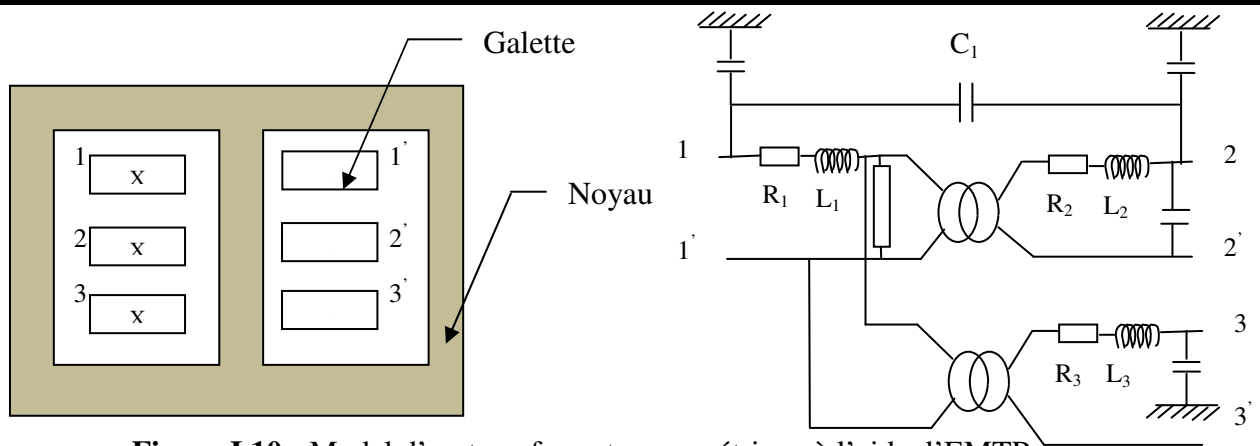


Figure I.10 : Model d'un transformateur symétrique à l'aide d'EMTP.

I.9.2.2. Modèle de RESEL

RESEL est un programme conversationnel pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques [13], son premier objectif était l'étude des phénomènes dans les transformateurs. La configuration de modélisation se base sur la représentation de comportement électrique, ainsi le comportement magnétique.

- Le circuit électrique comporte des forces électromotrices, et plusieurs résistances et capacités [14].
- Le circuit magnétique se compose d'un réseau de réluctances et de forces magnétiques.

Les deux circuits sont couplés de telle façon que les sources du circuit électrique sont liées à la variation de flux du circuit magnétique, mais les sources du circuit magnétiques sont liées aux courants dans les enroulements.

Les figures ci-dessous traduisent des circuits qui se couplent afin de modéliser un transformateur à deux colonnes avec le mode de RESEL.

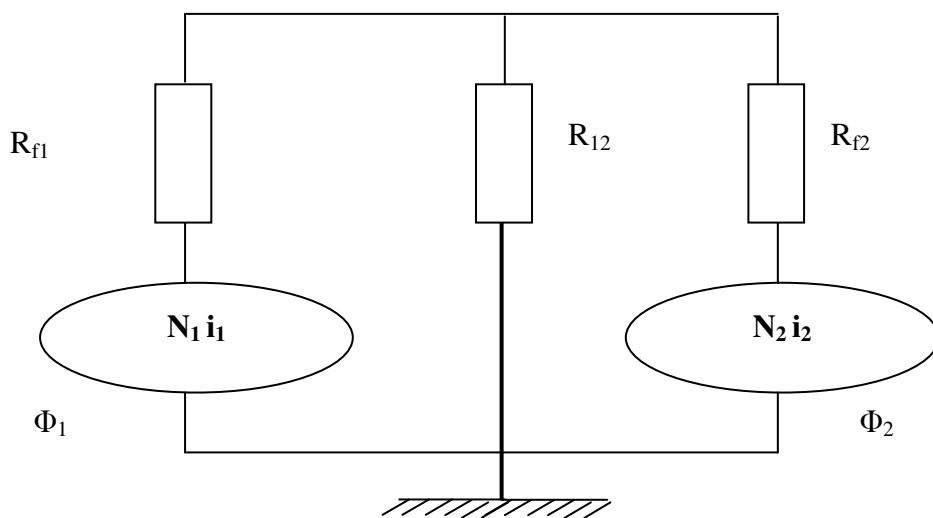


Figure I.11 : Représentation de circuit magnétique

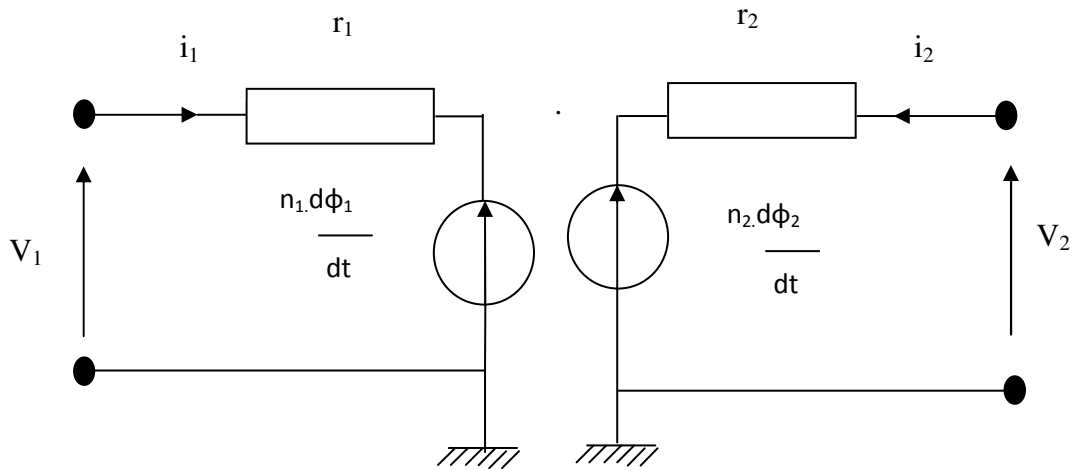


Figure 1.12 : Représentation de circuit électrique.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques notions de base qui correspondent à un transformateur de puissance : C'est un outil stratégique qui fonctionne selon la loi de Faraday. Il est soit monophasé ou triphasé, utilise l'huile ou l'air comme un système de refroidissement. Le transformateur à huile est utilisé essentiellement dans les postes maçonnés, mais celui à l'air est destiné aux régions rurales ou aux environnements de risque d'incendie élevé.

Puis nous avons fait une modélisation de transformateur de puissance en basse et à haute fréquence. Dans la première gamme de fréquence, la description de circuit du transformateur prend en compte l'état du circuit magnétique et les pertes. Mais dans la deuxième gamme, elle se fait sous multiples manières. Nous avons choisi le modèle de Resel et celui d'EMTP qui sont les plus utilisés pour une modélisation en régime transitoire, chacun avec ses propres composants qui sont liés au principe de fonctionnement.

Chapitre II

Etude des phénomènes transitoires

II.1. Introduction

Le transformateur de puissance est considéré comme étant l'élément de base dans les réseaux électriques notamment dans les réseaux de transport et de répartition de l'énergie électrique. Il peut y être affecté par des phénomènes transitoires lors des variations brusques de la tension d'alimentation. L'étude faite dans ce chapitre sert à expliquer tout d'abord les deux types de surintensité transitoire qui peuvent y avoir lieu lors de la remise aléatoire de sous tension d'un transformateur de puissance à vide. Le premier type concerne l'apparition de courant d'appel et le deuxième s'agit d'apparition de courant sympathique. Puis approfondir l'étude en déterminant l'effet de quelques facteurs sur l'apparition de courant sympathique en proposant quelques solutions pour le minimiser le plus possible.

II.2. Courant d'appel

II.2.1. Flux rémanent

Le flux rémanent joue un rôle de base dans l'apparition du courant d'appel dans les transformateurs 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 [2].

II.2.2. Origine de flux rémanent

Pendant l'alimentation de bobinage primaire dont la bobine qui est concentrique de n_1 spires entoure le tore magnétique, la densité de flux croît et tend vers une valeur d'aimantation correspond à la saturation.

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

$$B = \mu_0 * \mu_r * H \quad (\text{II.2})$$

Lorsque l'intensité du champ magnétique diminue pour atteindre une valeur nulle, la densité de flux diminue et tend vers une valeur différente de zéro. Ceci est justifié par le déplacement des parois de Bloch qui n'est pas instantané, et qui se ne présente plus un retour à la situation initial, mais il se fait d'une manière à avoir une induction non nulle lors désaimantation dite induction rémanente [6]. Sa valeur dans les matériaux ferromagnétiques de type doux est assez petite.

II.2.3. Effet de flux rémanent

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

$$\varphi(t) = \left[\frac{u\sqrt{2}}{n\omega} \right] \cos(\omega t + \alpha) + [\varphi_r - (u\sqrt{2})/n\omega \cos(\alpha)] e^{-t/\tau} \quad (\text{II.3})$$

$$\tau = L / R.$$

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 [3].

- ❖ Si $\varphi_r = \varphi_{max}$ et $\alpha = 0$ sont remplacées dans l'équation (II.3), l'expression de flux devient sous l'expression suivante, en entraînant un appel de courant important. Alors ce cas est défavorable.

$$\varphi(t) = \left[\frac{u\sqrt{2}}{n\omega} \right] \cos(\omega t) + [\varphi_r \max - (u\sqrt{2})/n\omega] e^{-t/\tau} \quad (\text{II.4})$$

- ❖ Si $\varphi_r = 0$ et $\alpha = \pi/2$ sont remplacées dans l'équation (II.3) comme c'est montré ci-dessous, il n'aura plus de phénomènes transitoires qui va apparaître.

$$\varphi(t) = (u\sqrt{2})/[n\omega \cos(\omega t + \pi/2)] \quad (\text{II.5})$$

II.2.4. Identification de flux rémanent

Les transformateurs peuvent être réenclenchés suite au déclenchement provenant de différentes sources (foudre, isolation, protection) [4]. Cette remise sous tension peut s'accompagner d'un courant d'appel provoqué par la valeur de flux rémanent. Cette dernière se calcule en utilisant des méthodes dans différentes conditions.

- Méthode directe qui se base sur l'intégral de la tension lors la mise sous tension de transformateur.
- Méthode indirecte qui est réalisée lors la mise hors tension de transformateur.
- Méthode qui s'appuie sur l'analyse de courant d'appel lors la remise sous tension de transformateur.

II.2.5. 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.

Les figures ci-dessous représentent respectivement le circuit utilisé pour l'étudié associé avec un schéma du bloc explicatif, ainsi les résultats obtenus dans les deux régimes.

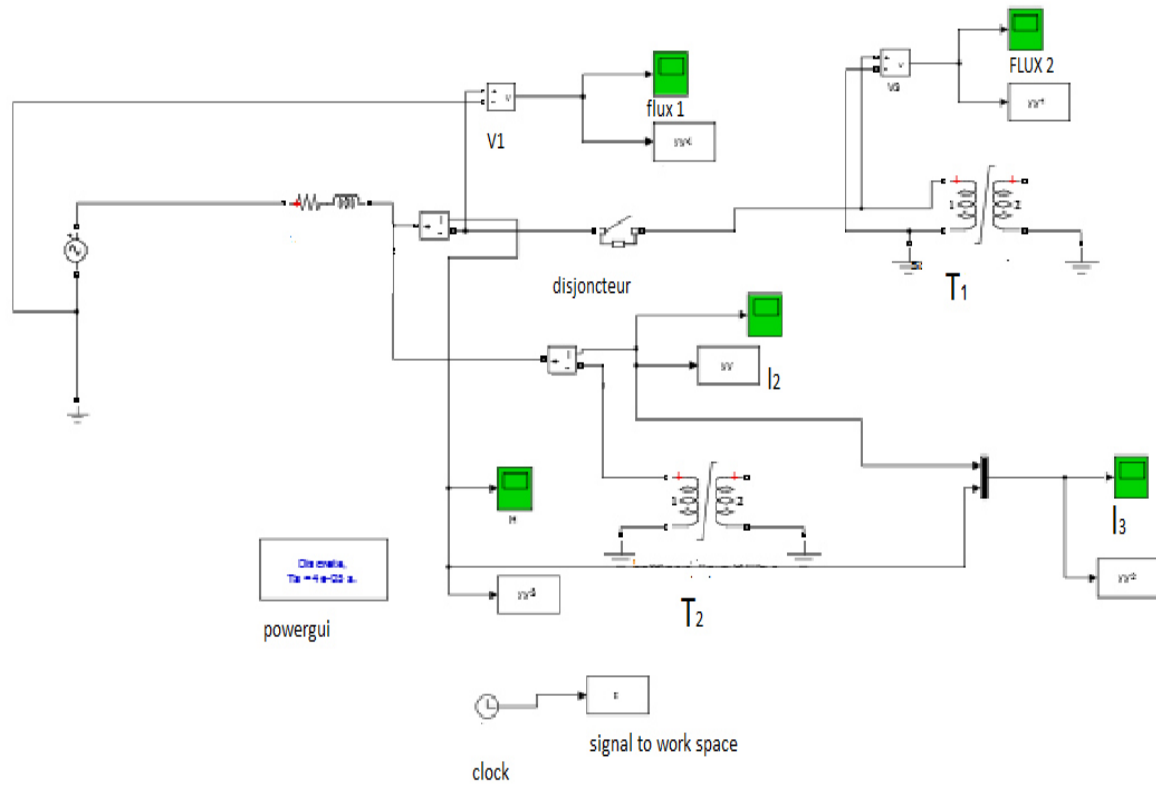


Figure II.1: Circuit de simulation utilisé dans l'étude .

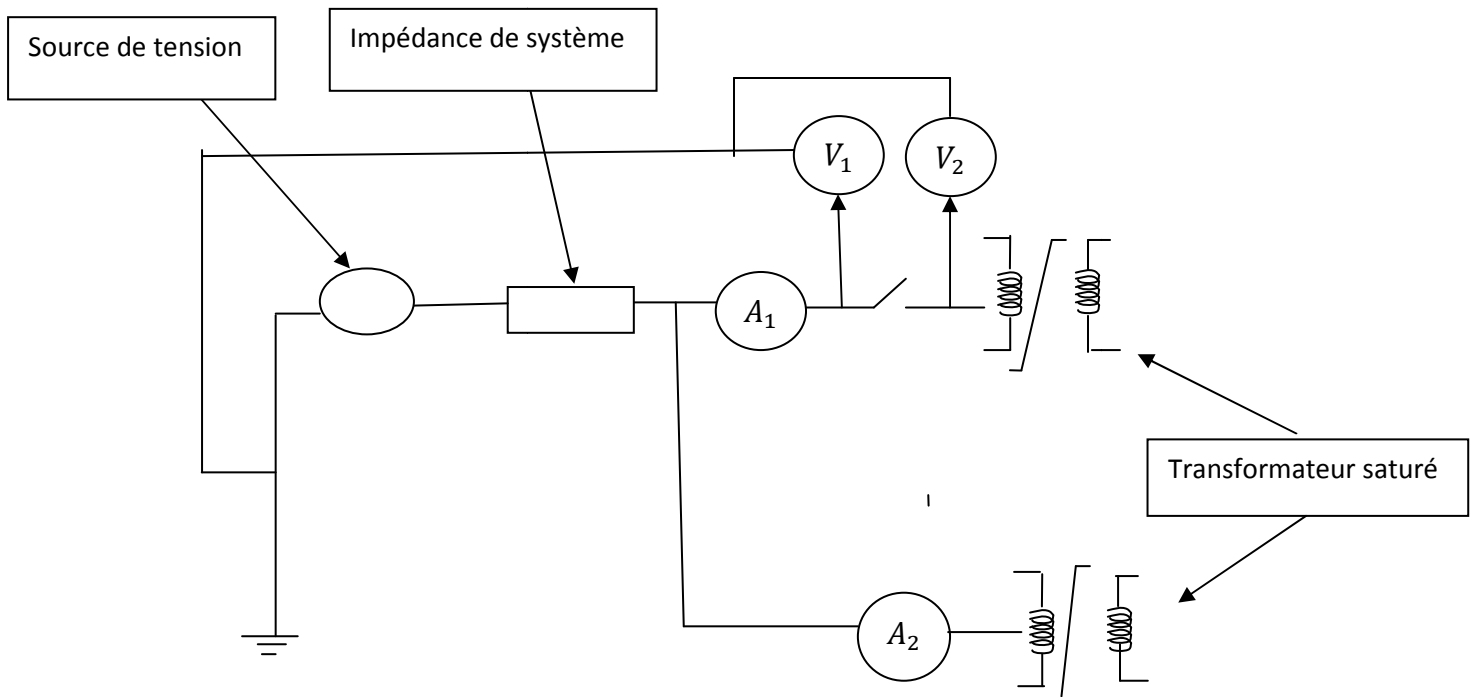


Figure II.2: Schéma du bloc explicatif.

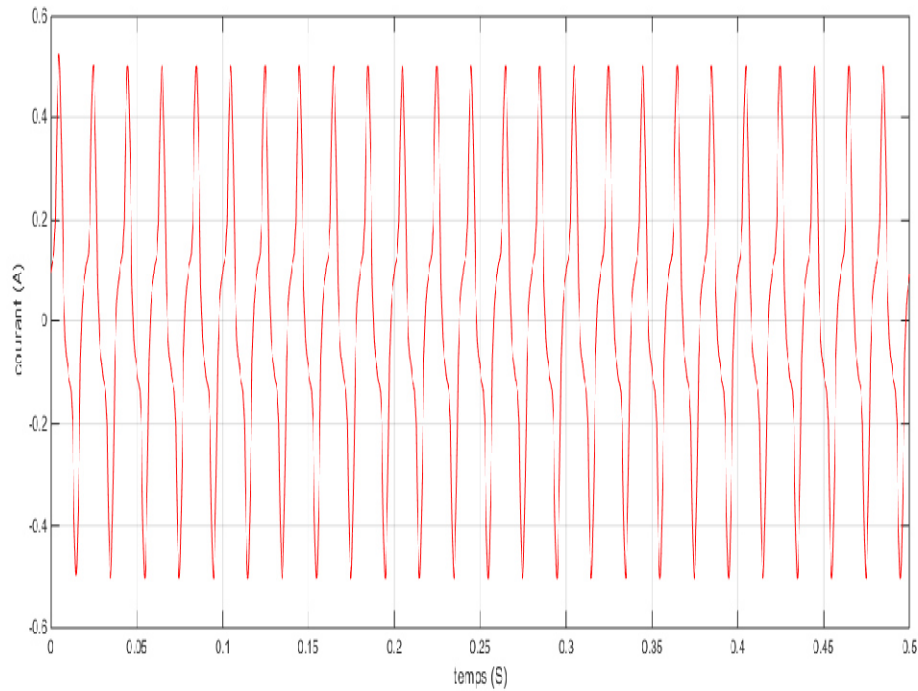


Figure II.3 : Forme de courant magnétisant dans la zone linéaire.

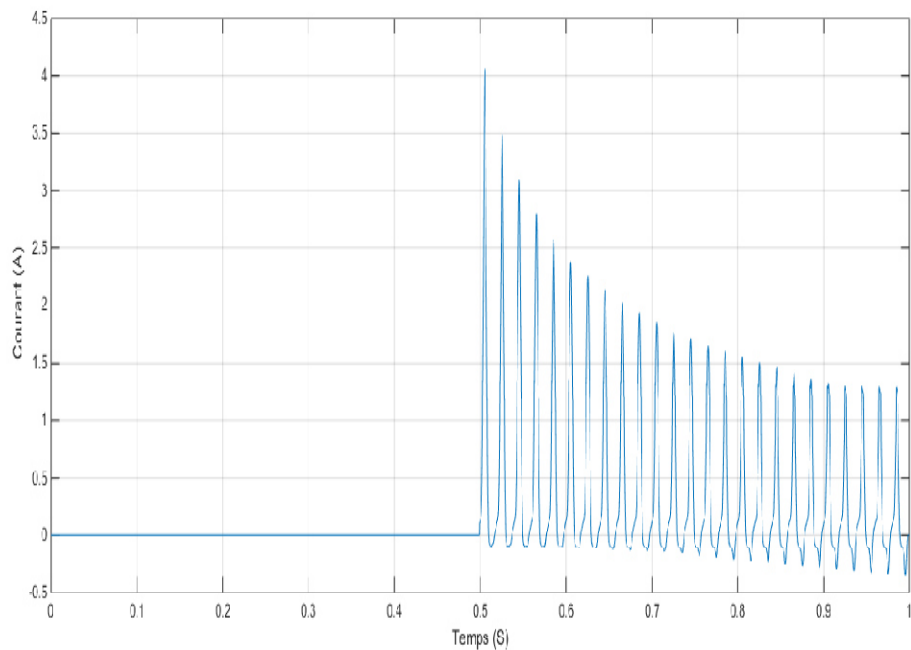


Figure II.4 : Forme de courant d'appel lors la mise sous tension du transformateur.

Les facteurs qui influencent sur l'amplitude et la durée de courant magnétisant sont multiples :

- 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 total du circuit d'alimentation.

II.2.6. Apparition de courant d'appel

Le courant d'appel est causé par la saturation d'un transformateur de puissance en raison des variations de la tension magnétisante [5]. 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 de flux de saturation.

Lors de la saturation du noyau de fer, il y a un dépassement de flux qui sera constaté, correspond à l'existence de valeur de flux rémanent. Ceux qui produisent une augmentation très élevée du courant magnétisant manifestée par son premier pic comme c'est montré dans les figures ci-dessous respectivement.

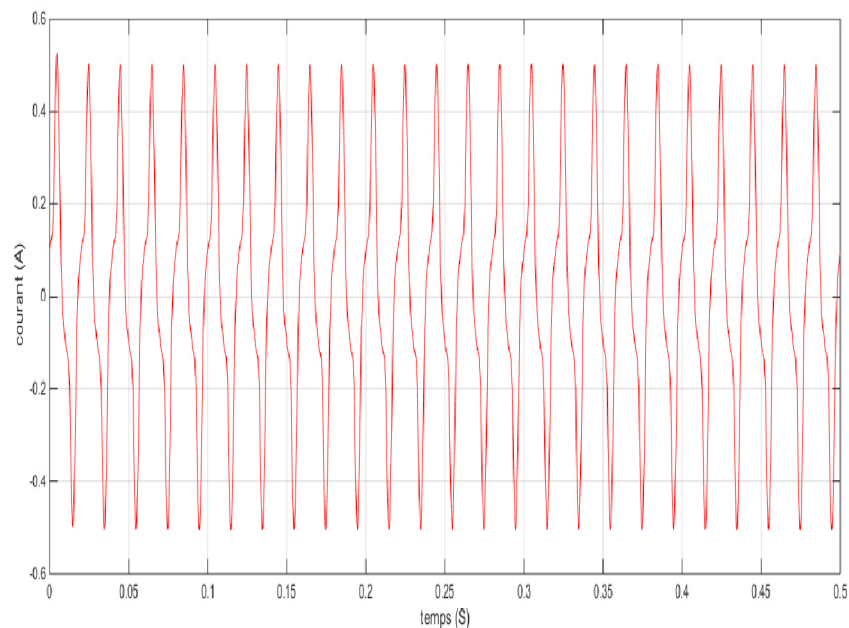


Figure II.5 : Le courant magnétisant dans le régime linéaire.

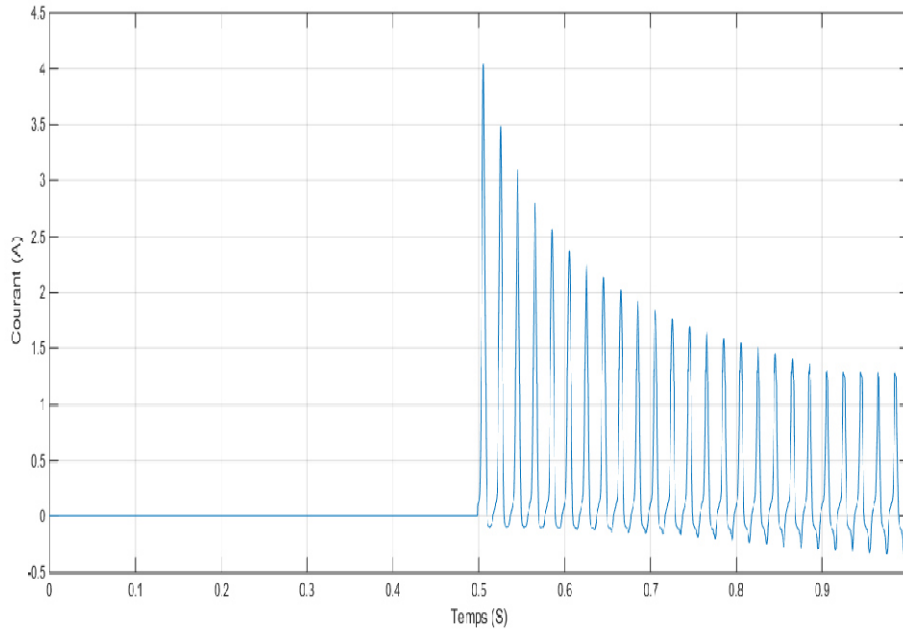


Figure II.6: Le courant magnétisant dans le régime transitoire.

II.2.7.. Effet de l'impédance du système

L'apparition de courant d'appel dans un transformateur à vide lors de la remise aléatoire en service du transformateur est représentée sur les figures suivantes pour des valeurs différentes du résistance .On remarque que l'augmentation de la valeur de résistance de système provoque une réduction de valeur de courant d'appel notamment celle de l'amplitude du pic initiale .

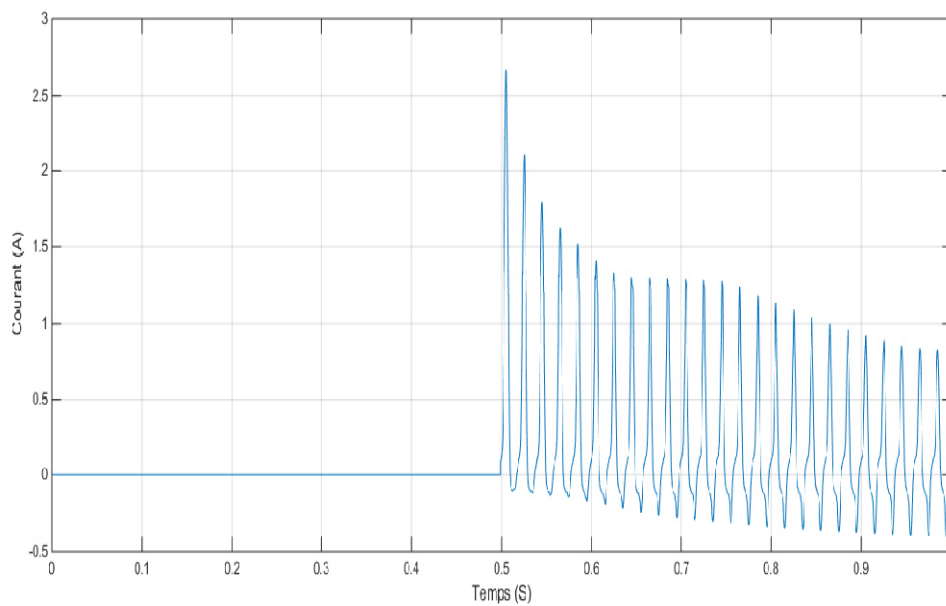


Figure II.7 : Apparition de courant d'appel pour R=6Ω.

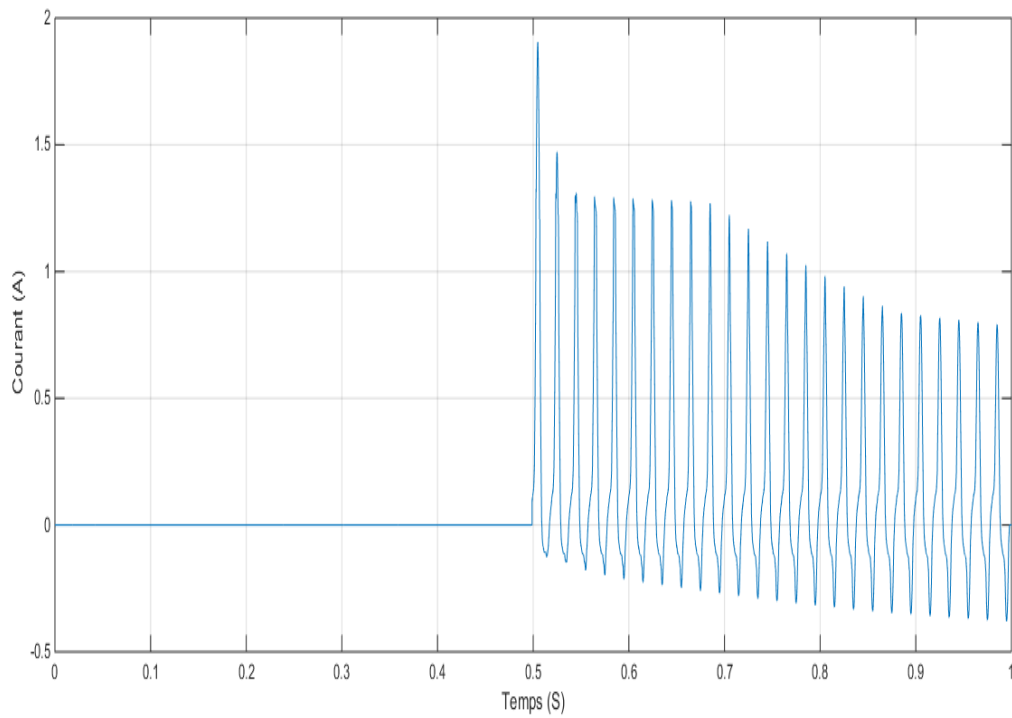


Figure II.8 : Apparition de courant d'appel pour $R=25\Omega$.

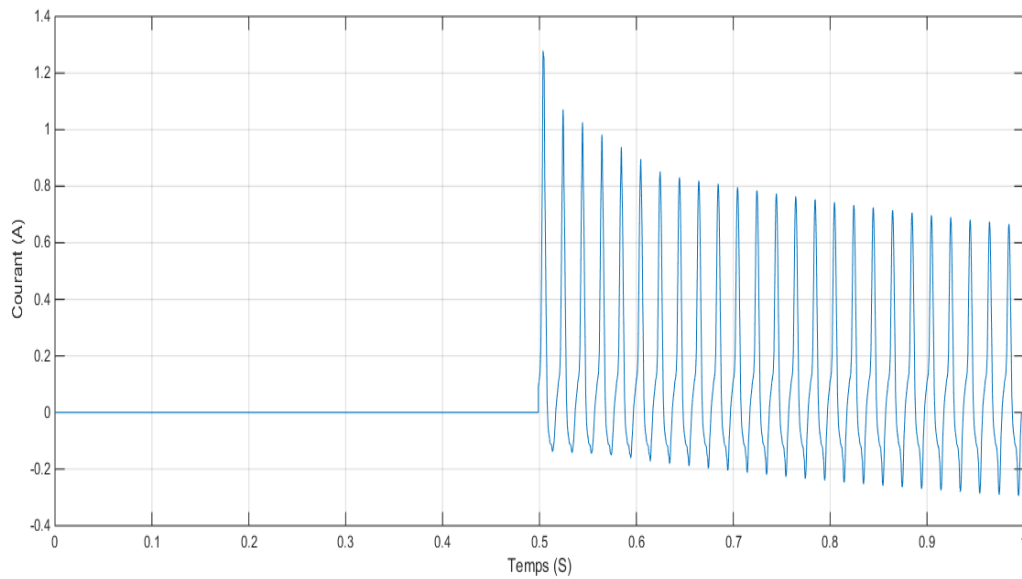


Figure II.9 : Apparition de courant d'appel pour $R=80\Omega$.

II.2.8. 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 par exemple :

- Les contraintes mécaniques comme le transformateur peut subir des déplacements des bobines.
- Dégradation accélérée du transformateur provoquée par des efforts électromagnétiques importantes au niveau du bobinages [15].
- Le fonctionnement involontaire de système du relais de protection [16].
- Apparition de courant sympathique dans les cas des transformateurs en parallèle.

II.2.9. Réduction de courant d'appel

Pour avoir une bonne qualité d'énergie électrique transportée ou consommée, il y a plusieurs techniques qui consistent à réduire le courant d'appel dont on cite par exemple :

- Utilisation des résistances et des inductances de pré-insertion à l'ouverture et surtout à la fermeture des disjoncteurs HT [2].
- 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.
- Les constructeurs des transformateurs peuvent adapter des solutions pour la réduction, par exemple l'insertion des intervalles d'air dans le circuit magnétique du noyau pour réduire la perméabilité magnétique du noyau de fer [17].
- 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 [18].
- Faire une meilleure planification possible par les exploitants des réseaux électriques qui doivent prendre en compte la valeur de flux rémanent qui peut y avoir lieu pour éviter le plus possible tout type de déformation.
- 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.3. Courant sympathique

II.3.1. Transformateurs connectés en parallèle

Les transformateurs de puissance branchés en parallèle, dans un circuit électrique, avec un autre qui est déjà mis sous tension peuvent provoquer un phénomène transitoire dit courant sympathique lors de commutation aléatoire. L'étude de ce phénomène est faite en réalisant la configuration parallèle

ci-dessous montrée dans la figure II.9. La source d'alimentation alimente un jeu de barre B, ou se connecte en parallèle deux transformateurs identiques à vide.

Le transformateur T_2 est mis sous tension pouvant rencontrer une saturation inattendue, qui exige des courants magnétiques de grande amplitude. Le disjoncteur assure l'excitation de transformateur T_1 après la mise sous tension de T_2 .

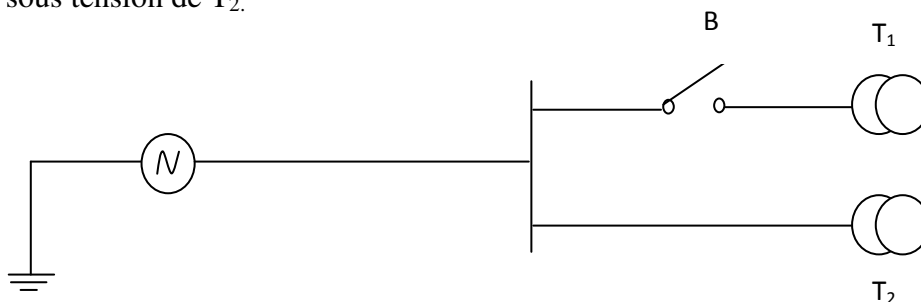


Figure II.10 : Système considéré pour l'étude de courant sympathique.

II.3.2. Apparition de courant sympathique

Les deux transformateurs sont alimentés par la même source de tension, mais l'un d'après l'autre. Ceci provoque deux types de décalage de flux qui assurent une saturation de T_2 pendant les demi-cycles positifs et celle de T_1 pendant les demi-cycles négatifs du flux stationnaire.

II.3.3. Interaction sympathique entre les transformateurs

Dans un réseau d'alimentation qui contient des transformateurs connectés en parallèle, le transformateur qui est déjà mis sous tension peut rencontrer une saturation inattendue pendant le transitoire d'appel d'autre transformateur entrant. Cette saturation exige des courants magnétiques de grande amplitude, et donc l'apparition de courant d'appel sympathique.

II.3.4. Réduction de l'interaction sympathique

Pour réduire l'interaction sympathique entre les transformateurs, il faut réduire le courant d'appel et/ou augmenter la résistance de système. Ceci est justifié de fait que la saturation du transformateur déjà mis sous tension est établie par une chute de tension asymétrique à travers la résistance du système provoquée par le courant d'appel généré dans le transformateur entrant.

II.3.5. Facteurs influençant sur le phénomène sympathique

II.3.5.1. Effet de la résistance du système

L'augmentation de la résistance du système influence sur le courant d'appel ainsi sur le courant sympathique d'une manière à les réduire. C'est une réduction justifiée par la réduction des pics initiaux de courant d'appel générés dans le transformateur T_1 .

II.3.5.2. Effet de flux résiduel

La mise sous tension impose deux cas différents dont le flux virtuel dans le circuit magnétique est soit identique ou opposé au flux rémanent. C'est le deuxième cas qui présente un risque dont le flux prend des valeurs très élevées qui font apparaître le courant d'appel. L'augmentation de valeur de flux rémanent croît l'amplitude de la valeur pic de courant d'appel.

II.4. Conclusion

Les commutations sont fréquentes en particulier dans les zones de distribution d'énergie électrique où se trouvent plusieurs transformateurs branchés en parallèle. Elles provoquent des surintensités transitoires qui sont le courant d'appel et le courant sympathique. Elles les affectent d'une manière à influencer sur la qualité d'énergie électrique et sur leur fonctionnement adéquat.

Les techniques de limitation de ces phénomènes sont multiples, chacune avec ses propres avantages et inconvénients. Mais celle la plus répandue doit prendre en considération le coût et la facilité de mise en œuvre par rapport à la taille du transformateur et à l'évaluation de l'impact sur le client.

Chapitre III

Détermination des paramètres d'un transformateur

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons déterminer les différents paramètres série et parallèle d'un transformateur en essai à vide et en court circuit en utilisant soit les différents essais dans laboratoire à travers des montages électriques ou bien des circuits de simulation réalisés sous MATLAB. Ces essais permettent essentiellement de déterminer les pertes fer qui sont représentés en deux types : perte par hystérésis ou perte par courant de Foucault.

III.2. Partie expérimental

III.2.1. Matériel utilisé

Les montages sont réalisés en utilisant le matériel suivant :

- Source d'alimentation alternative.
- Appareils de mesure (Voltmètre, Ampèremètre, Wattmètre).
- Câbles de raccordement.
- Transformateur monophasé qui contient une déclaration des valeurs suivantes sur sa 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 est de valeur de 50 HZ.

D'après ces valeurs citées précédemment, on peut calculer le courant primaire nominal et le courant secondaire nominal de telle manière :

$$I_{1n} = \frac{S_n}{v_{1n}} = 9.1 \text{ A} .$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{v_{2n}} = 4.54 \text{ A} .$$

ROZZANO-MI-ITALIE DE LORENZO			
transformateur 1 phasé			
type	DL 2 093	n°	89137-1
an	1992		
refroid.	AN/TROP	e	-6,2%
puissance	2 KVA	frequence	50 HZ
tension	220-440 / 25-50V / FASE P-S		
courants	- 9,1-4,54 / 80-40A / FASE P-S		
classe	F	c.n.i.	NORM

Figure III.1 : Plaque signalitique d'un transformateur monophasé.

III.2.2. Procédé d'identification des paramètres de transformateur

III.2.2.1. Essai à vide sous tension nominale

L'objectif de cet essai est de déterminer le rapport de transformation du transformateur et la valeur de pertes fer en déterminant la résistance R_{μ} , ainsi la valeur de la réactance magnétisante X_{μ} . Pour cela, comme c'est montré dans les figures ci-dessous, on utilise les appareils de mesure comme suit :

- Les deux voltmètres pour mesurer les deux tensions nominales primaire et secondaire.
- L'ampèremètre pour mesurer le courant magnétisant I_{μ} .
- Le wattmètre à fin de déterminer la puissance primaire.



Figure III.2 : montage d'un essai à vide d'un transformateur monophasé.

III.2.2.1.1 Valeurs de mesure

Ce tableau contient les résultats de la mesure effectuée.

Tableau III.1 : Résultats de l'essai à vide.

Grandeurs	$V_{10}(V)$	$V_{20}(V)$	$P_{10}(W)$	$\cos \varphi_{10}$	$I_{10}(mA)$
Mesure	220	25	17	0.2	0.369

III.2.2.1.2 Calcule

Celui qui parle des calcules à demander, il parle souvent de calcule de facteur de puissance ($\cos \alpha$) et celui des composantes de la branche magnétisante (R_m et X_m).

$$\text{Nous avons :} \quad S = P_{10} + j \varphi_{10} . \quad (\text{III.1})$$

$$P_{10} = p_{\text{fer}} . \quad (\text{III.2})$$

$$P_{10} = V_{10} I_{10} \cos \alpha . \quad (\text{III.3})$$

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

$$I_{10} = I_{10a} + j I_{10r} . \quad (\text{III.5})$$

$$I_{10a} = I_{10} \cos \alpha . \quad (\text{III.6})$$

$$I_{10r} = I_{10} \sin \alpha . \quad (\text{III.7})$$

$$V_{10} = R_m I_{10a} . \quad (\text{III.8})$$

$$V_{10} = X_m I_{10r} . \quad (\text{III.9})$$

A.N:

$$\cos \alpha = \frac{17}{220 \cdot 0.369} .$$

$$\cos \alpha = 0.209 .$$

$$R_m = 2847.05 \Omega .$$

$$X_m = 609.72 \Omega .$$

III.2.2.2. Essai en court-circuit à courant secondaire nominal sous tension réduite

Le transformateur dans ce type d'essai est à vide dont son secondaire est mis en court-circuit. On l'alimente sous une tension réduite pour se placer au régime nominal de courant au secondaire. La figure suivante nous montre le montage réalisé dans laboratoire, dont les grandeurs sont mesurées de telle manière :

- Le voltmètre assure la mesure de la tension primaire en court-circuit.
- Le wattmètre assure la mesure de la puissance primaire.
- L'un des deux ampèremètres sert essentiellement à contrôler le courant dans le wattmètre (A_1) et l'autre sert à mesurer le courant secondaire en court-circuit.



Figure III.3 :Montage réalisé en essai en court-circuit.

III.2.2.2.1 Mesure

Le tableau suivant est rempli par des valeurs obtenues d'utilisation des appareils de mesure.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai en court-circuit.

Grandeurs mesurées	V_{1cc} (V)	I_{1cc} (A)	P_{1cc} (W)	I_{2cc} (A)
Valeurs	22	9.1	87	5

III.2.2.2. Identification des paramètres

L'identification des valeurs de résistance et de réactance des enroulements primaires et secondaires se fait de telle façon :

$$R_{eq1} = 3.48 \ \Omega.$$

$$R_1 = \frac{R_{eq1}}{2} = \frac{3.48}{2}.$$

$$R_1 = 1.74 \Omega.$$

$$R_2 = m^2 R_1.$$

$$R_2 = (0.11364).$$

$$X_1 = \frac{Z_{eq}}{2} = \frac{2.69248}{2}.$$

$$X_1 = 1.34624 \ \Omega.$$

$$X_2 = L_2 \ \omega.$$

$$X_2 = \sqrt{(m Z_{1eq})^2 - R_2^2}.$$

D'après la loi d'Ohm

$$V_{1cc} = Z_{eq1} I_{1cc}.$$

$$Z_{eq1} = \frac{22}{9.1}.$$

$$Z_{eq1} = 2.41 \ \Omega.$$

$$X_2 = 0.0178 \ \Omega.$$

III.3. Simulation

Maintenant on passe à étudier les deux essais précédents en utilisant des circuits de simulation.

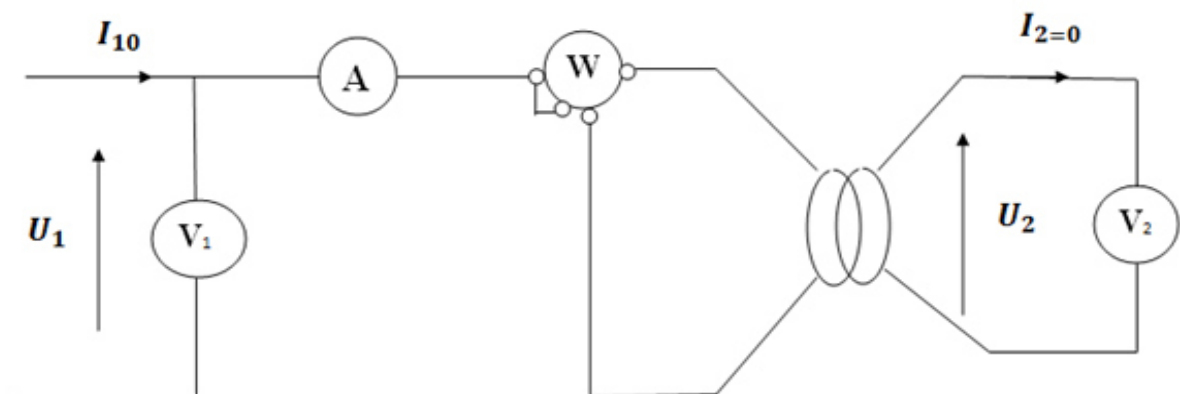


Figure III.4 : Montage explicatif du circuit de simulation réalisé à vide.

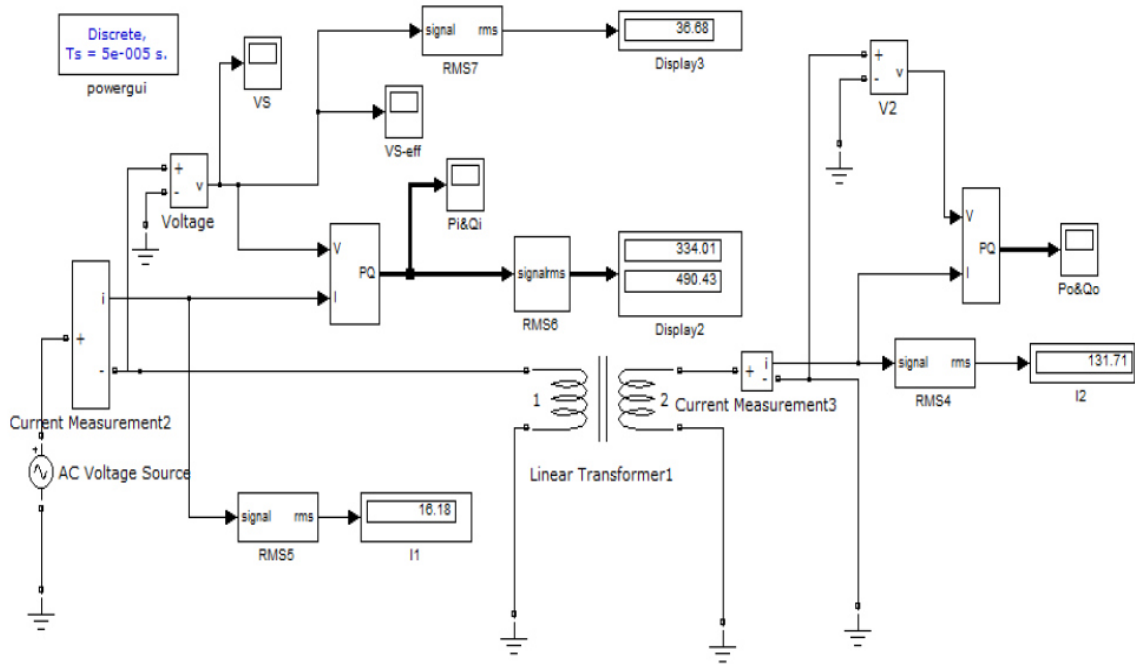


Figure III.5 : Circuit de simulation utilisé pour l'essai à vide.

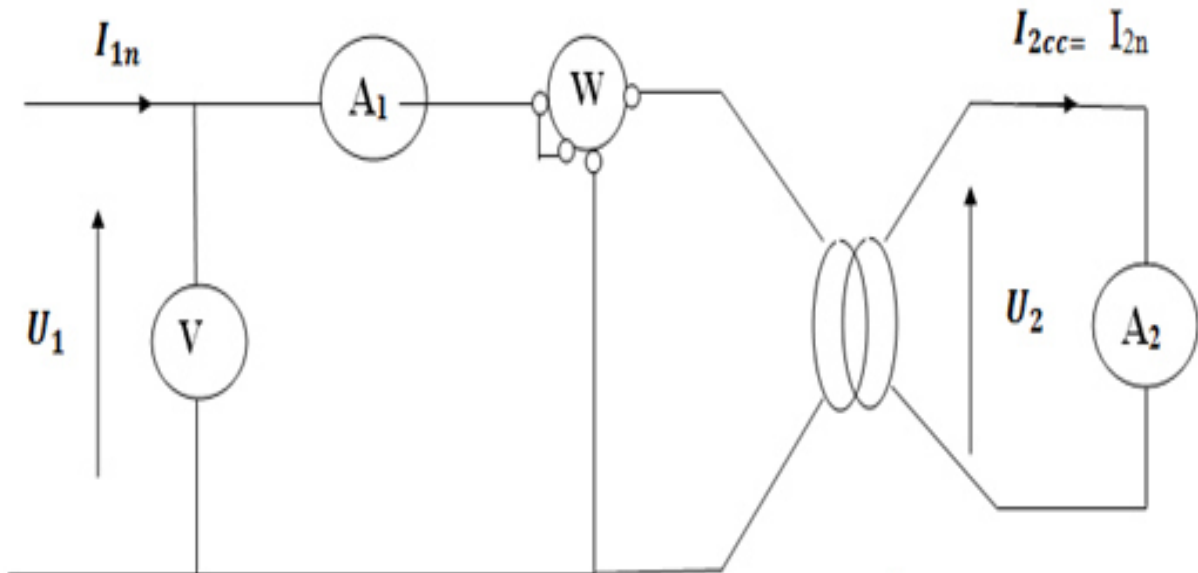


Figure III.6 : Montage explicatif du circuit de simulation réalisé en court-circuit.

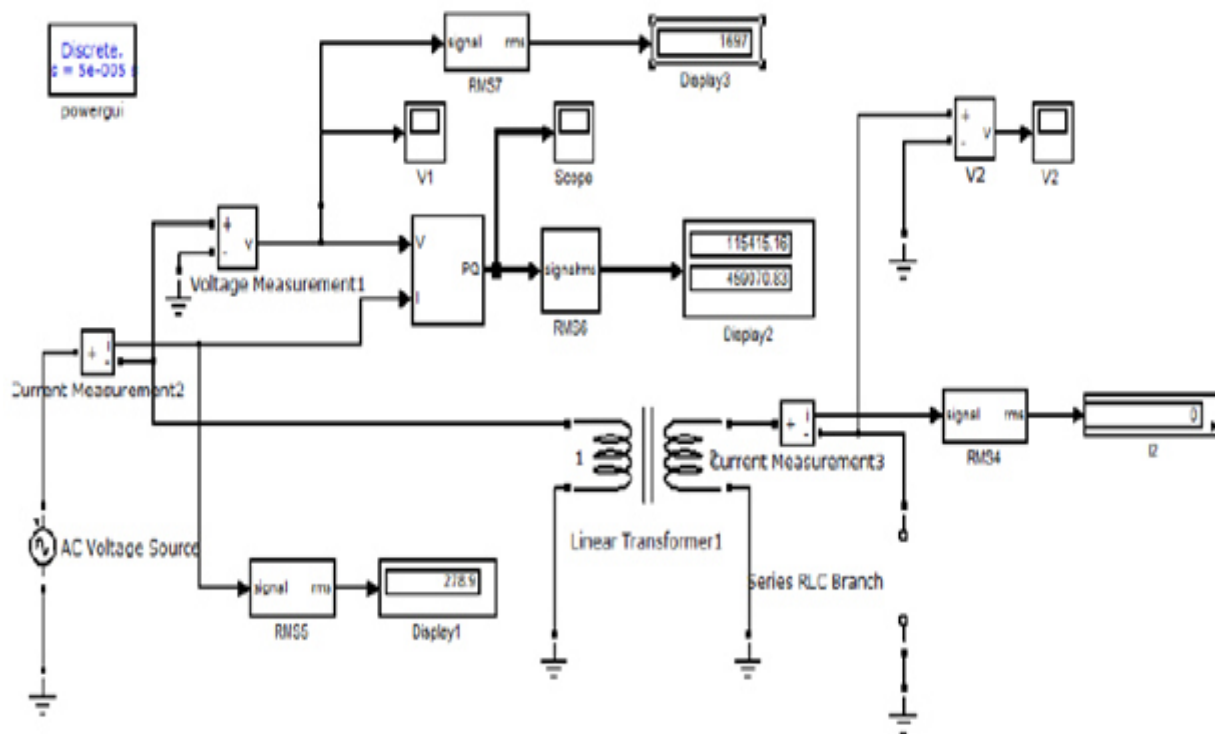


Figure III.7 : Circuit de simulation utilisé pour étudier le cas de court-circuit.

III.4. Modèle du noyau (Caractéristique flux-courant)

Cette figure représente caractéristique flux-courant qui représente l'inductance de saturation (L_m modèle de la figure I.9) de transformateur étudié.

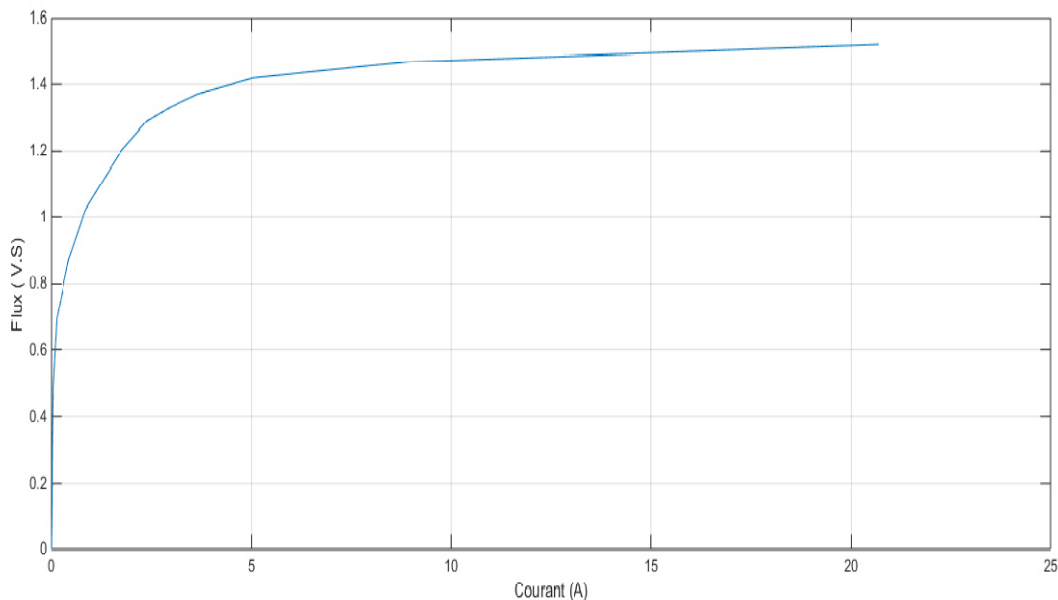


Figure III.8 : Courbe de saturation du transformateur.

III. 5.CONCLUSION

Cette partie décrit les procédés expérimentaux que nous avons utilisés pour calculer les valeurs des paramètres du transformateur utilisé dans notre étude. Elles sont représentées sous l'essai à vide et l'essai en court-circuit. Dans le premier essai la valeur de courant magnétisant obtenu de la mesure est très faible (0,369). Par conséquent les pertes joule sont très faibles d'une manière à obtenir la valeur de la puissance primaire à vide égale uniquement à la valeur des pertes fer. Ceci permet de calculer la résistance magnétisante et l'inductance magnétisante selon les équations précédentes.

Dans l'essai en court-circuit, d'après les résultats de la mesure, on remarque que la tension primaire est d'une valeur très faible (22 V), alors les pertes fer seront très faible de fait qu'elles dépendent essentiellement de champ magnétique, donc de la tension primaire et de la fréquence. Alors cette procédure nous permet de calculer les valeurs des résistances primaires et secondaires, ainsi des inductances primaires et secondaires.

Chapitre IV

Réduction de courant d'appel sympathique

IV.1. Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à étudier la commutation contrôlée qui traduit un outil de contrôle lors des variations brusques d'alimentation. Ces dernières sont imposées par l'ouverture et la fermeture non contrôlée de l'organe de coupure qui est le disjoncteur. Il faut s'appuyer sur le bon choix d'instant d'enclenchement et de ré-enclenchement, ainsi sur la forme d'onde de tension ponctuelle. Tout d'abord, nous avons présenté les montages réalisés dans laboratoire pour mesurer le courant d'appel sympathique. Puis on s'approfondit l'étude d'une manière à étudier la commutation contrôlée associée d'une stratégie de mesure de contrôle et de flux pour réduire le courant sympathique.

IV.2. Etude de mode opératoire

IV.2.1. Matériel utilisé dans laboratoire

- Une source de tension alternative de 220 V.
- Deux transformateurs de 2 KVA.
- Capteur de courant pour mesurer les signaux de courant.
- Une sonde de tension pour assurer la mesure de tension appliquée.
- Un oscilloscope numérique qui permet l'acqise des signaux simultanément.
- Une carte d'acquisition de donnée dSPACE 1104 .
- Logiciel expérimental dSPACE dans l'environnement MATLAB.

IV.2.2. Montage réalisé

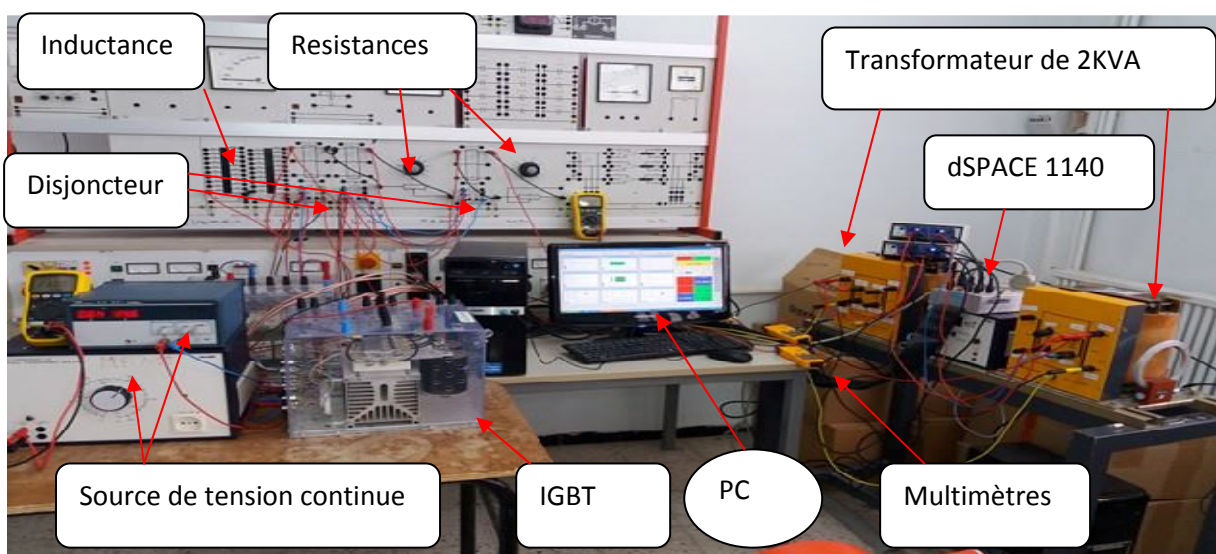


Figure IV.1 : Photo du montage réalisé dans le laboratoire.

L'utilisation des matériels cités précédemment se fait de la manière montrée dans la figure ci-dessus. La source de tension de 220 V alimente les deux transformateurs qui sont à vide et connectés en parallèle. Chacun est associé par un appareil de mesure. La source de tension continue alimente le disjoncteur par 24 V et celle de 15 V alimente l'IGBT. La tension appliquée aux transformateurs et les signaux de courant sont mesurés par des appareils de mesure, et sont acquis simultanément par l'oscilloscope numérique et la carte d'acquisition de données (entre les deux transformateurs). Dans l'environnement MATLAB dans le PC il existe un logiciel expérimental pour faire stocker, contrôler et analyser l'acquisition de données. La figure IV.2 représente l'interface utilisée sous logiciel ControlDesk qui fonctionne avec le système d'acquisition puis elle permet de visualiser toutes les données à mesurer, et aussi de donner des différentes commandes.

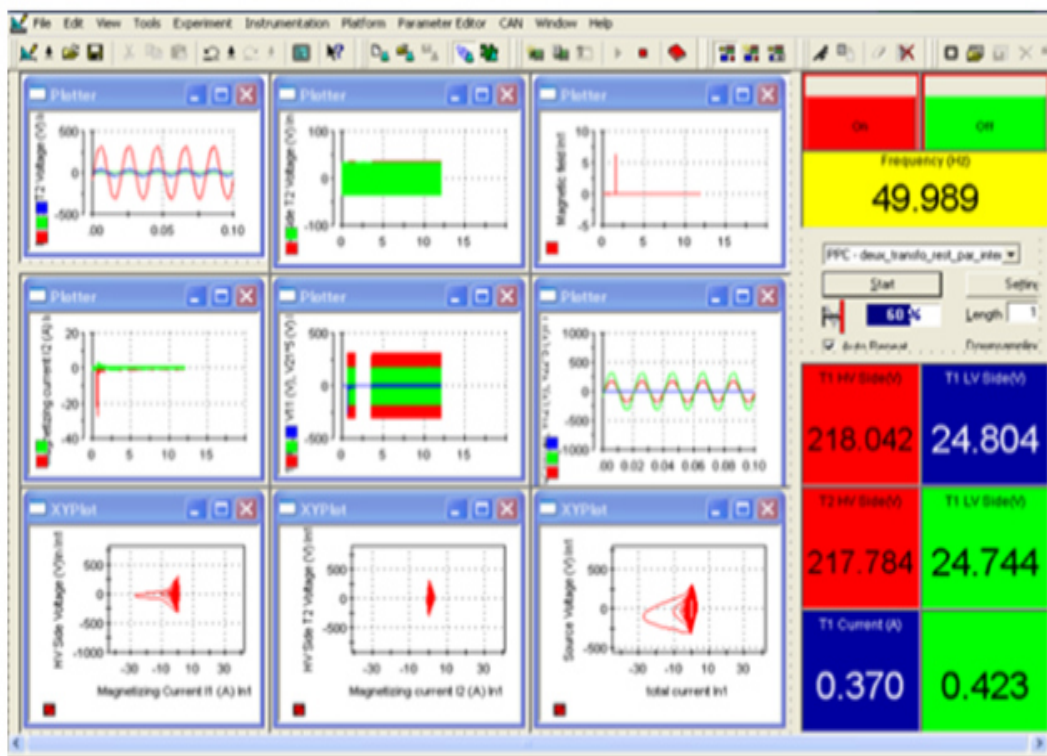


Figure IV.2 : Interface du système d'acquisition de données (ControlDesk).

IV.3. Commutation aléatoire

Les transformateurs de puissance dans un réseau électrique notamment celui de distribution sont branchés en parallèle. Pour des raisons de protection chacun est utilisé avec un disjoncteur en amont et en aval. La remise aléatoire sous tension d'un transformateur de puissance à vide en plusieurs fois va provoquer une augmentation des valeurs crêtes des courants sympathiques. Ceux-ci provoquent un danger pour l'appareillage.

Les figures suivantes nous montre les résultats obtenus par la mesure et par la simulation de courant d'appel et de courant sympathique dans le cas aléatoire.

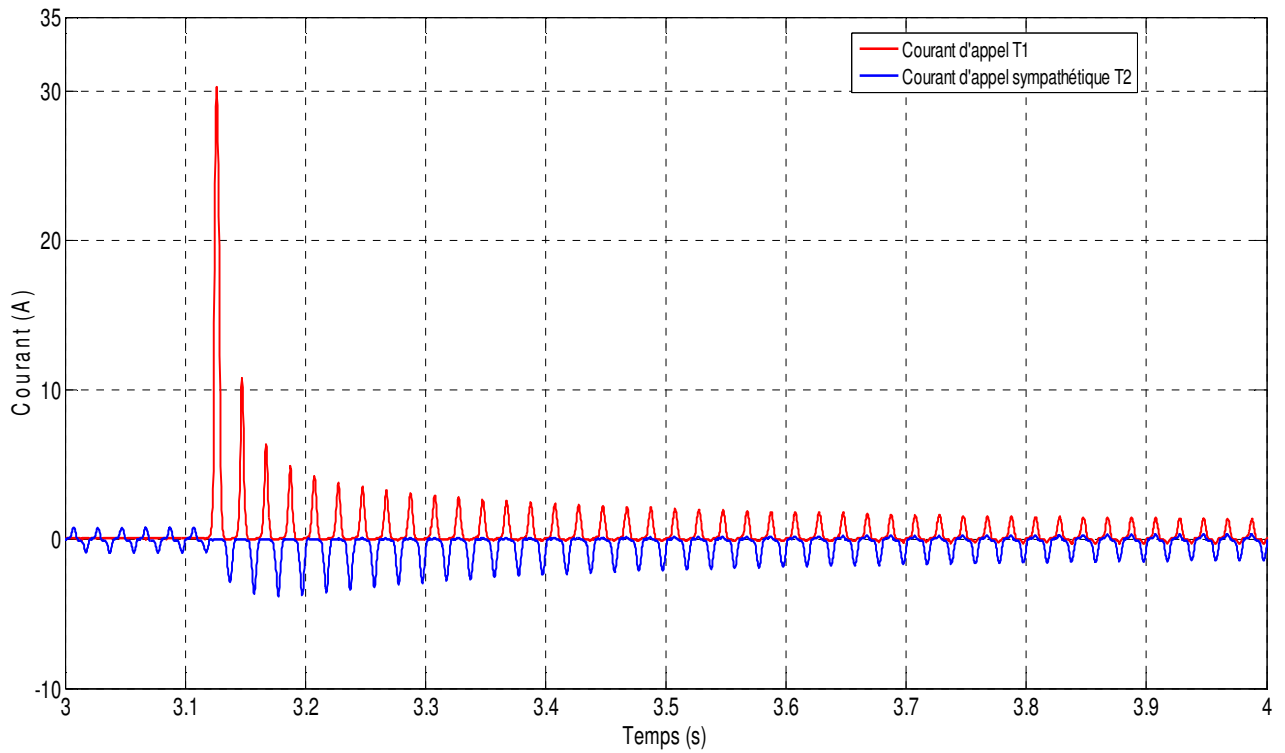


Figure IV.3 : Résultat obtenu par la mesure.

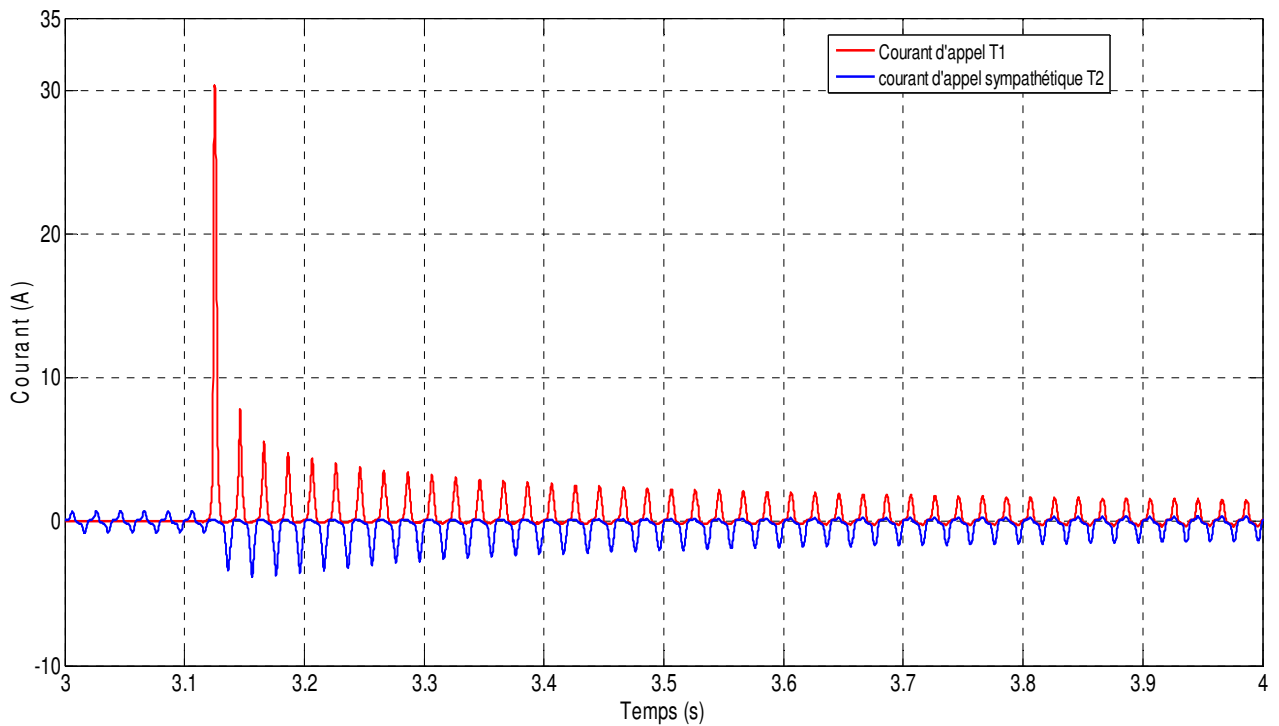


Figure IV.4 : Résultat obtenu par la simulation.

Les deux figures sont presque identiques, ce qui valide le modèle du transformateur utilisé. Dans chaque figure il y a deux allures, celle qui est en rouge représente le courant d'appel qui va apparaître dans le transformateur T_1 , et l'autre qui est en bleu traduit le courant d'appel sympathique dans le transformateur T_2 . Suivant les variations de ces phénomènes de surintensités transitoires pendant cette période, on observe deux parties différentes :

- Dans la première partie l'intensité de courant d'appel est nulle car le disjoncteur n'était pas encore fermé. Mais le courant d'appel sympathique existe sous une forme non sinusoïdale de valeur maximale assez petite. C'est le courant magnétisant obtenu par la mise sous tension du transformateur T_2 à vide.
- Dans la deuxième partie il y a une apparition de courant d'appel et de courant sympathique. La première est traduite par une apparition brusquement d'une valeur pic très élevée, justifiée par la saturation du transformateur T_1 à cause de la fermeture aléatoire du disjoncteur. Il y a aussi une apparition de courant sympathique qui est produite par le courant d'appel. Les deux phénomènes vont s'amortir durant quelques secondes.

IV.4. Commutation contrôlée

IV.4.1. Procédure de la commutation contrôlée

Nous avons deux transformateurs connectés en parallèle dont l'un est déjà mis sous tension (T_2) et l'autre est associé par un disjoncteur en amont. Le disjoncteur se ferme aléatoirement et reste fermé durant une période puis il s'ouvre d'une manière non vérifiée. La remise sous tension contrôlée prochaine prendra en compte les données de l'ouverture précédente et le point d'onde de tension du transformateur en primaire.

IV.4.2. Définition de la commutation contrôlée

La mise sous tension d'un transformateur monophasé à vide signifie que le circuit primaire est alimenté par une tension appliquée dont la variation de flux couplé avec n_1 spires y induit une tension comme suit :

$$V(t) = V_{max} \sin(\omega t) \quad (IV.1)$$

$$V(t) = n_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (IV.2)$$

$$V(t) = V_{max} \sin(\omega t) = n_1 \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (IV.3)$$

λ : est le flux totalisé crié au niveau de primaire.

$$V(t) = V_{max} \sin(\omega t) = \frac{d\lambda}{dt} \quad (IV.4)$$

$$\int \frac{d\lambda}{dt} = \int V_{max} \sin(\omega t) dt \quad (IV.5)$$

$$\lambda = \frac{V_{max}}{\omega} (-\cos(\omega t) + k) \quad (IV.6)$$

$$\begin{cases} \lambda = -\frac{V_{max}}{\omega} \cos(\omega t) + k \\ \lambda = \lambda_{max} (-\cos(\omega t) + k) \end{cases} \quad (IV.7)$$

$$\begin{cases} \lambda = -\frac{V_{max}}{\omega} \cos(\omega t) + k \\ \lambda = -\lambda_{max} \cos(\omega t) + k \end{cases} \quad (IV.8)$$

On suppose que à l'instant de fermeture, il existe une valeur de flux rémanent (flux résiduel)

$$\lambda_r = -V_{max} \cos(\omega t_{cf-opt}) + k \quad (IV.9)$$

Pour déterminer la valeur de k :

$$V_1(t) = V_{max} \sin(\omega t) = n_1 \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} = -e \quad (IV.10)$$

$$V_1(t) = V_{max} \sin(\omega t) = \frac{d\lambda}{dt} \quad (IV.11)$$

$$V_{max} \sin(\omega t) = \frac{d\lambda}{dt} \quad (IV.12)$$

$$\int \frac{d\lambda}{dt} = \int V_{max} \sin(\omega t) dt \quad (IV.13)$$

$$\lambda(t) = V_{max} \int \sin(\omega t) dt \quad (IV.14)$$

$$\lambda(t) = V_{max} \frac{1}{\omega} (-\cos(\omega t)) + k \quad (IV.15)$$

$$\begin{cases} \lambda(t) = -\frac{V_{max}}{\omega} \cos(\omega t) + k \\ \lambda(t) = -\lambda_{max} \cos(\omega t) + k \end{cases} \quad (IV.16)$$

$$\lambda_r = -\frac{V_{max}}{\omega} \cos(\omega t_{f-opt}) + k \quad (IV.17)$$

Pour déterminer la constante k, on considère que la valeur de flux rémanent reste invariable.

$$\lambda_r = \frac{-V_{max}}{\omega} \cos(\omega t_{f-op}) + k. \quad (IV.18)$$

$$k = \lambda_r + \frac{V_{max}}{\omega} \cos(\omega t_{f-op}). \quad (IV.19)$$

$$\lambda(t) = \frac{-V_{max}}{\omega} \cos(\omega t) + k . \tag{IV.20}$$

$$\lambda(t) = \frac{-V_{max}}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{V_{max}}{\omega} \cos(\omega t_{f-op}) + \lambda_r \tag{IV.21}$$

Si la valeur de flux totale créée s'ajoute avec la valeur de flux rémanent, le flux global dépassera la valeur de flux maximal correspondant au régime permanent. Ce dépassement de flux induit une augmentation de courant magnétisant et donc le courant d'appel va apparaître.

Pour éliminer le courant d'appel magnétisant, il faut que le flux rémanent et le flux de liaison soit compensé de sorte que le flux total égale au flux total en régime permanent.

$$\text{Si : } \lambda_r < 0 : t_{opt} = -\frac{1}{\omega_0} \text{arc cos}(\lambda_r / \lambda_0)$$

$$\text{Sinon : } t_{opt} = \frac{1}{\omega_0} [\text{arc cos} (\lambda_r / \lambda_0) + 1]$$

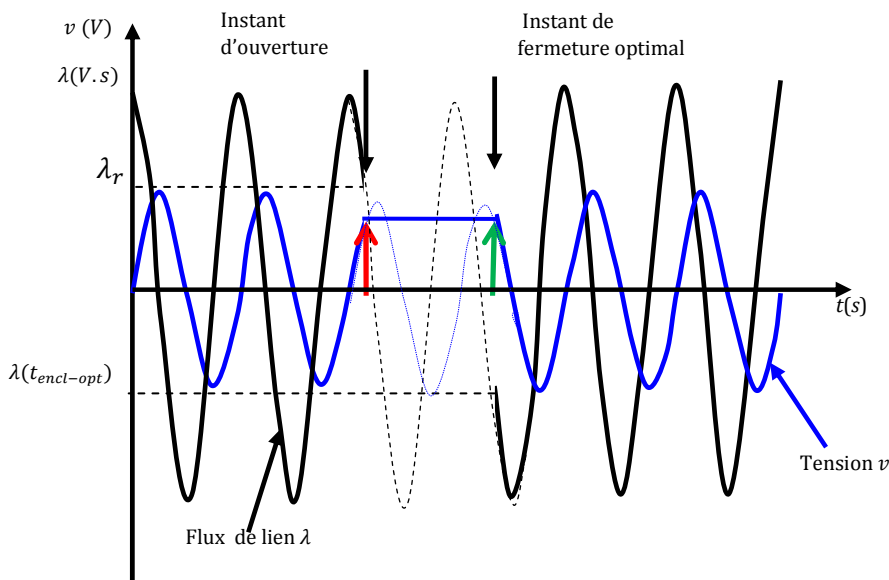


Figure IV.5 : Temps d'enclenchement optimal

La commutation contrôlée est une technique qui consiste à contrôler l'ouverture et la fermeture de disjoncteur en prenant en considération le bon choix d'instant d'enclenchement et la forme d'onde de tension. Son objectif est d'éviter le plus possible l'apparition de valeur pic de courant d'appel et donc de courant sympathique dans les commutations qui peuvent apparaître. Cette technique fonctionne selon les valeurs enregistrées de la première commutation aléatoire qui apparait. Le disponible sous MATLAB va valider cette commande.

IV.4.3. Stratégie de contrôle

La stratégie de contrôle se fait à travers d'un enchainement des étapes dont le flux sera estimé et contrôlé. Ces étapes sont :

- Fixer la source de tension à une valeur nominale de chaque transformateur.
- Programmer le disjoncteur de sorte qu'il se ferme au passage de tension par zéro.
- Intégrer le signal de tension pour avoir celui de flux.
- Estimer le flux résiduel à l'instant d'ouverture.
- Exécution simultanée de l'interface ControlDesk et de l'algorithme.

Cette stratégie peut être bien illustrée à travers la figure ci-dessous associée par un organigramme qui détaille les étapes précédentes.

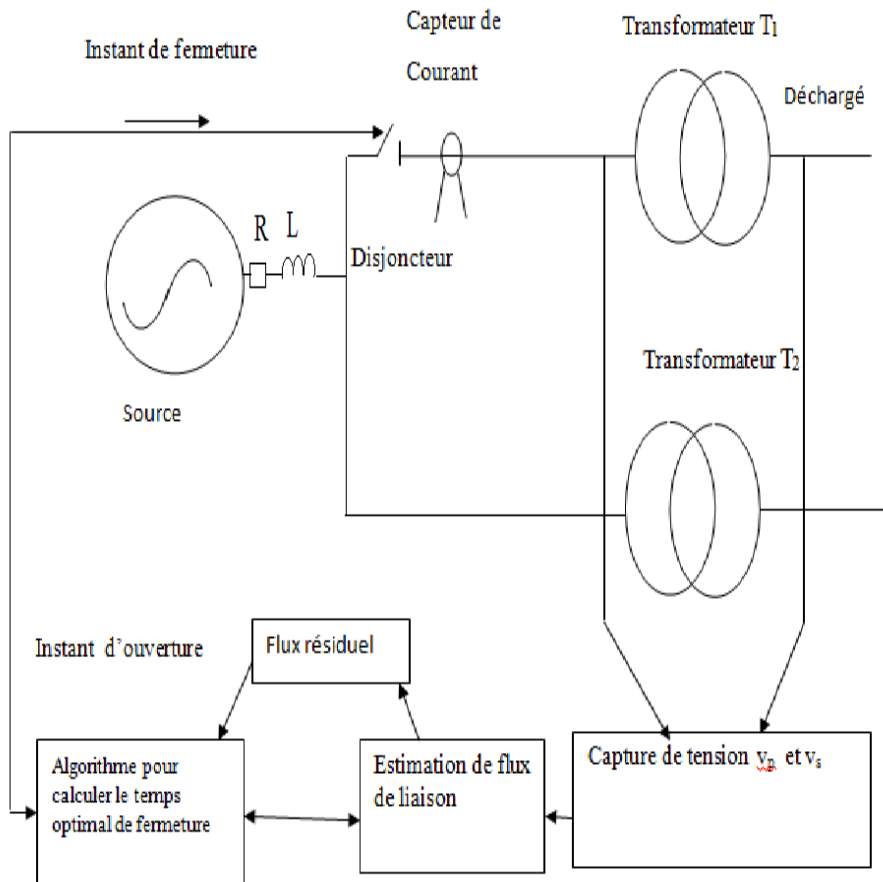


Figure IV.6 : Stratégie de mesure et de contrôle.

La commande réalisée ci-dessus peut être réalisée dans l'environnement MATLAB en utilisant le bloc de simulation suivant :

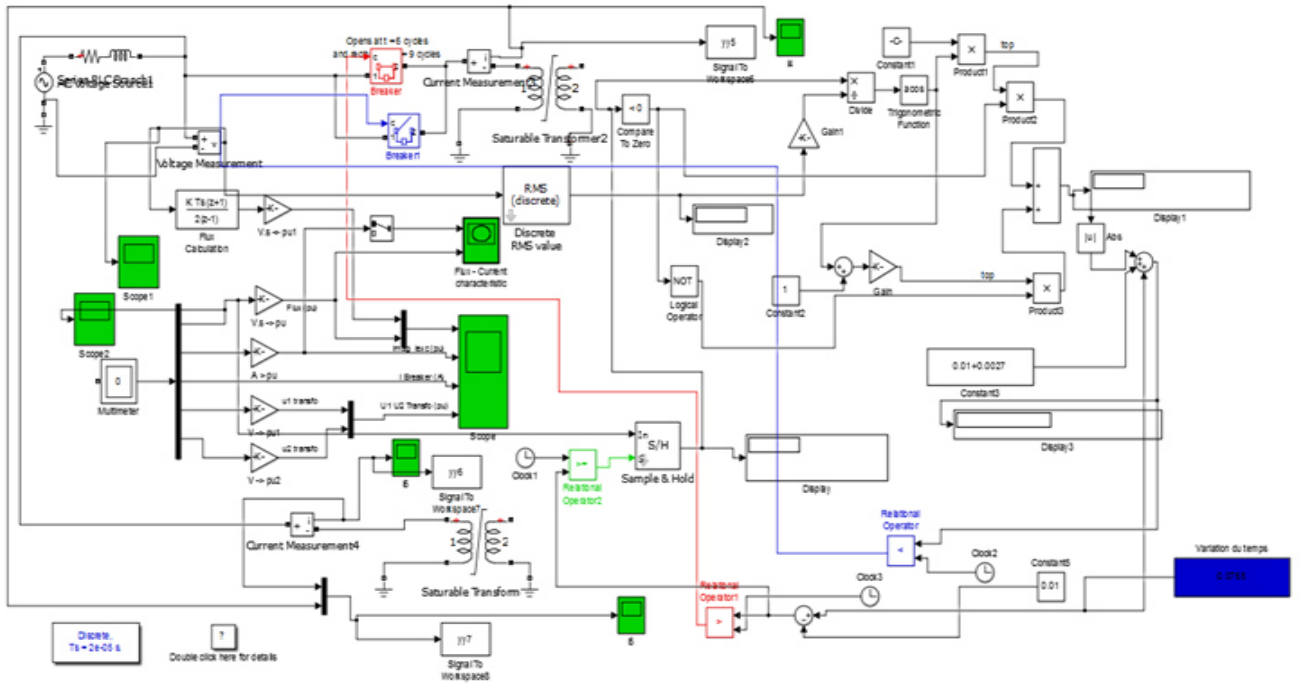


Figure IV.7 : Circuit de simulation qui sert à contrôler la commutation.

Ce schéma ci-dessous sert à représenter le circuit de simulation précédent en utilisant des blocs explicatifs.

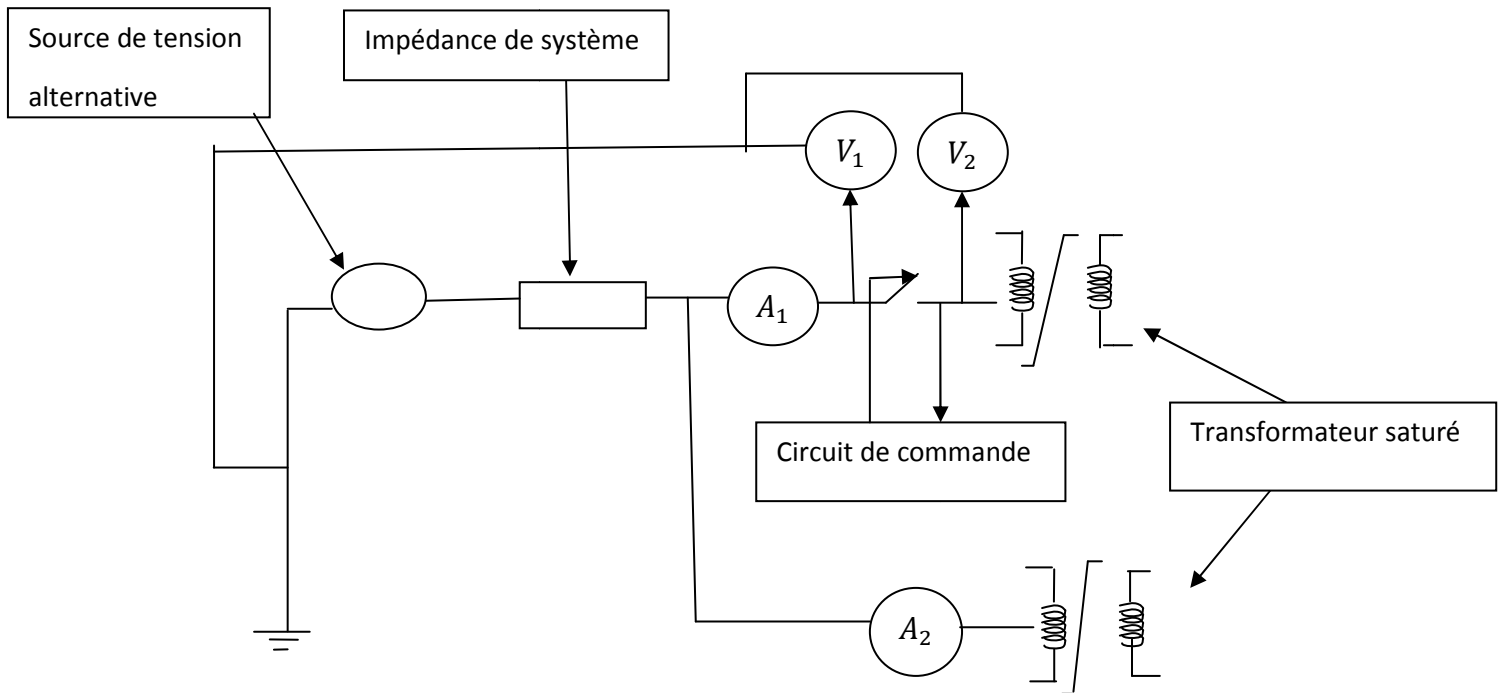


Figure IV.8 : Schéma explicatif du circuit de simulation.

IV.4.4. Résultats de la commutation contrôlée

Les figures ci-dessous représentent les résultats que nous avons obtenus dans la pratique et par la simulation pour une valeur d'onde de tension d'une valeur de $\frac{\pi}{6}$.

On remarque tout d'abord que les deux figures sont presque identiques et dans chacune l'allure en rouge représente le courant d'appel dans le transformateur T_1 , et celle qui est en bleu traduit le courant d'appel sympathique qui apparaît dans l'autre transformateur (T_2).

D'après ces figures, le transformateur T_1 est enclenché et réenclenché tout d'abord d'une manière aléatoire puis d'une autre qui est contrôlée. La première remise sous tension non vérifiée du transformateur T_1 génère une valeur pic très élevée de courant d'appel. Ceci provoque une apparition de courant d'appel sympathique dans l'autre transformateur de fait que les deux transformateurs sont connectés en parallèle. Les deux surintensités transitoires amortissent pendant quelques secondes.

Par contre, lors de la deuxième remise sous tension qui est contrôlée, on remarque que ce courant d'appel et ce courant sympathique sont réduits d'une façon à obtenir la valeur de courant à vide puisque cette commutation prend en compte la valeur de flux rémanent enregistrée déjà qui peut y avoir lieu (dans ce cas le flux rémanent est compensé à l'aide de la commande).

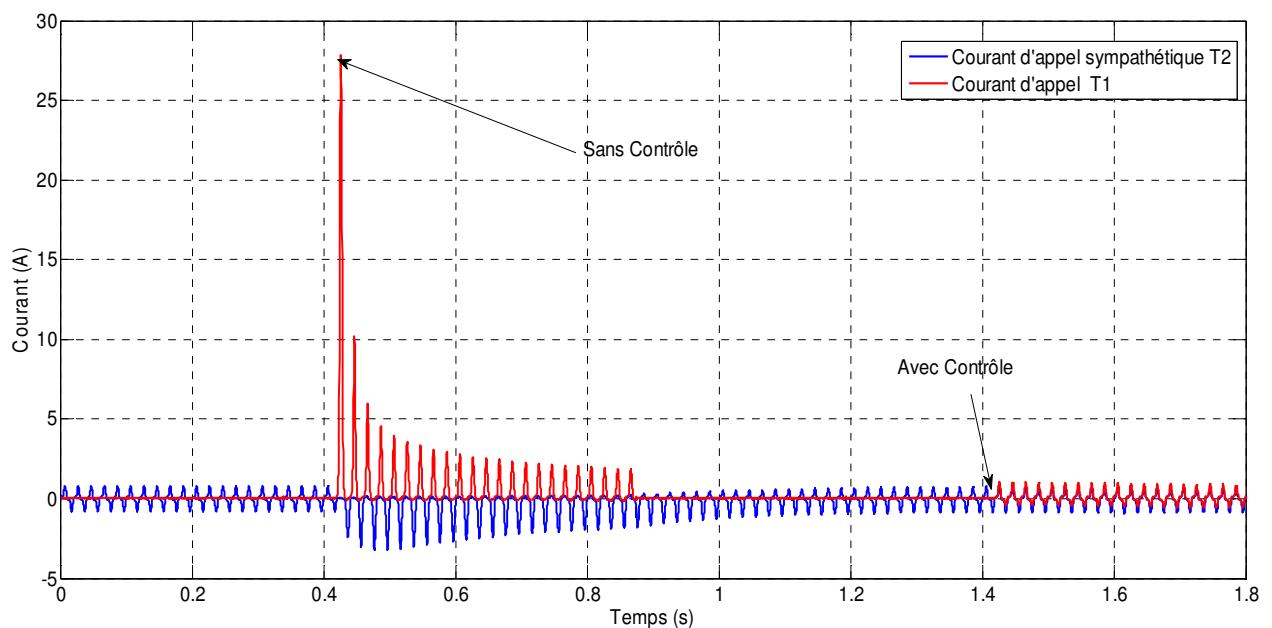


Figure IV.9 : Mesure des surintensités transitoires pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$.

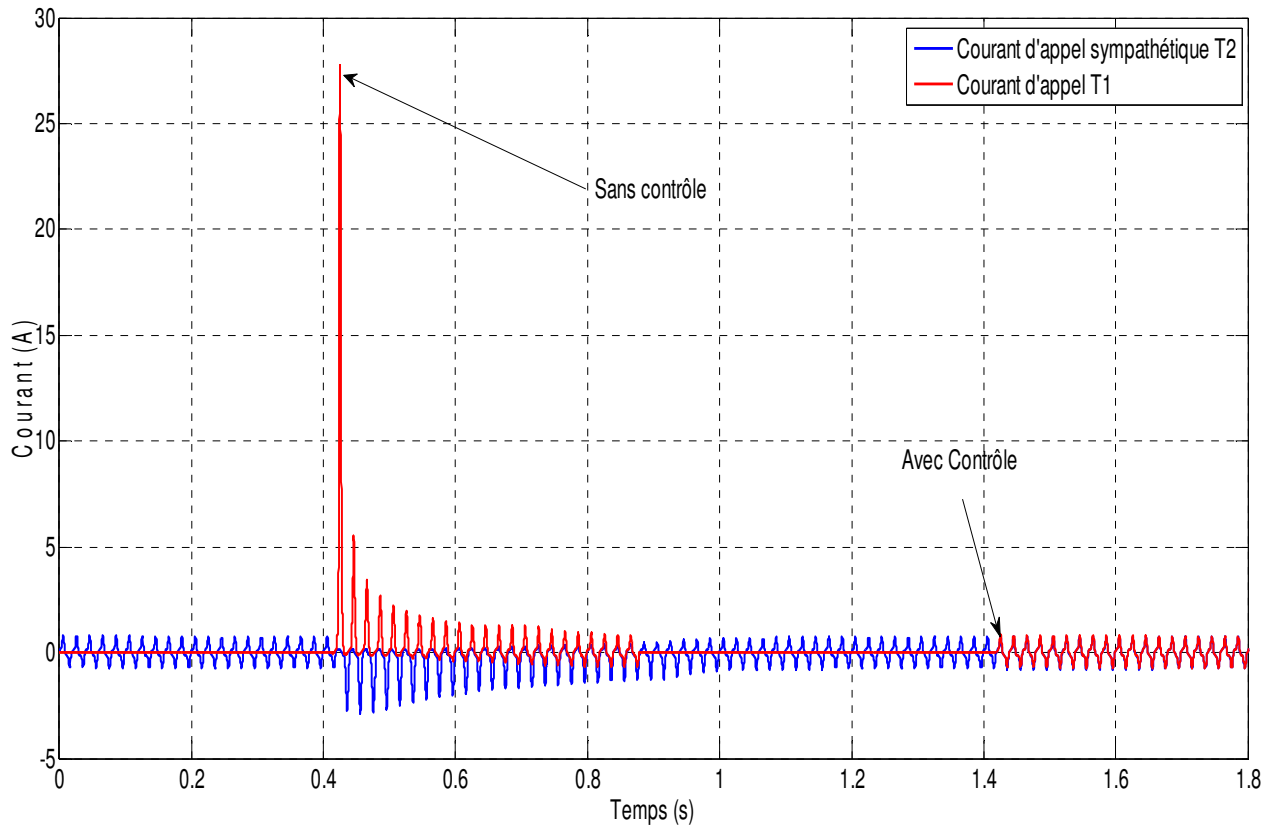


Figure IV.10: Simulation de surintensités transitoires pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$.

Voici les résultats de la mesure et de la simulation que nous avons obtenus lors de variation de l'angle de tension appliquée au primaire du transformateur T_1 . Comme les résultats sont à chaque fois identiques pour toute valeur d'onde de tension durant la période de signal, on choisit la valeur $\alpha = \frac{5\pi}{6}$.

On remarque que ces résultats sont identiques aux résultats précédents lorsque $\alpha = \frac{\pi}{6}$. Ceci peut être justifié du fait que la commutation contrôlée que nous avons utilisé est indépendante de point d'ouverture de l'onde de tension. Elle correspond essentiellement à la valeur de flux rémanent enregistrée de la première commutation aléatoire qui apparaît. Donc elle compense toujours cette valeur. Les résultats obtenus pour différentes ondes de tension sont les mêmes puisque notre commutation contrôlée est efficace.

On observe aussi que le résultat de la mesure est un peu différent que celui de la simulation (la valeur pic de courant d'appel) parce qu'il y a toujours certaines erreurs de la mesure. Ces erreurs dans notre cas sont assez petites et donc sont négligeables.

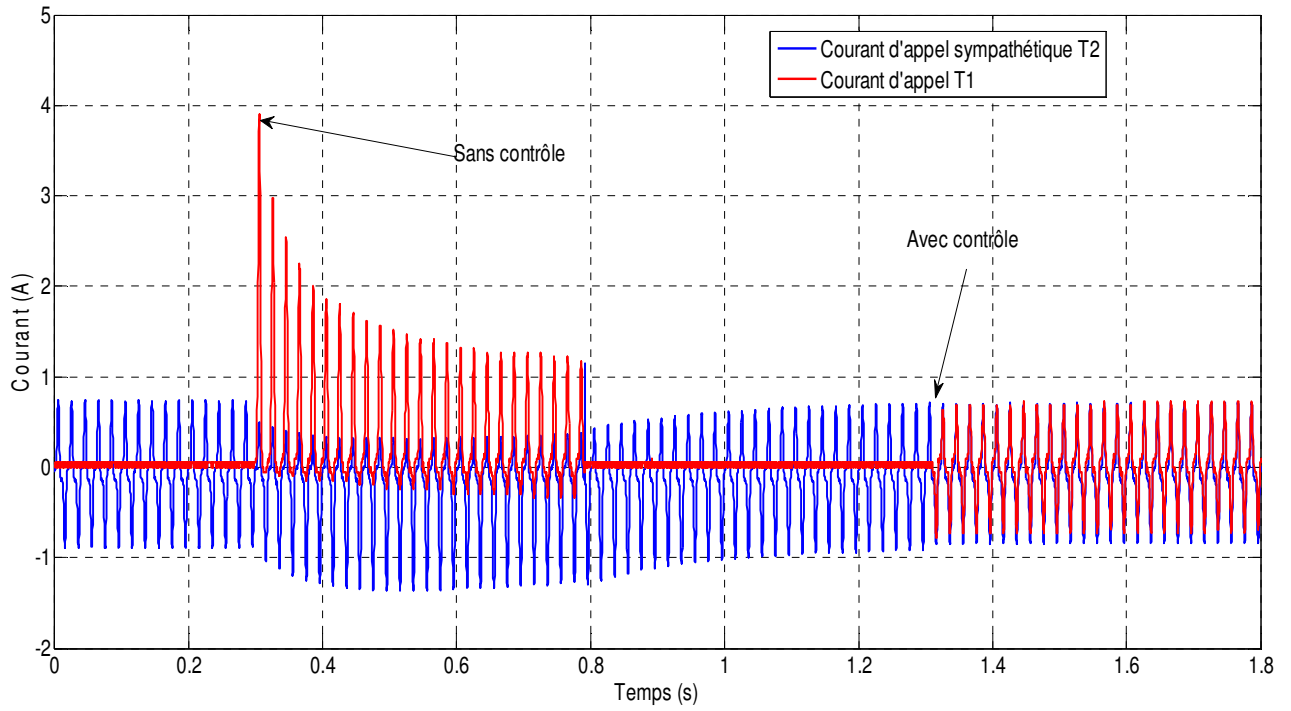


Figure IV.11 : Mesure des surintensités transitoires pour $\alpha = \frac{5\pi}{6}$.

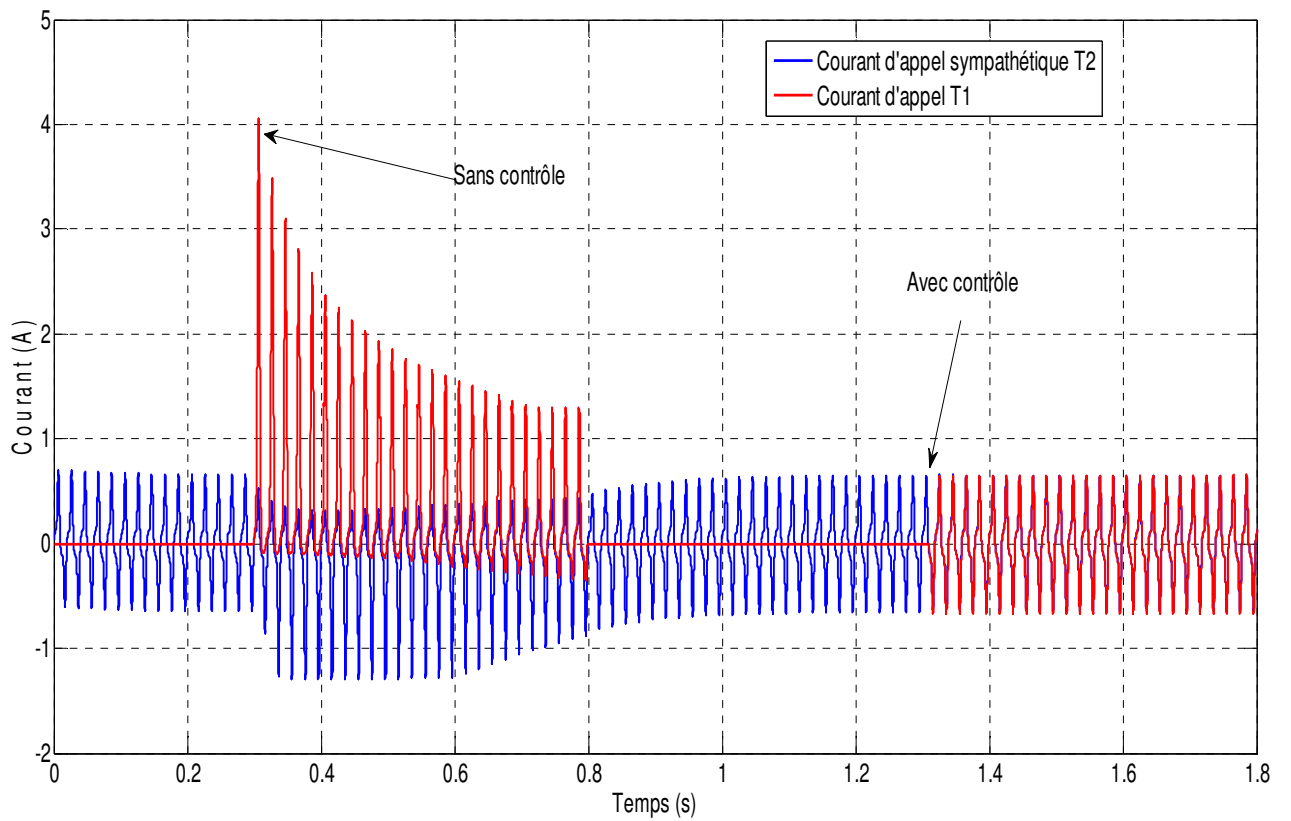


Figure IV.12 : Résultats obtenus par la simulation en cas de $\alpha = \frac{5\pi}{6}$.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre d'application nous avons étudié le courant d'appel sympathique en utilisant une procédure dans laboratoire et un circuit de simulation. D'après les résultats que nous avons obtenus il représente un courant qui accompagne le courant d'appel dans les cas des transformateurs qui sont mis en parallèle. Il n'est pas dangereux mais il peut provoquer des contraintes sur le long terme. Pour le réduire nous avons utilisé une commutation contrôlée qui régit sur la valeur de flux rémanent qui provoque l'apparition de courant d'appel dans le transformateur déjà mis sous tension. Donc elle fonctionne suivant la base de données enregistrée qui provient de la fermeture et de l'ouverture non vérifiée du disjoncteur. Dans notre essai cette ouverture est volontaire, mais au niveau des réseaux électriques elle peut être volontaire avec certaines conditions en cas des manœuvres ou bien intempestif en cas d'apparition de défaut. La commutation contrôlée est destinée principalement à compenser la valeur de flux rémanent quelque soit la valeur d'onde de tension au moment d'ouverture ou de la fermeture de disjoncteur. Suivant les résultats que nous avons obtenus dans des différents essais, elle est efficace.

Conclusion générale

Les transformateurs de puissance sont des liens très importants utilisés dans les réseaux électriques puisque les niveaux de tension dans la production et dans le réseau de transport et dans celui de distribution ne sont pas identiques pour des réseaux économiques liés aux coûts des pertes qui peuvent y avoir lieu. L'utilisation de ces transformateurs l'utilisation se fait en se basant le fonctionnement des organes de coupures qui doivent être branchés en amont et en aval pour assurer une protection efficace.

La variation brusque de l'alimentation fait apparus des surintensités transitoires lorsque l'ouverture et la fermeture du disjoncteur se fait aléatoirement. L'amplitude de ces surintensités dépasse la valeur de courant nominal et même s'approche ou dépasse celle de court-circuit. Donc elle menace le fonctionnement de transformateur qui sont des composantes stratégique, et s'influence négativement sur la qualité d'énergie électrique.

Le courant d'appel qui provient des manœuvres des disjoncteurs impose un effet sur la longue de vie des transformateurs de puissance. Il apparait dans des conditions spécifiques. il provient de la saturation du transformateur de puissance à cause de variation de tension magnétisante due de la variation de tension d'alimentation.

Le courant magnétisant commence à augmenter avec un taux très élevé lorsque le flux atteint la densité de saturation. Il circule dans l'enroulement de bobinage primaire, donc il peut provoquer le déclenchement intempestif des relais de protection. Dans le cas ou d'association des transformateurs en parallèle, le courant d'appel va générer une surintensité dans les transformateurs qui sont mis sous tension.

Les techniques théoriques et pratiques proposées pour la réduction de ces phénomènes sont multiples, chacune fonctionne selon propre principe. Ces techniques doivent être facile à intégrer dans le réseau et moins couteuses .l'une de ces techniques est l'utilisation des inductances de pré insertion, elle est difficile à intégrer dans la pratique car elle se fait au niveau des chambres auxiliaire du disjoncteur.

La solution pratique adaptée pour réduire les courants sympathique dans les réseaux électriques est celle d'utilisation d'un système de commande qui se base sur une connaissance de la valeur de flux rémanent. Dans la théorie, le calcule de cette valeur se fait à travers des méthodes directes ou indirectes .Mais dans le système de la commutation contrôlée, il se fait sous une procédure bien spécifique.

Le contrôle d'instant d'ouverture et de la fermeture dans le système réalisé précédemment se base sur l'acquisition des signaux mesuré à travers les appareils de mesure. L'acquisition des données se fait simultanément à l'aide de l'oscilloscope numérique et de la carte d'acquisition de données dSPACE 1140 connectée avec le PC. L'IGBT qui est alimenté par une source continue connecte le disjoncteur avec l'autre composant. Ce contrôle étudié se fait sous la procédure décrite ci-dessus, en se basant essentiellement sur les données obtenues lors de la première commutation aléatoire. Les valeurs de flux rémanent seront estimées à fin d'avoir une exécution simultanée de l'interface contrôle desk et de l'algorithme de la stratégie de mesure et de contrôle. Lors d'application d'une commutation aléatoire, le courant d'appel a une valeur pic très élevée et le courant sympathique apparait prenant des valeurs d'intensité élevées. Les deux seront réduits dans quelque seconde. Le courant sympathique prend une période lente pour s'amortir par rapport à celle de courant d'appel.

Dans les commutations contrôlées le courant sympathique est réduit à une valeur admissible. La fiabilité de cette commutation est vérifiée car les instants d'ouverture et de fermeture sont contrôlés et le courant sympathique est réduit quelque soit le diagramme de flux résiduel.

- [1] BOUDRAA Souhila, « Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile-Apport de l'intelligence artificielle », Thèse de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2017.
- [2] TIAN Liu, « Manœuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent », Thèse de doctorat en spécialité physique, Ecole doctorale, 2011.
- [3] 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 2011.
- [4] BUKUBUKWANA M, ZIVANOVIC R, « Inrush current transients during energization of an unloaded transformer on the Eskom network, Eskom distribution », Tshaane University of technologie , South Africa, June 2005.
- [5] 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.
- [6] NAHOULI Neima ,« Etude et réalisation d'un hystérésis- graphe d'un système de mesure de cycle d'hystérésis », Diplôme d'ingénieur CNAM en électrotechnique, Université de LYBANES, 2013-2014.
- [7] J. P.Baillon, J.M Dortot, «Matériaux », Prisse internationale polytechnique, 3^{ème} édition, Canada, 2000.
- [8] BELKEBIR Amel, «Modélisation-Identification paramétrique de l'hystérésis magnétique», Mémoire de magister, Université de Batna, Novembre 2006.
- [9] S.V.KULKARNI, S.A KHAPARDE, « Transformer engineering-design and practice », Indian institute of technology, Bombay, India.
- [10] T.O ROUSE, « Mineral insulating oil in transformer », IEEE Insulation magazine, 1998, Volume 14, pp 6-16.
- [11] AMIDOU Betie, « Impact de la qualité du système d'isolation sur la condition et l'efficacité des transformateurs de puissance », Thèse de doctorat, Université de Québec.
- [12] RAKOTOMALALA Andrianirine, « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régime haute fréquences », Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole centrale de LYON, 1996.
- [13] AHMED Ahmed, « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance et de leurs comportement en haute fréquence », Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole centrale de LYON, 1992.
- [14] M.STEURER, K. FROHLICH, « The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils », IEEE 2002.

- [15] M.JAMALI, M. MIRZAIE, S. Asghar GHOLAMIAN, « Calculation and Analysis transforme inrush current based on paramaters of transformer and operating conditions », Electronics and electrical engineering-Kaunas technologija, 2011, pp 17-20.
- [16] FRANKLIN. A.C, FRANKLIN D.P, « The J&P transformer book 11th Edition », Butterworths, London, pp 549-641, 1988.
- [17] Saravan Khumar RAVICHANDRAN, « Point-on- Wave switching for distribution transformer inrush current reduction », degree of master of engineering in electrical engineering, McGill university , Montreal (Canada), June 2015.

Résumé :

Le courant d'appel et le courant sympathique sont des surintensités transitoires qui affectent les transformateurs de puissance qui sont les plus importants ainsi que les plus coûteux dans les réseaux électriques. Le premier est généré par les variations brusques de la tension d'alimentation à cause de la mise sous tension et de la remise sous tension non vérifiée volontaires ou intempestifs des disjoncteurs. L'autre traduit l'influence de ce précédent sur les transformateurs branchés en parallèle qui sont déjà mis sous tension. Ils influencent sur la qualité d'énergie transportée et celle consommée, et il provoque des détériorations des transformateurs sur le long terme. Ils existent plusieurs méthodes pour la réduction de courant sympathique qui aura lieu dans les réseaux de distribution en cas de transformateurs à vide. L'utilisation des inductances de pré-insertion dans les chambres auxiliaires des disjoncteurs et l'utilisation des dispositifs pour démagnétiser complètement le transformateur sont difficiles dans les réseaux électriques. L'intégration de la commutation contrôlée qui est celle étudiée dans ce travail se base sur l'algorithme de mesure et de contrôle qui est basé sur la valeur de flux résiduel obtenu lors de la commutation aléatoire qui avait eu lieu. Le type de commutation utilisée influence principalement sur la valeur pic de courant d'appel et surtout sur l'amplitude de courant sympathique. Les résultats obtenus confirment la fiabilité de la commande.

Mots-clés : Transformateur, Flux résiduel, commande, mesure, dSPACE, Courant d'appel sympathique.

Abstract:

The inrush current and the sympathetic current are transient over currents which affect the power transformers which are the most important and the most expensive in the electrical networks. The first is generated by sudden changes in the supply voltage due to unintentional power-up and unintentional power-up of the circuit breakers. The other reflects the influence of this precedent on transformers connected in parallel which are already energized. They influence the quality of energy transported and consumed, and it causes deterioration of transformers over the long life. Several methods exist for the reduction of sympathetic current which will take place in the distribution networks in case of vacuum transformers. The use of pre-insertion inductors in the auxiliary chambers of circuit breakers and the use of devices to completely demagnetize the transformer are difficult in electrical networks. The integration of the controlled switching which is the one studied in this work is based on the measurement and control algorithm which is based on the residual flux value obtained during the random switching that had occurred. The type of switching used influences mainly the peak inrush current value and especially the amplitude of the sympathetic current. The results obtained confirm the reliability of the order.

Keywords: Transformer, Residual Flux, Control, Measurement, dSPACE, Sympathetic Inrush Current..