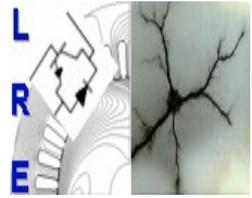




Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
ZAMA Ahmed Islam

Intitulé

Modélisation et Analyse des Transformateurs : Étude des phénomènes transitoires électromagnétiques rapides

Directeur(s) du mémoire :

R. Tahmi Docteur ENP

Jury:

S. Mekhtoub Professeur ENP
A. Boubakeur Professeur ENP
H. Sahraoui Docteur ENP

ENP 2013

ملخص— الهدف من هذا العمل هو نمذجة و تحليل المحولات الكهربائية. في هذه الدراسة تمت معالجة الخاصية المغناطيسية , المراحل الانتقالية الكهرومغناطيسية السريعة , التشبع المغناطيسي وعدم التوازن . الاختبارات التجريبية و المحاكاة العددية على نماذج معدلة من برنامج EMTP ادت الى مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها و تأكيد صحة التعديلات التي قمنا بها .
اختبرنا أيضا وسيلة لتقييم عدم التوازن المعروفة باسم FPEM التي تمكننا من معرفة عدم توازن مرحلة بالنسبة لمرحلة أخرى , هذه الطريقة اكدت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال طريقة المكونات المتناظرة .
الكلمات الرئيسية — محولات ثلاثة مراحل , الخاصية المغناطيسية , عدم التوازن , المراحل الانتقالية الكهرومغناطيسية السريعة
FPEM , EMTP

Résumé— Le but de ce travail est la modélisation et l'analyse des transformateurs. Dans cette étude l'hystérésis, les phénomènes transitoires électromagnétiques rapides, le déséquilibre et la saturation ont été largement abordés. Des tests expérimentaux et des simulations numériques sur des modèles corrigés du Logiciel EMTP (Electromagnetic Transients Program) ont été conduits et la comparaison des résultats obtenus a confirmé la validité de ce que nous avons apporté comme correction sur ce Logiciel destiné spécialement aux grands réseaux électriques Nous avons également testé une méthode d'évaluation des déséquilibres appelé FPEM (Feature Pattern Extraction Method) qui permet de déterminer le déséquilibre d'une phase par rapport à une autre. Cette méthode a confirmé les résultats obtenus par la méthode des composantes symétriques.

Mots-Clés— Transformateur triphasé, Cycle d'hystérésis, déséquilibre, Transitoires électromagnétiques rapides, EMTP, FPEM .

Abstract— The objectif of this work is the modeling and analysis of transformers. In this study the hysteresis, the fast electromagnetic transients ,the unbalance and the saturation have been widely discussed. Experimental tests and numerical simulations on models adjusted Software EMTP (Electromagnetic Transients Program) were conducted and the comparison of obtained results confirmed the validity of what we have made as a correction of this software specially designed for large electrical networks. We also tested a method for assessing unbalances called FPEM (Pattern Feature Extraction Method) for determining the unbalance of one phase to another. This method confirmed the obtained results by the method of symmetrical components.

Key words— Three phase transformer, hysteresis loop, unbalance, fast electromagnetic transients, EMTP, FPEM.

Remerciements

Nous remercions vivement notre promoteur R. Tahmi pour avoir accepté de diriger ce modeste travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et plus particulièrement ceux du département d'Électrotechnique.

Nous tenons à les citer individuellement, il s'agit des professeurs O. Touhami, R. Ibtouen, S. Mekhtoub, R. Tahmi, Mo. Mahmoudi, A. Boubakeur, A. Mekhaldi, L. Nezli, T. Zebbadji, M. Berkouk, M. Tegar, H. Sahraoui, M. Amorouayeche, D. Namane.

Enfin, nous remercions également les doctorants Ouadah M'hamed et Aboura Fouzi pour leur aide et les échanges d'idées.

Dédicaces

Je dédie ce projet :

A mes très chers parents

A mes sœurs et mon frère Mahdi

A toute la famille ZAMA et LOUCIF

A ma chère grand mère

A tous mes amis

Zama Ahmed Islam

Table des matières

Introduction générale	1
I Phénomènes Transitoires Électromagnétiques Rapides	3
I.1 Introduction	3
I.2 Surintensités	3
I.3 Surtensions	3
I.3.1 Caractéristiques des surtensions transitoires	4
I.4 Tests expérimentaux effectués sur un transformateur triphasé de Laboratoire	4
I.4.1 Courant d'enclenchement	4
I.4.2 Court-circuit triphasé brusque	6
I.4.3 Surtension	8
I.5 Conclusion	11
II Modélisation du transformateur	12
II.1 Introduction	12
II.2 Modélisation du transformateur monophasé	12
II.2.1 Identification des paramètres du transformateur monophasé	12
II.2.2 Modèle T	13
II.2.3 Modèle Π	17
II.2.4 Modèle Π modifié	18
II.2.5 Comparaison	21
II.2.6 Interprétation des résultats obtenus	22
II.3 Modélisation du transformateur triphasé	22
II.3.1 Identification des paramètres du transformateur triphasé	22
II.3.2 Modèle T	23
II.3.3 Modèle Π	25
II.3.4 Modèle en Π modifié	27
II.3.5 Comparaison des résultats obtenus	29
II.3.6 Simulation des transitoires électromagnétiques rapides	31
II.4 Conclusion	37
Conclusion générale	38
Annexes	39

Bibliographie

42

Introduction générale

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables, d'intensité et de tension généralement différents, mais de même fréquence. Cet appareil n'effectue donc qu'un transfert d'énergie par voie électromagnétique. Il comporte deux enroulements montés sur un circuit magnétique feuilleté, l'un est dit "Primaire" reçoit de la puissance active de la source et l'autre dit "Secondaire" fournit de la puissance active au circuit d'utilisation. Le transformateur peut fonctionner en abaisseur ou en élévateur [1].

Le transformateur est un élément important dans les systèmes de transport et de distribution dans les réseaux électriques. Il présente un comportement non linéaire causé par des phénomènes électromagnétiques internes tels que l'hystérésis, les courants de Foucault, la saturation magnétique.

Plusieurs travaux de modélisation et d'analyse des transformateurs ont été effectués, [2] et sont classés selon des approches différentes :

- Modélisation basée sur inductances propre et mutuelle

La première tentative d'analyse suivant cette approche a été présentée dans la référence [3]. Suivie d'un autre travail [4]. Dans ces travaux il y a des relations assez précises pour le calcul des inductances propres et mutuelles ont été élaborées. Cependant, en raison de la présence du noyau de fer, les valeurs numériques des inductances propre et mutuelle sont très proches et peuvent entraîner des équations mal conditionnées.

- Modélisation basée sur des inductances de fuite

Cette approche a été initiée par Blume [5] et améliorée par de nombreux autres. Ces modèles représentent adéquatement l'inductance de fuite du transformateur (en charge ou en court-circuit), mais le noyau de fer n'est pas correctement compris.

- Modélisation basée sur le principe de la dualité

Ce principe a été introduit par Colin Cherry [6], qui modélise le noyau de fer avec précision. Toutefois, les modèles basés uniquement sur cette approche ont un inconvénient : "les inductances de fuite ne sont pas correctement représentées" (ils sont directement déduits du flux de fuite en négligeant l'épaisseur des enroulements).

- Modélisation basée sur des mesures

Il existe un grand nombre de modèles de transformateurs à haute fréquence déduits des tests expérimentaux [7]. Les essais sont effectués pour la détermination des paramètres du modèle dans le domaine fréquentiel ou dans le domaine temporel. Les modèles obtenus à partir des mesures présentant l'inconvénient de leurs performances qui ne peuvent être garanties pour les transformateurs testés. La tendance à l'utilisation de cette approche est générale et les chercheurs se confor-

ment aux normes standards élaborées pour les tests de mesures.

– Analyse fondée sur les champs électromagnétiques

Les concepteurs de gros transformateurs utilisent des approches de calcul de champ électromagnétique pour la détermination des paramètres de conception. La technique des éléments finis est la solution numérique la plus largement utilisée [8]. Il est généralement admis que les études fondées sur le champ électromagnétique en trois dimensions sont nécessaires dans le processus de conception et ne sont pas pratiques pour le calcul des transitoires.

Notre travail consiste en la modélisation et l'analyse des transformateurs de laboratoire (monophasé et triphasé)

Le phénomène d'hystérésis, les transitoires électromagnétiques rapides et la saturation ont été largement abordés et ce, en utilisant deux modèles élaborés à savoir le modèle en T et ce lui de Π . Le déséquilibre a été également considéré puisque le transformateur triphasé est déséquilibré. Nous avons testé les modèles par des simulations effectuées par le logiciel (EMTP). Les essais expérimentaux sur les surtensions ont été effectués au laboratoire, non sans danger.

Chapitre I

Phénomènes Transitoires Électromagnétiques Rapides

I.1 Introduction

Pendant toute variation d'une ou plusieurs grandeurs déterminant le fonctionnement d'un transformateur (tension, charge, fréquence), il se produit un passage d'un état permanent à un autre transitoire [9]. Généralement, ce passage dure un temps très court mais tout de même il peut être accompagné d'effets importants et dangereux pour le transformateur tels que :

- * Apparition de très grandes contraintes mécaniques entre les enroulements ou entre les parties des enroulements.
- * Répartition très inégale de la tension entre différentes spires ou même entre différentes parties des enroulements.
- * Surchauffe brusque,..etc.

En fonction du facteur principal qui détermine le régime transitoire à savoir le courant ou la tension, on distingue deux principaux groupes de phénomènes :

- Les surintensités.
- Les surtensions.

I.2 Surintensités

Les surintensités apparaissent :

- A l'enclenchement d'un transformateur à vide sur un réseau,
- lors d'un court-circuit

I.3 Surtensions

La surtension dans un transformateur est une élévation de la tension au-dessus de la tension de service maximale. Les surtensions sont des phénomènes de courte durée sous forme de courtes impulsions séparées, périodiques ou apériodiques [9].

Les surtensions peuvent avoir pour cause :

- Les phénomènes atmosphériques tels que les coups de foudre directs frappant la ligne de transport, les phénomènes d'induction électromagnétique dans la ligne lors des décharges des nuages et d'induction électrostatique due aux nuages chargés. L'électrisation des conducteurs de la ligne par le vent porteur de particules de poussière et de neige peuvent également causer des surtensions.
- Les phénomènes de commutation, tels que l'enclenchement, le déclenchement, les variations rapides des charges, etc., accompagnés d'une variation brusque de l'énergie électromagnétique du système.
- Les phénomènes à caractère d'avarie tels que les courts-circuits, les coupures et les arcs répétés de mise à la terre.

I.3.1 Caractéristiques des surtensions transitoires

Elles sont généralement caractérisées par :

- Le coefficient de surtension qui est le rapport de l'amplitude crête de la tension atteinte à la valeur efficace de la tension ;
- La forme de l'onde ;
- La durée : On distingue selon leurs durées, trois types de surtensions :
 1. Surtension permanente de forme sinusoïdale (à fréquence industrielle), de longue durée (supérieure à 1 heure) ;
 2. Surtension temporaire de forme sinusoïdale (autour de la fréquence industrielle), d'une durée relativement longue (comprise entre 1,5 fois la période industrielle et 1 heure) ;
 3. Surtension transitoire de forme oscillatoire ou non et généralement vite amortie, de courte durée (inférieure à la période industrielle). Cette catégorie regroupe les surtensions à front lent (type choc de manoeuvre), à front rapide (type choc de foudre), à front très rapide...[10].

I.4 Tests expérimentaux effectués sur un transformateur triphasé de Laboratoire

I.4.1 Courant d'enclenchement

La Figure I.1 présente les résultats expérimentaux de l'essai du courant d'enclenchement à vide du transformateur triphasé au réseau. La mise sous tension du transformateur triphasé génère un transitoire important "enclenchement", les formes des courants d'enclenchement sont asymétriques, de très grande amplitude, riches en harmoniques paire et impaire, Fig.I.1 et I.2 et possèdent une composante aperiodique.

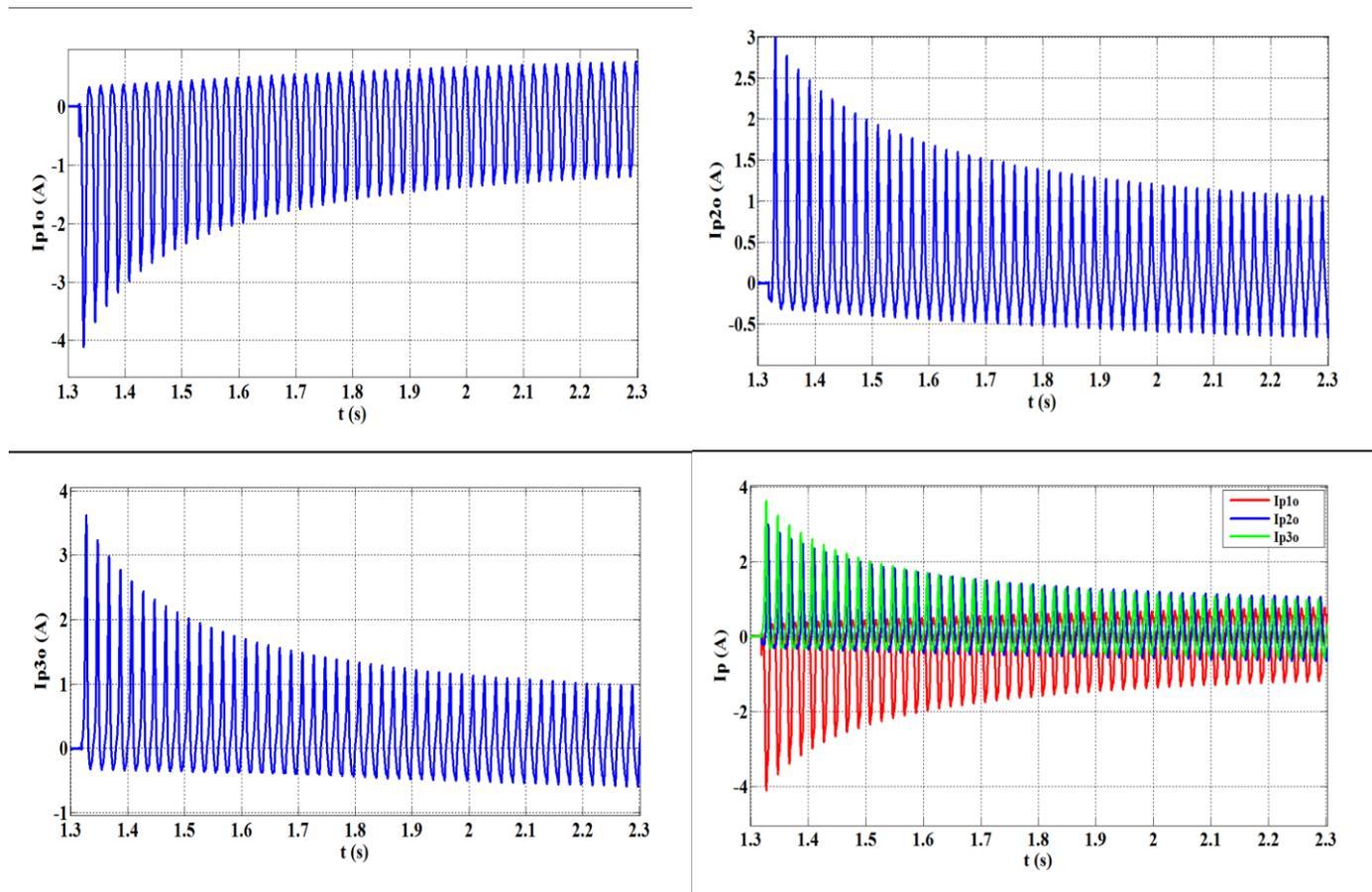


Fig. I.1 – Courant d’enclenchement à vide du transformateur triphasé

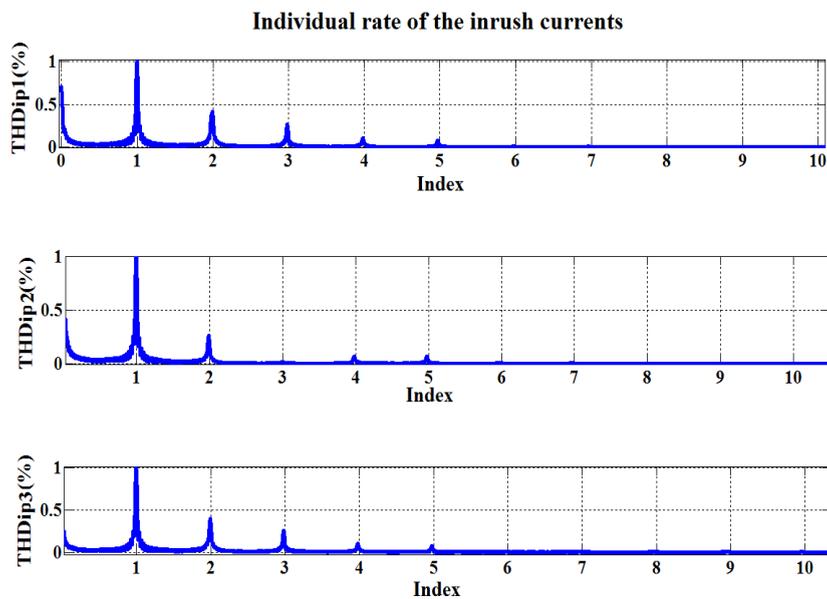


Fig. I.2 – Analyse harmonique des courants d’enclenchement à vide du transformateur triphasé

Dans la mise sous tension du transformateur triphasé, l'appel de courant est très élevé de l'ordre de 3 ou 4 fois le courant en régime permanent, voir tableau I.1. Initialement, le transformateur est magnétisé à flux rémanent. Cette valeur du flux rémanent peut pousser le transformateur à aller dans la zone saturée suivant le cycle d'hystérésis. Dans cette dernière, la valeur crête du courant est maximale (courant d'appel max) d'où la demande de puissance est élevée. En régime établi le transformateur fonctionne dans la zone linéaire où la demande de puissance est faible. Pour réduire l'appel de courant du transformateur il faut démagnétiser le transformateur ou alimenter le transformateur sous tension graduellement. La durée de ce phénomène Δt_{RT} est de l'ordre de 4 secondes. La durée du régime transitoire dans le noyau (phase 2) est deux fois plus grande que la durée du régime transitoire dans les deux phases (1 et 3), ces deux phases possèdent la même durée du régime transitoire.

Tab. I.1 – Caractéristiques des courants d'enclenchement du transformateur triphasé

	$\frac{I_{p_{o_{max}}}}{I_{p_o}}$	Δt_{RT} (s)	Constante de temps (s)
Phase 1	4.357	3.672	0.284
Phase 2	3.582	6.678	0.488
Phase 3	4.741	3.673	0.337

I.4.2 Court-circuit triphasé brusque

La Figure I.3 présente le schéma de montage de l'essai en court-circuit triphasé brusque. Le courant de court-circuit I_{2cc} est représenté, sur 3 échelles de temps, Figure I.4. La valeur maximale du courant secondaire de court-circuit est de 12A, car la tension appliquée au transformateur lors de l'essai du court-circuit triphasé brusque est de 15V environ 7% de la tension nominale. Cette faible valeur de tension de court-circuit entraîne une augmentation de $I_{2cc_{max}}$ jusqu'à $1.33I_{2n}$, ce qui explique que si la tension de court-circuit était proche de U_n , le courant de court-circuit dans ce cas dépassera $12I_n$ ce qui provoquera la destruction du transformateur (c'est le court-circuit le plus défavorable et le plus dangereux). Cette destruction n'est pas due uniquement aux forts courants qui provoquent la destruction des enroulements, mais cela est dû aussi aux efforts mécaniques pendant le court-circuit. Ces efforts apparaissent dans les enroulements ou circulent des courants inverses. Ces efforts sont proportionnels au carré du courant I_{2cc} et peuvent être décomposés en deux forces de sens opposés. Une partie de ces efforts tend à écarter l'enroulement extérieur et à comprimer l'enroulement intérieur. La fréquence d'oscillation du courant secondaire de court-circuit est de 50Hz au régime permanent (Figure I.4).

Les résultats de l'essai de court-circuit sont présentés à la figure I.5. La tension primaire de court-circuit est de 16 V, cette tension est nécessaire pour atteindre ce courant nominal. Le courant de court-circuit primaire augmente lors de la fermeture de l'interrupteur jusqu'à atteindre 10A au régime permanent. Le transitoire des courants primaires se caractérise par un retard de deux phases (phase 1 et 3) par rapport une phase (phase 2). Cette phase atteint le régime permanent au bout de 40ms. Par contre les phases 1 et 3 atteignent le régime permanent au bout de 165ms, ce retard peut provoquer des déséquilibres dans les réseaux électriques.

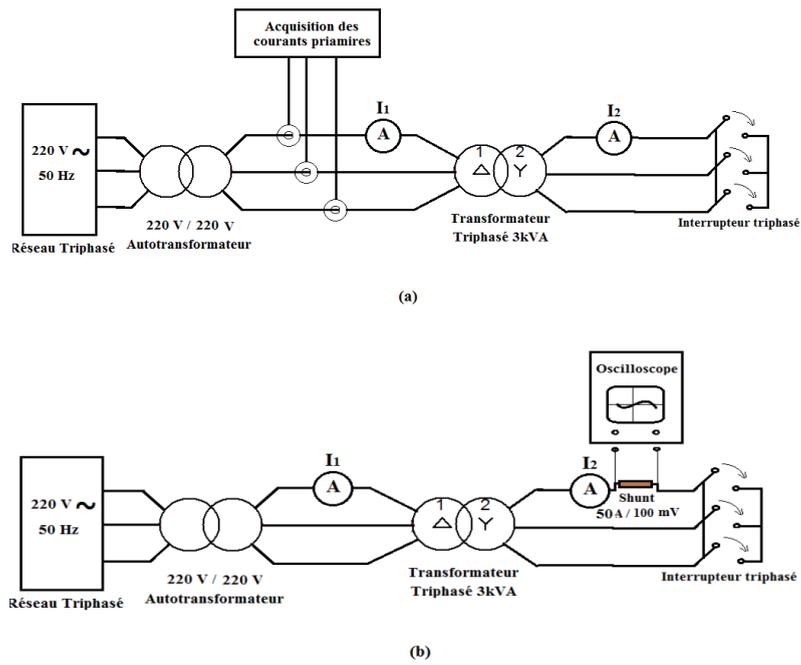


Fig. I.3 – Schéma électrique du montage du court-circuit brusque- (a) mesure des courants primaires ;(b) mesure des courants secondaires

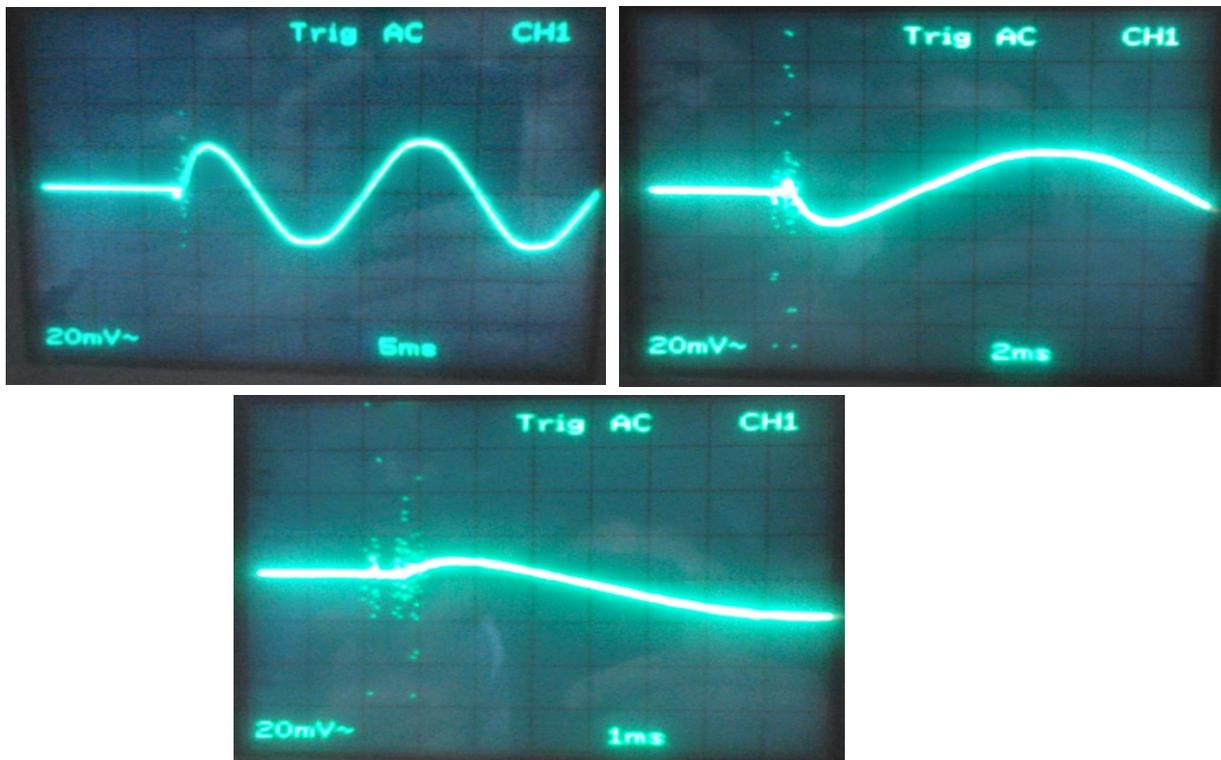


Fig. I.4 – Courant secondaire de court-circuit brusque du transformateur triphasé

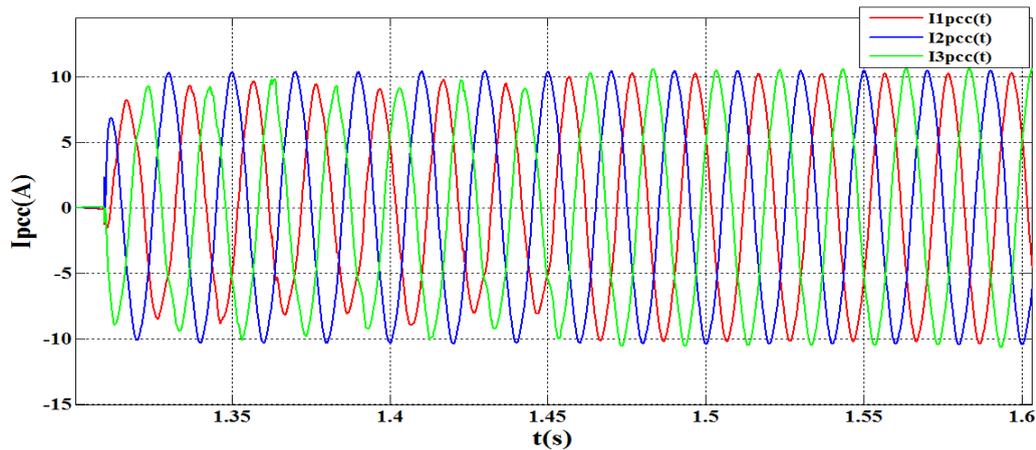


Fig. I.5 – Courants primaires de court-circuit brusque du transformateur triphasé

I.4.3 Surtension

Dans les réseaux électriques, lorsque l'arrachement du courant du transformateur se produit, la valeur du courant dans les trois phases est proche de zéro. Les trois phases ne sont pas interrompues simultanément. En raison du comportement fortement inductif du circuit qui doit s'annuler, la valeur instantanée de la tension devient proche de son maximum lors de l'interruption de courant. L'énergie magnétique stockée dans l'inductance L est maintenant transférée aux capacités C parasites du circuit, selon le principe de conservation de l'énergie [?].

$$\frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}Cv^2 \quad (I.1)$$

En raison de la faible valeur des capacités parasites, la tension de commutation développée est élevée, et a pour expression $v = i \frac{L}{C}$.

Par ce principe, on provoque la surtension selon l'essai de surtension présenté à la Figure I.6. On alimente ce circuit par un réseau triphasé. Ce circuit est constitué d'un autotransformateur qui alimente le circuit LC par une tension de 150V et ce, en tenant l'interrupteur triphasé ouvert. L'inductance (de 0.187 H) devient dans ce cas un réservoir d'énergie pour charger le condensateur. Lorsque l'interrupteur est fermé l'inductance assure le passage du courant au transformateur triphasé, et le condensateur, assure le survoltage au transformateur.

Lors de la fermeture de l'interrupteur, la bobine libère l'énergie emmagasinée, par conséquent la valeur max de la tension aux bornes de la bobine passe de 424 V à 256 V, voir Figure I.7.c. La capacité assure un survoltage de plus de 150 V, comme le montre la Figure I.7.d. La surtension appliquée au transformateur passe par un transitoire de plusieurs fréquences qui apparaissent sur la forme d'onde de la tension primaire. Le survoltage assuré par la capacité permet d'augmenter la tension primaire du transformateur de 0 à 464 V (Figure I.7.a). Ainsi la tension secondaire du transformateur passe également par un transitoire court d'une série de fréquence, la valeur maximale de la tension secondaire est de 132 V (transformateur abaisseur), Figure I.7.b.

La figure I.9 présente les tensions aux bornes de l'inductance et aux bornes du transformateur triphasé côté primaire pour différentes tensions et pour une inductance de 0.115 H. La tension aux bornes du trans-

formateur augmente jusqu'à 600V pour une tension d'entrée de 150V donnée par l'auto-transformateur, cette augmentation est due à la diminution de l'inductance, puisque l'inductance emmagasine plus l'énergie lorsqu'elle est de faible valeur. Pour cette même valeur de tension d'entrée la tension aux bornes de la capacité dépasse 1kV, Figure I.8

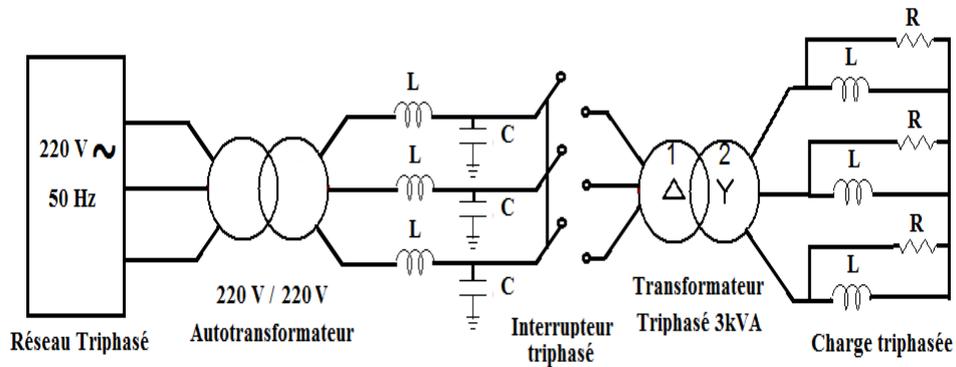
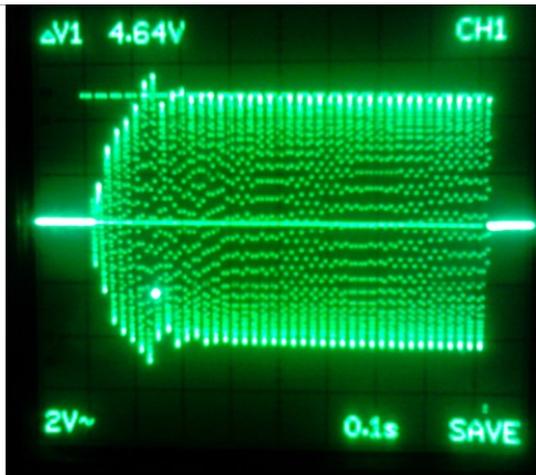
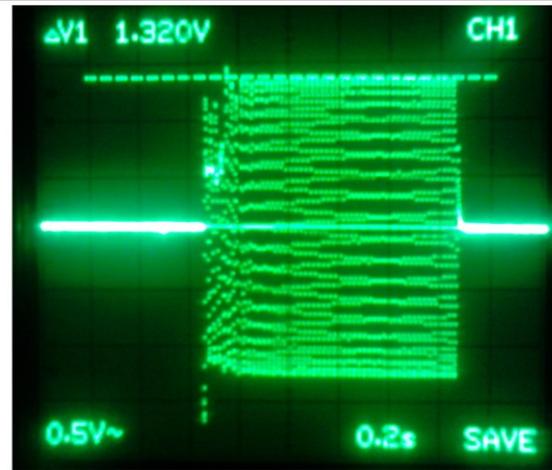


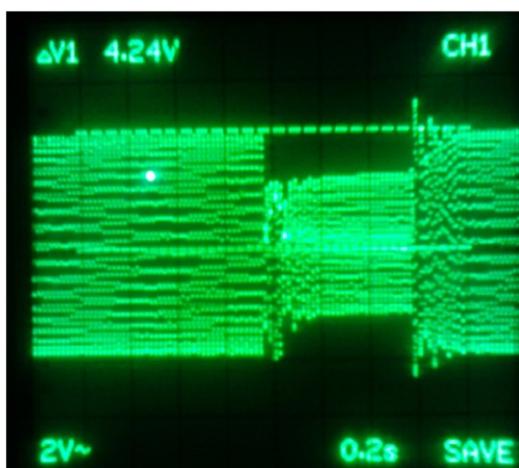
Fig. I.6 – Schéma électrique de l'essai de surtension



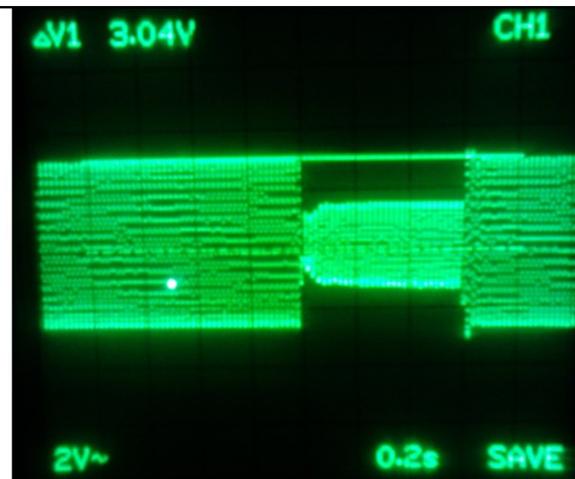
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. I.7 – (a) Tension aux bornes du transformateur triphasé côté primaire ; (b) Tension aux bornes du transformateur côté secondaire ; (c) Tension aux bornes de la bobine self ($L = 0.187 \text{ H}$) ; (d) Tension aux bornes de la capacité. La sonde de l'oscilloscope divise par 100.

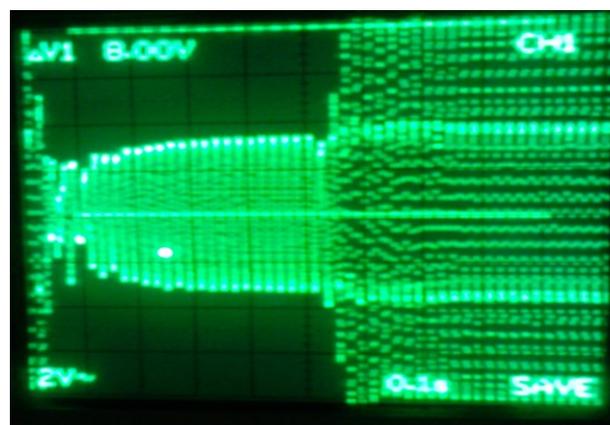
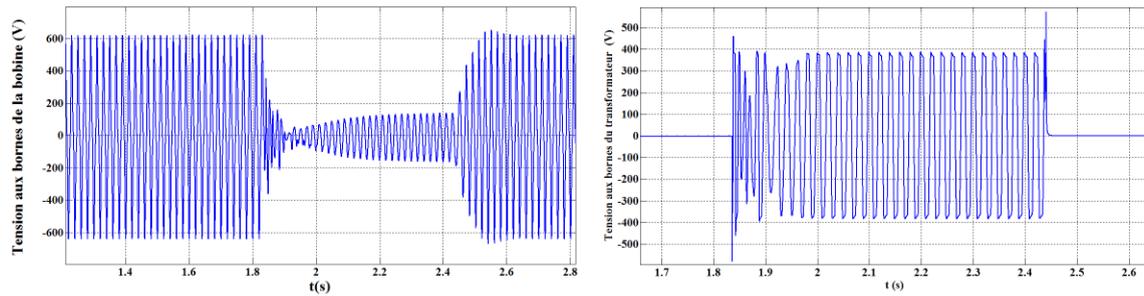
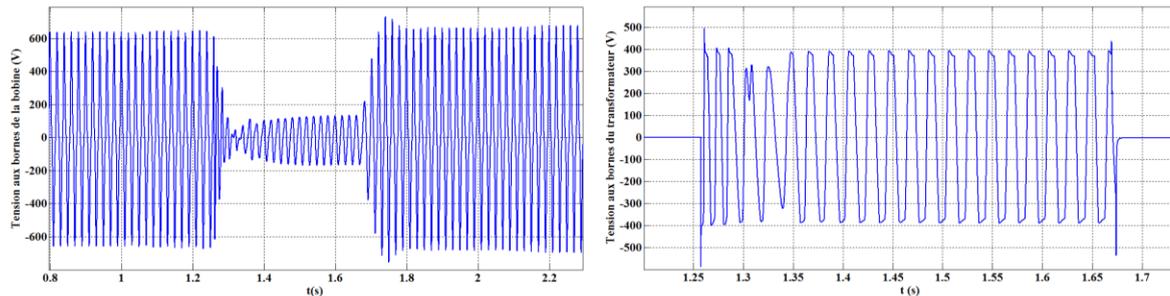


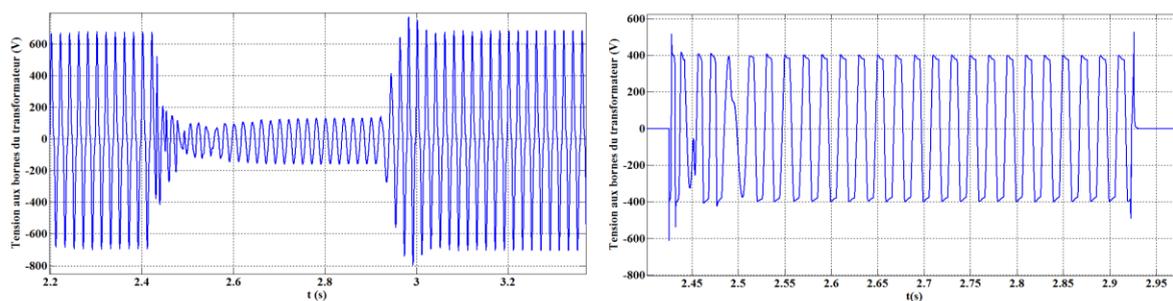
Fig. I.8 – Tension aux bornes de la capacité pour l'essai de surtension pour une inductance de 0.115 H . La sonde de l'oscilloscope divise par 100



Essai de surtension à 100V



Essai de surtension à 120V



Essai de surtension à 150V

Fig. I.9 – Essai de surtension pour une inductance de 0.115 H

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les transitoires électromagnétiques rapides dans le transformateur triphasé à savoir : la surintensité et la surtension. Nous savons bien que les phénomènes électromagnétiques rapides sont caractérisés par trois grandeurs importantes : la tension, le courant et la fréquence. Nous avons étudié seulement les deux premières grandeurs. L'étude de la surintensité nous a permis de voir l'appel de courant du transformateur lors de la mise sous tension. Nous avons, également, étudié le court-circuit triphasé brusque du transformateur, où nous avons observé le courant maximum du court-circuit pour une faible tension de court-circuit appliquée au transformateur. Quand à la surtension, l'étude de ce phénomène nous a permis de voir l'effet de survoltage que peut provoquer la présence des capacités, ainsi que l'influence de la faible valeur de l'inductance en amont du transformateur.

Chapitre II

Modélisation du transformateur

II.1 Introduction

De nos jours, la modélisation des transformateurs fait encore l'objet de nombreuses recherches [2-8]. La difficulté réside, d'une part dans le comportement non linéaire causé par l'aimantation, l'hystérésis et en régime transitoire. D'autre part, la non disponibilité des données géométriques du transformateur complique la modélisation exacte.

Ils existent plusieurs modèles de représentation du transformateur lors des phénomènes transitoires électromagnétiques. Cependant, la majorité de ces modèles ne représentent pas fidèlement le transformateur à cause des paramètres estimés ou déterminés par des essais expérimentaux qui supposent que ces paramètres ne dépendent pas de la fréquence, la température, les variations topologiques sur le noyau et la construction des enroulements. Dans ce chapitre nous allons présenter deux modélisations : une modélisation de Kapp améliorée et une modélisation en Pi améliorée.

II.2 Modélisation du transformateur monophasé

II.2.1 Identification des paramètres du transformateur monophasé

Les résistances des enroulements primaire et secondaire du transformateur monophasé sont : $R_1 = 0.657\Omega$; $R_2 = 0.725\Omega$

Nous présentons au tableau II.1 les paramètres identifiés du transformateur à partir des tests expérimentaux

Tab. II.1 – Transformateur monophasé 2 kVA

Variable	Essai à vide	Essai en court-circuit
$V_1(V)$	220	10.2
$I_1(A)$	0.45	8
$P_1(\text{Pertes noyau}) (W)$	25	
$P_1(\text{Pertes enroulements}) (W)$		68
$V_2(V)$	220	
$I_2(A)$		7.6
$Q_1 = \sqrt{(V_1 I_1)^2 - P_1^2} \text{ (VAr)}$	95.79	45.106

II.2.2 Modèle T

La figure II.1 présente le schéma de montage du modèle T du transformateur monophasé. La branche magnétisante du modèle T est modélisée par le cycle d'hystérésis obtenu par l'expérimentation et par une résistance R_{CF} qui représente les pertes par courants de Foucault. Le cycle d'hystérésis est introduit dans le modèle T grâce à une fonction de calcul de données de l'hystérésis (Hysteresis Reactor Data Calculation Function). Cette fonction est disponible dans un dispositif appelé "Hysteresis Fitter" fourni par le logiciel EMTP dans le champ de la librairie des éléments non-linéaires. Ce dispositif permet d'approximer le cycle d'hystérésis à partir d'un fichier de valeurs (de courant de flux) de la partie positive du cycle d'hystérésis obtenu au chapitre I. Le résultat de l'approximation du cycle d'hystérésis est introduit dans un fichier de données d'extension (.hys), ce dernier sera introduit dans un élément appelé "Hysteretic reactor", qui permet de générer le cycle d'hystérésis complet par un calcul des paramètres, Figure II.2. L'introduction du cycle d'hystérésis dans le modèle T permet de modéliser uniquement les pertes par courants de Foucault dans la branche magnétisante et par conséquent $R_{CF} = 2 * R_m$ car à 50Hz $R_{CF} = R_{Hysteresis}$ et, à vide on obtient : $R_m = 2 * R_{CF} // 2 * R_{Hysteresis}$.

Dans le modèle T, les résistances R_1 et R_2 : modélisent les pertes Joule dans les enroulements, L_1 représente l'inductance de fuite ramenée au secondaire déterminée par l'essai en court-circuit, le calcul de ces paramètres est présenté au tableau II.2.

Tab. II.2 – Paramètres du modèle T

Paramètres du modèle T du transformateur monophasé	
$R_1(\Omega)$	0.6566
$R_2(\Omega)$	0.72466
$L_1(mH)$	2.243
$R_{CF} = 2 * R_m(\Omega)$	2*1936

Transformateur monophasé 2kVA_modèle T

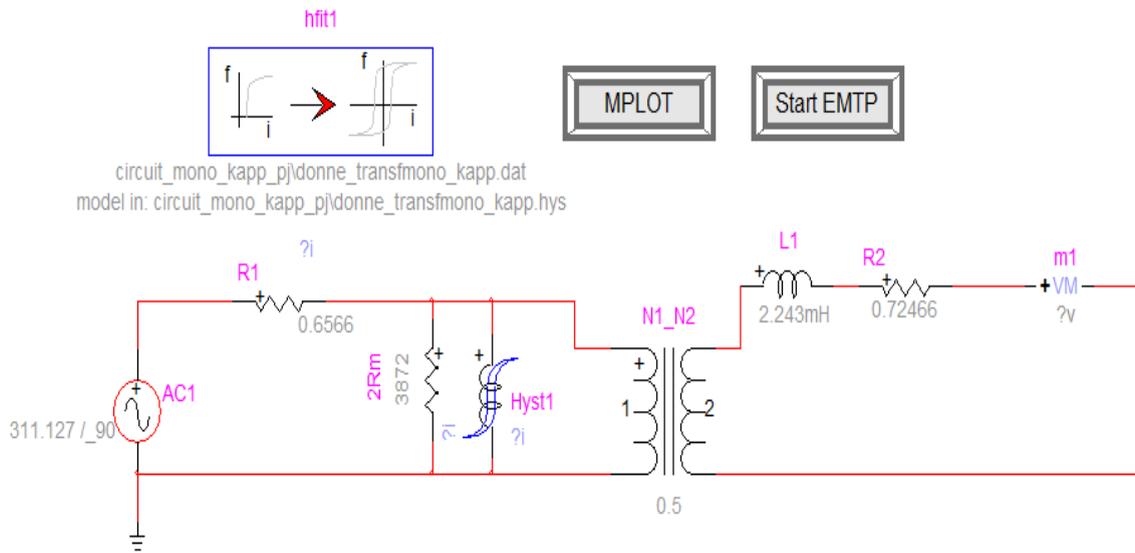


Fig. II.1 – Schéma de montage du modèle T simulé.

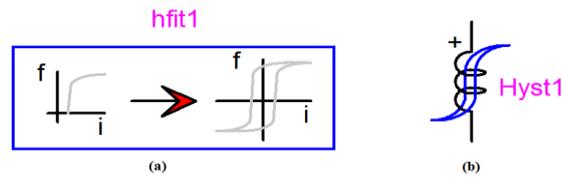


Fig. II.2 – (a) Hysteresis Fitter ; (b) Hysteretic reactor.

La Figure II.3. a représente le résultat de l'approximation du cycle d'hystérésis donnée par la fonction "Hysteresis Fitter", la Figure II.3.b présente les propriétés de "Hysteretic reactor" pour le calcul du cycle d'hystérésis.

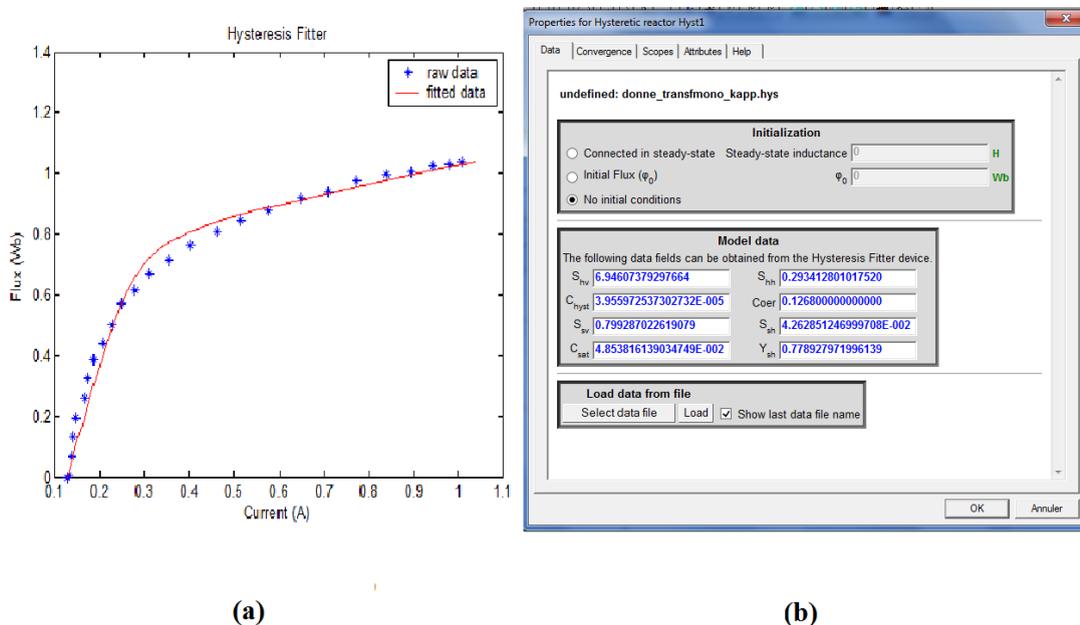


Fig. II.3 – (a) Approximation de la courbe $\phi = f(i)$ du cycle d'hystérésis ; (c) Paramètre des propriétés du cycle d'hystérésis.

La Figure II.4 présente le courant d'enclenchement à vide du modèle T. Les courants primaires à vide : actif I_{CF} et réactif $I_{hysteresis}$ de la branche magnétisante ainsi que le courant d'appel (Inrush current) sont représentés à la Figure II.5. La tension secondaire du transformateur monophasé est présentée à la Figure II.6.

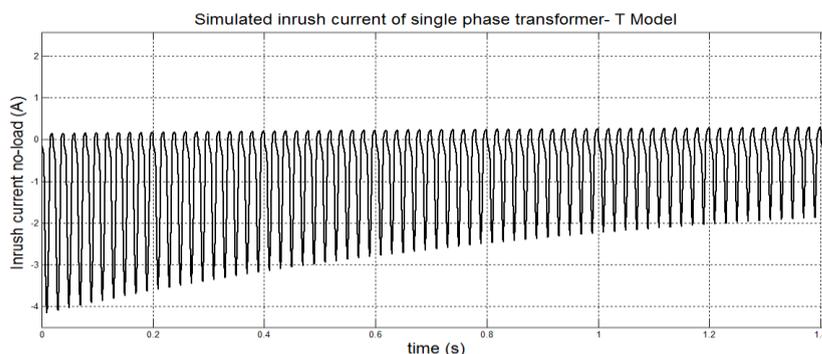


Fig. II.4 – Courant d'enclenchement à vide du modèle T.

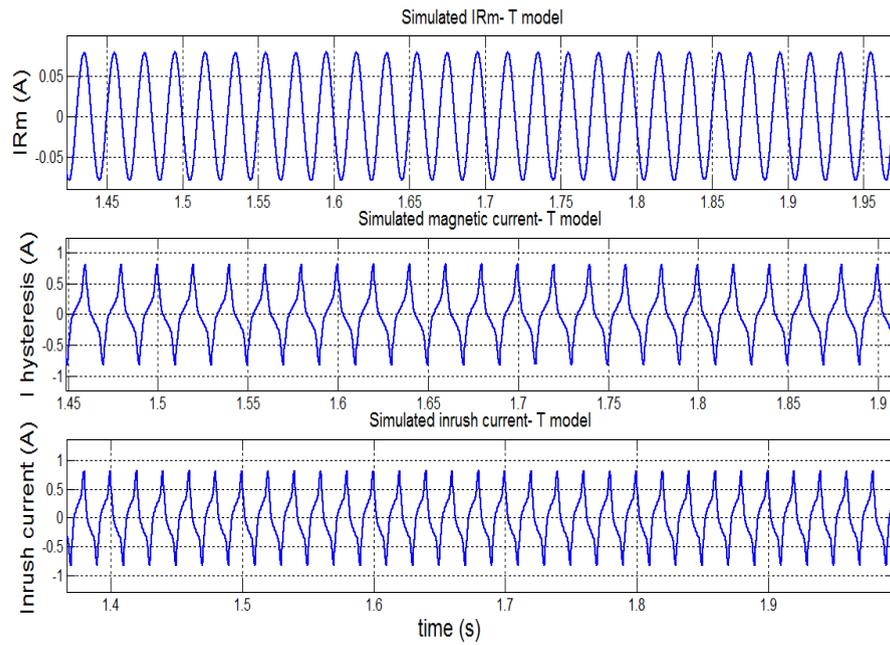


Fig. II.5 – Courants à vide primaires simulés du modèle T.

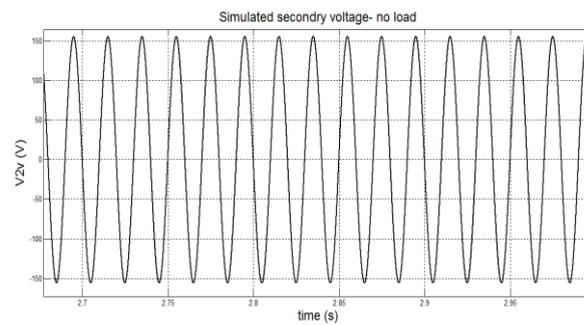


Fig. II.6 – Tension secondaire à vide-modèle T.

II.2.3 Modèle II

La Figure II.7 présente le schéma de montage du modèle II. Nous avons effectué la simulation à l'aide de l'EMTP en considérant le modèle II et avons obtenu les résultats suivants : la caractéristique non-linéaire de la branche magnétisante L_m est présentée à la Figure II.8.

Les courants primaires sont présentés à la Figure II.9.

La tension à vide secondaire est présentée à la Figure II.10.

Transformateur Monophasé 2kVA montage Pi

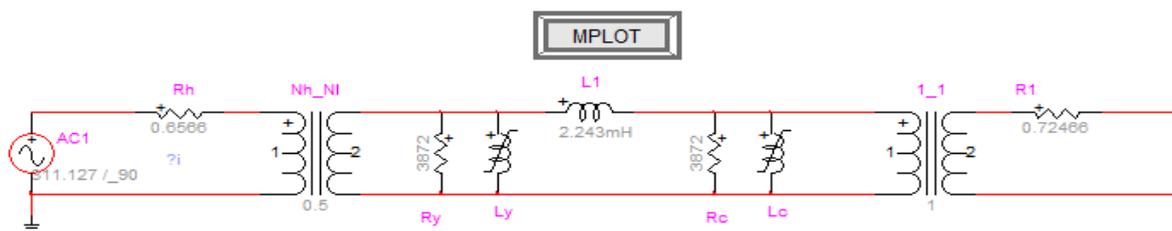


Fig. II.7 – Schéma du montage du modèle Pi du transformateur monophasé.

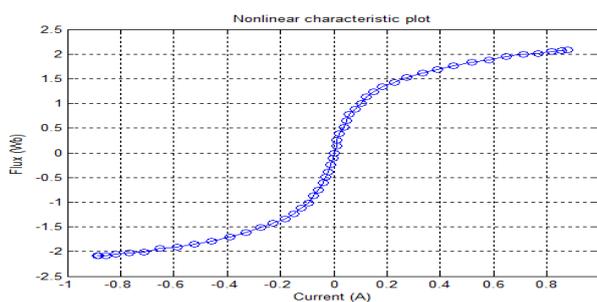


Fig. II.8 – Caractéristique non-linéaire de la branche magnétisante.

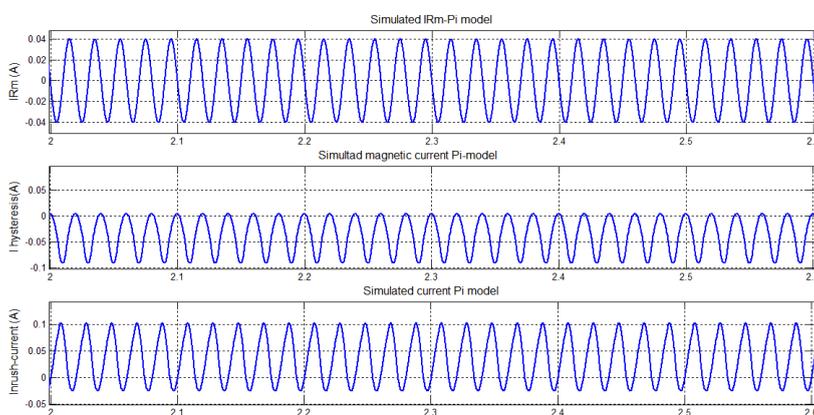


Fig. II.9 – Courants à vide primaires simulés du modèle Pi.

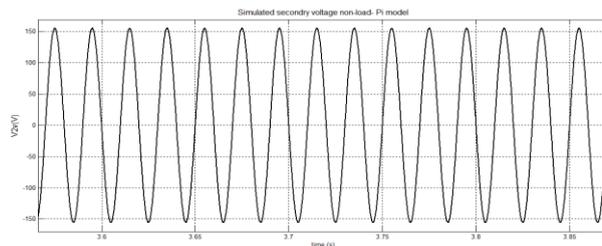


Fig. II.10 – Tension à vide secondaire-modèle Pi.

Les résultats obtenus avec ce modèle ne sont pas convaincants et restent assez loin de ceux expérimentaux. Ce qui nous a poussé à corriger le modèle en apportant une modification pour laquelle nous appelons le modèle II modifié.

II.2.4 Modèle II modifié

Compte tenu des résultats obtenus auparavant nous avons apporté des corrections au modèle II qui est une représentation réelle de la structure physique du transformateur. Ces corrections sont les suivantes :

1. Correction de l'identification des paramètres du modèle Pi, en introduisant le rapport de transformation m ou intervertissant des transformateurs sans l'introduction du rapport de transformation dans les paramètres du modèle.
2. Introduction du cycle d'hystérésis dans la branche magnétisante et la correction du paramètre modélisant des pertes à vide.

La correction des paramètres :

- Remplacer $(R_y = R_c = 2R_m)$ par $(R_y = R_c = 2m^2R_m)$, comme on introduit le cycle d'hystérésis, les résistances R_y et R_c présentent dans ce cas les pertes par courants de Foucault. Par conséquent, on remplace $(R_y = R_c = 2R_m)$ par $(R_y = R_c = 4m^2R_m)$.
- Remplacer le cycle d'hystérésis modélisé par la fonction $2\phi = f(i)$ par un cycle modélisé par la fonction suivante $2m^2\phi = f(i)$. Ces paramètres sont présentés dans le tableau II.3.

Tab. II.3 – Paramètres du modèle Pi modifié du transformateur monophasé

Paramètres du modèle Pi modifié	
$R_1(\Omega)$	0.6566
$R_2(\Omega)$	0.72466
$L_{sh}(mH)$	2.243
$R_y = R_c(\Omega)$	1936

La Figure II.11 présente le schéma de montage du modèle II corrigé avec les corrections cités précédemment. L'approximation de la courbe de magnétisation est présentée à la Figure II.12. Le courant d'enclenchement à vide du transformateur est présenté à la figure II.13.

Les Figures II.14 et II.15 représentent la tension secondaire à vide et les courants primaires à vide du transformateur, respectivement.

Transformateur Monophasé 2kVA modèle Pi modifié

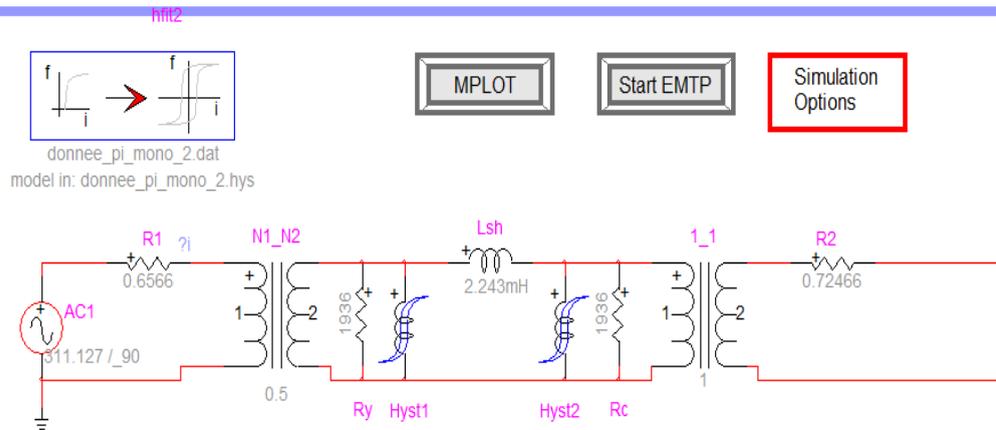


Fig. II.11 – Modèle Pi modifié.

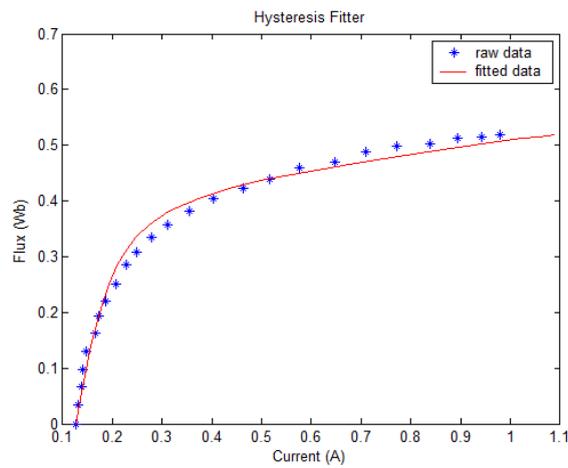


Fig. II.12 – Approximation de la courbe du cycle d’hystérésis.

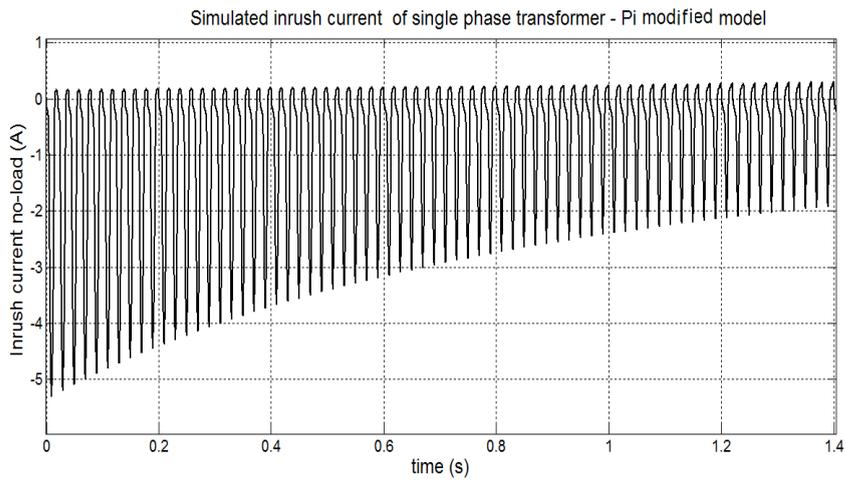


Fig. II.13 – Courant d'appel à vide simulé par le modèle II modifié.

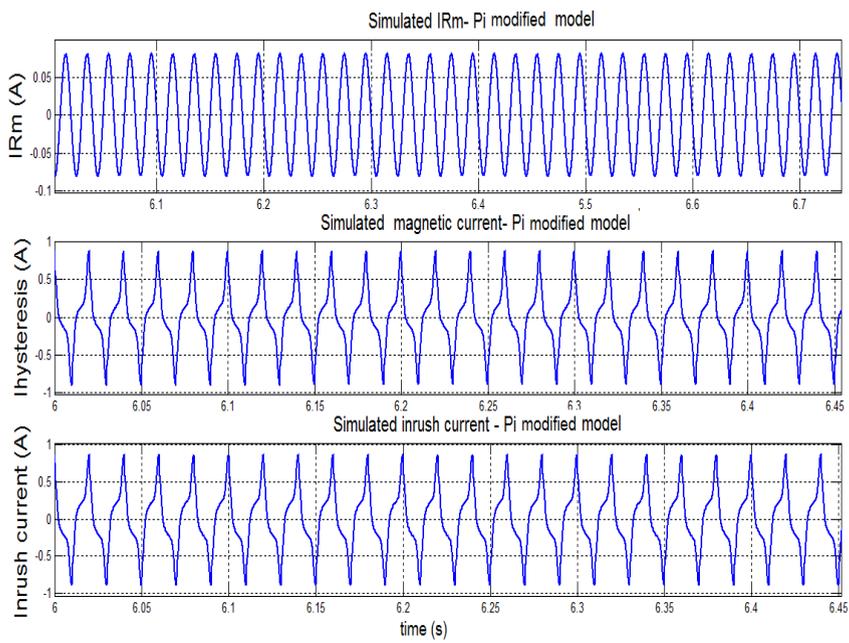


Fig. II.14 – Courants primaires simulés du modèle II modifié.

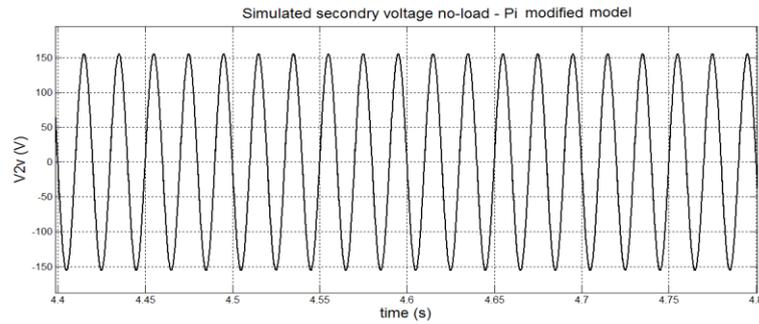


Fig. II.15 – Tension secondaire à vide-modèle Pi modifié

II.2.5 Comparaison

La figure II.16 présente une comparaison entre les courants d'appel (enclenchement) des différents modèles avec le relevé expérimental. La comparaison des courants magnétisants des différents modèles est également présentée à la figure II.17.

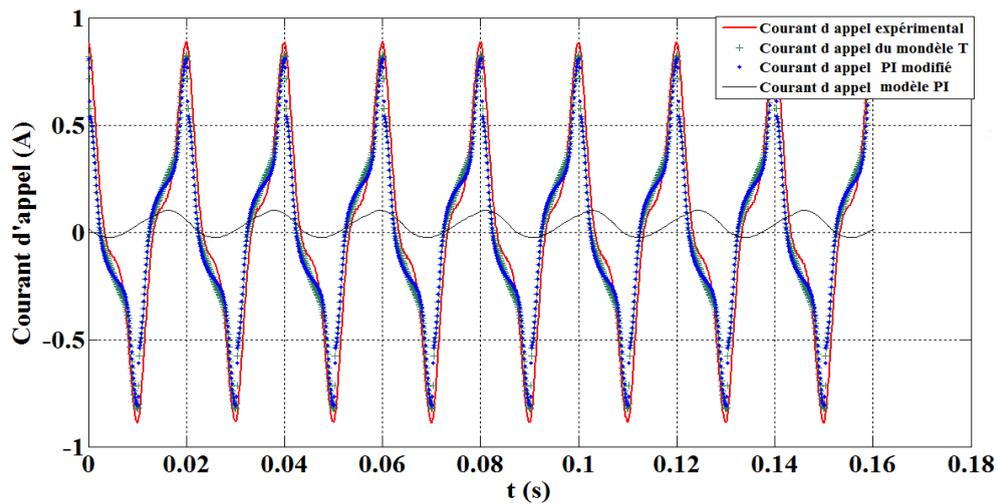


Fig. II.16 – Comparaison des modèles avec l'expérimentation-courant d'appel

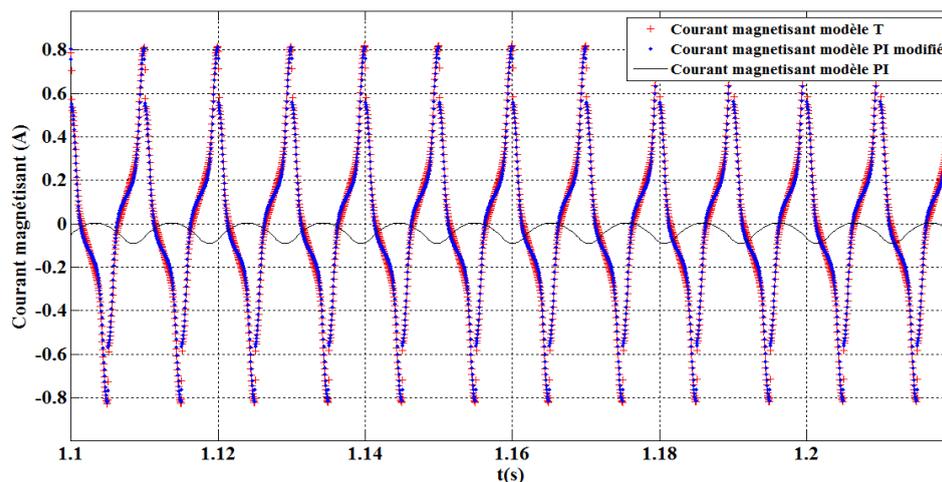


Fig. II.17 – Comparaison des modèles-courant magnétisant

II.2.6 Interprétation des résultats obtenus

D'après la comparaison effectuée, on remarque que le modèle II n'est pas juste et donne des résultats assez loin de ceux expérimentaux. Les corrections apportées au modèle Pi ont donné de meilleurs résultats, Figure II.16. Le courant d'appel du modèle II modifié est plus proche de l'expérimentation que celui du modèle T, sachant que le modèle T donne aussi de bons résultats.

Le courant magnétisant obtenu par le modèle II modifié coïncide avec le courant magnétisant du modèle T. Cependant, le courant magnétisant du modèle II est assez loin que les courants magnétisants du modèle T et du modèle II modifié. Finalement, on peut conclure que le modèle II modifié est aussi valable que le modèle T.

II.3 Modélisation du transformateur triphasé

II.3.1 Identification des paramètres du transformateur triphasé

Nous avons effectué des tests expérimentaux qui ont donné les résultats suivants : Les résistances des enroulements primaire et secondaire du transformateur triphasé sont : $R_1 = 0.881\Omega$; $R_2 = 0.340\Omega$

Tab. II.4 – Transformateur triphasé 3 kVA

Variable	Essai à vide	Essai en court-circuit
U_1 (V)	220	8
I_1 (A)	1.9	6.84
P_1 (pertes noyau) (W)	20	
P_1 (pertes enroulements) (W)		46
V_2 (V)	110	
I_2 (A)		7.9
$Q_1 = \frac{3V_1 I_1^2 - P_1^2}{3}$ (VAr)	1253.84	157.5833
Essai de la séquence zéro		
P(W)	I(A)	V(V)
100	5	145
	$R_o = 1.333\Omega$	$L_o = 31.54mH$

II.3.2 Modèle T

Nous avons conçu le modèle T présenté à la figure II.18 . Les caractéristiques non-linéaires des inductances L_{m1} , L_{m2} et L_{m3} introduites dans le modèle, sont présentées à la figure II.19.

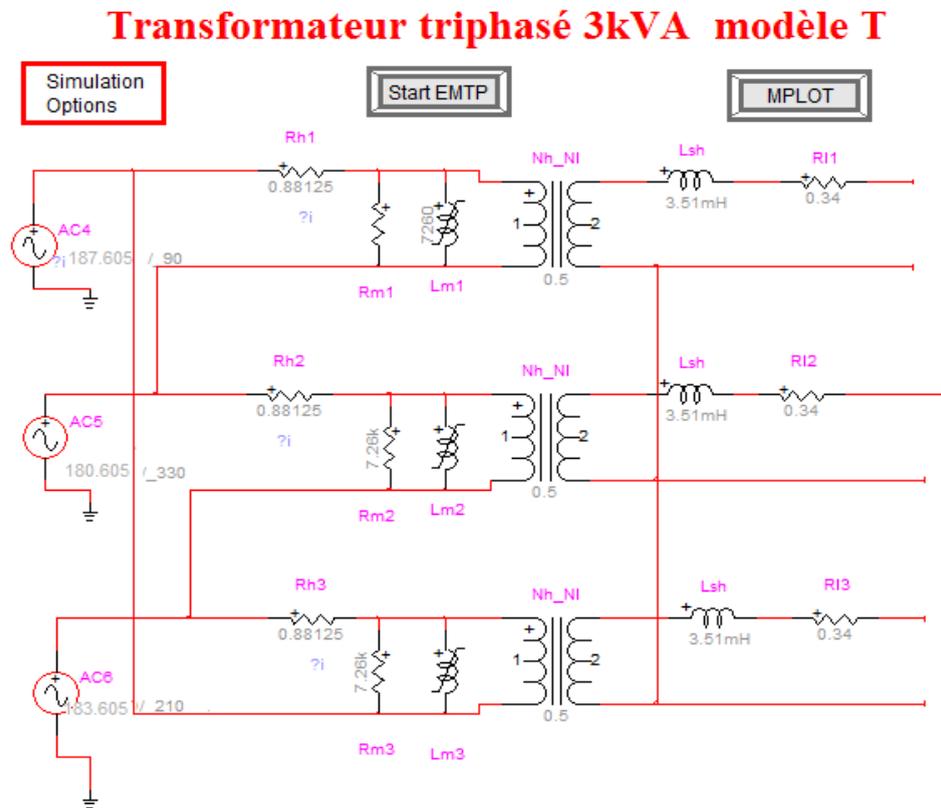


Fig. II.18 – Schéma de montage du modèle T pour le transformateur triphasé

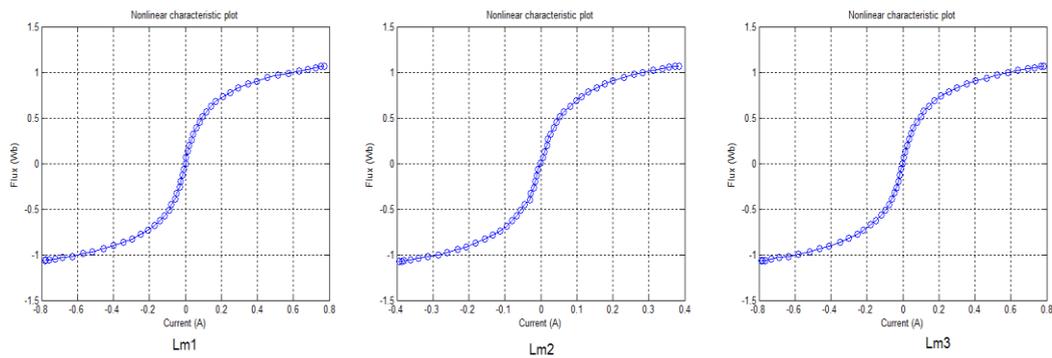


Fig. II.19 – Inductances non-linéaires

Les résultats des simulations effectués pour la modélisation du transformateur en T, sont présentés à la Figure II.20 pour les courants de ligne. Les courants de phase sont présentés à la Figure II.21. La figure II.22 présente les courants magnétisants.

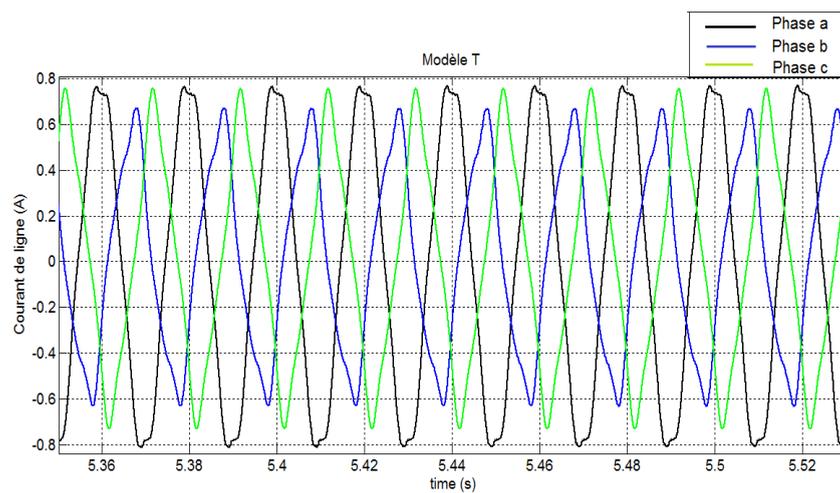


Fig. II.20 – Courants de ligne Modèle T

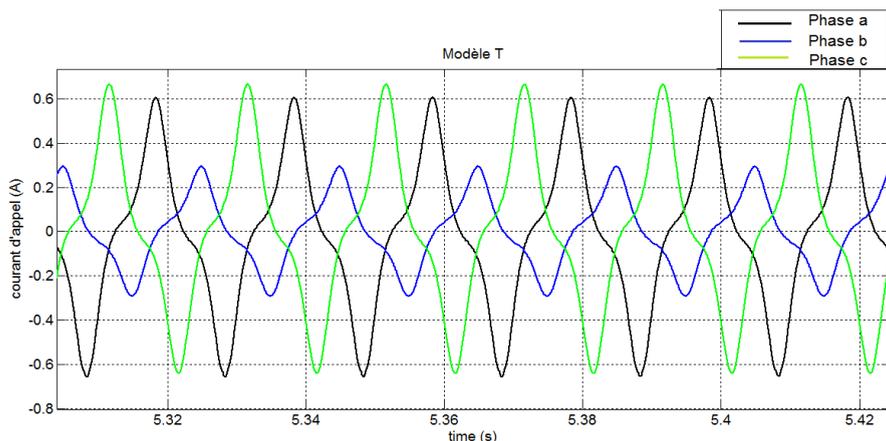


Fig. II.21 – Courants de phase Modèle T

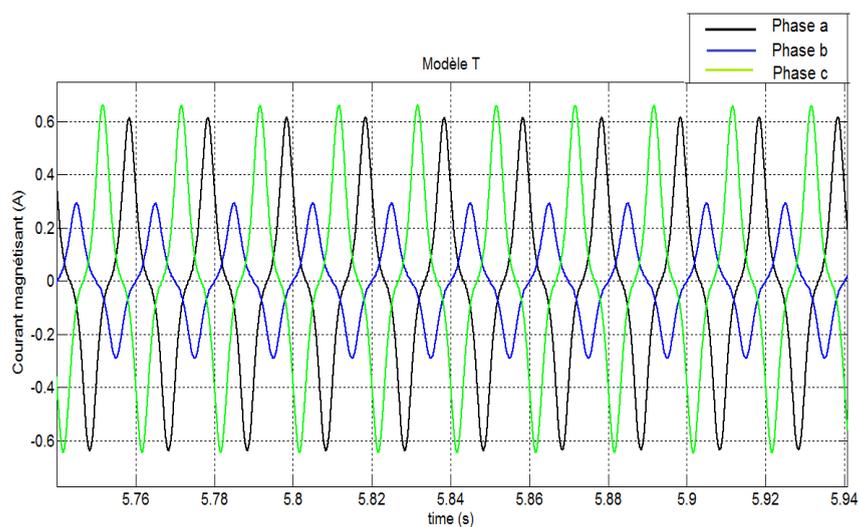


Fig. II.22 – Courants magnétisants Modèle T

II.3.3 Modèle II

Le schéma de modèle II est présenté à la Figure II.23. Les résultats de la simulation du modèle II sont présentés à la figure II.24, II.25 et II.26 pour les courants magnétisants, les courants de ligne et les courants d'enclenchement, respectivement.

Le modèle II du transformateur est un modèle basé sur la structure réelle du transformateur. Cependant, les courants magnétisants obtenus sont complètement loin des courants magnétisants réels chap.I.

Ces courants possèdent une forme sinusoïdale ainsi que les valeurs maximales de ces courants sont très faibles. Ceci peut être expliqué par le fait que le transformateur travaille dans la zone linéaire des branches magnétisantes. D'où, il est nécessaire de corriger l'identification des paramètres de ce modèle.

Transformateur triphasé modèle Pi

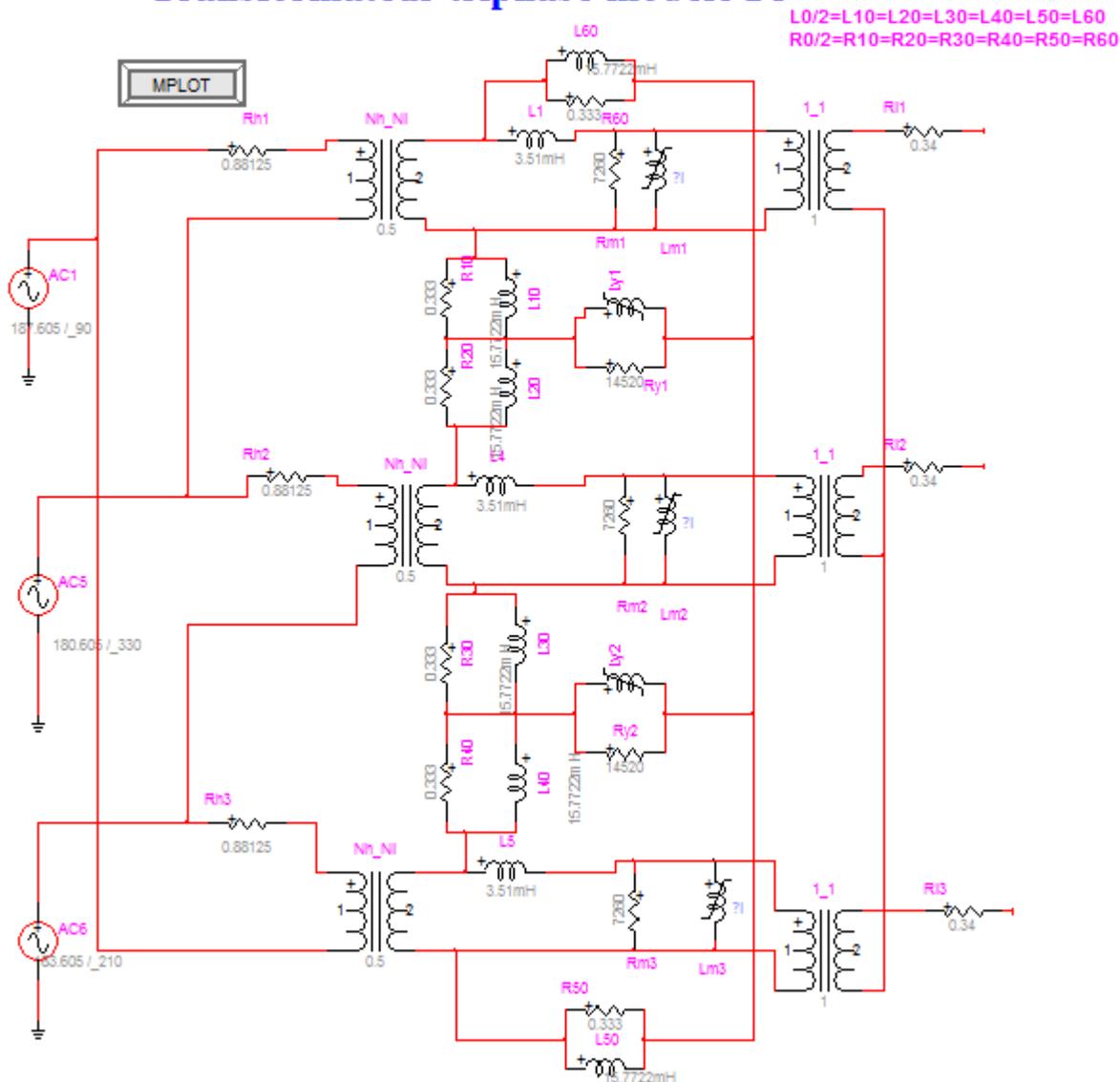


Fig. II.23 – Schéma de montage du modèle Pi pour le transformateur triphasé

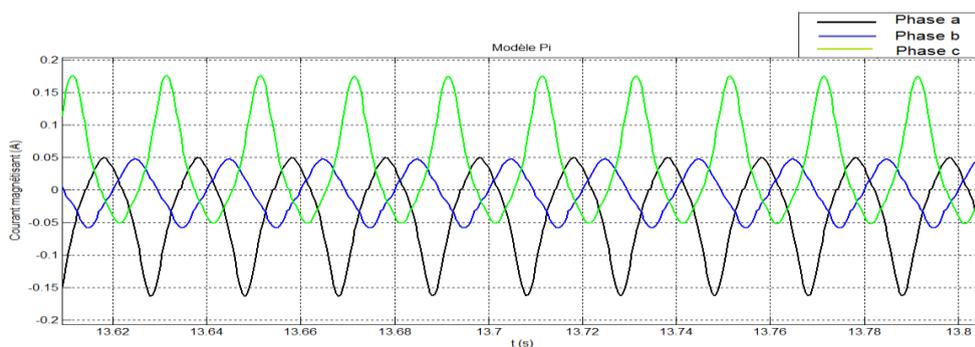


Fig. II.24 – Courants magnétisants Modèle Pi

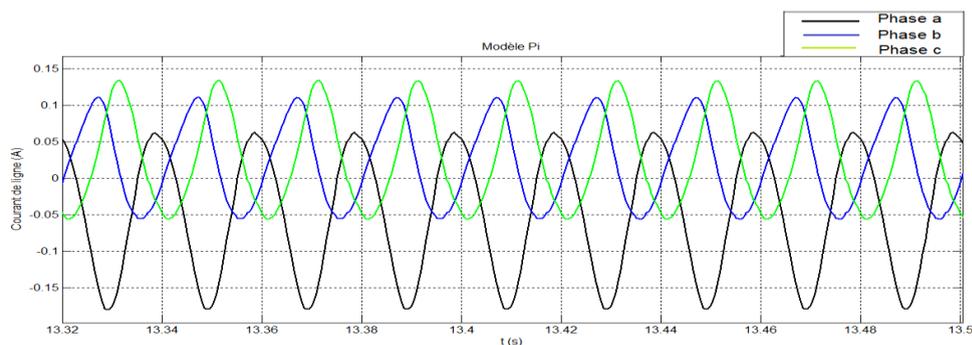


Fig. II.25 – Courants de ligne Modèle Pi

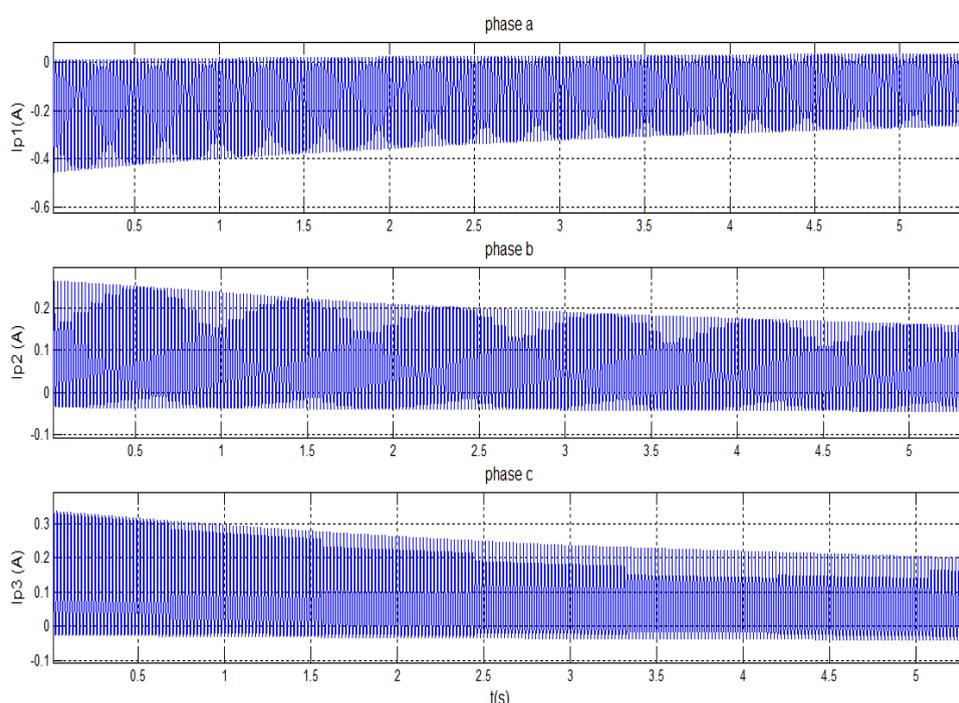


Fig. II.26 – Courants d'enclenchement Modèle Pi

II.3.4 Modèle en Π modifié

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que les résultats obtenus par le modèle Π nécessite une correction des paramètres. Dans ce modèle, l'identification de la branche magnétisante est déterminée par un essai à vide et par conséquent, un calcul de puissance primaire. Cette branche magnétisante est modélisée après un transformateur idéal de rapport de transformation ($m=0.5$). Or pour la correction, le rapport de transformation doit être introduit dans la branche magnétisante c.à.d remplacer (R_m et L_m) par ($m^2 R_m$ et $m^2 L_m$). Une deuxième solution à ce problème consiste à intervertir les deux transformateurs idéaux pour garder les mêmes paramètres de la branche magnétisante. Cependant, l'inductance L_{sh} déterminée par un essai en court-circuit doit être ramenée au secondaire c.à.d après le transformateur idéal de rapport de transformation m . Cette dernière correction est plus facile à mettre en œuvre. Le schéma du modèle Π modifié est présenté à la Figure II.27.

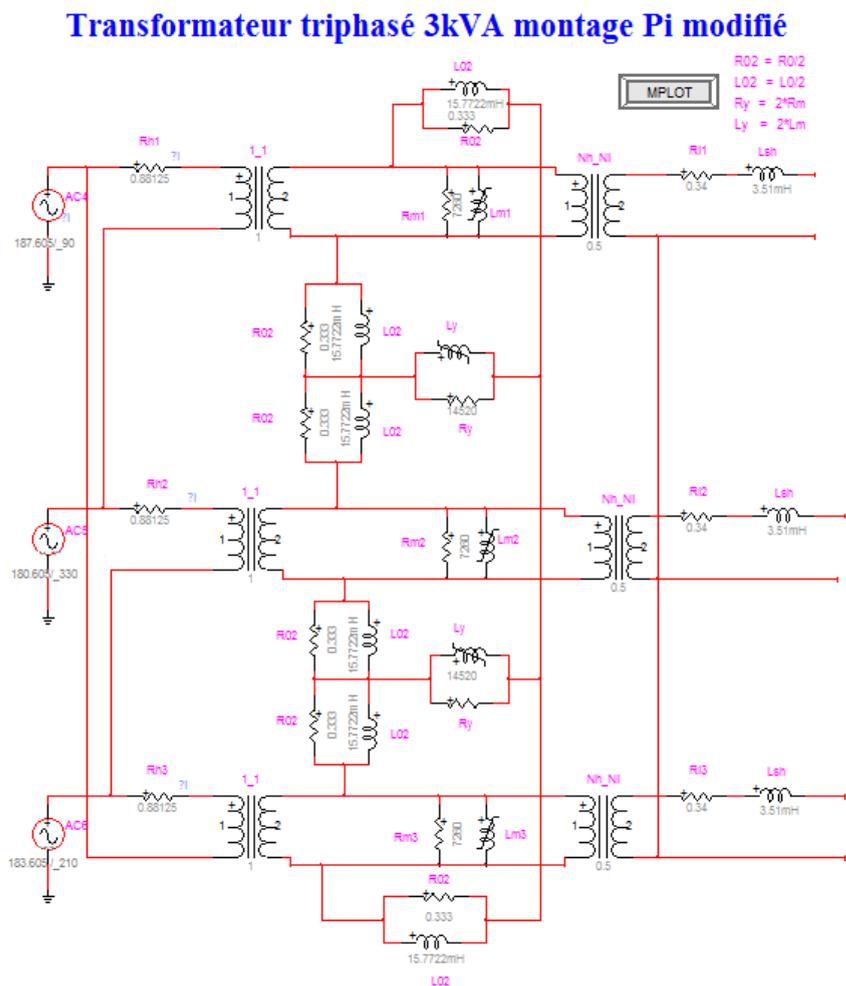


Fig. II.27 – Schéma de montage du modèle Pi modifié pour le transformateur triphasé

Les résultats de la simulation du modèle Pi modifié sont présentés aux figures II.28, II.29 et à la figure II.30 pour les courants magnétisants, les courants de ligne et les courants de phase respectivement. Ces résultats sont très proches des résultats expérimentaux et du modèle T.

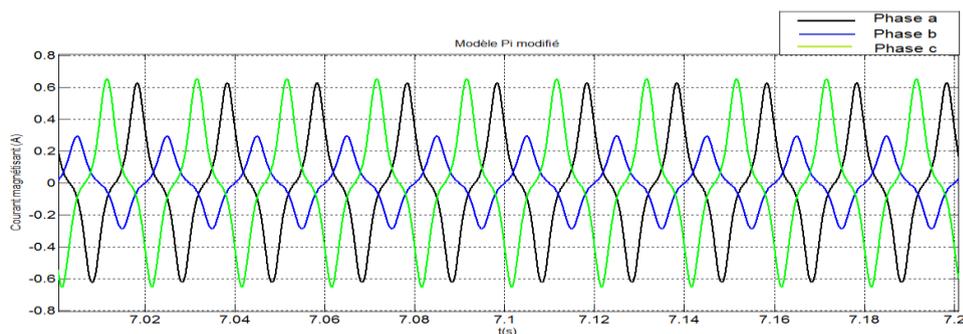


Fig. II.28 – Courants magnétisants du modèle Pi modifié

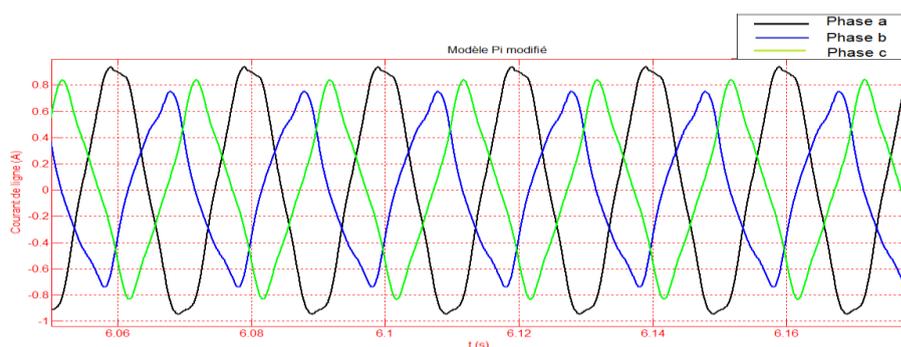


Fig. II.29 – Courants de ligne du modèle Pi modifié

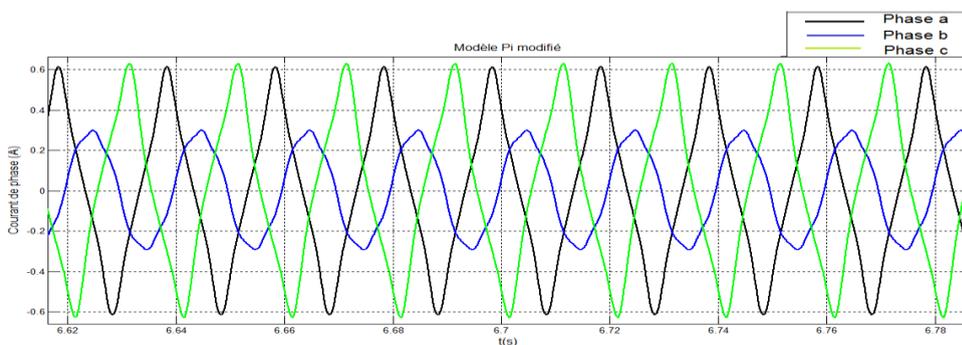


Fig. II.30 – Courants de phase du modèle Pi modifié

II.3.5 Comparaison des résultats obtenus

La comparaison entre les courants de ligne simulés et ceux expérimentaux est présentée à la figure II.13. On voit bien que le modèle Pi modifié se rapproche mieux du modèle T dans les phases b et c. Pour la phase a, la forme du courant de ligne du modèle T est proche du courant expérimental que du modèle Pi modifié mais possède un écart dans la valeur maximale. Par contre le modèle Pi est plus proche du courant expérimental, voir figure II.13. Dans cette comparaison on voit bien que les modifications apportées au modèle Pi donnent de très bons résultats et se rapprochent de ceux expérimentaux.

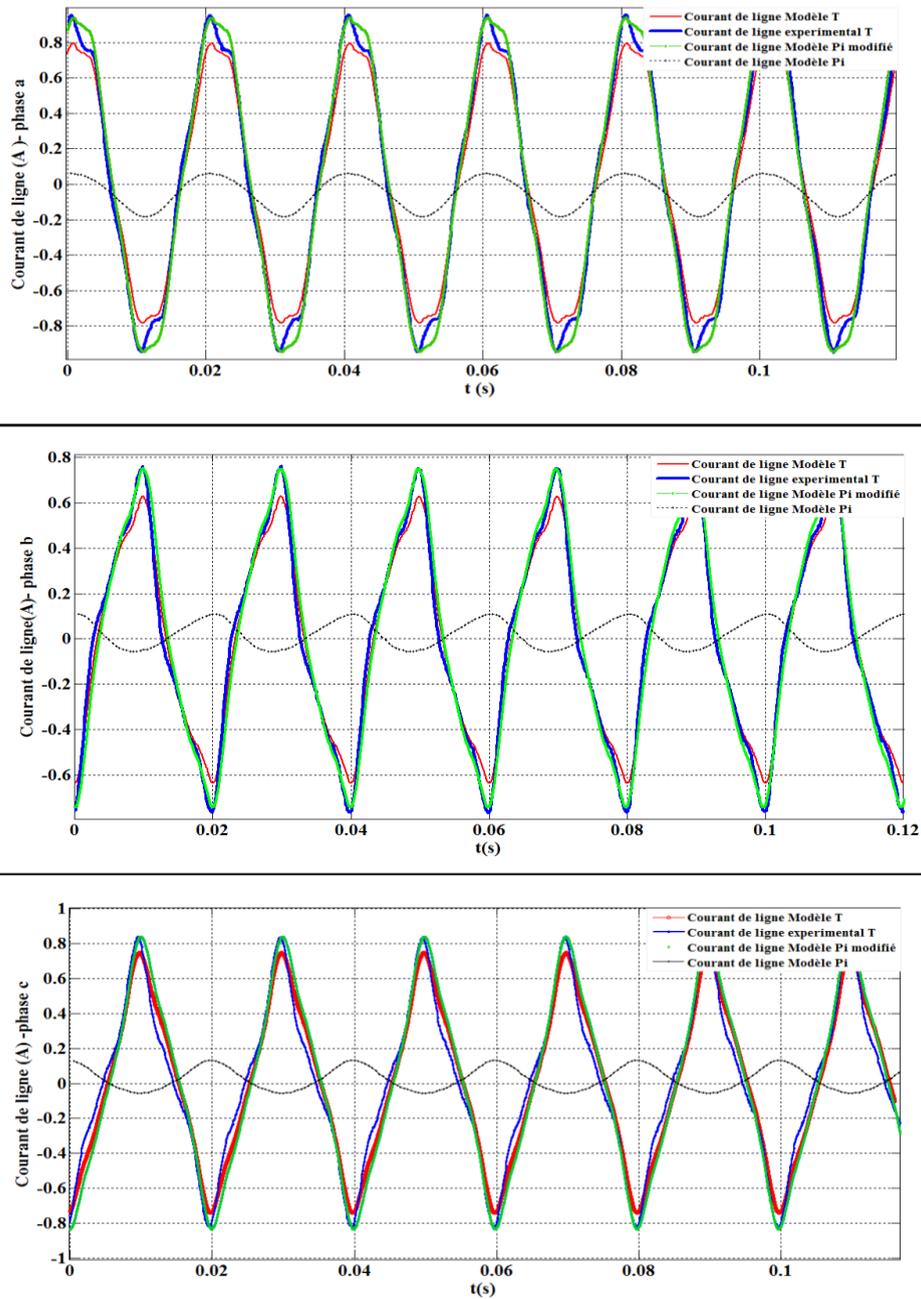


Fig. II.31 – Comparaison entre les courants de ligne simulés et les courants de ligne expérimentaux

II.3.6 Simulation des transitoires électromagnétiques rapides

Nous avons étudié seulement deux grandeurs physiques à savoir : La surtension et la surintensité.

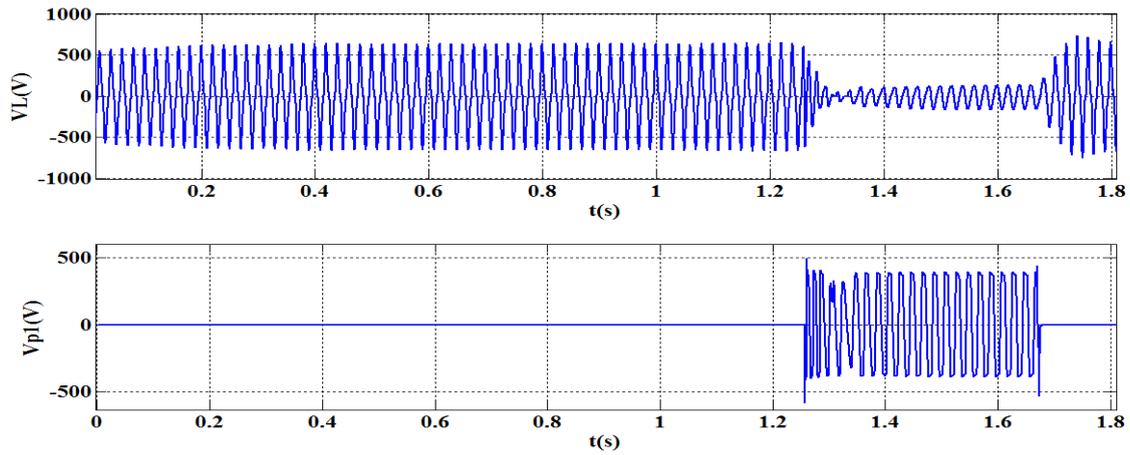
II.3.6.1 Surtension

Le tableau II.5 présente un récapitulatif de la comparaison de la surtension à 120V entre l'expérimentale et les modèles T et Pi modifié. Avant la fermeture de l'interrupteur, expérimentalement, la tension aux bornes de l'inductance est proche de la valeur de la tension V_{Lmax} du modèle Pi. Après la fermeture de l'interrupteur, la bobine libère toute l'énergie emmagasinée et se décharge dans la capacité, la valeur maximale de la tension après la décharge est de 131,86 . Cette valeur de la tension est retrouvée dans le modèle II. Il en est de même pour la tension primaire aux bornes du transformateur où le modèle Pi est encore plus proche que le modèle T. Le pic de la surtension aux bornes du transformateur est de 586.54 V, cette tension est inférieure au pic de la surtension obtenu dans le modèle II. Par contre dans le modèle T, la tension aux bornes du transformateur atteint 1kV, ce qui est très loin de l'expérimentation. Il faut noter également que lors de la simulation du modèle T, la tension aux bornes du transformateur n'est pas égale à zéro après l'ouverture de l'interrupteur, figure II.32.

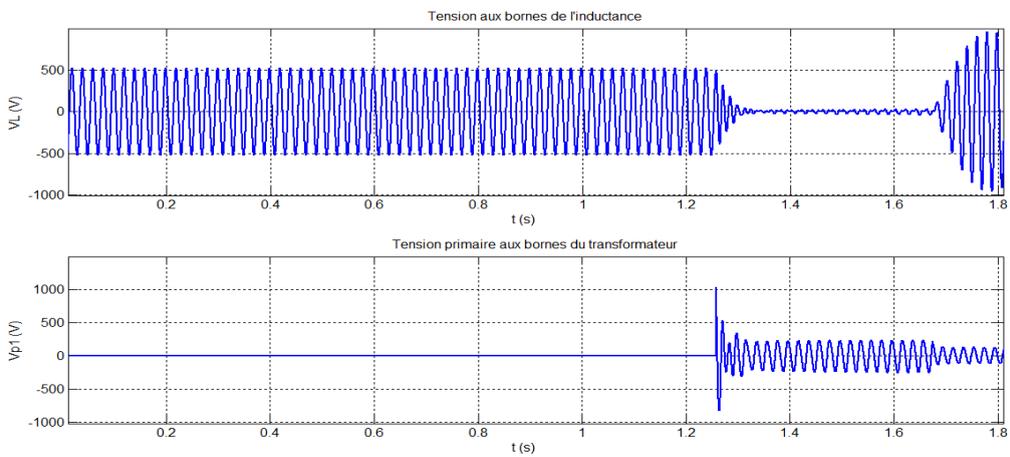
En conclusion, en surtension le modèle T n'est pas valable. Le modèle II modifié donne de bons résultats. Les circuits de la simulation du modèle T et Pi pour la surtension à 120V sont présents en Annexe.

Tab. II.5 – Récapitulatif de la comparaison de la surtension à 120V

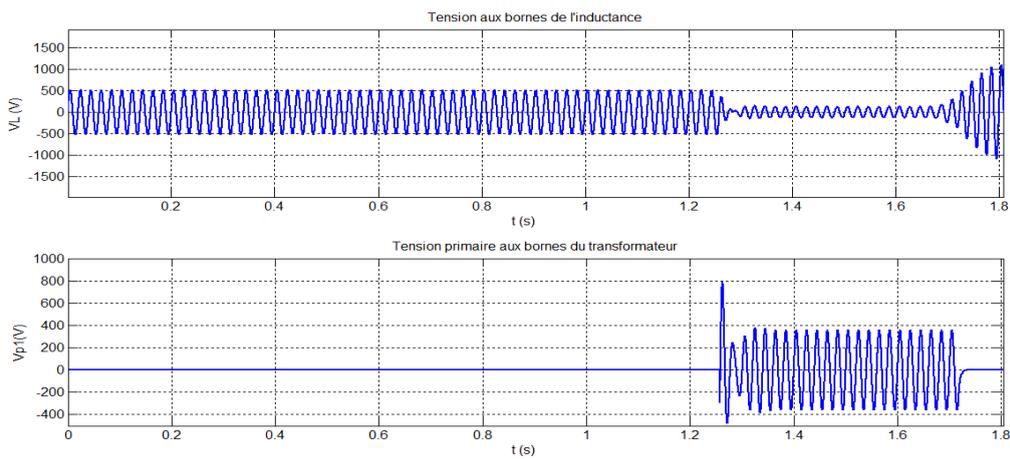
	Avant la surtension		Après la surtension		Pic de la surtension (V)
	$V_{Lmax}(V)$	$V_{Ipmax}(V)$	$V_{Lmax}(V)$	$V_{Ipmax}(V)$	
Expérimental	640.75	0	131.86	395.1	586.54
Modèle T	520	0	19.25	224	1000
Modèle Pi modifié	521.5	0	133.1	359.568	794.2



(a) Expérimental



(b) Modèle T



(c) Modèle Pi modifié

Fig. II.32 – Surtension à 120V

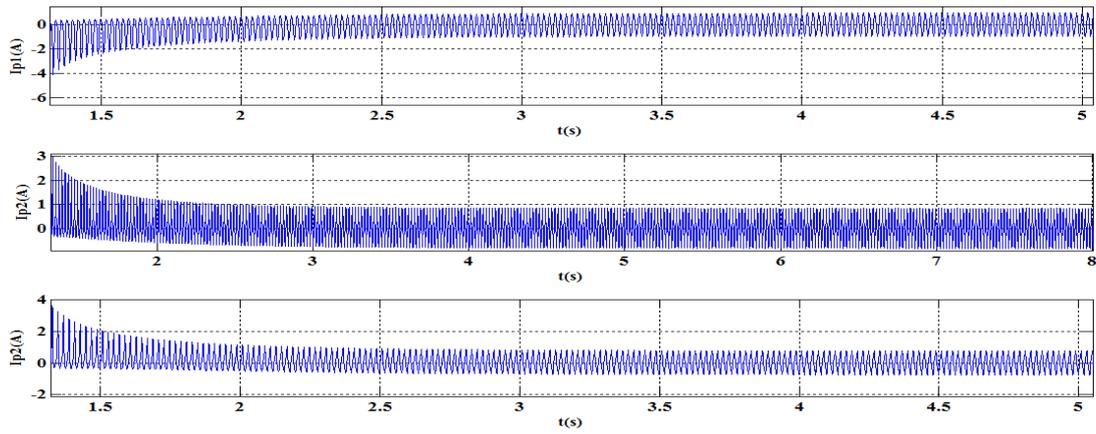
II.3.6.2 Surintensité

Courants d'enclenchement

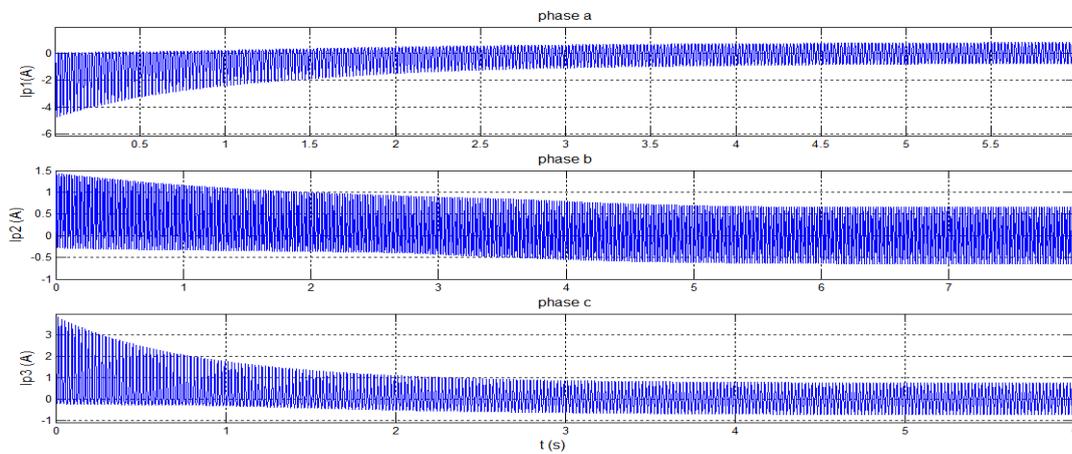
Les courants d'enclenchement à vide par phase du modèle T, Π modifié et ceux expérimentaux sont présentés à la figure II.33. La forme de ces courants d'enclenchement obtenus par le modèle T et le modèle Π sont proches des courants expérimentaux. Le modèle Π modifié est également très proche de l'expérimentation que du modèle T, le Tableau II.6. On remarque que les durées du régime transitoire obtenues par le modèle Π sont voisines des durées du régime transitoire expérimental. Il en est de même pour le rapport $\frac{I_{p_{o_{max}}}}{I_{p_o}}$.

Tab. II.6 – Récapitulatif de la comparaison des courants d'enclenchement à vide

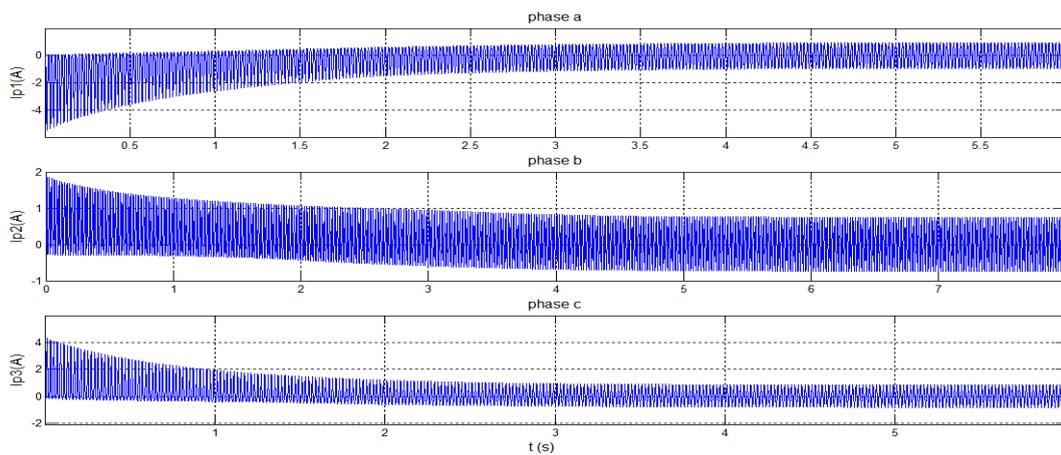
	$\frac{I_{p_{o_{max}}}}{I_{p_o}}$		
	phase a	phase b	phase c
Expérimental	4.625	3.52	4.74
Modèle T	6.1	2.17	5.08
Modèle Pi modifié	5.81	2.41	5.09
	$\Delta t_{RT} (s)$		
	phase a	phase b	phase c
Expérimental	3.672	6.678	3.673
Modèle T	5	8	4.5
Modèle Pi modifié	4.5	8	4.5



(a) Expérimental



(b) Modèle T



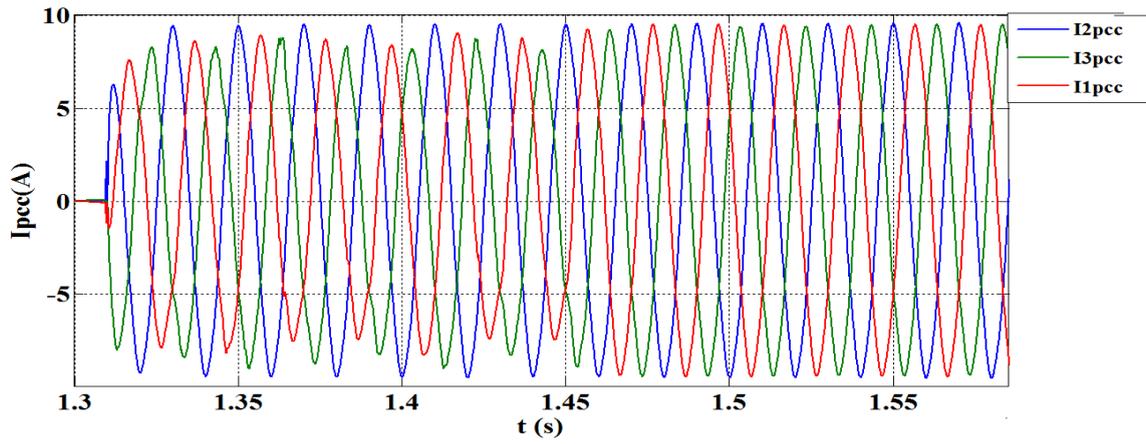
(c) Modèle Pi modifié

Fig. II.33 – Courants d'enclenchement à vide

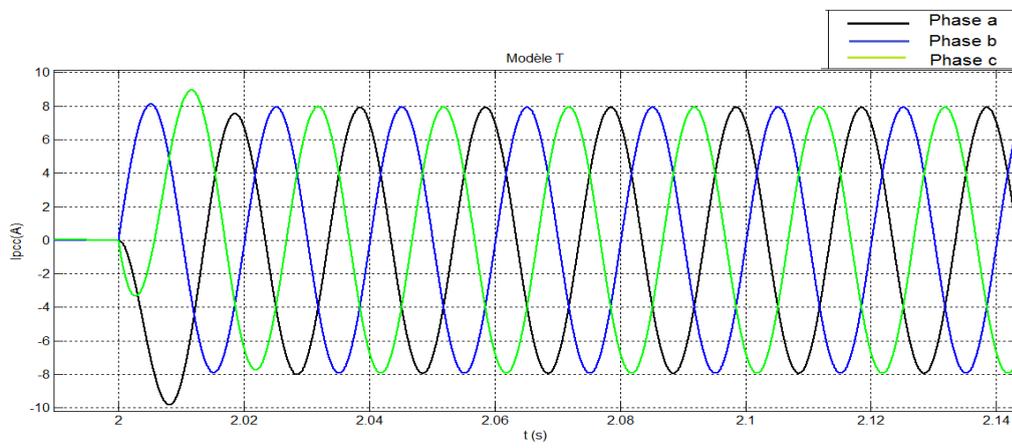
Court-circuit triphasé brusque

Les courants de court-circuit obtenus expérimentalement ainsi que ceux des modèles T et Pi corrigé

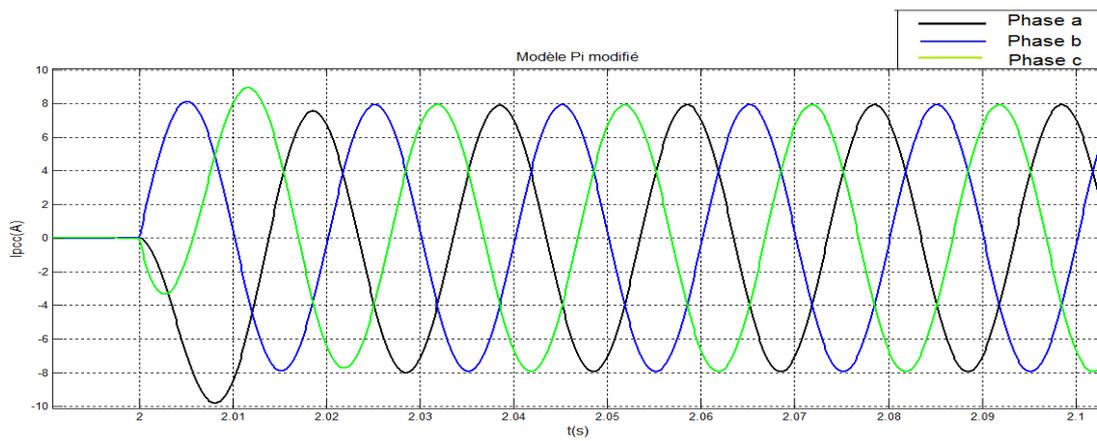
sont présentés à la figure II.34. Contrairement à l'enclenchement du transformateur, le noyau atteint rapidement le régime permanent. Ceci peut être expliqué par la faible valeur du courant de court-circuit dans le noyau, par contre dans la simulation des modèles T et II corrigé, les courants de court-circuit des colonnes d'extrémités passent par un pic de -10 A et 8.9 A pour les phases a et c ,respectivement, pour atteindre 8A dans le régime permanent. Le régime transitoire dans ces deux phases a et c est de 50 ms et 57 ms respectivement. Cependant, le régime transitoire des courants de court-circuit est de 160 ms pour les colonnes d'extrémité et de 40 ms pour le noyau. Le courant maximal de court-circuit en régime permanent est de 9.75 A.



(a) Expérimental



(b) Modèle T



(c) Modèle Pi modifié

Fig. II.34 – Courants primaires de court-circuit

II.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons vu que le modèle Π est basé sur le principe de la dualité, et par suite sur la structure physique d'un transformateur bien défini. Nous avons également vu que les corrections apportées au modèle Π monophasé et triphasé donnent des résultats proches de ceux expérimentaux. Les modèles en T monophasé et triphasé sont valables en régime permanent, et non dans les transitoires électromagnétiques rapides. Ce qui n'est pas le cas du modèle Π corrigé qui donne de meilleurs résultats.

Nous avons introduit dans les modèles T et Π du transformateur monophasé, le cycle d'hystérésis obtenu par expérimentation grâce à deux dispositifs disponibles dans le logiciel EMTP : le premier est un modèle d'hystérésis appelé "Hysteresis Fitter" qui permet de générer le cycle d'hystérésis à partir des données expérimentales. Le second est une inductance à cycle d'hystérésis appelée "Hysteretic reactor device", qui fonctionne à partir du cycle d'hystérésis généré par le premier dispositif. Cette utilisation des cycles d'hystérésis en monophasé a permis d'obtenir de bons résultats.

Dans le modèle T et Π du transformateur triphasé, nous avons évité d'utiliser ces deux dispositifs cités précédemment à cause des contraintes d'approximation des cycles du logiciel EMTP. Par contre, nous avons modélisé les branches magnétisantes par des inductances non-linéaires fonctionnant avec la moyenne du cycle d'hystérésis.

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'études nous avons mené des études de modélisation et d'analyse sur les transformateurs monophasé et triphasé. Les transformateurs jouent un rôle très important dans les réseaux électriques. C'est pourquoi, notre modélisation a été élaborée et vérifiée en utilisant un Logiciel d'analyse des grands réseaux électriques connu sous le nom de l'EMTP.

Nous avons mené des tests d'expérimentation sur des transformateurs de Laboratoire. Les cycles d'hystérésis, les phénomènes transitoires électromagnétiques rapides, le déséquilibre et la saturation ont été observées expérimentalement, en dépit du fait que certains tests sont très dangereux à exécuter du fait que lors des surtensions exagérées et des surintensités le transformateur risque sa destruction. Nous avons également utilisé des modèles du Logiciel EMTP que nous avons corrigés eu égard aux choix des transformateurs utilisés dans la librairie du Logiciel.

Les modèles T et Pi du transformateur monophasé sont introduits dans le Logiciel EMTP. Aussi, le cycle d'hystérésis obtenu par expérimentation grâce à deux dispositifs disponibles dans le logiciel EMTP : le premier étant un modèle d'hystérésis appelé "Hysteresis Fitter" qui permet de générer le cycle d'hystérésis à partir des données expérimentales. Le second est une inductance à cycle d'hystérésis appelée "Hysteretic reactor device", qui fonctionne à partir du cycle d'hystérésis généré par le premier dispositif.

Cette utilisation des cycles d'hystérésis en monophasé et les corrections effectuées sur le modèle ont permis d'obtenir des résultats probants.

Nous avons également étudié le déséquilibre du transformateur triphasé de laboratoire par l'utilisation de deux méthodes dont l'une est basée sur les composantes symétriques et l'autre appelée FPEM. Au vu de ce travail nous pouvons dire que notre contribution réside dans les corrections que nous avons portées sur les modèles des transformateurs monophasé et triphasé du Logiciel EMTP. Cependant, lors des études des phénomènes transitoires électromagnétiques rapides caractérisés par trois grandeurs, à savoir : la tension, le courant et la fréquence, nous n'avons tenu compte que de deux grandeurs physiques. La troisième qui est la fréquence doit faire l'objet des études de résonance.

Annexes

Transformateurs

Plaque Signalétique Transformateur Monophasé

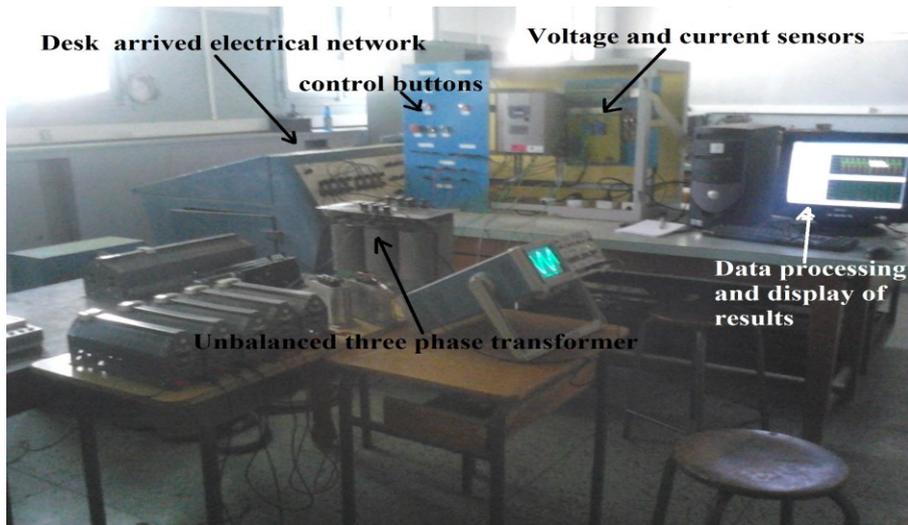
Transformateur monophasé		Réf R R 3008 ALSTOM
Primaire	220 V –	
Secondaire	110 V	
Puissance	2 kVA	

Plaque Signalétique Transformateur Triphasé

Transformateur triphasé ($\Delta \mathbf{f}$)		Réf R R 1726/2 ALSTOM
Primaire	220 V Δ – 380 V \mathbf{f}	
Secondaire	190 V Δ – 110 V \mathbf{f}	
Puissance	3 kVA	

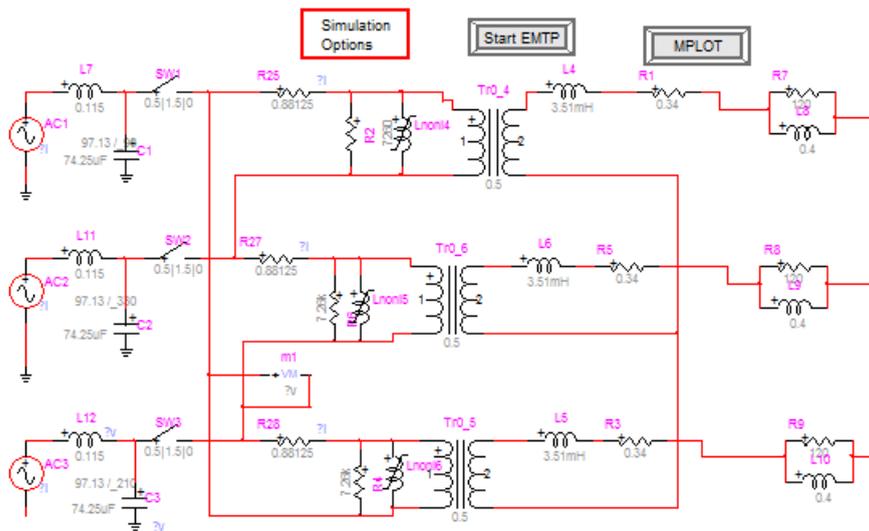
Plaque signalétique des charges utilisées pour les essais

Charge monophasée	ETS CH Suter-Paris-n° 239596	Volts= 110V	Amp= 3/30 A	r=38.8 ohms
Charge triphasée	ETS CH Suter-Paris-n° 2472	Volts= 220V	Amp=1-5/15	

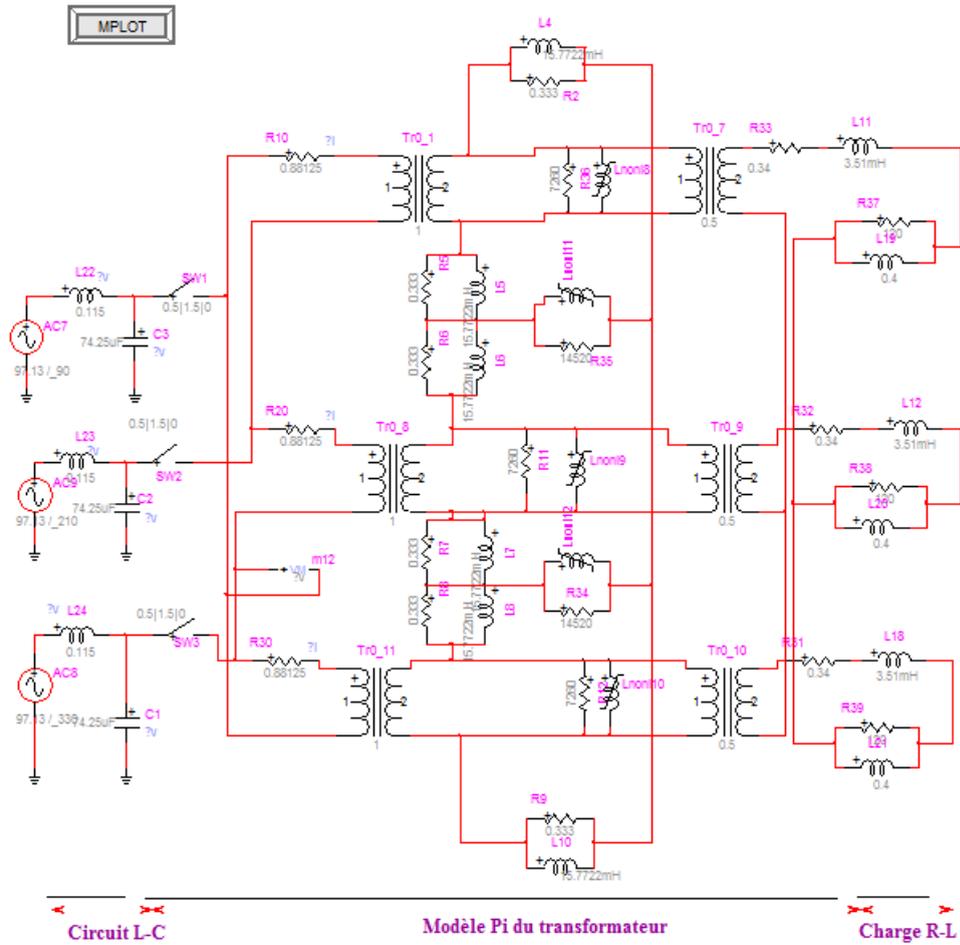


Banc d'essai

Montage de surtension à 120V du transformateur triphase-modèle T



Montage de surtension à 120V du transformateur triphase-modèle PI



Bibliographie

- [1] Jean Chatelain. *Machines Électriques*, volume X. Presses Polytechniques Romandes, 1989.
- [2] Adam Semlyen Francisco de Leon. Complete transformer model for electromagnetic transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9(No. 1) :pp : 231–239, January 1994.
- [3] L.Rabins. Transformer reactance calculations with digital computers. *AIEE Transactions*, Vol.75(Pt.I) :pp.261–267, July 1956.
- [4] P.L Fergestad and T. Hemriksen. Inductances for the calculation of transient oscillation in tranafomer. *IEEE Transations on Power Apparatus and Systems*, Vol PAS-93 :pp. 510–517, March/April 1974.
- [5] L.P. Blume. *Transformer engineering*. Second Edition, John Wdey and Sons, 1951.
- [6] E. Colin Cherry. The duality between interlinked electric and magnetic circuits and the magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuits. *Proc. of the physical Society*, Vol. (B) 62, Feb 1949.
- [7] A.O. Soysal and A. Szmylen. Practical transfer function estimation and its application to wide frequency range representation of transformers. SM 358-2 PWRD presented at the 1992 IEEE/pEs Summer Meeting, (No. 92) :pp. 101–111.
- [8] F.A. Fuad N.A. Demerdash, T.W. Nehl and O.A. Mohammed. Expetimental verification and application of the three dimensional finite element magnetic vector potential method in electrical apparatus. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100(No. 8) :pp. 4112–4122, August 1981.
- [9] M. Kostenko et L. Piotrovski. *Machines Électriques*, volume I. Edition MIR MOSCOU, 1979.
- [10] L. Kaci F. Aboura. *Étude De La Qualité D'énergie Électrique Pour Des Charges Non Linéaires*. Projet de fin d'études, Juin 2012.