

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

De fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
De Master Académique
Spécialité : Machines électriques

Thème

**Influence du régime de neutre sur les
surtensions dans un enroulement de
transformateur sur matlab simuling**

Préposé et dirigé par :

M^r : T.Otmane cherif

présenté par :

M^r: HELAL BRAHIM

M^r: LOUNIS DJAMEL

Promotion 2012/2013

Remerciements



*Nous tenons à exprimer notre
profonde gratitude à monsieur T.Otmane cherif
Pour sa grande disponibilité lors de nos différentes
sollicitations et aussi pour ses précieux conseils
pour l'élaboration de ce projet.*

*Nous remercions l'ensemble des membres du jury
qui nous ferons l'honneur d'examiner notre travail.
Et un grand merci à tous les enseignants qui ont
contribué à notre formation.*

*Nos remerciements et nos respects s'adressent
au personnel de L'Entreprise Electro-industries.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre
reconnaissance à tout ceux et celles qui ont
contribué de près ou de loin à l'élaboration et la
finalisation de ce mémoire*

Merci à tous.

**M^r Helal Brahim
M^r Lounis Djamel**





Dédicaces

Nous tenons à dédier ce modeste travail à tous ceux qui nous sont très chers :

- *A nos très chers parents qui nous soutenue, encouragés, aidés durant toute notre vie que dieu les gardes pour nous, on leurs souhaite une longue vie ;*
- *A nos très chers frères et sœurs ;*
- *A tous nos amis (es) ;*
- *A tous le département ainsi notre section d'électrotechnique.*



M^r Lounis Djamel
M^r Helal Brahim

Le Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les transformateurs et les surtensions	
I.1. Généralités sur les transformateurs et les surtensions	2
I.1.1 Introduction	2
I.1.2. Constitution générale	2
I.1.2.1. La partie active	2
I.1.2.2. La partie constructive	2
I.1.3. Mode de couplage des enroulements	6
I.1.4 principe de fonctionnement d'un transformateur	7
I.1.5. Principaux types de transformateurs	8
I.2. Généralités sur les surtensions	11
I.2.1. Introduction	11
I.2.2. Surintensités	12
I.2.2.1. Causes des surintensité	12
I.2.3. Les surtensions	13
I.2.3.1. Nature des surtension	13
I.2.4. Classification des coups de foudre	14
I.2.5. Propagation de l'onde de surtension	15
I.2.6. Causes des surtensions	17
Chapitre II : Phénomènes transitoires dans les transformateurs lors d'une surtension	
II.1. Introduction	20
II.2. Equation de circuit	21
II.3. Répartition de tension le long d'un bobinage dont le neutre est mis à la terre	23
II.3.1. Hypothèses simplificatrices	23

II.3.2. Répartition initiale de la tension	24
II.4. Phénomène transitoire de la tension	28
Conclusion.....	30

Chapitre III : Différents modèles d'études

III.1.introduction	31
III.2. Modèle de Morched	31
III.3. Modèle de Leon	32
III.4. Modèle de Chimklai	33
III.5.Modèle de Gustavsen	35
III.6. Modèle d'Andrieu	35
III.7.Modèle de Noda.....	36
III.8. Le modèle d'E.M.T.P	37
III.9. Le modèle de RESEL	39
III.10. Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles	40
Conclusion	41

Chapitre IV :Calcul des paramètres du transformateur

IV. Calcules des paramètres du transformateur.....	42
IV.1. Caractéristiques du transformateur	42
IV.1.1. Caractéristiques électriques.....	42
IV.1.2. Caractéristiques géométriques.....	42
IV.2. Relations empiriques pour le calcul des paramètres.....	43
IV.2.1. Détermination de la résistance R.....	43
IV.2.2. Calcul numérique de la résistance R1	44
IV.2.2.1. Pour l'enroulement primaire.....	45
IV.3. Détermination des inductances propres L et mutuelles M.....	45

IV.3.1. Relations empiriques pour le calcul des inductances propres L et mutuelles M	45
IV.3.2. Calcul numérique des inductances propres L et mutuelles M	46
IV.3.2.1. Calcul des inductances propres L	46
IV.3.2.1.1. Pour l'enroulement primaire	46
IV.3.2.2. Calcul des inductances mutuelles M	46
IV.3.2.2.1. Calcul de la mutuelle entre les éléments de l'enroulement HT	49
IV.4. Détermination des capacités transversales C et longitudinales K	50
IV.4.1. Relation empirique pour le calcul des capacités C et K	50
IV.4.2. Calcul numérique des capacités transversales C et longitudinale	51
IV.4.2.1. Calcul des capacités transversales C	51
IV.4.3. Calcul le capacité longitudinale K des enroulements primaire	51
IV.4.3.1. Pour le primaire	52

Chapitre V : Modélisation et analyse des résultats de simulation

V.1.Introduction	54
V.1.1. Equation électriques de l'enroulement	54
V.1.2.mise en équation du circuit électrique	54
V.1.2.1.Pour les tensions	54
V.1.2.2.Pour les courants	55
V.2.Modélisation et simulation de l'onde de choc (1.2/50us) sur MATLAB 7.8.0.	56
V.3. Simulation de l'ensemble enroulement et onde sur MATLAB SIMULINK	57
V.4.Analyse des résultats de la simulation	58
V.4.1. Interprétation des résultats	59
Conclusion générale	61

Annexes

Bibliographie

Introduction :

Ces dernières années, le marché de l'énergie est devenu très compétitif. Afin de limiter les coûts, les fournisseurs d'électricité sont souvent contraints de réduire leurs investissements en utilisant des équipements vieillissants et en surchargeant les transformateurs de puissance. Ces transformateurs sont dangereux car ils contiennent une quantité importante d'huile en contact direct avec des éléments haute tension. Par conséquent, les explosions de transformateurs sont de plus en plus fréquentes. Elles résultent pour la plupart en incendies entraînant des pertes économiques élevées et des risques importants de pollution. Pour toutes ces raisons, les explosions de transformateurs et leur prévention sont devenues un enjeu industriel majeur.

Il existe plusieurs types de transformateurs, mais dans notre étude, nous nous intéresserons aux transformateurs de puissances, vu le grand intérêt qu'ils présentent dans le développement en interconnexion des réseaux électriques.

Les réseaux électriques sont l'objet à la fois des surtensions internes et externes et les transformateurs sont les éléments les plus affectés. Les surtensions internes sont créées par des modifications brutales des variables à l'intérieur du réseau, et les surtensions externes par des décharges d'origine atmosphérique. Ces surtensions sont connues pour le danger et les dégâts, qu'elles peuvent causer comme la mise hors service du réseau électrique, par conséquent, elles occasionnent d'énormes pertes financières.

Afin d'éviter les dangers dus aux surtensions, différents dispositifs de protection sont mis en évidence à savoir les parafoudres et les éclateurs qui ont pour rôle d'évacuer les courants engendrés par ces surtensions vers la terre.

Notre étude se portera sur les enroulements du transformateur de puissance lorsqu'ils sont traversés par une surtension.

Pour faire ce travail, nous allons établir le modèle mathématique qui calcul avec une bonne précision les effets de l'onde de surtension sur les enroulements du transformateur. Pour cela nous allons tenir compte du schéma équivalent à constantes localisées et à paramètres constants, par la suite nous allons procéder à la détermination des paramètres du schéma de calcul.

A partir de ce schéma nous allons établir des équations différentielles, ainsi nous obtiendrons un modèle mathématique très complexe. Pour sa résolution on a fait appel à un logiciel de simulation (Matlab Simulink)

Notre objectif est de faire une simulation dans l'environnement de **Matlab** afin de montrer l'influence des régimes du neutre sur les surtensions dans l'enroulement HT d'un transformateur.

I.1. Généralités sur les transformateurs

I.1.1. Introduction :

Le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline, car c'est une machine de base pour le transport d'énergie électrique. En effet c'est un convertisseur statique très robuste à induction, couplé et destiné à la conversion d'un système de courant variable en un ou plusieurs systèmes de courants variables d'intensités et de tension généralement différentes mais de même fréquence [FRANC 33].

L'ancêtre du transformateur est le « générateur secondaire » imaginé par l'Anglais J.D.Gibbs et le Français L.Gaulard et construit à L'ondres en 1883. La première transmission électrique en courant alternatif utilisant des machines de ce type est réalisée par Gaularde en 1884 entre l'exposition de Turin et la gare de Lanzo distante de trente-sept kilomètres. Trois ingénieurs Hongrois, M. Deri, O. Blathy et K. Zibernowsky, qui assistent à cette exposition, remarquent les graves imperfections du générateur secondaire, notamment son circuit magnétique ouvert . Il conçoivent en 1885 le transformateur sous une forme qu'il a pratiquement conservée de nos jours [ENCYC 73].

I.1.2. Constitution générale :

Le transformateur est un appareil d'induction qui est composé de deux(2) parties principales qui sont :

I.1.2.1. Partie active :

Constitué essentiellement du circuit magnétique, électrique. Elle est destinée à la conversion d'énergie électrique.

I.1.2.2. Partie constructive :

Destinée à assurer l'isolement et la fixation de la partie active.

❖ Partie active :

a) Le noyau (Circuit magnétique)

Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôle d'acier de bonne qualité, de plus pour minimiser les pertes dans le fer, les tôles utilisées son en acier doux et ont une

faible épaisseur et sont isolées entre elles avec du vernis. Le circuit se présente sous forme de trois colonnes et deux culasses, son rôle essentiel est de canaliser le flux et de présenter le minimum de pertes hystérésis et courant de Foucault.

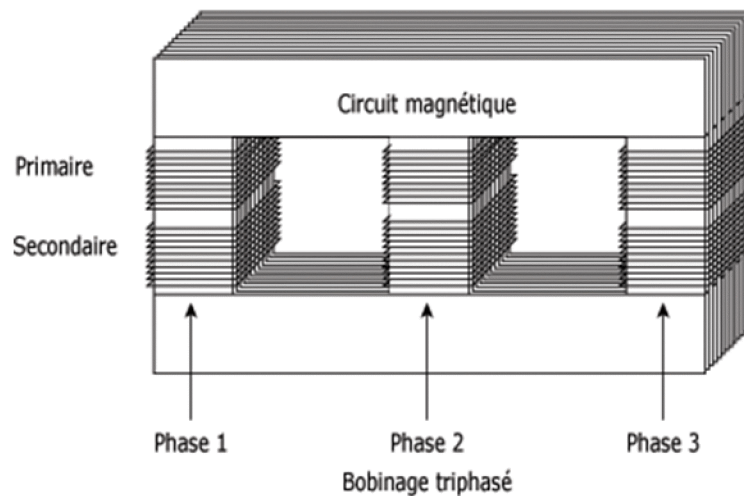


Fig I.1 : Le circuit magnétique du transformateur.

b) Bobinages (Les enroulements):

Les enroulements sont réalisés soit en cuivre soit en aluminium. Les bobinages sont effectués avec du fil rectangulaire isolé en papier en multicouches, en disque ou hélicoïdal.

Il y en a deux par colonne, l'un forme l'enroulement primaire et l'autre le secondaire tous deux électriquement distincts.

On désigne par les grandes lettres (A .B.C) les bornes d'enroulement haute tension et par les petites lettres (a .b.c.g.) Les bornes de la basse tension.

Les enroulements prennent différentes dispositions: En couches concentriques, et bi-concentriques et à galettes.



Fig I.2 : Photographie des enroulements d'un transformateur triphasé.

c) Représentation des enroulements**➤ Enroulement primaire :**

Le courant circulant dans l'enroulement est à faible intensité ; mais la tension très élevée à laquelle il est soumis impose une section de conducteur plus faible, et l'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement haut tension.

➤ Enroulement secondaire :

Le courant circulant dans cet enroulement est d'intensité très grande. Pour la réalisation de cette caractéristique, on impose un nombre de spires limité, et une section des conducteurs relativement importante.

➤ Isolement :

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

- L'isolement des spires est réalisé par du vernis et papier imprégné.
- Isolement des bobines est réalisé par un tube isolant en presspahn ou en papier bakélite avec un câble monté sur la colonne du circuit magnétique. Entre bobines BT et HT l'isolement se fait à l'aide d'un tube écran en papier balisé avec cales. Entre bobines HT voisines on utilise un écran plan en presspahn ou en papier bakélite qui est fixé à chaque englué. Enfin entre bobines et culasse l'isolement se fait à l'aide de cales en papier bakélite ou en bois imprégné et de cornières en presspahn rejoignant les tubes écran.
- L'isolement est renforcé par imprégnation d'huile.

➤ Les diélectriques :

Selon les tensions appliquées aux enroulements, l'isolation peut être assurée par :

-De l'air pour les petits transformateurs BT.

-De l'huile pour les transformateurs de puissance.

Le diélectrique assure à la fois l'isolement et le refroidissement du transformateur.

➤ **Prise de réglage :**

Le fonctionnement du transformateur peut se faire à des valeurs variables de la tension autour de la valeur nominale, en faisant varier le rapport de transformation par modification du nombre de spires de l'un des enroulements au niveau de prise de réglage.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \Longrightarrow \quad U_2 = \frac{N_2 U_1}{N_1}$$

Il ya deux grands types de transformateurs

- élévateur de tension (abaisseur de courant) : $m_v > 1$ $N_2 > N_1$
- abaisseur de tension (élévateur de courant) : $m_v < 1$ $N_2 < N_1$

Pour un bon fonctionnement, les transformateurs sont équipés d'un commutateur d'ajustement pour la tension primaire (+5 %, -5%)

Le réglage se fait hors tension à 3 prises fixes :

Position 1 (prise soustractive) : $U_n - X\%$

Position 2 (prise nominale) : U_n

Position 3 (prise additive) : $U_n + X\%$

Pour des raisons d'ordre pratique, les spires de réglage sont enroulées sur la dernière couche du primaire, ce qui facilite leurs connexions au commutateur de réglage.

❖ **La partie constructive :**

Les pièces constructives du transformateur sont :

➤ **La cuve**

Elle est destinée à contenir la partie active baignant dans l'huile. Dans le fond de la cuve se trouve un dispositif d'écoulement du liquide de refroidissement et d'isolement pour favoriser le refroidissement des bobinages.

➤ **Le couvercle**

Il sert à couvrir la cuve. Il sert aussi de support aux accessoires, tels que : les isolateurs, le conservateur d'huile ...

➤ **Le conservateur d'huile**

Il permet le remplissage complet de la cuve et réduit la surface de l'huile en contact avec l'air extérieur humide.

➤ **Les isolateurs et les traversées**

➤ **Les isolateurs (HT)**

Ils sont au nombre de trois et ont pour rôle d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire (HT) et les lignes d'arrivées.

➤ **Les traversées (BT)**

Ils sont au nombre de quatre. Ils sont formés de deux parties placées de part et d'autre du couvercle reliées par une tige entre les extrémités du secondaire (BT) et les lignes de départ.

I.1.3. Mode de couplage des enroulements :

Les enroulements primaire et secondaire d'un transformateur triphasé peuvent être connectés en étoile, en triangle ou zigzag.

Le choix de couplage se fait en fonction des conditions d'utilisation. Dans le cas d'une distribution entre phase et neutre, le déséquilibre des intensités entraîne un déséquilibre dangereux des tensions secondaires.

Ce mode de distribution nécessite une possibilité d'accès au neutre donc une connexion étoile ou zigzag au secondaire.

Le couplage $Y y_n$ fonctionne bien à condition que le courant dans le neutre ne dépasse pas 10% du courant nominal, si le déséquilibre est plus important, on utilise le couplage $Y_n z$.

Lorsqu'on branche un transformateur en parallèle avec un autre déjà placé, le couplage est imposé par le déphasage du premier. [SONEL]

Les couplages les plus utilisés :

- Le couplage triangle -étoile (Dy).
- Le couplage étoile zigzag (Y z).
- Le couplage triangle zigzag (D z).

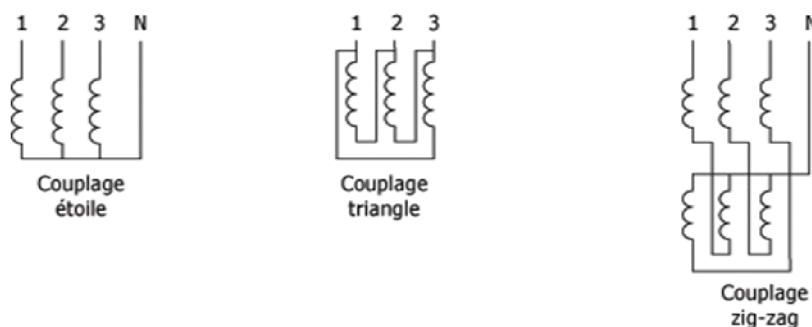


Fig I.3 : Les couplages les plus utilisés.

a) **Le couplage étoile** : permet la sortie du neutre et ainsi de disposer des tensions simples et composées. Il est, pour cela, très utilisé en BT.

b) **Le couplage triangle** : ne permet pas la sortie du neutre ; de plus, comme les enroulements sont alimentés par la tension composée, ils nécessitent un plus grand nombre de spires qu'en étoile.

c) **Le couplage zigzag** : est divisé en deux demi-bobines placées sur deux colonnes différentes comme indiqué sur la figure en haut. On obtient avec ce couplage une meilleure répartition des tensions sur un réseau BT déséquilibré.

I.1.4. Principe de fonctionnement d'un transformateur :

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable Φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice

Proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($\frac{d\Phi}{dt}$) et au nombre de spire que

Comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit

Magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du

Primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension

Proportionnelle au nombre de spires du secondaire.

La fermeture du secondaire sur une charge , provoque la circulation du courant secondaire. Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure (I.4).

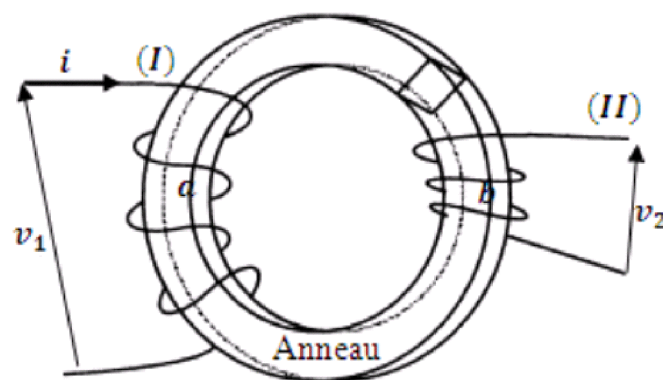


Fig I.4 : Circuits magnétique et électrique liés

I.1.5. Principaux types de transformateurs :

Le domaine d'utilisation des transformateurs est très vaste. Selon le domaine d'utilisation, les appareils présenteront certaines différences dans les caractéristiques de construction, mais du point de vue de fonctionnement, il ya pratiquement identité pour tous les transformateurs. La méthode d'étude et donc similaire et on la développera dans le cas des transformateurs de puissances monophasés et triphasés à deux enroulements [KOSTE 76].

- ❖ Il existe plusieurs types de transformateurs :
 - Les transformateurs de puissances destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.
 - Les transformateurs de mesure de tension et de courant.
 - L'auto –transformateur destiné à régler la tension dans les limites restreintes pour le couplage de réseaux et à mettre en route des moteurs alternatifs.
 - Les transformateurs de phase destinés à alimenter les installations à convertisseur statique (redresseur...).
 - Les transformateurs d'essais **HT, THT**.
 - Les transformateurs de puissance spéciaux pour l'alimentation de fours ,poste de soudage.
 - Les transformateurs utilisés en radiotechnique.
- ❖ En trouve aussi ces différents types de transformateurs selon leur mode de construction.

a) Transformateurs respirant

Les transformateurs de construction respirant sont Règlés et fixés comme standard. Le couvercle dispose de 2 ouvertures d'aération, qui permettent L'échange d'air avec le coussin d'air situé sous le couvercle, à L'intérieur du transformateur. Ce coussin d'air est en contact sur toute la surface avec le liquide de refroidissement et l'humidité Éventuelle peut être évacuée lorsque la température du liquide de Refroidissement est élevée. La construction respirant se distingue par un faible volume d'huile et des dimensions réduites. En fonctionnement, le transformateur travaille hors pression et ne provoque pas de contraintes supplémentaires sur la cuve. La construction respirant a été éprouvée des milliers de fois et est d'un prix très avantageux.

b) Transformateurs hermétiques

Aujourd'hui la demande pour des transformateurs à cuve hermétique s'accroît.

Grâce à une étanchéité totale à l'air, il n'y a aucun contact entre le liquide de refroidissement et l'air ambiant, ce qui ralentit le vieillissement de l'huile et réduit d'autant les coûts d'entretien.

La dilatation de l'huile est absorbée par les ondulations de refroidissement, ce qui conduit à une augmentation de la contrainte mécanique sur la cuve. Afin de limiter les pressions, les transformateurs fermés hermétiquement nécessitent des ondulations plus prononcées, ce qui a pour conséquence un plus grand volume d'huile et de plus grandes dimensions. Malgré les contraintes mécaniques plus élevées, les transformateurs hermétiques sont parfaitement éprouvés et aussi sûrs que les Transformateurs respirants.

c) Transformateurs pour industries

Lorsque des transformateurs sont exploités dans un réseau industriel, où des tensions parasites transitoires sont prévisibles à cause des redresseurs de courant ou des entraînements à convertisseur de fréquences, il est conseillé de concevoir spécialement ces transformateurs. Si les tensions parasites transitoires sont continues et nombreuses, l'isolation papier et la laque du fil peuvent vieillir prématurément, aussi bien côté moyenne que basse tension du transformateur. Pour éviter ce phénomène, il est nécessaire, de renforcer l'isolation par couche et de monter un blindage mis à la terre entre les enroulements moyenne et haute tension.

d) Transformateurs enrobés dans la résine

En alternative aux transformateurs de distribution à liquide, on trouve également des transformateurs enrobés dans la résine.

Les transformateurs enrobés dans la résine répondent aux normes internationales en vigueur et trouvent leur utilisation partout où les transformateurs à liquide ne sont pas désirés, par exemple, là où il y a un risque pour l'environnement ou d'incendie.

La plage de puissance s'étend de 160 kVA à 3150 kVA pour une tension nominale maximale U_m 36 kV. Les matériaux de haute qualité et une construction robuste assurent une fiabilité maximale. L'enroulement basse tension est isolé à la résine, l'enroulement moyenne tension

est sous vide selon un processus qui évite la formation de vacuoles ou de fissures. L'utilisation d'isolation à fibre de verre et résine époxy permet une très grande résistance mécanique.

Le risque d'incendie étant réduit, les transformateurs enrobés dans la résine peuvent être placés directement à proximité de l'utilisateur. Ni le bac de récupération d'huile ni le coupe-feu n'étant nécessaires, cela permet une réduction des coûts d'investissement.

Les transformateurs enrobés dans la résine résistent sans problème à des pointes de charge temporaires, comme celles provoquées par le démarrage de moteurs ou par des activités de soudage. En ajoutant un ventilateur, ils peuvent même résister à une surcharge continue de 40%. Les ventilateurs sont montés sur la tôle emboutie du transformateur. Un montage ultérieur est toujours possible. Sur demande, les transformateurs enrobés dans la résine peuvent être montés dans un carter.



Fig I.5 Transformateurs enrobés dans la résine

e) Transformateurs à sec

Les transformateurs à sec trouvent leur application partout où la basse tension doit être transformée en basse tension. La fabrication se fait selon les spécifications des clients, par exemple autotransformateur ou transformateur de séparation, et prend en compte leurs souhaits particuliers. La plage de puissance pour les transformateurs monophasés va de 5 VA à 100 kVA et pour les transformateurs triphasés de 250 VA à 500 kVA, avec une tension nominale maximale U_m 1.1 kV.

Selon la dimension ou les souhaits du client, les transformateurs sont construits avec classe d'isolation B ou F. En fonction de la classe de température exigée, les isolants utilisés se distinguent par une excellente résistance mécanique et au claquage, et de bonnes propriétés thermiques. La partie active est imprégnée sous vide ou par immersion pour la protéger contre l'humidité et, ensuite, peinte de couleur RAL 7032. Les transformateurs à sec peuvent être montés dans un carter sur demande.



Fig I.6 Transformateurs à sec

f) Transformateurs spéciaux

Les applications spéciales nécessitent des solutions spéciales: dans le réseau de distribution, certains appareils sont télécommandés de manière centralisée par fréquence vocale. Nous Fournissons aussi bien des transformateurs pour l'alimentation des systèmes de télécommande sénaire pour des fréquences allant de 200 Hz à 2000 Hz et une tension nominale maximale $U_m 36$ kV que des transformateurs pour l'alimentation d'installations radio Mobiles. Pour l'exploitation ferroviaire, Rauscher & Stoecklin produisent des transformateurs monophasés pour caténares jusqu'à 1000 kVA pour l'alimentation d'utilisateurs dans les réseaux ferroviaires, avec 15 kV et 16 2/3 Hz ou 25 kV et 50 Hz.

I.2. Généralités sur les surtensions

I.2.1. Introduction :

Pendant toute variation brusque d'une ou plusieurs grandeurs qui déterminent le fonctionnement d'un transformateur (tension, fréquence, charge, etc...), il se produit le passage d'un état à un autre .Généralement, ce passage dure un temps très court, mais tout de même, il peut être accompagné d'effets importants et dangereux pour le transformateur tel que :

L'apparition de très grandes contraintes mécaniques entre les enroulements ou entre les parties de ce dernier, l'augmentation très inégale de la tension entre différents parties des enroulements ou même entre différentes spires , les surchauffes brusques , etc....

Ces effets jouent un rôle très important dans les puissances des transformateurs à haute tension. Pour cette raison, plusieurs mesures ont été prises afin d'augmenter la tenue mécanique, électrique et thermique des transformateurs.

En fonction du facteur principal qui détermine le régime transitoire (courant ou tension), on distingue deux principaux phénomènes

- Les surintensités
- Les surtensions

L'étude de ces phénomènes a une très grande importance pour l'exploitation de transformateurs. Pour la nôtre, elle portera essentiellement sur les surtensions, du moins nous essaierons tout de même de donner un aperçu sur les surintensités vu aussi leur importance [KOSTE 76].

I.2.2. Surintensité :

Les surintensités ont une faible durée par rapport aux surcharges et leur intensité est de 2 à 25 fois l'intensité nominale [BERNA 88].

I.2.2.1. Cause des Surintensité :

a) L'enclenchement du transformateur à vide :

En régime permanent, le courant à vide d'un transformateur ne dépasse pas 10% du courant nominal, mais à l'enclenchement du transformateur, sur un réseau dont la tension est proche de la valeur nominale, un saut de courant apparaît, sa valeur dépasse la valeur nominale (de courant à vide).

L'appareillage de protection doit être calculé de façon à éviter le débranchement intempestif du transformateur, toute fois, le courant d'enclenchement ne cause pas de danger pour les transformateurs mais peut provoquer leur mise en hors circuit [KOSTE 76].

b) lors d'un court circuit :

Les courts circuits sont dus à :

- Un contact accidentel entre phases ou entre phase et neutre (la terre).
- Un défaut d'isolement.
- Une mauvaise manœuvre.

❖ Leurs effets sont :

a) phénomène thermique :

Dans ce phénomène, la température des enroulements du transformateur peut atteindre des valeurs présentant un danger pour l'isolation [KOSTE 76].

b) phénomène électrodynamique :

Des efforts électrodynamiques apparaissent entre spires, galettes et entre bobines primaires et bobines secondaires des enroulements du transformateur. Ces efforts présentent un danger pour le circuit électrique mais en particulier pour les enroulements

❖ **Les conséquences du court-circuit :**

- La chaleur de l'arc ou celle dépensée dans le contact imprévu, peut faire fondre les métaux environnants, carboniser les isolants et même déclencher les incendie.
- Les efforts électrodynamiques des courants de court-circuit sont très dangereux, les enroulements des transformateurs sont véritablement secoués. Ils peuvent même causer un décalage de galettes.
- L'échauffement de tous les conducteurs traversés par le courant de court-circuit sont très important, il concentre ses effets sur les points faibles (bornes des transformateurs) [PAUL].

I.2.3. Les Surtensions :

On appelle surtension toute élévation de tension au dessus de la tension de service maximale, on entend par surtension des phénomènes de courte durée sous formes de croûte impulsion séparées en périodiques ou apériodiques.

Les éléments constituant un réseau électriques, en particulier les transformateurs de puissance (qui font l'objet de notre étude) subissent des contrainte de tension, elles peuvent êtres d'une part permanentes du fait de la tension de service et d'autre part pendont de brèves durée du fait de surtension de diverses origines.

I.2.3.1. Nature des surtensions

La nature du phénomène se produisant dans un transformateur pendant des Surtensions dépend de la forme d'onde électromagnétique, on distingue deux formes [KOSTE 76]

Les ondes apériodiques (simples et complexes) : elles sont fréquentes pour des surtensions d'origine atmosphérique.

Les ondes périodiques : apparaissent pendant le phénomène de commutation.

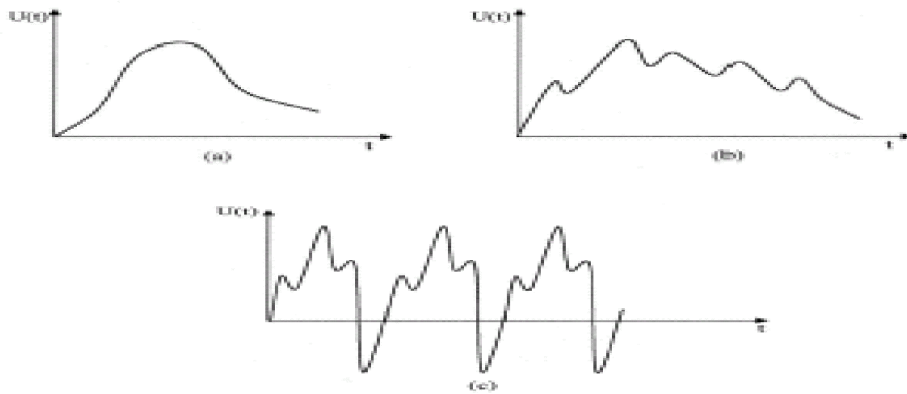


Fig I.7 :Onde de surtension

I.2.4. Classification des coups de foudres :

On peut classer les coups de foudre selon deux critères :

a) Selon leurs polarités

- Les coups de foudres positifs (décharge d'un nuage chargé positivement)
- les coups de foudres négatifs (décharge d'un nuage chargé négativement)

b) Selon le sens de développement de leader

- le coup de foudre ascendant (développement de leader à partir du sol).
- le coup de foudre descendant (développement de leader à partir du nuage)

D'après ce critère, on peut classer le coup de foudre en quatre catégories figure :

- Descendant négatif.
- Ascendant négatif.
- Descendant positif
- Ascendant positif

I.2.5. Propagation de l'onde de surtension :

L'onde se propage le long de la ligne à une vitesse $V = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ où L et C sont respectivement l'inductance et la capacité par unité de longueur de la ligne. Cette vitesse est de l'ordre 300000km/s dans une ligne aérienne de 100 à 150 000 km/s dans un câble isolé. Au cours de sa propagation, l'onde s'aplatit, s'amortit et devient peu à peu moins dangereuse. L'onde subit des modifications, si elle rencontre des obstacles au cours de sa propagation, par exemple : à l'extrémité d'une ligne ouverte, le courant s'annule et la surtension double.- Sur une ligne en court-circuit, la tension s'annule et le courant double. - à une bifurcation, il se produit une onde réfléchie sur la ligne d'arrivée et une onde incidente affaiblie sur \pm les départs.
- Lorsque l'onde passe d'une ligne aérienne à une ligne isolée, la tension de l'onde diminue et l'intensité augmente.

❖ Durée des surtensions

La tension de claquage dépend de l'amplitude et de la durée de l'application de la Contrainte diélectrique, et c'est donc aussi sur la durée que se base la classification de celle-ci [CHABA 01].

Une distinction est faite entre les chocs de foudre et les chocs de manœuvre d'après la durée du front. Les chocs dont la durée du front vont jusqu'à 20 μ s sont considérés comme étant des chocs de foudre figure(I.8.b), et ceux qui ont une durée du front plus longue comme étant des chocs de manœuvre figure (I.8.a).

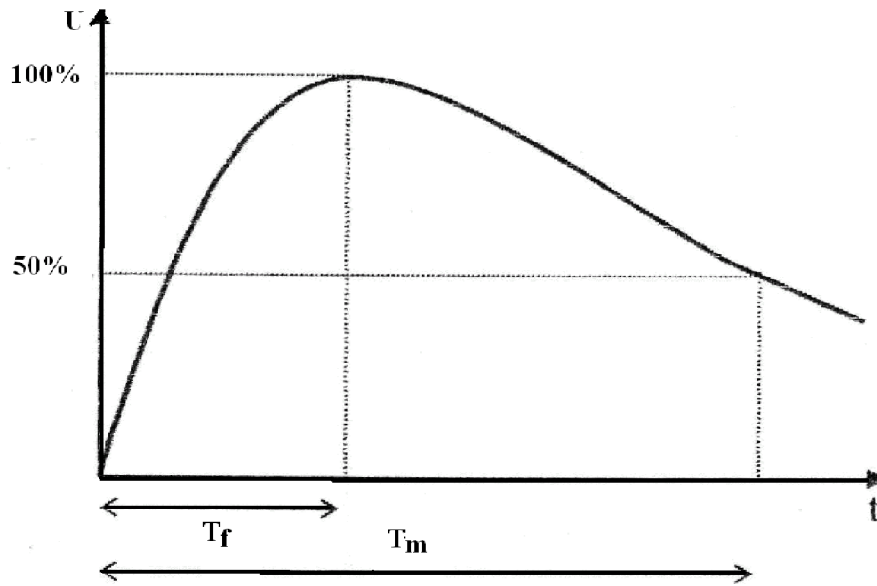


Fig. I.8.a Onde de choc de manœuvre

Où : T_f : durée de front.

T_m : durée jusqu'à la mi-amplitude.

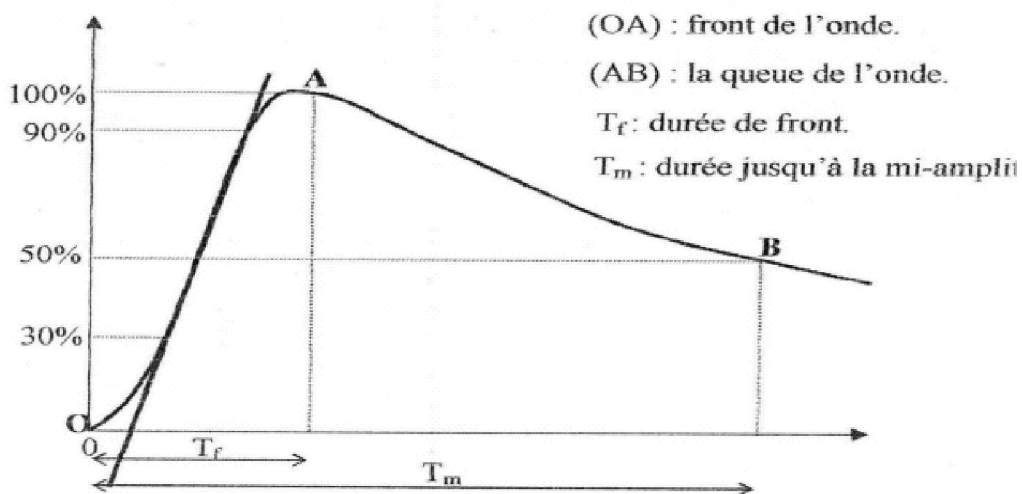


Fig.I.8.b Onde de choc (foudre)

Les études ont montré que les surtensions d'enclenchement et de déclenchement dépassent la tension simple nominale de 2 à 5 fois. Les surtensions dues aux avaries dépassent cette tension de 7 à 8 fois, et les surtensions dues aux causes atmosphériques la dépassent de 7 à 12 fois. Les surtensions qui dépassent la tension de ligne de service de 2.5 fois sont considérées sans danger mais lorsqu'elles dépassent la tension de service 3.5 fois, elles présentent un danger.

I.2.6. Cause des surtensions :

Par la nature même de leur origine, il existe deux façons de classer les surtensions:

a) Surtensions par décharges électriques atmosphériques

Les orages sont des événements très habituels, et aussi très dangereux. On estime que sur notre planète se produisent simultanément quelques 2000 orages et qu'environ 100 coup de foudre se déchargent sur la terre chaque seconde. Au total, cela représente environ 4000 orages quotidiens et 9 millions de décharges atmosphériques chaque jour.

Au moment de l'impact, la foudre provoque une impulsion de courant qui arrive à atteindre des dizaines de milliers d'ampères. Cette décharge génère une surtension dans le système électrique qui peut provoquer des incendies, la destruction de machines et y compris la mort de personnes.



Fig I.8 :Image d'un éclair

b) Surtensions de commutation :

Ces surtensions sont générées dans les lignes électriques, principalement en raison des deux motifs suivants:

- Commutations de machines de grande puissance :

Les moteurs électriques sont des charges très inductives dont la connexion ,le débranchement provoquent des surtensions.

Il existe de même d'autres processus capables de les produire, comme par exemple l'allumage et l'extinction de la soudure à l'arc, manœuvres et/ou failles dans l'approvisionnement électrique. En cas de court-circuit dans un certain point du réseau, les protections de la compagnie électrique y répondent en ouvrant le circuit, suivies par les tentatives de ré enclenchement au cas où il s'agisse d'une faille transitoire, ce qui produit les surtensions typiques de connexion décharges inductives.

- **Mécanismes de propagation :**

Le mécanisme de propagation prédominant des surtensions de commutation est par conduction, puisqu'elles ont leur origine dans les réseaux d'alimentation électrique. C'est dans les décharges électriques atmosphériques que peut se manifester toute la gamme des formes de propagation. Par conséquent, on différencie les mécanismes suivants :

- **Surtensions conduites**

La foudre peut avoir un impact direct sur les lignes électriques aériennes. La surtension se propage et arrive jusqu'à l'utilisateur, en dérivant à terre à travers ses équipements et en produisant des avaries à ces derniers.

Une erreur assez fréquente est de penser que les décharges incidentes dans les lignes électriques de distribution (Moyenne Tension) n'arrivent pas à celles de Basse Tension grâce à l'isolement galvanique fourni par le transformateur existant. Ceci est faux étant donné que cet isolement est effectif à des fréquences nominales du réseau, tandis que pour les formes d'onde assimilées à la foudre le transformateur provoque peu d'atténuation.

- **Surtensions induites**

Le champ électromagnétique provoqué par les décharges électriques, induit des courants transitoires dans les équipements à proximité, en les transmettant à l'intérieur des installations et en endommageant les équipements.

- **Surtensions par couplage capacitif**

Il existe toujours un couplage capacitif, également appelé capacité parasite, entre n'importe quelle paire de conducteur. Plus la rapidité de la forme d'onde de tension impliquée est grande, plus les surtensions par Couplage capacitif sont importantes.

➤ **Augmentation du potentiel dans les prises de terre**

Ce mécanisme est un cas particulier des surtensions conduites mentionnées auparavant mais vu son incidence élevée, elles vont être mises en relief dans un paragraphe spécifique. Lorsqu'un coup de foudre atteint la terre, le courant de décharge peut élever le potentiel de terre à plusieurs milliers de volts autour du point d'impact dans le terrain comme conséquence du courant qui se disperse. Tout objet sur le terrain touché aura la tension associée à ce moment, ce qui peut être à l'origine d'une différence de tension dangereuse par rapport à d'autres points de l'installation. Il faut particulièrement prêter attention aux éléments métalliques enterrés, comme les canalisations et les prises de terre.

Les surtensions qui arrivent aux bornes des transformateurs peuvent être limitées de différentes manières, beaucoup plus dangereuses sont des tensions qui naissent à l'intérieur des transformateurs. Lorsque l'onde électromagnétique se répartit le long de l'enroulement, les tensions entre les différentes bobines, de même entre les différentes spires de l'enroulement peuvent dépasser plusieurs fois la tension nominale en régime permanent de fonctionnement de transformateur. L'expérience montre que ce sont le plus souvent les spires qui se trouvent plus près des sorties du transformateur qui sont endommagées. Mais en général, les surtensions et les claquages de l'isolation peuvent avoir lieu en un point quelconque de l'enroulement en fonction des caractéristiques de ce dernier. Le claquage de l'isolation entraîne la mise hors service de transformateur et la perturbation des conditions normales. Les surtensions dans les transformateurs ont été l'objet de nombreuses études [KOSTE 76].

Il faut bien avoir en vue que les phénomènes qui accompagnent la propagation d'une onde de surtension dans un transformateur sont très complexes et ne peuvent être entièrement analysée mathématiquement. On est obligé d'adopter plusieurs hypothèses, les résultats obtenus ont toute fois permis de tirer plusieurs conclusions importantes et ont servi au développement d'un transformateur dit résistant.

II.1 Introduction

Pendant toute variation d'une ou plusieurs grandeurs déterminant le fonctionnement d'un transformateur (tension fréquences, charge ... etc.,) il se produit le passage d'un état permanent à un autre, généralement ce passage dure un temps très court mais il a des conséquences très dangereuses pour le transformateur.

Ce qu'il faut savoir c'est que les phénomènes qui accompagnent la propagation d'une onde de surtension dans un transformateur sont très complexes et ne peuvent pas être entièrement analysés par des méthodes mathématiques seulement, pour cela on est obligé d'adopter plusieurs hypothèses simplificatrices pour permettre de tirer des conclusions dans le but d'améliorer la protection des transformateurs contre les surtensions.

Le cas le plus dangereux pour un transformateur est celui où les trois phases sont traversées par les mêmes ondes de surtension, alors il nous suffira donc de considérer dans toute l'étude une seule phase, vu que ce sont les mêmes phénomènes qui se produisent dans les deux autres.

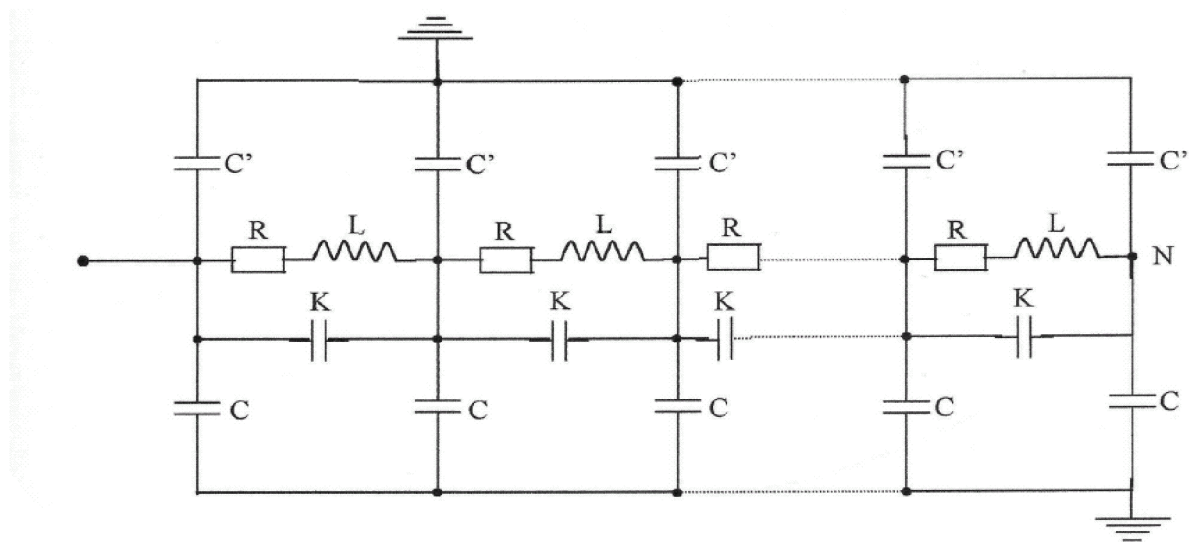


Fig. II.1 Schéma équivalent complet de l'enroulement (H.T).

Tout au long de cette analyse, nous supposons que dans les transformateurs de Grande puissance, il existe toujours un enroulement connecté en triangle jouant le rôle d'un écran magnétique, Nous assurons aussi que les ondes agissant sur le Transformateur ont des fréquences (amplitudes) suffisamment importantes pour pouvoir

négliger l'influence du noyau sur l'enroulement. Le schéma équivalent correspond à cette simplification est donné par la figure (II.2)

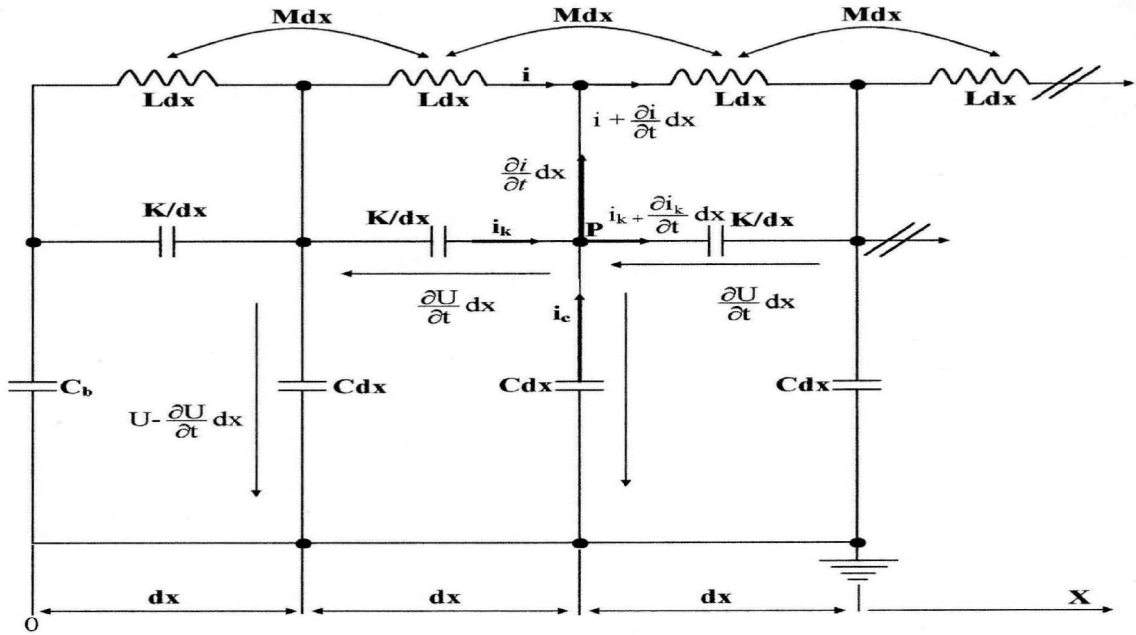


Fig II.2 : Schéma équivalent de l'enroulement sans l'influence du noyau

L (H/m) : inductance linéique propre

C (F/m) : capacité linéique transversale de l'enroulement et la cuve.

M (H/m) : inductance linéique mutuelle

C_b (F) : capacité de la borne de traversée entre éléments du transformateur.

K (F/m) : capacité linéique longitudinale entre éléments.

II.2 Equation de circuit :

En négligeant la transmission des phénomènes transitoires d'un enroulement à l'autre et leurs résistances, l'équation de KIRCHOUFF au nœud « P » situé à l'abscisse x s'écrit :

$$i + i_k = \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) + \left(i_k + \frac{\partial i_k}{\partial x} dx \right) - i_c \quad (\text{A}) \quad \text{II.1}$$

$$\text{d'où : } i_c = \frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx \quad (\text{A}) \quad \text{II.2}$$

$$\text{comme : } i_c = -cdx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{A}) \quad \text{II.3}$$

de (II.2) et (II.3) on a :

$$\frac{\partial(i+i_K)}{\partial x} dx = -c dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{A/m}) \quad \text{II.4}$$

Sur la capacité K, on a la relation suivante :

$$i_K = -\frac{K}{dx} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} dx \quad (\text{A}) \quad \text{II.5}$$

$$\text{D'où: } i_K = -K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (\text{A}) \quad \text{II.6}$$

$$\text{Et: } \frac{\partial i_K}{\partial x} = -K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (\text{A/m}) \quad \text{II.7}$$

Sur l'inductance L on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x} dx = -L dx \frac{\partial i}{\partial t} \quad (\text{V}) \quad \text{II.8}$$

$$\text{D'où : } \frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (\text{V/m}) \quad \text{II.9}$$

$$\text{Et : } \frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{A/s}) \quad \text{II.10}$$

En multipliant les deux membres par $\frac{\partial t}{\partial x}$, on aura :

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \cdot \partial t}{\partial x^2} \quad (\text{A/m}) \quad \text{II.11}$$

En sommant (II.7) et (II.11) ; on obtient :

$$\frac{\partial(i+i_K)}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} - K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (\text{A/m}) \quad \text{II.12}$$

En égalant (I.4) et (I.12) puis en multipliant membre à membre $L \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$, on aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t} = 0 \quad (\text{V}^2/\text{m}^2) \quad \text{II.13}$$

On obtient une équation de la même forme pour le courant.

La solution de l'équation (II.13) est de la forme :

$$u = U \cos(\omega t) \cdot \sin(\beta x) \quad \text{ou : } \omega = 2\pi f \text{ (est la pulsation), } f \text{ étant la fréquence.}$$

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$: (constante de propagation).

λ : (est la longueur d'onde)

Cette solution représente une onde stationnaire.

II.3 Répartition de la tension le long d'un bobinage dont le neutre est mis à la Terre :

Un enroulement du transformateur frappé par une impulsion de choc se comporte comme un réseau à constantes réparties comprenant des inductances en série (chaque spire est une inductance), des capacités en série (capacité d'une spire à sa voisine) et des capacités dérivées (capacité d'une spire à la terre) [SONEL]

II.3.1.hypothèses simplificatrices :

En régime permanent, le courant circule seulement dans l'enroulement du transformateur, en rencontrant sur son chemin des résistances et des réactances inductives. Mais lors d'une action de surtension atmosphérique, le phénomène change de façon radiale. En effet, les phénomènes liés aux surtensions se déroulent à très grande vitesse et agissant sur le transformateur comme des phénomènes aperiodiques de très haute fréquence. Dans ce cas, la réactance inductive du transformateur devient très grande, tandis que la réactance capacitive diminue beaucoup. A la limite, on peut admettre que lors des surtensions le courant passe seulement par les réactances capacitatives. En utilisant les capacités K de la partie donnée de l'enroulement de la bobine, par rapport à la partie voisine et la capacité C de la bobine par rapport à la terre. Dans ces conditions, le schéma équivalent de l'enroulement sera représenté par la figure (II.3).

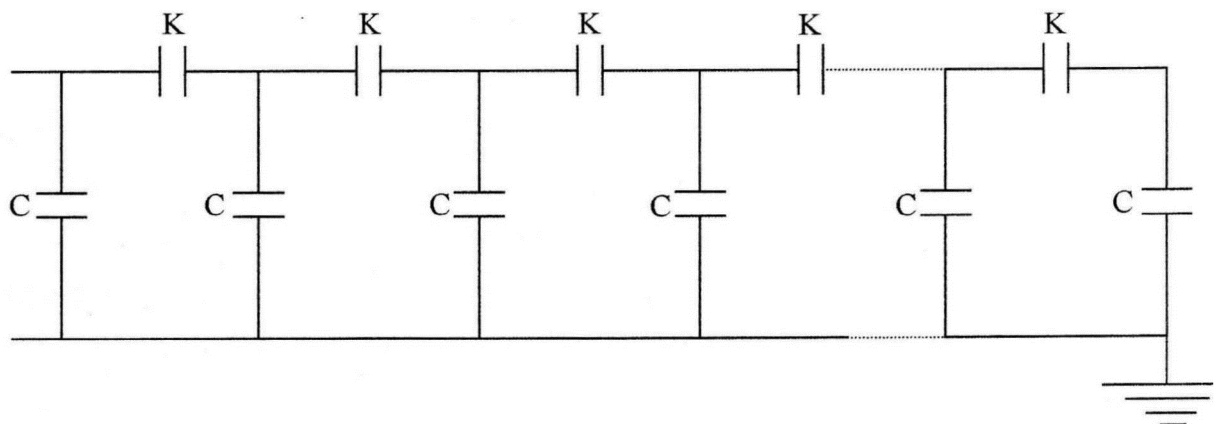


Fig. II.3 : Schéma équivalent simplifié de l'enroulement (HT) lors d'un phénomène ondulatoire

II.3.2. Répartition initial de la tension :

La répartition réelle de la tension le long de l'enroulement, se trouve entre les deux cas limites qui sont :

➤ S'il n'y avait pas de capacités par rapport à la terre ($C=0$), toutes les capacités K seraient en série et le circuit de la figure (II.3) serait parcouru par un courant de la même valeur. Nous obtiendrions alors une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement (identique à la répartition au régime permanent). [KOSTE 76]

❖ **Cas où le neutre est mis à la terre :** la répartition est représentée par une droite inclinée réunissant les point M et N qui correspondent respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement qui se trouve sous la tension U et à sa fin dont le potentiel est nul figure (II.4).

❖ **Cas où le neutre est isolé de la terre :** la répartition est représentée par une droite horizontale $M'N'$ figure (II.5).

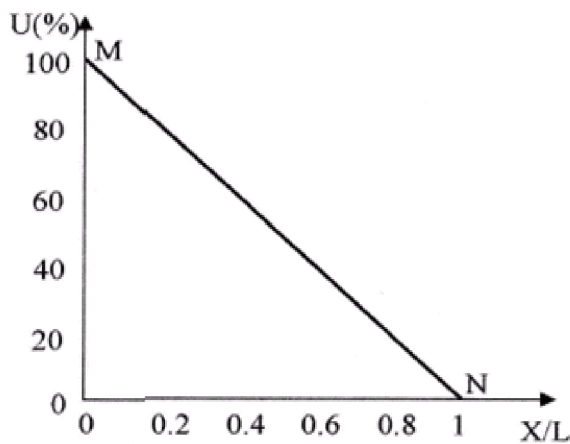


Fig II.4 Neutre mise à la terre

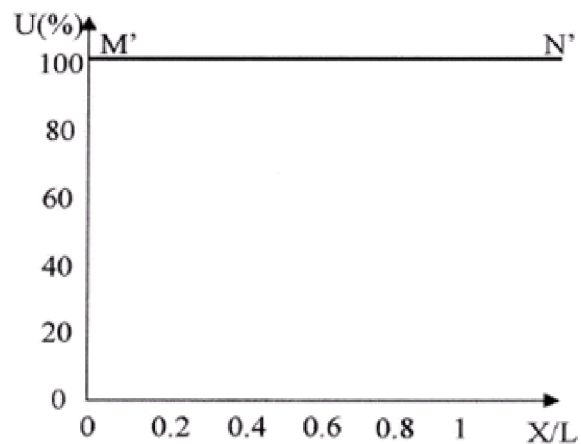


Fig II.5 Neutre isolé de la terre

➤ S'il n'y avait pas de capacités K ($K=0$), le courant de la ligne se dirigerait vers la terre à travers la première capacité depuis le début de l'enroulement. Cela signifie, que toute la tension est concentrée dans la première spire qui est donc soumise à une forte surtension.

❖ **Cas où le neutre est mis à la terre :** la répartition de la tension est représentée par une droite verticale réunissant le point M à l'origine des coordonnées figure(II.6).

❖ **Cas où le neutre est isolé de la terre :** la répartition est identique à la précédente figure (II.7).

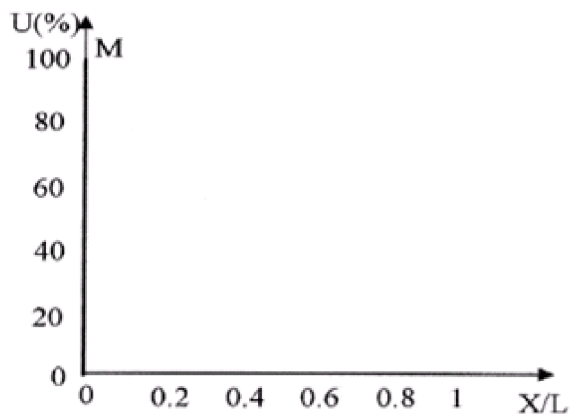


Fig II.6 Neutre mise à la terre

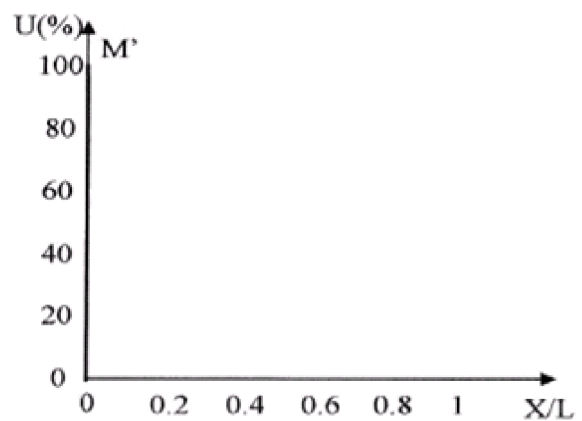


Fig II.7 Neutre isolé de la terre

Une analyse mathématique plus détaillée montre que la tension est répartie suivant une loi hyperbolique. En un point d'abscisse « x » à partir de la borne d'entrée, la tension initiale u_{ox} est donnée par la relation suivante :

$$u_{ox} = U_{choc} \cdot \frac{Sh\alpha(l-x)}{Sh\alpha l} \quad \text{II.14}$$

Si le neutre était isolé de la terre, on aurait :

$$u_{ox} = U_{choc} \cdot \frac{Ch\alpha(l-x)}{Ch\alpha l} \quad \text{II.15}$$

U_{choc} : est la valeur maximale de la surtension. l : longueur totale de l'enroulement.

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}} \quad (\text{dans les transformateurs modernes } \alpha = 5 \text{ à } 15)$$

La répartition de la tension initiale dans les transformateurs pour les différentes valeurs de α est donnée par la figur ci dessous

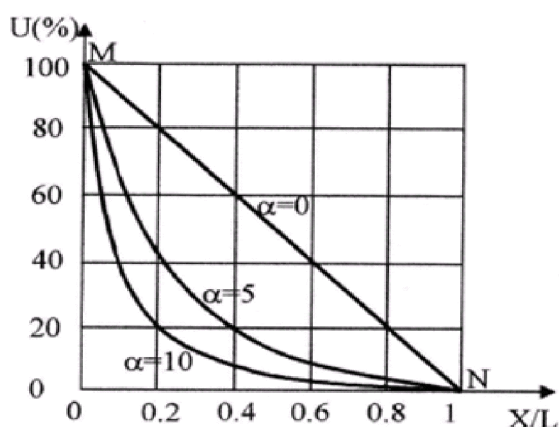


Fig II.8 Neutre mise à la terre

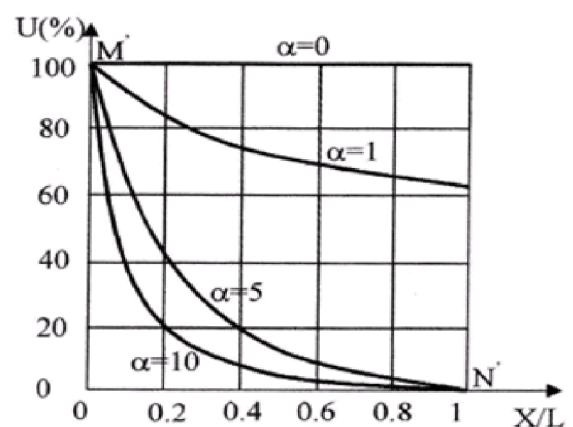


Fig II.9 Neutre isolé de la terre

a. Démonstration :

Dans l'hypothèse où $L \rightarrow \infty$, l'équation (II.13) devient :

$$-C \frac{\partial u}{\partial t^2} + K \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \cdot \partial t^2} = 0 \quad (\text{A/ms}) \quad \text{II.16}$$

Pour le calcul de la répartition initiale de la tension à $t=0$, on pose $(x,0)=U_{x0}$

$$U_{x0} = \frac{U_0(x)}{U_{choc}}$$

L'équation (II.16) devient :

$$-C \cdot U_{x0} + K \frac{\partial^2 U_{x0}}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{C/m}) \quad \text{II.17}$$

Ou bien :

$$\frac{\partial^2 U_{x0}}{\partial x^2} - \frac{C}{K} U_{x0} = 0 \quad (\text{V/m}^2) \quad \text{II.18}$$

La solution de cette équation est :

$$U_{x0} = A \cdot \exp(\alpha x) + B \cdot \exp(-\alpha x) \quad \text{II.19}$$

A et B sont des constantes qui vont être déterminées par les conditions aux limites.

Pour $x=0$ (injection de la tension)

$$U_{x0} = 1pu \quad \text{II.20}$$

Pour $x=l$ (point mis à la terre)

$$U_{x0} = 0pu \quad \text{II.21}$$

En injectant (II.20) et (II.21) dans (II.19), on aura :

$$\text{Pour } x=0 : A+B=1 \text{ d'où } B=1-A \quad \text{II.22}$$

$$\text{Pour } x=l : A \cdot \exp(\alpha l) + B \cdot \exp(-\alpha l) = 0 \quad \text{II.23}$$

En injectant (II.22) et (II.23) dans (II.19), on aura :

$$U_{x0} = \frac{\exp[\alpha(l-x)] - \exp[-\alpha(l-x)]}{\exp(\alpha l) - \exp(-\alpha l)} \quad \text{II.24}$$

Qui peut secrire en fonction hyperbolique comme sui :

$$U_{X0} = \frac{\text{sh}[\alpha(1-X)]}{\text{sh}(\alpha 1)} U_{choc} \quad \text{II.25}$$

Si le neutre est flottant :

$$U_{X0} = \frac{\text{sh}[\alpha(X-1)]}{\text{sh}(\alpha 1)} U_{choc} \quad \text{II.26}$$

b .Le gradient de tension :

Pour calculer la rigidité diélectrique de l'enroulement, il faut connaître le gradient de tension entre deux éléments voisins (bobines, spires) de l'enroulement.

D'après les figures (II.8) et (II.9), on remarque que le plus grand gradient de tension a lieu au début de l'enroulement sur ses premières spires. La valeur de ce gradient est déterminée par la

dérivée première $\frac{du_x}{dx}$

$$th\alpha \approx ch \approx 1$$

cas où le neutre est mis à la terre :

$$\left[\frac{dU_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \quad [\text{pu}]$$

$$\left[\frac{dU_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \cdot U_{choc} \quad [\text{kV}]$$

cas où le neutre est isolé de la terre :

$$\left[\frac{dU_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \quad [\text{pu}]$$

$$\left[\frac{dU_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \cdot U_{choc} \quad [\text{kV}]$$

Cette formule nous montre qu'à l'instant initial, la partie de l'enroulement la plus proche de l'entrée se trouve sous tension de $a = 10$ à 15 fois plus grande qu'une répartition uniforme de la tension. D'où la nécessité de prendre des précautions pour protéger les isolants contre le claquage [FRANC 33]

c. Répartition finale de la tension :

Lorsque le point neutre est mis à la terre, la répartition finale de la tension est représentée par une droite inclinée MN figure (II.11) et lorsque le neutre est isolé, tout l'enroulement acquit à l'instant final le même potentiel représenté sur la figure (II.12) par une droite parallèle à l'axe des abscisses.

Dans le cas de l'enroulement avec neutre mis à la terre, pour un point se trouvant à l'origine porté à la tension U_1 sa tension finale étant U_2 , le passage de l'une à l'autre se fera par une série d'oscillations entre les courbes 1 et 4 qui en représentent à peu près l'enveloppe. Ces oscillations seront d'autant plus que la différence $U_2 - U_1$ sera plus élevée.[KOSTE 76]

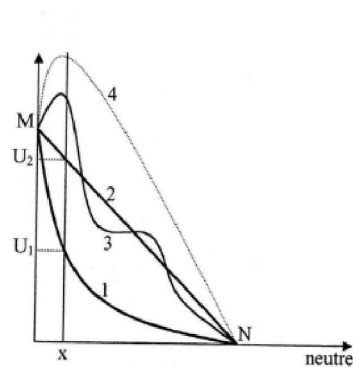


Fig. II.11 : neutre à la terre

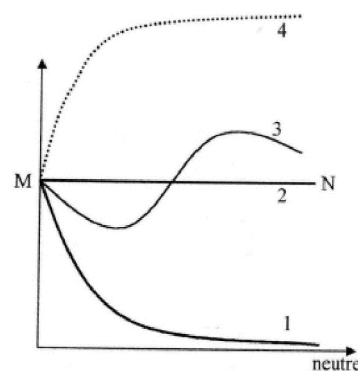


Fig. II.12 : neutre

isolé

- 1 : répartition initiale.
- 2 : répartition finale.
- 3 : répartition intermédiaire.
- 4 : répartition maximum.

II.4. Phénomène transitoire de tension

Pour les hypothèses les plus simples, l'expression cherchée est obtenue comme intégrale d'une équation différentielle de quatrième ordre au moins (comme on aura l'occasion de le voir dans le chapitre V), et la théorie stipule que :

- Le phénomène ayant lieu dans l'enroulement est périodique et s'amortit suivant une fonction exponentielle, la tension varie dans l'espace suivant l'axe x , c'est à dire suivant la longueur de l'enroulement et dans le temps en chaque point de l'enroulement.
- La répartition finale de la tension (droite MN et M'N' sur les figure(II.13.a) et (II.13.b)) peut être considérée comme des axes autour des quelles se produit le phénomène oscillatoire.

Des limites des oscillations possibles se trouvent dans des aires hachurées figures(II.13.a) et (II.13.b), on peut développer la différence entre la répartition initiale et finale de la tension en série d'harmoniques.

Pour les transformateurs à neutre mis à la terre, on obtient une série comprenant 1, 2,3 etc..., quart d'onde figure (II.13.c), et pour les transformateurs à neutre isolé, on obtient une série comprenant 1, 3,5etc..., quart d'onde figure (II.13.d). Dans le temps des harmoniques supérieurs pulsent à la fréquence f_n proportionnelle à l'ordre de l'harmonique V . [koste 76]

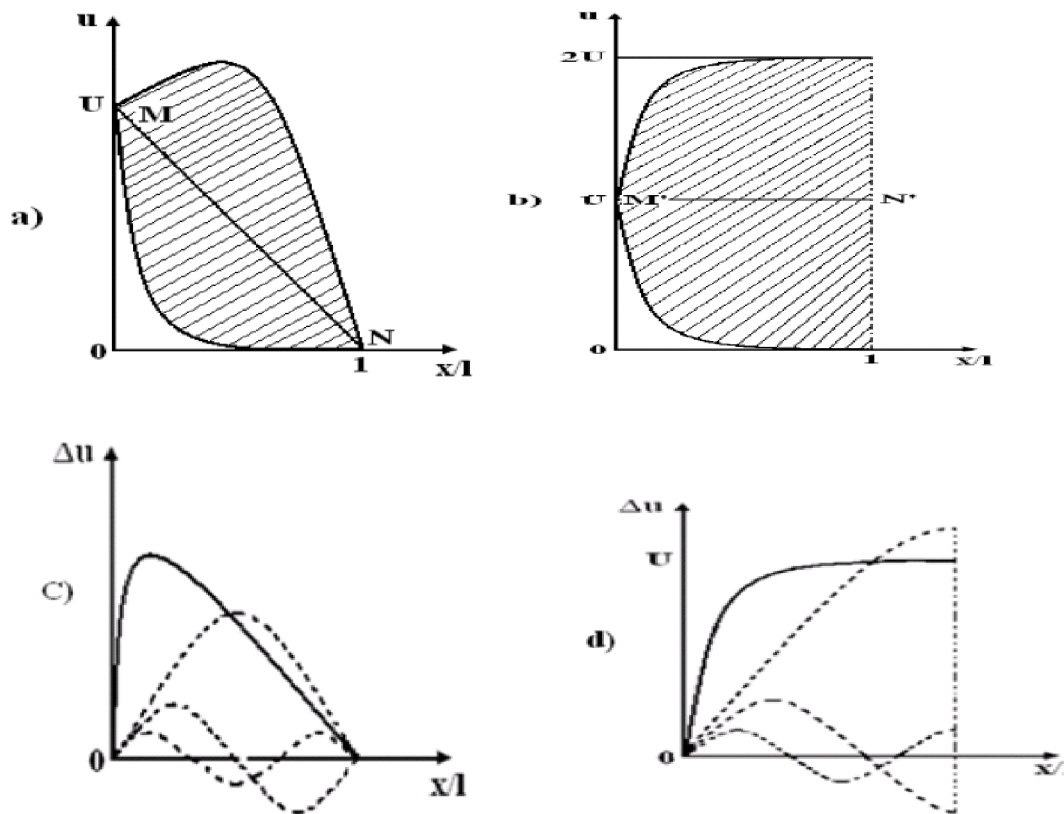


Fig II.13 Phénomène transitoire dans l'enroulement d'un transformateur

a) et c) neutre mis a la terre

b) et d) neutre isolé de la terre

Les tensions harmoniques de différents ordres se propagent dans l'enroulement à des vitesses différentes. Pour cette raison, l'onde qui pénètre dans l'enroulement se déforme continuellement (figure (II.14.a) pour un neutre mis à la terre figure (II.14.b) pour un neutre isolé) représente approximativement la répartition de la tension le long de l'enroulement aux différents instants. Sur les courbes, le temps est désigné en fraction de périodes d'oscillations depuis l'établissement de la répartition initiale de la tension.

De plus, l'analyse permet de conclure que la résistance de l'enroulement d'un transformateur n'est pas une grandeur constante mais une fonction de l'onde de l'harmonique. En ce qui concerne la résistance de l'enroulement et la déformation de l'onde, un transformateur diffère nettement d'une ligne de transport qui est dotée d'une impédance caractéristique constante pour toutes les ondes et impulsions et sur laquelle une onde se propage avec une déformation plus petite que celle du transformateur ($1\mu\text{s}/\text{Km}$ pour la ligne).

D'une manière identique sont analysés des phénomènes plus complexes qui se produisent dans le transformateur, lorsqu'arrive une impulsion aperiodique de forme quelconque.

Si l'impulsion est de forme oscillatoire, haute fréquence, le danger de résonance de l'impulsion de fréquence donnée et de l'un des harmoniques apparaît. Donc, dans un transformateur peuvent apparaître de grandes variations de tension entre l'enroulement de transformateur en un point donné et la terre. Dans chacun de ces cas, le transformateur peut subir une avarie qui aura pour résultat la mise hors service

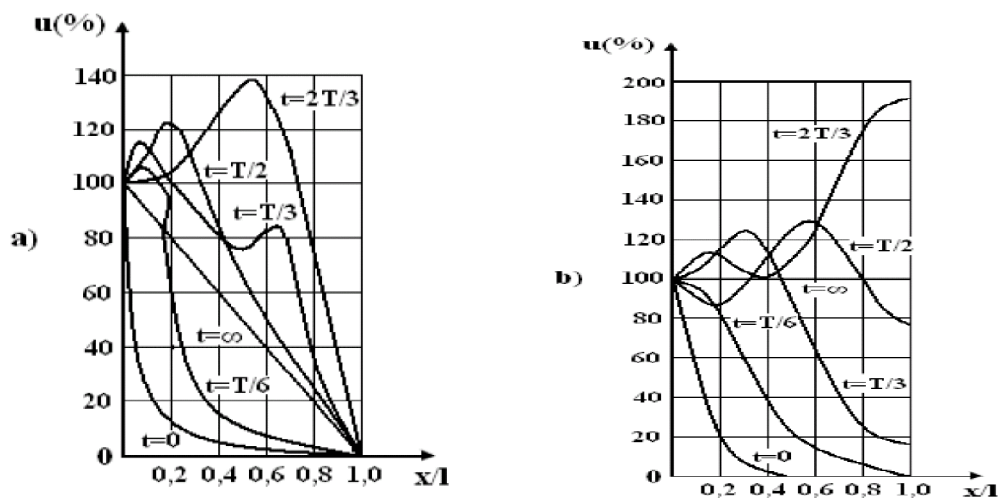


Fig. II.14 : Répartition de la tension le long de l'enroulement à différents instants pour :

- a : le cas du neutre mis à la terre.
- b : le cas du neutre isolé.

Conclusion :

Pour mieux métriser les phénomènes transitoires dans les transformateurs nous sommes obligés de connaître les différentes valeurs des capacité(C , K) ainsi que les inductances ((L , M) et la résistance(R) et pour cela nous sommes obligés de calculer les différents paramètres du transformateur en ce référant au diffèrent modèles mathématiques déjà étudiés.

III.1. Introduction

Les modèles mathématiques de simulations des dispositifs électrotechniques sont nécessaires afin de les exploiter au stade de conception de ces derniers. Etant donné que les transformateurs sont des éléments essentiels des systèmes des réseaux électriques, ces recherches nécessitent fréquemment des modèles de transformateurs. Le rôle d'un transformateur consiste à transférer la puissance du primaire au secondaire et ce rôle est fondamentalement lié au flux magnétique du noyau. Le transfert de puissance entre enroulements provoque toujours un flux de dispositif entre ces enroulements, à ce flux de dispersion correspond une impédance série du transformateur. A des fréquences plus élevées ou à des transitoires rapides, des capacités (des enroulements...) ne peuvent plus être négligées. Jointes aux coefficients d'auto-induction mutuelle des enroulements, elles forment des circuits oscillant aux fréquences des résonances. En vue d'étudier les phénomènes physiques dans les transformateurs, nous présentons les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature.

III.2. Modèle de Morched [MOR 93]

Ce modèle est utilisé dans EMTP pour modéliser le transformateur en haute fréquence.

Supposons un transformateur de 'n' bornes (y compris HT et BT), l'équation matricielle que relie les tensions et les courants des bornes est (III-1) ou sa forme réduite (III.2)

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdot & \cdot & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdot & \cdot & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n1} & \cdot & \cdot & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad \text{III.1}$$

$$[Y][V] = [I] \quad \text{III.2}$$

Avec :

[Y] :Matrice de conductance, dont les éléments sont complexes et dépendants de la fréquence

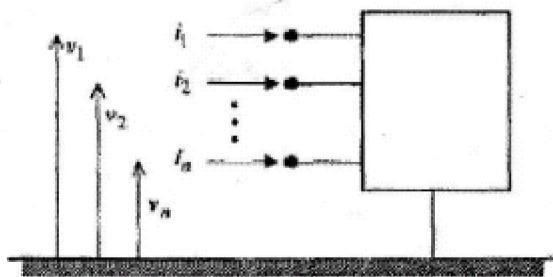


Fig III.1 Modèle d'un transformateur considéré comme une boîte de n bornes

Dans ce modèle, chaque élément de matrice des conductances est approximé avec une fonction rationnelle qui a les pôles et les zéros réels et complexes conjugués. Ensuite ces fonctions rationnelles seront synthétisées par des circuits R, L, C comme dans la figure (III.2).

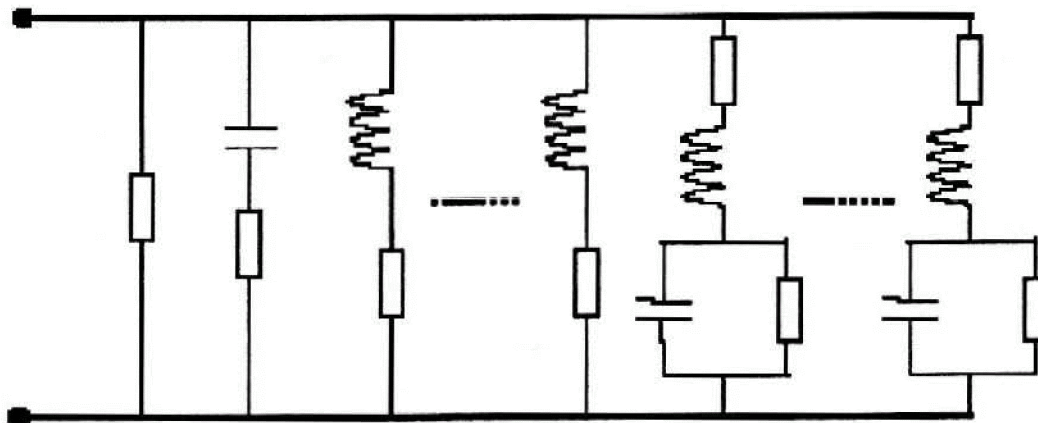


Fig III.2 : Circuit équivalent pour un élément de matrice de l'inductance.

Cependant, pour diminuer le calcul, ce modèle a fait une hypothèse simplificatrice en considérant que la matrice $[Y]$ est symétrique, ce qui n'est pas toujours valable. De plus, une autre difficulté provient de la détermination des éléments de la matrice $[Y]$ qui est aussi compliquée lorsqu'elle est réalisée en haute fréquence. L'avantage de ce modèle est qu'il nous permet de modéliser tous les types de transformateur à condition d'avoir les valeurs de la matrice de conductance.

III.3. Modèle de Leon : [Leo 93], [Leo 95]

Dans ces travaux, les auteurs ont présenté le développement d'un modèle du transformateur de puissance en HF. Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau du fer. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés :

- Une matrice d'inductance de fuite entre les paires de spires (ou section/galettes)
- Une matrice de capacité entre spires (ou section /galettes) et entre les spires et les masses.
- Une matrice de résistance, qui dépend de la fréquence et qui tient compte des courants de Foucault

Pour chaque colonne un système de trois matrices comme ci-dessous est calculé et puis transformé sous forme d'une équation d'état. Ensuite un circuit de Foster en série figure (III.3) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

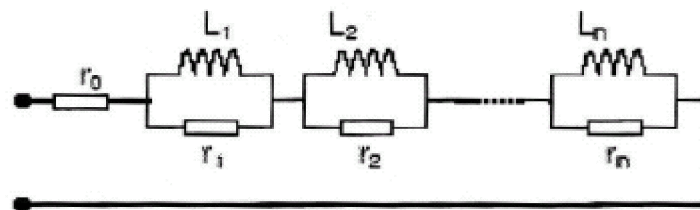


Fig. III.3 : Circuit de Foster en série

Pour le noyau de fer, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de Cauer figure (III.4)

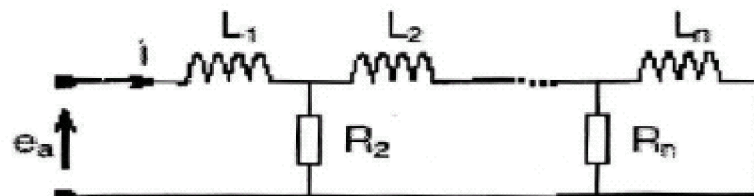


Fig. III.4 : Modèle de Cauer pour le noyau de fer.

Ce modèle, qui ne tient pas compte de l'inductance mutuelle dans l'air entre les enroulements, nous permet quand même de modéliser le transformateur par un circuit équivalent. Portant, il est encore assez compliqué en raisons des calculs analytiques et des transformations en circuit équivalent.

III.4. Modèle de Chimklai : [Chim 95]

Dans ce modèle, les auteurs ont proposé une méthode simple pour modéliser un transformateur de puissance. Ce modèle Figure (III.5) se base sur le modèle classique à

(50Hz) du transformateur. Ensuite pour modéliser le transformateur en HF, les capacités et les circuits R, L, C, seront synthétisés par les mesures et seront ajoutés dans le circuit du modèle classique. En effet, chaque circuit rajouté représentera un phénomène qui se produit en HF. Les capacités représentent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer... etc. Cette idée est la base pour établir plusieurs modèles qui sont développés après, cette méthode pour modéliser un transformateur est très simple et efficace.

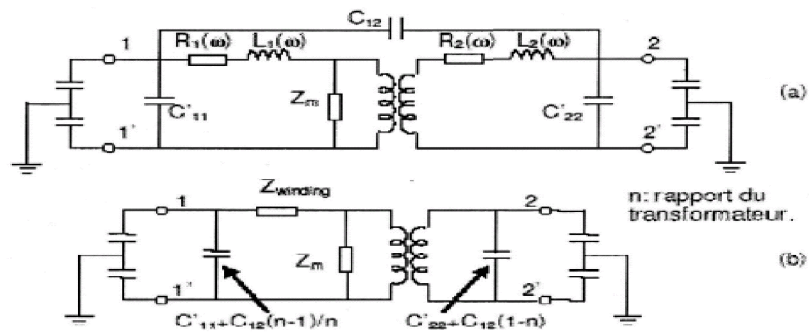


Fig. III.5 : Modèle du transformateur de Chimklai
 a) - circuit d'origine
 b) – circuit simplifié

Dans ce travail l'auteur se base sur un modèle classique à 50 Hz, qui comporte un transformateur idéal, la résistance et l'inductance de l'enroulement, et l'impédance magnétisante. L'extension à un modèle HF se réalise :

- La considération de la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, dite l'impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$) comme dans la figure (III.6).

Cette impédance est synthétisée par une méthode d'approximation non linéaire pour un circuit R, L, C.

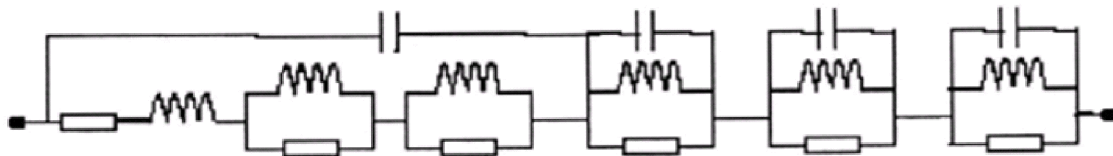


Fig. III.6 : $Z_{winding}$

Le rajout d'un système de capacités dont la capacité entre enroulements, capacité entre enroulement et la masse, capacité entre les spires d'un enroulement, capacité entre l'extérieur d'un enroulement et l'extérieur d'un autre. Elles sont toutes supposées constantes dans la gamme de fréquence étudiée. Toutes ces capacités sauf la capacité entre les spires d'un enroulement, peuvent être divisées en deux parties dont chacune est connectée à une extrémité de l'enroulement.

Ces travaux nous donnent une bonne base pour développer nos modélisations du transformateur. Pourtant, il reste encore des limites, il considère que les phases sont symétriques, la fréquence jusqu'à laquelle le modèle reste valable est de 100KHz.

III.5. Modèle de Gustavsen : [Gus 98]

Ce modèle suit le principe de celui de Morched, en considérant le transformateur comme une boîte noire. La différence est la méthode d'approximation des éléments de la matrice d'inductance. Dans ce modèle, les auteurs ont développé une méthode dite « vectorfitting » pour approximer chaque élément par circuit R, L, C équivalent.

Les avantages et les désavantages de ce modèle restent les mêmes que ceux du modèle de Morched, c'est la difficulté des mesures pour obtenir la matrice d'inductance qui est très délicate en HF.

III.6. Modèle d'Andrieu : [And 99]

Dans ce travail, les auteurs ont développé un modèle d'un transformateur de distribution triphasée à deux enroulements par des principes comme dans le modèle de Chimklai figure (III.7) pour modéliser un transformateur en HF, les phénomènes suivants sont pris en compte :

- Les capacités.
- Les résonances en HT.
- L'impédance de l'enroulement de BT, dépendant la fréquence (Z_{cc}).

L'auteur a également proposé une procédure, dans laquelle les mesures nécessaires sont fixées pour développer un modèle en HF. Ces mesures sont les mesures des capacités, les mesures en court-circuit et les mesures en circuit ouvert. Mais la fréquence limite dans laquelle le modèle est valable est inférieure à 1MHz, pour une fréquence plus haute on montre des désaccords entre le résultat de la simulation et la mesure.

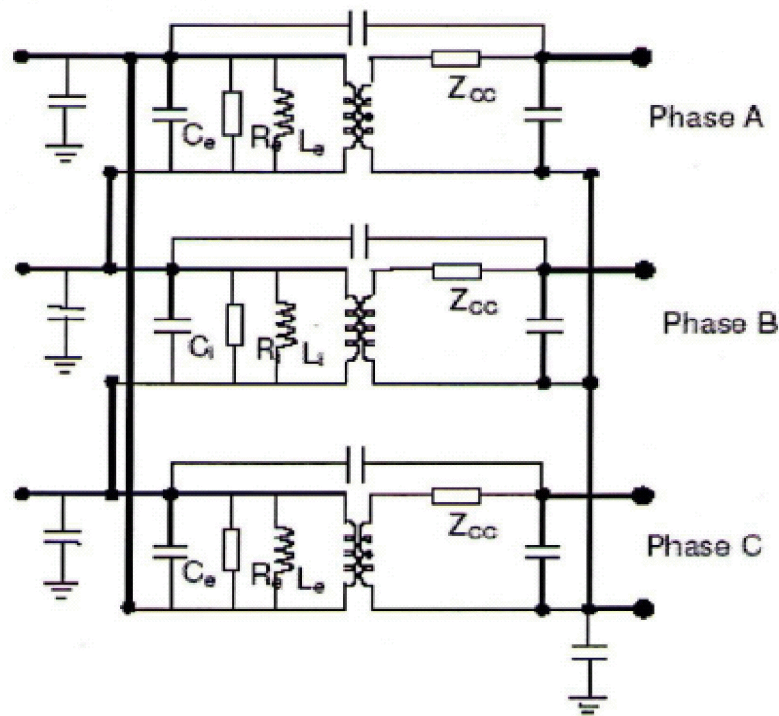


Fig. III.7 : Modèle d'Andrieu

Le circuit équivalent de l'impédance Z_{cc} est montré dans la figure (III.8)

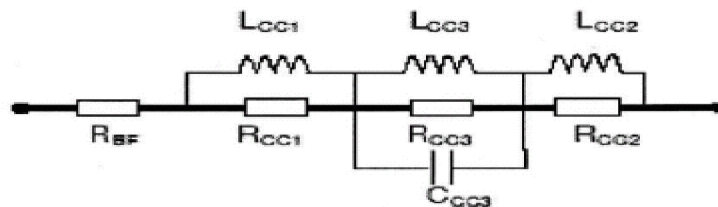


Fig. III.8 : Circuit équivalent de Z_{cc} .

III.7.Modèle de Noda: [Nod 02]

Dans ce travail, les auteurs ont montré le développement d'un modèle de transformateur de puissance en HF. Ce modèle suit le même principe que celui de Chimklai. Donc à partir de modèle à 50Hz, en HF il tient en compte de :

- ❖ Capacités entre les enroulements et entre les enroulements et la masse ($C_{s1}, C_{s2}C_{sm}$).
- ❖ Effet de peau du conducteur et du noyau de fer (Z_{skin}).
- ❖ Résonances créés par les inductances de l'enroulement et capacités entre les spires (Y_1, Z_1).

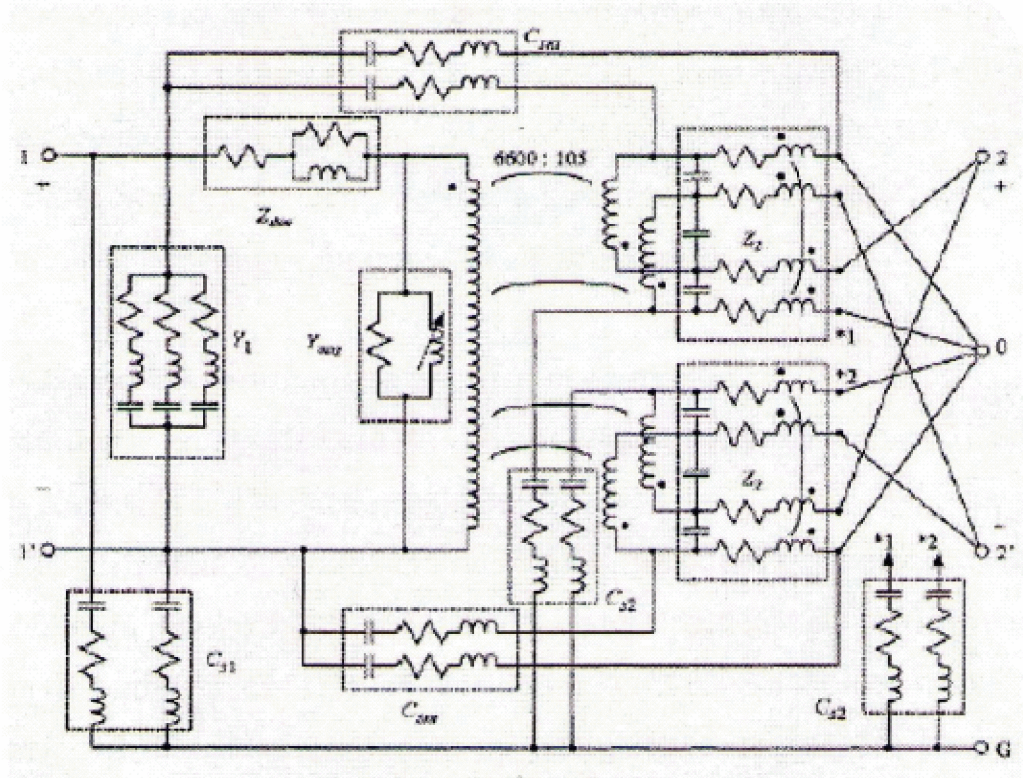


Fig. III.9 : Modèle de Noda.

Ce travail a donné un bon résultat sur la modélisation du transformateur en HF. Il a montré des méthodes simples pour synthétiser les circuits équivalents représentant les phénomènes comme des résonances, ou les capacités. Mais en raison de la structure particulière monophasée, la disposition particulière de l'enroulement BT (divisé en quatre), le modèle reste encore difficile à appliquer.

III.8. Le modèle d'E.M.T.P :

EMTP (Electro Magnetic Transient Program) est un programme de simulation, des régimes transitoires et permanents des réseaux électriques. Il est utilisé pour les études temporelles et fréquentielles.

Ce modèle consiste à représenter le transformateur par schéma électrique équivalent comprenant des transformateurs parfaits, une branche de magnétisation saturable modélisant le noyau de fer, des inductances de fuite des éléments (galettes, couches ou bobines) et les résistances des enroulements. Notant que ce modèle est utilisé dans les programmes d'étude des réseaux électriques.

A haute fréquence, on remplace les dipôles résistances et inductances par des circuits R, L en cascade ou en parallèle pour prendre en considération la variation de ces paramètres en fonction de la fréquence à cause de l'effet de peau et de la diminution de la pénétration du flux dans les tôles magnétiques. Il faut tenir compte aussi des capacités de couplage entre les éléments qui jouent un rôle important en haute fréquence.

La figure ci-dessous figure (III.10) décrit le schéma électrique équivalent utilisé dans EMTP pour la représentation d'un transformateur monophasé .

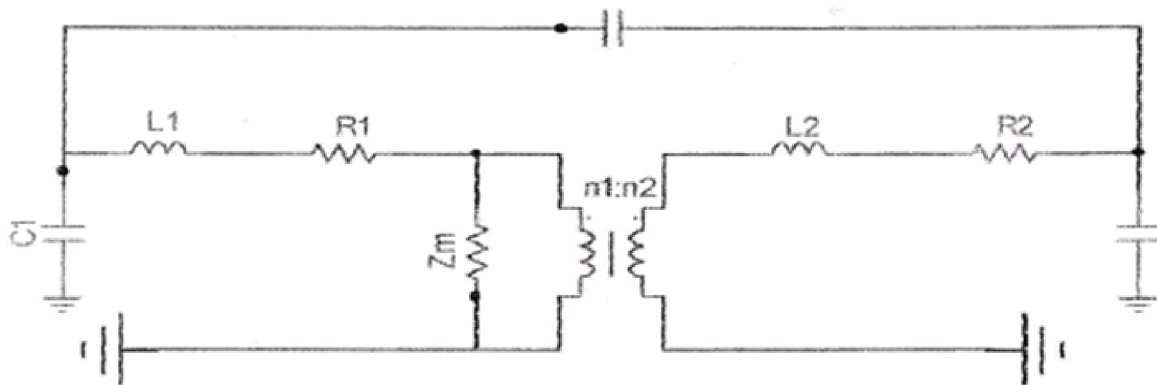


Fig.III.10 : Modèle classique d'un transformateur monophasé surEMTP

Les paramètres du schéma classique figure (III.10) sont déterminés, soit par calcul numérique ou analytique, à partir de la géométrie du transformateur, et en faisant des hypothèses simplificatrices (symétrie, perméabilité du noyau magnétique constante,...) soit par mesure (essais à vide, essais en court-circuit,...).

Le principal avantage du modèle EMTP est qu'il est possible de faire des études d'interactions du transformateur avec le réseau, dans des configurations quasi-réelles (présence de protection...). En plus des éléments linéaires (résistances et inductances linéaires), il tient compte des éléments non linéaires, tels que les parafoudres.

Il est important de remarquer que le modèle EMTP, est intéressant pour les études des réseaux avec une modélisation globale du transformateur, mais il n'est bien adapté pour les études internes du transformateur.

Il faut noter que ce type de représentation dans EMTP peut, pour certaines géométries de transformateur, poser des problèmes. En effet le transformateur réel est symétrique alors que le modèle spécifique à EMTP ne l'est pas. L'inductance de court-circuit n'est pas la même vue du secondaire. Ceci est dû au fait que le schéma utilisé dans EMTP ne comporte qu'une seule branche magnétique Z_m figure (III.10) [H.W.DO 87].

III.9. Le modèle de RESEL :

Ce modèle est développé par des ingénieurs d'Etude et de recherche de l'Electricité de France (EDF), et son but principal est l'étude des phénomènes transitoires dans les réseaux électriques, en particulier dans les transformateurs. Pour modéliser un transformateur, il est nécessaire d'utiliser deux types de schéma, couplés entre eux. L'un traduit le comportement électrique du transformateur, l'autre exprime son comportement magnétique figure (III.11). Le circuit électrique est représenté par plusieurs cellules résistances, capacités et forces magnétomotrices. L'association de ces cellules tient compte des techniques de bobinage du transformateur.

Le circuit magnétique est composé d'un réseau de ré reluctances et de forces électromotrices.

Les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique. Par contre les sources du circuit magnétique sont liées aux courants dans les enroulements. Afin de tenir compte des effets de la fréquence, le circuit magnétique est décomposé en éléments simples pour les quels la résolution des équations de Maxwell est plus simple. Les ré reluctances complexes ainsi calculées se composent de cellules de résistances et d'inductances.

De la même façon, pour prendre en considération l'effet de peau, on introduit des éléments complexes qui traduisent les pertes dans les conducteurs. Le programme ne traite que les éléments de réseau à constantes localisées, et ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur.

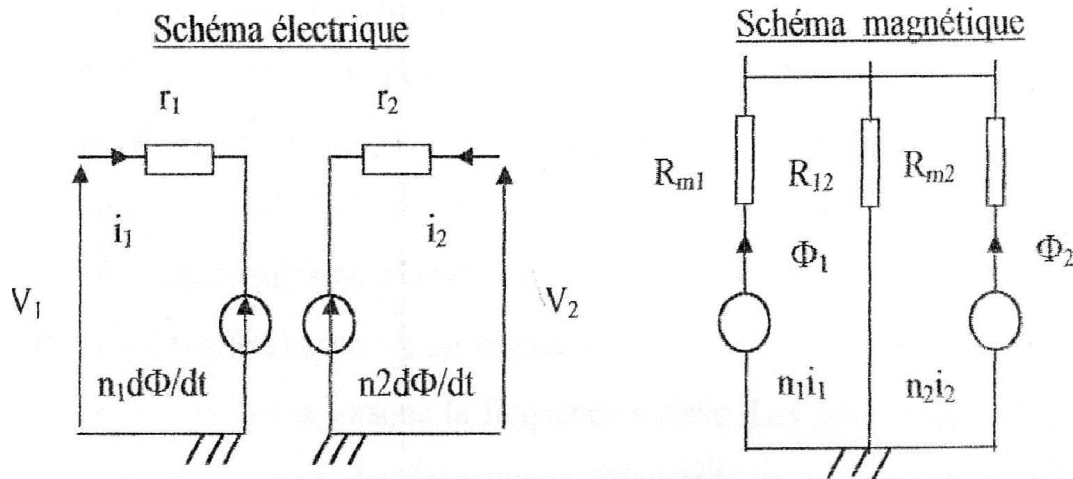


Fig.III.11 : Principe du modèle à ré reluctances et sources commandées

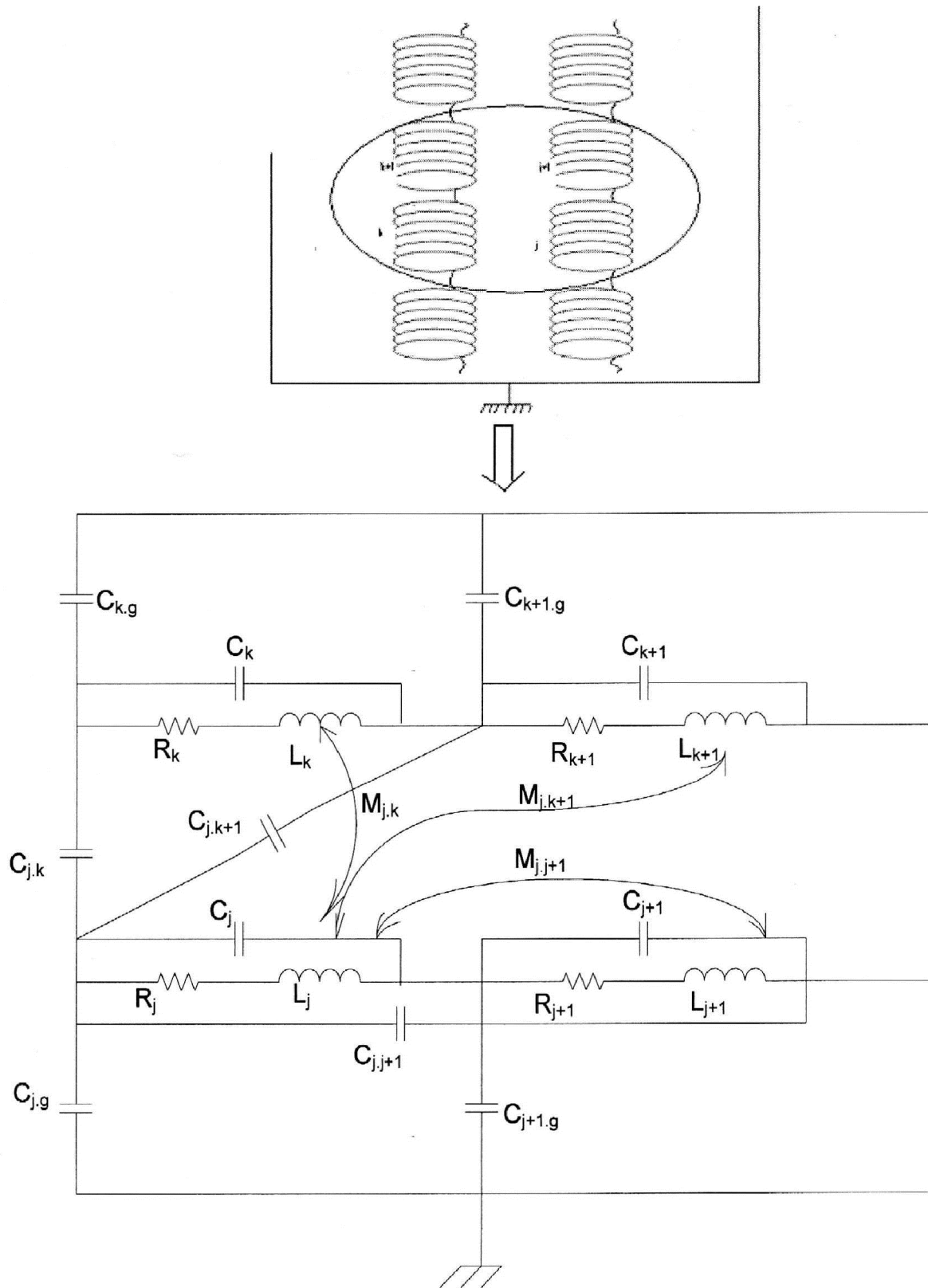
III.10. Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles :

On peut assimiler le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc à celui d'un système de capacités et d'inductances [Der 98]. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances, inductances et capacités. Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement atteint dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulations mises en œuvre.

Le transformateur est discrétisé par spires ou par galettes ou par des bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres éléments. Entre les éléments, il existe des capacités de couplage et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse, figure (III.12)

Quel que soit le type de représentation, les paramètres correspondants à chaque élément sont calculés en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques de bobinage ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau magnétique. Ce modèle est le plus répandu et utilisé à l'heure actuelle. Le nombre de paramètres à calculer est important. Pour n élément, il faut calculer $(n+1) n/2$ capacités et $(n+1) n/2$ inductances.

Le schéma est modifié, plus au moins, selon l'intérêt de chaque étude dont les paramètres sont déterminés, soit par la mesure, soit par des calculs analytiques directs de la géométrie [Der 98]



Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différents modèles de transformateur en haute fréquence, parmi ces modèles on s'intéressera au modèle basé sur la représentation RLC afin de bien étudier les problèmes dus aux surtensions.

Introduction :

Etant donné que les conducteurs constituant les enroulements du transformateur possèdent une longueur importante (quelques kilomètres), le caractère ondulatoire de celui-ci ne nous inquiétera guère. On notera bien sur que le schéma équivalent de l'enroulement, à la différence de celui de la ligne, possède en plus des inductances mutuelles M_{ij} , des capacités longitudinales K (figure IV.1).

IV.1.Caractéristiques du transformateur

Comme application, notre étude s'est portée sur le transformateur 500/15.75KV portant les indications suivantes :

IV.1.1.Caractéristiques électriques

$S_n=200\text{MVA}$: Puissance apparente nominale.

$U_{HT}=500\text{KV}$: Tension nominale de l'enroulement haute tension.

$U_{BT}=15.75\text{KV}$: Tension nominale de l'enroulement basse tension.

$U_{CC} =12.5\%$: Tension de court-circuit.

$\Delta P_{CC}=700\text{W}$: Perte de puissance en court-circuit.

$\Delta P_0=175\text{W}$: Perte de puissance à vide.

$I_0=0.35\%$: Courant à vide.

IV.1.2.Caractéristiques géométriques

$d_{\text{extHT}} =2770 \text{ mm}$: diamètre extérieur de l'enroulement haute tension.

$d_{\text{int HT}} =1760 \text{ mm}$: diamètre intérieur de l'enroulement haute tension

$d_{\text{extBT}} =2770 \text{ mm}$: diamètre extérieur de l'enroulement basse tension.

$d_{\text{intBT}} =1760 \text{ mm}$: diamètre intérieur de l'enroulement basse tension.

$d_n= 1100 \text{ mm}$: diamètre du noyau.

$d_c = 5000 \text{ mm}$: diamètre de la cuve.

$L_{\text{en}} = 2360 \text{ mm}$: longueur de l'enroulement.

Dans notre transformateur le mode de couplage utilisé est étoile/triangle.

Les dimensions géométriques sont représentées sur la figure (IV.1)

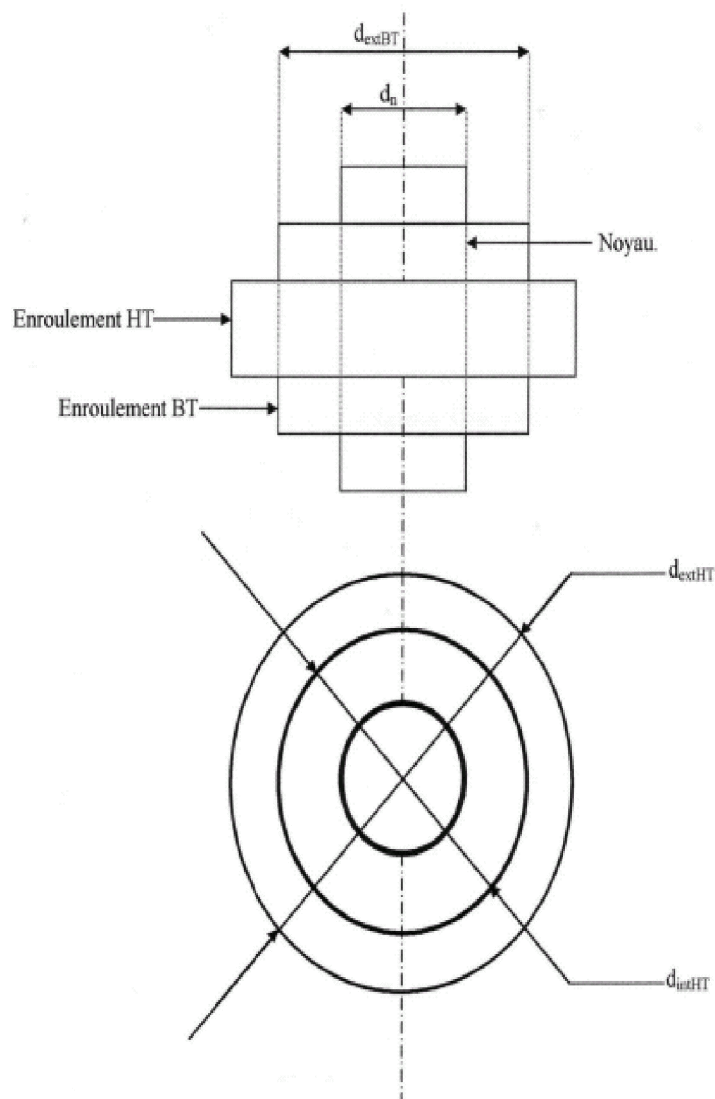


Fig. IV.1. Caractéristiques géométriques du transformateur

IV.2. Relations empiriques pour le calcul des paramètres :

Nombreuses ont été les expériences menées sur les transformateurs soumis à des différentes formes d'ondes impulsionnelles, qui nous ont amené aux relations que nous citerons ci-dessous pour un calcul aisé des paramètres du transformateur.

IV.2.1. Détermination de la résistance R :

La résistance de l'enroulement R dépend de la forme d'onde appliquée, elle est donnée par la relation empirique suivante [HELLE 73] :

$$R_{\Delta} = k_1 \cdot R_0 \quad \text{IV.1}$$

Avec :

R_{Δ} : La résistance correspondante au cas de l'application d'une onde de tension impulsionnelle sur les enroulements de transformateur.

k_1 : Facteur de précision de la résistance.

R_0 : La résistance de l'enroulement correspondante à la fréquence 50 HZ , elle est calculée par :

$$R_0 = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_n^2}{S_n^2} \quad \text{IV.2}$$

Où :

P_{cc} : représente les pertes de puissance en court-circuit.

U_n, S_n sont respectivement la tension et la puissance nominales du transformateur.

Pour un seul élément, on aura :

$$R = \frac{R_{\Delta}}{n}$$

n : est le nombre d'éléments.

Remarque :

Les paramètres de l'enroulement primaire (**HT**) seront repérés par l'indice **1**.

IV.2.2. Calcul numérique de la résistances R_1 :

La résistance d' enroulements primaire sera calculée par les formules (IV.1) et (IV.2).

$$R_{\Delta 1} = k_1 \cdot R_{01}$$

$$R_{01} = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_{HT}^2}{S_n^2} = \frac{700 \cdot (500)^2 \cdot 10^3 \cdot 10^6}{(200 \cdot 10^6)^2} = 4.375 \Omega$$

$$k_1 = 10.775$$

IV.2.2.1. Pour l'enroulement primaire :

$$R_{\Delta 1} = 10.775 \cdot 4.375 = 46.27 \Omega$$

Pour un enroulement on aura :

$$R_1 = \frac{R_{\Delta 1}}{n} = \frac{12.71}{6} = 8 \Omega$$

R_1 : est la résistance d'un élément de l'enroulement primaire.

IV.3. Détermination des inductances propres L et mutuelles M :**IV.3.1 Relations empiriques pour le calcul des inductances propres L et mutuelles M :**

Calculer l'inductance L nécessite la connaissance de la valeur de l'inductance totale de l'enroulement. Cette dernière est donnée par la relation suivante [LOKHA].

$$L_{en} = k_2 * L_{cc} \tag{IV.4}$$

Où :

L_{en} : est l'inductance totale de l'enroulement.

k_2 : est le facteur qui tient compte de la forme d'onde appliquée à l'enroulement, il est aussi appelé le facteur de précision pour l'inductance L, en générale $k_2 = 0.65$.

L_{cc} : est l'inductance propre correspondante au régime du court-circuit, elle est donnée par :

$$L_{CC} = \frac{1}{2\pi f} * \frac{U_{CC}}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \tag{IV.5}$$

Avec :

U_{CC} : la tension du court-circuit du transformateur.

f : la fréquence de service du transformateur.

L'inductance d'un seul élément est donnée par :

$$L = \frac{L_{en}}{n} \tag{IV.6}$$

n : nombre d'éléments.

IV.3.2. Calcul numérique des inductances propres L et mutuelles M :**IV.3.2.1. Calcul de l' inductances propres L :****IV.3.2.1.1. Pour l'enroulement primaire :**

$$L_{1CC} = \frac{1}{2\pi f} * \frac{U_{CC}}{100} * \frac{U_{HT}^2}{S_n} = \frac{1}{2 \cdot (3.14) \cdot 50} \frac{(12.5) \cdot ((500 \cdot 10)^3)^2}{100 \cdot 200 \cdot 10^6} = 0.5H.$$

$$L_{1CC} = 0.5H$$

D'ou :

$$L_{en} = 0.5 * 0.65 = 0.325 = 325000 \mu H$$

Pour un seul élément

$$L'_1 = \frac{L_{en}}{6} = \frac{325000}{6} = 54166.666 \mu H$$

$$L'_1 = 54166.666 \mu H$$

Remarque :

L'inductance d'un élément de l'enroulement L'_1 comporte une inductance propre L_1 , l'inductance mutuelle entre différents éléments de l'enroulement et la mutuelle entre l'élément d'un enroulement et les éléments de l'autre enroulement. Donc pour pouvoir calculer L_1 , on est obligé de passer par le calcul des inductances mutuelles M.

IV.3.2.2. Calcul des inductances mutuelle M :

Les inductances mutuelles sont calculées par la fonction empirique [LOKHA].

$$\frac{M}{L} = f\left(\frac{a}{b}\right) \quad \text{IV.7}$$

Qui dépend des positions des éléments par rapport au noyau et entre eux. Cette fonction est représentée sur la figure (IV.a).

Avec :

a : est la distance entre les éléments (disque, bobine, spires ,etc...)de l'enroulement.

b_{HT} : distance entre l'enroulement HT et le noyau.

b_{BT} :est la distance entre l'enroulement BT et le noyau. (Voir figure (IV.a))

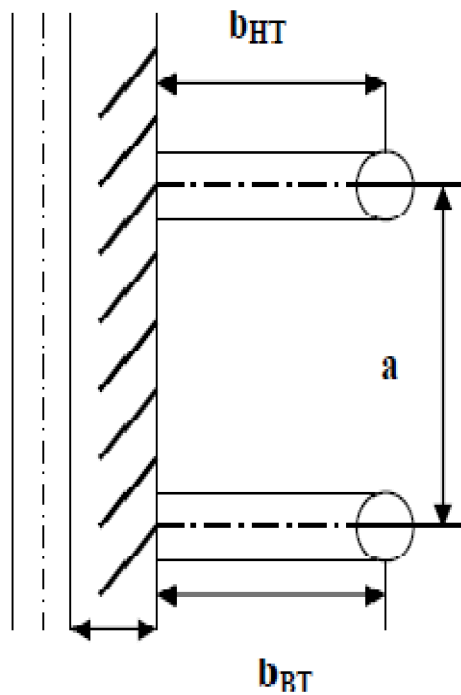


Fig IV.a. Disposition schématique des spires

Pour cela on détermine d'abord a et b qui dépendent des caractéristiques géométriques des enroulements du noyau et de la cuve : figure (IV..a) et (IV.b)

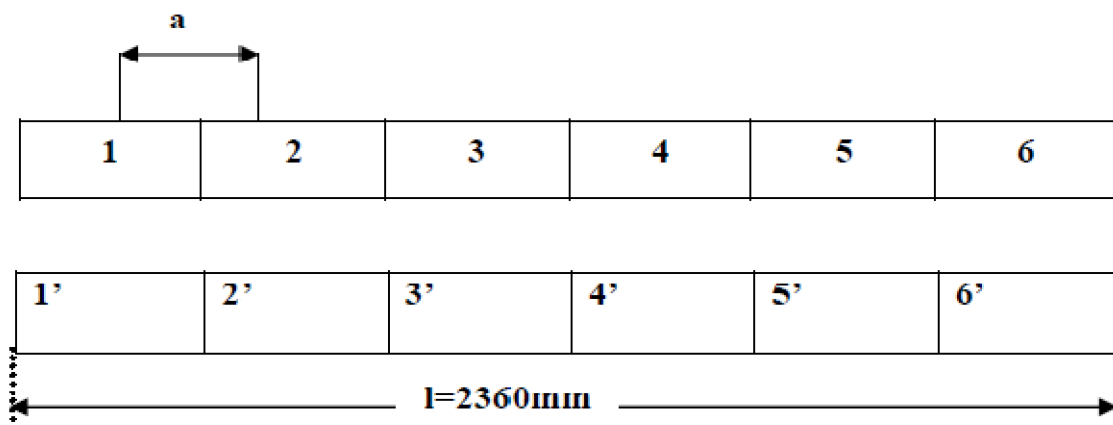


Fig. IV.b : Subdivision des enroulements HT et BT

La longueur d'un élément sera donc :

$$a = \frac{l}{n} = \frac{2360}{6} = 393.33\text{mm}$$

La valeur de b sera donnée par :

Pour l'enroulement haute tension :

$$b_{HT} = r_{moyHT} - r_n$$

Avec :

$$r_n = \frac{d}{2} = \frac{1100}{2} = 550 \text{ mm} \quad \text{Rayon du noyau.}$$

$$r_{moyHT} = \frac{r_{extHT} + r_{intHT}}{2} = \frac{1385 + 880}{2} = 1132.5 \text{ mm.}$$

Donc

$$b_{HT} = 582.5 \text{ mm}$$

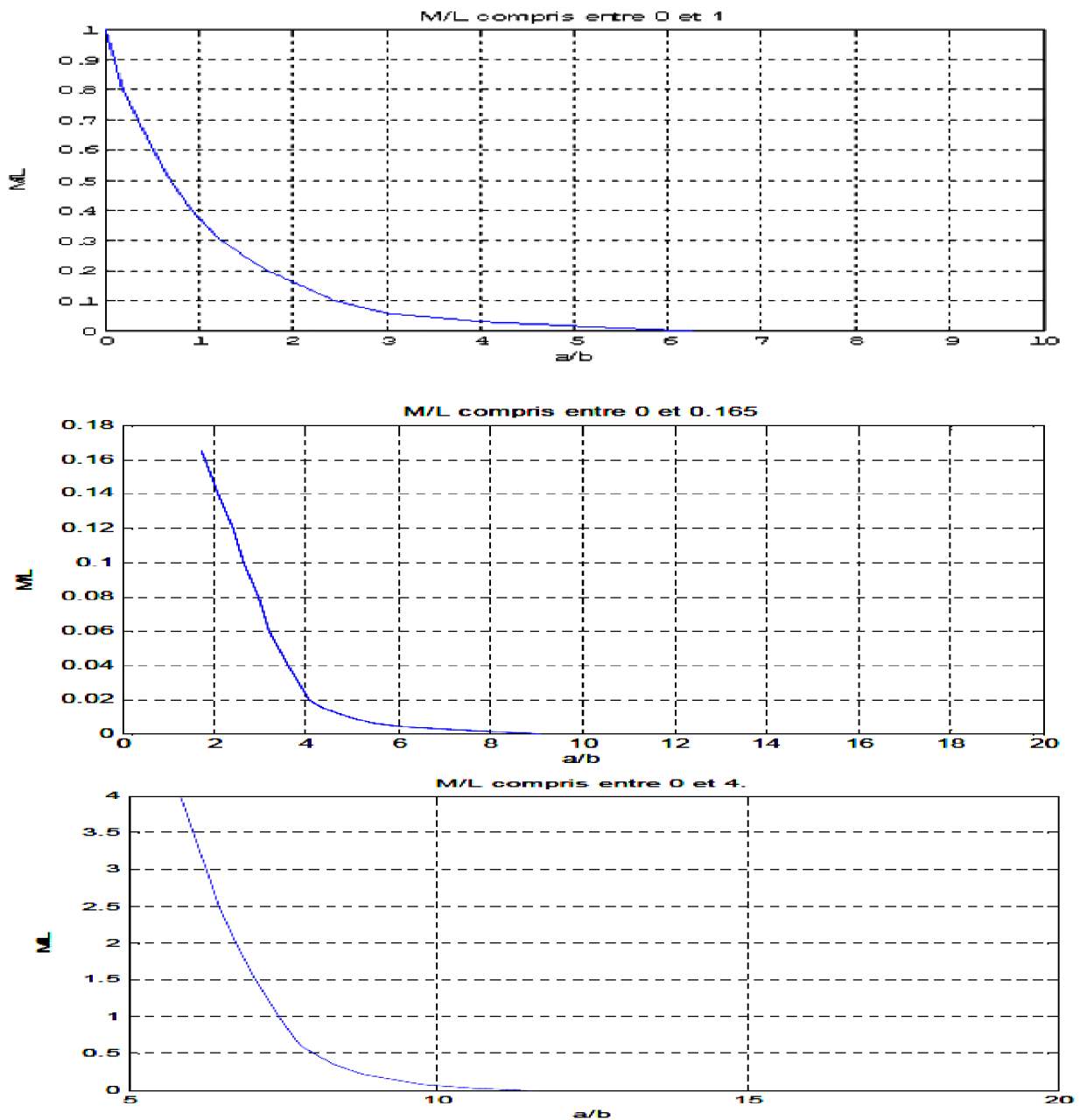


Fig. V .2 : Représentation de la fonction $M/L = f(a/b)$

Connaissant a et b et en utilisant les courbes de la figure (IV.2), on déterminera les valeurs des inductances mutuelles entre les éléments de l'enroulement primaire (tableaux (IV.1)).

IV.3.2.2.1. Calcul de la mutuelle entre les éléments de l'enroulement HT

N° de la mutuelle	a [mm]	b_{HT} [mm]	a/b_{HT}	$K_{H-H} = \frac{M_{H-H}}{L_1}$	$M_{H-H}[\mu H]$
1	393.33	582.5	0.6752	0.53	13514.44
2	786.66		1.3504	0.28	7139.70
3	1180		2.0257	0.15	3824.84
4	1573.33		2.7009	0.075	1912.42
5	1966.66		3.3762	0.04	1019.95

Tableau (IV.1) : calcul des mutuelles entre les éléments de l'enroulement HT.

Après avoir calculé inductance mutuelle, l'inductance propre sera calculée suivant ces formules :

$$L_1 = \frac{L'_1}{1 + \sum K_{H-H} + \sum K_{H-B}} \quad \text{IV.11}$$

$$\sum K_{H-H} = 1.075$$

$$\sum K_{H-B} = 0.03805$$

Après calcul, on aura :

$$L_1 = L_H = 25498.96 \mu\text{H} \text{ (l'inductance propre d'un élément de l'enroulement primaire)}$$

IV.4. Détermination des capacités transversales C et longitudinale K

IV.4.1. Relations empiriques pour le calcul des capacités C et K

La capacité C entre l'enroulement et le noyau est donnée par [LOKHA 73].

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 - d_2} \quad \text{IV.13}$$

Où :

ε_r : Permittivité relative de l'huile.

ε_0 : Permittivité absolue du vide.

l : longueur totale de l'enroulement.

d_1 et d_2 : sont respectivement le diamètre intérieur de l'enroulement et du noyau.

La capacité longitudinale K sera calculée en fonction de la valeur du facteur α de la répartition initiale

La capacité d'entrée des transformateurs est donnée par [ALAIN 94]

$$C_{\text{ent.tr}} = \frac{Q_{x=0}}{U_0} = \frac{1}{U_0} * k_{\text{tot}} * \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=0} = \frac{1}{U_0} * k_{\text{tot}} * U_0 * \alpha \quad \text{IV.14}$$

Sachant que :

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{\text{tot}}}{K_{\text{tot}}}} \quad \text{IV.15}$$

$U_0 = U_{\text{choc}}$ est l'amplitude maximale de tension à l'entrée de l'enroulement.

On aura :

$$C_{\text{ent.tr}} = \sqrt{K_{\text{tot}} * C_{\text{tot}}} \quad \text{IV.16}$$

Donc connaissant α et $C_{\text{ent.tr}}$ on peut facilement déterminer K.

IV.4.2. Calcul numérique des capacités transversales C et longitudinale K

IV.4.2.1. Calcul des capacités transversales C

La capacité transversale de l'enroulement primaire par rapport à la masse (la cuve) sera calculée par cette formule :

$$C_{1\text{tot}} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{\text{cuve}} + d_{\text{extHT}}}{d_{\text{cuve}} - d_{\text{extHT}}}$$

$$\rightarrow C_{1\text{tot}} = 8,85 \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2,360 \cdot \frac{5000 + 2770}{5000 - 2770} = 890,82 \mu\text{F}$$

D'où :

$$C_1 = \frac{C_{1\text{tot}}}{n+1} = \frac{891,2}{7} = 130 \text{PF} = 0,00012 \mu\text{F}$$

C_1 : la capacité transversale d'un seul élément de l'enroulement primaire (HT).

IV.4.3. Calcul de la capacité longitudinale K de l'enroulements primaire :

Connaissant la valeur de la capacité C_1 , on peut passer facilement au calcul de la capacité longitudinale K_1 par la formule suivante :

$$K_{\text{ntot}} = \frac{C_{n\Sigma}}{\alpha^2} \quad \text{IV.17}$$

Avec :

α est le facteur qui tient compte de la répartition initiale de la tension

$$C_{1\Sigma} = C_1 + \frac{C_{12} \cdot C_2}{C_{12} + C_2} \quad \text{IV.18}$$

Mais pour tout cela, il faut d'abord avoir la valeur de α calculée à partir de la fonction suivante :

$$F(\alpha) = \frac{sh[\alpha(1-x)]}{sh(\alpha.l)} - u(x)$$

Le tableau qui suivra résumera la répartition initiale des tensions, donnée par les constructeurs des transformateurs et qui a été dressé pour un enroulement comportant 36 bobines, qui sera traduit par le graphe de la figure (IV.4)

N° du nœud	U(%)
A-0	100
2-0	96
4-0	96.5
6-0	97
8-0	96.5
10-0	95.3
12-0	99
14-0	102
16-0	103
18-0	104
20-0	104.7
22-0	104.7
24-0	104
26-0	102
28-0	103
30-0	103.5
32-0	103.5

Tableau (IV.4)

Après tout calcul fait, on aura $F(\alpha) = 0$ pour la valeur de $\alpha=1$

IV.4.3.1. Pour le primaire :

$$K_{1\text{tot}} = \frac{C_{I\Sigma}}{\alpha^2}$$

Avec :

$$C_{1\text{tot}} = C_1 + \frac{C_{12} \cdot c_2}{C_{12} + c_2} = 0.00013 + \frac{0.00164 \cdot 0.00023}{0.00164 + 0.00023} = 0.00033 \mu\text{F}$$

$$C_{1\text{tot}} = 0.00033 \mu\text{F}$$

Donc la capacité longitudinale de l'enroulement primaire pour un élément est :

$$K_1 = 0.00033 \cdot 6 = 0.0019 \mu\text{F}$$

$$K_1 = 0.0019 \mu\text{F}$$

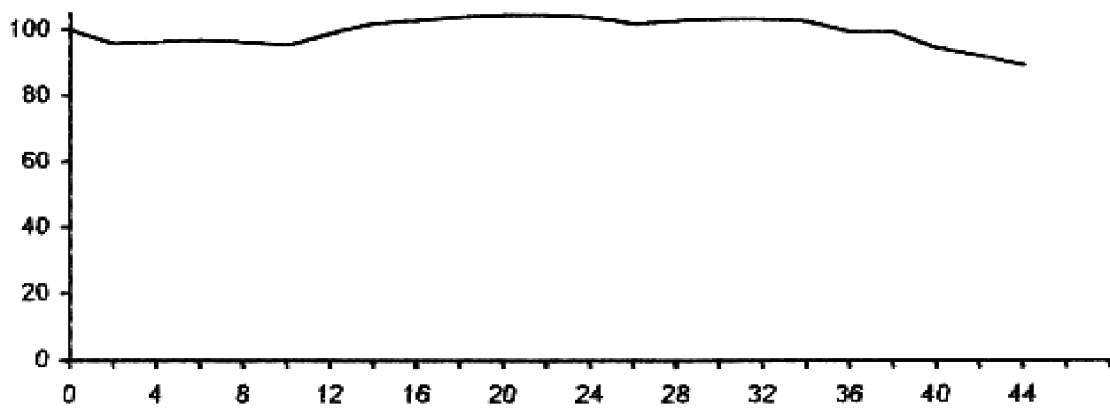


Fig. IV.4 : Répartition de la tension initiale fournie par le constructeur

V.1 introduction :

Comme, il a été démontré précédemment le passage de la répartition initiale à la répartition finale se fait par des oscillations ayant lieu dans le temps et dans l'espace.

L'analyse de ce phénomène pendant ce stade est très délicat, car le schéma équivalent est très compliqué et il faut prendre en considération : l'influence des couplage existant entre les parties de l'enroulement qui ne peuvent pas être exprimées par des simple formules. l'influence de la résistance des enroulements et enfin l'influence des conductibilité des isolants .

Nous allons essayer dans ce chapitre d'approcher le problème mathématique puis de contourner les difficultés rencontrées par des méthodes numériques.

V.1.1. Equations électriques de enroulement :

Nous raisonnerons sur le schéma de la figure (V-1) , où :

R_1, L_1, C_1, K_1 sont respectivement la résistance , l'inductance , la capacité transversale, et la capacité longitudinale d'un élément d'un enroulement .

V.1.2. Mise en équations du circuit électrique :

L'application des deux lois de Kirchhoff au circuit équivalent de l'enroulement (fig.V-1), nous conduira aux deux systèmes d'équations suivants :

V.1.2.1. Pour les tensions :

Notons (V.1) ce système :

$$\begin{aligned}
 U_1 - U_2 &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + M_{15} \frac{di_5}{dt} + M_{16} \frac{di_6}{dt} \\
 U_2 - U_3 &= R_1 i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + M_{25} \frac{di_5}{dt} + M_{26} \frac{di_6}{dt} \\
 U_3 - U_4 &= R_1 i_3 + L_1 \frac{di_3}{dt} + M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt} + M_{35} \frac{di_5}{dt} + M_{36} \frac{di_6}{dt} \\
 U_4 - U_5 &= R_1 i_4 + L_1 \frac{di_4}{dt} + M_{41} \frac{di_1}{dt} + M_{42} \frac{di_2}{dt} + M_{43} \frac{di_3}{dt} + M_{45} \frac{di_5}{dt} + M_{46} \frac{di_6}{dt} \\
 U_5 - U_6 &= R_1 i_5 + L_1 \frac{di_5}{dt} + M_{51} \frac{di_1}{dt} + M_{52} \frac{di_2}{dt} + M_{53} \frac{di_3}{dt} + M_{54} \frac{di_4}{dt} + M_{56} \frac{di_6}{dt} \\
 U_7 &= 0 \text{ (Relié à la terre)}
 \end{aligned} \tag{V.1}$$

Généralisation :

Pour $1 \leq k \leq n$ ou n est le nombre d'éléments

$$U_k - U_{k+1} = R_1 i_k + L_1 \frac{di_k}{dt} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n M_{kl} \frac{di_l}{dt}$$

V.1.2.2. Pour les courants :

Notons (V.1) ce système ;

$$i_0 - i_1 = -k \frac{du_2}{dt} + (c+k) \frac{du_1}{dt}$$

$$i_1 - i_2 = -k \frac{du_1}{dt} + (c+2k) \frac{du_2}{dt} - k \frac{du_3}{dt}$$

$$i_2 - i_3 = -k \frac{du_2}{dt} + (c+2k) \frac{du_3}{dt} - k \frac{du_4}{dt}$$

$$i_3 - i_4 = -k \frac{du_3}{dt} + (c+2k) \frac{du_4}{dt} - k \frac{du_5}{dt}$$

V.2

$$i_4 - i_5 = -k \frac{du_4}{dt} + (c+2k) \frac{du_5}{dt} - k \frac{du_6}{dt}$$

$$i_5 - i_6 = -k \frac{du_5}{dt} + (c+2k) \frac{du_6}{dt}$$

Généralisation :

Le système (V-2) sera généralisé à n éléments comme suit :

a) Pour : $1 \leq k \leq n-1$

$$i_k - i_{k+1} = -k \frac{du_k}{dt} + (c+2k) \frac{du_{k+1}}{dt} - k \frac{du_{k+2}}{dt}$$

b) Pour : $k=0$

$$i_0 - i_1 = (c+k) \frac{du_1}{dt} - k \frac{du_2}{dt}$$

c) Pour : $k=n$

$$i_n - i_{n+1} = -k \frac{du_n}{dt} + (c+k) \frac{du_{n+1}}{dt}$$

Pour résoudre ce système différentiel on utilisera, la fonction ode 45 prévue par **MATLAB 7.8.0** cette fonction utilise la méthode de Runge kutta avec un pas de calcul automatique.

V.2. Modélisation et simulation de l'onde de choc standard 1.2/50us sur MATLAB 7.8.0

La forme d'onde appliquée sur l'enroulement est un facteur important pour la résolution des équations différentiels.

On considère l'onde bi-exponentielle suivante :

$$u_0 = U_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad \text{avec :}$$

$$U_0 = 2315 \text{ kv}$$

$$a = 0.018889$$

$$b = 1.958565$$

pour avoir des résultats correspondant au cas le plus sévère, nous avons utilisé l'onde complète d'essai 1.2/50us

a) Schéma bloc de l'onde de choc simulé sur MATLAB 7.8 SIMULINK

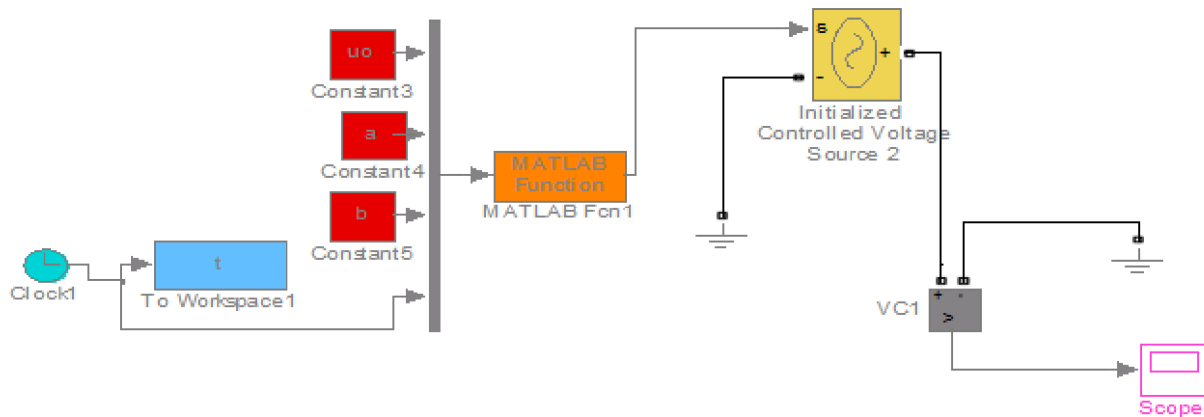
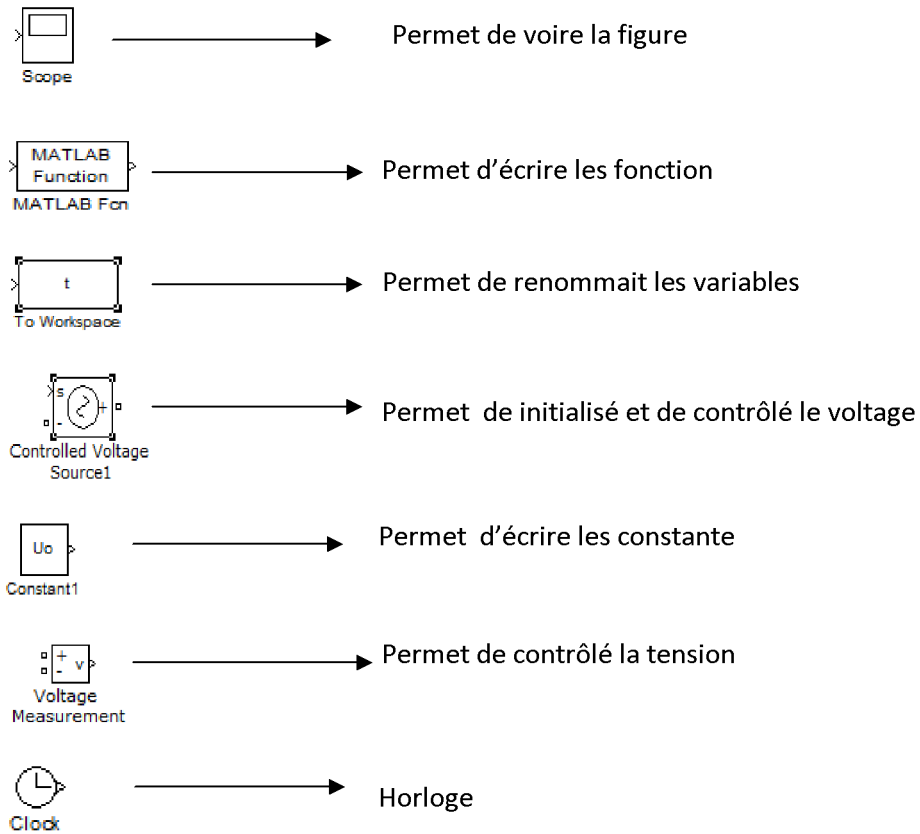


Schéma block de simulation de l'onde de choc 1.2/50 us

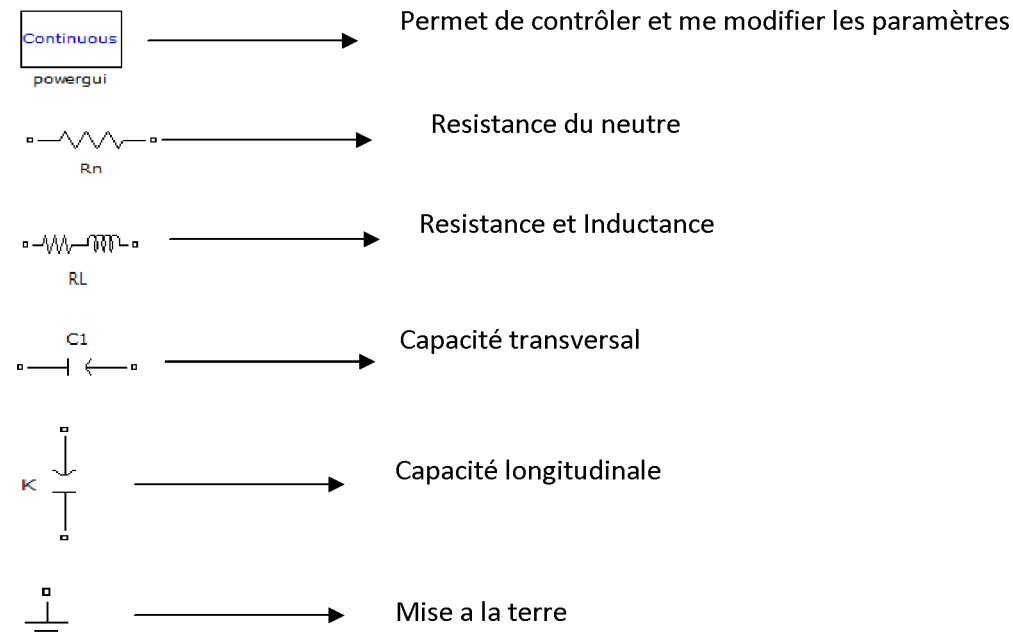
Avec :



Tous ces block nous ont permis de simuler et de tracer l'onde de la figure : (5-3 annexe 1)

V.3. Simulation de l'ensemble enroulement et onde de choc sur MATLAB SIMULINK

Dans cet simulation on a utilisé les éléments suivants :



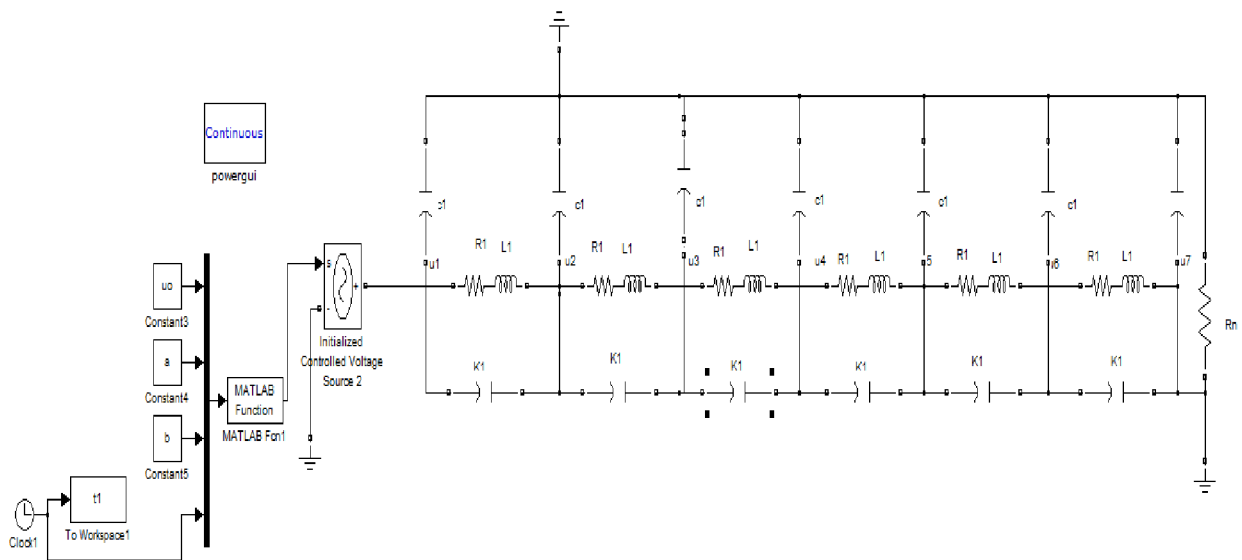


Fig V.2 Schéma équivalent de l'enroulement soumis à des surtensions

V.4. Analyse des résultats de la simulation :

l'instrument de calcul mis en œuvre dans notre étude est le logiciel MATLAB SIMULINK 7.8.0 . les résultats de ces calculs sont classes selon la disposition du neutre par rapport a la terre.

La variation de la tension le long de l'enroulement diffère selon le régime du neutre est les différents résultats sont consigné dans les tableaux suivant :

(V. a) : pour neutre isolé .

(V. b) : pour neutre mis à la terre .

Différentes tensions	Valeurs des tension en KV
U1	2700
U2	2200
U3	1700
U4	1200
U5	550
U6	0

(Tableau V-a) Neutre mise a la terre

Différentes tension	Valeurs des tension en KV
U1	3300
U2	3600
U3	3700
U4	3750
U5	3800
U6	3900

(Tableau V-b) Neutre isolé de la terre

V.4.1. Interprétation des résultats :

➤ Neutre isolé de la terre :

lors de la propagation de l'onde de surtension, l'enroulement subit un accroissement de tension allant ainsi de 3300kv aux début de ce dernier pour atteindre 3900kv à la fin soit une augmentation de 600 à 700 KV.

cette augmentation de la tension le long de l'enroulement ainsi que la variation au cour du temps est montrée avec exactitude sur les(fig. 7 Annexe 8) et(fig.12 Annexe 13) en voit bien que la tension peut atteindre des valeur très grandes chose qui est dangereux pour l'isolation du transformateur .

➤ Neutre mis a la terre :

Une fois que l'onde de surtension a pénétré dans l'enroulement, elle se propage et la tension le long de ce dernier évolue dans le sens décroissant, elle a l'allure d'une moitié de parabole concave .

Comme exemple une diminution de 1000kv est enregistrée entre la tension d'entrée de l'enroulement (U1) et la tension(U3) ,(fig.1 Annexe 2) et (fig.3 Annexe 4).

A partir de là, la tension continue a diminuer considérablement pour s'annuler a la fin de l'enroulement chose qui est positif pour la protection des isolants des transformateurs

Cette diminution de la tension ainsi que sa variation dans le temps est montrée dans les (fig. (4,5,6) Annexes (5,6,7))

Les conclusions tirées sont les suivantes :

Les surtensions dans l'enroulement HT dépendent principalement du régime du neutre de ce dernier.

Dans le cas où le neutre est mis à la terre, elle se réduit au fur et à mesure qu'on s'approche de ce dernier, par contre dans le cas contraire (neutre isolé) la tension est beaucoup plus importante du côté du neutre.

Le régime du neutre joue un rôle important dans la protection des transformateurs contre les surtensions.

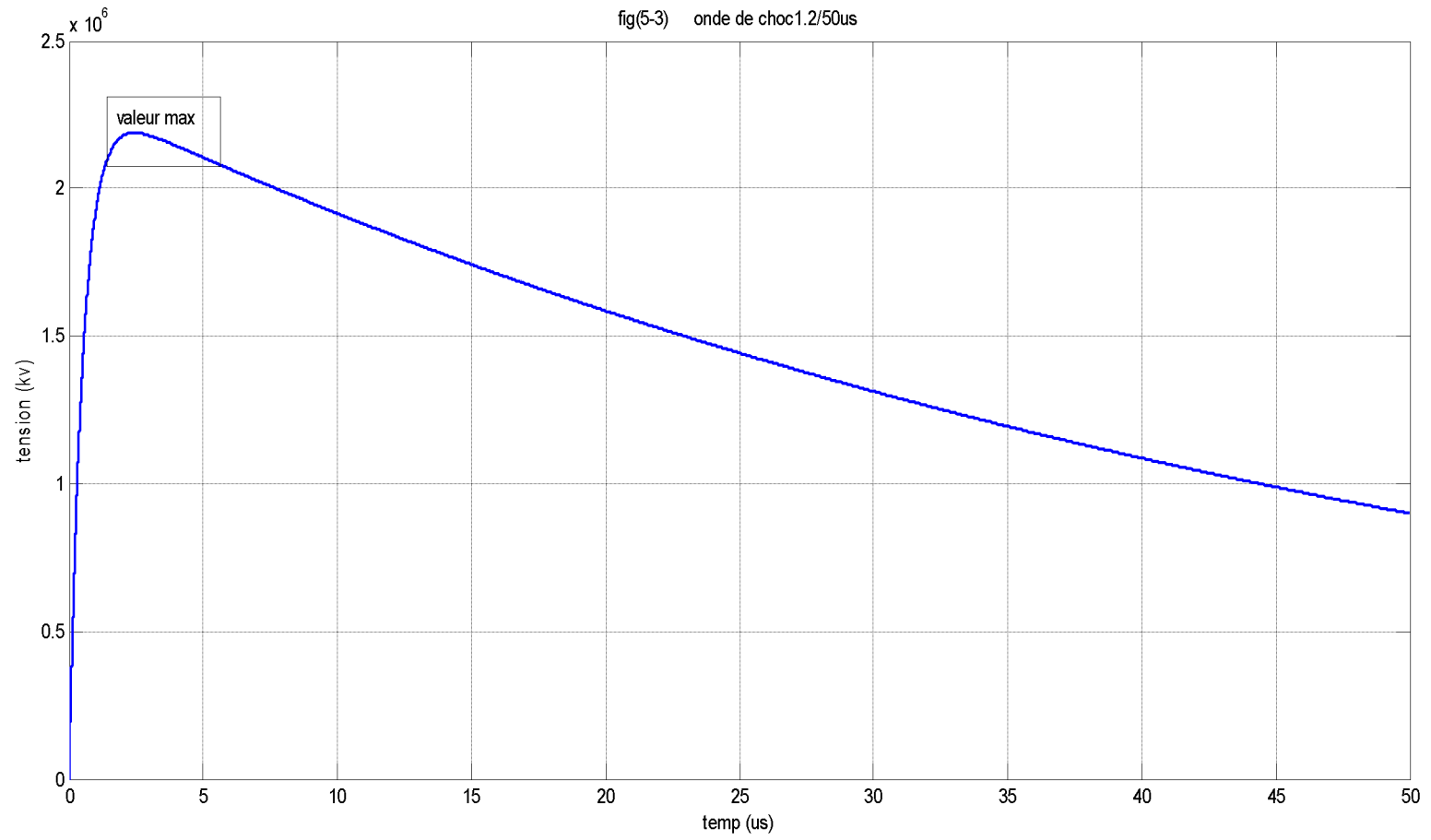
D'autres moyens sont utilisés pour la protection des transformateurs comme les éclateurs ou les parafoudres.

Conclusion générale :

Ce projet fut pour nous l'occasion d'entrée dans le domaine de la recherche scientifique. Il nous a permis d'analyser le problème des surtensions dans les enroulements de transformateurs moyennant quelques hypothèses simplificatrices.

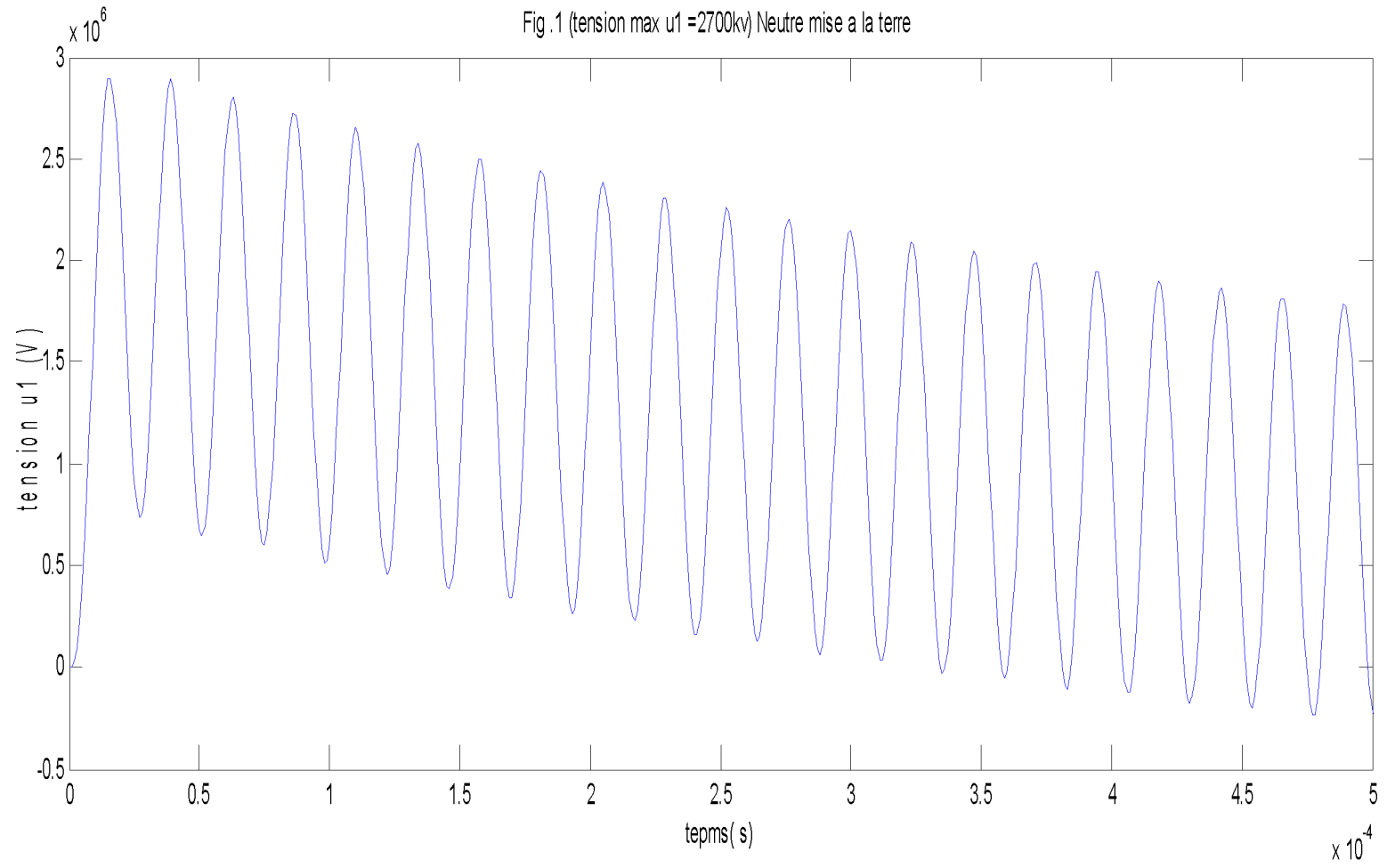
Toutefois les résultats obtenus permettent non seulement de tirer des conclusions importantes en vue d'améliorer la protection des transformateurs contre les surtensions mais aussi de servir d'outil de base pour les étudiants qui approfondiront ce travail.

Annexe n°01

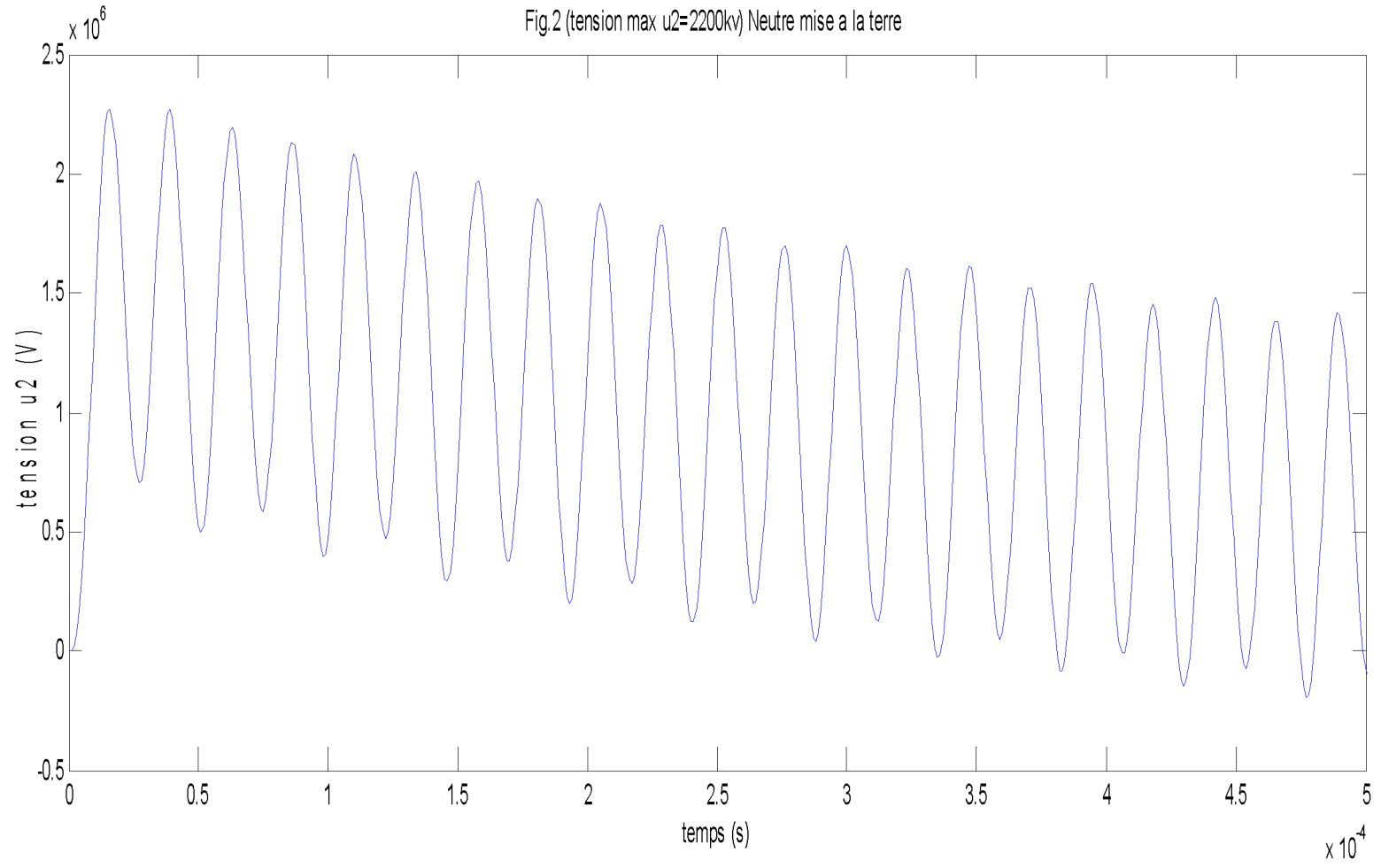


Annexe n°02

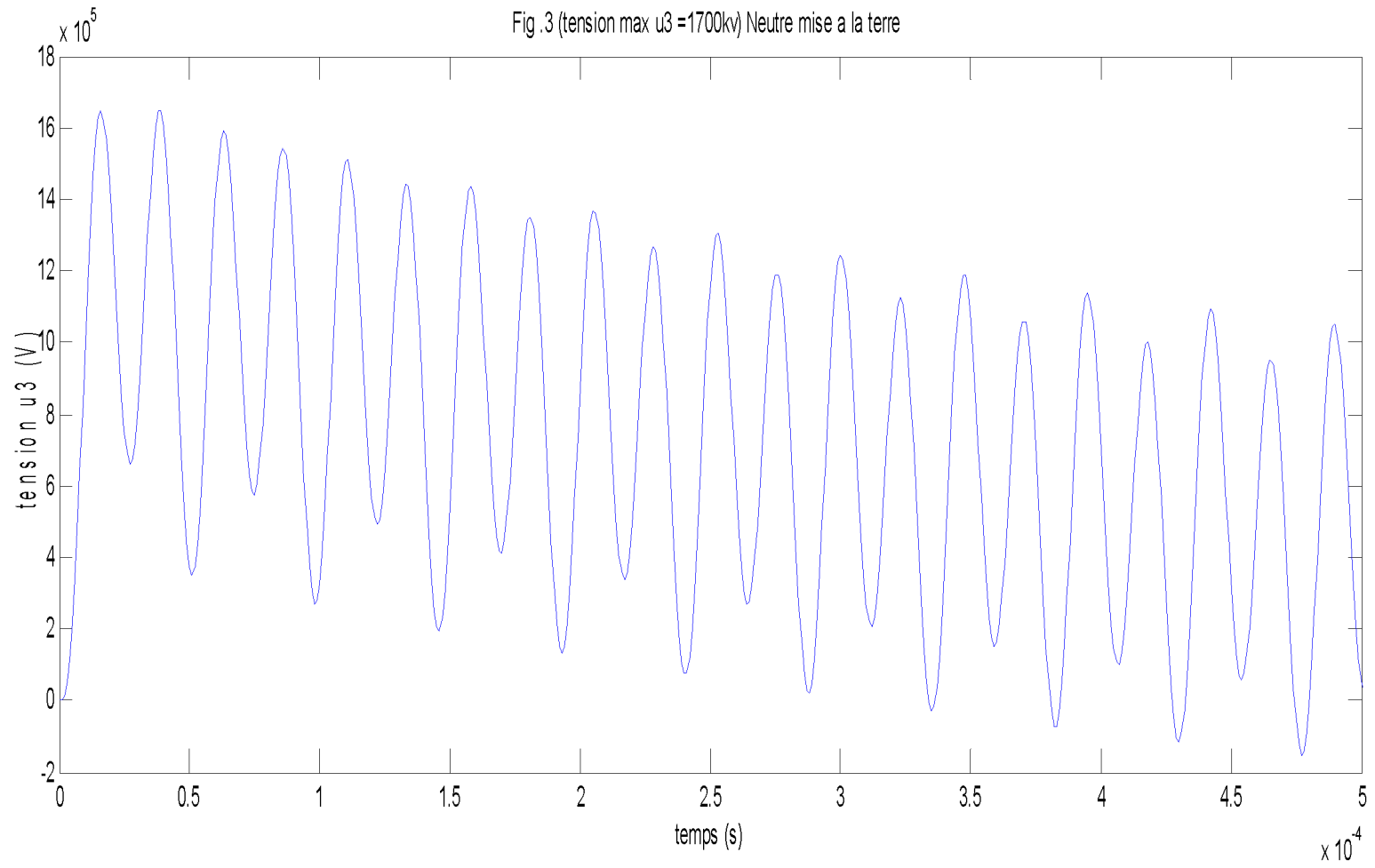
Fig.1 (tension max u1 =2700kv) Neutre mise a la terre



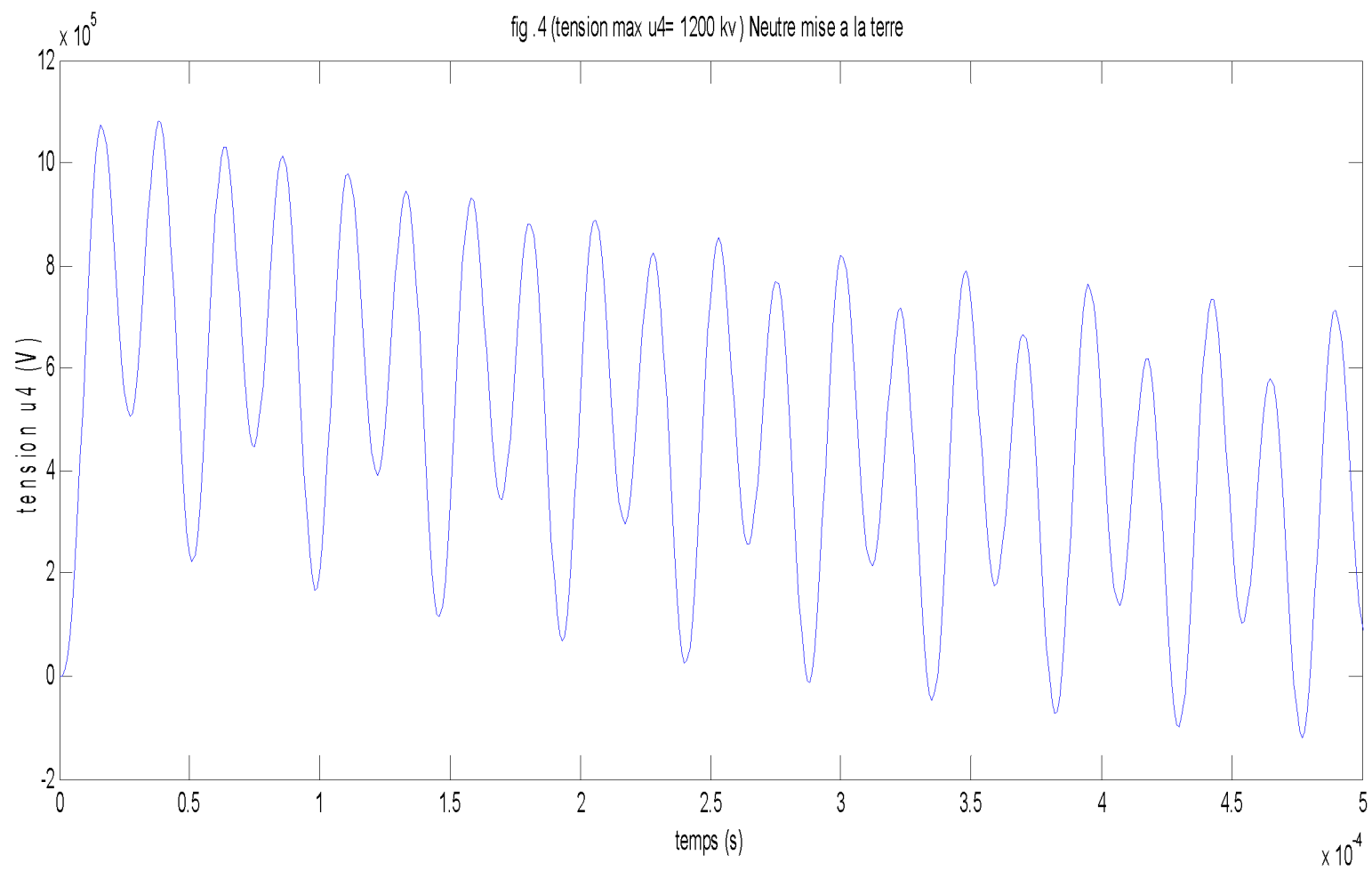
Annexe n°03



Annexe n°04

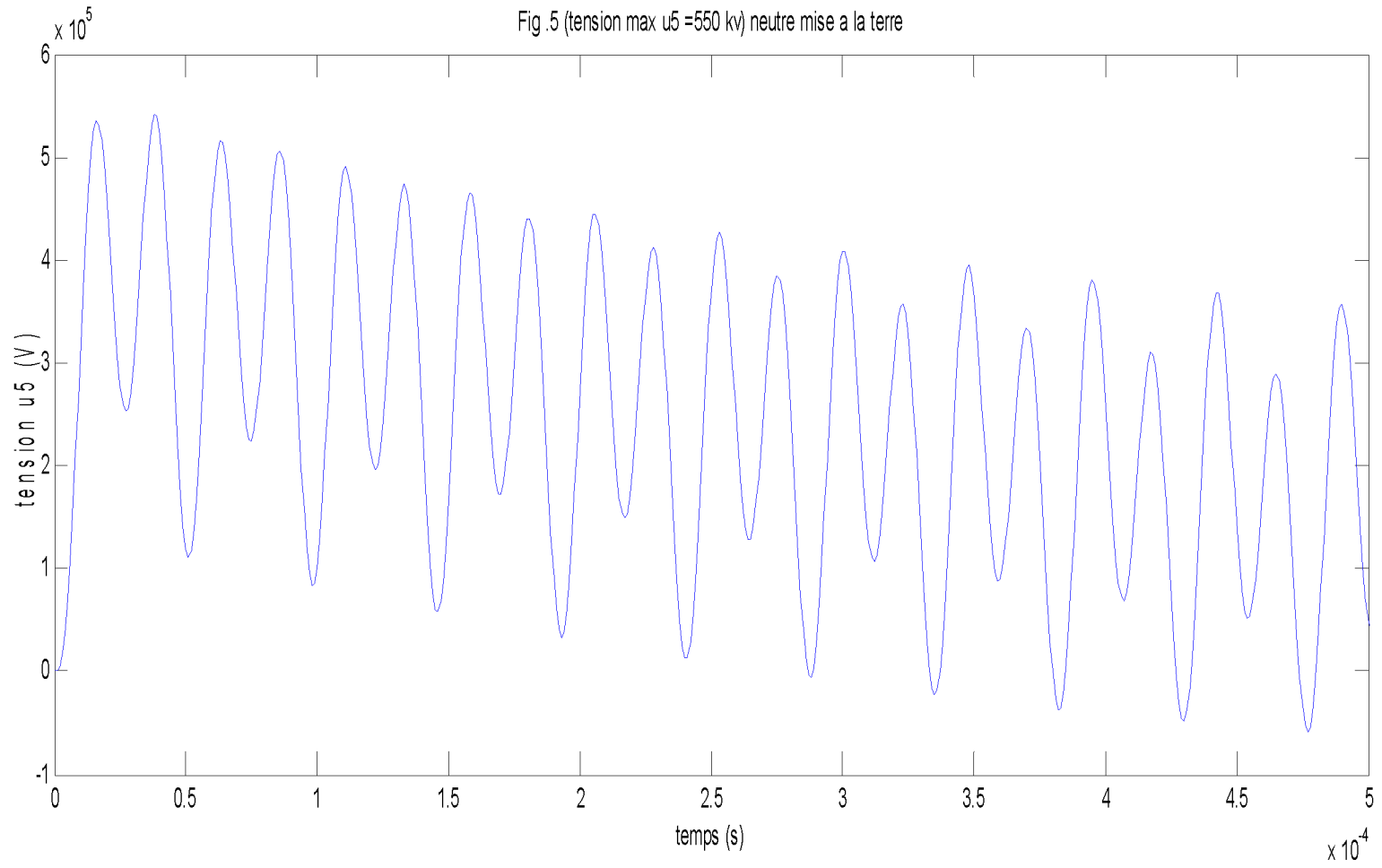


Annexe°05



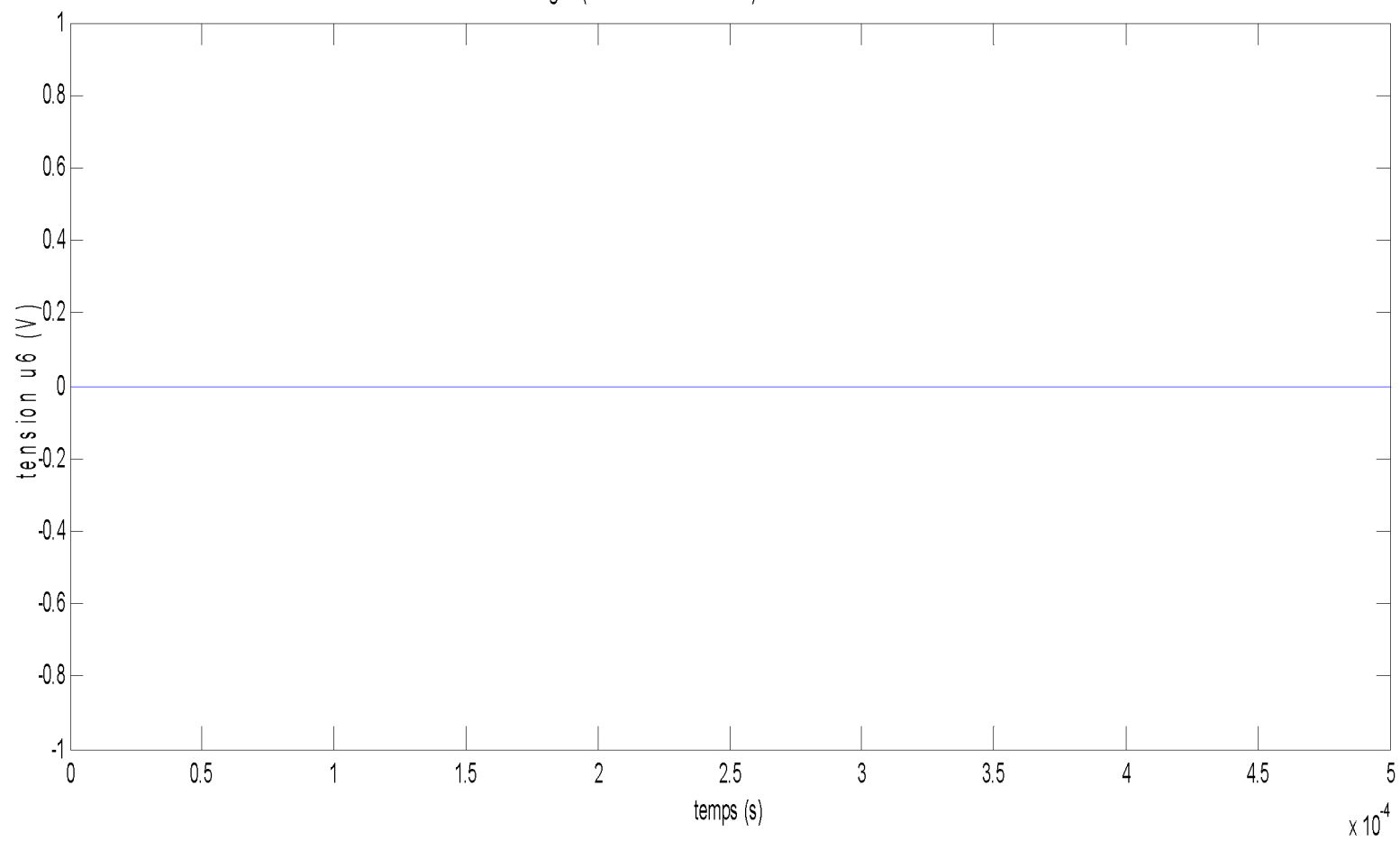
Annexe n°06

Fig. 5 (tension max u5 =550 kv) neutre mise a la terre

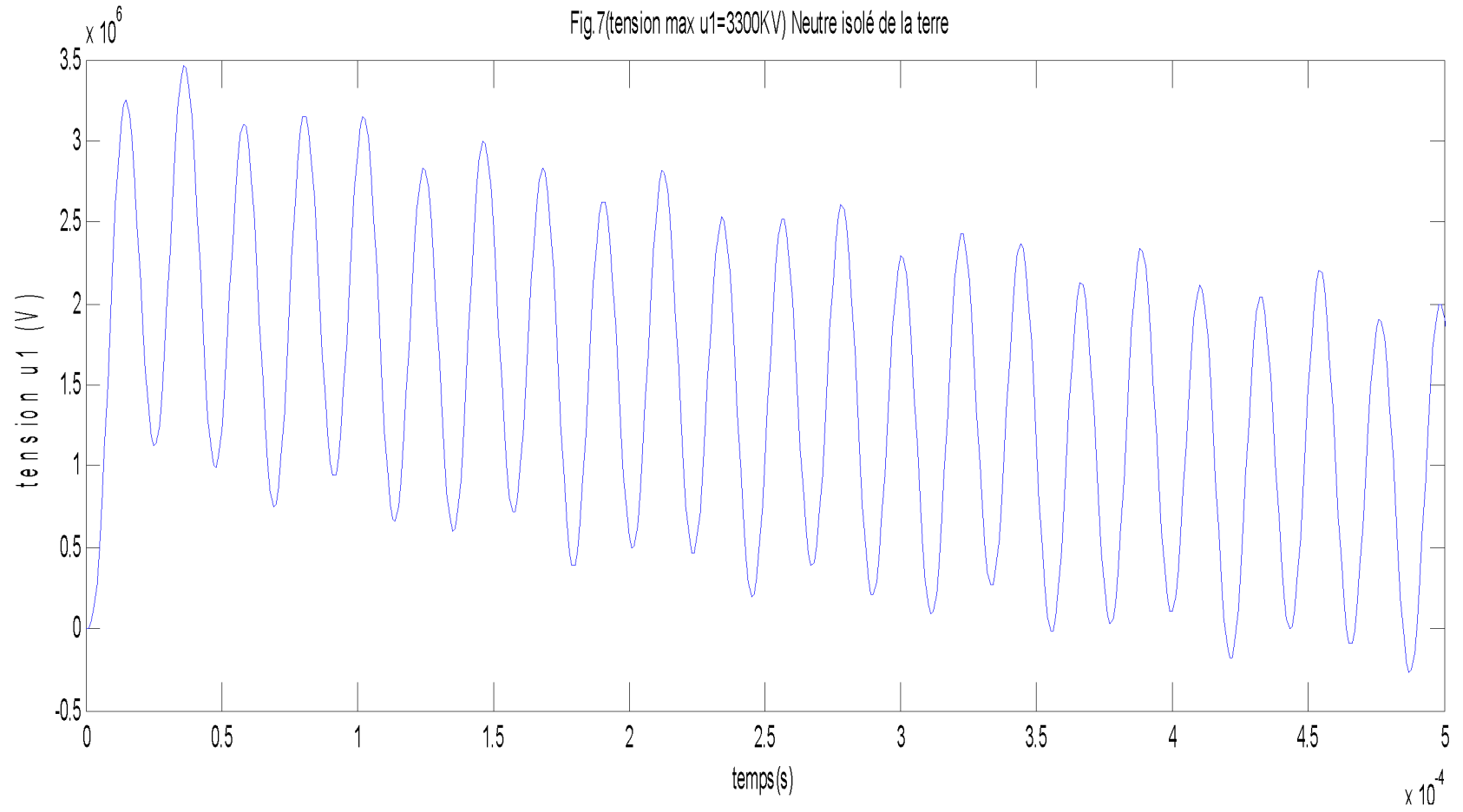


Annexe n°07

Fig. 6 (tension max u6 = 0 kv) Neutre mise a la terre

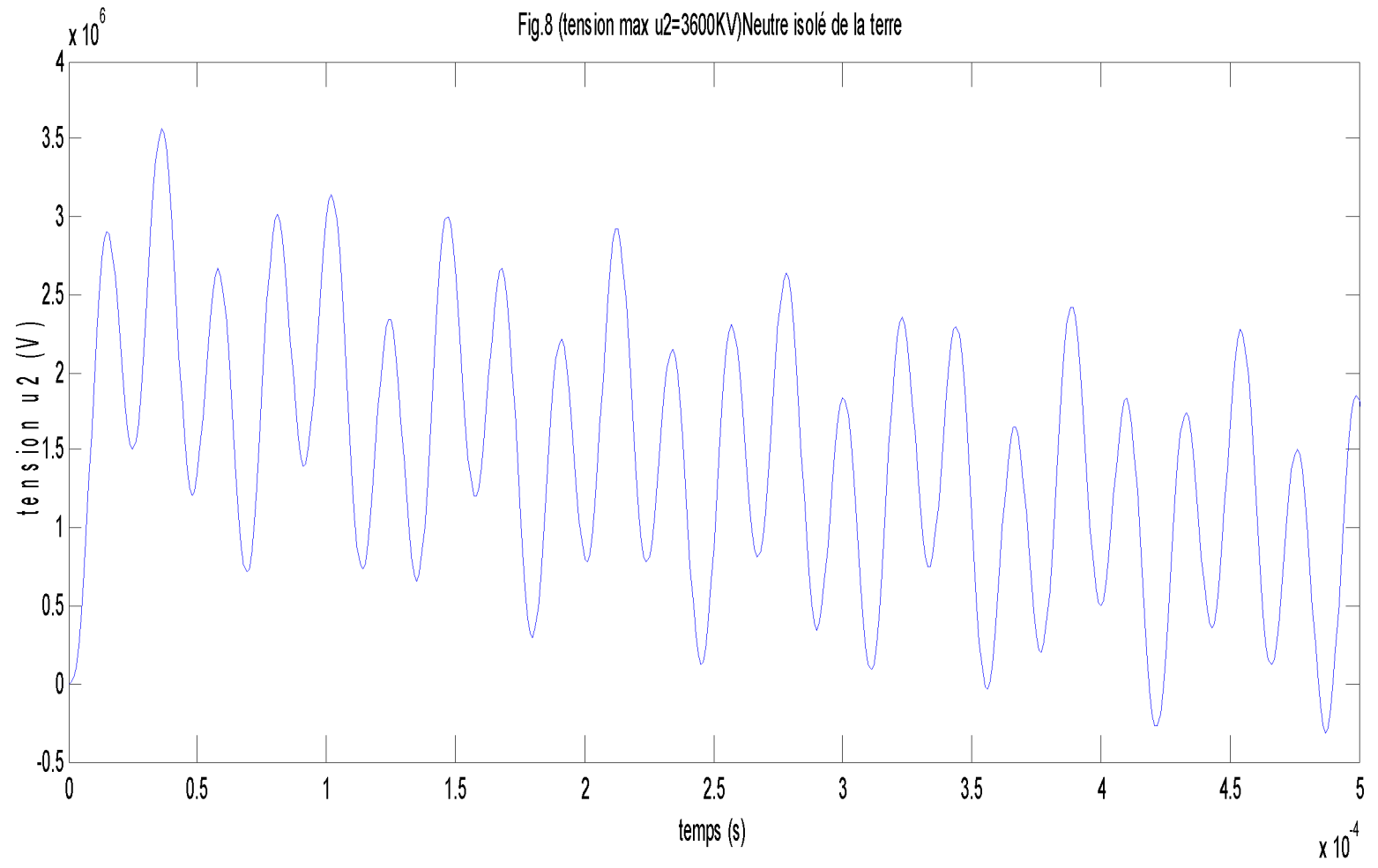


Annexe n°08



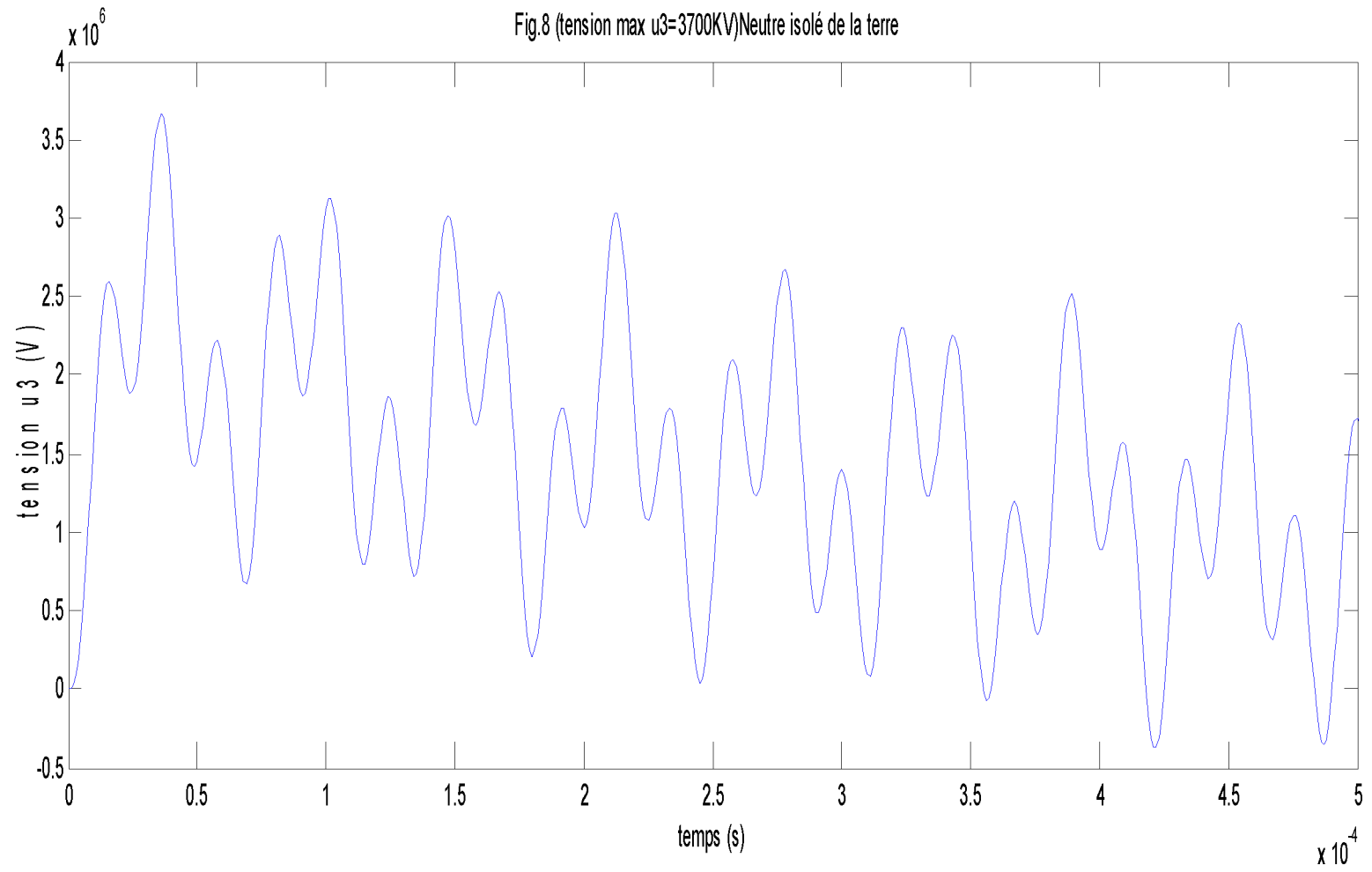
Annexe n°09

Fig.8 (tension max u2=3600KV)Neutre isolé de la terre



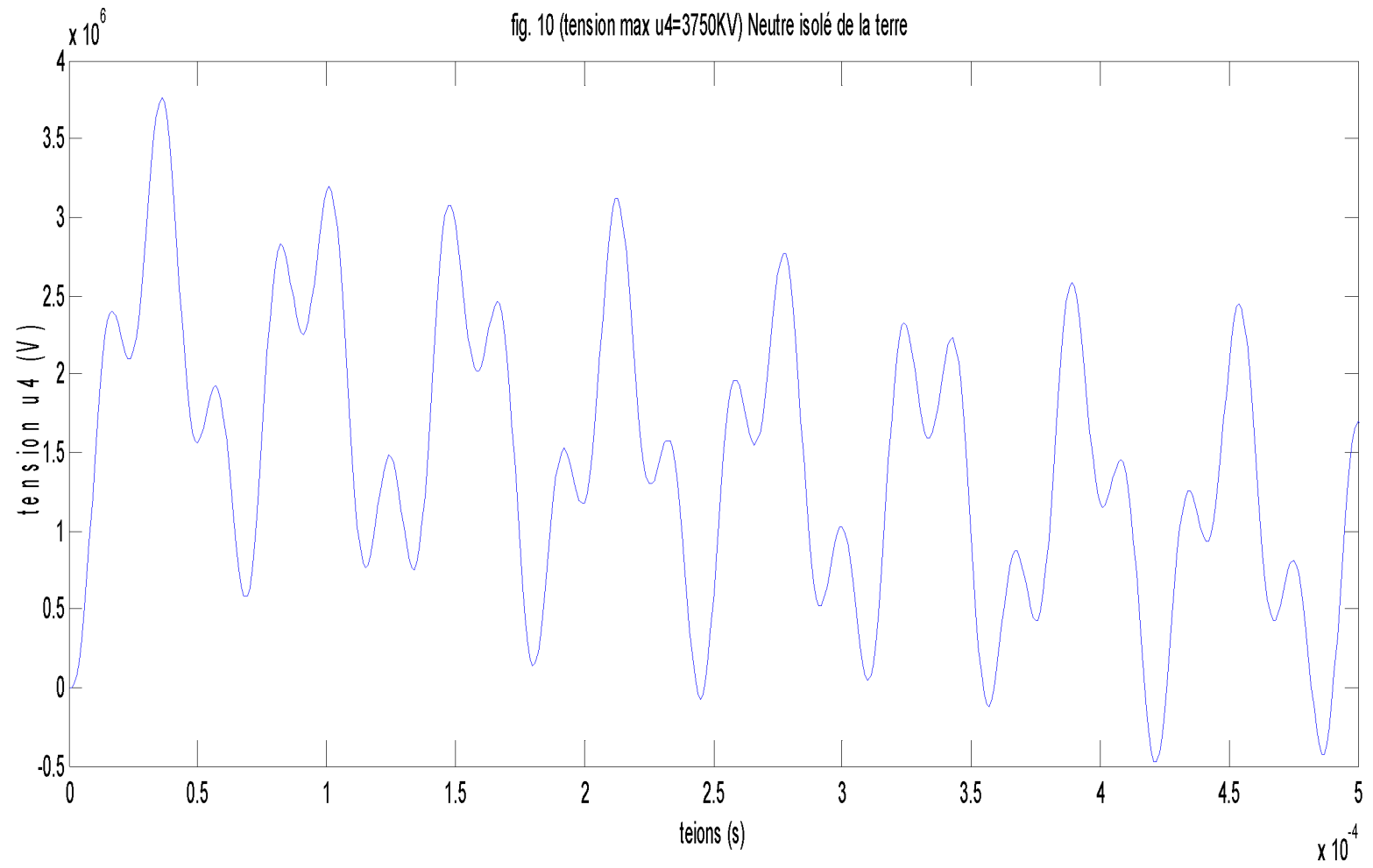
Annexe n°10

Fig.8 (tension max u3=3700KV)Neutre isolé de la terre



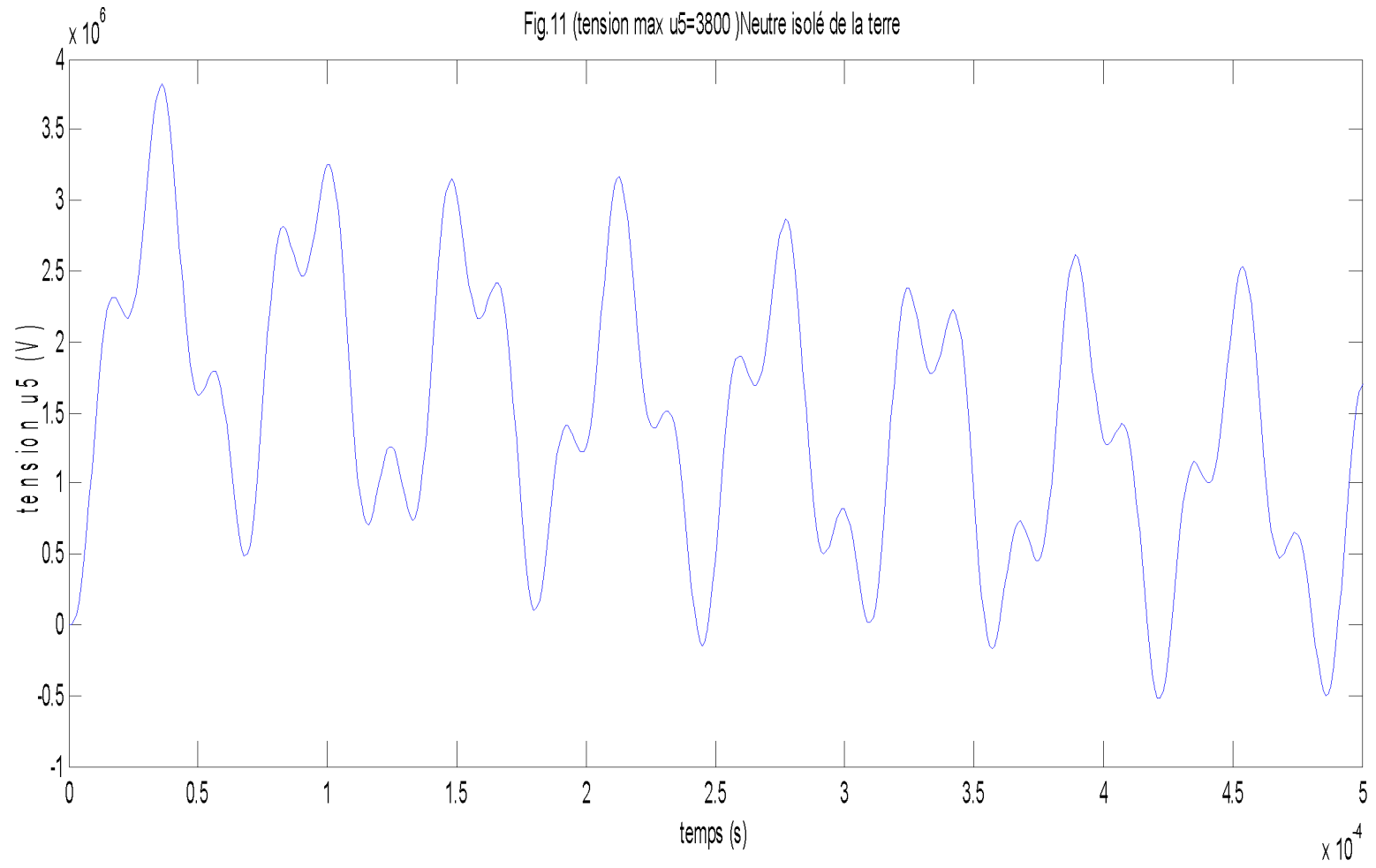
Annexe n°11

fig. 10 (tension max u4=3750KV) Neutre isolé de la terre



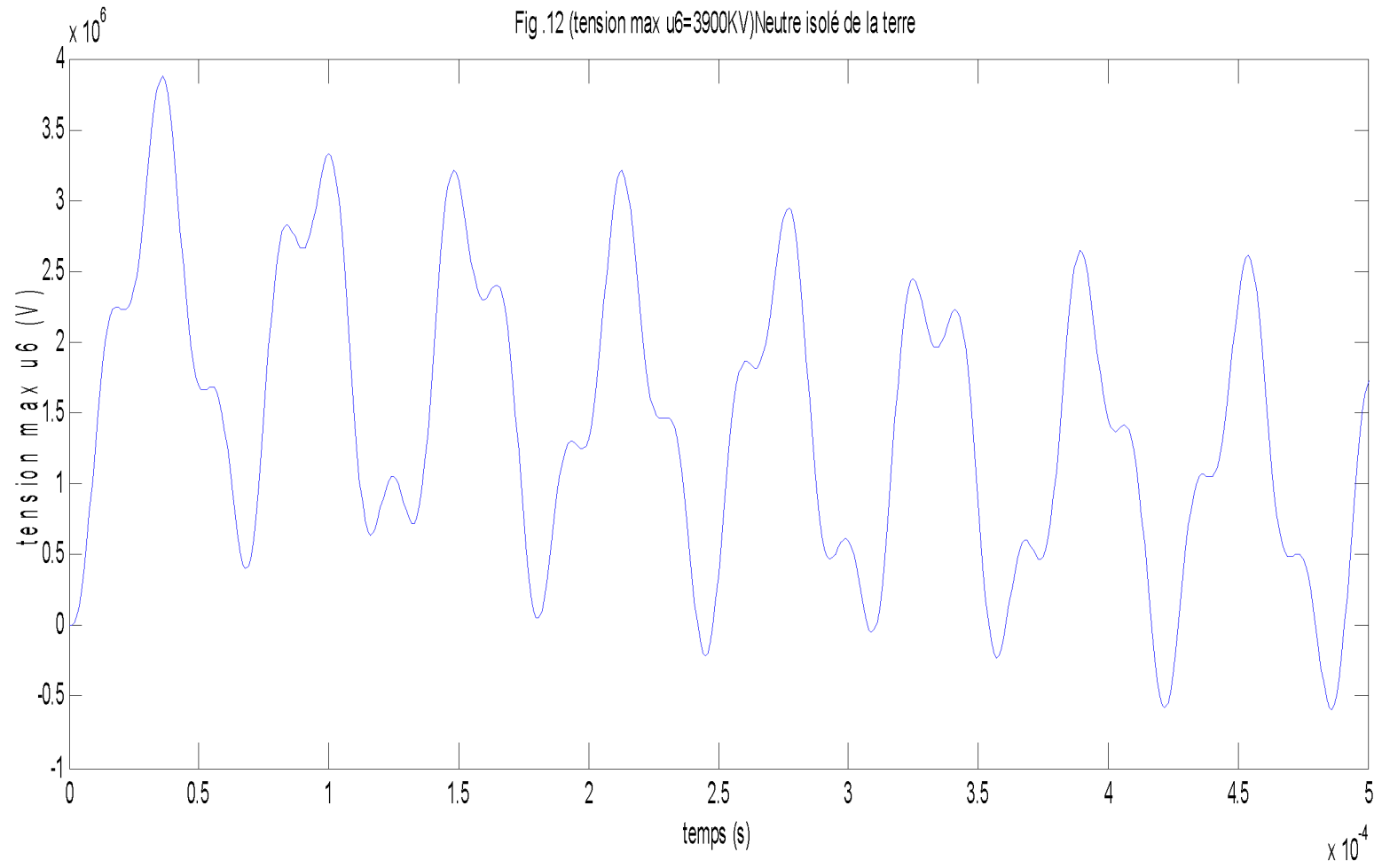
Annexe n°12

Fig.11 (tension max u5=3800) Neutre isolé de la terre



Annexe n°13

Fig. 12 (tension max u6=3900KV) Neutre isolé de la terre



Bibliographie

[ALAIN 94] : ALAIN SCHMITH, THIEVY DEFLANDE « cahiers de l'ingénieur » EDF. Origine et effets des surtensions. MARS 1994.

[And 99] : G.Andrieu, E.Dauphant, D.Boss, « A frequency-dependant model for a MV/LV transformer », International conference power systems transients (IPST), Budapest, Hungary, June 20-24, 1999.

[AVILA 82] : J. AVILA ROSALES, E, L, AVARADO. « a non lineas Frequency dependent Transformateur Model for Electromagnétique transient studies. Power systems, IEEE, vol. pas- 101, n°11, Novembre 1982, PP 4228 ».

[BERNA] : BERNARD HOCHART « Transformateur de puissance » , 2eme Edition (Tec et Doc. LA VOISIER) 1988.

[CHABA 01] : N.CHABANE ; l'influence de la tension de service sur les surtension dan les enroulements de transformateurs fonctionnant dan les conditions réelles d'exploitation : Mémoire d'ingénieur ; U.M.M.T.O 2001.

[Chim 95] : S.Chimklai, R.Marti, « Simplifed three- phase transformer model for électromagnétique transients. », ,IEEE Transaction on power delivery Vol :3, n°3,july 1995.

[Der 98] : Nizar.Derbel, « Elaboration et mise en œuvre d'un model HF du transformateur a trios colonnes en vue de la simulation des surtensions transitoire transmises aux lignes BT » école doctorale de lyon, année 1998.

[DOMME 87] : H.W.DOMMEL « EMTP théorie book, BPA,1986 l'analyse des régimes transitoires dan les réseaux électriques » n°1,1987, PP, 25-33.

[ECYC 73] : Encyclopédie des sciences industrielles Electricité Electronique Applications Quillet paris 1973.

[FRANC 33] : FRANCIS MILSANT «Transformateurs et reseaux électriques » BERITI.EDITION 1933.

[GUARD 88] : J. L. GUARDODO, K. J. CORNICK. « A Computer Model for Calculating step fronted Surge distribution in machine winding » IEEE / PES, summer meeting Portland, Oregon, juuly 24-29 : 1988, paper 88 SM. GO 9. O. PP27.

[HELLE] : HELLER. B, VEVERKAA « les processus impulsionsnels dans les machines électriques » RevueENERGUIYA, Moscou, 1973.

[LAREN 83] : P.G Me LAREN, H.ORAE, « Multi Conductor transmission line model for the Line End, coil of large As MACHINES », proc, vol.132, pt. B. n°3, May 1983, PP 149-156.

[Leo 93] : F. Leo, A.Semlyen, «for transformer transients. »,IEEE Transaction on power delivery Vol : 8,n°1, January 1993.

[Leo 95] : F.Leo, A.Semlyen, « Complete transformer model for électromagnétique transients », IEEE Transaction on power delivery Vol : 9,n°1, January 1995.

[LOKHA 73] : LOKHANINE A. K. POGOSTINE V. I « calcul des capacités des enroulements de transformateurs HT » Revue ELECTROECHINICA. LVOV , 1973.

[LOKHA] : LOKHANINEA. K « détermination des inductances des transformateurs HT ».

[M.KOSTENKO et L.PIOTROVSTKI « Machines électriques » , Tome I . MIR MOSCOU, 1976.

[Mor 93] : A. Morched, L.Marti, J.Ottevangers, « A high frequency transformer model for EMTP. »,IEEE Transaction on power delivery Vol : 13,n°31, January 1998.

[MUSIL 82] : R.MUSIL, G.PREININGER, E.WENGER « the resonance effect of oscillating system overvoltages on transformer windings ». vol.PAS-102, n°10, October 1982, PP 3703-3711.

[NEMA 64] : NEMA « Methode of measurement of radio influence voltage (R.I.V) of hight voltage » pub n°.107.A, 1964.

[Nod 02] : T.Noda, H.Nakamoto, S.Yokohama, « Accurate modeling of core-type distribution transformels for electromagnetique transients studies », ,IEEE Transaction on power delivery Vol : 17,n°41, October 2002.

[PAUL] : PAUL HOCHARD « Le transformateur de puissance ».

[PICHON 65] : A.PICHON « Calcul et const ruction des machines électriques / Transformateur université de paris », division Electricité et Electroniques 1965.

[SCHNE 00] : SCHNEIDER Electricque «La protection des installations contre la foudre » 2000.

[SONEL] : SONELGAZ « Centre de formation de Blida »> transformateur de puissance.

Résumé

Il existe plusieurs types de transformateurs, mais dans notre étude, on s'intéressera aux transformateurs de puissances, vu le grand intérêt qu'ils présentent dans le développement en interconnexion des réseaux électriques. Ces derniers sont dangereux car ils contiennent une quantité importante d'huile.

Afin d'éviter les dangers dus aux surtensions, différents dispositifs de protection sont mis en évidence à savoir les parafoudres et les éclateurs qui ont pour rôle d'écouler les courants engendrés par ces surtensions vers la terre.

Notre étude se portera sur les enroulements du transformateur de puissance lorsqu'ils sont traversés par une surtension.

Après avoir conçu le modèle mathématique nous avons simulé le modèle sur MATLAB SIMULINK et nous avons obtenu les conclusions suivantes concernant l'influence du régime du neutre sur les surtensions dans un transformateur

➤ **Neutre isolé de la terre :**

Lors de la propagation de l'onde de surtension, l'enroulement subit un accroissement de tension allant ainsi de 3300kV au début de ce dernier pour atteindre 3900kV à la fin soit une augmentation de 600 à 700 KV.

cette augmentation de la tension le long de l'enroulement ainsi que la variation au cours du temps est montrée avec exactitude sur les (fig. 7 Annexe 8) et (fig.12 Annexe 13) en voit bien que la tension atteint des valeurs très grandes chose qui est dangereuse pour l'isolation du transformateur .

➤ **Neutre mis à la terre :**

Une fois que l'onde de surtension a pénétré dans l'enroulement, elle se propage et la tension le long de ce dernier évolue dans le sens décroissant, elle a l'allure d'une moitié de parabole concave.

Comme exemple une diminution de 1000kV est enregistrée entre la tension d'entrée de l'enroulement (**U1**) et la tension (**U3**) ,(fig.1 Annexe 2) et (fig.3 Annexe 4).

A partir de là, la tension continue à diminuer considérablement pour s'annuler à la fin de l'enroulement chose qui est positive pour la protection des isolants des transformateurs

Cette diminution de la tension ainsi que sa variation dans le temps est montrée dans les (fig. (4,5,6) Annexes (5,6,7)).

Les mots clés :

Simulation

MATLAB SIMULINK

Influence

Régime du neutre

Surtension

Foudre

Transformateur de puissance

Enroulement de transformateur