Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'électrotechnique





De fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE.

Option : machines électriques



Influence des résistances des enroulements du transformateur sur les surtensions

<u>Proposé et dirigé par :</u> Mr T.O.CHERIF

Etudié et présenté par :

- M^{elle} BELKACEMI Lamia
- M^{elle} BOUABDELLAH Dehbia

Promotion : 2009

Remerciements

Au terme de notre travail nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à sa réalisation.

Nos remerciements les plus spéciaux à notre promoteur, Monsieur T.OTMANE CHERIF qui a accepté de nous encadrer et pour sa disponibilité et ses orientations pour mener à bien notre travail.

Nous sommes aussi reconnaissantes à notre enseignant Mr maufid zada qui a contribué à la réalisation de ce travail.

Nous remercions nos chers parents qui nous ont encouragées et soutenues pour aller au bout de notre cursus.

Nos derniers remerciements vont aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents quí m'ont toujours

soutenue

Mes frères : Salah, Sofíane et Moumouh

Ma petite sœur que j'adore : Sabrina

Mon fiancé Bislam et sa famille

Mes tantes : Zahra et aldjía

Ma grande mère maternelle

Tous mes amís

Mon bínôme Lamía et sa famílle

Tous ceux quí me sont chers

Dehbia

Dédicaces

Je dédie ce mémoire de fin d'étude :

A mes très chers et adorables parents.

A mes frères Hmidouche, Sosso et Omar.

A mes sœurs Fatma et Nadia

A mon amie et binôme avec qui j'ai eu le plaisir de partager ce travail de fin d'étude et sa famille.

A tous ceux que j'estime.

Ramía

Le Sommaire

Introduction générale1
Chapitre I
I.1.Généralités sur les transformateurs
I.1.1 Introduction
I.1.2. Constitution générale
I.1.2.1.La partie active
I.1.2.2. La partie constructive
I.1.3. Principaux types de transformateurs
I.1.4. Grandeurs nominales
I.1.5.Mode de couplage des enroulements
I.2. Généralités sur les surtensions
I.2.1. Introduction
I.2.2. Surintensités
I.2.2.1.L'enclenchement d'un transformateur à vide7
I.2.2.2. Lors d'un court-circuit
I.2.3. Les surtensions
I.2.3.1. Les surtensions d'origines internes
I.2.3.2. Les surtensions d'origines externes

Chapitre II

II.1. Introduction	.15
II.2. Equation de circuit	.17
II.3. Répartition de tension le long d'un bobinage dont le neutre est mis à la terre	.18
II.3.1. Hypothèses simplificatrices	.19
II.3.2. Répartition initiale de la tension	.19
II.4. Phénomène transitoire de la tension	25
Conclusion	28

Chapitre III

III.1. Modèle de Morched	29
III.2. Modèle de Leon	31
III.3. Modèle de Chimklai	32

III.4. Modèle de Gustavsen	.33
III.5. Modèle d'Andrieu	.34
III.6.Modèle de Noda	.35
III.7. Le modèle d'E.M.T.P	.36
III.8. Le modèle de RESEL :	.38
III.9. Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles	39
Conclusion	42

Chapitre IV

IV.1. Caractéristiques du transformateur	43
IV.1.1. Caractéristiques électriques	43
IV.1.2. Caractéristiques géométriques	43
IV.2. Relations empiriques pour le calcul des paramètres	45
IV.2.1. Détermination de la résistance R	45
IV.2.2. Calcul numérique des résistances R1 et R2	45
IV.2.2.1. Pour l'enroulement primaire	46
IV.2.2.2. Pour l'enroulement secondaire	46
IV.3. Détermination des inductances propres L et mutuelles M	46
IV.3.1. Relations empiriques pour le calcul des inductances propres Let mutuelles	M46
IV.3.2. Calcul numérique des inductances propres L et mutuelles M	47
IV.3.2.1. Calcul des inductances propres L	47
IV.3.2.1.1. Pour l'enroulement primaire	47
IV.3.2.1.2. Pour l'enroulement secondaire	47
IV.3.2.2. Calcul des inductances mutuelles M	48
IV.3.2.2.1. Calcul de la mutuelle entre les éléments de l'enroulement HT	51
IV.3.2.2.2. Calcul de la mutuelle entre les éléments de l'enroulement BT	51
IV.3.2.2.3. Calcul de la mutuelle entre les deux enroulements, HT et BT	52
IV.4. Détermination des capacités transversales C et longitudinales K	53
IV.4.1. Relation empirique pour le calcul des capacités C et K	53
IV.4.2. Calcul numérique des capacités transversales C et longitudinale	53
IV.4.2.1. Calcul des capacités transversales C	53
IV.4.2.1.1. Pour le primaire	53
IV.4.2.1.2. Pour le secondaire	54

IV.4.2.1.3. Entre les deux enroulements	.54
IV.4.3. Calcul des capacités longitudinales K des enroulements primaire et	
secondaire	55
IV.4.3.1. Pour le primaire	57
IV.4.3.2. Pour le secondaire	57

Chapitre V

V.1. Introduction	
V.2.1Definition des paramètres	58
V.2.2.Caractéristiques des parafoudres utilisés	58
V.2.2.1.Parafoudre de la haute tension	59
V.2.2.2.Parafoudre de la basse tension	59
V.3.Modèle mathématiques du poste et du transformateur	59
V.3.1.Equations électriques de l'enroulement	60
V.3.1.1 Equations des tensions	60.
V.3.1.2.Equations des courants	61
V.4.Simulation des enroulements sur P-SPICE	71
V.4.1Analyse des résultats de simulation	71
V.4.2.Interprétation et comparaison des résultats	77
V.4.3 .Calcul du coefficient d'amortissement	79
V.6.1.Mise en équation du circuit électrique	81
V.6.1.2.les courants primaires et secondaires	81
V.6.2. Ecriture matricielle des équations du circuit magnétique	81

Chapitre VI

VI.1. Introduction	86
VI.2. Coordination de l'isolement	87
VI.3. Protection contre les surtensions	87
VI.3.1. Protection primaire	88
VI.3.2. Protection secondaire	91
VI.3.2.1. L'éclateur	91
VI.3.2.2. Les parafoudres	93

VI.4. Protection contre les surintensités et les surcharges	98
VI.4.1. Disjoncteurs	98
IV.4.2. Interrupteurs à cornes	100
IV.4.3. Fusibles haute tension	101
VI.4.4. Le thermostat	101
VI.4.5. Le thermomètre	101
Conclusion générale	102



Introduction générale

L'énergie électrique est l'un des besoins les plus importants pour l'Homme. Elle est produite dans les centrales électriques qui se trouvent généralement loin des zones de consommation

Afin de la mettre à la disposition des utilisateurs, il est nécessaire de construire des réseaux pour son transport et sa distribution (lignes aériennes, câbles souterrains)

Pour assurer une meilleure qualité de l'énergie et de réduire le cout des installations, il est impératif d'élever la tension dés que la puissance à transporter devient importante.

La distribution de cette énergie s'effectue en moyenne ou en basse tension.la conversion en haute ou en basse tension s'effectue à l'aide des convertisseurs statiques (transformateurs).

. 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.

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 crées 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 par le danger et les dégâts, celles-ci peuvent causées la mise hors service du réseau électrique, par conséquent, elles occasionnent d'énormes pertes financières.

A fin 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 l'influence des résistances des enroulements du transformateur de puissance lorsqu'ils sont traversés par une surtension sur cette dernière.

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 a constantes localisées et à paramètres constants, par la suite nous allons procéder à la détermination des paramètres du schéma de calcul.

1

Introduction générale

A partir de ce schéma nous allons établir des équations différentielles, ainsi nous obtiendrons un model mathématique très complexe, pour sa résolution on a fait appel à un logiciel de simulation (P-SPICE).

Notre objectif est de faire une comparaison entre le cas où les résistances du schéma équivalent sont prises en considération ou non.



Généralités sur les transformateurs

I.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 courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables d'intensités et de tensions généralement différentes mais de même fréquence[1].

L'ancêtre du transformateur est le « générateur secondaire » imaginé par l'Anglais J.D.Gibbs et le Français L. Gaulard et construit à Londres en 1883. La première transmission électrique en courant alternatif utilisant des machines de ce type est réalisée par Gaulard 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.Zipernowsky, qui assistent à cette exposition, remarquent les graves imperfections du générateur secondaire, notamment son circuit magnétique ouvert. Ils conçoivent en 1885 le transformateur sous une forme qu'il a pratiquement conservée de nos jours [2].

I.1.2.Constitution générale :

Le transformateur est constitué de deux parties : Partie active et partie constructive.

I.1.2.1.La partie active :

Elle est la partie où est assurée la conversion d'énergie, elle comporte le circuit magnétique et les enroulements.

a. Circuit magnétique :

Le circuit magnétique fermé en tôles d'acier de bonne qualité, de plus pour minimiser les pertes dans le fer, les tôles utilisées sont en acier doux à 4% de Silicium, d'une épaisseur de 0.35 à 5mm, parfaitement laminées, isolées au vernis. Il s'ensuit que les pertes totales pour une induction de 1 Tesla (1wb/m²) et 50Hz varient avec la qualité des tôles choisies de 1.2 à1.6 Watts pour les tôles laminées à chaud et de 0.5à 0.6Watts par Kg seulement pour les tôles à cristaux orientés, laminées à froid **[3].**

b. Les enroulements :

Ils sont sous forme d'un matériau bon conducteur, en cuivre ou en aluminium, de section circulaire ou rectangulaire. Ils sont généralement cylindriques, disposés concentriquement sur la même colonne, ils sont à couches ou à galettes, pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

- Il faut diminuer les intervalles entre les deux enroulements pour diminuer les champs de dispersion magnétique, ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance réactive.

- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégagent sous forme calorifique.

- Résister aux actions électrothermiques et électrodynamiques lors de fonctionnement (court circuit brusque).

- Emploi d'acier magnétiquement doux, spécial, ayant une petite surface du cycle d'hystérésis.

- L'isolation de l'enroulement doit présenter la rigidité diélectrique nécessaire pour supporter les surtensions [3].

I.1.2.2. La partie constructive :

a. Cuve et le couvercle :

Les enroulements sont isolés du circuit magnétique et du milieu extérieur ou de l'enveloppe métallique de la machine (cuve) par des diélectriques gazeux (air, hexafluorure (SF6) de soufre), solide (quartz) ou liquide (huile minérale, hydrocarbure chloré de soufre), et sur le couvercle, sont fixées des pièces pour le déplacement du transformateur [3].

I.1.3. 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 y a pratiquement identité pour tous les transformateurs. La méthode d'étude est donc similaire et on la développera dans le cas des transformateurs de puissances monophasés et triphasés à deux enroulements [3].

Il existe plusieurs types de transformateurs :

• Les transformateurs de puissance destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.

• L'auto-transformateur destiné à régler la tension dans les limites restreintes pour le couplage de réseaux et à mettre en marche des moteurs alternatifs.

- Les transformateurs de mesure de tension et de courant.
- Les transformateurs de phase destinés à alimenter les installations à convertisseurs statiques (redresseurs...).
- Les transformateurs d'essais HT, THT.
- Les transformateurs de puissance spéciaux pour l'alimentation de fours, postes de soudage.
- Les transformateurs utilisés en radiotechnique.

I.1.4.Grandeurs nominales :

On appelle service nominal d'un transformateur, le service indiqué sur la plaque signalétique par le constructeur.

- Tensions nominales U_{1n} et U_{2n} : c'est les tensions entre les phases des enroulements primaire et secondaire respectivement.
- Le courant nominal I_n : c'est le courant des enroulements.
- La puissance apparente S_n [KVA].

 $\begin{array}{lll} S_n = V_n * I_n & \text{pour un transformateur monophasé.} \\ S_n = \sqrt{3} \ U_n * I_n & \text{pour un transformateur triphasé.} \\ S_n = S_{2n} = S_n & \text{pour un transformateur à deux enroulements.} \end{array}$

- La tension de court circuit Ucc.
- Le facteur de transformation K.
- La fréquence f nominale adopté est de 50Hz.

I.1.5.Mode de couplage des en roulements :

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 tentions secondaires.

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

Le couplage Y_{yn} 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_{nz} .

Lorsque qu'on branche un transformateur en parallèle avec un autre déjà placé, le couplage est imposé par le déphasage du premier [5]





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 différentes parties des enroulements ou même entre différentes spires, les surchauffes brusques, etc..... Ces effets jouent un rôle très important dans les puissants 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 groupes de phénomènes.

- Les surintensités.
- Les surtensions.

L'étude de ces phénomènes a une très grande importance pour l'exploitation de transformateur. Pour la notre, elle portera essentiellement sur les surtensions, du moins nous essayerons tout de même de donner un aperçu sur les surintensités vu aussi leur importances [3].

I.2.2. Surintensités :

Les surintensités se distinguent des surcharges par leurs plus faibles durées (de quelques dixièmes à quelques dizaines de secondes) et pour leurs intensités relatives (de 2 à 25 fois l'intensité nominale) **[6].**

Les surintensités apparaissent à :

I.2.2.1. L'enclenchement d'un transformateur à vide

On régime permanant, le courant à vide d'un transformateur ne dépasse pas 10% du courant nominal, mais à l'enclenchement de 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 de transformateur. Malgré que, toutefois le courant d'enclenchement ne cause pas de danger pour les transformateurs, mais il peut provoquer la mise hors circuit de ce dernier [3].

I.2.2.2. Lors d'un court-circuit

Elles sont dues soit à :

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

L'augmentation de l'intensité est alors très rapide et l'intensité maximale peut être élevée d'où risque d'accident [3].

Les effets dus au court circuit sont :

a. Phénomène thermique

Dans ce phénomène, la température des enroulements de transformateur peut atteindre des valeurs présentant un danger pour l'isolation [3].

b. Phénomène électrodynamique

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

I.2.3. Les surtensions :

Les éléments constituant un réseau électrique, en particulier les transformateurs de puissance (qui fait l'objet de notre étude) subissent des contraintes de tension, elles peuvent être d'une part permanentes du fait de la tension de service et d'autre part pendant de brèves durées du fait de surtensions de diverses origines [3].

On peut appeler surtensions dans un transformateur, toute élévation de tension au dessus de la tension de service maximale, mais en général, on entend par surtension des phénomènes de courte durée sous forme de courtes impulsions séparées périodiques ou apériodiques.

Les surtensions peuvent être dues à des phénomènes internes ou externes.

I.2.3.1. Les surtensions d'origines internes

Ces surtensions résultent d'un changement de régime en un point du réseau. Elles sont plus importantes quand le changement est plus rapide, elles sont produites par des phénomènes différents [3]. **a. Phénomène de commutation :** tels que l'enclenchement, déclenchement, les variations rapides des charges etc..., accompagnés d'une variation brusque de l'énergie électromagnétique du système.

b. Phénomène à caractère d'avaries : tels que les courts-circuits et les coupures, les arcs répétés du système.

c. Phénomène de Ferro-résonance : ce phénomène est de nature oscillatoire. Il peut prendre naissance par interaction de capacité du réseau avec une inductance non linéaire particulièrement, celle présentée par un transformateur à vide. Il en résulte des surtensions entretenues ou non sur des réseaux à forte capacitance qui peuvent entraîner des avaries aux transformateurs ou aux câbles eux mêmes.

La Ferro-résonnance présente certaines analogies avec la résonance classique et se distingue toute fois par le fait que l'inductance mise en jeu n'est définie que de façon univoque, mais varie avec la saturation. Ces sortes de surtensions sont rares, on les élimine en modifiant les constantes des circuits à l'aide des moyens de protection **[6]**.

I.2.3.2. Les surtensions d'origines externes

Ces surtensions sont indépendantes de la tension de service du réseau, elles sont produites par [3] :

a. Phénomènes atmosphériques : tel que le coup de foudre direct frappant la ligne de transport figure. (I.5) **[8],** les phénomènes d'induction électromagnétique lors de décharge des nuages et induction électrostatique due aux nuages chargés, l'électrisation des conducteurs de la ligne par le vent porteur des particules de poussière, de neige etc....

* Nature des surtensions

La nature du phénomène se produisant dans un transformateur pendant des surtensions dépend de la forme d'onde électromagnétique, on distingue [3] :

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

b.**Les ondes périodiques :** apparaissent pendant le phénomène de commutation figure (c).



* Classification des coups de foudres

On peut classer les coups de foudres selon deux critères :

a1. 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)

a2. 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 (I.3) :
- Descendant négatif.
- Ascendant négatif.
- Descendant positif
- Ascendant positif





Foudres descendantes négatives de loin les plus fréquentes en plaine et dans nos région (80 à 90%)



Foudres descendantes positives



Foudres ascendantes négatives

Fig. I.3 classification des coups de foudre selon le sens de développement de leader

*Propagation de l'onde de surtension

L'onde se propage le long de la ligne à une vitesse $V = \pm \sqrt{\frac{1}{LC}}$ où Let C sont

respectivement l'inductance et la capacité par unité de longueur de la ligne.

Cette vitesse est de l'ordre 300 000 km/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 :

- A 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.

- A une bifurcation, il se produit une onde réfléchie sur la ligne d'arrivée et une onde incidente affaiblie sur 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 **[9].**

Une distinction est faite entre les chocs de foudre et les chocs de manœuvre d'après la durée du front. Les chocs dont le durées du front vont jusqu'à 20µs sont considérés comme étant des chocs de foudre figure (I.4.a), et ceux qui ont une durée du front plus longue comme étant des chocs de manœuvre figure (I.4.b).



Fig. I.4.a : onde de choc de manœuvre

(OA) : front de l'onde. (AB) : la queue de l'onde. T_f : durée de front. T_m : durée jusqu'à la mi-amplit 50% 30% T_f T_m T_m

Où : Tf : durée de front. Tm : durée jusqu'à la mi-amplitude.



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'elle dépasse la tension de service 3.5 fois, elle présente un danger.

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 permanant 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 entraine la mise hors service de transformateur et la perturbation des conditions normales. Les surtensions dans les transformateurs ont été l'objet de nombreuses études **[3].**

Il faut bien voir 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 obligés d'adopté plusieurs hypothèses, les résultats obtenus ont toute fois permis de tirer plusieurs conclusions importantes et ont servi au développement d'un transformateur dit résistant.



fig.I.5 Coup de foudre sur réseau de transport [8]



Phénomène transitoire dans les transformateurs lors d'une surtension

II.1.Introduction :

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 pas être entièrement analysés par des méthodes mathématiques seulement. On est obligé d'adopter plusieurs hypothèses simplificatrices pour permettre l'étude des phénomènes de base.

Toutefois, les résultats obtenus permettent de tirer des conclusions importantes en vue d'améliorer la protection des transformateurs contre les surtensions.

Le cas le plus sévère est celui où les trois phases du transformateur sont traversées par les mêmes ondes de surtensions, il nous suffira de considérer dans toute l'étude qui suivra une seule phase figure (II.1), vu que les phénomènes qui se produisent dans les deux autres sont identiques.



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

Tout au long de cette analyse, nous supposerons que dans les transformateurs de grande puissance, il existe toujours un enroulement connecté en tringle jouant le rôle d'un écran magnétique, nous assumerons aussi que les ondes agissant sur le transformateur sont de fréquences (amplitudes) suffisamment importantes pour

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



Figure : Schéma équivalent de l'enroulement sans l'influence du noyau.

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 « \mathbf{P} » situé à l'abscisse x s''écrit :

$$\mathbf{i} + \mathbf{i}_k = (\mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial x} dx) + (\mathbf{i}_k + \frac{\partial \mathbf{i}_k}{\partial x} dx) - \mathbf{i}_c$$
 (A) **II.1**

D'où:
$$i_c = \frac{\partial (i + i_k)}{\partial x} dx$$
 (A) I.2

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

De (II.2) et (II.3), on a :

$$\frac{\partial (i+i_k)}{\partial x} dx = -cdx \frac{\partial u}{\partial t}$$
(A/m) II.4

Sur la capacité K, on a la relation suivante :

$$i_{k} = -\frac{K}{dx} \frac{\partial^{2} u}{\partial u \partial t} dx$$
 (A) II.5

D'où:
$$i_k = -K \frac{\partial^2 u}{\partial u \partial t}$$
 (A) **II.6**

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

Sur l'inductance L, on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x}dx = -Ldx \quad .\frac{\partial i}{\partial t} \tag{V} \qquad II.8$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \cdot \partial t} = 0$$
 (A/m) 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(ϖ t).Sin (β x) ou: $\varpi = 2\pi$ f : (est la pulsation), f

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) [5].

II.3.1.hypothèses simplificatrices :

En régime permanant, 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 liées aux surtensions se déroulent à très grande vitesse et agissant sur le transformateur comme des phénomènes apériodiques 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 capacitives. 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).





II.3.2. Répartition initiale de la tension [3]

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 obtiendrons alors une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement (identique à la répartition au régime permanant).

- 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).



S'il n'a 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.7).

• **Cas où le neutre est isolé de la terre :** la répartition est identique à la précédente figure (II.8).



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 :

$$u_{ox} = U_{Choc} \cdot \frac{Sh\,\alpha(1-x)}{Sh\,\alpha 1}$$
 II.14

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

$$u_{ox} = U_{Choc} \cdot \frac{Ch \,\alpha \,(x-1)}{Ch \,\alpha 1}$$
 II.15

 U_{Choc} : est la valeur maximale de la surtension. 1 : longueur totale de l'enroulement.

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}}$$
 (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 les figures ci-dessous :





Fig.II.9 : neutre mis à la terre.

Fig.II.10 : neutre isolé de la terre.

a. Démonstration :

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

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

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

$$U_{xo} = \frac{U_0(x)}{U_{Choc}}$$

L'équation (II.16) devient :

$$-C.U_{xo} + K\frac{\partial^2 U_{xo}}{\partial x^2} = 0$$
 (C/m) **II.17**

Ou bien :

$$\frac{\partial^2 U_{xo}}{\partial x^2} - \frac{C}{K} U_{xo} = 0$$
 (V/m²) II.18

La solution de cette équation est :

$$U_{xo} = A.\exp(\alpha x) + B.\exp(-\alpha x)$$
 II.19

A et B sont des constantes qui vont être déterminées par les conditions aux limites. Pour x = 0 (injection de la tension)

$$U_{xo} = 1_{\text{pu}}$$
 II.20

II.21

pour x = 0 (point mis à la terre) $U_{xo} = 0$ pu

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

Pour
$$x = 0: A + B = 1$$
 d'où $B = 1 - A$ II.22

Pour
$$x = 1$$
: $A.\exp(\alpha 1) + B.\exp(-\alpha 1) = 0$ II.23

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

$$U_{xo} = \frac{\exp[\alpha(1-x)] - \exp[-\alpha(1-x)]}{\exp(\alpha 1) - \exp(-\alpha 1)}$$
II.24

Qui peut s'écrire en fonction hyperbolique comme suit :

$$U_{xo} = \frac{Sh[\alpha(1-x)]}{Sh(\alpha 1)} U_{Choc}$$
 II.25

Si le neutre est flottant :

$$U_{xo} = \frac{Ch\alpha(x-1)}{Ch(\alpha 1)} U_{Choc}$$
 II.26

b. Le gradient de tension [3] :

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.9) et (II.10), 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 $\frac{du_x}{dx}$.

Pour les valeurs de cette dérivée et en tenant compte du fait que $\alpha \ge 3$, nous avons :

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

Cas où le neutre est mis à la terre :

$$\left[\frac{du_x}{dx}\right]_{x=0} = -\alpha \qquad [pu]$$

$$\left[\frac{du_x}{dx}\right]_{x=0} = -\alpha . U_{Choc}$$
 [KV]

Cas où le neutre est isolé de la terre :

$$\left[\frac{du_x}{dx}\right]_{x=o} = -\alpha \qquad [pu]$$

$$\left[\frac{du_x}{dx}\right]_{x=o} = -\alpha . U_{Choc}$$
 [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 $\alpha = 10$ à15 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 **[1]**

c. Répartition finale de la tension [3]

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 prés l'enveloppe. Ces oscillations seront d'autant plus que la différence $U_2 - U_1$ sera plus élevée.



Fig. II.11 : neutre à la terre



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

II.4.Phénomène transitoire de tension [3]

Pour les hypothèses les plus simples, l'expression cherchée est obtenue comme intégrale d'une équation différentielle de quantième ordre au moins (comme on aura l'occasion de le voir dons 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 a 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, 3,5 etc..., 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.



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 déférents 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 μ s/Km pour la ligne). D'une manière identique sont analysés des phénomènes plus complexes qui se produisent dans le transformateur. Lorsqu'arrive une impulsion apériodique de forme quelconque.

Si l'impulsion est de forme oscillatoire, haute fréquence, le danger de résonnance de l'impulsion de fréquence donnée est de l'un des harmoniques apparait. Donc, dans un transformateur peuvent apparaitre 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.





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

Conclusion :

L''étude qu'on aura effectuée est purement théorique, l'analyse numérique de la transmission de la surtension ne peut aboutir à des résultats exacts sans la connaissance des valeurs des capacités K et C ainsi les inductances L, M et la résistance R.

C'est pour cette raison que le calcul des paramètres du transformateur s'impose.



Modèles mathématiques d'étude

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 séries du transformateur. A des fréquences plus élevés 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.1. Modèle de Morched [MOR93]

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 (I-1) ou sa la forme réduite (I-2)

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & . & . & . & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & . & . & . & Y_{2n} \\ . & . & . & . & . & . \\ Y_{n1} & Y_{n2} & . & . & . & Y_{nn} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ . \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ . \\ I_n \end{bmatrix}$$
I.1

$$[Y] [V] = [I]$$
I.2

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





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)



Figure(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.2. Modèle de Leon : [Leo93], [Leo95] :

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-dessus 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.3. Modèle de Chimklai : [Chim95] :

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 (Zwinding) 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) : Zwinding

◆ 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 et connecter 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.4. Modèle de Gustavsen : [Gus98] :

Ce modèle suit le principe de celui de Morched, en considérant le transformateur comme une boite noir. 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.5. Modèle d'Andrieu : [And99] :

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(Zcc).

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 Zcc est montré dans la figure (III.8)



Fig. (III.8) : Circuit équivalent de Zcc.

III.6.Modèle de Noda: [Nod02] :

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 compote 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 crées par les inductances de l'enroulement et capacités entre les spires (Y₁, Z₁).

Chaque phénomène sera représenté par un circuit équivalent. Le modèle complet est montré dans la figure (**III.9**).



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.7. 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 magnétique. Il faut tenir compote 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 sur EMTP

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 du au fait que le schéma utilisé dans EMTP ne comporte qu'une seule branche magnétique Z_m figure (III.10) **[13]**.

III.8. 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 réluctances 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 réluctances 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 réluctances et sources commandées

III.9. 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 [Der98].

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)

Quelque 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 répondu et utilisé à l'heure actuelle. Le nombre de paramètre 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 direct de la géométrie [**Der98**]. Un autre modèle assez simple est basé sur un circuit essentiellement composé des inductances, des capacités et des résistances en parallèle qui représentent les pertes. Les résistances sont omises. A travers l'analyse du fonctionnement de plusieurs transformateurs, les auteurs ont pu estimer les pertes par courant de Foucault par des résistances en parallèle avec les inductances de fuites et empiriques dépendant de la configuration du transformateur choisie **[Der98].**



Fig. (II.10) : couplage de l'élément j avec les autres éléments.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons résumé les différents modèles de transformateurs en haute fréquence. Parmi ces modèles, on s'intéressera au modèle qui représente le transformateur par un schéma équivalent à constante localisées et à paramètres constants. Les paramètres de ce schéma, inductifs (selfs et mutuelles), capacitifs et résistifs, doivent tenir compte aussi de la géométrie du transformateur.



Détermination des paramètres des enroulements du transformateur

Le schéma équivalent des enroulements d'un transformateur a la particularité de posséder en plus du schéma de la ligne, les inductances mutuelles M et les capacités longitudinales K et cela à cause de la concentration des spires des enroulements malgré la longueur importante des conducteurs constituant les enroulements.

IV.1. Caractéristiques du transformateur

Notre étude sera faite sur un transformateur de 500/15,75KV, portant les indications suivantes :

IV.1.1. Caractéristiques électriques

 $S_n = 200MVA$: puissance apparente nominale. U_{HT} =500KV : tension nominale de l'enroulement haute tension. U_{BT} =15,75KV : tension nominale de l'enroulement basse tension. U_{CC} =12,5% : tension du court circuit. P_{CC} =700KW : pertes de puissance en court circuit. P_0 =175KW : pertes de puissance a vide. I_0 =0,35* I_n % / courant a vide. f=50Hz.

IV.1.2.Caractéristiques géométriques

 $d_{extHT} = 2770 \text{ mm}$: diamètre extérieur de l'enroulement haute tension. $d_{int HT} = 1760 \text{ mm}$: diamètre intérieur de l'enroulement haute tension. $d_{extBT} = 2770 \text{ mm}$: diamètre extérieur de l'enroulement basse tension. $d_{intBT} = 2770 \text{ mm}$: diamètre intérieur de l'enroulement basse tension. $d_n = 1100 \text{ mm}$: diamètre du noyau. $d_c = 5000 \text{ mm}$: diamètre de la cuve. $L_{en} = 2360 \text{ mm}$: 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. V.1Caracetrestiques géométriques du transformateur.

IV.2. Relations empiriques pour le calcul des paramètres

Les expériences menées sur les transformateurs soumis à différentes formes d'ondes impulsionnelles, nous permettent d'établir dans ce chapitre, des relations empiriques pour un calcul des paramètres du schéma équivalent 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 **[18]** :

$$R_{\Delta} = K_1 \cdot R_0 \qquad \qquad IV.1$$

Avec :

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

K₁ : facteur de précision de la résistance.

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

$$R_0 = \frac{\Delta p_{cc} \cdot U_n^2}{S_n^2}$$
 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

$$R = \frac{R_{\Delta}}{n}$$
 IV.3

n : est le nombre d'éléments

Remarque

Les paramètres de l'enroulement primaire (HT) seront repérés par l'indice 1 et ceux du secondaire (BT) par l'indice 2.

IV.2.2.Calcul numérique des résistances R1et R2

Les résistances des deux enroulements primaire et secondaire seront calculées par les formules (IV.1) et (IV.2).

$$R_{\Delta 1} = K_1 \cdot R_{01}$$

$$R_{01} = \frac{\Delta p_{cc} \cdot U_{HT}^2}{S_n^2} = \frac{700.(500)^2 \cdot 10^3 \cdot 10^6}{(200.10^6)^2} = 4.375\Omega$$
K1=10.775
D'où :
IV.2.2.1.pour l'enroulement primaire

$$R_{\Delta 1} = 10.575 * 4.375 = 46.27\Omega$$

Pour un enroulement on aura :

$$R_1 = \frac{R_{\Delta 1}}{n} = \frac{46.27}{6} = 8\Omega$$

R1 : est la résistance d'un élément de l'enroulement primaire (HT).

IV.2.2.2.Pour l'enroulement secondaire

$$R_{\Delta 2} = K_1 R_{02}$$

Avec :

$$R_{01} = \frac{\Delta p_{cc} \cdot U_{BT}^2}{S_n^2} = \frac{700.(15.75)^2.10^3.10^6}{(200.10^6)^2} = 0.0043\Omega$$

D'où :

$$R_{\Delta 2} = K_1 * R_{02} = 10.575 * 0.0043 = 0.046\Omega$$

Soit : $R_2 = \frac{0.046}{6} = 0.008\Omega$

R2 : est la résistance d'un élément de l'enroulement secondaire (BT).

IV.3.Détermination des inductances propres Let mutuelles M IV.3.1. Relations empiriques pour le calcul des inductances propres Let 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 **[19].**

$$L_{en} = K_2 * L_{cc}$$
 IV.4

Où :

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

K₂ : 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 général K2 = 0.65.

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

$$L_{cc} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$
 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 :

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

n est le nombre d'éléments

IV.3.2 Calcul numérique des inductances propres et mutuelles M

IV.3.2.1.Calcul des inductances propres L

IV.3.2.1.1.Pour l'enroulement primaire

$$L_{1cc} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_{HT}^2}{S_n} + \frac{1}{2.(3.14).50} \frac{(12.5).(500.10^3)^2}{100.200.10^6} = 0.5H$$

L1cc=0.5H

D'où :

Len=0.5*0.65=0.325=325000 µH

Pour un seul élément

$$L_{1} = \frac{L_{en}}{6} = \frac{325000}{6} = 54166.666 \mu H$$

L'1=54166.66 µH

IV.3.2.1.2.Pour l'enroulement secondaire

$$L_{2cc} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U_{BT}^2}{S_n} = \frac{1}{2.(3.14).50} \frac{(12.5).(15,75.10^3)^2}{100.200.10^6} = 0.00493504H$$

$$L_{en} = K_2 * L_{2cc} = 0.65 * 0.000493504 = 0.000320778H = 320.77 \mu H$$

Pour un seul élément

$$L_2 = \frac{320.77}{6} = 53.46 \mu H$$

Remarque

Les inductances d'un élément des enroulements L'1 et L'2 comportent respectivement des inductances propres L1et L2, les inductances mutuelles entre différents éléments de l'enroulement et les mutuelles entre l'élément d'un enroulement et les éléments de l'autre enroulement. Donc pour pouvoir calculer L1 et L2, on est obligé de passer par le calcul des inductances mutuelles M.

IV.3.2.2.calcul des inductances mutuelles M

Les inductances mutuelles sont calculées par la fonction empirique [19].

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

Qui dépend des positions des éléments par rapport au noyau et entre eux. Cette fonction est représente sur la figure (IV.2).

Avec :

a : est la distance entre les éléments (disques, bobine, spires, etc....) de

l'enroulement.

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

b_{HT} est la distance entre l'enroulement BT et le noyau. (Voir figure (IV.3))



Fig. IV.3.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.3.a) et (IV.3.b)





La longueur d'un élément sera donc :

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

La valeur de b sera donnée par :

Pour l'enroulement haute tension :

$$\mathbf{b}_{\mathrm{HT}} = \mathbf{r}_{\mathrm{moyHT}} - \mathbf{r}_{\mathrm{n}} \qquad \qquad \mathbf{IV.9}$$

Pour l'enroulement basse tension :

$$b_{BT} = r_{moyBT} - r_n$$
 IV.10

Avec :

 $r_n = d/2 = 550mm$ rayon du noyau.

$$r_{moyHT} = \frac{r_{extHT} + r_{int HT}}{2} = \frac{1385 + 880}{2} = 1132.5mm$$
$$r_{moyBT} = \frac{r_{extBT} + r_{int BT}}{2} = \frac{640 + 275}{2} = 607.5mm$$
Donc :

b_{HT} =582.5mm

 $b_{BT} = 57.5 \text{mm}$



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)) puis entre les éléments de l'enroulement secondaire (tableau (IV.2)) et enfin les inductances entre les éléments des deux enroulements (tableau (IV.3))

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

N°de la mutuelle	a [mm]	b _{HT} [mm]	a/b _{HT}	$K_{H-H} = \frac{M_{H-H}}{L_1}$	Μ _{Η-Η} [μΗ]
1	393.33		0.6752	0.53	13514.44
2	786.66		1.3504	0.28	7139.70
3	1180	82.5	2.0257	0.15	3824.84
4	1573.33	4)	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.

					•
N°de la mutuelle	a [mm]	b _{BT} [mm]	a/b _{BT}	$K_{B-B} = \frac{M_{B-B}}{L_1}$	M _{B-B} [μH]
1	393.33		6.8405	0.007	0.3580
2	786.66		13.6810	0.00003	0.0015
3	1180	57.5	20.5217	0.000001	0.000051
4	1573.33		27.3622	0.0000001	0.0000051
5	1966.66		34.2027	0.00000001	0.00000051

Tableau (IV.2) : calcul des mutuelles entre les éléments de l'enroulement

BT

IV.3.2.2.3.Calcul de la mutuelle entre les deux enroulements HT et BT.

Le calcul se fait en fonction de
$$\frac{a}{\sqrt{b_{HT} \cdot b_{BT}}}$$

N° de la mutuelle	b _{BT} [mm]	b _{HT} [mm]	a[mm]	$\frac{a}{\sqrt{b_{_{HT}} \cdot b_{_{BT}}}}$	$K_{H-B} = \frac{M_{H-B}}{L}$	Μ _{HB} [μH]
1			0	0	0.032	204.29
2			393.33	2.1491	0.005	80.75
3	S	2.5	786.66	4.2983	0.0009	34.26
4	57	582	1180	6.4476	0.00013	13.02
5			1576.33	8.5968	0.000017	4.70
6			1966.66	10.7460	0.000003	0.0000059

Tableau (IV.3) : calcul des mutuelles entre les éléments des deu	X
enroulements.	

Apres avoir calculer toutes les inductances mutuelles, les inductances propres seront calculées suivant ces formules :

$$L_{1} = \frac{L_{1}}{1 + \sum K_{H-H} + \sum K_{H-B}}$$
 IV.11

$$L_{2} = \frac{L_{2}}{1 + \sum K_{B-B} + \sum K_{H-B}}$$
 IV. 12

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

$$\sum K_{B-B} = 0.00703111$$

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

Apres calcul, on aura :

 $L_1=L_H=25498,96\mu$ H (l'inductance propre d'un élément de l'enroulement primaire)

 $L_2=L_B=51,15\mu H$ (l'inductance propre d'un élément de l'enroulement secondaire)

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 [20]

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

Où :

 ϵ_r : permittivité relative de l'huile.

 \mathcal{E}_{o} : permittivité absolue du vide.

l : longueur totale de l'enroulement.

d₁ et d₂ : 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 [8]

$$C_{ent.tr} = \frac{Q_{x=0}}{U_o} = \frac{1}{U_o} \cdot K_{tot} \cdot \frac{du}{dx}\Big|_{x=0} = \frac{1}{U_o} \cdot K_{tot} \cdot U_o \cdot \alpha$$
 IV.14

Sachant que :

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

 $U_o=U_{choc}$ est l'amplitude maximale de tension à l'entrée de l'enroulement. On aura :

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

Donc connaissant α et C_{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

IV.4.2.1.1.Pour le primaire

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

$$C_{1tot} = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{cuve} + d_{extHT}}{d_{cuve} - d_{extHT}}$$
$$\Rightarrow C_{1tot} = 8,85.3,9.3,14.2,360 \cdot \frac{5000 + 2770}{5000 - 2770} = 890.82PF$$

D'où :

$$C_1 = \frac{C_{1tot}}{n+1} = \frac{891.2}{7} = 130PF = 0.00012\mu F$$

C1 : la capacité transversale d'un seul élément de l'enroulement primaire (HT).

IV.4.2.1.2.Pour le secondaire

La capacité transversale de l'enroulement secondaire et la masse (noyau) sera calculée par la formule suivante :

$$C_{2tot} = \varepsilon_o .\varepsilon_r .\pi .l. \frac{d_{\text{int }BT} + d_n}{d_{\text{int }BT} - d_n}$$

$$\Rightarrow C_{1tot} = 8,85.3,9.3,14.2,360. \frac{1150 + 1100}{1150 - 1100} = 11509.65PF$$

D'où :

$$C_2 = \frac{C_{2tot}}{n+1} = \frac{11509.65}{7} = 1644.23PF = 0.0016\mu F$$

C2 : la capacité transversale d'un seul élément de l'enroulement secondaire (BT).

IV.4.2.1.3 Entre les deux enroulements

La capacité transversale entre les deux enroulements sera calculée selon cette formule :

$$C_{(1-2)tot} = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{\text{int } HT} + d_{extBT}}{d_{\text{int } HT} - d_{extBT}}$$

$$\Rightarrow C_{(1-2)tot} = 8,85.3,9.3,14.2,360 \cdot \frac{1760 + 1280}{1760 - 1280} = 1620PF \cdot C_{(1-2)tot} = 1620PF \cdot$$

D'où :
$$C_{1-2} = \frac{C_{(1-2)tot}}{n+1} = \frac{1620.7}{7} = 0.00023 \mu F$$

 C_{1-2} : la capacité transversale d'un élément entre les deux enroulements HT et BT.

IV.4.3. Calcul des capacités longitudinales K des enroulements primaire et secondaire

Connaissant les valeurs des capacités C_1 et C_2 et C_{1-2} , on peut passer facilement au calcul des capacités longitudinales K1 et K2 par les formules suivantes :

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

Avec :

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

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

$$C_{2\Sigma} = C_2 + \frac{C_{12} \cdot C_1}{C_{12} + C_1}$$
 IV.19

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

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

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
34-0	102.7
36-0	99.6
38-0	99.6
40-0	94.7
42-0	92
44-0	89.5

Tableau (IV.4)

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

IV.4.3.1.Pour le primaire :

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

Avec :

$$C_{1tot} = C_1 + \frac{C_{12} \cdot C_2}{C_{12} + C_2} = 0.00013 + \frac{0.00164 * 0.00023}{0.00164 + 0.00023} = 0.00033 \mu F$$

K_{1tot}=0.00033µF

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

 K_1 =0.00033*6=0.0019 μ F

 $K_1\!\!=\!\!0.0019\;\mu F$

IV.4.3.2.Pour le secondaire:

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

$$C_{2tot} = C_2 + \frac{C_{12} \cdot C_1}{C_{12} + C_1} = 0.00013 + \frac{0.00023 * 0.00013}{0.00023 + 0.00013} = 0.00172 \mu F$$

K_{2tot}=0.00172µF

Et pour la capacité secondaire d'un seul élément on aura :

 $K_2\!\!=\!\!0.00172^*6\!\!=\!\!0.01033\,\mu F$

 $K_2=0.01033 \ \mu F$



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

<u>Chapitre V</u>

Modélisation des enroulements du transformateur

V.1.Introduction

Une étude bibliographique a été réalisée sur un grand nombre de travaux. Ces études montrent que le comportement du transformateur soumis aux ondes de choc peut être considéré de deux façons. La première consiste à utiliser les lois de similitude et conduit impérativement à la réalisation d'un modèle physique. Cette méthode reste précise mais elle est relativement longue à mettre en œuvre et onéreuse. C'est pour cette raison qu'on lui préfère l'utilisation du schéma équivalent.

La précision dans les résultats et le coût de la modélisation reste liés au modèle mathématique choisi et au degré de précision adapté pour le calcul des paramètres.

Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement atteint dans la modélisation d'un enroulement et du programme de simulation mis en œuvre.

A la vue de cet ensemble de difficultés que présentent ces différentes approches nous proposons dans notre cas, une nouvelle méthode de calcul des surtensions dans les enroulements de transformateur. Elle traite de ces phénomènes de surtensions en tenant en compte des conditions réelles d'exploitation, ceci, avec une précision suffisante dans les résultats obtenus.

V.2.Schéma équivalent proposé

Apres avoir exposé dans un chapitre précédent les différents modèles utilisés pour l'étude des phénomènes de surtensions dans le bobinage du transformateur, nous proposons le modèle que nous avons choisi, qui nous parait le mieux adapté. C'est le modèle qui représente le transformateur par un réseau de capacités, de résistances et d'inductances propres et mutuelles.

La validité de ce model est liée au degré de raffinement dans la discrétisation du bobinage.

V.2.1.Définition des paramètres

En raisonnant sur le schéma de la figure (V.1) où les impédances caractéristiques des deux enroulements de la phase A, coté haute tension (HT) et (BT) sont notées Z_H et Z_B respectivement. Les distances entre les parafoudres et le transformateur sont introduites dans les calculs a l'aide des paramètres L_H , C_{PA} , L_B
et C_{BP} comme on tient compte du poste coté haute tension (HT) par le biais de capacité d'entrées Cp. chaque enroulement est subdivisé sous certaines conditions en six parties représentées sur la figure (V.1) par six éléments connectés en série. Il est noté que le logiciel mis en œuvre ne permet pas de considérer des schémas comportant plus de cent nœuds. Chaque élément du schéma représente un ou plusieurs éléments constitutifs de l'enroulement (disques, bobines ou simplement spires selon la construction).les résistances, les inductances propres et mutuelles, les capacités transversales (par rapport au noyau, à la cuve et entre les enroulements) et les capacités longitudinales sont représentées respectivement par R, L, M, C, et K. En tenant compte de la haute fréquence de l'onde appliquée et de l'existence dans les transformateurs d'un enroulement connecté en triangle, nous négligeons l'influence du noyau (d'ailleurs le schéma équivalent traditionnel ne tient pas compte du noyau).afin d'obtenir des résultats correspondant aux plus sévères sollicitations de l'isolation, nous avons choisi une tension d'épreuve impulsionnelle caractérisée par une onde complète 1,2/50µs.

V.2.2. Caractéristiques des parafoudres utilisés

V.2.2.1.Parafoudre de la haute tension

Tension en (KV)	0	600	660	670	700	760	840	900
Courant en (KA)	0	0,001	0,005	0,01	0,1	1	5	10

V.2.2.2.Parafoudre de la basse tension

Tension en (KV)	0	33	35	37	39	40	45	51
Courant en (KA)	0	0,001	0,01	0,1	1	3	5	10

V.3.Modèle mathématiques du poste et du transformateur

Les équations sont établies à partir du schéma de calcul figure (V.1), pour des points quelconques des enroulements primaire et secondaire. L'application des deux lois de KIRCHHOF nous conduit au deux systèmes d'équations suivants :

V.3.1. Equations électriques de l'enroulement

Selon PETERSON, l'impédance caractéristique de la ligne est considérée à l'élément localisé, la tension appliquée doit être doublée

Démonstration :

Soit :

U_i: l'onde de tension incidente.

U_r : l'onde de tension réfléchie.

Ut: l'onde de tension transmise.

Et :

$i_1 = \frac{U_i}{Z_c}$	V.1
$i_r = \frac{U_r}{Z_c}$	V.2
$i_t = \frac{U_t}{Z_c}$	V.3

Z_c : impédance de la charge

Leurs courants respectifs :

$$U_t = U_i + U_r V.4$$

$$i_t = i_i - i_r V.5$$

En injectant (V.2) et (IV.1) dans l'équation (V.4) on aura :

$$i_t = \frac{1}{Z_c} (U_i - U_r)$$
 V.6

En multipliant les deux membres de l'équation (V.4) par $1/Z_c$ et en additionnant l'équation obtenue avec l'équation (V.6) on obtient :

$$\frac{1}{Z_c} \cdot U_t + i_t = \frac{1}{Z_c} (U_i + U_r) + \frac{1}{Z_c} (U_i - U_r)$$
$$\frac{1}{Z_c} \cdot U_t + i_t = \frac{2}{Z_c} U_i$$





Fig.V.3 : Schéma équivalent de la ligne à éléments localisés lors d'une surtension selon PETERSON

V.3.1.1 Equations des tensions

• Pour le primaire :

Dans notre étude, on utilise un parafoudre a oxyde de zinc dont :

$$U_p = A(i_p)^{\alpha}$$
 (Caractéristique du parafoudre)

Où :

A est la valeur absolue de Up

ip est le courant traversant le parafoudre

 α est le facteur de non linéarité de parafoudre

D'après le schéma équivalent figure (V.1) on a :

io et uo sont respectivement le courant et la surtension appliqués.

Soit :

 $u_0 = U_0(exp(-at)-exp(-bt))$: c'est la forme d'onde de choc appliquée tel que :

V.11

a=0.018889 b=1.898565

Uo=2315

Pour :

$$U_{P1} = A_1(I_{P1})^{\alpha} \Longrightarrow Ln(U_{P1}) = Ln(A_1) + \alpha_1 Ln(I_{P1})$$
$$\Rightarrow I_{P1} = \exp(\frac{Ln(I_{P1}) - Ln(A_1)}{\alpha_1})$$
V.9

$$\Rightarrow \frac{dI_{p_1}}{dt} = \frac{1}{\alpha_1 U_{p_1}} \cdot \frac{dU_{p_1}}{dt} (\frac{\exp(Ln(I_{p_1}) - Ln(A_1))}{\alpha_1})$$
 V.10

$$u_0 = U_0(exp(-at)-exp(-bt))$$

$$U_o - U_{P1} = Z_H \cdot i_o \Longrightarrow i_o = \frac{U_o - U_{P1}}{Z_H}$$
 V.12

$$U_{P1} - U_1 = L_H \frac{d}{dt} (i_o - I_{P1})$$
 V.13

$$U_{P1} = Z_{P1} \cdot I_{P1} \Longrightarrow I_{P1} = \frac{U_{P1}}{Z_{P1}}$$
 V.14

En injectant (V.12) dans (V.13) on trouve :

$$U_{P1} - U_1 = L_H \frac{d}{dt} \left(\frac{U_o}{Z_H} - \frac{U_{P1}}{Z_H} - I_{P1} \right)$$
 V.15

En développant on aura :

$$U_{P1} - U_1 = \frac{L_H}{Z_H} \left(\frac{dU_o}{dt} - \frac{dU_{P1}}{dt}\right) - L_H \frac{dI_{P1}}{dt}$$
V.16

$$U_{P1} - U_1 = \frac{U_o \cdot L_H}{Z_H} (-a \exp(-at) + b \exp(-bt)) - \frac{L_H \cdot dU_{P1}}{Z_H \cdot dt} - \frac{L_H}{Z_{P1}} \cdot \frac{dU_{P1}}{dt}$$
 V.17

$$U_{P1} - U_1 = \frac{L_H}{Z_H} U_O(-a\exp(-at) + b\exp(-bt)) - L_H(\frac{\alpha_1 \cdot Z_{P1}}{Z_H} + 1) \cdot \frac{dI_{P1}}{dt}$$
 V.18

On prend :

$$A = \frac{U_o \cdot L_H}{Z_H} (-a \exp(-at) + b \exp(-bt))$$

On aura donc :

$$U_{P1} - U_1 = A - L_H \left(\frac{\alpha_1 \cdot Z_{P1}}{Z_H} + 1\right) \cdot \frac{dI_{P1}}{dt}$$
 V.19

Les équations différentielles des tensions dans le transformateur sont :

$$U_{1} - U_{2} = R_{1}i_{1} + L_{1}\frac{di_{1}}{dt} + M_{12}\frac{di_{2}}{dt} + \dots + M_{16}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS11}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS16}\frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{2} - U_{3} = R_{1}i_{2} + L_{1}\frac{di_{2}}{dt} + M_{21}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{26}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS21}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS26}\frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{3} - U_{4} = R_{1}i_{3} + L_{1}\frac{di_{3}}{dt} + M_{31}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{36}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS31}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS36}\frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{4} - U_{5} = R_{1}i_{4} + L_{1}\frac{di_{4}}{dt} + M_{41}\frac{di_{2}}{dt} + \dots + M_{46}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS41}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS46}\frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{5} - U_{6} = R_{1}i_{5} + L_{1}\frac{di_{5}}{dt} + M_{51}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{56}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS51}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS56}\frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{6} - U_{7} = R_{1}i_{6} + L_{1}\frac{di_{6}}{dt} + M_{61}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{65}\frac{di_{5}}{dt} + M_{PS61}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS66}\frac{di_{6}}{dt}$$

U₇=0 (relié à la terre)

Généralisation :

Pour 1≤K≤h où h est le nombre d'éléments

$$U_{K} - U_{K+1} = R_{1}i_{K} + L_{1}\frac{di_{K}}{dt} + \sum_{\substack{m=1\\m\neq K}}^{h} M_{Km}\frac{di_{m}}{dt} + \sum_{n=1}^{h} M_{PSKn}\frac{di_{n}}{dt}$$

Ecriture matricielle

$\begin{bmatrix} U_{p1} - U_1 - A \end{bmatrix}$	$\left[-L_{H}(\propto_{1}\frac{Z_{p1}}{ZH}+1)\right]$	0	0	0	0	0	()	$\left[I_{p}\right]$	7
$U_{1} - U_{2} - R_{1}i_{1}$	0	L_1	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}		i_1	
$U_2 - U_4 - R_1 i_2$	0	M_{21}	L_1	M_{23}	M_{24}	M_{25}	M_{26}		i_2	
$\left U_3 - U_4 - R_1 i_3 \right =$	0	M_{31}	M_{32}	L_1	M_{34}	M_{35}	M_{36}	$\frac{d}{dt}$	$\frac{1}{i_3}$	
$U_4 - U_5 - R_1 i_4$	0	M_{41}	M_{42}	M_{43}	L_1	M_{45}	M_{46}		<i>i</i> ₄	
$U_{5} - U_{6} - R_{1}i_{5}$	0	M_{51}	M_{52}	M_{53}	M_{54}	L_1	M_{56}		i_5	
$\left[U_{6}-0-R_{1}i_{6}\right]$	0	M_{61}	M_{62}	M_{63}	M_{64}	M_{65}	L_1		i_6	
	Ĺ									

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{PS11} & M_{PS12} & M_{PS13} & M_{PS14} & M_{PS15} & M_{PS16} \\ 0 & M_{PS21} & M_{PS22} & M_{PS23} & M_{PS24} & M_{PS25} & M_{PS26} \\ 0 & M_{PS31} & M_{PS32} & M_{PS33} & M_{PS34} & M_{PS35} & M_{PS36} \\ 0 & M_{PS41} & M_{PS42} & M_{PS43} & M_{PS44} & M_{PS45} & M_{PS46} \\ 0 & M_{PS51} & M_{PS52} & M_{PS53} & M_{PS54} & M_{PS55} & M_{PS56} \\ 0 & M_{PS61} & M_{PS62} & M_{PS63} & M_{PS64} & M_{PS65} & M_{PS66} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix}$$

♦ Pour le secondaire

$$U_{P3} - U_{1}' = -L_{B}(\alpha_{3} \frac{Z_{P3}}{Z_{B}} + 1) \frac{dI_{P3}}{dt}$$

$$U_{1}' - U_{2}' = R_{2}i'_{1} + L_{2} \frac{di'_{1}}{dt} + M_{S12} \frac{di'_{2}}{dt} + \dots + M_{S16} \frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS11} \frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS16} \frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{2}' - U_{3}' = R_{2}i'_{2} + L_{2} \frac{di'_{2}}{dt} + M_{S21} \frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S26} \frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS21} \frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS26} \frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{3}' - U_{4}' = R_{2}i'_{3} + L_{2} \frac{di'_{3}}{dt} + M_{S31} \frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S36} \frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS31} \frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS36} \frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{4}' - U_{5}' = R_{2}i'_{4} + L_{2} \frac{di'_{4}}{dt} + M_{S41} \frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S46} \frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS41} \frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS46} \frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{5}' - U_{6}' = R_{2}i'_{5} + L_{2} \frac{di'_{5}}{dt} + M_{S51} \frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S56} \frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS51} \frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS56} \frac{di_{6}}{dt}$$

$$U_{6}' - U_{7}' = R_{2}i'_{6} + L_{2} \frac{di'_{6}}{dt} + M_{S61} \frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S66} \frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS61} \frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS66} \frac{di_{6}}{dt}$$

Généralisation :

Pour 1≤K≤h où h est le nombre d'éléments

$$U'_{K} - U'_{K+1} = R_{2}i'_{K} + L_{2}\frac{di'_{K}}{dt} + \sum_{\substack{m=1\\m \neq K}}^{h} M_{SKm}\frac{di'_{m}}{dt} + \sum_{n=1}^{h} M_{PSKn}\frac{di_{n}}{dt}$$

Ecriture matricielle :

$\begin{bmatrix} U_{nn} - U'_{n-1} \end{bmatrix}$	$\left[-L_B(\alpha_3 \frac{Z_{P3}}{dt})\right]$	0	0	0	0	0	0		$[I_n]$
$U'_1 - U'_2 - R_2 i'_1$	0	L_2	M_{S12}	<i>M</i> _{<i>S</i>13}	M_{S14}	M_{S15}	M_{S16}		i'_1
$U'_2 - U'_3 - R_2 i'_2$	0	M_{s21}	L_2	M_{S23}	M_{S24}	M_{s25}	M_{S26}		i'_2
$ U'_{3}-U'_{4}-R_{2}i'_{3} =$	0	M_{S31}	M_{S32}	L_2	M_{S34}	M_{S35}	M_{S36}	$\left \frac{d}{dt}\right $	<i>i</i> ' ₃
$U'_{4} - U'_{5} - R_{2}i'_{4}$	0	M_{S41}	M_{S42}	M_{S43}	L_2	M_{S45}	M_{S46}		<i>i</i> ' ₄
$U'_{5} - U'_{6} - R_{2}i'_{5}$	0	M_{S51}	M_{S52}	M_{S53}	M_{S54}	L_2	M_{S56}		<i>i</i> ' ₅
$\left[U'_{6}-0-R_{2}i'_{6}\right]$	0	M_{S61}	M_{S62}	$M_{_{S63}}$	M_{S64}	M_{S65}	L_2		$\lfloor i'_6 \rfloor$
	L								

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{PS11} & M_{PS12} & M_{PS13} & M_{PS14} & M_{PS15} & M_{PS16} \\ 0 & M_{PS21} & M_{PS22} & M_{PS23} & M_{PS24} & M_{PS25} & M_{PS26} \\ 0 & M_{PS31} & M_{PS32} & M_{PS33} & M_{PS34} & M_{PS35} & M_{PS36} \\ 0 & M_{PS41} & M_{PS42} & M_{PS43} & M_{PS44} & M_{PS45} & M_{PS46} \\ 0 & M_{PS51} & M_{PS52} & M_{PS53} & M_{PS54} & M_{PS55} & M_{PS56} \\ 0 & M_{PS61} & M_{PS62} & M_{PS63} & M_{PS64} & M_{PS65} & M_{PS66} \end{bmatrix} \frac{d}{i_1} \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix}$$

V.3.1.2. Equations des courants

♦ Pour le primaire

Comme on a déjà mentionné

$$\begin{cases} i_p = \exp(\frac{Ln(u_p) - Ln(a)}{\alpha}) \\ i_0 = (u_o - u_p) / Z_A \\ u_o = U_o(\exp(-at) - \exp(-bt)) \end{cases}$$

Au nœud (1) du schéma équivalent (fig. V.1) on a :

$$i_{o} = I_{P1} - I_{P2} - i_{1} = (K_{1} + C_{12} + C_{1} + C_{P} + C_{P2}) \frac{dU_{1}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{2}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{1}}{dt}$$

En injectant la valeur de $\,\,i_{o}\,et\,\,I_{p}$ on aura :

$$\frac{U_o}{Z_H}(\exp(-at) - \exp(-bt)) - \frac{U_{P1}}{Z_H} - i_{P1} - i_{P2} - i_1 = (K + C_1 + C_{P2} + C_{P2})\frac{dU_1}{dt} - K_1\frac{dU_2}{dt} - C_{12}\frac{dU_1}{dt}$$

$$\begin{split} i_{1} - i_{2} &= -K_{1} \frac{dU_{1}}{dt} + (2K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{2}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{2}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{2}}{dt}}{dt} \\ i_{2} - i_{3} &= -K_{1} \frac{dU_{2}}{dt} + (2K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{3}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{4}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{3}}{dt}}{dt} \\ i_{3} - i_{4} &= -K_{1} \frac{dU_{3}}{dt} + (2K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{4}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{5}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{4}}{dt}}{dt} \\ i_{4} - i_{5} &= -K_{1} \frac{dU_{4}}{dt} + (2K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{5}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{6}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{5}}{dt}}{dt} \\ i_{5} - i_{6} &= -K_{1} \frac{dU_{5}}{dt} + (2K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{6}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{7}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{5}}{dt}}{dt} \\ i_{6} - (1/R_{NB})U_{7} &= -K_{1} \frac{dU_{6}}{dt} + (K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{7}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{7}}{dt} \\ \end{split}$$

Généralisation

Pour $1 \leq K \leq h-1$

$$i_{K} - i_{K+1} = -K_{1} \frac{dU_{K}}{dt} + (2K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{K+1}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{K+2}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{K+1}}{dt}$$

Pour k=n

$$i_{K} - (1/R_{NB})U_{K+1} = -K_{1} \frac{dU_{K}}{dt} - C_{12} \frac{dU'_{K+1}}{dt} + (K_{1} + C + C_{12}) \frac{dU_{K+1}}{dt}$$

Ecriture matricielle

$i_{o} - i_{1} - i_{p1} - i_{p2}$	
$i_1 - i_2$	
$i_2 - i_3$	
$i_3 - i_4$	=
$i_4 - i_5$	
$i_5 - i_6$	
$i_6 - 0$	

$[(K_1 - C_1 + C_{12} + C_{p-1})]$	$+C_{p_3}$)	- <i>K</i> ₁	0	0	0	0	0
$-K_1$	(2K ₁ +C	$C_{1}+C_{12}$	$-K_{i}$	0	0	0	0
0	— <i>K</i>	f (2	$2K_1 + C_1 + C_{12}$	$-K_1$	0	0	0
0	0)	$-K_1$	$(2K_1+C_1+C_1)$	$-K_1$	0	0
0	0)	0	$-K_{1}$	(2 <i>K</i> ₁ + <i>C</i> ₁ +	C_{12} $-K_1$	0
0	0)	0	0	$-K_1$	$(2K_1+C_1+C_1)$	- <i>K</i> ₁
0	0)	0	0	0	$-K_1$ (k	$K_1 + C_1 + C_{12}$

♦ Pour le secondaire

$$\begin{split} &-I_{P3} - i_{1}^{'} = (K_{2} + C_{12} + C_{2} + C_{P2}) \frac{dU'_{1}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{2}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{1}}{dt} \\ &i_{1}^{'} - i_{2}^{'} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2}) \frac{dU'_{2}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{3}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{2}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{1}}{dt} \\ &i_{2}^{'} - i_{3}^{'} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2}) \frac{dU'_{3}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{4}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{3}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{2}}{dt} \\ &i_{3}^{'} - i_{4}^{'} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2}) \frac{dU'_{4}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{5}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{4}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{3}}{dt} \\ &i_{4}^{'} - i_{5}^{'} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2}) \frac{dU'_{5}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{6}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{5}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{4}}{dt} \\ &i_{5}^{'} - i_{6}^{'} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2}) \frac{dU'_{6}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{7}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{6}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{4}}{dt} \\ &i_{5}^{'} - (1/R_{NB})U'_{NB} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2}) \frac{dU'_{7}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{7}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{5}}{dt} \\ \end{split}$$

Généralisation

Pour 1≤K≤h-1

$$i_{K} - i_{K+1} = -K_{2} \frac{dU'_{K}}{dt} + (2K_{2} + C_{2} + C_{12}) \frac{dU'_{K+1}}{dt} - K_{2} \frac{dU'_{K+2}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{K+1}}{dt}$$

Pour k=n

$$i'_{K} - (1/R_{NH})U'_{K+1} = -K_{2} \frac{dU'_{K}}{dt} - C_{12} \frac{dU_{K+1}}{dt} + (K_{1} + C_{2} + C_{12}) \frac{dU'_{K+1}}{dt}$$

Ecriture matricielle

ſ	$-I_{P3} - i'_{1}$							
	<i>i</i> ' ₁ - <i>i</i> ' ₂							
	$i'_{2} - i'_{3}$							
	$i'_{3} - i'_{4} =$							
	<i>i</i> ' ₄ - <i>i</i> ' ₅							
	$i'_{5} - i'_{6}$							
	<i>i</i> ' ₆ -0							
	$\left[(K_2 + C_1 + C_2 + C_2) + C_2 +$	$(m_{2}) -K_{2}$	0	0	0	0	0	_
	$-K_2$	$(2K_2+C_2+C_1)$) $-K_2$	0	0	0	0	
	0	$-K_2$	$(K_2 + C_2 + C_{12})$	$-K_2$	0	0	0	
	0	0	$-K_2$	$(2K_2+C_2+C_{12})$	$-K_2$	0	0	
	0	0	0	$-K_2$	$(2K_2+C_2+C_1)$	$-K_{2}$	0	
	0	0	0	0	$-K_2$	$(2K_2 + C_2 + C_2)$	(12) 0	
	0	0	0	0	0	$-K_2$	$(K_2 + C_2 + C_{12})$)

$$* \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_{1}^{'} \\ U_{2}^{'} \\ U_{3}^{'} \\ U_{4}^{'} \\ U_{5}^{'} \\ U_{6}^{'} \\ U_{7}^{'} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{12} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_{1} \\ U_{2} \\ U_{3} \\ U_{4} \\ U_{5} \\ U_{6} \\ U_{7} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1} \\ U_{2} \\ U_{3} \\ U_{4} \\ U_{5} \\ U_{6} \\ U_{7} \end{bmatrix}$$



Fig. V.1.Schéma complet équivalent d'un transformateur soumis à une surtension

V.4.Simulation des enroulements sur P-SPICE :

Dans le but de d'apporter, des clarifications sur l'influence des résistances des enroulements du transformateur lors de passage de l'onde de surtension sur cette dernière, on fait appel à un logiciel de simulation (P-SPICE), conçu spécialement pour l'étude des phénomènes transitoires dans les circuits électriques.

Pour utiliser ce logiciel, il suffit de numéroter chaque élément du circuit équivalent des deux enroulements et d'insérer les caractéristiques de transformateur. Il est important de préciser que lors de cette opération, la numérotation des nœuds a été faite comme nous l'indique la figure (V.4.a) après chaque composant d'un élément :



Fig. V.4.a : disposition des tensions sur le schéma

V.4.1Analyse des résultats de simulation :

Lors de notre étude, on s'intéressera à la répartition de la tension le long des enroulements du transformateur et à l'influence des résistances des enroulements sur celle ci. En faisant balayer les deux régimes de neutre pour l'enroulement basse tension et en gardant toujours la mise à la terre de la haute tension.

Nous opterons pour deux cas :

• Un 1^{er} cas où nous tiendrons compte des résistances des enroulements du transformateur.

• Un 2^{eme} cas où nous ne tiendrons pas compte des résistances des enroulements du transformateur

Les différents cas qui se présentent sont exposés ci après :

*La basse tension est isolée de la terre

La répartition des tensions aux différents points des enroulements de transformateur en fonction du temps voir (annexe)

Les valeurs maximales de la répartition de la tension aux différents points des deux enroulements en fonction de leurs longueurs sont dans les différents tableaux suivants :

 $\$ Cas où les résistances des enroulements sont prises en considération :

Tableaux (V.4.1) et (V.4.2) avec figures(V.4.1) et(V.4.2) respectivement

Tableau V.4.1

	U ₃	U_5	U ₇	U ₉	U ₁₁	U ₁₃	U ₁₅
Umax(KV)	842,844	955,784	879,445	699,707	646,994	431,18	88,017
X/L	0,1428	0,2857	0,4285	0,5714	0,7142	0,8571	1



Fig. V.4.1

Tableau V.4.2

	U ₁₆	U ₁₉	U ₂₁	U ₂₃	U ₂₅	U ₂₇	U ₂₉
Umax(KV)	358,406	345,687	340,84	339,4 32	342,547	351,251	389,7 28
X/l	0,1428	0,2857	0,4285	0,571 4	0,7142	0,8571	1



♦Cas où les résistances des enroulements ne sont pas prises en considération : Tableaux (V.4.3) et (V.4.4) avec figures (V.4.3) et (V.4.4) respectivement

Tableau V.4.3

	U ₃	U_4	U_5	U ₆	U ₇	U ₈	U ₉
Umax(KV)	842,94	956,456	880,424	701,328	655,174	437,521	90,925
X/L	0,1428	0,2857	0,4285	0,5714	0,7142	0,8571	1



Fig. V.4.3

	U ₁₀	U ₁₂	U ₁₃	U ₁₄	U ₁₅	U ₁₆	U ₁₇
Umax(KV)	357,269	345,886	348,163	337,731	342,47	350,897	388,08
X/L	0,1428	0,2857	0,4285	0,5714	0,7142	0,8571	1







◆La basse tension est mise à la terre

La répartition des tensions aux différents points des enroulements de

transformateur en fonction du temps voir (annexe II)

Les valeurs maximales de la répartition de la tension aux différents points des deux enroulements en fonction de leurs longueurs sont dans les différents tableaux suivants :

♦ Cas où les résistances des enroulements sont prises en considération :

Tableaux (V.4.5) et (V.4.6) avec figures (V.4.5) et (V.4.6) respectivement

Tableau	V.4.	5
---------	------	---

	U ₃	U_5	U ₇	U ₉	U ₁₁	U ₁₃	U ₁₅	
Umax(KV)	838,002	946,462	919,529	846,422	681,623	398,252	91,162	
X/L	0,1428	0,2857	0,4285	0,5714	0,7142	0,8571	1	



Fig. V.4.5

Table	au V	/ .4.6

	U ₁₆	U ₁₉	U ₂₁	U ₂₃	U ₂₅	U ₂₇	U ₂₉
Umax(KV)	355,393	284,508	259,992	239,613	213,322	177,373	165,06
X/L	0,1428	0,2857	0,4285	0,5714	0,7142	0,8571	1



Fig. V.4.6



Tableau V.4.7

	U ₃	U ₄	U_5	U ₆	U ₇	U ₈	U ₉
Umax(KV)	837,961	948,317	922,567	849,919	685,15	400,559	95,36
X/L	0,1428	0,2857	0,4285	0,5714	0,7142	0,8571	1



Fig. V.4.7

```
Tableau .V.4.8
```

	U ₁₀	U ₁₂	U ₁₃	U ₁₄	U ₁₅	U ₁₆	U ₁₇
Umax(KV)	355,752	283,395	259,162	244,61	216,051	178,993	165,6
X/L	0,1428	0,2857	0,4285	0,5714	0,7142	0,8571	1



Fig. V.4.8



V.4.2.Interprétation et comparaison des résultats









La basse tension est mise à la terre







Enroulement BT

Une fois l'onde de surtension pénètre dans l'enroulement HT, elle se propage, la tension le long de ce dernier diminue. L'allure des courbes a une forme d'une moitié d'une parabole concave.

Si on compare enroulement par enroulement, on voit bien que la tension se repartie de la même manière dans presque tout les cas vus, la valeur crête de la surtension augmente seulement de 2.14% du coté BT et de 0.9% du coté HT.

V.4.3 .Calcul du coefficient d'amortissement

- > Cas du neutre mis à la terre
 - Avec résistances

$$K_{am} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{200}} = \frac{919.529}{54.628} = 16.83$$

• Sans résistances

$$K_{am} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{200}} = \frac{922.567}{39.728} = 23.22$$

- Cas du neutre isolé de la terre
 - Avec résistances

$$K_{am} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{400}} = \frac{358.406}{27.92} = 12.83$$

• Sans résistances

$$K_{am} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{400}} = \frac{357.269}{27.2} = 13.13$$



Fig. V.1.Schéma équivalent d'un transformateur sans les résistances soumis à une surtension

V.6.1.Mise en équation du circuit électrique

L'application des deux lois de KIRCHHOF au circuit précédent nous conduira aux deux systèmes d'équations suivants

V.6.1.1.pour les tensions

• Pour les tensions primaires

$$U_{1} - U_{2} - R_{1}i_{1} = +L_{1}\frac{di_{1}}{dt} + M_{12}\frac{di_{2}}{dt} + \dots + M_{16}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS11}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS16}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U_{2} - U_{3} - R_{1}i_{2} = L_{1}\frac{di_{2}}{dt} + M_{21}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{26}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS21}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS26}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U_{3} - U_{4} - R_{1}i_{3} = L_{1}\frac{di_{3}}{dt} + M_{31}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{36}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS31}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS36}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U_{4} - U_{5} - R_{1}i_{4} = L_{1}\frac{di_{4}}{dt} + M_{41}\frac{di_{2}}{dt} + \dots + M_{46}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS41}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS46}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U_{5} - U_{6} - R_{1}i_{5} = L_{1}\frac{di_{5}}{dt} + M_{51}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{56}\frac{di_{6}}{dt} + M_{PS51}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS56}\frac{di_{6}}{dt}$$

♦ Pour les tensions secondaires

$$U'_{1}-U'_{2}-R_{2}i'_{1} = L_{2}\frac{di'_{1}}{dt} + M_{S12}\frac{di'_{2}}{dt} + \dots + M_{S16}\frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS11}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS16}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U'_{2}-U'_{3}-R_{2}i'_{2} = L_{2}\frac{di'_{2}}{dt} + M_{S21}\frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S26}\frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS21}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS26}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U'_{3}-U'_{4}-R_{2}i'_{3} = L_{2}\frac{di'_{3}}{dt} + M_{S31}\frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S36}\frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS31}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS36}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U'_{4}-U'_{5}-R_{2}i'_{4} = L_{2}\frac{di'_{4}}{dt} + M_{S41}\frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S46}\frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS41}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS46}\frac{di_{6}}{dt}$$
$$U'_{5}-U'_{6}-R_{2}i'_{5} = L_{2}\frac{di'_{5}}{dt} + M_{S51}\frac{di'_{1}}{dt} + \dots + M_{S56}\frac{di'_{6}}{dt} + M_{PS51}\frac{di_{1}}{dt} + \dots + M_{PS56}\frac{di_{6}}{dt}$$

V.6.1.2.les courants primaires et secondaires

♦ Pour les courants primaires

$$i_{o} - i_{1} = (C_{1} + C_{12} + K_{1})\frac{dU_{1}}{dt} - K_{1}\frac{dU_{2}}{dt} - C_{12}\frac{dU'_{1}}{dt}$$
$$i_{1} - i_{2} = (C_{1} + C_{12} + 2K_{1})\frac{dU_{2}}{dt} - K_{1}\frac{dU_{3}}{dt} - C_{12}\frac{dU'_{2}}{dt} - K_{1}\frac{dU_{1}}{dt}$$

$$\begin{split} i_{2} - i_{3} &= (C_{1} + C_{12} + 2K_{1}) \frac{dU_{3}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{4}}{dt} - C_{12} \frac{dU'_{3}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{2}}{dt} \\ i_{3} - i_{4} &= (C_{1} + C_{12} + 2K_{1}) \frac{dU_{4}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{5}}{dt} - C_{12} \frac{dU'_{4}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{3}}{dt} \\ i_{4} - i_{5} &= (C_{1} + C_{12} + 2K_{1}) \frac{dU_{5}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{6}}{dt} - C_{12} \frac{dU'_{5}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{4}}{dt} \\ i_{5} - i_{6} &= (C_{1} + C_{12} + 2K_{1}) \frac{dU_{6}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{7}}{dt} - C_{12} \frac{dU'_{6}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{5}}{dt} \\ i_{6} - (\frac{1}{R_{NH}})U_{7} &= (C_{1} + C_{12} + 2K_{1}) \frac{dU_{7}}{dt} - K_{1} \frac{dU_{6}}{dt} - C_{12} \frac{dU'_{6}}{dt} - C_{12} \frac{dU'_{7}}{dt} \\ \end{split}$$

• Pour les courants secondaires

$$i'_{1} = (K_{2} + C_{12} + 2K_{1})\frac{dU'_{1}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{2}}{dt} - C_{12}\frac{dU_{1}}{dt}$$

$$i'_{1} - i'_{2} = (C_{1} + C_{12} + C_{2})\frac{dU'_{2}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{3}}{dt} - C_{12}\frac{dU_{2}}{dt} - K_{1}\frac{dU'_{1}}{dt}$$

$$i'_{2} - i'_{3} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2})\frac{dU'_{3}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{4}}{dt} - C_{12}\frac{dU_{3}}{dt} - K_{1}\frac{dU'_{2}}{dt}$$

$$i'_{3} - i'_{4} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2})\frac{dU'_{4}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{5}}{dt} - C_{12}\frac{dU_{4}}{dt} - K_{1}\frac{dU'_{3}}{dt}$$

$$i'_{4} - i'_{5} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2})\frac{dU'_{5}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{6}}{dt} - C_{12}\frac{dU_{5}}{dt} - K_{1}\frac{dU'_{4}}{dt}$$

$$i'_{5} - i'_{6} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2})\frac{dU'_{6}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{7}}{dt} - C_{12}\frac{dU_{6}}{dt} - K_{1}\frac{dU'_{5}}{dt}$$

$$i'_{6} - (1/R_{NB})U_{14} = (2K_{2} + C_{12} + C_{2})\frac{dU'_{7}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{7}}{dt} - K_{2}\frac{dU'_{6}}{dt} - C_{12}\frac{dU_{7}}{dt}$$

Avec :

$$i_0 = \frac{u_0 - U_1}{Z_H}$$

V.6.2.Ecriture matricielle des équations du circuit magnétique

♦ Pour les tensions

	$\begin{bmatrix} U_{1} \\ U_{2} \\ U_{3} \\ U_{4} \\ U_{5} \\ U_{6} \\ U_{1} \\ U_{2} \\ U_{2} \\ U_{2} \\ U_{3} \\ U_{4} \\ U_{5} \\ U_$	-U $-U$ $-U$ $-U$ $-U$ $-U$ $-U$ $-U$	$\begin{bmatrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & $		[∆ U]				[Ľ] ↓					
	$\begin{bmatrix} L_1 \end{bmatrix}$	M	I ₁₂	<i>M</i> ₁₃	M_{14}	M_{1}	15	M_{16}	M_{PS}	11 N	1 _{PS12}	M_{PS13}	M_{PS14}	M_{PS15}	M_{PS16}
	<i>M</i> ₂₁	1	-1	M_{23}	M_{24}	М	25	M_{26}	M_{PS}	21 N	1 _{PS22}	M_{PS23}	M_{PS24}	M_{PS25}	M_{PS26}
	<i>M</i> ₃₁	M	l ₃₂	L_1	<i>M</i> ₃₄	M	35	<i>M</i> ₃₆	M_{PS}	$_{31}$ M	l _{PS32}	M_{PS33}	M_{PS34}	M_{PS35}	M_{PS36}
	M_{41}	M	l ₄₂	M ₄₃	L_1	M	45	M_{46}	M_{PS}	$_{41} M$	l _{PS42}	M_{PS43}	M_{PS44}	M_{PS45}	M_{PS46}
	M_{51}	M	l ₅₂	М ₅₃ М	М ₅₄ М	L_1		М ₅₆ І	M _{PS5}	M	<i>PS</i> 52	М _{PS53}	M _{PS54}	М _{PS55} М	M _{PS56}
	M_{61}	M	62 1	M	M	M M	55	L_1 M	IVI PS6	M	PS62	M_{PS63}	M	M_{PS65}	M
	M	$\frac{1}{\lambda}$	<i>PS</i> 12	M_{PS13}	M_{PS14}	M	PS15	M_{PS16}	L_2 M		<i>S</i> 12	M_{S13}	M	M_{S15}	M_{S16}
	M_{PS2}	M	<i>PS22</i>	M_{PS23}	M_{PS2}	M	PS25	M_{PS26}	M_{S22}	2 I M.	-2	L _s	M_{S24}	M_{S25}	M_{S26}
	M_{PS3}	1 M	1 ps32	M_{PS33}	M_{PS34}	M	DS 45	M_{PS36}	M_{SA}	M	532	M_{SA2}	L_2	M 535	M 536
	M_{PS5}	1 M	PS42 1 PS52	M _{PS53}	M_{PS44}	M_1	PS45	M_{PS56}	$M_{s_{51}}$	M	542	M_{s53}	M_{554}^{2}	L_2	M_{556}
	M_{PS6}	1 M	1 _{PS62}	M_{PS63}	M_{PS6^2}	M	PS65	M_{PS66}	M_{S61}	M	S62	M_{s63}	M_{s64}	\tilde{M}_{S65}	L_2
[- ;]											[i ⁻	1		
	i_1 i_2	$\int R_1$	0	0	0 0	0	0	0	0 0	0	0	$\begin{bmatrix} i_1\\i_2\end{bmatrix}$			
	<i>i</i> ₃	0	R_1	0 P	0 0	0	0	0	0 0	0	0	<i>i</i> ₃			
	i_4	0	0	R_1	$R_{\rm c} = 0$	0	0	0	0 0	0	0	i_4			
	<i>i</i> ₅	0	0	0	$\begin{array}{c} 0 \\ R_1 \end{array}$	0	0	0	0 0	0	0	i_5			
$*\frac{d}{dt}$	$\begin{array}{c c} l_6 \\ i' \end{array}$	0	0	0	0 0	R_1	0	0	0 0	0	0	$ * _{i'}^{l_6}$			
ui	$\begin{vmatrix} i \\ i \end{vmatrix}_2$	0	0	0	0 0	0	R_2	0	0 0	0	0	$\begin{vmatrix} i_1\\i_2 \end{vmatrix}$			
	<i>i</i> ' ₃		0	0	0 0	0	0	R_2	$0 0 0 \mathbf{p} \mathbf{o}$	0	0	i'_3			
	<i>i</i> ' ₄	0	0	0	0 0	0	0	0	$n_2 = 0$ 0 R_1	0	0	<i>i</i> ' ₄			
	<i>i</i> ' ₅	0	0	0	0 0	0	0	0	0 0	<i>R</i> ,	0	<i>i</i> ' ₅			
	_i' ₆ _	0	0	0	0 0	0	0	0	0 0	0	R_2	$\begin{bmatrix} i'_6 \end{bmatrix}$]		
	Ţ						Ī	_				Ĩ			

ற்

[**R**]

[I]

♦ pour courants

			·	L				B]										
	[Δ]																
		7 .	$\neg \int C_A$	$-K_1$	0	0) 0	0	0	$-C_{12}$	0		0	0	0 0	0 0	ر ۱	
	-	- l ₁	-K	C_{1}	- K	, (0 0	0	0	0	$-C_{12}$	2	0	0	0 () ()	
		$-l_2$	0	$-K_1$	$C_{\scriptscriptstyle B}$	-K	1 0	0	0	0	0	-	$-C_{12}$	0	0 () ()	
		- i ₃ _ i	0	0	- K	$C_1 C_B$	$-K_1$	0	0	0	0		0	$-C_{12}$	0 0) ()	
	<i>i</i>	$-i_4$	0	0	0	- 1	$K_1 C_B$	$-K_1$	0	0	0		0	0	$-C_{12}$	0 0	Į į	
	<i>i</i> 4	-i.	0	0	0	0	$-K_1$	C_{B}	$-K_1$	0	0		0	0	0 -0	$C_{12} = 0$		
	-5	i,	0	0	0	0	0	$-K_1$	C_A	0	0	()	0	0 0	-C	12	
	-	- <i>i</i> ' ₁	= -C	$C_{12} = 0$	0	0 0	0	0	0	C_{c}	$-K_2$	1	0	0	0	0	0	
	<i>i</i> ' ₁	$-i'_2$	0	$-C_{12}$	0	0 0	0	0	0	$-K_2$	C_{D}	_	K_2	0	0	0	0	
	i'_2	$-i'_3$		0	- C	C ₁₂ C) ()	0	0	0	$-K_2$	2	C_D	- K	$_{2}$ 0	0	0	
	<i>i</i> ' ₃	$-i'_{4}$		0	0	-($\int_{12}^{12} 0$	0	0	0	0		$-K_2$	C_{L}	$K_{2} - K_{2}$	0 V	0	
	<i>i</i> ' ₄	$-i'_{5}$		0	0	0	-0	12 U		0	0		0	- I	$\mathbf{A}_2 \mathbf{C}_D$	$-\mathbf{K}_2$	U K	
	<i>i</i> ' ₅	$-i'_6$		0	0	0	0		-C	, 0	0		0	0	$\mathbf{J} = \mathbf{K}_2$	-K	$\begin{bmatrix} -\kappa_2 \\ C \end{bmatrix}$	
	ļi	6		Ũ	Ŭ	0	0	0	U	12 0	Ŭ		Ū	0		1 2	U _C	
															_	$\begin{bmatrix} U \end{bmatrix}$	[P]	1
	U_1		$1/Z_A$	0	0	0	0 0)	0	0	0	0	0	0	0	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$		
	U_2		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0	0		
	U_3		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0			
	U_4		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0			
	U_5		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0	0		
	U_6		0	0	0	0	0 () 1	$/R_{_{NH}}$	0	0	0	0	0	0			
$*^{d}$	U_7		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0			
dt	U'_1		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0	$\begin{bmatrix} O_7 \\ 0 \end{bmatrix}$		
	U'_2		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0	0		
	U'_3		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0			
	U'_4		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0			
	U'_{5}		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0	0		
	U'_{ϵ}		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	0	0		
	U'_{7}		0	0	0	0	0 ()	0	0	0	0	0	0	$1/R_{_{NR}}$		0	
	` ∱ _		-					↑								$\begin{bmatrix} U_{14} \end{bmatrix}$	⊥L_]
							Г											
	[U]						Ľ	C]								[U]	[D]]

Tel que :

 $p = 1/Z_A (\exp(-at) - \exp(-bt)))$ $C_A - C_1 + K_1 + C_{12}$ $C_B = C_1 + 2K_1 + C_{12}$ $C_C = C_2 + K_2 + C_{12}$



Protection des transformateurs contre les surtensions

VI.1.Introduction :

Le transformateur est l'un des éléments des réseaux électriques, qui atteint le plus haut degré de fiabilité. Cependant, si les contraintes en régime permanant peuvent être facilement prises en considération pour le dimensionnement, les contraintes en régime transitoire (électrique, électrodynamique ou thermique) susceptibles d'une grande variation relèvent du traitement statistique. Il ya adonc lieu de tenir compte de l'éventualité de défauts en exploitation, d'apprécier leurs conséquences et de mettre en œuvre les moyens de les pallier.

Les phénomènes externes au transformateur sont en premier lieu les surtensions résultant des phénomènes atmosphériques (foudre) transmises par les lignes aériennes. La présence de tronçons de câbles est susceptible, dans ce cas, de créer des problèmes de réflexion d'onde. Les manœuvres de couplage effectuées sur les réseaux peuvent produire des surtensions de moins grande raideur et de plus longue durée, éprouvant également les diélectriques solides et liquides.

Ces surtensions doivent être limitées en amplitude au-dessous du niveau de tenue du transformateur.

Les courts-circuits soumettant le transformateur à des courants de dix à vingt fois le courant nominal, ont des effets thermiques et électrodynamiques. Un transformateur est normalement dimensionné pour supporter dans sa vie quelques dizaines de courts-circuits pendant un temps ne dépassant pas deux secondes. Si la probabilité est plus grande, une construction spéciale s'impose. Le court-circuit doit être éliminé é d'autant plus vite que le courant est plus intense.

Les surcharges proviennent de circonstances prédéterminées ou fortuites. Dans le premier cas, l'altération thermique des isolants ne doit pas dépasser les valeurs normales, dans le second, il est possible d'admettre un certain délai, au prix d'un sacrifice sur la durée de vie d'un transformateur **[21]**.

Et pour assurer une protection performante contre ces perturbations et limiter leurs inconvénients, nous faisons appel à des dispositifs de protection adéquats, leur mise en œuvre nécessite l'élaboration réfléchie des niveaux cohérents d'isolement et de protection.

86

Nota : il est préférable que toutes les protections soient envisagées des la conception des installations ou des systèmes. Ceci pour éviter des modifications ultérieures difficiles à mettre en œuvre et de coût élevé.

V.I.2. Coordination de l'isolement :

La coordination de l'isolement permet de réaliser le meilleur compromis technico-économique dans la protection contre les surtensions pouvant apparaître sur les installations électriques, que ces surtensions aient pour origine le réseau ou la foudre.

Trois types de surtensions peuvent provoquer un claquage et donc un défaut d'isolement avec ou non la destruction du matériel :

- Surtensions à fréquence industrielle (50 à 500Hz)
- Surtensions de maneouvre.
- Surtensions atmosphériques (coup de foudre)

La coordination de l'isolement participe à l'obtention d'une plus grande disponibilité de l'énergie électrique, sa maîtrise nécessite :

- De connaître le niveau des surtensions pouvant exister sur le réseau.

- D'installer des dispositifs de protection tout à la fois adoptés aux composants du réseau (niveau d'isolement) et aux types de surtensions.

- De choisir les divers composants du réseau à partir de leurs niveaux de tenue aux surtensions qui doivent satisfaire aux contraintes précédemment définies [22].

VI.3.Protection contre les surtensions

La protection contre les surtensions est d'autant meilleure qu'un écoulement maximal des perturbations vers la terre est assuré, le plus prés possible des sources de perturbations.

La condition d'une protection efficace est donc d'assurer des impédances de terre minimales, en créant des maillages et des interconnexions de prises de terre chaque fois que possible.

Contre les courants de foudre et les élévations de potentiel qu'ils induisent, il y a lieu de distinguer deux grands types de protections qui permettent de supprimer ou limiter les surtensions, protection primaire et protection secondaire [22].

VI.3.1.protection primaire

Cette protection a pour but de limiter les impacts sur les ouvrages électriques en détournant la foudre vers des lieux d'écoulement précis. Il existe trois grands types de protection primaire :

a. Paratonnerres

Leur rôle est d'écouler au sol les charges électriques lors de formation de l'éclair entre sa pointe et le nuage et d'imposer le parcourt au courant électrique qui se forme à ce moment.

Deux types de paratonnerres sont apparus :

Paratonnerre à tige de FRANKLIN

C'est une simple tige de fer verticale et pointue, placée en partie haute de la structure à protéger afin qu'elle soit le point de capture en cas de chute de foudre, cette ligne reliée directement à la terre pour éviter tout risque de dispersion de courant de foudre dans les installations électriques.



Fig.VI.1 : principe du paratonnerre à tige de FRANKLIN

Plusieurs types de prises de terre existent : piquets, grilles ou pattes d'oies, ce dernier types est le plus efficace, car il procure une plus faible résistance et surtout une faible impédance.

Paratonnerre à dispositif d'amorçage :

Il est constitué d'une tige de cuivre surmonté d'une pointe effilée en laiton, d'un bloc excitateur contenant des sources ionisantes scellées, non contaminatrices, un cercle accélérateur solidaire à tige (potentiel nul) et trois prises de potentiel atmosphérique sont reliées à l'excitateur.

Il se distingue par une protection et une efficacité considérablement accrues. Il se base sur le principe de la diminution de retard à l'amorçage et de déclenchement prématuré de l'effet couronne ,ceci est dû à l'émission d'ions favorisant le processus d'amorçage.



Fig. (VI.2) : Schéma d'un paratonnerre à dispositif d'amorçage. [7]

b. Cage maillée ou de FARADAY :

Elle consiste en la réalisation d'un maillage fermé de conducteurs horizontaux et verticaux reliés au sol à réseau terre. Ce principe est utilisé pour les bâtiments et des structures très sensibles. Il consiste à multiplier les feuillards de descente à l'extérieur du bâtiment de façon symétrique. On ajoute des liaisons horizontales si le bâtiment est haut ; par exemple tous les deux étages figures (VI.3). Les conducteurs de descente sont reliés à la terre par des pattes d'oie. Le résultat consiste a obtenir des mailles de 15×15m ou 10×10m. L'effet résulte en une meilleure équipotentialité du bâtiment et la division des courants de foudre, réduisant ainsi fortement les champs et inductions électromagnétiques. La couverture de la zone à protéger est équivalente à une multiplicité de paratonnerres.



Fig.VI.3 : principe d'une cage maillée (cage de FARADAY) [7]

c. Câbles de gardes :

Ce sont des conducteurs parallèles aux câbles de phases, situés au dessus d'eux et reliés à la terre par l'intermédiaire des pylônes. Ils constituent une protection efficace contre le foudroiement des lignes aériennes, leur mission est de capter les coups de foudre dont l'intensité est supérieure au courant critique.



Fig .VI.4 : Coup de foudre sur le câble de garde. [7]

VI.3.2.Protection secondaire :

Elle est destinée à protéger, contre les surtensions conduites par les impacts indirects, les équipements des postes et /ou installations.

Son objectif est d'assurer que le niveau d'isolement aux chocs des différents éléments ne soit pas dépassé (coordination de l'isolement). Son principe est de créer un circuit de dérivation à la terre, permettant ainsi l'écoulement du courant de foudre, par amorçage ou conduction. Deux types d'appareils sont utilisés pour écrêter, limiter les surtensions transitoires de fortes amplitudes, l'éclateur et le parafoudre. Ils sont généralement dimensionnés pour intervenir sur les surtensions de foudre.

VI.3.2.1. L'éclateur :

Il est constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger, l'autre à la terre ; comportant un intervalle d'éclatement d'air libre entre ces deux électrodes, cet intervalle crée un point faible dans l'isolation du réseau en un point connu, évitant ainsi qu'un amorçage n'ait lieu en un autre point non déterminé du réseau où il pourrait avoir des surtensions graves.

91



Fig.VI.5 : éclateur MT avec tige anti-oiseau [7]

Le principal intérêt des éclateurs est leur faible prix. Ce sont des appareils très fiables, très faiblement réglables, de sorte que leurs caractéristiques peuvent être ajustées suivant leurs fonctions.

La limitation de la tension aux bornes est effectuée par l'amorçage de l'intervalle d'air.

Ce mode de fonctionnement présente un certain nombre d'inconvénients.

- Une assez grande dispersion de sa tension d'amorçage, en effet, elle dépend de nombreux paramètres tels que : Les conditions atmosphériques, l'état d'ionisation de l'air et des contraintes appliquées.
- Un amorçage sensible aux influences externes.
- Il crée un front d'onde coupée très raide pouvant détruire les enroulements des machines situées à proximité.
- Un courant de défaut à la terre apparait lors de l'intervention de l'éclateur. Ce courant « de suite », dont l'intensité dépend du mode de mise à la terre du neutre du réseau, ne peut généralement pas s'éteindre spontanément et impose l'intervention d'une protection en amont (disjoncteur à réenclenchement rapide ou disjoncteur shunt).
- Encore en place sur les réseaux, les éclateurs sont aujourd'hui de plus en plus remplacés par les parafoudres.

VI.3.2.2. Les parafoudres :

Les parafoudres sont des appareils semi conducteurs servant à protéger le transformateur ou autres installations électriques contre les surtensions imposées par la foudre ou par les manœuvres de commutation des lignes et des transformateurs.

La partie supérieure d'un parafoudre est reliée à la phase et la partie inférieure est connectée directement à la terre.

Moyennant un coût beaucoup plus élevé, les parafoudres permettent d'éviter la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur, et ils se distinguent par les faits suivants :

- Peu de dispersion de leur tension d'amorçage.
- Retard à la conduction quasiment nul.
- Une extinction spontanée de l'arc.
- Une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde de tension coupée.
- Une insensibilité (jusqu'à un certain point) aux influences externes.
 Différents modèles ont été conçus, seuls les types les plus répandus seront présentés dans la suite de ce chapitre.

a- Parafoudres conventionnels (parafoudres à résistances non linéaires et éclateurs) :

Ce type de parafoudre figure (VI.7) est constitué d'une ou plusieurs résistances non linéaires (varistances), associées en série avec un ou plusieurs éclateurs. L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation de ce type de parafoudre, la plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC), formée de disques moulés dont les faces parallèles sont métallisées et le pourtour recouvert d'un revêtement isolant destiné à éliminer les contournements.

Les éclateurs sont constitués de disques de laiton emboutis, empilés et séparés par de petites pièces isolantes en céramique.


Fig.VI.7 : Parafoudre à moyenne tension conventionnel.[7]

Fonctionnement :

Dans les conditions normales de service, les éclateurs ne sont pas conducteurs. Lorsque la tension figure (VI.8) dépasse un certain seuil (niveau d'amorçage), les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les résistances du parafoudre. Lorsque la tension augmente, les valeurs de ces résistances diminuent rapidement et limitent ainsi la surtension. Après le passage de l'onde de courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre décroît, mais la non linéarité des caractéristiques entraîne une décroissance plus rapide du courant. Une fois la tension revenue à la valeur normale du réseau, le courant se trouve donc, limité à une intensité assez faible (courant de suite) et peut-être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage à zéro. Ainsi, la surtension se trouve écrêtée, sans que soient provoqués des défauts permanents ni d'ondes coupées ; ceci résulte de la présence d'une résistance en série avec les éclateurs, en empêchant l'apparition d'un front raide lors de la chute de tension provoquée par l'amorçage du parafoudre.



Uo: niveau de la surtension sans parafoudre
Ua: tension d'amorçage
U : tension de service
Ur : tension résiduelle
Id : courant de décharge
Is : courant de suite

Fig.VI.8 : Schéma de fonctionnement d'un parafoudre [7]

• Paramètres caractéristiques :

Ce types de parafoudre est caractérisé par :

-la tension d'extinction, ou tension assignée, qui est la tension à fréquence industrielle (50 Hz) la plus élevée sous laquelle le parafoudre est capable de se désamorcer spontanément. Cette tension d'extinction doit être strictement supérieure à la plus forte surtension temporaire susceptible d'apparaître sur le réseau (le parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une surtension temporaire, l'énergie qu'il aurait à dissiper lui serait fatale).
- les tensions d'amorçage suivant les formes d'ondes (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre...), sont définies à partir des considérations

statistiques. On définit ainsi :

- La tension à 0% d'amorçage, qui est la tension la plus élevée ne produisant jamais l'amorçage.
- La tension à 100% d'amorçage qui est la tension la plus faible produisant souvent d'amorçage.

- La tension résiduelle au courant nominal de décharge, qui est la tension maximale qui apparaît aux bornes du parafoudre lorsqu'il est traversé par le courant nominal de décharge.

- Le niveau de protection, définit arbitrairement par la valeur maximale de ces trois tensions : la tension 100% d'amorçage au choc de foudre, la tension

d'amorçage sur le front d'onde et la tension résiduelle au courant nominal de décharge.

- le pouvoir d'écoulement de courant de choc, c'est-à-dire la capacité de dissipation d'énergie.

les performances, caractérisées par le rapport de la tension à 100% d'amorçage au choc de foudre (en valeur de crête) à la tension assignée (en valeur efficace).
Elles sont d'autant plus efficaces que le rapport est faible et il est de l'ordre de 3.2 pour les parafoudres MT et de 2.3 pour les parafoudres HT.

b. Parafoudre à OXYDE de ZINC (ZnO) :

• Fonctionnement :

Son principal intérêt sur le parafoudre conventionnel est la suppression de l'élément délicat : l'éclateur.

Il est constitué uniquement de résistances non linéaires empilées dans un tube en porcelaine pour presque toutes les tensions de service ou dans un tube synthétique (fibre de verre plus résine) pour les réseaux de distribution.

L'absence de l'éclateur fait que le parafoudre à ZnO est continuellement conducteur mais, sous la tension nominale du réseau protégé, avec un courant de fuite à la terre très faible (inférieur à 10mA). Leur principe de fonctionnement est très simple et repose sur la caractéristique non linéaire des résistances à ZnO. Cette non-linéarité est telle que la résistance passe de 1.5 M Ω à 15 Ω entre la tension de service et la tension au courant nominal de décharge.



Fig.VI.9 : Parafoudre à Oxyde de Zinc en enveloppe porcelaine [7]

Paramètres caractéristiques :

Un parafoudre à ZnO est caractérisé par :

- Sa tension maximale de service permanant : c'est la tension maximale qu'il est capable de supporter sans vieillissement excessif, en régime permanant pendant toute sa durée de vie.

- Sa tension assignée qui peut être liée par analogie avec les parafoudres à SiC, à la tenue aux surtensions temporaires. Mais elle n'est définie que par un essai.

- Son niveau de protection, défini arbitrairement comme la tension résiduelle du parafoudre soumis à un choc de courant donné.

- Son courant nominal de décharge.

- Sa capacité d'absorption d'énergie.

VI.4. Protection contre les surintensités et les surcharges :

La protection contre les surintensités et les surcharges nous permet d'assurer la protection des personnes, d'éviter la destruction du matériel et nous permet d'effectuer en même temps toute manœuvre indispensable au fonctionnement des équipements.

Le problème réside donc dans la possibilité de trouver si, par exemple, la surintensité détectée est due à une exploitation normale ou d'un court-circuit provenant d'un défaut de l'installation ou d'une fausse manœuvre.

Contre les surcharges, on utilise généralement les thermostats et les thermomètres. Les protections sont basées sur la détestation d'un échauffement anormal de l'appareil, qui peut être aussi dû à une ventilation insuffisante, une température ambiante trop élevée ou à la limite une défaillance interne. Les principaux dispositifs de protection sont **[24]**.

VI.4.1.Disjoncteurs :

Le disjoncteur est un appareil qui peut interrompre des courants importants, qu'il s'agisse du courant normal ou des courants de défaut. Il peut donc, être utilisé comme un gros interrupteur, commandé sur place par un bouton poussoir ou télécommandé. De plus, le disjoncteur ouvre un circuit automatiquement dés que le courant qui le traverse dépasse une valeur prédéterminée. Quand il sert à interrompre les forts courants de court circuit, il joue le même rôle qu'un fusible,

98

mais il a un fonctionnement plus sûr et on n'a pas besoin de le remplacer après chaque interruption.

Les disjoncteurs les plus répandus sont :

a. Les disjoncteurs à l'huile :

Ils se composent d'une cuve contenant de l'huile isolante, de bornes d'entrée en porcelaine à l'extrémité desquelles se trouvent les contactes fixes, et d'un contacte mobile actionné par le déplacement d'une tige isolante. Le courant d'une phase pénètre par l'une des bornes d'entrée, traverse le premier contact fixe et sort de la deuxième borne. Ces bornes s'appellent traversées.



Fig.VI.10 : Coupe schématique d'un disjoncteur à l'huile [7]

b.Les disjoncteurs à air comprimé :

Provoquent l'extinction de l'arc en soufflant l'air à vitesse supersonique entre les contacts qui se séparent (contact fixe et contact mobil). L'air est conservé dans les réservoirs à une pression de l'ordre 3Mpa, grâce à un compresseur situé dans le poste de transformation. Chaque phase est composée de trois modules de contacts raccordés en série. Le bruit lors de l'ouverture nécessite parfois des mesures d'insonorisation. Lorsque le disjoncteur se déclenche, la tige est poussée vers le haut, ce qui sépare les contacts fixes et les contacts mobiles. L'arc intense est immédiatement entraîné et éteint par un jet d'air sortant par l'orifice. La résistance sert à amortir les surtensions lors de l'ouverture du disjoncteur.



Fig.VI.11 : Vue de coupe d'un module de disjoncteur à air comprimé [7]

c. Les disjoncteurs à gaz SF6 :

Ils sont utilisés lorsqu'il faut réduire les dimensions du disjoncteur comme, par exemple, dans les postes intérieurs des centres villes. Ces disjoncteurs blindés ont une grande économie d'espace tout en étant silencieux que les disjoncteurs à air comprimé.

d. Les disjoncteurs à vide :

Leur principe de fonctionnement est différent de celui des autres disjoncteurs car l'absence d'un gaz évite le problème d'ionisation lors de l'ouverture des contacts. Ils peuvent interrompre un courant de défaut de 25kA sur un réseau de 60Hz.

VI.4.2. Interrupteur à cornes :

Les interrupteurs à cornes sont des appareils qui peuvent couper les courants capacitifs des lignes de transport ou les courants d'excitation des transformateurs, mais qui ne peuvent pas interrompre les courants de charge normaux. Ils comprennent une lame mobile et une mâchoire fixe montée sur des isolateurs et, en plus, deux cornes qui se séparent seulement après l'ouverture des contacts principaux. L'arc s'établit alors entre les cornes et s'élève, sous l'action combinée du courant d'air chaud et du champ magnétique qu'il produit, jusqu'à son extinction.

Ces cornes s'érodent graduellement, mais ils sont facilement remplaçables.

VI.4.3. Fusibles haute tension :

Les coupe-circuits sont des limiteurs de courant pour une intensité déterminée. La fusion se produit avant que le courant n'atteigne sa valeur maximale. Les effets thermiques et dynamiques des courts-circuits sont donc considérablement limités.

Toutefois, cette protection devra laisser passer la pointe d'intensité qui se manifeste à l'enclenchement du transformateur. La calibre du fusible sera donc nettement supérieur à l'intensité nominale de l'appareil.

VI.4.4. Le thermostat :

Placé sur un couvercle, le thermostat est composé d'un tube baignant dans la partie supérieur du d'électrique. Une tige métallisée insérée dans ce tube provoque par dilatation, pour une température préréglée, l'action sur un contact permettant ainsi une signalisation par manque ou émission de tension. Certains modèles à seuils autorisent une alarme pour une température t_1 , un déclenchement pour une valeur plus élevée t_2 .

VI.4.5. Le thermomètre :

Basé sur la dilatation d'un liquide enfermé dans un bulbe, le thermomètre peut être placé soit sur le couvercle, sur la cuve ou sur une paroi proche. Toute en donnant par lecture directe la température atteinte, certains types sont équipés de deux contacts réglables permettant d'actionner une alarme pour une température t_1 et de permettre un déclenchement pour une température supérieur t₂.



Conclusion Générale

Le comportement d'un réseau électrique lors de phénomène transitoire dépend du comportement de chacun de ses constituants. Ceux-ci, partant d'un état stable, vont influer sur le comportement transitoire de l'ensemble. Il importe donc de connaitre le comportement de chacun d'eux pour pouvoir déterminer le comportement de l'ensemble du réseau électrique considéré. Notamment le comportement du transformateur.

Dans un premier temps nous avons énuméré quelques méthodes existantes dans la literature qui traitent de la modélisation et l'étude des surtensions dans les transformateurs. En suite nous avons déterminé le schéma équivalent du poste, en dernier nous avons réalisé un programme de simulation numérique du comportement des enroulements du transformateur aux chocs.

L'étude considérée est réalisé en utilisant un logiciel de simulation (P-SPICE). Nous avons tiré les conclusions suivantes :

• L'influence du régime du neutre sur les enroulements des transformateurs réduit au fur et a mesure l'amplitude de l'onde impulsive en s'approchant de ce dernier.

• L'existence des liaisons capacitives entre les enroulements (BT) et (HT) fait apparaître une répartition de tension dans cet enroulement, en plus de celle qui existe toujours dans l'enroulement HT, la tension de l'enroulement BT est déterminée par l'influence électromagnétique du primaire.

• La mise a la terre de l'enroulement primaire fait diminuer la surtension transmise tout en s'approchant du neutre de l'enroulement secondaire.

Donc nous pouvons conclure que le passage est beaucoup plus important avec le neutre isolé de la terre.

Nous avons aussi effectué une analyse sur l'influence des résistances des enroulements du transformateur sur la répartition de la surtension qui traversent ces derniers, la valeur crête de la surtension n'augmente que de 2.14% du coté BT et de 0.9% du coté HT.

Ce qui nous mène a dire que les résistances n'influent pas virement sur la répartition des surtensions le long des enroulements du transformateur, et ceci peut être expliqué par le fait que les valeurs des résistances sont négligeables devant celles des sections des conducteurs.

Conclusion Générale

Nous espérons que ce présent travail puisse être un outil de base et une analyse complémentaire pour les futures études concernant la propagation des surtensions dans les transformateurs.

Bibliographie

[1]: FRANCIS MILSANT << Transformateurs et réseaux électriques >> BERITI.EDITION1933.

[2] : Encyclopédie des sciences industrielles Electricité Electronique, Applications Quillet Paris 1973.

[3]: M.KOSTENKO et L.PIOTROVSTKI << Machines électriques >>, Tome I? MIR Moscou, 1976.

[4]: A.PICHON << Calcul et construction des machines électriques / Transformateur université de' paris, division Electricité et Electroniques 1965.

[5]: SONELGAZ << Centre de formation de Blida >> transformateur de puissance.

[6] : BERNARD HOCHART << Transformateur de puissance >>,2eme Edition (Tec et Doc.

LA VOISIER) 1988.

[7]: SCHNEIDER Electrique << La protection des installations contre la foudre >> Novembre 2000.

[8] : ALAIN SCHMITH, THIEVY DEFLANDE << cahiers de l'Ingénieur >> EDF .Origine et effets des surtensions. Mars 1994.

[9]: N.CHABANE; L'influence de la tension de service sur les surtensions dans les enroulements de transformateurs fonctionnant dans les conditions réelles d'exploitation : Mémoire d'ingénieur ; U.M.M.T.O 2001.

[10] : PAUL HOCHARD << Le transformateur de puissance >>

[11]: R. 5.MUSIL, G, PREININGER, E. WENGER << the résonnance effect of oscillating system overvoltages on transformer windings >> .vol. PAS -102, n°10,October 1982,PP 3703-3711

[12]: NEMA << Méthode of measurement of radio Influence voltage (R .I. V) of hight voltage >> Pub n°.107.A ,1964

[13] : H.W .DOMMEL<<EMTP theory book>>, BPA ,1986 l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques >> n°1, 1987, PP, 25-33

[15] : P.G Me LAREN, H. ORAEE,<<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.

[16]: 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. [17]: J. AVILA ROSALES, E, L, AVARADO. <<a non Lineas Frequency dépendent Transformateur Model for Electromagnétique transient studies. Studies. Power systems, IEEE, Vol. pas-101,n°11,Novembre 1982, PP 4228

[18]: HELLER. B, VEVERKAA << les processus impulsionnels dans les machines électriques >>Revue ENERGUIYA, Moscou, 1973.

[19] : LOKHANINEA. K <<détermination des inductances des transformateurs HT >>,

[20] : LOKHANINE A. K. POGOSTINE V. I << calcul des capacités des enroulements de transformateurs HT >> Revue ELECTROECHINICA. LVOV, 1973

[21] : cahier Technique Merlin Gerin n° 168, Nov 2000

[22] : cahier Technique Merlin Gerin nº 151, Nov 2000

[Leo93] :F.Leon, A.Semlyen, <<Time domain modelling of current effects for transformer transients. >>, IEEE Transaction on power delivery Vol : 8, No : 1, January 1993.

[Leo 95]: F.Leon, A.Semlyen, <<Complete transformer model for électromagnétique transients. >>, IEEE Transaction on power delivery Vol : 9, No : 1, January 1995.

[Chim95] :S.Chimklai, R.Marti, <<Simplifed three-phase transformer model for électromagnétique transients. >>, IEEE Transaction on power delivery Vol : 3, No : 3, July 1995.

[Mor 93] : A. Morched, L. Marti, J. Ottevangers, <<A high frequency transformer model for EMTP. >>, IEEE Transaction on power delivery Vol : 8, No : 3, July 1993.

[Gus98]: B.Gustaven, A. Semlyen. << Application of vector fitting to state equation representation of transformer for simulation electromagnetique transients. >>, IEEE Transaction on power delivery Vol: 13, No: 3 1, January 1998.

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

[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, No: 4 1, Octobre 2002.

[Der 98] : Nizar.Derbel, <<Elaboration et mise en œuvre d'un modèle HF du transformateur a trois colonnes en vue de la simulation des surtensions transitoires transmises aux lignes BT. >> école doctorale de Lyon, année 1998.