

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etudes de Master Académique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **RESEAUX ELECTRIQUES**

Présenté par

Hakim AMMI

Noureddine FEKIK

Thème

Amélioration du schéma de protection des enroulements des transformateurs contre les surtensions atmosphériques

Mémoire soutenu publiquement le 25 juin 2014 devant le jury composé de :

M Mustapha MOUDOUD

MCB, UMMTO, Président

M Nahid MUFIZADA

Professeur, UMMTO, Rapporteur

M Ali FETTAT

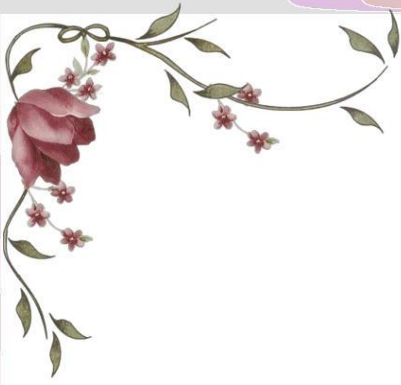
Ingénieur Maintenanancier, CEVITAL, Co-promoteur

M Belkacem MOULA

MAB, UMMTO, Examineur

M Hakim DJOUDI

MAA, UMMTO, Examineur



Remerciements

Nous remercions en premier lieu dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements accompagnés de toute notre profonde gratitude à notre promoteur Monsieur MUFIDZADA Nahid, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, de nous avoir proposé ce sujet, pour sa disponibilité permanente, pour son aide ainsi que pour les conseils précieux qu'il n'a cessés de nous prodiguer qui ont contribué énormément à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à remercier et exprimer notre profonde gratitude à nos Co-promoteur Monsieur FATTET ALI, ingénieur d'état en électrotechnique pour son aide et ses conseils.

Nous remercions nos chères parents qui nos encouragées et sentenues pour aller au bout de notre cursus.

En fin, nous adressons nos vifs remerciements au président de jury qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.



Dédicace

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- + Ma très chère mère qui m'a toujours soutenu*
- + La mémoire de mon père*
- + Mes frères Djamel, Samir, Yacine*
- + Mes sœurs Tassadite, Nadia*
- + Mes petits neveu Ali et Ramadhan*
- + Mes nièces Kenza, Lyliá et Yasmine*
- + Ma tante Hammama*
- + Mes chers amis YAZID, AREZKI, SOFIANE, AISSA, DJAMEL*
- + Toute la famille FEKIK*
- + Toute personne qui pense à moi de proche ou de loin*
- + TOUS les étudiants et les enseignants de département électrotechnique*

NOUREDDINE

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs

I-transformateur.....	3
I-1 Définition.....	3
I-2-Domaine d'utilisation de transformateur.....	3
I-3-Principe de fonctionnement d'un transformateur.....	3
I-4-Principaux éléments de transformateur	4
I-5-Modes de couplage des transformateurs triphasés	6
I-6-Choix de couplage.....	6
I-7-Indice horaire et le rapport de transformation	7
I-8-Détermination des indices horaires pour les couplages normalisés	8
I-9- Grandeurs nominales de transformateur	9
I-10-Défauts dans les transformateurs.....	10

Chapitre II : Protection des transformateurs contre les surtensions atmosphériques

Introduction	11
II-1-Surtension	11
II-1-1-Définition.....	11
II-1-2-Origines des surtensions	11
II-1-3-Répartition des surtensions atmosphériques le long de l'enroulement d'un transformateur	19
II-1-4- Schéma équivalent d'un transformateur soumis aux surtensions.....	20
II-1-5- Répartition initiale de la tension le long de l'enroulement d'un Transformateur	22
II-1-6- Gradient de la tension	25

II-1-7- Répartition finale de la tension	26
II-1-8- Phénomène transitoire de la tension	26
II-2-Protection	29
II-2-1-Parafoudres	29
II-2-2- Protection des postes	36
II-2-3-Le rôle de fil de garde et le parafoudre à expulsion dans la protection des Postes.	37
II-2-4-Particularité des protections des équipements des postes et coordination de leurs Isolations	38
II-2-5-Protection des enroulements ouverts des transformateurs.....	39

Chapitre III : Modélisation et calcul des paramètres de l'enroulement du transformateur

Introduction	40
III-1-Détermination des paramètres du transformateur	40
III-1-1-Caractéristiques électriques du transformateur	40
III-1-2-Caractéristiques géométriques.....	40
III-1-3-Relation empiriques pour le calcul des paramètres	41
III-1-4-Calcul numérique des paramètres du transformateur	45
III-2-Modélisation des enroulements des transformateurs.....	51
III-2-1-Equations électriques de l'enroulement	51
III-2-2-Mise en équation du circuit électrique.....	53
III-2-3-Ecriture matricielle des équations du circuit électrique	56

Chapitre IV : Détermination des régimes de neutre de l'enroulement de transformateur lors d'application des surtensions

Introduction	59
IV -1- Différents régimes de neutre	59
IV-1-1- Neutre est directement mis à la terre.....	59

IV-1-2- Neutre est complètement isolé de la terre	61
IV-1-3- Neutre est mis à la terre à travers une impédance	62
IV-2-Application des régimes de neutre	64

Chapitre V : Détermination et analyse des surtensions dans les transformateurs

Introduction	65
V-1- Schéma de la simulation	65
V-2- Résultats de simulation	67
V-3- Les courbes de simulation	67
V-4- Analyses des résultats	70
V-5- Le gradient de tension.....	73
V-6- Les courbes de gradient obtenues	74
V-7- Interprétation des courbes.....	74

Liste des figures

Liste des figures

Figure I-1 : représentes symboles de transformateur	03
Figure I-2 : schéma de principe d'un transformateur	04
Figure I-3-a :Couplage Yy0	08
Figure I-3-b :Diagramme vectoriel	08
Figure I-4-a : Couplage Dy11	08
Figure I-4-b : Diagramme vectoriel.....	08
Figure I-5-a : Couplage Yz.....	09
Figure I-5-b : Diagramme vectoriel.....	09
Figure II-1 : représente la commutation de courant inductif	12
Figure II-2 : Formes des ondes normalisées.....	13
Figure II-3 : coup de foudre direct	15
Figure II-4 : coup de foudre indirect	16
Figure II-5 : par induction électromagnétique.....	17
Figure II-6 : Montée en potentiel de la prise de terre	17
Figure II-7 : Par induction électrostatique.....	18
Figure II-8 : Formes des ondes de foudre	19
Figure II-9 : schéma équivalent d'un enroulement de transformateur soumis aux surtensions	20
Figure II-10: Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition Initiale	22
Figure II-11 : Répartition initiale de la tension le long de l'enroulement de transformateur Pour C=0 et K=0	24
Figure II-12: Répartition finale de la tension le long de l'enroulement.....	26
Figure II-13 : Limites des oscillations de L'onde de surtension dans l'enroulement	27
Figure II-14 : phénomène transitoire dans l'enroulement	28

Figure II-15 : phénomène transitoire dans l'enroulement	28
Figure II-16: Structure d'un parafoudre à oxyde de zinc en enveloppe porcelaine	31
Figure II-17 : Les résistances à ZnO sont en générale de forme cylindrique	31
Figure II-18 : protection de transformateur par un parafoudre à Oxyde de Zinc	32
Figure II-19 : Courbe caractéristique courant-tension d'une varistance à oxyde métallique	32
Figure II-20 : Parafoudre à résistance variable et l'éclateur	34
Figure II-21 : Schéma de fonctionnement.....	35
Figure II-22 : Coup de foudre sur la ligne.....	35
Figure II-23 : Renforcement de la protection par le fil de garde.....	37
Figure II-24 : Rôle de fil de garde et le parafoudre à expulsion.....	38
Figure (II-22) : distance de parafoudre.....	39
Figure III-1-a : disposition schématique des spires	42
Figure III-1-b : Représentation de la fonction $\frac{M_{ij}}{L} = f\left(\frac{a}{b}\right)$	44
Figure III-2: Représentation des distance a et b sur la disposition schématique des Eléments de l'enroulement.....	47
Figure III-3 : Répartition initiale de la tension fournie par le constructeur	50
Figure III-4 : Schéma équivalent de la ligne à élément localisé lors d'une surtension selon PETERSON	53
Figure III-6: Schéma équivalent de l'enroulement soumis à des surtensions	57
Figure IV-1 : Neutre mis à la terre	59
Figure IV-2 : diagramme vectoriel.....	60
Figure IV-3 : Neutre isolé de la terre	61
Figure IV-4 : Diagramme vectoriel	62
Figure IV-5 : Neutre mis à la terre à travers une impédance	62
Figure IV-6 : Diagramme vectoriel	63
Figure V-a : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur soumis à des surtensions	65

Figure V-b : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur avec thyristor soumis à des surtensions	63
Figure V-1 : la répartition des surtensions U_0, U_p, U_1	67
Figure V-2: Les courbes des surtensions (U_3, U_7, U_{10}) sur les éléments (3, 7, 10) de L'enroulement pour $R_n = 0 \Omega$	68
Figure V-3 : les courbes des U_3, U_7, U_{10} sur les éléments (3, 7, 10) de l'enroulement Pour $R_n = 4390$	68
Figure V-4 : Les Courbes des surtensions U_3, U_7, U_{10} sur les éléments (3,7, 10) Pour $R_n = \text{infini}$	69
Figure V-5 : La courbe de la surtension U_{11} sur l'élément 11 avec thyristor pour $t = 1 \mu s$	69
Figure V-6 : La courbe de la surtension U_{11} sur l'élément 11 avec un thyristor pour $t = 5 \mu s$	70
Figure V-7 : Répartition du gradient de tension le long de l'enroulement du transformateur	74

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau III-1 : Représente les valeurs de M_{ij}	47
Tableau III-2: Représente la répartition initiale de la tension	49
Tableau III-3 : Détermination de α	49
Tableau V-A : La répartition des tensions le long de l'enroulement en dépendance du régime de neutre	64
Tableau V-B : La répartition des gradients de tension le long de l'enroulement.....	70

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique présente un besoin fondamentale dans plusieurs secteurs de l'activité humaine, que ce soit dans notre vie domestique ou dans l'industrie où elle joue un rôle très important. Elle est produite dans des centrales électriques, est transportée à des zones de consommation, ce qui crée des réseaux électriques.

Pour assurer une meilleure qualité de l'énergie, est de réduire le coût des installations, il est impératif d'élever la tension dès que la puissance à transporter devient importante. La conversion de cette énergie en haute ou en basse tension s'effectue à l'aide des convertisseurs statiques (transformateur).

Il existe plusieurs types de transformateur, mais dans notre étude, on s'intéressera aux transformateurs de puissance qui sont d'une importance capitale dans le transport d'énergie électrique, leur coût d'achat, de transport et d'installation est très élevé. Ils sont soumis quotidiennement à des surtensions, soit d'origine interne (manœuvre) ou externe (foudre) ; celles-ci peuvent occasionner des dégâts considérables à la suite des quels, se produit une interruption de la distribution d'énergie électrique et ainsi des pertes financières.

La foudre qui atteint un fil de ligne, produit des ondes de tension dans le temps au point d'impact. Ces ondes se propagent de part et d'autre part du point d'impact, avec une vitesse voisine de celle de la lumière et une certaine déformation.

Lorsque l'onde de surtension arrive en un point de raccordement d'éléments du réseau, tel que le point de raccordement d'un transformateur avec la ligne aérienne par exemple, son amplitude augmente et continue à se propager dans l'enroulement du transformateur. Cette situation peut provoquer des amorçages dans le transformateur, éventuellement des indices et même des accidents de personnes se trouvant au poste.

Afin d'éviter les dangers dus aux surtensions atmosphériques, l'appareil principale de la protection des équipements de postes contre ces surtensions venant par les lignes est le parafoudre. Les tensions résiduelles, et les tensions d'amorçages des parafoudres sont prises à 10% inférieur de la tension de décharge de l'élément protégé. Les parafoudres sont installés sur les jeux de barres des postes, et à côté des transformateurs de grandes puissances, par ce que ces derniers sont les éléments importants des postes électriques, pour limiter les paramètres des ondes de surtension à proximité des postes (3 – 4km) sont protégés par les files de garde pour renforcer cette protection.

Toutes ces formes des protections traditionnelles sont importantes. Le renforcement du schéma de protection des transformateurs peut être obtenu, par le choix correspondant du régime de neutre de l'enroulement. Le présent projet est consacré à l'étude de la protection des transformateurs par le changement du régime de neutre. Cette étude est réalisée à l'aide de la modélisation mathématique.

La mise en équations, pour déterminer les surtensions en différents points le long de l'enroulement se fera sur un schéma équivalent où l'enroulement est à constantes réparties. Ce dernier est subdivisé en 10 éléments identiques (groupes de spires, galettes...) en série, faisant intervenir leur résistance, leur inductance, les capacités de fuites transversales et longitudinales et les mutuelles inductances entre ces éléments.

Notre travail s'articule autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre nous donne un aperçu général sur les transformateurs de puissance (principe de fonctionnement, caractéristiques, modes de couplage...etc.).

Le deuxième chapitre est consacré sur la protection des transformateurs contre les surtensions atmosphériques, avec les différents types de parafoudre (parafoudre à oxyde de zinc, à résistance variable est éclateur, et le parafoudre à expulsion).

Dans le troisième chapitre on représente la modélisation de l'enroulement de transformateur et la détermination des paramètres de l'enroulement.

Le quatrième chapitre portera sur la détermination du régime de neutre lors d'applications des surtensions.

Le dernier chapitre consiste à la détermination et analyse des surtensions dans les transformateurs lors du schéma usuel et du nouveau schéma de protection.

Nous adopterons des schémas équivalents simplifiés de l'enroulement du transformateur, d'après lesquels, nous établirons des équations différentielles, et donc le phénomène physique sera traduit en équations mathématiques délicates, résolues par des méthodes numériques.

Pour notre part nous avons choisi le logiciel Orcade 16.0 pour sa rapidité et sa précision.

Chapitre I

Généralités sur les transformateurs

I-Transformateur

I-1-Définition

Le transformateur est un appareil électromagnétique statique, destiné à transformer un courant alternatif primaire en un autre courant alternatif secondaire de même fréquence, ayant dans le cas général d'autres caractéristiques, en particulier, une autre tension et un autre courant. [1]



Figure I-1 : représentés symboles de transformateur

I-2-Domaine d'utilisation de transformateur

On utilise ce transformateur dans les cas suivants :

- Liaison entre les alternateurs de grande puissance des centrales électriques et les réseaux de haute tension sur lesquels ils débitent;
- Alimentation des services auxiliaires des centrales électriques;
- Liaison entre les réseaux de haute, moyenne et basse tension (HT, MT, BT) ;
- Dans les postes de distribution pour abaisser la tension afin de connecter des charges. [1]

I-3-Principe de fonctionnement d'un transformateur

Le fonctionnement d'un transformateur est basé sur l'interaction électromagnétique de deux ou de plusieurs circuits immobiles l'un par rapport à l'autre .Si aux bornes de l'un des enroulements on applique une tension d'un réseau de courant alternatif, sous l'action de flux magnétique reliant les deux enroulements, dans le secondaire enroulement apparaîtra une force électromotrice F.E.M alternatif et le secondaire circuit sera parcouru par un courant qui alimentera les récepteurs d'énergie électrique connectés aux bornes de l'enroulement secondaire . De cette façon se réalise le transfert d'énergie de courant alternatif du circuit primaire (réseau primaire) au circuit secondaire (réseau secondaire). [1]

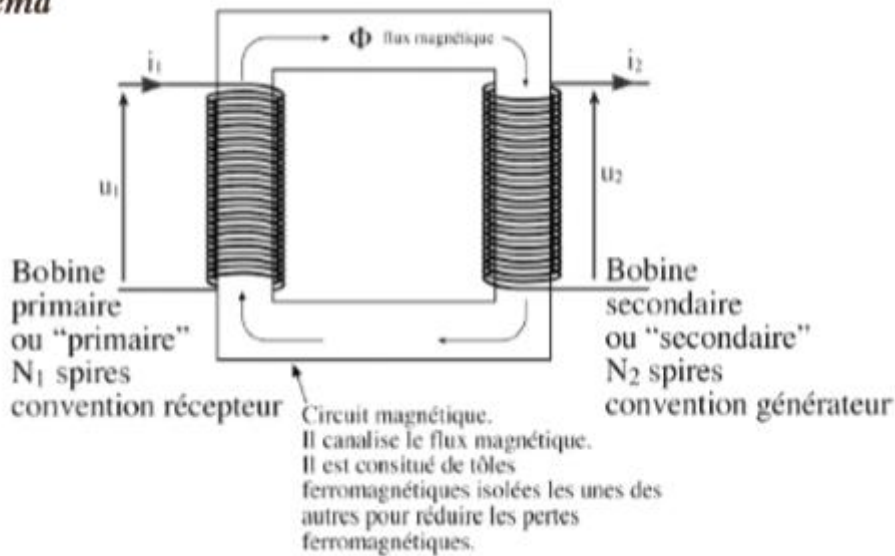
Schéma

Figure I-2 : schéma de principe d'un transformateur

I-4-Principaux éléments des transformateurs

Un transformateur se compose des parties principales suivantes :[1]

- a) Le noyau ;
- b) L'enroulement ;
- c) Cuve d'un transformateur dans l'huile ;
- d) Couvercle de cuve et sortie.

a)-Noyau du transformateur

On appelle le noyau d'un transformateur l'ensemble formant le circuit magnétique avec tous les éléments faisant partie de cet ensemble. Suivant le noyau on distingue : [1]

- a) Les transformateurs à colonnes dans lesquels les enroulements entourent les colonnes du noyau ;
- b) Les transformateurs cuirassés dans lesquels les enroulements sont entourés par le noyau .

b)-Enroulements des transformateurs

Un enroulement de transformateur est l'ensemble des spires, formant un circuit associé à l'une des tensions, pour lesquelles le transformateur a été établi. En d'autre terme, il s'agit d'une bobine électrique, placée autour du noyau magnétique d'un transformateur.

Les enroulements des transformateurs doivent satisfaire à plusieurs exigences sont :

1) l'enroulement doit être économique en ce qui concerne les dépenses ;

Initiales en tenant compte du prix du cuivre et le rendement du transformateur ;

2) le régime thermique de l'enroulement doit correspondre aux exigences de la norme, car une température trop élevée réduit nettement la vie du Transformateur ;

3) l'enroulement doit résister aux contraintes naissant lors d'un court-circuit brusque ;

4) l'enroulement doit présenter la rigidité diélectrique nécessaire pour supporter les surtensions. [1]

c)- Cuve d'un transformateur dans l'huile

A l'heure actuelle les plus répandus sont les transformateurs dans l'huile dans lesquels le noyau et les enroulements sont placés dans une cuve remplie d'huile. La construction de la cuve correspond au calcul thermique du transformateur, généralement la cuve d'un transformateur de puissance est de forme ovale, est installée sur le chariot avec galets prévus pour supporter le poids totale de transformateur, il existe différentes formes de cuves selon la puissance de transformateur. [1]

- les transformateurs de très faible puissance environ 30 KVA ont des cuve lisses les plus simples ;

- les transformateurs de puissance plus élevée jusqu'à 3000 KVA ;

- les transformateurs jusqu'à 10 000 KVA ont des réfrigérants radiateurs muni cent par les ventilateurs pour renforcer le refroidissement adaptés aux parois de la cuve ;

- les transformateurs jusqu'à 10 000 KVA et plus.

d)- Couvercle de cuve et sortie

Le couvercle de la cuve est un élément important de cette dernière sur le couvercle sont placées plusieurs pièces dont les plus importantes sont : [1]

- Les isolateurs de sortie des enroulements HT et BT ;
- Le conservateur d'huile dans les transformateurs de 100 kV et plus ;
- Le tube d'évacuation des gaz pour transformateurs.

e)-Huile de transformateur

Afin d'améliorer l'isolement et le refroidissement de la partie active du transformateur cette dernière est placée dans la cuve remplie d'huile minérale pour transformateur. [1]

I-5-Modes de Couplage des transformateurs triphasés

- Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) soit en triangle(D).
- Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de trois manières différentes : étoile (y), triangle(d) et zigzag(z). [4]

- **Connexion en étoile** : Pour connecter un enroulement triphasé en étoile on réunit leurs extrémités en un point neutre commun.

- **Connexion en triangle** : En connectant l'enroulement en triangle, le commencement de l'enroulement de phase suivant est réuni à la fin de l'enroulement précédent.

- **Connexion en zigzag** : Ce mode de connexion consiste à diviser chaque enroulement de phase, coté basse tension, en deux parties qui le plus souvent sont égales, et à les placer sur les différents noyaux. [1]

On obtient ainsi six (6) couplages possibles entre primaire et secondaire : [4]

Y-y : étoile-étoile

Y-d : étoile-triangle

Y-z : étoile-zigzag

D-y : triangle-étoile

D-d : triangle-triangle

D-z: triangle-zigzag

I-6- Choix du couplage

Le choix de couplage s'effectue à partir de nombreux critères. [2]

- Dimensionnement des enroulements

On a toujours intérêt de choisir un couplage étoile aux très hautes tensions et un couplage triangle de faible tension. En effet, avec le couplage étoile, chaque enroulement supporte la tension $V = U/\sqrt{3}$, tandis que, avec le couplage triangle l'intensité par enroulement est $J = I/\sqrt{3}$.

- Fonctionnement déséquilibré :

- Aux faibles déséquilibres; le primaire et secondaire seront couplés en étoile avec conducteur de neutre.
- Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire en zigzag.
- Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilisera un montage triangle étoile pour économiser du cuivre au secondaire.

➤ Couplages normalisés

Trois couplage sont particulièrement utilisés en pratique ce sont les Yy, Dy, Yz.

I-7- Indice horaire et le rapport de transformation

a- Indice horaire

L'indice horaire (I) est un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduit le déphasage θ entre deux tensions primaire et secondaire homologues ;

En pratique ce déphasage θ étant toujours un multiple de 30° .

Où : θ le retard d'une tension coté basse tension sur son homologue coté haute tension. [3]

$$\text{L'indice horaire } I : I = \frac{\theta}{30^\circ} \quad \text{avec : } 0 \leq I \leq 11$$

b-Le rapport de transformation

$$\text{Par définition : } K_{tr} = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$$

Ce rapport dépend non seulement du nombre de spires primaires N_1 et secondaires N_2 , mais aussi du couplage au primaire et au secondaire.[3]

I-8-Détermination des indices horaires pour les couplages normalisée

- pour le coulage étoile-étoile (Yy) :

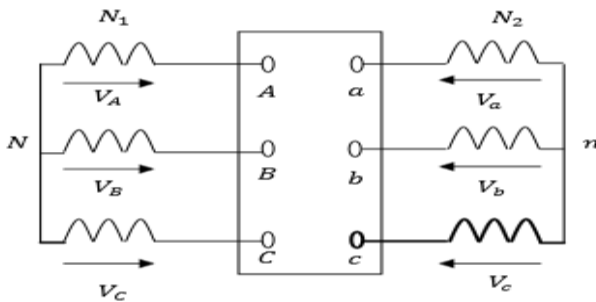


Figure I-3-a : Couplage Yy0

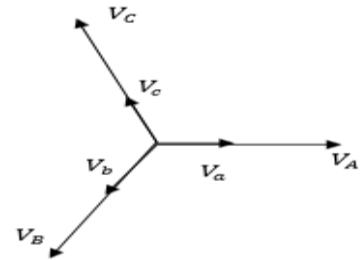


Figure I-3-b: Diagramme vectoriel

Les deux systèmes des tensions simples étant en phase, ils sont orientés dans le meme sens, c'est-à-dire $\theta = 0^\circ$ et $I = 0$, ainsi on peut écrire ce couplage sous le symbole normalisé Yy0. Le rapport de transformation est $K_{tr} = \frac{N_1}{N_2}$. [4]

- Pour le couplage triangle –étoile (Dy) :

La tension aux bornes d'une phase du primaire est une tension composée, alors que la tension aux bornes de la phase correspondante du secondaire est une tension simple. Le rapport de transformation est $:K_{tr} = \sqrt{3} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$ le déphasage θ entre les tensions du primaire et le secondaire est de $(-\pi/6)$, ce qui veut dire l'indice horaire est $I = 11$, ainsi en peut écrire ce couplage sous le symbole normalisé Dy11.[4]

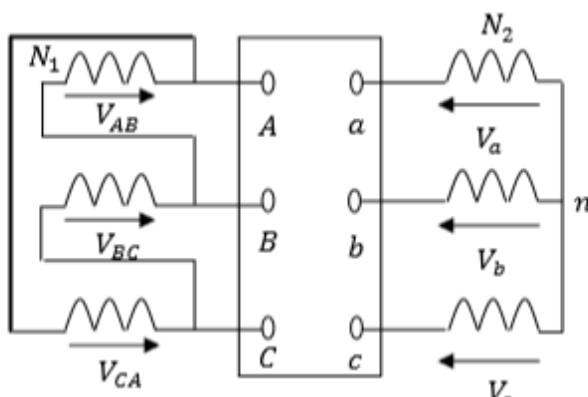


Figure I-4-a : Couplage Dy11

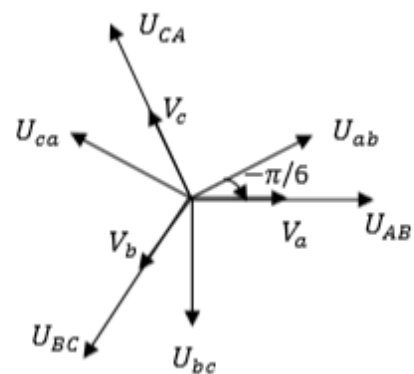


Figure I-4-b : Diagramme vectoriel

- Pour le couplage étoile-zigzag (Yz) :

La tension aux bornes d'une phase du primaire est une tension simple, alors qu'une tension aux bornes d'une phase secondaire est la somme des deux tensions aux de demi bobines ce qui permet de construire le diagramme vectorielle. Le rapport de transformation est $K_{tr} = \sqrt{3} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$. Le déphasage θ entre les tensions est de $(-\pi/6)$ ce qui veut l'indice horaire est $I = 11$, ainsi en peut écrire ce couplage sous le symbole normalisé Dy11.[4]

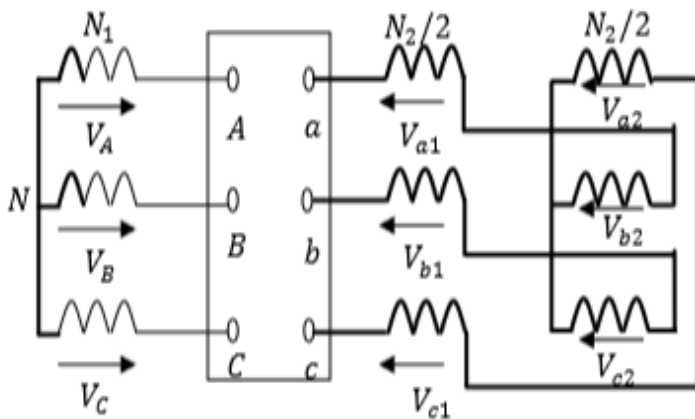


Figure I-5-a : Couplage Yz

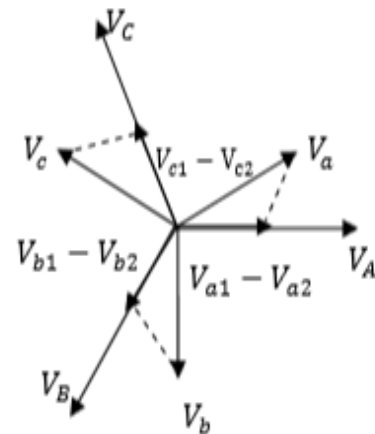


Figure I-5-b : Diagramme vectoriel

I-9-Grandeurs nominales de transformateur

Le transformateur est caractérisé par :

- La puissance apparente S (KVA) ;
 - La tension primaire U_1 (KV) ;
 - La tension secondaire U_2 (KV) ;
 - La fréquence f ;
 - Les couplages des enroulements ;
 - Le mode de refroidissement ;
 - Pertes de puissance en régime à vide (ΔP_0) ;
 - Pertes de puissance en régime à court-circuit (ΔP_{cc}) ;
 - Courant de régime à vide (I_0) ;
 - Tension de court-circuit (U_{cc}) ;
- La tension nominale U_{1n} est la tension entre phases au primaire (ou au secondaire).
 - Le courant nominal I_{1n} est le courant dans un fil de ligne d'alimentation.

- La puissance apparente nominale est $\sqrt{3}$ fois le produit des valeurs nominales de la tension et de courant.

Ces valeurs nominales sont des valeurs mesurables à l'extérieur de transformateur. Connaissant ces grandeurs nominales, il est facile de déterminer les grandeurs (tension et l'intensité) par phase suivant le mode de couplage (étoile ou triangle). [2]

I-10- Défauts dans les transformateurs

Les transformateurs sont exposés à des défauts de nature divers :

- électrique : mauvais contacts dans les connexions et le changeur de prise.
- diélectrique : amorçages entre enroulements ou entre pièce sous tension et la masse, décharges partielles.
- thermique : échauffement anormale, vieillissement thermique, pollution de l'huile.
- mécanique : vibrations, fuites, fonctionnement défectueux de changeurs de prises.
- électromagnétique : courants de Foucault induits dans le circuit magnétique,

Les pièces de serrage, la cuve. [5]

Chapitre II

**Protection des transformateurs contre
les surtensions atmosphérique**

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'étude des surtensions atmosphériques dans le poste créé par les ondes de surtension venant par les lignes aériennes, où ces ondes sont créés lors des coups directe de foudre sur les conducteurs des phases, où par le passage de fil de garde où des pylônes par voie de contournement inverse. Ces surtensions ne dépasse pas les tensions de décharge des isolations des lignes, en effet si sur la ligne se crée une surtension très grande, alors elle se propage le long de celle-ci, elle fait les contournements sur les chaines d'isolations jusqu'à que sa valeur devient inférieur de la tension de contournement de ces chaines. Cette surtension ne présente pas des risques pour les isolations des lignes, mais elle peut présenter des dangers pour les isolations des postes, par ce que le niveau des isolations des postes, et toujours inférieur de celle des lignes. L'appareille principale de la protection des équipements de poste contre les surtensions atmosphériques venant par les lignes est le parafoudre.

II-1-Surtension

II-1-1-Définition

On désigne par surtension toute différence de potentiel anormale apparaissant dans les circuits électriques, et qu'est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, etc..). On distingue deux sortes de surtension :

- Transversales apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs.
- Longitudinales ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur. Ce qu'on appelle le gradient de surtension.[6]

II-1-2-Origines des surtensions

Les surtensions peuvent avoir deux origines [7] :

- Surtension d'origine interne;
- Surtension d'origine externe (atmosphérique) ;

A- Surtension d'origine interne

Ce sont les surtensions de commutations (ou de manœuvre), d'amorçage d'arc et de Ferro- résonance.

❖ Surtension de manœuvre

Tout changement brusque de configuration d'un réseau (fonctionnement de disjoncteur, apparition d'un défaut, etc..) engendre également une surtension transitoire rapide, dite surtension de manœuvre, qui se propage dans ce réseau et dont la durée peut s'échelonner de quelques dizaines de microseconde à quelques dizaines de millisecondes. Les cas les plus fréquents sont :[9]

- Les coupures des courants de lignes à vide, ou de câble à vide, ou de batteries de condensateurs ;
- La coupure des faibles courants inductifs ou magnétisants (transformateurs à vide, ou charge par inductances shunts).

a-La commutation de courants inductifs

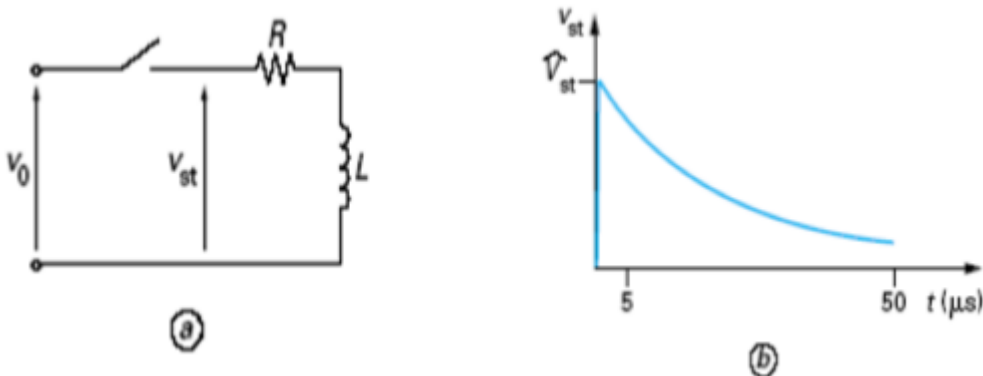
Ces surtensions sont des impulsions de tension apparaissant lors de la commutation (ouverture et fermeture) de circuits comportant des éléments inductifs tels que inductances, enroulements de moteurs ou de transformateurs,... etc.

En effet, la coupure d'un circuit, tel que celui représenté sur la figure (a), entraîne une brusque variation de l'intensité du courant électrique parcourant l'élément d'inductance L ; celui-ci engendre alors, dans le circuit, une surtension V_{st} , tel que :

$V_{st} = -L \frac{di}{dt}$; Cette surtension est particulièrement élevée lors de la coupure brusque

($\frac{di}{dt} \rightarrow \infty$). Toute fois, l'énergie de la surtension est limitée par l'énergie totale W stockée dans

l'inductance : $W = \frac{1}{2} Li_0^2$ avec : i_0 courant parcourant des inductances avant la coupure. Du fait de sa forte valeur, la surtension est donc limitée dans le temps figure (b). [10]

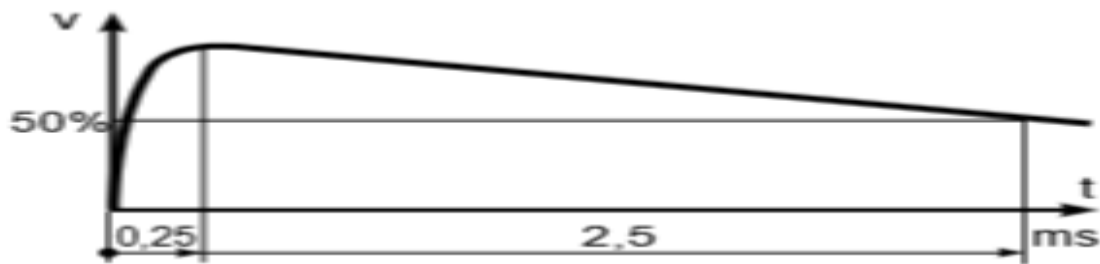


FigureII-1: Représente la commutation de courant inductif

b- La commutation des circuits capacitifs

Comme dans le cas précédent, la coupure du courant de caractère de capacité crée aussi une surtension. Par exemple, le débranchement d'une ligne à vide, ou un câble ... etc. [10]

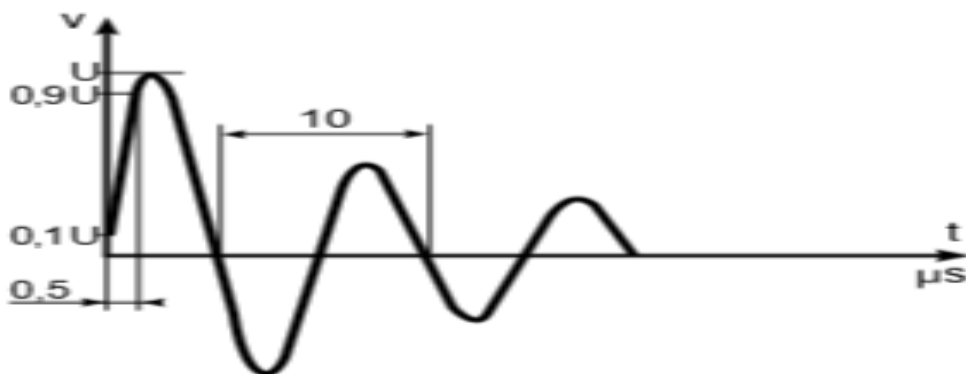
c- Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre : [7]



a- ondes 250/2500 μs dite onde longue amortie



b- onde 5/50ns dite onde impulsionnelle récurrente (simulant par exemple la fusion d'un fusible)



c- onde 0.5/100KHz dite onde sinusoïdale amorite

Figure II-2 : Formes des ondes normalisées

❖ Surtension d'amorçage d'arc

Ces surtensions sont produites dans les réseaux fonctionnant avec le neutre isolé de la terre, lors de la mise à la terre d'une phase du réseau la tension de cette phase diminue jusqu'à zéro, la tension de neutre augmente jusqu'à la tension des phases (tension simple), et les tensions des autres phases (les phases saines) augmente jusqu'à la tension composée. D'habitude sur le point de court-circuit un arc électrique se crée, dans le cas où cet arc n'est pas stable une surtension se crée à cause de l'allumage est l'extinction consécutive de l'arc. La valeur de cette forme de surtension atteinte jusqu'à $(3.2 \div 3.5) U_{ph}$, qui présente un danger pour les isolations des équipements du réseau électrique. [14]

❖ Surtension de Ferro-résonance

Augmentation considérable des tensions sont toujours dangereux pour les isolations, même les petites augmentations des tensions sont non souhaitable, par ce que la conséquence à un caractère cumulatif qui accélère le vieillissement des isolations.[14]

B- Surtensions d'origine externe (atmosphérique)

Une surtension de foudre et résultat de la décharge d'un nuage orageux.

❖ Nature et comportement de la foudre

La foudre est une décharge électrique entre le nuage et le sol ou entre deux nuages. A la différence d'un condensateur, où les charges sont à la surface des électrodes conductrices, dans un nuage orageux, les charges sont portées par les gouttelettes d'eau ou les cristaux de glace ; leurs déplacements sont relativement lents, de telle sorte que les charges ne mettent en jeu qu'une partie des charges contenues dans le nuage.

Ainsi, un coup de foudre est généralement constitué d'une série de décharge, utilisant le même trajet d'éclair, et séparées les unes des autres d'un temps variant entre dizaines de microseconde jusqu'à quelques dixièmes de secondes.

Les décharges entre nuage et le sol sont négatives dans 90% des cas ; elles frappent ainsi les points de l'électrode opposée aux points où le champ électrique est le plus fort : c'est-à-dire les pointes (arbre, clochers, pylône, file de ligne électrique, etc...).[6]

❖ Mode d'action de la foudre sur les lignes

Aussi bien les réseaux BT que les réseaux HT sont influencés par la foudre, et cela avec plusieurs manières [6] :

- Par coup de foudre direct ;
- Par coup de foudre indirect ;
- Par induction électromagnétique (choc en retour) ;
- Elévation du potentiel de terre ;
- Par induction électrostatique.

a- coup de foudre direct

L'impact direct sur une ligne électrique, génère une onde de tension qui se propage dans les deux côtés. Cette onde, qui est amortie par l'effet couronne et la longueur de la ligne, est coupée soit par l'isolateur à corne soit par les moyens de protection au poste.[6][7]

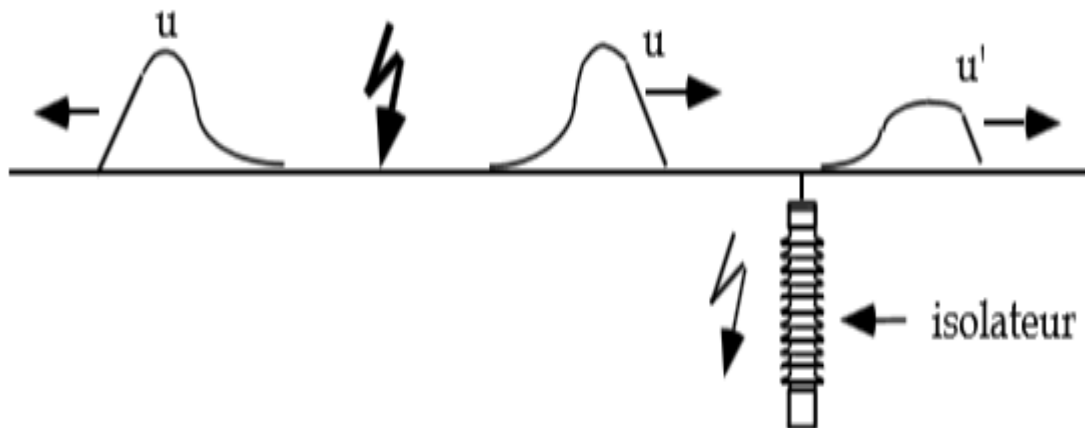


Figure II-3: coup de foudre direct

La valeur de courant de foudre est de forme : $I(t) = I_{max}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$

A ce courant est associée une onde de tension dont la valeur en première approximation est :

$$U = Z \cdot KI(t)$$

Avec :

$$k=1/4$$

$Z = \sqrt{L/C}$: Impédance d'onde de la ligne

$KI(t)$: est la proportion de courant de foudre qui se propage dans la partie de ligne considérée.

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

Quand l'onde de tension rencontre le premier pylône deux cas peuvent se présenter :

- $Z \cdot KI(t) >$ tension de tenue de la chaîne d'isolateurs, un contournement se produit, l'onde est alors coupée.
- $Z \cdot KI(t) <$ tension de tenue de la chaîne d'isolateurs, l'onde pleine continue sa propagation.

b-Coups de foudre indirect

Les coups indirect tombent généralement sur le pylône, ou le fil de garde et résulte une augmentation de la tension de la masse métallique du pylône par rapport à la terre.[8]

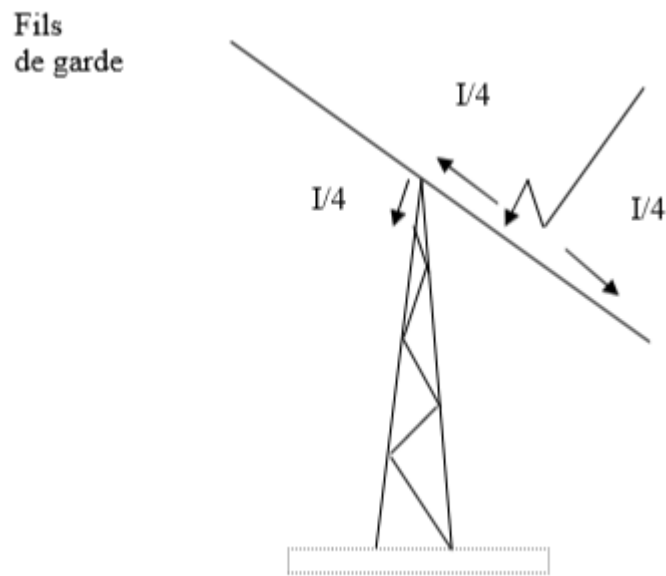


Figure II-4 : coup de foudre indirect

$$\text{L'augmentation de la tension est : } V = R \frac{I}{4} + \frac{L}{4} \frac{dI}{dt}$$

Où R et L sont respectivement la résistance et l'inductance de pylône et de la prise de terre.

Ces surtensions qui contraignent l'isolation du poste et particulièrement celle des transformateurs dépendent de la construction et de la configuration du réseau.

C-Induction électromagnétique

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrême rapide de champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètre, voire plusieurs kilomètres.[6]

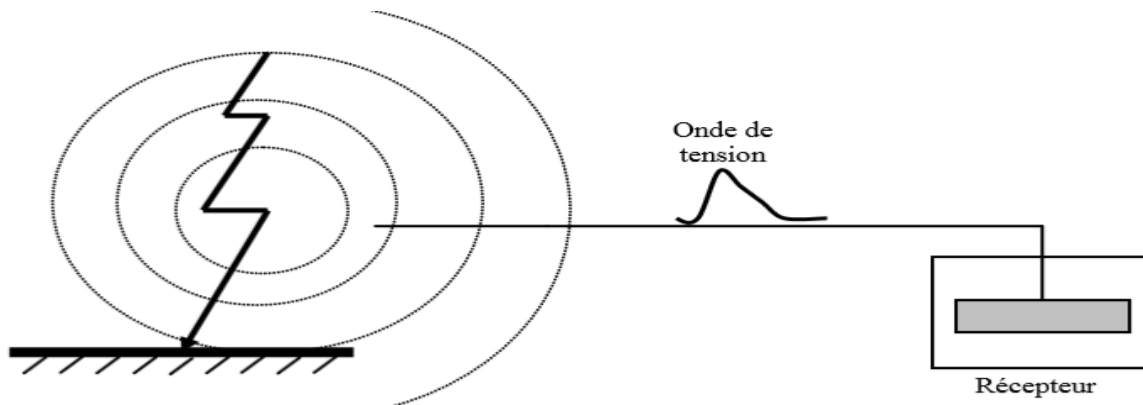


Figure II-5 : par induction électromagnétique

La formule estimée pour une surtension induite est la suivante :

$$U_{ind} = Z_0 \cdot \frac{I \cdot h}{d} \text{ où } Z_0 = \frac{0.25}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 30 \Omega$$

h : hauteur du conducteur.

d : distance entre la ligne et l'impact de foudre.

I : courant de la foudre.

d- Elévation de potentiel de terre

Une élévation de potentiel de sol à lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par celui-ci. Cette variation de la tension du sol touche les installations lorsque l'impact de la foudre à la terre est à proximité de leurs prises de terre. Le courant circulant dans la terre peut provoquer la montée en potentiel des équipements par les prises de terre.

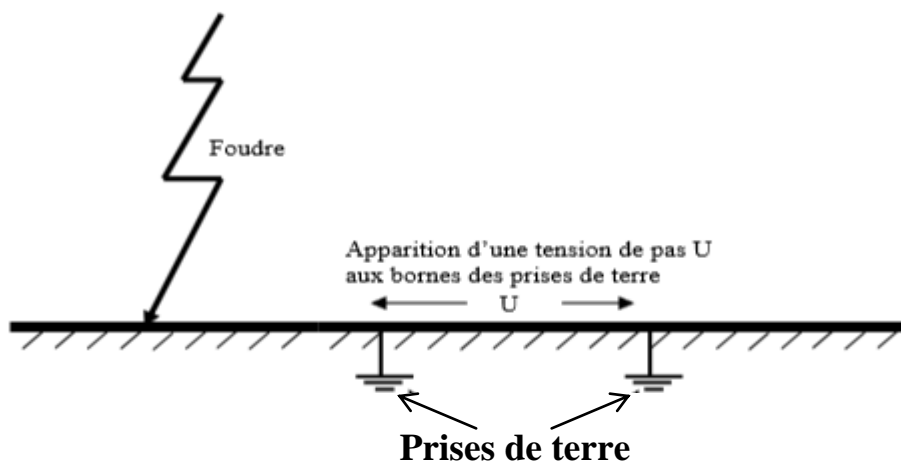


Figure II-6 : Montée en potentiel de la prise de terre

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

Ce phénomène qui explique souvent le foudroiement indirect des animaux : même à 100m du point d'impact, un cheval dans un pré peut subir entre ses pattes arrière et ses avant une différence de potentiel de 500v.

e- par induction électrostatiques

Les surtensions apparaissent lorsque l'état électrique de nuage se modifie brusquement, par suite d'une décharge entre ce nuage et la terre ou un autre nuage. Si le nuage est subitement déchargé, les charges accumulées sur la ligne en regard du nuage sont libérées, et élève immédiatement le potentiel de cette partie à une valeur qui peut être considérable, et qu'est égale au Potentiel qu'aurait eu cette zone sous l'action du nuage orageux, si ces charges n'étaient venues l'annuler ou le réduire à une faible valeur. Les charges ainsi libérées et la surtension correspondante se déplacent vers les deux extrémités de la ligne sous la forme d'ondes mobiles. [6]

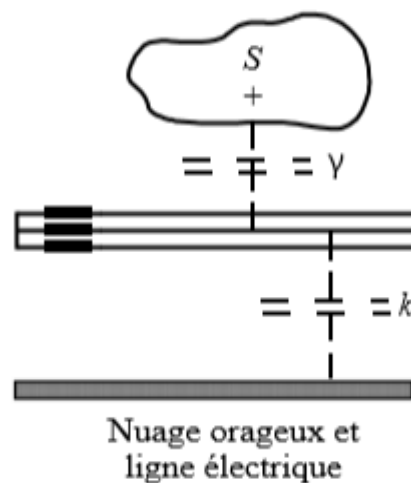


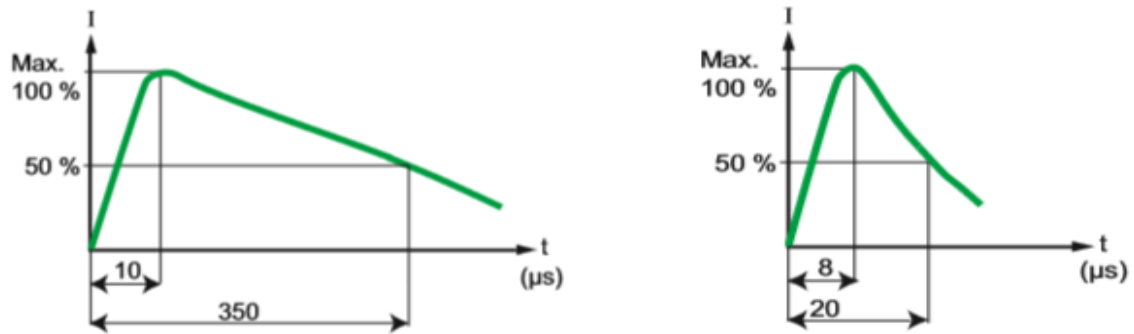
Figure II-7 : Par induction électrostatique

❖ Forme des ondes de foudre normalisées

L'analyse des phénomènes permet de définir les types d'ondes de courant et de tension de foudre [7] :

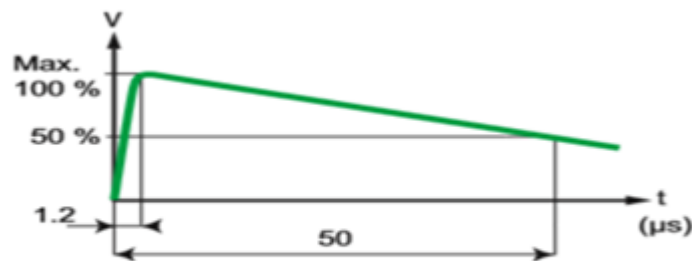
Deux types d'ondes sont retenus par les normes CEI :

- onde 10/350 μ s** : pour caractériser les ondes de courants de coup de foudre direct.
- onde 8/20 μ s** : pour caractériser les ondes de courants de coup de foudre indirect.
- Les surtensions créées par les coups de foudre sont caractérisées par une onde de tension 1.2/50 μ s.



a)- onde de courant 10/350 μs

b)- onde de courant 8/20 μs



c)- onde de tension 1.2/50 μs

Figure II-8 : Formes des ondes de foudre

II-1-3-Répartition des surtensions atmosphériques le long de l'enroulement d'un transformateur

Lorsqu'une surtension transitoire parvient à l'entrée d'un bobinage de transformateur, elle se propage le long de celui-ci. La répartition de la tension qu'en résulte est un phénomène très complexe, durant lesquelles les tensions entre les différentes bobines et même entre les différentes spires de l'enroulement, peuvent dépasser de plusieurs fois les tensions normales en régime permanent de fonctionnement de transformateur. L'expérience prouve que ce sont le plus souvent les spires qui se trouvent le plus près des sorties du transformateur qui sont endommagées, mais, en général, les surtensions et le claquage de l'isolation peuvent avoir lieu en un point quelconque de l'enroulement en fonction des caractéristiques de ce dernier.

[1]

II-1-4-Schéma équivalent d'un transformateur soumis aux surtensions

On se limite dans cette étude de surtension à un schéma équivalent monophasé d'un enroulement de côté haute tension du transformateur, en négligeant les résistances d'enroulement.[1]

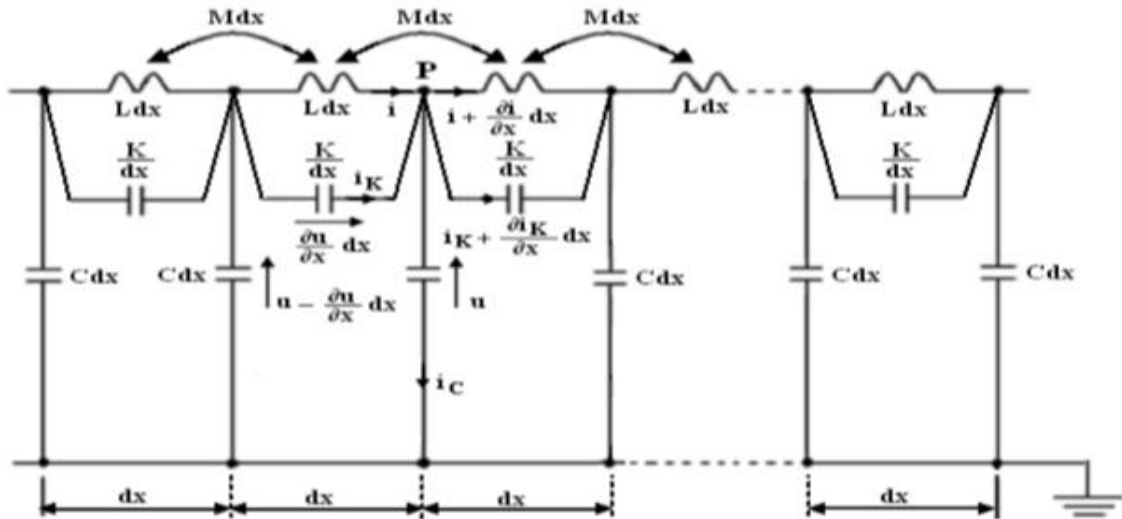


Figure II-9 : schéma équivalent d'un enroulement de transformateur soumis aux surtensions

L (H/m) : inductance linéique propre des spires

M (H/m) : inductance linéique mutuelle entre spires

C (F/m) : capacité linéique transversale entre l'enroulement la cuve et le noyau de transformateur

K(Fm) : capacité linéique longitudinale entre spires, ou galettes.

II-1-4-a-Equation de circuit :

En appliquant la loi de Kirchhoff au nœud P situé à l'abscisse x donne :

$$i + i_k = \left(i - \frac{di}{dx} dx \right) + \left(i_k + \frac{\partial i_k}{\partial x} dx \right) - i_c = 0 \quad (\text{II-1})$$

D'où :

$$i_c = \frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} dx \quad (\text{II-2})$$

Et comme :

$$i_c = -C dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{II-3})$$

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

En égalant (II-2) et (II-3), on aura :

$$\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} = -C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{II-4})$$

Le courant qui traverse la capacité K est donné par la relation suivante :

$$i_k = -\frac{k}{dx} \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} dx \quad (\text{II-5})$$

D'où :

$$i_k = -k \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \quad (\text{II-6})$$

Et :

$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = -k \frac{\partial^3 y}{\partial x^2 \partial t} \quad (\text{II-7})$$

En négligeant la transmission des phénomènes des transitoires d'un enroulement à un autre et les résistances d'enroulements R, on aura la relation suivante à travers l'inductance L :

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

D'où :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (\text{II-9})$$

Et :

$$\frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{II-10})$$

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

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

En sommant (II-11) et (II-7), on obtient :

$$\frac{d(i+i_k)}{dx} = -\frac{1}{L} \frac{du \partial t}{dx^2} - K \frac{d^3 u}{dx^2 dt} \quad (\text{II-12})$$

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

En identifiant les équations (II-4) et (II-12), ensuite en multipliant les deux membres par $L \frac{\partial u}{\partial t}$, et enfin en ordonnant on aura :

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

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

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

$$u = U \cos(\omega t) \cdot \sin(\beta x) \quad (\text{II-14})$$

Où : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$;

ω : est la pulsation

f : est la fréquence

β : est la constante de propagation, tel que $\beta = 2\pi/\lambda$.

λ : est la longueur d'onde

II-1-5-La répartition initiale de la tension le long de l'enroulement d'un transformateur

Les phénomènes liés aux surtensions impulsionnelles, se déroulent à très grande vitesse et agissent sur le transformateur, comme des phénomènes oscillatoires de très haute fréquence. Dans ce cas la réactance inductive ($L\omega$) du transformateur devient très grande, tandis que la réactance capacitive ($\frac{1}{C\omega}$) diminue considérablement. Par conséquent le courant passe seulement par les capacités. C'est pour cette raison qu'il est suffisant de considérer le schéma suivant, on appelle ce schéma le schéma de la répartition initiale de la tension le long de l'enroulement. [1]

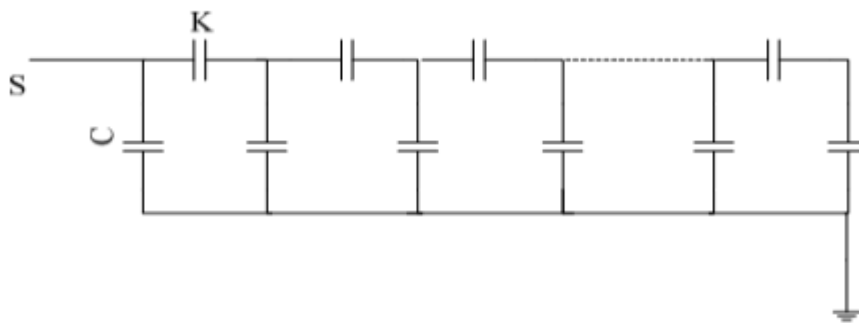


Figure II-10 : Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition initiale de la tension

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

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

C=0 :

S'il n'y avait pas des capacités C ($C=0$) par rapport à la terre, toutes les capacités longitudinales K seraient en série, et ce circuit serait parcouru par un courant de même valeur. Avec des capacités K identiques nous obtiendrions une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement, c'est-à-dire la même répartition qu'en régime permanent.

- **Cas où le neutre est mis à la terre** : la répartition est représentée par une droite inclinée réunissant les points M et N correspondant respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement, qui se trouve sous la tension U et sa fin dont le potentiel est nul Figure (II-11).

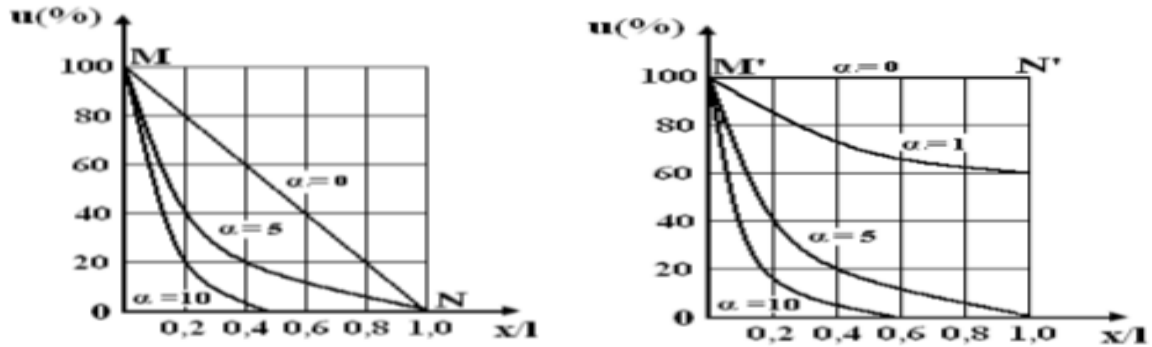
- **Cas où le neutre est isolé de la terre** : la répartition est représentée par une droite horizontale $M' N'$ figure (II-11)

K=0 :

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

- **Cas où le neutre est isolé de la terre** : La répartition de la tension est représentée par une droite verticale réunissant le point M' à l'origine des coordonnées.



a - Neutre est mis à la terre

b- Neutre isolé de la terre

Figure II-11 : Répartition initiale de la tension le long de l'enroulement de transformateur pour $C=0$ et $K=0$

Une analyse mathématique plus détaillée montre que la tension le long de l'enroulement (figure (a)) est répartie suivant une loi hyperbolique. En un point d'abscisse x compté à partir de la borne d'entrée, la surtension initiale $u_0(x)$ est fournie par les relations suivantes :

$$U_0(X) = U_{choc} [sh\alpha \cdot (l - x) / sh \alpha \cdot l] \quad (II-15)$$

U_{choc} : Est la valeur maximale de la surtension.

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

l : Longueur totale de l'enroulement du transformateur.

➤ Démonstration :

Dans l'hypothèse où $L \rightarrow \infty$, l'équation (2-13) devient :

$$-C \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) + K \left(\frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} \right) = 0 \quad (II-16)$$

Pour le calcul de la répartition initiale de la tension au temps $t=0$, $U = U_{x0}$

Où :

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

L'équation (II-16) devient :

$$-C U_{x0} + K \left(\frac{\partial^2 U_{x0}}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (II-17)$$

En arrangeant les termes on aura l'équation :

$$\left(\frac{\partial^2 U_{x0}}{\partial x^2} \right) - \left(\frac{C}{K} \right) U_{x0} = 0 \quad (II-18)$$

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

La solution de cette équation est :

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

➤ Conditions aux limites :

Les conditions aux extrémités (figure II-1-4) donnent :

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

$$U_{x0}=1 \text{ pu} \quad (\text{II-20})$$

Pour $x=1$ (point mis à la terre)

$$U_{x0} = 0 \text{ pu} \quad (\text{II-21})$$

En injectant (II-20) et (II-21) dans l'équation (II-19) on aura :

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

$$\text{-pour } x=1 : A \exp(\alpha) + B \exp(-\alpha) = 0 \quad (\text{II-23})$$

En injectant (II-22) et (II-23) dans l'équation (II-19) on obtient :

$$U_{x0} = [\exp[\alpha(1-x)] - \exp[-\alpha(1-x)]] / [\exp(\alpha) - \exp(-\alpha)] \quad (\text{II-24})$$

En multipliant l'équation (II-24) par $(2/2)$, elle s'écrira :

$$U_{x0} = \text{sh}[(1-x)] / \text{sh}\alpha \quad (\text{II-25})$$

On retrouve bien l'équation (II-15)

Par analogie, dans le cas du neutre isolé on trouve que

$$U_{x0} = \text{sh}[\alpha(1-x)] / \text{ch}\alpha \quad (\text{II-26})$$

Remarque:

On constate sur la figure (II-10), que si les capacités reliées à la terre sont relativement élevées par rapport aux capacités longitudinales entre spires, l'isolation des spires situées du côté HT sera très sollicitée en cas de surtensions.

II-1-6- Gradient de la tension :

Pour calculer la rigidité diélectrique de l'enroulement, il faut connaître le gradient de tension entre deux éléments voisins de l'enroulement. D'après la figure on remarque le plus grand gradient de tension à lieu au début de l'enroulement sur ses premières spires, c'est-à-dire pour $x=0$. La valeur de ce gradient est déterminée par la dérivée première $\frac{du_x}{dx}$

En déterminons la valeur de celle-ci à partir des expressions (II-15) et (II-16) et en tenant compte du fait que pour $\alpha \geq 3$ nous avons :

$$\text{Th } \alpha \approx \text{coth } \alpha$$

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

Et nous aurons donc :

$$\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=0} = -U_{choc} \cdot \alpha$$

Le premier facteur de cette formule, donne la valeur du gradient de tension pour une répartition uniforme de la tension le long de l'enroulement, et le secondaire montre qu'à l'instant initial les éléments de l'enroulement les plus proches de l'entrée A, se trouvent sous une tension de $\alpha = 10$ à 15 fois plus grande que pour une répartition uniforme de la tension. D'où la nécessité de prendre des précautions pour protéger les isolants contre le claquage. [1]

II-1-7-Répartition final de la tension

Les courbes de répartition de la tension le long de l'enroulement, représentées sur la figure (II-11) correspondent aux régimes transitoires, après un certain intervalle de temps suffisant. L'apparition du régime permanent.

- ❖ Pour le cas où le neutre est mis à la terre, la répartition finale de la tension est représentée par une droite inclinée MN dans la figure (II-12), de fonction $u(x) = U \left(-\frac{1}{l}x + 1\right)$ correspondante à $\alpha = 0$ de la figure (II-11-a)
- ❖ Pour le cas où le neutre est isolé de la terre la tension se répartie uniformément le long de l'enroulement, elle est représentée par une droite parallèle M'N' à l'axe des abscisses dans la figure (II-12-b) de fonction $u(x) = U = C^{ste}$ correspondante à $\alpha = 0$ de la figure (II-11-b)

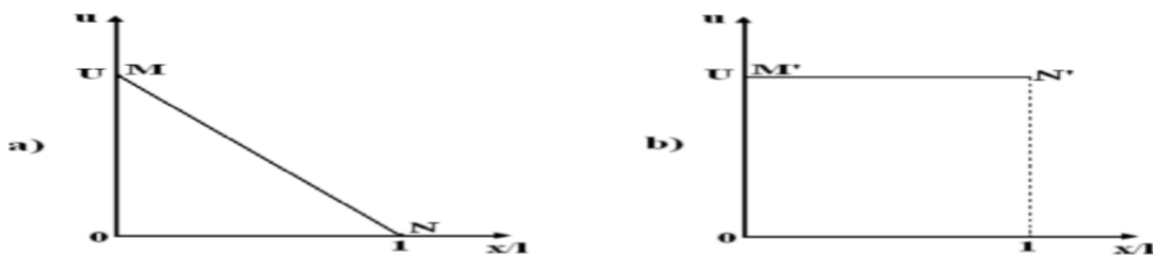


Figure II-12: Répartition finale de la tension le long de l'enroulement.

a) Neutre mis à la terre

b)- Neutre isolé de la terre

II-1-8- Phénomène transitoire de la tension

Si on tient compte de la résistance de l'enroulement, le passage de la répartition initiale à la répartition finale le long de l'enroulement est un phénomène de nature oscillatoire amortie.

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

La propagation et la réflexion de l'onde amortie se traduisent par des oscillations ayant lieu dans le temps et dans l'espace, pour les hypothèses les plus simples, l'expression cherchée est obtenue comme intégrale d'une équation différentielle à dérivée partielles de quatrième ordre au moins. Notre analyse nous a amené aux résultats suivants :

- Le phénomène ayant lieu dans l'enroulement est périodique et s'amortie suivant une fonction exponentielle.
- Les répartitions finales de la tension sur la figure (II-12), constituent les axes aux tours des quels s'effectue les phénomènes oscillatoires, les limites des oscillations se trouvent dans les aires hachurées représentés sur la figure (II-13).

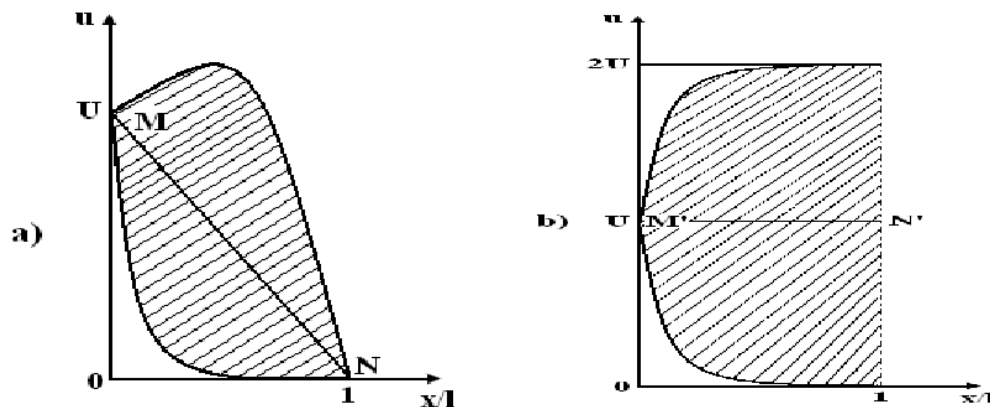


Figure (II-13) : Limites des oscillations de l'onde de surtension dans l'enroulement

a) Neutre mis à la terre.

b) Neutre isolé de la terre.

La décomposition en série de Fourier de la différence entre la répartition initial et finale, nous donne :

- Pour un enroulement à neutre mis à la terre on obtient une série d'harmoniques comprenant (1, 2, 3,...etc.) en demi-onde. Figure (II-14-a).
- Pour un neutre isolé de la terre on obtient une série d'harmoniques comprenant (1, 3, 5,...etc.) en quart d'onde figure (II-14-b).

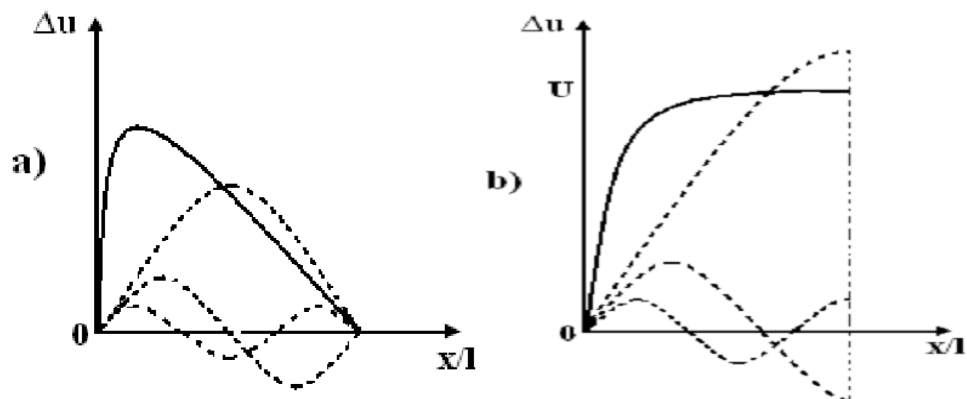


Figure II-14 : phénomène transitoire dans l'enroulement.

a) Neutre mis à la terre.

b) Neutre isolé de la terre.

L'onde qui pénètre dans l'enroulement se déforme continuellement, la figure (II-15) représente la répartition de la tension le long de l'enroulement pour différents instants.

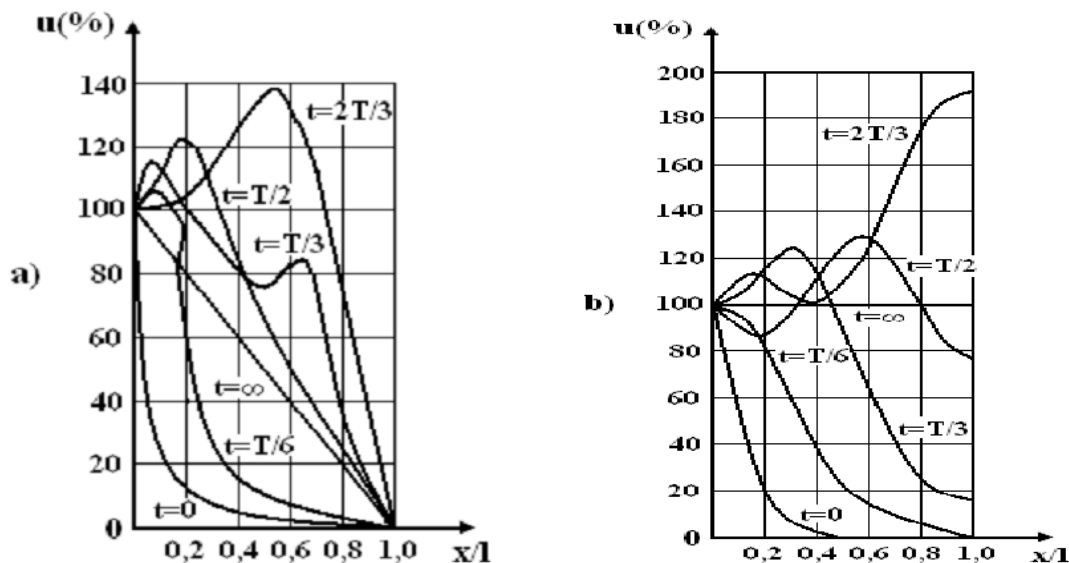


Figure II-15 : phénomène transitoire dans l'enroulement.

a) Neutre mis à la terre.

b) Neutre isolé de la terre.

Le potentiel varie dans l'espace suivant l'abscisse x et dans le temps. Un point quelconque de l'enroulement peut être soumis à un gradient élevé, ce qui rend assez illusoire le renforcement des isolations des spires d'entrée, autre fois adopté par le constructeur. Dans ce cas le transformateur peut subir une avarie qui aura pour résultat sa mise hors service.[1]

II-2-Protection

La protection des équipements des postes contre les surtensions atmosphériques (onde de surtension), est la coordination de leur isolation sont basés sur l'utilisation des différents types de parafoudre, surtout les parafoudres à oxyde de Zinc (ZnO). Les isolations de ces équipements doivent être coordonnées par les caractéristiques de parafoudre. [14]

II-2-1-Parafoudres

A- Définition

Le parafoudre est un appareil statique, destiné à protéger l'isolement des équipements de haute, et moyenne tension contre les surtensions. [16]

B- Emplacement des parafoudres

Les parafoudres seront toujours placés le plus près possible des installations à protéger. Dans le réseau électrique, ils doivent être placés au voisinage immédiat des transformateurs. En effet, du fait qu'il présente une grande impédance, il y aura réflexion et donc augmentation locale de la tension. Un parafoudre placé à quelques dizaines de mètres peut très bien se trouver dans un nœud et ne jamais amorcer.

Dans les grands postes, on aura même intérêt à placer plusieurs parafoudres sur les mêmes jeux de barres, et à côté des transformateurs de puissance (par ce que ces derniers sont les éléments importants des postes électriques). [6]

C- Caractéristique et définition

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les parafoudres :[6]

- **La tension d'amorçage**

Est la tension minimum pour laquelle le parafoudre fonctionne. A 50 Hz, elle aura pour valeur au moins 2 fois la valeur efficace la plus élevée du réseau. Au choc, elle dépend très fortement de la forme d'onde ; elle est généralement définie pour une onde 1,2/50 ou 4/10 et 8/20, pour des ondes de courant.

- **La tension résiduelle**

Est la tension maximum aux bornes du parafoudre, pendant le passage du courant de décharge. Tension et courant sont liés par :

$$U_r = I_{décharge} \cdot R_p$$

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

- **La tension d'extinction (ou la tension de désamorçage)**

Est la valeur la plus élevée de la tension de service, pour laquelle le parafoudre interrompt son courant de suite. C'est généralement la valeur qui désigne le parafoudre.

- **Le pouvoir de décharge**

Est l'intensité maximum du courant que le parafoudre peut écouler, plusieurs fois le courant de suite, sans être endommagé.

- **Le courant de suite**

Est le courant fourni par le réseau, et qui subsiste un temps plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler de lui-même à la fin d'une alternance de la tension.

Un parafoudre doit remplir les conditions suivantes :

- a) à l'apparition d'une surtension, il faut mettre le conducteur à la terre dans un temps très court ($< 0,1 \mu\text{s}$),
- b) se désamorcer rapidement après l'écoulement à la terre du courant de la décharge,
- c) avoir une tension d'amorçage et une tension résiduelle aussi stables que possible pendant des années; elles doivent en outre être indépendantes de la polarité et de la forme de l'onde, des conditions climatiques.

D-Différents types de parafoudre

❖ Parafoudre à Oxyde de Zinc

Le parafoudre à oxyde de zinc est le dispositif de protection contre les surtensions, le plus utilisé dans les réseaux, ils sont utilisés pour limiter les surtensions transitoires (atmosphériques ou de manœuvre) de courte durée. [16]

a- Structure des parafoudres à oxyde de zinc

Le parafoudre à oxyde de zinc est constitué d'un empilement de résistance non linéaire (varistance) dans une enveloppe en porcelaine, ou en matière synthétique (fibre de verre plus résine). [16]

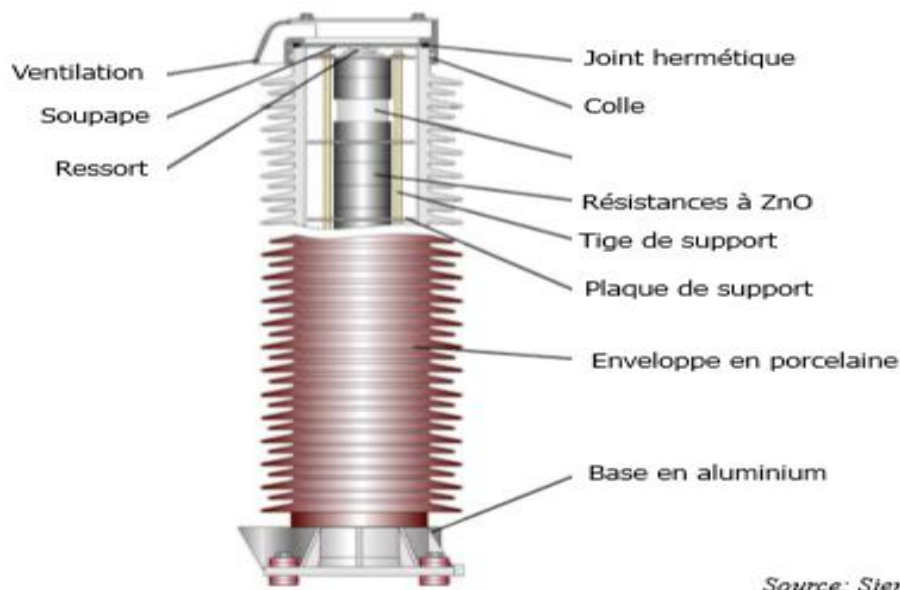


Figure II-16 : Structure d'un parafoudre à oxyde de zinc en enveloppe porcelaine



Figure II-17 : Les résistances à ZnO sont en générale de forme cylindrique

b- Principe de fonctionnement

La varistance du parafoudre est une résistance non linéaire, qui chute considérablement lorsque la tension augmente. En fonctionnement normal, à l'absence de surtension, la résistance de la varistance est très élevée et empêche le passage du courant de la ligne vers la terre. Par contre, en régime de surtension la résistance chute subitement pour dévier le courant, vers la terre. Quand l'onde de tension arrive par la ligne électrique, le courant de la foudre choisit le chemin le moins résistant, celui de la varistance, et dévie ainsi vers la terre. C'est pratiquement le même principe de fonctionnement que l'éclateur, car dans les deux cas c'est la résistance de l'équipement de protection qui chute : pour l'éclateur grâce au claquage, pour la varistance grâce à la résistance non linéaire. [15]

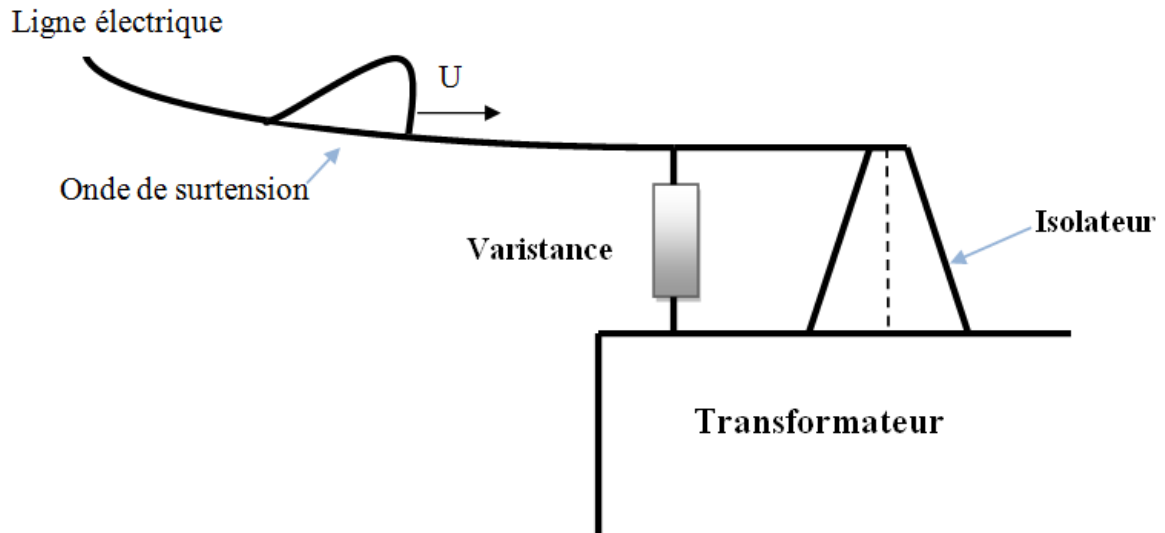


Figure II-18 : protection de transformateur par un parafoudre à Oxyde de Zinc

c- Caractéristique « courant-tension » d'une varistance de parafoudre

Généralement c'est une résistance en céramique, composé pour la plus grande partie d'oxyde de zinc (ZnO). La figure ci-dessous illustre schématiquement la courbe caractéristique courant-tension. La résistance est non linéaire et la chute de tension est très faible, ce sont les deux propriétés principales de la varistance.

A l'apparition d'une surtension, le parafoudre doit s'amorcer rapidement ($<0.1\mu s$). [15]

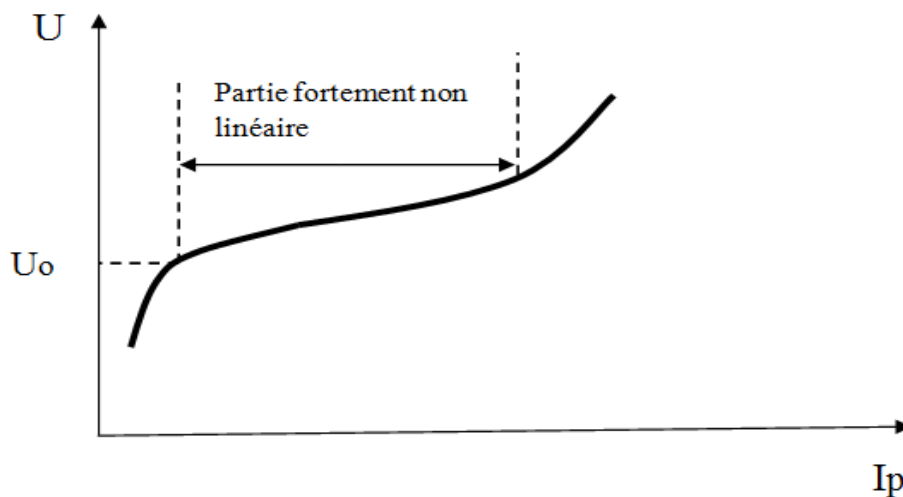


Figure II-19 : Courbe caractéristique courant-tension d'une varistance à oxyde de zinc

d- Caractéristiques

Un parafoudre à ZnO est caractérisé par :

- Sa tension maximale de service permanent ;
- Sa tension assignée qui peut être liée ; par analogie avec les parafoudres à carbure de silicium, à la tenue aux surtensions temporaires ;
- Le niveau de protection défini comme la tension résiduel soumis à un choc de courant donné ;
- Le courant de décharge ;
- La tenue en courant, de choc, (elle traduit le besoin de tenue à des ondes longues entraînant une dissipation d'énergie importante et non la nécessité d'écouler de tels courants en exploitation). [19]

❖ Parafoudre à résistance variable et l'éclateur

a- Constitution

Le parafoudre est constitué par un ensemble d'éléments identique disposés en série comprenant chacun :

- Un ou plusieurs éclateurs constitués chacun par deux électrodes séparées par une courte distance dans l'air ou dans un gaz neutre ;
- une (ou plusieurs résistances) non linéaire disposée on série avec l'éclateur, et fonctionnant :
 - Comme une résistance de faible valeur pour des courants de décharge de grande amplitude, limitant ainsi la tension à la borne.
 - Comme une résistance de valeur élevée lorsque la tension appliquée est égale à la tension assignée à fréquence industrielle, limitant ainsi l'amplitude du courant de suite et facilitant son extinction. [18]

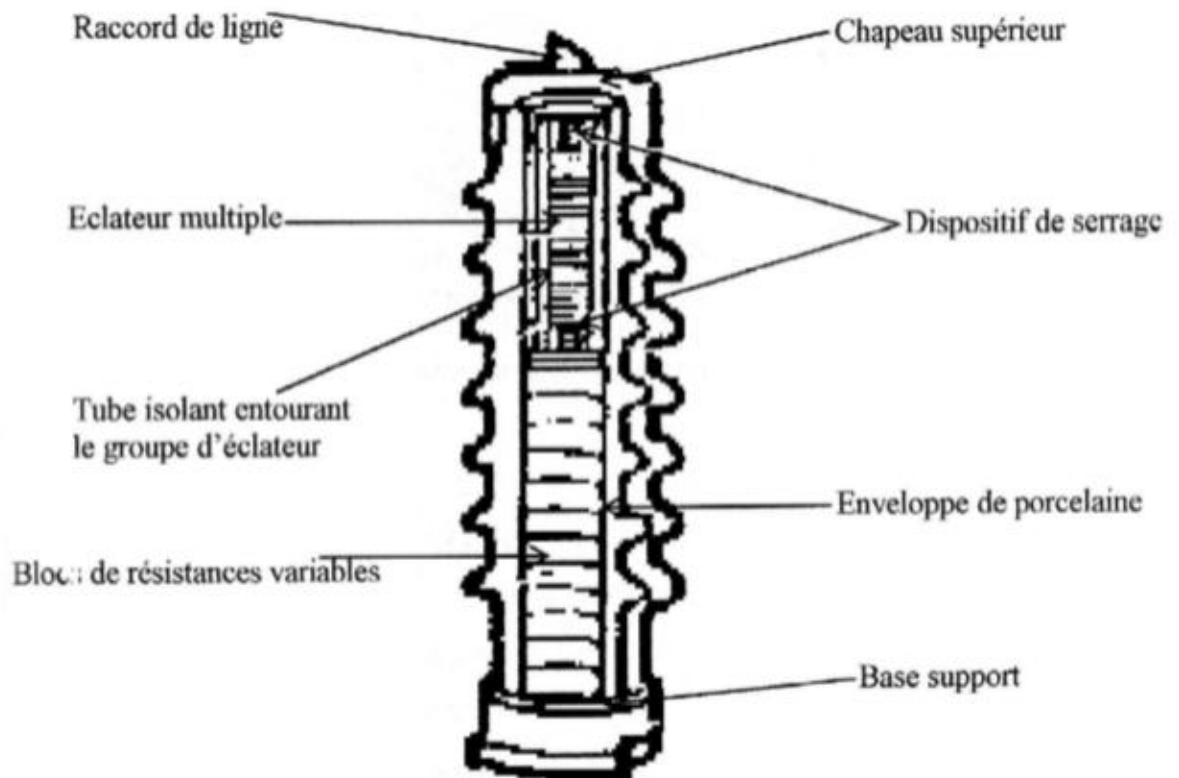


Figure II-20 : Parafoudre à résistance variable et l'éclateur [19]

b- Principe de fonctionnement

Ce type de parafoudre associe en série un éclateur et des résistances non linéaires. Lorsque la tension appliquée à cet ensemble atteint une certaine valeur, les éclateurs amorcent et provoquent la circulation d'un courant dans les résistances non linéaires. La tension qui apparaît à leurs bornes dites tension résiduelle est une fonction des impédances du réseau et des valeurs des résistances. De plus les éclateurs des parafoudres sont conçus de telle façon (soufflage magnétique par exemple), qu'il puisse y avoir extinction de l'arc au plus tard au premier passage par zéro de courant. Il y a alors la coupure du « courant de suite », c'est-à-dire du courant à fréquence industrielle qui traverse le parafoudre. Il n'y aura réamorçage des éclateurs que si la tension réapparaissant aux bornes de parafoudre dépasse une certaine valeur qui ne peut être inférieure à la tension assignée du parafoudre. [19]

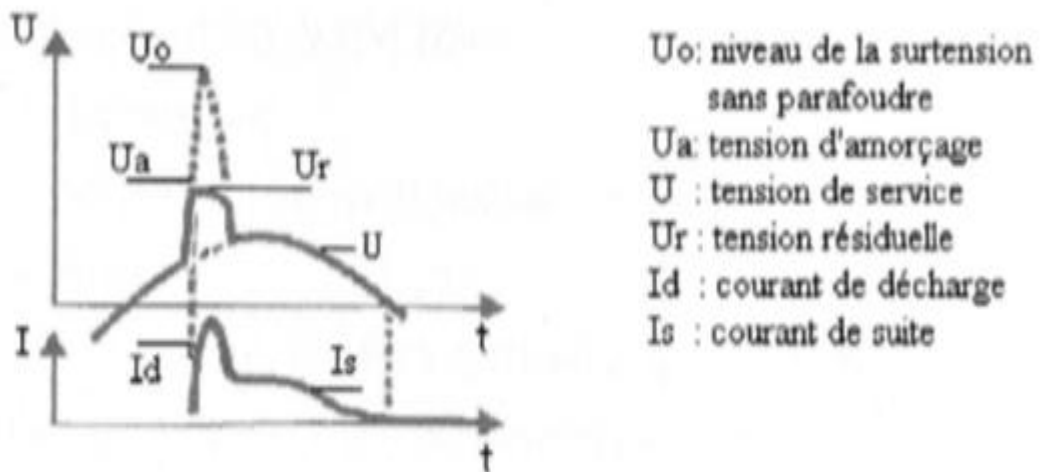


Figure II-21 : Schéma de fonctionnement

c- Caractéristiques

- Sa tension d'extinction ou tension assignée qu'est la tension à fréquence industrielle la plus élevée sous la quelle le parafoudre peut se désamorcer spontanément ;
- Ses tensions d'amorçage suivant les formes d'onde (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre...);
- Son pouvoir d'écoulement de courant de choc (c'est-à-dire la capacité de dissipation d'énergie); [18]

d- Calcul le courant dans le parafoudre

- Si le point d'impact de foudre se trouve loin de parafoudre, alors on peut négliger les multi réflexions des ondes entre le point d'impact de foudre et de parafoudre, dans ce cas le courant dans le parafoudre et calculer comme suite : [14]

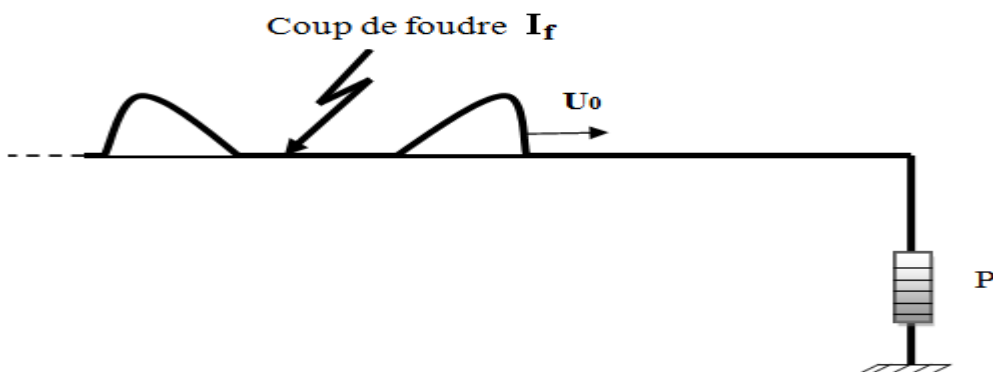


Figure II-22 : Coup de foudre sur la ligne

$$I_p = \frac{2U_0 - U_{rés}}{Z_c}$$

U_0 : l'amplitude de la tension venant de la ligne.

$U_{rés}$: la tension résiduelle sur le parafoudre.

Z_c : L'impédance caractéristique de la ligne.

- Si le coup de foudre arrive à proximité des parafoudres, par exemple à coté de dernier pylône, vers le poste, avec un contournement postérieur sur la résistance de la mise à la terre (Z_c), alors sur le parafoudre s'établit rapidement une grande tension, dans ce cas le courant dans le parafoudre est calculé :

$$I_p = \frac{2U_0}{Z_c}$$

❖ Parafoudre à expulsion

a- Construction :

Les parafoudres à expulsion sont des éclateurs possèdent un pouvoir de coupure appréciable. Ils sont constitués de deux éclateurs en série. L'un de ces éclateurs, dit auxiliaire, évite le maintien en permanence, sous pleine d'isolateur du dispositif de coupure. L'autre éclateur, placé à l'intérieur d'un tube en fibre, possède un niveau d'amorçage assez défini, il forme la partie active du parafoudre. [17]

b- Principe de fonctionnement

Lorsque l'arc s'amorce à l'intérieur d'un tube, il décompose la fibre et donne naissance à une masse de gaz peu conducteur qui s'expulse violemment par l'ouverture inférieure, l'arc est alors soufflé et s'éteint en une demi période. Les parafoudres à expulsion sont installés sur les pylônes, des lignes à proximité des postes pour diminuer les courants de décharge des parafoudres. [17]

II-2-2- Protection des postes

Il est important de remarquer que, par la diminution des tensions nominales des parafoudres lors de même valeur de courant de foudre, le courant de parafoudre augmente beaucoup. Par éloignement du point d'impact de parafoudre, la valeur maximale du courant à travers le parafoudre parvient après une certaine multi-réflexion des ondes entre le point

Chapitre II La protection contre les surtensions atmosphériques

d'impact de foudre et le parafoudre, par conséquent le courant dans le parafoudre n'atteint pas sa valeur maximale, à l'instant que le courant de foudre passe sa valeur maximale.

Pour diminuer le courant à travers le parafoudre il faut augmenter la distance entre le parafoudre et le point d'impact de foudre, de même ceci améliore le fonctionnement des parafoudres. Donc pour diminuer le courant il faut éviter les coups des foudres sur la partie de la ligne de longueur (1÷3km) approché au poste, doit être protégé par le fil de garde. Si la ligne est protégée par le fil de garde sur toute sa longueur, alors la protection de cette ligne doit être faite scrupuleusement. (Très petite résistance de la mise à la terre des pylônes, très petite angle de protection). La protection des approches des lignes au poste contribue de même la réalisation de deuxième exigence assurant une protection fiable, c'est-à-dire qui permet de limiter la probabilité de venir au poste des ondes ayant des grandes valeurs. [14]

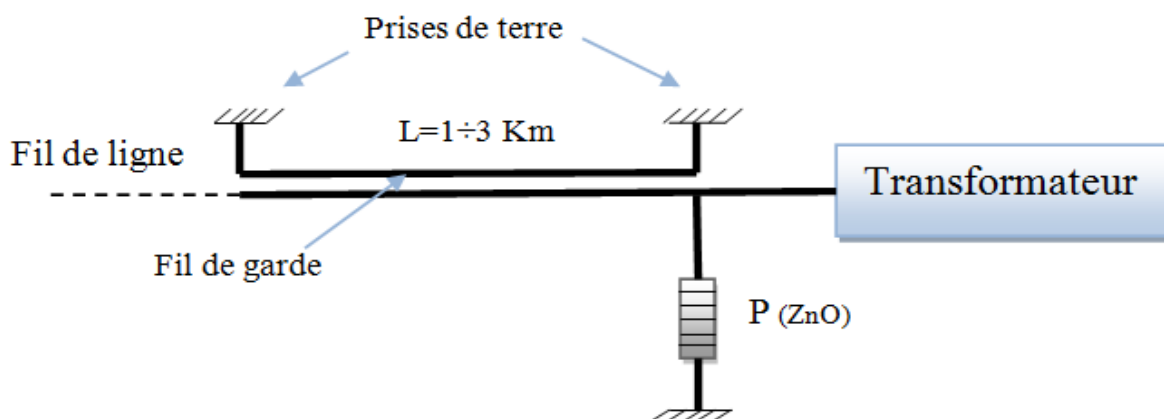


Figure II-23 : Renforcement de la protection par le fil de garde

II-2-3-Le rôle de fil de garde et le parafoudre à expulsion dans la protection des postes

Le fil de garde est installé juste sur la partie de la ligne à proximité de poste, si la protection par ce dernier n'est pas suffisante, alors pour renforcer cette protection. On ajoute au schéma de protection encore le parafoudre à expulsion (P_{E1}). Ce parafoudre est connecté à la ligne au début de fil de garde. Dans certains cas, on trouve la connexion d'un deuxième parafoudre à expulsion qui est connecté juste à l'entrée de poste (P_{E2}). Il ne joue aucun rôle dans la protection des postes contre les surtensions atmosphériques. Il est destiné pour protéger le disjoncteur en cas où il est ouvert. [14]

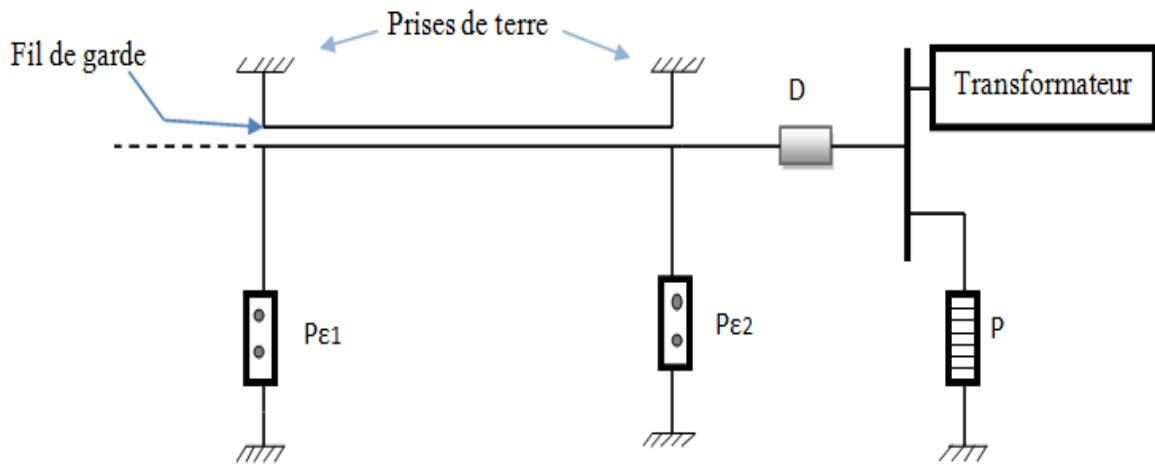


Figure II-24 : Rôle de file de garde et le parafoudre à expulsion

II-2-4-Particularité des protections des équipements des postes et la coordination de leurs isolations

La protection des équipements des postes contre les surtensions atmosphériques (onde de surtension qui vient le long de la ligne), et la coordination de leurs isolations, sont basés sur l'utilisation des parafoudres surtout les parafoudres ZnO (oxyde de zinc). Les isolations de ces équipements doivent être coordonnées par les caractéristiques des parafoudres dans les postes électriques. Les points d'installations des parafoudres sont choisis de façon, que la protection entière de poste sera réalisée par un nombre minimale de parafoudre (pour un but économique et pour ne pas compliquer le schéma de poste). Les transformateurs étant un élément important de réseau électrique, ont une protection supplémentaire assurée par un deuxième parafoudre installé à une distance a déterminée de transformateur. La distance dépend du type de parafoudre, du type de poste (poste unidirectionnelle, de passage, et de multidirectionnelle), et de la constitution des lignes et de leurs protections. [14]

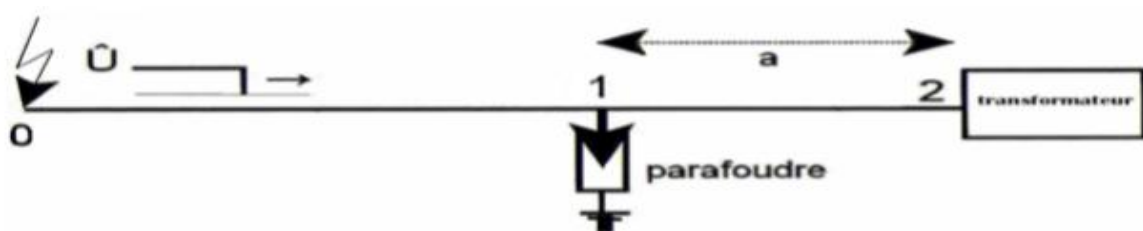


Figure II-25 : distance de parafoudre

II-2-5-Protection des enroulements ouverts des transformateurs

Dans certain cas l'enroulement BT de transformateur reste d'être débrancher des autres éléments de la partie correspondante de réseau électrique. En cas d'un arrêt longtemps d'un alternateur à la répartition, où en cas de la charge minimale, donc un des deux alternateurs est débranché. L'enroulement correspondant de transformateur élévateur reste ouvert. L'existence d'un enroulement ouvert (provisoirement non utiliser) concerne aussi au transformateur à trois enroulements lors d'action d'une surtension au borne de HT de transformateur. [14]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudiés les surtensions dans les transformateurs, qui peuvent endommager leurs enroulements et les mètres hors service, c'est pour cette raison qu'on a utilisés les différents types de parafoudre pour limité ces dernière.

Chapitre III

Modélisation et calcul des paramètres de l'enroulement
du transformateur

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de montrer comment présenter une modélisation de l'enroulement du transformateur, en gardant les dimensionnements géométriques et des propriétés physique du milieu où il se trouve, afin d'identifier et de déterminer ses différents paramètres. Pour l'étude des surtensions dans les enroulements du transformateur, en cas que celles sont engendrées par des manœuvres sur le réseau ou par des décharges de foudre sur la ligne où à proximité.

III-1-Détermination des paramètres du transformateur

III-1-1-Caractéristiques électriques du transformateur

Notre étude sera faite sur un transformateur du type TDH-63000 /110KV, portant les indications suivantes :

$S_n = 63\text{MVA}$: Puissance apparente nominale ;

$U_{HT} = 115\text{KV}$: Tension nominal de l'enroulement haute tension ;

$\Delta P_{CC} = 245\text{KW}$: Pertes de puissance en court-circuit ;

$\Delta P_0 = 50\text{KW}$: Pertes de puissance à vide ;

$U_{cc} = 10.5\%$: Tension de court-circuit ;

$I_0 = 0.55\%$: Courant à vide ;

$f = 50\text{Hz}$.

III-1-2- Caractéristiques géométriques

$d_{extHT} = 1270\text{ mm}$ (Diamètre extérieur de l'enroulement haut tension) ;

$d_{intHT} = 1052\text{ mm}$ ((Diamètre intérieur de l'enroulement haut tension) ;

$d_n = 764\text{ mm}$ (Diamètre de noyau) ;

$d_{cuve} = 4270\text{ mm}$ (Diamètre de cuve) ;

$l_{en} = 1805\text{mm}$ (Longueur de l'enroulement du transformateur).

III-1-3-Relations empiriques pour le calcul des paramètres

La relation empirique menées sur les transformateurs soumis à des 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.

A-Détermination de la résistance R

La résistance de l'enroulement R_{Δ} dépend de la forme d'onde appliquée, elle est donnée par la relation empirique suivante [11] :

$$R_{\Delta} = K_1 \cdot R_0 \quad (\text{III-1})$$

Avec :

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

K_1 : Facture tenant compte de la forme de la tension appliquée.

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

$$R_0 = \frac{\Delta P_{CC} U_n^2}{S_n^2} \quad (\text{III-2})$$

Où :

ΔP_{CC} : Sont les pertes de puissance en court-circuit.

U_n et S_n : Sont respectivement la tension nominale et la puissance nominale du transformateur.

Pour un seul élément, on aura : $R = \frac{R_{\Delta}}{n}$

n : est le nombre d'élément

B-Détermination des inductances propres L et mutuelles M_{ij}

- L'inductance propre

Calculer l'inductance totale de l'enroulement revient à calculer l'inductance L_{CC} durégame de court-circuit comme d'après la formule suivante [12] :

$$L_{tot} = K_2 \cdot L_{CC} \quad (\text{III-3})$$

L_{tot} : est l'inductance totale de l'enroulement

K_2 : est le facteur qui tient compte de la forme d'onde appliquée à l'enroulement, elle est aussi appelé facteur de précision pour l'inductance L , en général $K_2 = 0.65$.

L_{CC} : est l'impédance propre correspondant au régime de court-circuit, elle est donné par :

$$L_{CC} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{CC}^2}{100 S_n} \quad (\text{III-4})$$

Avec :

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

f : La fréquence de service du transformateur.

$$L = \frac{L_{tot}}{n}$$

n : est le nombre d'élément

• L'inductance mutuelle

Les inductances mutuelles seront calculées par la fonction empirique suivante :

$$\frac{M_{ij}}{L} = f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (\text{III-5})$$

Qui est représentée sur la (fig-III-1-b)

Où : L : est l'inductance propre d'un élément

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

b : est la distance entre l'enroulement et le noyau (figure III-1-a)

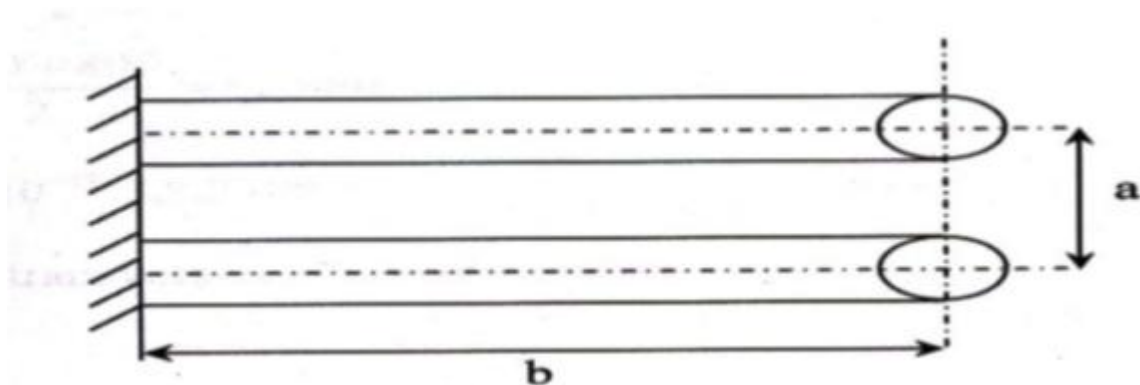
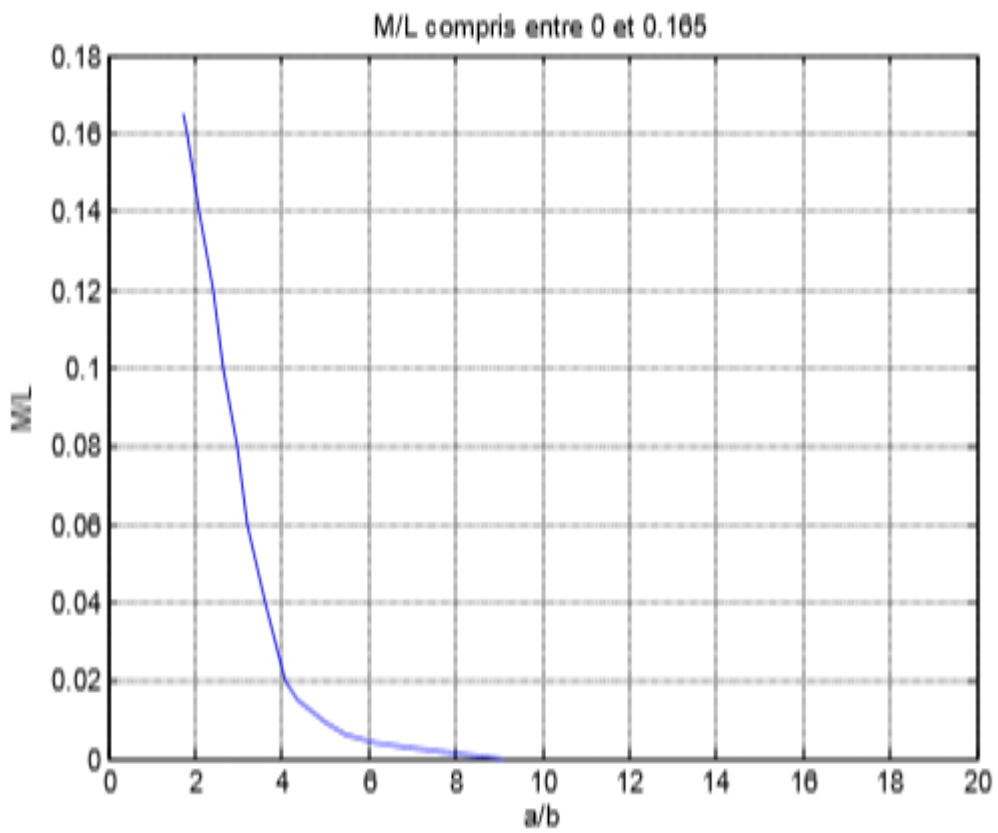
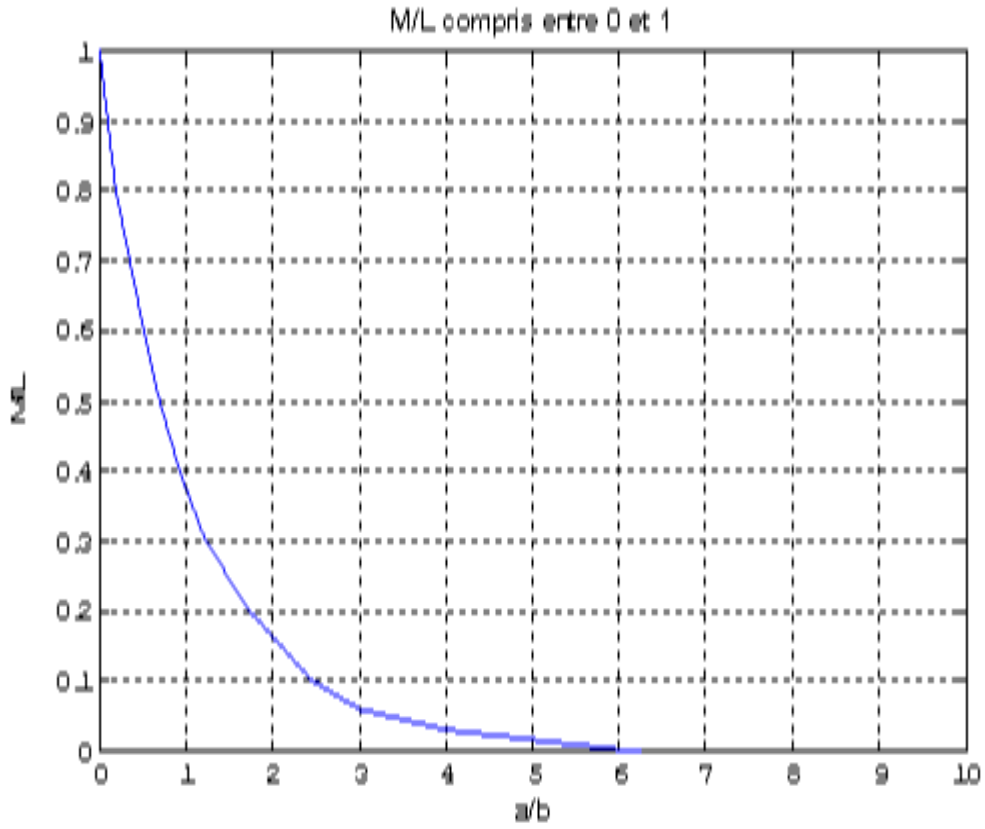


Figure III-1-a : disposition schématique des spires



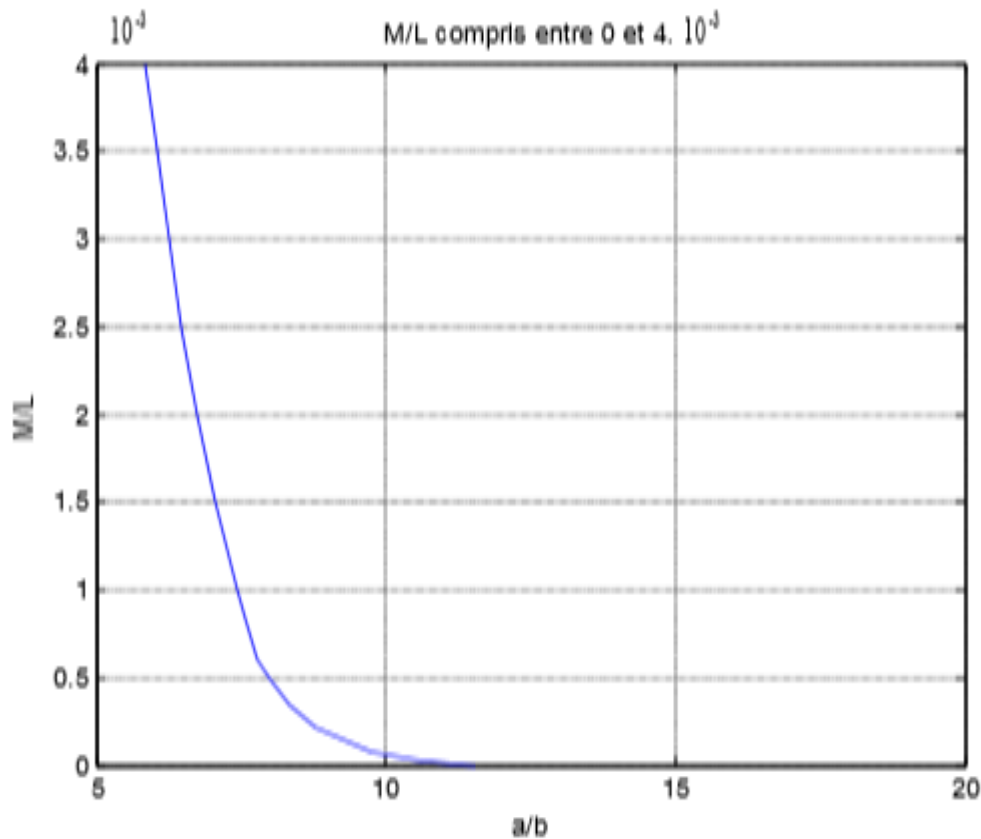


Figure III-1-b : Représentation de la fonction $\frac{M_{ij}}{L} = f\left(\frac{a}{b}\right)$

C-Détermination des capacités transversales C et longitudinales K

La capacité C entre l'enroulement et le noyau est donné par [13] :

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot l \frac{d_1 + d_2}{d_1 - d_2} \quad (\text{III-6})$$

Où :

d_1 et d_2 : Sont respectivement les diamètres intérieurs de l'enroulement et du noyau.

l : est la longueur totale de l'enroulement.

ε_r : est la permittivité relative du matériau ($\varepsilon_r = 3.9$)

ε_0 : est la permittivité absolue de l'air ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)

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

Sachant que :

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}} \quad (III-7)$$

La capacité d'entrée des transformateurs est donnée par :

$$C_{enr.tr} = \frac{Q_{x=0}}{U_0} = \frac{1}{U_0} k_{tot} \left. \frac{du}{dx} \right| = \frac{1}{U_0} K_{tot} U_0 \alpha \quad (III-8)$$

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

On aura :

$$K_{tot} = \frac{C_{tot}}{\alpha^2} \quad (III-9)$$

Donc connaissant α et $C_{enr.tr}$, on peut facilement déterminer K.

III-1-4-Calcul numérique des paramètres du transformateur

A-Calcul de la résistance de l'enroulement R

La résistance totale de l'enroulement sera calculée par la formule (III-1) :

$$R_0 = \frac{\Delta P_{CC} U_n^2}{S_n^2} = \frac{245 \cdot 10^3 (115 \cdot 10^3)^2}{(63 \cdot 10^6)^2} = 0,8163 \Omega$$

$$R_0 = 0.8163 \Omega$$

Et : $R_{\Delta} = K_1 \cdot R_0$

$$K_1 = \frac{1.0575}{\sqrt{\omega t_h}} = \frac{1.0575}{\sqrt{2\pi f t_h}} = \frac{1.0575}{\sqrt{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 100}} = 5,9678 \quad (\text{Avec : } t_h = 100 \mu s)$$

$$K_1 = 5.9678$$

$$R_{\Delta} = K_1 \cdot R_0 = 5,9678 \cdot 0,8163 = 4,8715 \Omega$$

$$R_{\Delta} = 4,8715 \Omega$$

Comme l'enroulement est constitué de dix éléments donc la résistance d'un élément est :

$$R = \frac{R_{\Delta}}{n} = \frac{4,8715}{10} = 0.48715 \Omega \text{ où : } R = 0.48715 \Omega$$

B-Calcul de l'inductance L

L'inductance totale de l'enroulement en tenant compte de l'influence des autres inductances est donnée par l'expression (III-3) :

$$L_{CC} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{CC}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{2(3,14).50} \frac{10,5}{100} \frac{(115.10^3)^2}{63.10^6} = 0,07019H$$

Et: $K_2=0,65$

D'où : $L_{tot} = K_2 \cdot L_{CC} = 0,65 \cdot 0,07019 = 0,0456H$

Pour un élément :

$$L = \frac{L_{tot}}{n} = \frac{0,0456}{10} = 0,00456H$$

C'est-à-dire : $L=4560\mu H$

C-Calcul des inductances mutuelles M_{ij}

Pour calculer les inductances mutuelles M_{ij} il faut calculer d'abord les coefficients de mutualités $\frac{M_{ij}}{L}$ avec la fonction empirique suivante :

$$\frac{M_{ij}}{L} = f\left(\frac{a}{b}\right)$$

Déterminons d'abord a et b qui dépendent des caractéristique géométriques de l'enroulement et du noyau :

La longueur d'un élément de l'enroulement est donc :

$$a = \frac{\text{la longueur de l'enroulement}}{\text{le nombre d'élément}} = \frac{l_{enr}}{n} = \frac{1805}{10} = 180,5$$

$$a = 180,5$$

La valeur de b sera donné par :

$$b = r_{moyHT} - r_n$$

Où : $r_{moyHT} = \frac{r_{extHT} + r_{intHT}}{2} = \frac{635 + 526}{2} = 580,5mm$

$r_{moyHT} = 580.5mm$

$b = r_{moyHT} - r_n = 580.5 - 382 = 198,5$

D'où : $b = 198.5$

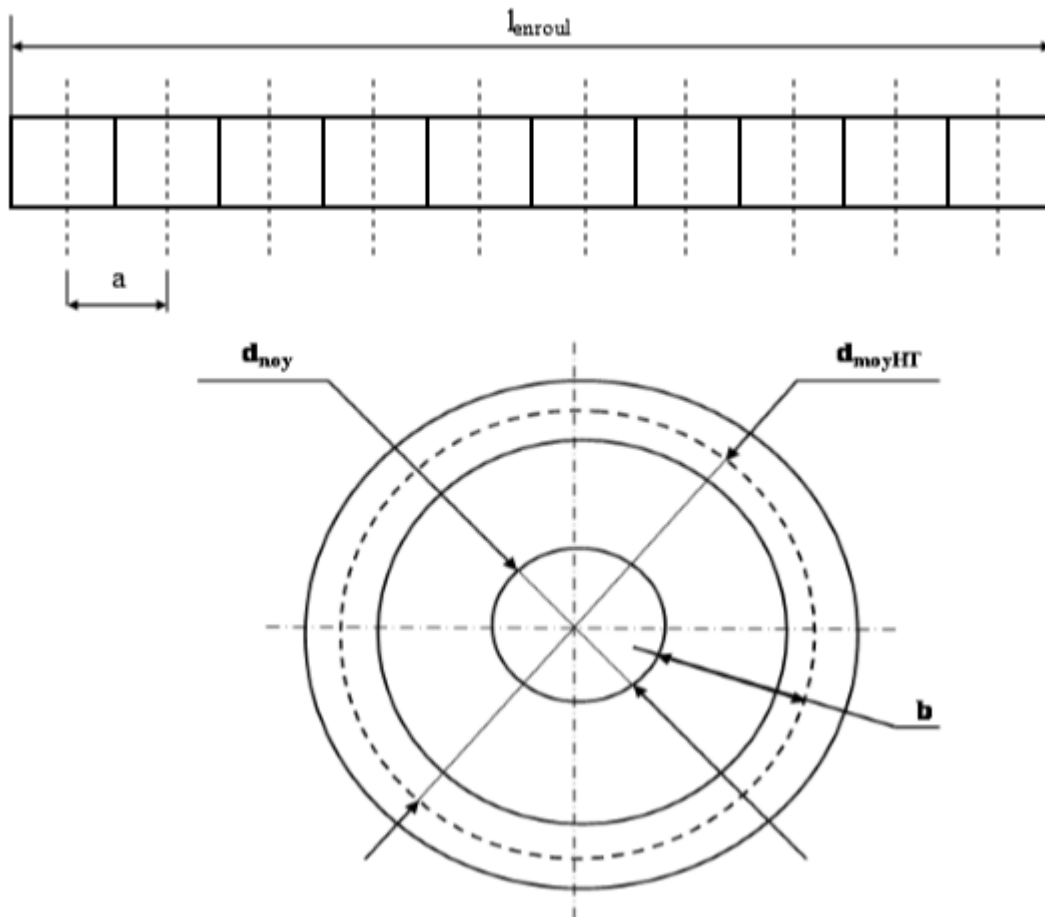


Figure III-2: Représentation des distance a et b sur la disposition schématique des éléments de l'enroulement

Connaissant a et b et en utilisant les données de la figure (III-1-b), on déterminera les valeurs des inductances mutuelles qui seront résumées dans le tableau ci-dessous :

L'inductance propre d'un élément de l'enroulement sans l'influence des autres inductances est donnée par :

$$L' = \frac{L}{1 + \sum \sigma} = \frac{4560}{1 + 0,7263} = 2641,4\mu H$$

Et donc : $L' = 2641,4\mu H$

Remarque : Le chiffre 1 au dénominateur exprime l'influence de l'inductance sur elle-même, c'est-à-dire l'inductance mutuelle.

N° de la mutuelle	a [mm]	b [mm]	a/b	Mij [μH]	$\sigma = \frac{Mij}{L}$
1	180.5	198.5	0.91	103	0.39
2	361		1.81	47.54	0.18
3	540		2.72	26.41	0.1
4	722		3.63	9.77	0.037
5	902.5		4.54	2.64	0.01
6	1083		5.45	1.32	$5 \cdot 10^{-3}$
7	1263.5		6.36	0.72	$2.75 \cdot 10^{-3}$
8	1444		7.27	0.31	$1.2 \cdot 10^{-3}$
9	1624.5		8.18	0.09	$0.35 \cdot 10^{-3}$
					$\sum \sigma = 0,72633$

Tableau III-1 : Représente les valeurs de M_{ij}

D- Calcul des capacités transversales C et longitudinales K

• Calcul la capacité transversal C

En appliquant la relation (III-6), calculons la capacité transversale C de l'enroulement :

$$C_{total} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{intHT} + d_n}{d_{intHT} - d_n}$$

$$= 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 1,805 \cdot \frac{1052 + 764}{1052 - 764} = 7,859 \cdot 10^{-7} = 1,2310^{-9} F$$

$$C_{total} = 0,00123 \mu F$$

$$D'où : C_{el} = \frac{C_{total}}{n+1} = \frac{0,00123}{10+1} = \frac{0,00123}{11} = 0,000112 \mu F$$

$$Soit : C_{el} = 0,000112 \mu F$$

Calculons maintenant C'_{enrc} la capacité entre l'enroulement et la cuve du transformateur

$$C'_{enrc} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{cuve} + d_{extHT}}{d_{cuve} - d_{extHT}}$$

$$= 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 1,805 \cdot \frac{4270 + 1270}{4270 - 1270} = 0,361 \cdot 10^{-9} F$$

$$C'_{enrc} = 0,000361 \mu F$$

Calcul de C_{enrc} la capacité entre un élément de l'enroulement et la cuve du transformateur :

$$C'_{el} = \frac{C'_{enrc}}{m+1} = \frac{0,000361}{10+1} = \frac{0,000361}{11} = 0,000032 \mu F$$

D'où la capacité totale de chaque élément de l'enroulement du transformateur est :

$$C_{\Sigma el} = C_{el} + C'_{el} = 0,000112 + 0,000032 = 0,000144 \mu F$$

Et donc : $C_{\Sigma el} = 0,000144 \mu F$

• Calcul la capacité longitudinale K

Connaissant la valeur de C_{Σ} on peut passer au calcul de K par la formule qui suit :

$$K = \frac{C_{\Sigma}}{\alpha^2}$$

Où : C_{Σ} est la capacité totale de l'enroulement

La valeur de facteur α se détermine d'après la courbe caractéristique de la répartition initiale de la tension figure (III-3) dressé à partir de tableau donné par le constructeur.

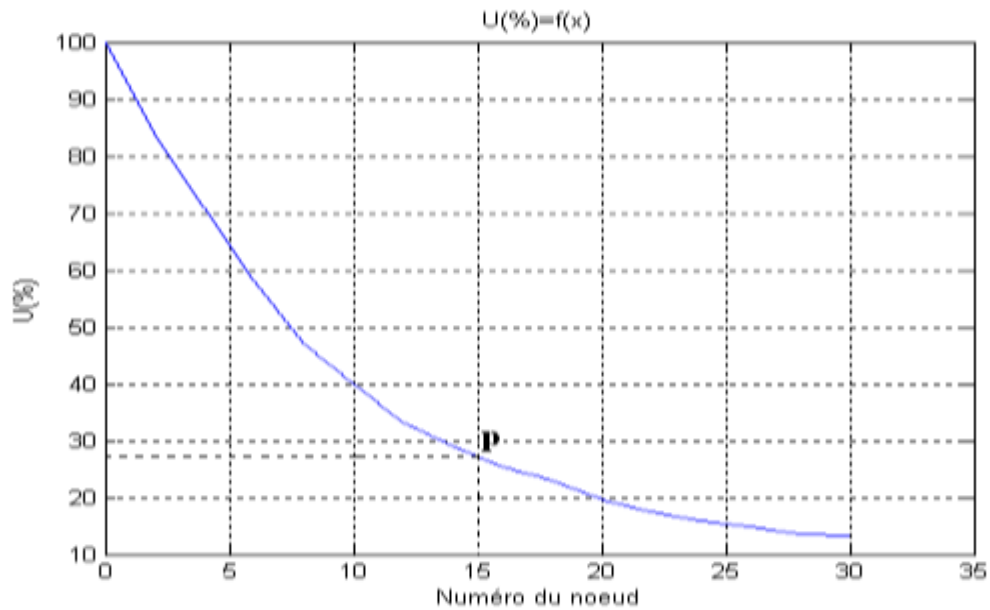


Figure III-3 : Répartition initiale de la tension fournie par le constructeur

N° du nœud	U(%)
A-0	100
2-0	84
4-0	71
6-0	58
8-0	47
10-0	40
12-0	33,2
14-0	29
16-0	25,3
18-0	23
20-0	19,7
22-0	17,6
24-0	15,8
26-0	15
28-0	13,5
30-0	13,4

Tableau III-2 : Répartition initiale de la tension

- Détermination de facteur α

Les valeurs de α sont obtenus à partir de la fonction suivant :

$$F(\alpha) = \frac{\text{sh}[\alpha(1-x)]}{\text{sh}(\alpha \cdot 1)} - U(x)$$

On prend un point P(0,5 ; 0,275) dans la courbe représenté sur la figure(III-3) et on cherche la valeur de α pour avoir $F(\alpha) = 0$, les résultats obtenues sont mentionnés dans le tableau suivant :

α	2,3	2,38	2,4095	2,5	2,6
$F(\alpha)$	0,0352	0,0120	0	-0,0097	-0,0492

Tableau III-3 :Détermination de facteur α

$F(\alpha) = 0$ Pour $\alpha = 2,4095$

$$\text{Donc : } K_{\Sigma} = \frac{C_{\Sigma}}{\alpha^2} = \frac{0,00144}{2,4095^2} = 0,00024\mu F$$

Où : K_{Σ} est la capacité longitudinale totale de l'enroulement

L'enroulement de transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une capacité longitudinale :

$$K_{el} \cdot n = 0,00024 \cdot 10 = 0,0024\mu F \quad d'o\grave{u} \quad K_{el} = 0,0024\mu F$$

III-2-Modélisation des enroulements des transformateurs

III-2-1- 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. Son schéma équivalent sera représenté par la figure (III-4).

Démonstration :

Soit :

U_i : l'onde de tension incidente.

U_r : l'onde de tension réfléchie.

U_t : l'onde de tension transmise.

$$\text{Et : } \quad i_t = \frac{U_t}{Z_c} \quad (\text{III-1})$$

$$i_i = \frac{U_i}{Z_c} \quad (\text{III-2})$$

$$i_r = \frac{U_r}{Z_c} \quad (\text{III-3})$$

Z_c : impédance de la charge

Et i_i, i_r, i_t leurs courants respectifs :

$$\text{On a : } U_t = U_i + U_r \quad (\text{III-4})$$

$$i_t = i_i - i_r \quad (\text{III-5})$$

En injectant (III-2) et (III-3) dans l'équation (III-5), on aura :

$$i_t = \frac{U_i}{Z_c} - \frac{U_r}{Z_c} = \frac{1}{Z_c} (U_i - U_r) \quad (\text{III-6})$$

En multipliant les deux membres de l'équation (III-4) par $\frac{1}{Z_c}$ et en additionnant l'équation obtenue avec l'équation (III-6), on obtient :

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

$$\frac{1}{Z_c} U_t + i_t = \frac{2}{Z_c} U_i$$

$$2U_i = U_t + Z_c i_t \quad (\text{III-7})$$

En posant : $2U_i = U_0$

$$\text{On aura : } U_0 = U_t + Z_c i_t \quad (\text{III-8})$$

Le schéma électrique correspondant à cette expression est le suivant :

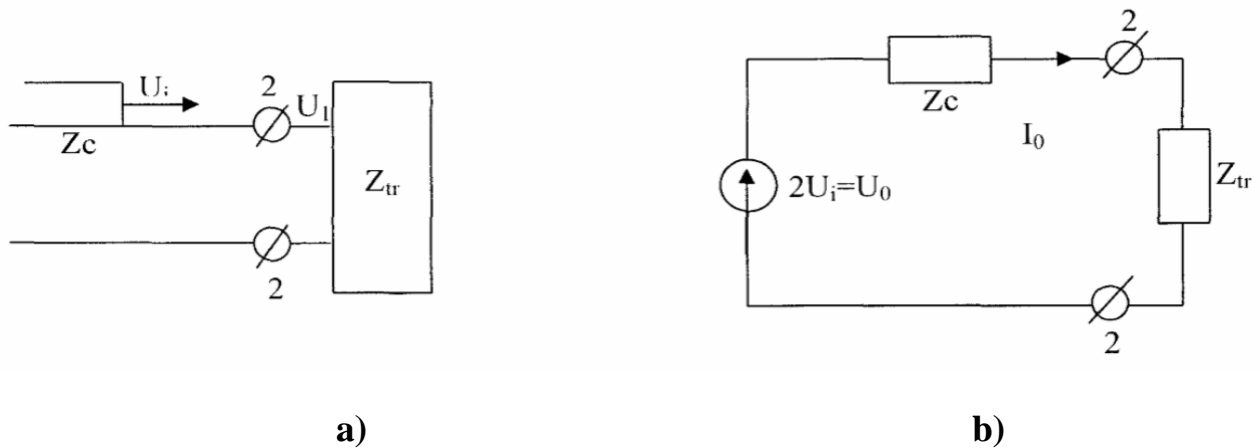


Figure III-4 : Schéma équivalent de la ligne à élément localisé lors d’une surtension selon PETERSON

III-2-2-Mise en équation du circuit électrique

L’application des deux lois de Kirchhoff au circuit équivalent de l’enroulement, nous conduira aux deux systèmes d’équations suivants (figure III-5)

a- Pour les tensions

Sachant que : $U_p = U_1$ (d’après la figure III-5)

i_0 et u_0 sont respectivement le courant et la tension de la surtension appliquée.

$$I_p = e^{\frac{\ln U_p - 6,29}{\alpha}} \tag{III-9}$$

$$u_0 = U_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \tag{III-10}$$

Donc :

$$u_0 - u_p = u_0 - u_1$$

Et :

$$u_0 - u_1 = Z_c - i_0 \implies i_0 = \frac{u_0 - u_1}{Z_c} \tag{III-11}$$

$$u_1 - u_2 = L_1 \frac{d}{dt}(i_0 - i_p) \tag{III-12}$$

On:

$$U_1 = U_P = Z_P \cdot I_P \quad \longrightarrow \quad I_P = \frac{U_1}{Z_P} \quad (\text{III-13})$$

En injectant (III-10) et (III-12) dans (III-11) on trouve :

$$u_1 - u_2 = L_1 \frac{d}{dt} \left(\frac{u_0}{Z_c} - \frac{u_1}{Z_c} - i_p \right) \quad (\text{III-14})$$

En développant on a :

$$u_1 - u_2 = \frac{L_1}{Z_c} \left(\frac{du_0}{Z_c} - \frac{du_1}{Z_c} \right) - L_1 \frac{di_p}{dt} \quad (\text{III-15})$$

On injecte (III-9) et (III-10) dans (III-15), après calcul on aboutit à l'équation suivante :

$$u_1 - u_2 = U_0 \frac{L_1}{Z_c} (\beta e^{-\beta t} - \alpha e^{-\alpha t}) - \frac{L_1}{Z_c} \frac{du_1}{dt} - \frac{L_1}{\alpha Z_P} \quad (\text{III-16})$$

On pose

$$A = U_0 \frac{L_1}{Z_c} (\beta e^{-\beta t} - \alpha e^{-\alpha t}) - \frac{L_1}{\alpha Z_P} \quad (\text{III-17})$$

Et donc :

$$u_1 - u_2 = A - \frac{L_1}{Z_c} \frac{du_1}{dt} \quad (\text{III-18})$$

Les équations différentielles des tensions dans le transformateur sont :

$$U_2 - U_3 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + \dots + M_{19} \frac{di_9}{dt} + M_{110} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_3 - U_4 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + \dots + M_{29} \frac{di_9}{dt} + M_{210} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_4 - U_5 = Ri_3 + L \frac{di_3}{dt} + M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt} + \dots + M_{39} \frac{di_9}{dt} + M_{310} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_5 - U_6 = Ri_4 + L \frac{di_4}{dt} + M_{41} \frac{di_1}{dt} + M_{42} \frac{di_2}{dt} + M_{43} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{49} \frac{di_9}{dt} + M_{410} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_6 - U_7 = Ri_5 + L \frac{di_5}{dt} + M_{51} \frac{di_1}{dt} + M_{52} \frac{di_2}{dt} + M_{53} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{59} \frac{di_9}{dt} + M_{510} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_7 - U_8 = Ri_6 + L \frac{di_6}{dt} + M_{61} \frac{di_1}{dt} + M_{62} \frac{di_2}{dt} + M_{63} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{69} \frac{di_9}{dt} + M_{610} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_8 - U_9 = Ri_7 + L \frac{di_7}{dt} + M_{71} \frac{di_1}{dt} + M_{72} \frac{di_2}{dt} + M_{73} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{79} \frac{di_9}{dt} + M_{710} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_9 - U_{10} = Ri_8 + L \frac{di_8}{dt} + M_{81} \frac{di_1}{dt} + M_{82} \frac{di_2}{dt} + M_{83} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{89} \frac{di_9}{dt} + M_{810} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_{10} - U_{11} = Ri_9 + L \frac{di_9}{dt} + M_{91} \frac{di_1}{dt} + M_{92} \frac{di_2}{dt} + M_{93} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{98} \frac{di_8}{dt} + M_{910} \frac{di_{10}}{dt}$$

$$U_{11} - 0 - Ri_{10} + L \frac{di_{10}}{dt} + M_{101} \frac{di_1}{dt} + M_{102} \frac{di_2}{dt} + M_{103} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{108} \frac{di_8}{dt} + M_{109} \frac{di_{10}}{dt}$$

$u_{12} = 0$ (Relié à la terre)

Vue que les inductances mutuelles $(M_{ij}) i = \overline{1 \dots 10} ; j = \overline{1 \dots 10} ; i \neq j$ sont réciproques, on aura : $M_{ij} = M_{ji}$

• **Généralisation :**

Généralisation le système d'équations pour n (éléments de bobine) montées en série ; comme suit:

$$u_n - u_{n+1} = R \cdot i_n + L \frac{di_n}{dt} + \sum_{m=1}^n \sum_{m \neq 1}^n M_{nm} \frac{di_m}{dt} \dots \dots \dots (I)$$

Avec : $1 \leq n \leq 10$

b- pour les courants :

Au nœud (2) à l'entrée du transformateur on a :

$$i_0 - i_p - i_1 = (K + C + C_e + C_{poste}) \frac{du_2}{dt} \tag{III-19}$$

On a :

$$u_0 = i_0 \cdot Z_c \tag{III-20}$$

On injectant (III-19) et (III-11) dans (III-18) en prenant en considération que $u_1 = u_p$, on trouve l'équation suivante :

$$\left(\frac{U_0}{Z_c} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) - \frac{U_p}{Z_c} - I_p \right) - i_1 = (K + C + C_e + C_{poste}) \frac{du_2}{dt} \tag{III-21}$$

Systèmes d'équation (II) des différents courants :

$$i_1 - i_2 = -K \frac{du_2}{dt} + (2K + C) \frac{du_3}{dt} - K \frac{du_4}{dt}$$

$$i_2 - i_3 = -K \frac{du_3}{dt} + (2K + C) \frac{du_4}{dt} - K \frac{du_5}{dt}$$

$$i_3 - i_4 = -K \frac{du_4}{dt} + (2K + C) \frac{du_5}{dt} - K \frac{du_6}{dt}$$

$$i_4 - i_5 = -K \frac{du_5}{dt} + (2K + C) \frac{du_6}{dt} - K \frac{du_7}{dt}$$

$$\begin{aligned}
 i_5 - i_6 &= -K \frac{du_6}{dt} + (2K + C) \frac{du_7}{dt} - K \frac{du_8}{dt} \\
 i_6 - i_7 &= -K \frac{du_7}{dt} + (2K + C) \frac{du_8}{dt} - K \frac{du_9}{dt} \\
 i_7 - i_8 &= -K \frac{du_8}{dt} + (2K + C) \frac{du_9}{dt} - K \frac{du_{10}}{dt} \\
 i_8 - i_9 &= -K \frac{du_9}{dt} + (2K + C) \frac{du_{10}}{dt} - K \frac{du_{11}}{dt} \\
 i_9 - i_{10} &= -K \frac{du_{10}}{dt} + (2K + C) \frac{du_{11}}{dt}
 \end{aligned}$$

• **Généralisation :**

Le système (II) sera généralisé à élément comme suit :

Pour $1 \leq n \leq 9$ on a :

$$i_n - i_{n+1} = -K \frac{du_{n+1}}{dt} + (2K + C) \frac{du_{n+2}}{dt} - K \frac{du_{n+3}}{dt} \dots \dots \dots \text{(II)}$$

III-2-3-Ecriture matricielle des équations du circuit électrique

a) Pour les tensions

$$\begin{bmatrix} U_1 - U_2 - A \\ U_2 - U_3 - R_{i1} \\ U_3 - U_4 - R_{i2} \\ U_4 - U_5 - R_{i3} \\ U_5 - U_6 - R_{i4} \\ U_6 - U_7 - R_{i5} \\ U_7 - U_8 - R_{i6} \\ U_8 - U_9 - R_{i7} \\ U_9 - U_{10} - R_{i8} \\ U_{10} - U_{11} - R_{i9} \\ U_{11} - 0 - R_{i10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_p & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & L & M_{12} & M_{13} & \dots & \dots & M_{19} & M_{110} \\ 0 & M_{22} & L & M_{23} & \dots & \dots & M_{29} & M_{210} \\ 0 & M_{32} & M_{33} & L & \dots & \dots & M_{39} & M_{310} \\ 0 & M_{42} & M_{43} & M_{44} & \dots & \dots & M_{49} & M_{410} \\ 0 & M_{52} & M_{53} & M_{54} & \dots & \dots & M_{59} & M_{510} \\ 0 & M_{62} & M_{63} & M_{64} & \dots & \dots & M_{69} & M_{610} \\ 0 & M_{72} & M_{73} & M_{74} & \dots & \dots & M_{79} & M_{710} \\ 0 & M_{82} & M_{83} & M_{84} & \dots & \dots & M_{89} & M_{810} \\ 0 & M_{92} & M_{93} & M_{94} & \dots & \dots & L & M_{810} \\ 0 & M_{102} & M_{103} & M_{104} & \dots & \dots & M_{109} & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_p \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \\ i_{10} \end{bmatrix}$$

b)-Pour les Courants

$$\begin{bmatrix} i_0 - i_p - i_1 \\ i_1 - i_2 \\ i_2 - i_3 \\ i_3 - i_4 \\ i_4 - i_5 \\ i_5 - i_6 \\ i_6 - i_7 \\ i_7 - i_8 \\ i_8 - i_9 \\ i_9 - i_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (k + c + c_p + c_{poste}) & -k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k & (2k + c) - k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k & (2k + c) - k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k & (2k + c) - k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k & (2k + c) - k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k & (2k + c) - k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k & (2k + c) - k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k & (2k + c) - k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k & (2k + c) - k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k & (2k + c) - k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k & (2k + c) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \\ U_9 \\ U_{10} \\ U_{11} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$C = 0.000144 \mu F$$

$$C_e = 0.001 \mu F$$

$$K = 0.0024 \mu F$$

$$C_{Poste} = 0.001 \mu F$$

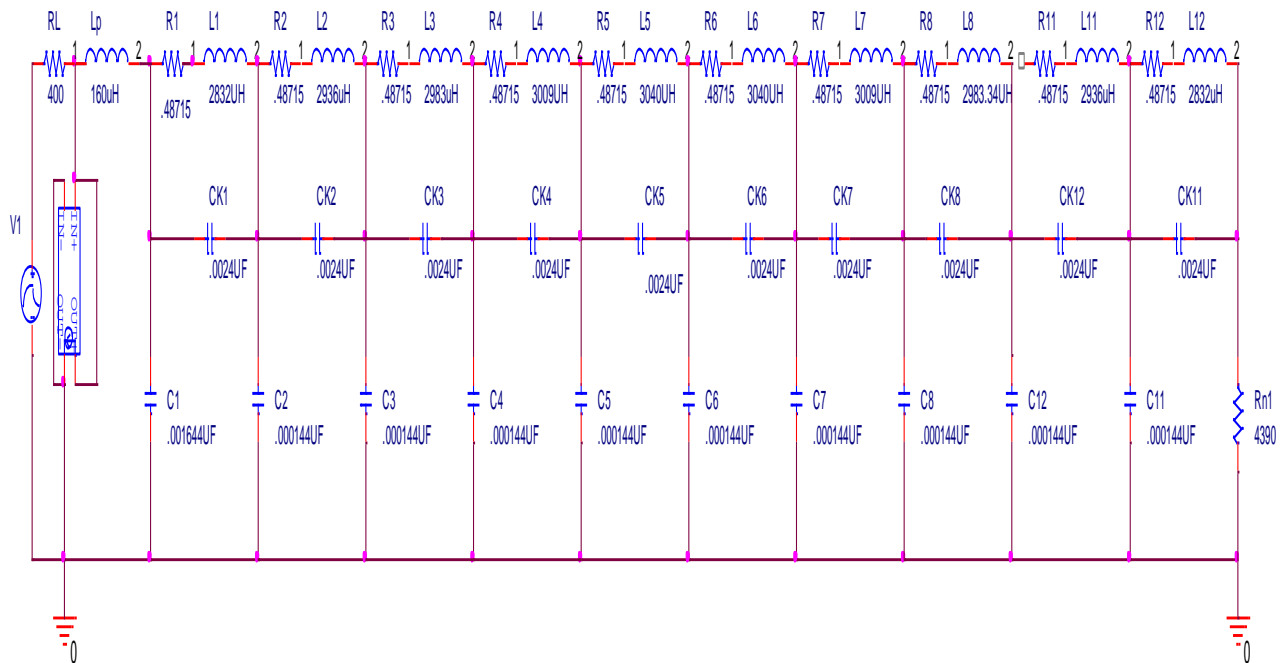


Figure III-5 : Schéma équivalent de l'enroulement soumis à des surtensions

Avec :

P : est le parafoudre ;

C_{poste} : est la capacité d'entrée du poste ;

N : le neutre de l'enroulement;

L, R, C, K : sont respectivement la résistance, l'inductance propre, la capacité transversale, et la capacité longitudinale de l'enroulement ;

M_{ij} : inductance mutuelle ;

Z_c : est la capacité de la ligne considérée .

Chapitre IV

Détermination du régime de neutre de
l'enroulement l'or d'application des surtensions

Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'étude des différents régimes de neutre, qui joue un rôle très important dans les réseaux électriques. Lors d'un défaut d'isolement, où de la mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement de neutre à la terre.

La liaison de neutre à la terre est adoptée en réalisant un compromis entre trois exigences souvent contradictoires :

- Amortir convenablement les surtensions ;
- Limiter l'importance des dégâts et des perturbations dus à un défaut à la terre ;
- Permettre la réalisation de protection simple et sélective.

VI-Différents régime de neutre

Les réseaux électriques peuvent fonctionner en trois régime de neutre sont [14] :

- Le neutre qu'est directement mis à la terre ;
- Le neutre qu'est complètement isolé de terre ;
- Le neutre qu'est mis à la terre à travers une impédance.

IV-1- Le neutre est directement mis à la terre

Supposons qu'un conducteur d'une ligne de transmission vienne en contacte accidentellement avec la terre. [14]

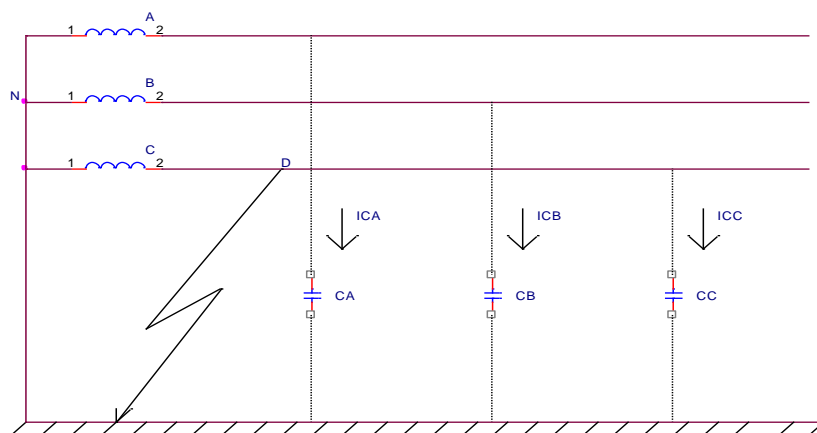


Figure IV-1 : Neutre mis à la terre

Soit D est le point où la phase C est mise à la terre, dans ce cas, un courant assez grand, se crée dans cette phase. Ce courant se ferme dans le circuit CDTNC ce crée à cause de la mise à la terre de la phase C.

Dans les réseaux électriques, il existe toujours deux types de courant :

- Le courant des charges.
- Le courant des capacités.

La somme de ces courants triphasés, dans le régime normale, sont égaux à zéro.

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \rightarrow \sum \dot{I}_k = 0$$

$$\dot{I}_{c_A} + \dot{I}_{c_B} + \dot{I}_{c_C} = 0 \rightarrow \sum I_{ck} = 0$$

Mais, dans le cas considéré (court-circuit monophasé), ces sommes deviennent plus égales à zéro.

$$\sum \dot{I}_k \neq 0$$

$$\sum I_{ck} \neq 0$$

C'est-à-dire, le courant dans les conducteurs du neutre, n'est plus égal à zéro. Ce grand courant fait fonctionner la protection qui débranche cette partie endommagé du réseau électrique.

Dans ce régime endommagé la tension de la phase C diminue jusqu'à zéro (0), les tensions des autres phases et du neutre ne changent pas.

$$U_C = 0, U_A = U_B = U_{PH}, U_N = 0$$

Le diagramme vectoriel est représenté sur la figure suivante :

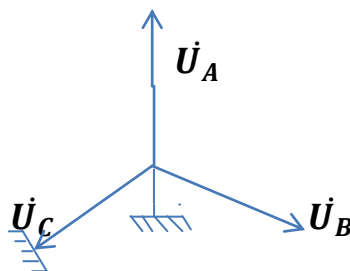


Figure IV-2 : diagramme vectoriel

IV-2) - Le neutre est complètement isolé de la terre :

Dans ce cas, le circuit CDTNC n'est pas fermé, le courant de la phase C, se ferme à travers des capacités C_A et C_B . Ce courant n'est pas grand, par conséquent, dans le réseau avec le neutre isolé de la terre, la mise à la terre d'une phase n'est pas un court-circuit. [14]

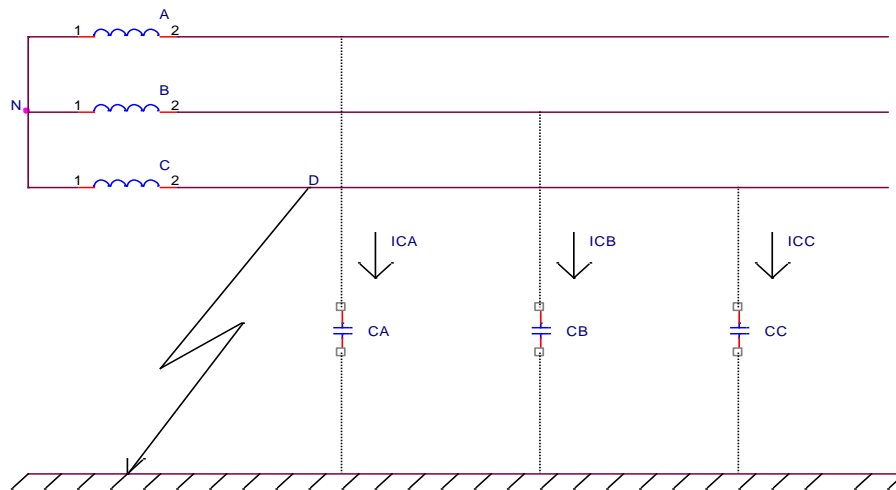


Figure IV-3 : Neutre isolé de la terre

Le réseau électrique peut fonctionner dans ce régime pendant une durée de temps, mais ce régime doit être éliminé (le régime normale doit être établi plutôt que possible), c'est pour cette raison qu'on fait les contrôles sur les isolations des phases. Autrement dit, dans ces réseaux, la protection fonctionne sur la signalisation (pas sur le débranchement).

Dans ce réseau, lors de la mise à la terre d'une phase, la tension de cette phase diminue jusqu'à zéro, la tension du neutre augmente jusqu'à la tension de phase et les tensions des autres phases (phases saines) augmentent jusqu'à la tension composée.

$$\begin{cases} U_C = 0 \\ U_A = U_B = \sqrt{3}U_{ph} \\ U_n = U_{ph} \end{cases}$$

Le diagramme vectoriel est représenté sur la figure suivante :

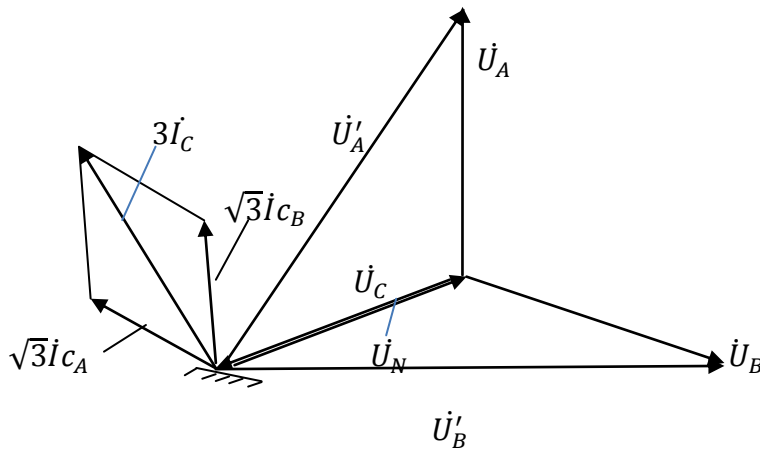


Figure IV-4 : Diagramme vectoriel

D'habitude, sur le point de court-circuit un arc électrique se crée. Dans le cas, où cet arc n'est pas stable, une surtension se crée à cause de l'allumage et l'extinction consécutive de l'arc, la valeur de cette forme de surtension d'amorçage d'arc, atteint une valeur jusqu'à $(2,3 \div 3,5)U_{ph}$, qui présente un danger pour les isolations des équipements du réseau électrique.

IV-3- Le neutre est mis à la terre à travers une impédance

Lors de la mise à la terre du neutre du réseau à travers une impédance, le circuit CDTNC, devient fermé à travers de cette impédance. Le courant de cette connexion accidentelle est un court- circuit. [14]

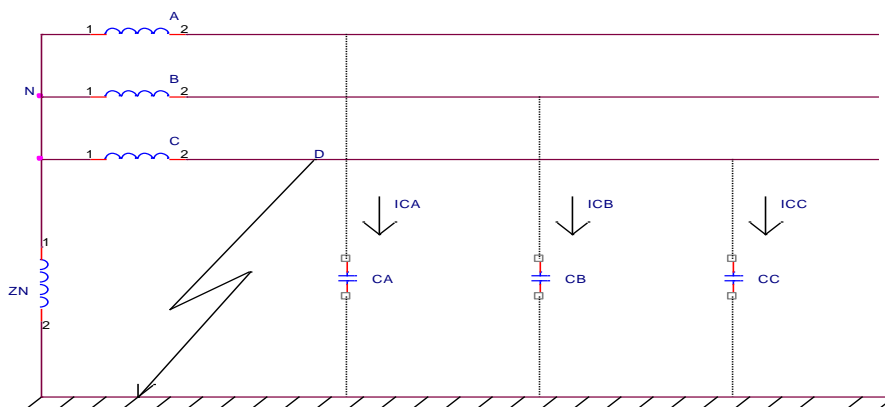


Figure IV-5 : Neutre mis à la terre à travers une impédance

Le courant de court-circuit atteint aussi des valeurs assez grandes, mais ces valeurs sont inférieures à des valeurs correspondantes, dans le cas de neutre est directement mis à la terre, par ce que ce courant de court-circuit est limité par l'impédance de neutre.

L'impédance de neutre doit être choisie de façon que le courant de court-circuit soit suffisant pour faire fonctionner la protection.

Les changements des tensions sont comme suivant :

$$\begin{cases} U_C = 0 \\ U_A = U_B = \sqrt{3} U_{ph} \\ U_N = U_{Ph} \end{cases}$$

Le diagramme vectoriel est représenté sur la figure suivante :

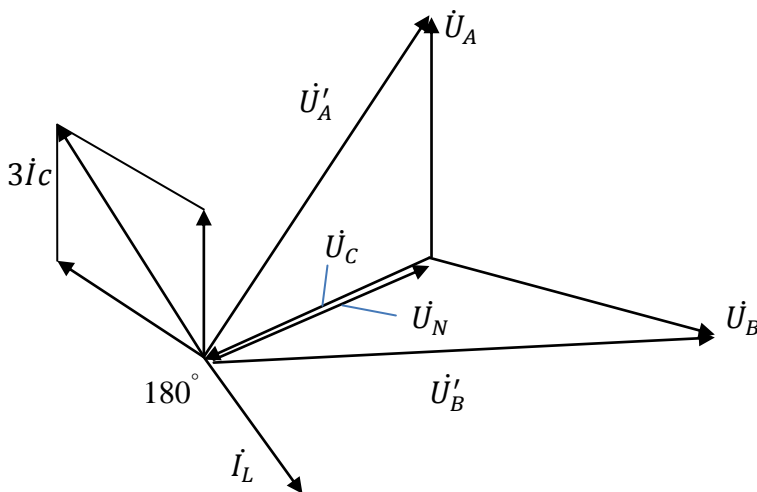


Figure IV-6 : Diagramme vectoriel

D'habitude, comme l'impédance du neutre, on utilise une bobine d'inductance (bobine de Peterson). Elle doit être choisie de façon que $I_L \approx 3I_C$, il faut éviter d'avoir $I_L = 3I_C$, car dans ce cas, un régime de résonance se crée dans le réseau considéré. Une surtension d'amorçage d'arc se crée aussi, mais la valeur ne dépasse pas $(2.5 \div 2.7) U_{ph}$.

Comme en voit l'impédance du neutre limite les courants de court-circuit et aussi les surtensions.

IV-2-Application des régimes de neutre

Dans les réseaux électriques de tension nominale jusqu'à 1KV, on applique tous les deux régimes du neutre.

- Dans les réseaux de tension nominale 380/220V, on utilise le neutre mis à la terre, car la population peut avoir des contacts avec ce réseau. Pour assurer la protection des gens on utilise ce régime du neutre.

- Les réseaux de courant nominal de 500 A, divisé à deux groupes :

- Où, $I_{cc} < 500 A$, on utilise le neutre isolé de la terre, ou mis à la terre à travers une impédance.
- Où, $I_{cc} > 500 A$, on utilise neutre mis à la terre.

Dans les réseaux de HT, on utilise le régime de neutre directement mis à la terre, pour augmenter la fiabilité de fonctionnement des protections (pour augmenter la sensibilité des relais). En ce qui concerne les réseaux de moyenne tension MT, on utilise le régime de neutre complètement isolé de la terre, par ce que ces réseaux occupent d'habitude des grandes territoires, par conséquent la probabilité de la création de court-circuit monophasé, et aussi assez grand. Pour assurer la continuité d'alimentation permanente des consommateurs, on utilise le régime de neutre complètement isolé de la terre. [14]

Chapitre V

Détermination et analyse des surtensions dans les transformateurs lors du schéma usuel et du nouveau schéma de protection

Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'étude de l'influence du régime de neutre sur les surtensions dans l'enroulement de transformateur et trouver la condition de concordance entre transformateur et l'impédance sur le neutre (R_n).

V-1- Schémas de simulation

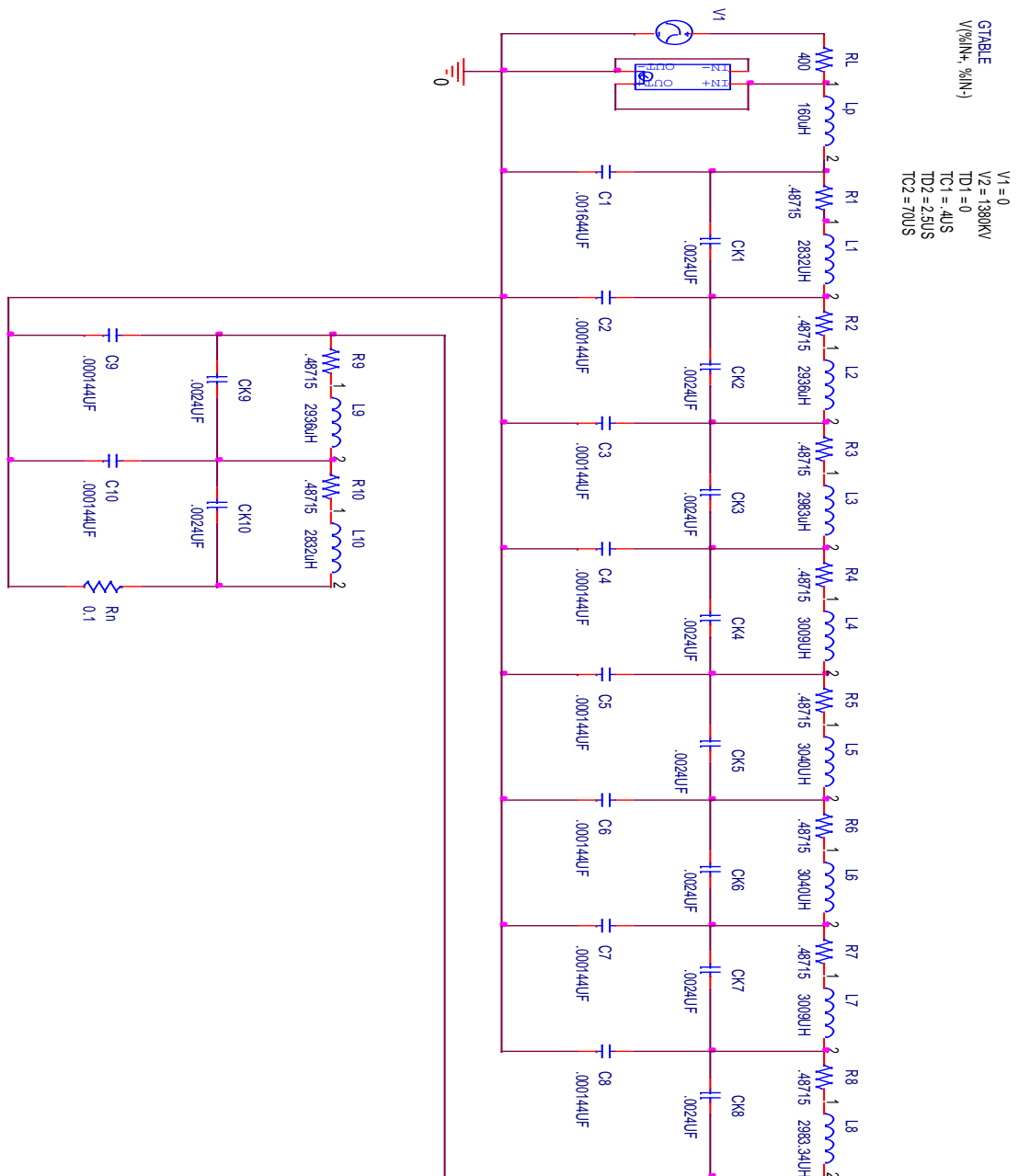


Figure V-1-a : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur soumis à des surtensions

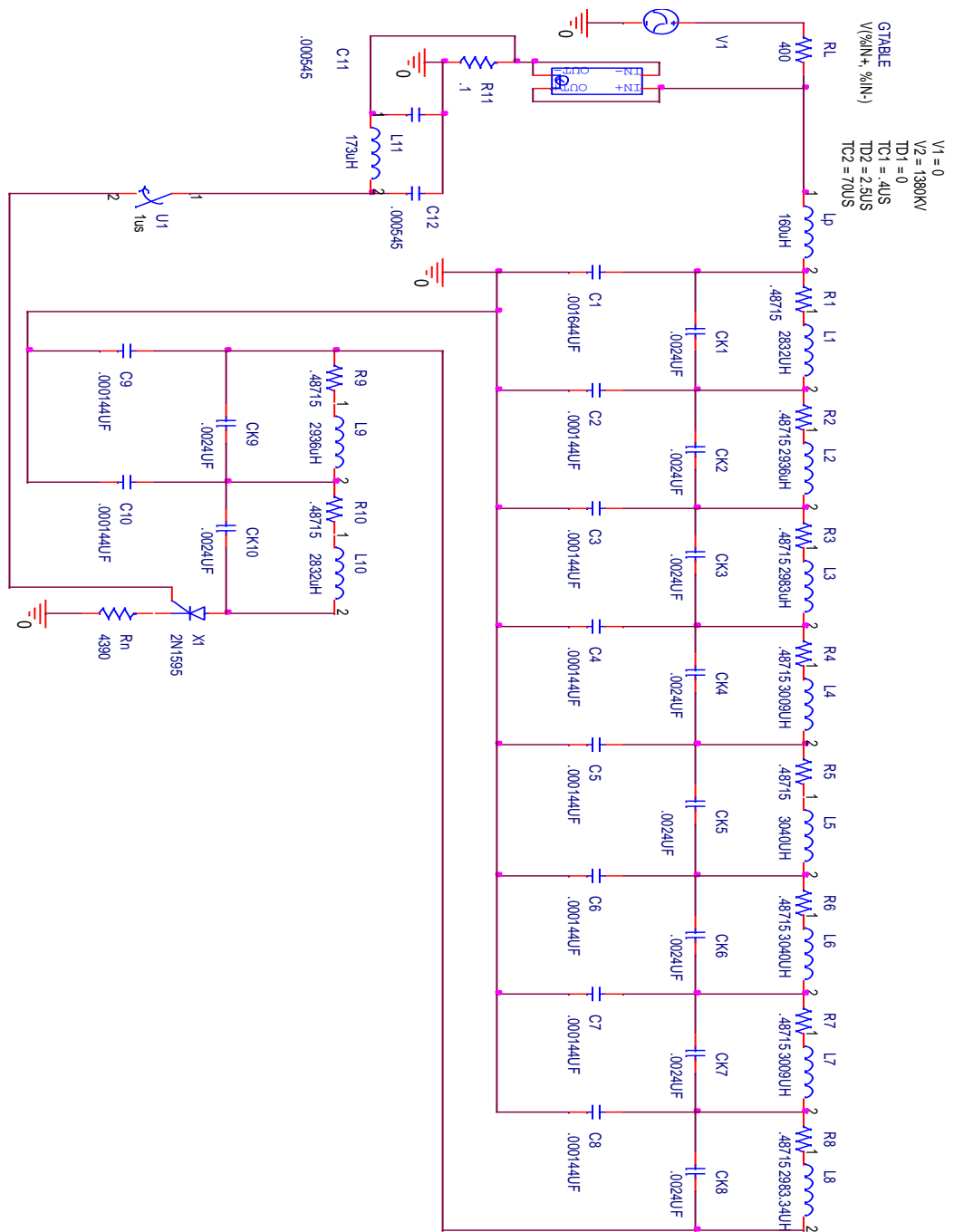


Figure V-1-b : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur avec thyristor soumis à des surtensions

V-2-Résultats de simulation

• Tableau de simulation

La variation de la tension (U (kV)) le long de l'enroulement dépend du régime de neutre (de la résistance $R_n(\Omega)$). Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau suivant :

Rn	0	100	500	1000	2000	4390	4500	4700	5000	6000	∞
U ₀	1380	1380	1380	1380	1380	1380	1380	1380	1380	1380	1380
U _P	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235
U ₁	412.05	411.86	411.43	411.37	411.58	411.97	411.98	412	412.03	412.11	412.62
U ₂	328.03	327.89	327.78	328.52	330.53	335.74	335.92	336.25	336.71	338.02	349.17
U ₃	295.87	296.60	299.61	303.73	310.93	321.18	321.50	322.07	322.87	325.19	345.6
U ₄	263.93	265.32	270.83	277.46	288.11	363	303.44	304.27	305	412.11	361
U ₅	229.01	231	239.1	248.37	263.46	294.09	296.11	297.91	300	307.83	375.76
U ₆	191.81	194.56	208.92	228.08	247.91	287.34	288.62	290.86	294.03	303.25	388.43
U ₇	153.40	156.85	206.09	226.95	238.80	277.10	278.64	281.33	285.5	296.24	398.78
U ₈	114.66	134.38	196.87	218.76	234	264.9	266.7	269.84	274.58	289.12	415.47
U ₉	75.77	107.06	183.6	207.91	225.04	262.67	264.92	268.86	274.42	290.40	427.17
U ₁₀	35.23	79.26	167.54	194.88	213.56	259.56	262	266.22	272.2	289.31	432.98
U ₁₁	0	54.8	156.73	184.79	208.07	255.18	257.73	262.19	268.45	286.40	432.98

Tableau A : La répartition des tensions le long de l'enroulement en dépendance du régime de neutre.

V-3-Les courbes de simulation

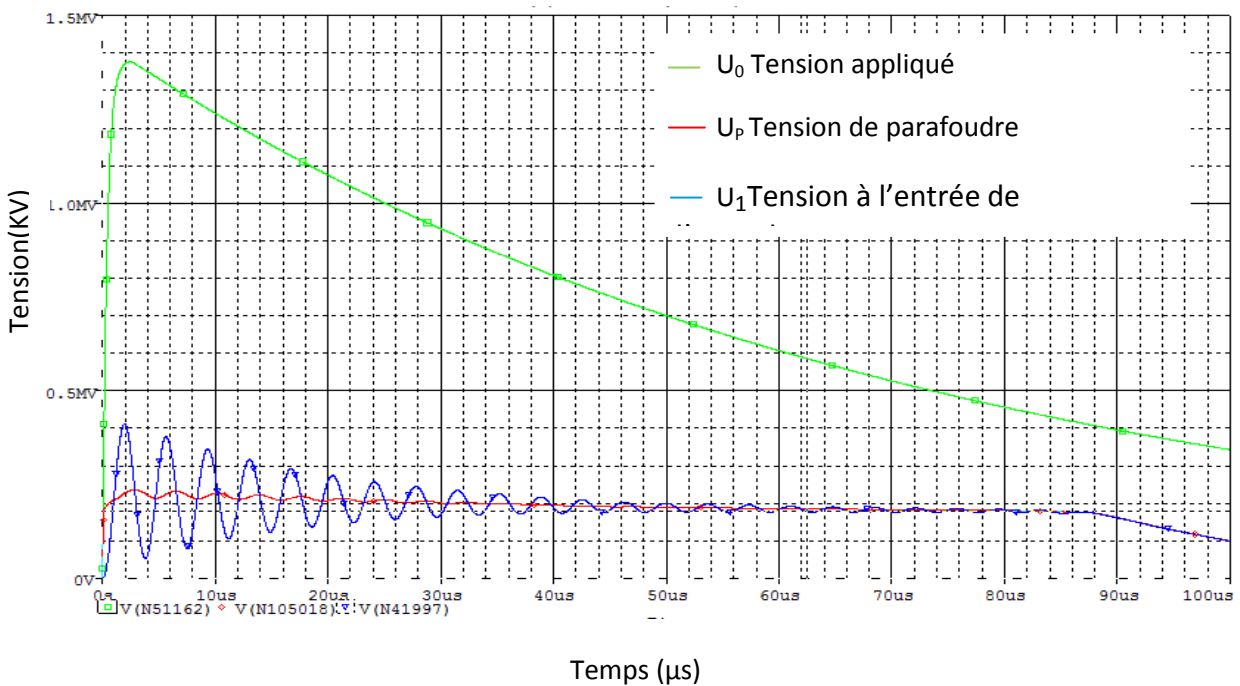


Figure I : La répartition des surtensions U₀, U_P, U₁

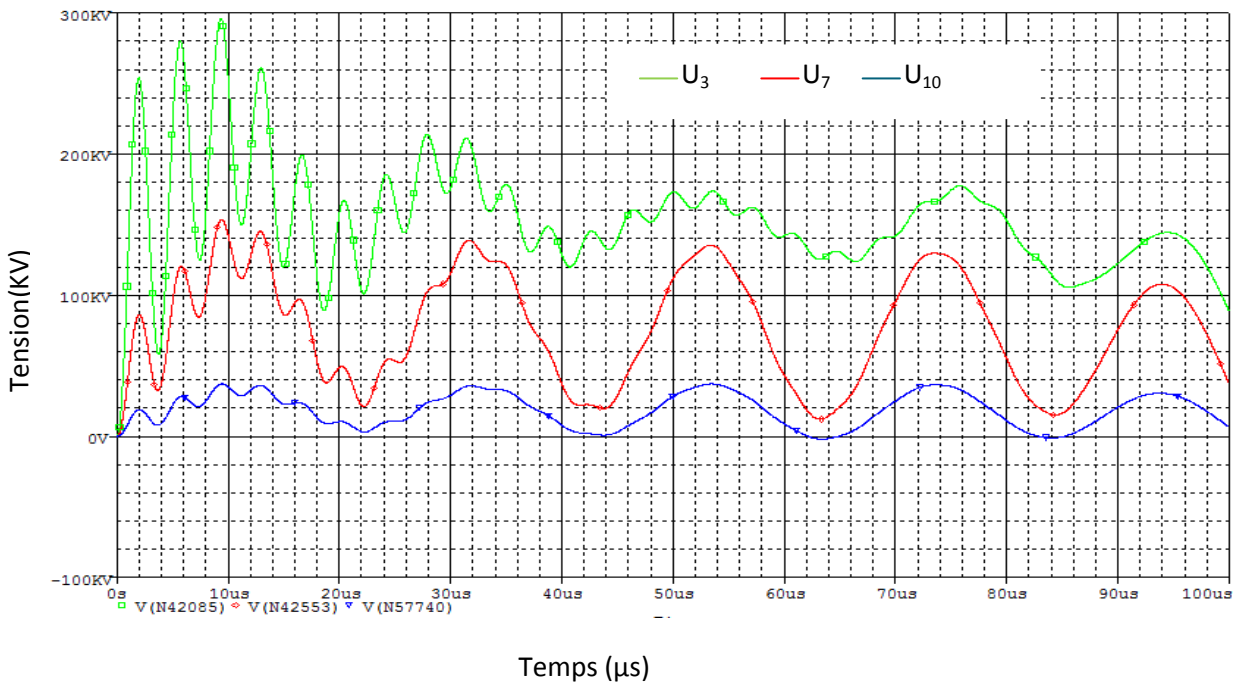


Figure II : Les courbes des surtensions (U3, U7, U10) sur les éléments (3, 7, 10) de l'enroulement pour $R_n=0\Omega$

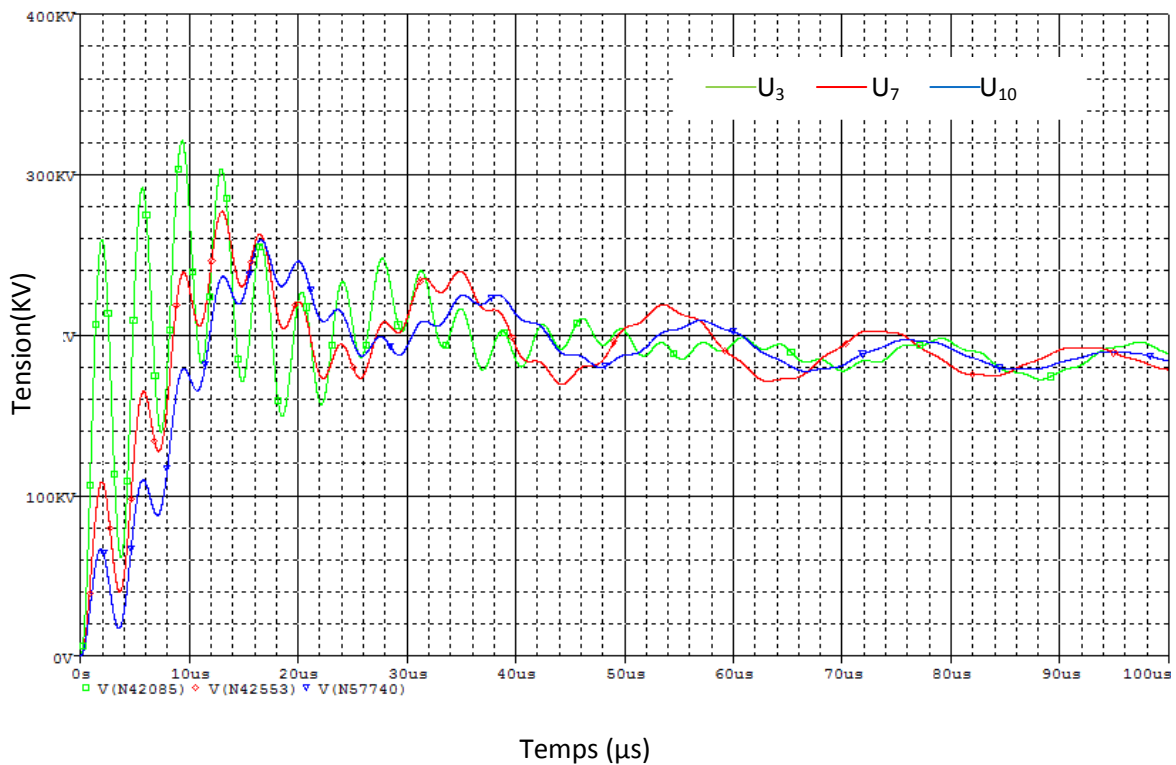


Figure III : Les courbes des U3, U7, U10 sur les éléments (3, 7, 10) de l'enroulement pour $R_n=4390$

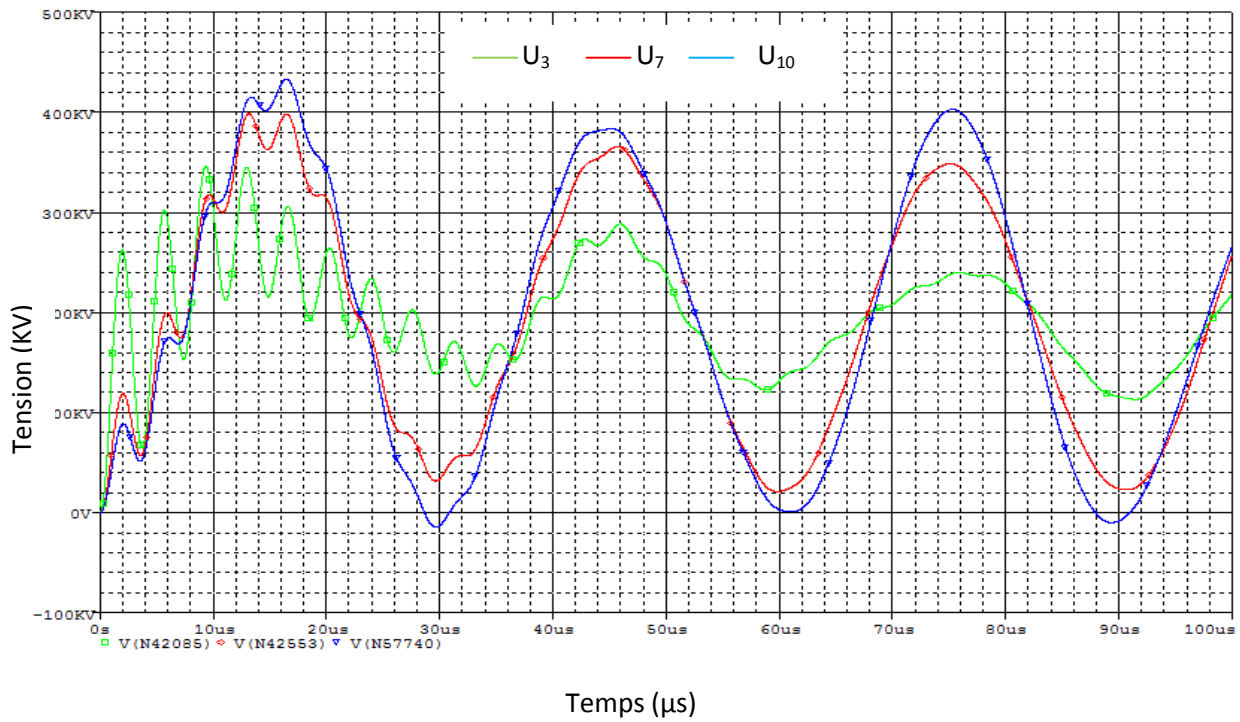


Figure IV : Les Courbes des surtensions U₃, U₇, U₁₀ sur les éléments (3,7, 10) pour R_n=infini

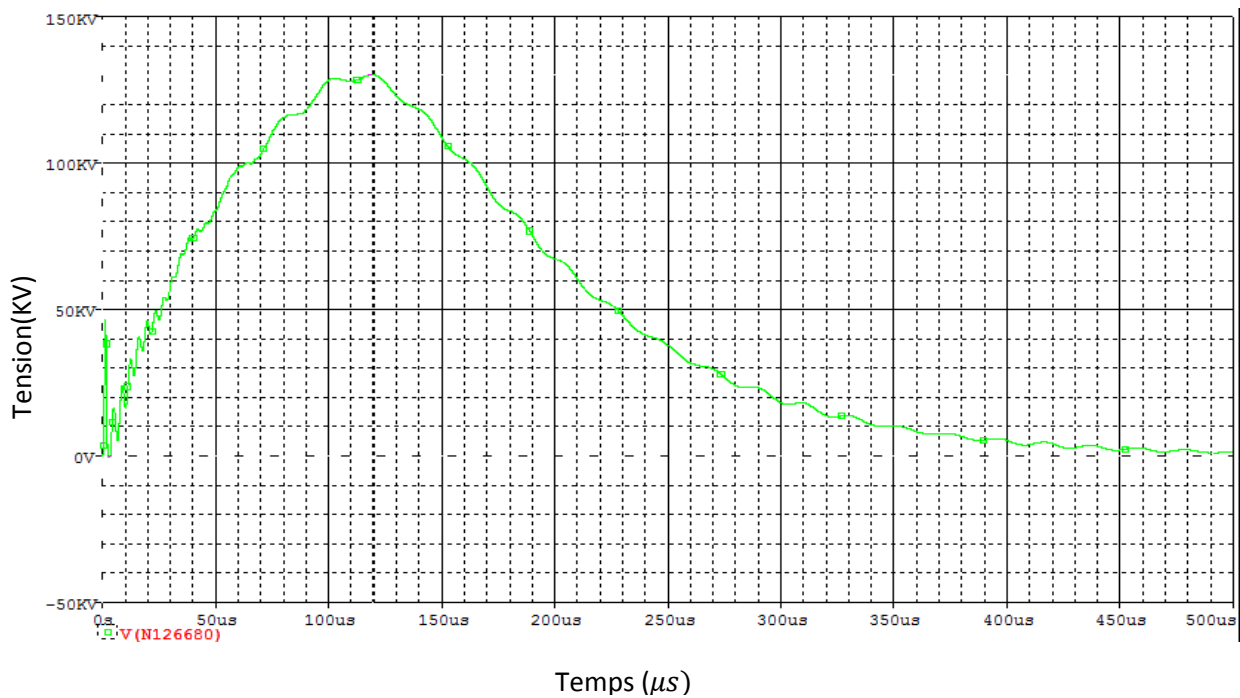


Figure V : La courbe de la surtension U₁₁ sur l'élément 11 avec thyristor à t=1 μs

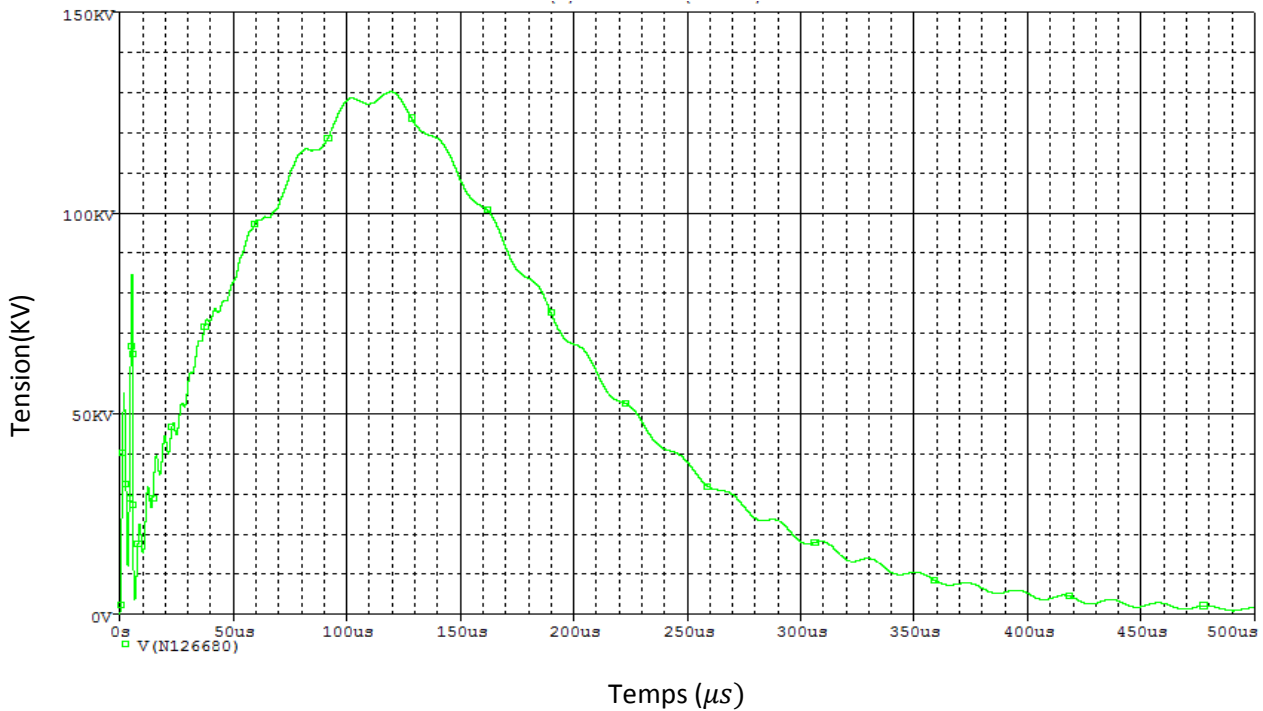


Figure VI : La courbe de la surtension U11 sur l'élément 11 avec un thyristor à $t=5\mu s$

V-4-Analyse des résultats de simulation

Cette étude de l'influence du régime de neutre sur les surtensions dans l'enroulement de transformateur est réalisé lors de la variation de R_n dans l'intervalle $0 \div \infty \Omega$.

Comme la tension appliquée U_0 nous utilisons la tension d'épreuve de l'onde complète $1.2/50 \mu s$, avec l'amplitude égale à la valeur des surtensions maximales, qui peuvent se créer sur la ligne de tension nominale de 110 KV. C'est-à-dire un peu inférieur de la tension de décharge de la chaîne d'isolation de cette ligne.

Pour trouver les valeurs des tensions correspondantes aux plus sever, l'étude est fait pour le poste impasse (unidirectionnelle). Le transformateur se trouvant dans ce poste est protégé par un parafoudre à ZnO, qui est placé à une distance de 120m de transformateur (d'après les normes). La ligne est représentée par son impédance caractéristique, qui égale à 400Ω pour les lignes de tension nominale de 110 KV.

D'abord nous avons trouvés la valeur de R_n égale à l'impédance caractéristique de l'enroulement. Cette dernière est déterminée d'après la condition de la concordance de l'enroulement et de R_n . Pour le transformateur à l'étude nous avons trouvés que

Chapitre V Détermination et analyse des sursensions dans les transformateurs

$R_n = Z_{ctr} = 4390 \Omega$. Puis nous avons fait les mesures des sursensions sur 10 points de l'enroulement (sur chaque 10% de la longueur de l'enroulement).

Les résultats des calculs sont donnés dans le tableau A est sur les figures I-IV.

Comme on voit sur la figure(I), la tension sur le parafoudre U_p (la tension résiduelle) est égale à 235 KV, qu'est correspondante au courant de parafoudre égal à 3 KA. Elle devient presque constante.

La sursension à l'entrée de l'enroulement U1 pratiquement ne dépend pas du régime de neutre. Lors de changement de R_n de la valeur 0 jusqu'à ∞ , cette tension est égale à 412 KV, qui ne dépasse pas la valeur admissible de sursension sur les transformateurs de tension nominale de 110 KV. Cette valeur admissible est égale à 470 KV.

Cette sursension est la somme de la tension résiduelle du parafoudre et une oscillation créée sur la distance entre le parafoudre est le transformateur, à cause de la multi réflexion de l'onde de ces deux point.

Dans l'enroulement, en éloignant de l'entrée d'enroulement l'influence du régime de neutre se renforce (autrement dit, en approchant au neutre). Si le neutre est mis à la terre les sursensions diminuent progressivement dans le sens vers le neutre. Les trois sursensions sur les points 3, 7 et 10 sont représentées sur la figure II la diminution est considérable.

Comme on voit de cette figure l'oscillation créée sur la distance entre parafoudre et le transformateur amorti considérablement en éloignent de l'entrée de l'enroulement .sur le point 10 cette oscillation est presque insignifiant.

Par l'augmentation de R_n les sursensions sur chaque point augmente. Ces sursensions atteintes ses valeurs maximales (sur chaque point) lors de $R_n = \infty$ (le neutre isolé de la terre). Cette augmentation de sursension est traduite par l'augmentation du facteur de réflexion de l'onde à la fin de l'enroulement. Evidemment que par l'augmentation des sursensions leurs périodes augmentent et de même oscillation renforce.

La comparaison des courbes de sursension sur le point 10 lors de $R_n = 0$ et $R_n = \infty$ montre, que la période change de $20.0 \mu s$ à $30 \mu s$ et les oscillations se passent respectivement entre $0 \div 38$ KV et $0 \div 400$ KV. L'augmentation d'oscillation est 10 fois.

Le changement de l'oscillation sur le point 7 est $15 \div 130$ KV et $20 \div 350$ KV.

Chapitre V Détermination et analyse des surtensions dans les transformateurs

C'est la valeur de $R_n = 4390 \Omega$, qui présente un grand intérêt par ce que dans ce cas l'oscillation doit être minimale.

Les courbes des surtensions correspondantes à ce cas sont représentées sur la figure III. Ces courbes montrent que l'oscillation est égale à : sur le point 3 dans l'intervalle $175 \div 205$ KV et sur le point 10 dans l'intervalle $180 \div 195$ KV.

Les courbes des surtensions sur le neutre, où le régime est changé par le fonctionnement du parafoudre. Ces deux correspondent aux cas où le thyristor fonctionne avec un retard de $1\mu s$ et $5\mu s$ dans les figures V et VI, Comme on voit l'amplitude de cette surtension ne change pas et celle-ci est égale à 130 KV. Donc, le changement du régime de neutre fonctionnant lorsqu'il est isolé de la terre diminue la surtension sur ce point de la valeur de 433 KV à 136 KV, comme on voit d'après le tableau A, pour $R_n = 4390 \Omega$ sans thyristor on trouve 255 KV, et dans le cas avec thyristor la tension est 130 KV.

Lors de l'absence du thyristor le courant dans R_n est 58A. Et lors de la présence de ce dernier le courant égale à 30 A.

Cette différence du courant dans R_n fait les différentes tensions sur le neutre, à savoir 255 KV et 130 KV respectivement.

V-5-Le gradient de tension

Ce tableau représente la répartition de gradient de tension le long de l'enroulement :

Rn(Ω) $U_k-U_{k+1}(kV)$	0	500	2000	4390	5000	∞
U1-U2	88	87.34	85.97	87.2	85.1	84.2
U2-U3	56.11	69.54	68.08	67.23	67.11	66.1
U3-U4	56.11	55.46	53.83	52.85	52.71	51.4
U4-U5	45.13	44.44	42.54	41.37	41.22	39.81
U5-U6	38.32	36.45	33.65	32.21	32	33.94
U6-U7	38.45	34.96	28.76	25.78	25.32	30.1
U7-U8	38.76	35.16	27.27	21.82	21.28	23.8
U8-U9	38.9	35.20	26.7	20.14	19.1	16.5
U9-U10	38.53	34.83	25.87	18.71	17.57	8.45
U10-U11	37.23	33.62	24.73	17.39	16.2	31.25

Tableau B : La répartition des gradients de tension le long de l'enroulement

V-6-Les courbes des gradients obtenus

Cette figure représente la répartition des gradients des tensions en fonction de la longueur de l'enroulement.

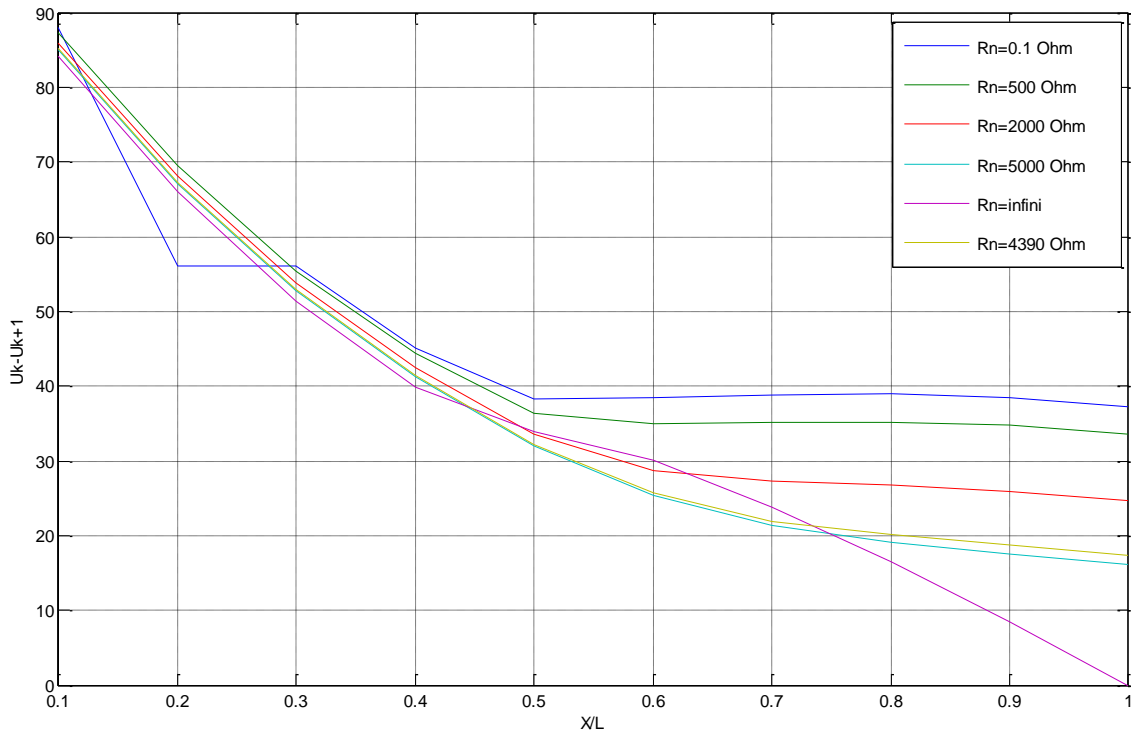


Figure VII : Répartition du gradient de tension le long de l'enroulement du transformateur

V-7-Interprétation des courbes U=f(X/L)

Les courbes de gradient des surtensions sur l'enroulement sont représentées sur la figure VII, et dans le tableau B, le plus grand gradient de la tension est obtenu à proximité de l'entrée d'enroulement pour chacune des valeurs de la résistance R_n , et en s'approchant du neutre celui-ci diminue. Alors dans le cas où le neutre est mis à la terre ($R_n=0\Omega$), on constate que dans l'intervalle $[0.1 \div 0.2]$ le gradient diminue rapidement, passe de 88 à 56.11KV, après il reste constant dans l'intervalle $[0.2 \div 0.3]$, et à partir de là, il continue à diminuer lentement jusqu'à 38.32 KV, soit de 44% de décroissance. En revanche pour R_n est égale à 500, 2000 et 5000 Ω nous remarquons que les gradients diminuent passant respectivement de 85.34, 85.97 et 85.1 KV jusqu'à 33.63, 24.73 et 16.2 KV. Dans le cas où le neutre est isolé de la terre ($R=\infty$), on constate que le gradient de valeur crête 84.2 KV diminue jusqu'à atteindre une valeur de 8.45 KV, alors il subira une diminution de 10%. Evidemment, que lors d'une telle diminution de

l'oscillation les gradients de surtension diminueront aussi. En cas d'une impédance sur le neutre égale à l'impédance caractéristique de l'enroulement ($R_n = Z_{ct} = 4390 \Omega$), ils diminuent et ont des valeurs minimales.

Le changement du régime de neutre lors d'exploitation du transformateur peut être assuré par un thyristor choisit d'après la tension du neutre. L'ouverture du thyristor doit être réalisée par une chute de tension prise sur la résistance montée en série avec le parafoudre.

Conclusion

Les surtensions dans l'enroulement HT dépendent principalement du régime de neutre, qui joue un rôle important dans la protection des transformateurs contre ces derniers. Dans le cas où le neutre est mis à la terre, elles se réduisent au fur et à mesure qu'on s'approche de ce dernier, mais dans le cas contraire (neutre isolé) la tension est beaucoup plus importante du côté de neutre.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'importance du transformateur dans le réseau électrique fait que sa protection contre les surtensions de foudre aux quelles il est soumis soit indispensable. Cette protection exige une étude détaillée sur la propagation des ondes des surtensions dans l'enroulement du transformateur.

Dans le but d'apporter une augmentation de la fiabilité de protection des transformateurs, nous avons fait cette étude en tenant compte du schéma équivalent traditionnel du transformateur et leur schéma de protection.

La mise à la terre du neutre de l'enroulement fait diminuer la surtension transmise tout en s'approchant du neutre, où elle devient égale à zéro. Dans le cas contraire, elle est beaucoup plus importante de côté du neutre est dépasse la surtension d'entré.

Dans le cas d'une impédance sur le neutre égale à l'impédance caractéristique de l'enroulement, la surtension sur tout l'enroulement devient minimale, c'est à cause de la concordance de l'enroulement et l'impédance de neutre.

Ceci permettre d'améliorer la protection de l'enroulement et en générale tout le transformateur, surtout contre les gradients des surtensions.

Notre étude est basée sur l'amélioration du schéma de protection de transformateur avec le changement du régime de leur neutre

De cette façon, le transformateur fonctionnant à sont régime normale avec le neutre isolé de la terre, en cas de l'apparition d'une onde de surtension passe au régime de concordance avec l'impédance du neutre.

De ce fait le neutre doit être lié avec le parafoudre afin d'ouvrir le thyristor pour changer le régime du neutre.

On trouve que, lors du neutre isolé de la terre la surtension sur ce point est 433 KV et avec le changement du régime de neutre cette surtension diminue jusqu'à 136 KV, c'est-à-dire plus que trois fois (3 fois).

La valeur de l'impédance de neutre est trouvée par légalité des tensions à l'entré est à la sortie de l'enroulement. Pour le transformateur considérer cette impédance égale à 4390 Ω .

A cet effet nous sommes arrivés à conclure que :

- ✓ Les surtensions dans l'enroulement HT dépendent principalement de régime du neutre.
- ✓ Le renforcement du schéma de protection est obtenu par le changement de régime du neutre.
- ✓ Cette modernisation du schéma de protection de transformateur contre les surtensions augmente la fiabilité de protection.
- ✓ Le changement du régime de neutre peut être assuré par un groupe de thyristor, à l'aide desquelles, une impédance égale à l'impédance caractéristique de l'enroulement est introduite sur le neutre.

On souhaite que ce modeste travail, puisse être un outil de base et un complément pour les futures études des surtensions dans les transformateurs.

Bibliographique

- [1] : **M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI** ; Machines électriques, Tome 1, édition : MIR Moscou 1976.
- [2] : **FRANCIS MILSANT** ; « cours d'électrotechnique, transformateurs et réseaux électriques ».
- [3] : **D-BAREILLE.J-P DAUNIS** ; « cours d'électrotechnique, transformateurs et machines tournantes ».
- [4] : **GUY Séguier-Francis Notelet**; « Electrotechnique industrielle » 3^{ème} Edition.
- [5] : « **Guide de conception des réseaux industriels** » Schneider Electric 6883 427/A.
- [6] : **AFFOLTER Jean –François** « HAUTE TENSION »cours de l'école d'ingénieur du Canton de Vand, Octobre 2000.
- [7] : **CHRISTOPHE SERAUDIE** ; « Surtension et Parafoudres en BT, coordination de l'isolement en BT » cahier techniques MERLIN GERIN N° 179 Septembre 1995.
- [8] : **RM-SIBEL-P-RAVERDY** ; « Protection Contre les surtensions »Mars 1996.
- [9] : **D-Fulchiron** ; « Surtensions et coordination de l'isolement » cahier technique Merlin Gerin N° 151. Décembre 1992.
- [10] : **MICHEL GRACIEL & JOSEPH PINAL** « la sécurité contre les perturbations ».Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique Doc. D5170
- [11] :**B.HELLER ; A. VEVERKA**, « Les processus impulsionnels dans les machines électriques », ENERGUIYA, Moscou, 1973.
- [12] : **A.K.LOKHANINE**, « Détermination des inductances des transformateurs HT », ELECTRICHESTVO, Moscou, 1976.
- [13] : **A.K.LOKHANINE & V.I.POGOSTINE**, « calcul des capacités des enroulements de transformateur HT », ELECTROTECHNICA, Lvov, 1973.
- [14] : **MUFID ZADA-NAHID**, « Cours de master 1 sur La protection des réseaux électriques».
- [15] : **A.Tilmatine**, « Cours sur la foudre »

[16] : **HOANG LE-HUY** ; « Surtension et parafoudre » GEL 22230 appareil électrique université de LAVAL 2008.

[17] : **FRANÇOIS GIRARD – ADEE** ; « Généralités sur la foudre » EDITION Octobre 1998, cahier technique.

[18] : **ELECTRICIT2E DE FRANCE / CENTRE DE NORMAISATION** « La protection contre les surtensions des installation à haute et très haute tension (63 à 400KV », Septembre 1980.

[19] : **SCHENEIDER ELECTRIQUE** ; « La protection des installations contre la foudre » Novembre 2000.