

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Présenté par
Ghiles DJEBALI
Khalid BOUACHERINE

Thème

Etude du transformateur de puissance en régime impulsional

Mémoire soutenu 16 septembre 2015 devant le jury composé de :

M Hamid SEDDIKI
MCA, UMMTO, President

M Tahar OTMANE CHERIF
MCA, UMMTO, encadreur

M Ali BECHOUCHE
MCB, UMMTO , Examineur

M Koussaila MESBAH
Doctorant,UMMTO, Examineur

REMERCIEMENTS

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour Mr:T. OTMANE
CHERIF Pour avoir accepté de diriger notre travail.*

*Toutes nos reconnaissances aux membres du jury qui nous feront
l'honneur de juger notre modeste travail.*

*Dans le souci de n'avoir oublié personne, nous remercions tous ceux qui
ont contribué de près ou de loin à ce que ce travail soit réalisé.*

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissances

Introduction.....3

I. Transformateur.....3

I.1. Définition3

I.2 Rôle et domaine d'utilisation des transformateurs de puissance.....3

I.3 Processus de dimensionnement5

 I.3.a. Dimensionnement magnétique5

 I.3.b. Dimensionnement électrique.....5

 I.3.c. Optimisation mécanique et thermique5

I.4 Constitution d'un transformateur.....5

 I.4.1. Le noyau du transformateur.....6

 I.4.2. Les enroulements.....6

 I.4.3 La cuve.....7

 I.4.4 couvercle de cuve et sorties.....8

I.5 Type de transformateur.....8

 I.5.a. Transformateur cuirassé8

 I.5.b. Transformateur à colonne9

 I.5.c. Transformateur à huile minérale (immersion)10

 I.5.d. Transformateurs secs.....11

I.6 Couplage des enroulements.....11

 I.6.1 Groupe de couplage.....12

 I.6.2 Schémas de couplage.....13

 I.6.2. a. Etoile-étoile.....13

 I.6.2 b. Etoile –triangle.....11

 I.6.2 .c. Etoile- zigzag.....12

 I.6.3 Choix du couplage.....12

I.7. Fonctionnement du transformateur.....14

I.8 Rendement du transformateur.....15

I.9 Puissances du transformateur15

I.10 Les Pertes dans le transformateur16

 I.10 .1 Les Pertes dans les enroulements15

 I.10 .2 Les Pertes dans le Circuit Magnétique16

Sommaire

I.11 Mise en parallèle des transformateurs triphasés.....	18
I.11.a. la compatibilité de l'indice horaire.....	18
I.12 Rapport de transformation.....	19
I.12.a. Le rapport de transformation par colonne m_c	19
I.12.b. Le rapport de transformation par phase m_{ph}	19
I.13 les contraintes	20
Conclusion	20

Chapitre II Les phénomènes subits par les transformateurs de puissances

Introduction	21
II.1. les courts circuits et les surcharges	21
II.1.A. Types de court circuit.....	21
II.1.B. Les types de surcharges	22
II.1.c. Méthode de calcul des courants de court-circuit	23
II.2. Les surtensions	24
II.2.1. les type des surtensions	24
II.2. 1.1 .Surtensions atmosphériques.....	24
II.2. 2.a. Coups de foudre directs.....	24
II.2. 2.b .Coups de foudre indirects	25
II.2.1.2. Surtension de manœuvre	26
II.2.1.3. Surtension à fréquence industrielle.....	26
II.2.1.4 Ferro-résonance.....	26
II.2.3 Propagation de l'onde de surtension.....	27
Conclusion.....	27

Chapitre III : Modèles mathématiques d'étude

Introduction.....	28
III.1. Modèle de Morched	28
III.2. Modèle de Leon	29
III.3. Modèle de Chimklai	30
III.4. Modèle de Gustavsen	32
III.5. Modèle d'Andrieu	32

Sommaire

III.6.. Modèle de Noda	33
III.7.. Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles.....	34
Conclusion	35

Chapitre IV : Modélisation du transformateur en régime impulsional

Introduction	36
IV.1. Schéma équivalent d'un transformateur soumis aux surtensions.....	36
IV.2. Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT	36
IV.2.a. Equations du circuit.....	37
IV.3. Répartition initiale de la tension sur un enroulement du transformateur	39
IV.3.a. Répartition initiale de la tension dont le neutre est mis à la terre	42
IV.3.b. Répartition initiale de la tension dont le neutre est isolé de la terre	34
IV.4 Répartition finale de la tension.....	44
IV.5 les conséquences de l'onde de surtension sur le transformateur.....	44
IV.6. Régime transitoire de la tension.....	45
Conclusion.....	47

Chapitre V : Protection des transformateurs

Introduction.....	48
V.1 Le dispositif de protection.....	48
V.2 Rôle du dispositif de protection.....	48
V.3 propriétés du dispositif de protection.....	48
V.4 Constitution d'un système de protection.....	48
V.5 Régime du neutre	49
V.6 Moyens de protection	49
V.6.1 Disjoncteurs.....	50
V.6.1 .a Disjoncteur à l'huile	50
V.6.1 b. Disjoncteur à air comprimé	50
V.6.1.c Disjoncteur à haute tension au SF6 (hexafluorure de soufre)	51
V.6.1 .d Disjoncteur auto-pneumatique.....	51
V.6.1.1 Fonctions assurées par le disjoncteur	52
V.6.1 1 .a Protection contre les surcharges	53
V.6.1.b. Protection contre les courts-circuits	53

Sommaire

V.6.2 Les Relais	54
V.6.2.1 choix du relais	54
V.6.2.2 Différents types des relais.....	54
V.6.2.2.1 Le relais électromécaniques.....	54
V.6.2.2.2 Relais à induction magnétique	55
V.6.2.2.3 Relais à balance	55
V.6.2.2.4 Relais thermique	55
V.6.2.2.5 Relais statique	56
V.6.2.2.6 Relais de Bucholz.....	56
V.6.3 Le fil de garde	57
V.6.3 .1 Rôles du câble de garde	58
V.6.4 Les éclateurs	58
V.6.4.1 Eclateur à cornes.....	58
V.6.4.2 Eclateurs à tige.....	59
V.6.5 Les fusibles.....	59
V.6.6. Le parafoudre.....	59
V.6.6.1. Type des parafoudres	59
V.6.6.1 .a. Parafoudres à résistances variables et éclateurs	59
V.6.6.1 .b. Parafoudre a oxyde de zinc	60
V.6.6.2. Avantage des parafoudres	60
V.6.6.3. Distance de protection.....	61
Conclusion	61

Chapitre VI : Application et discussion des résultats de simulation

Introduction	62
VI.1. Caractéristiques du transformateur.....	62
VI.1.a. Caractéristiques électriques.....	62
VI.1.b. Caractéristiques géométriques.....	62
VI.1.c. Paramètres calculés du transformateur	63
VI.2 Le principe de la simulation sous ORCAD 16.3.....	63
VI.3. Schéma équivalent de l'enroulement sur ORCAD 16.3.....	64
VI.4. Simulation sur Orcad 16.3 avec le neutre mis à la terre.....	65
VI.4.1 interprétation des résultats.....	65
VI.5.1. Neutre mis à la terre à travers une résistance.....	65

Sommaire

VI.5.1.1. Interprétation des résultats	68
VI.5.2. Neutre mis à travers une inductance.....	68
VI.5.2.1. Interprétation des résultats.....	70
VI.6. L'enroulement HT avec l'application d'un parafoudre.....	71
VI.7. L'enroulement HT avec l'application d'un parafoudre et le neutre isolé de la terre.....	72
VI.7.1. Interprétation des résultats	73
VI.8. L'enroulement HT avec l'application d'un parafoudre et le neutre mis à la terre.....	73
VI.8.1. Mis a la terre a travers une résistance.....	73
VI.8.1.1. Interprétation des résultats	75
VI.8.2. Mis a la terre a travers une inductance.....	75
VI.8.2.1. Interprétation des résultats.....	78
Conclusion.....	78
Conclusion générale	79

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, s'effectue principalement sous forme de tension et de courant alternatif. Il est difficile de produire ou de distribuer cette énergie à haute tension. Par contre un transport économique de cette énergie à grandes distances ne peut être réalisé qu'en haute tension. Ce problème est résolu à l'aide des transformateurs.

Un transformateur est une machine statique capable de recevoir l'énergie électrique sous une tension et un courant à fréquence donnée, et la restituer avec une autre tension et un autre courant à la même fréquence.

De part sa fonction, on rencontre le transformateur, dans l'ensemble d'un réseau électrique, aux points de production (BT/HT), aux points de distribution sectoriels (HT/MT) et aux points d'utilisation (MT/BT).

Pour des raisons économiques et sécuritaires, le transport de cette énergie se fait en haute tension.

En un point d'un réseau électrique, souvent la tension n'est pas fixe à cause des chutes de tension produites dans les transformateurs et les lignes par les différentes charges alimentées.

Or la tension doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, et pour la maintenir dans les limites admissibles, le distributeur d'énergie électrique a souvent recours au réglage de la tension.

Un premier réglage se fait au niveau de la centrale électrique par l'excitation des alternateurs. Ce réglage ne suffit pas. Un deuxième réglage est effectué à tous les échelons du transport, sur l'enroulement « haute tension » du transformateur. Souvent cet enroulement présente des « prises » à son bout et grâce à un commutateur de prises, on peut varier le nombre de spires utilisées de l'enroulement et régler donc la tension à une valeur déterminée.

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

Lorsque l'onde de surtension arrive en un point de raccordement d'éléments du réseau, tel 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 incendies et même des accidents de personnes se trouvant au poste.

Ces différents dangers, ainsi que l'exigence assez récente et croissante de la qualité des systèmes électriques (fiabilité, disponibilité, continuité de service...) font que la foudre fait partie des grandes préoccupations des recherches sur les transformateurs.

Pour la détermination du niveau d'isolement et du schéma des protections contre les surtensions (utilisation de parafoudres essentiellement), il faut préalablement évaluer ces surtensions et connaître les contraintes qu'elles imposent aux transformateurs.

Notre étude se portera sur l'influence des surtensions et des surintensités sur les transformateurs de puissance et les moyens de protection.

Ce présent mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les transformateurs, leurs principaux types et leurs spécificités conceptuelles, en passant par un rappel sur le grand rôle de cette machine importante dans le réseau de distribution.

Le deuxième chapitre sera focalisé sur les différents phénomènes subits par les transformateurs de puissance, nous exposerons en premier, leurs définitions, leurs causes et leurs conséquences. Dans le troisième chapitre on s'intéressera aux principaux modèles des transformateurs.

Le quatrième chapitre aura comme objet de modélisation le transformateur de puissance en régime impulsionnel dans lequel nous traiterons la surtension de foudre, et sa répartition le long des enroulements de transformateur en tenant compte du régime de neutre.

Le cinquième chapitre traitera les différents types de protection les plus usuels (éclateurs, parafoudres.....).

Dans sixième le chapitre nous présenterons les résultats obtenus par la simulation d'un enroulement HT d'un transformateur de puissance, avec une discussion des résultats d'une manière objective et chronologique afin de porter un aspect méthodique à notre travail.

Le problème est étudié par la modélisation des enroulements du transformateur sous le logiciel ORCAD 16. 3 qui est choisi pour sa rapidité et sa précision.

Introduction

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (Courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée et distribuée de façon économique. Il existe différents types de transformateurs. On s'intéresse aux transformateurs de puissance, haute tension, triphasés, utilisés dans les réseaux, où, la production et le transport de l'énergie électrique sont réalisés en triphasé et qui sont exposés aux différents types de surtensions.

I. Transformateur

I.1. Définition

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative d'une même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux besoins d'utilisation. Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion.

Seuls les transformateurs de puissances permettent, très économiquement, de minimiser les pertes en ligne, en assurant le transport de l'énergie à longue distance sous tension élevée, puis d'abaisser ensuite cette tension, étape par étape pour alimenter les réseaux régionaux et locaux, jusqu'à la tension d'alimentation domestique.

I.2 Rôle et domaine d'utilisation des transformateurs de puissance [1]

On utilise les transformateurs de puissance dans les cas suivants :

- liaison entre les gros alternateurs des centrales thermiques ou hydrauliques et les réseaux haute tension sur lesquels ils débitent.
- alimentation des services auxiliaires des centrales thermiques ou hydrauliques.
- liaison entre les réseaux haute tension ou entre les réseaux haute tension et moyenne tension.
- liaison entre les réseaux haute tension et les usines très importantes.

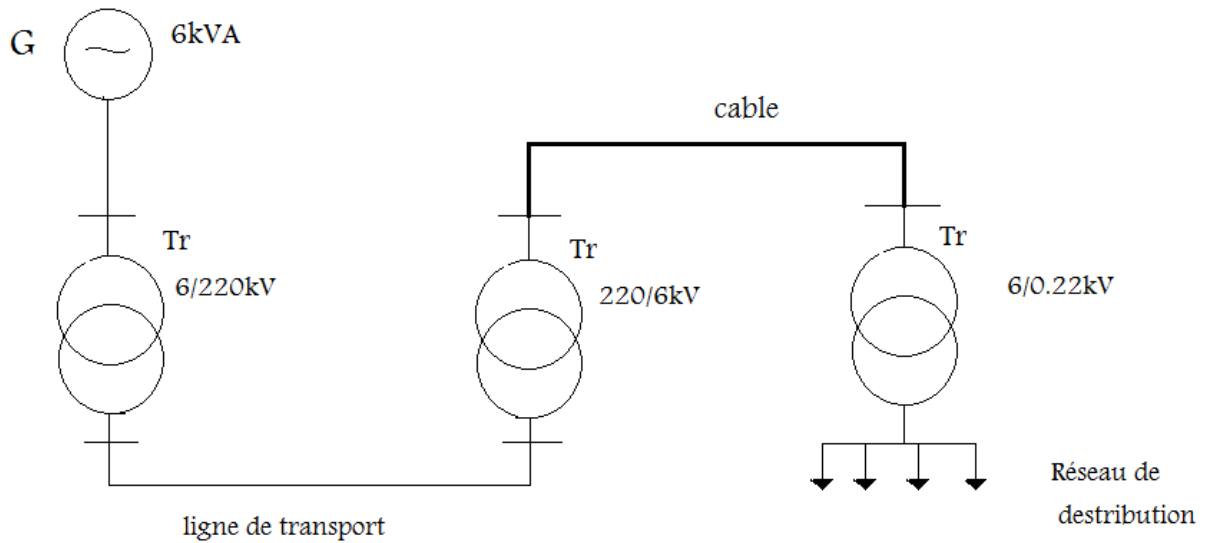


Figure :(I.1) réseau unifilaire (production et transport)

Du point de vue économique, le transport de l'énergie électrique se fait en alternatif. Durant son transport de la centrale électrique au consommateur, l'énergie électrique est dans la majorité des cas transformée au moins trois fois.

Dans la centrale, un générateur de courant alternatif (alternateur) fournit un courant à haute tension (6 à 30KV). Mais cette tension est insuffisante pour transporter l'énergie à grande distance et pour cette raison la centrale est reliée à la ligne de transport par un transformateur qui élève la tension jusqu'à la valeur de 100 à 500 KV. Plus la ligne est longue plus cette tension doit être élevée. A cette haute tension, l'énergie électrique est transportée à l'endroit de consommation, dans un centre industriel par exemple. Dans un faubourg, dans poste de transformation, la tension est abaissée jusqu'à valeur de 6 à 10KV permettant d'utiliser des câbles souterrains.

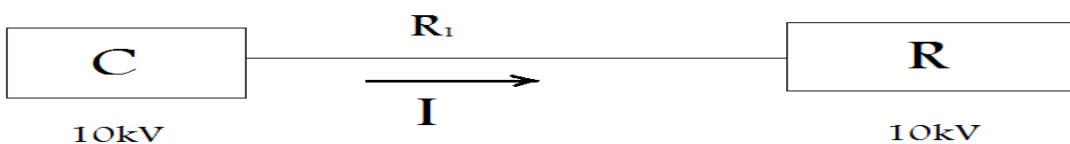
L'énergie est transmise par un câble au point de consommation où elle est transformée pour la troisième fois et le consommateur peut alors l'utiliser à basse tension (127 ou 220V).

La (figure .1) donne un schéma de transport d'énergie sur lequel les trois phases d'un système triphasé son représentées par un seul trait.

Ce schéma simplifié montre que la puissance totale des transformateurs doit être trois fois supérieure à la puissance totale de tous les alternateurs installés dans les centrales, ce qui montre l'importance exceptionnelle des transformateurs dans le système moderne d'alimentation en énergie électrique.

Exemple

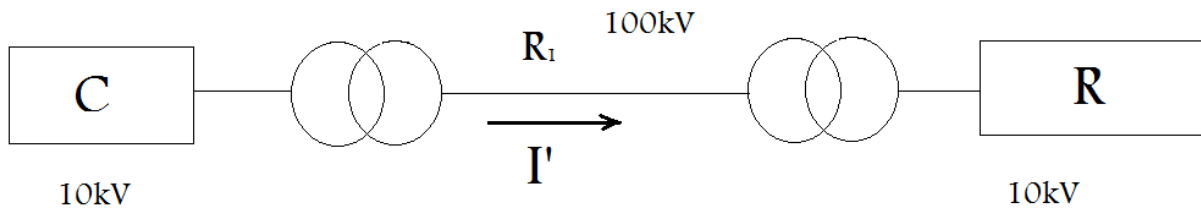
Une centrale électrique (C) produit l'énergie sous une tension de 10 kV. Elle est branchée par une ligne de transport ($R_1=10 \Omega$) à un récepteur (R) dont la puissance est de 1000 kVA.



$$I = \frac{S}{U} = \frac{1000}{10} = 100 \text{ A}; \Delta P = R_l \cdot I^2 = 100^2 \cdot 10 = 100 \text{ kW}$$

$$\Delta U = R_l \cdot I = 100 \cdot 10 = 1 \text{ kV.}$$

Mettons tout prêt de la centrale un transformateur élévateur (10/100kV), et devant le récepteur un transformateur abaisseur (100/10kV)



$$I' = \frac{S}{U'} = \frac{1000}{100} = 10 \text{ A};$$

$$\Delta P' = R_l \cdot (I')^2 = 10^2 \cdot 10 = 1 \text{ kW};$$

$$\Delta U' = R_l \cdot I' = 10 \cdot 10 = 0.1 \text{ kV.}$$

Cette réduction des pertes due à l'utilisation des transformateurs permet d'augmenter le nombre de récepteurs ou bien de diminuer la section des fils de ligne.

Plus la ligne de transport est longue et plus la puissance transmise est grande, plus la tension doit être élevée.

I.3 Processus de dimensionnement [2]

a. Dimensionnement magnétique

Ce dimensionnement doit permettre le choix du :

- matériaux magnétique ;
- dimension du circuit magnétique ;
- nombre de spires, et induction de travail ; afin de limiter les pertes, éviter la saturation et obtenir la valeur d'inductance primaire et secondaire souhaitée.

b. Dimensionnement électrique

Les épaisseurs d'isolants et des lignes de fuite doivent être déterminées pour respecter les règles définies dans les normes et éviter les risques de perforation ou de contournement.

C. Optimisation mécanique et thermique

Pour une meilleure implantation, une mécanique adaptée doit être trouvée pour chaque bobinage afin de permettre la tenue aux contraintes environnementales et d'évacuer le maximum de pertes

I.4 Constitution d'un transformateur [3]

Un transformateur comprend les parties principales suivantes :

Le noyau, les enroulements, la cuve, le couvercle et les isolateurs de sortie.

I.4.1. Le noyau du transformateur

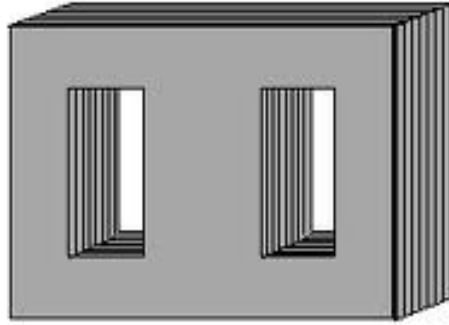


Fig (I.2) le noyau du transformateur

Le noyau du transformateur est l'ensemble formant le circuit magnétique. Il est constitué de tôles d'aciers assemblées entre elles de telle sorte à minimiser les pertes fer, les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique, les tôles utilisées sont en acier doux et ont une faible épaisseur (0,35 à 0,5 mm) et sont isolées entre elles avec du vernis. Le circuit se présente sous forme de trois colonnes et deux culasses, son rôle essentiel est de canaliser le flux et de présenter le minimum de pertes.

I.4.2. Les enroulements

Les enroulements sont constitués de conducteurs de section ronde ou rectangulaire, enroulés en bobines sur les colonnes du transformateur. Les enroulements haute tension (A, B, C) et basse tension (a, b, c) concentriques, sont isolés électriquement les uns des autres de telle sorte que l'énergie n'est transmise que grâce à leur couplage magnétique. Ces derniers sont plus proches du noyau que les premiers. Pour éviter des efforts axiaux en cas de forts courants, la hauteur des enroulements doit être la même. On place le circuit magnétique, muni de ses enroulements dans une cuve remplie d'huile minérale très fluide. L'huile, circulant le long des parties actives du transformateur véhicule la chaleur dégagée, chaleur qu'elle transmet ensuite à la cuve munie de radiateurs. **Fig. (I.3). Fig. (I.4)**

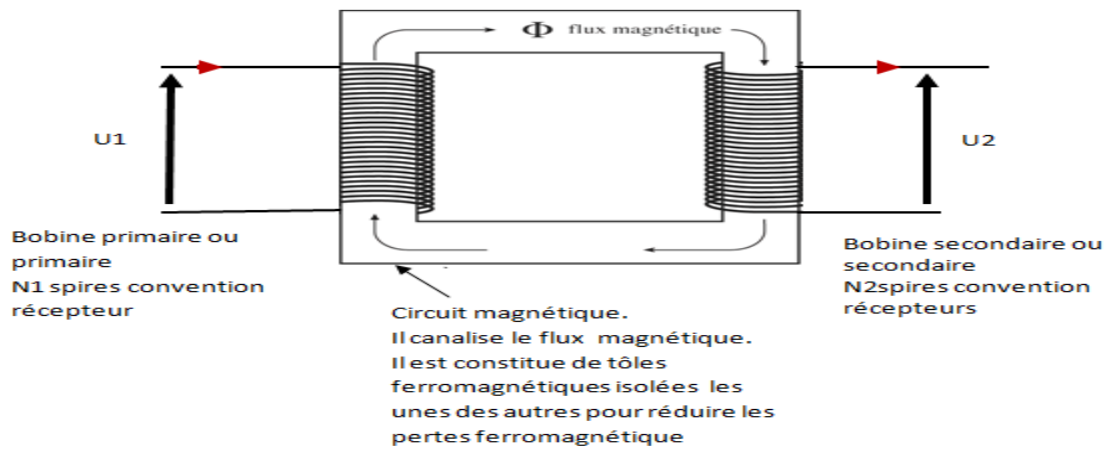


Figure. (I.3) Bobines primaire et secondaire d'un transformateur monophasé

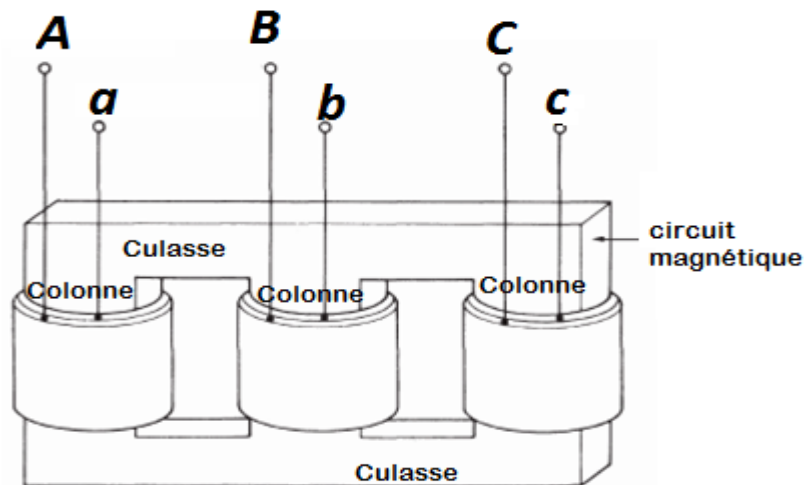


Fig. (I.4) : partie active d'un transformateur triphasé.

I.4.3 La cuve

La construction de la cuve est liée au calcul thermique du transformateur. En général la cuve des transformateurs de puissance est de forme ovale, installée sur un chariot avec galets prévus pour supporter le poids total des parties actives et de l'huile de refroidissement.

I.4.4 couvercle de cuve et sorties

Le couvercle de la cuve est un élément important sur lequel sont placées plusieurs pièces à savoir:

- Les isolateurs de sorties pour assurer une liaison électrique entre les réseaux haute tension et moyenne tension et les enroulements. Dans les transformateurs prévus pour une tension ne dépassant pas 35 kV on utilise des isolateurs en porcelaine remplis d'air ou d'huile. Par contre dans les transformateurs de 110 kV et plus, on utilise des isolateurs en porcelaine remplis d'huile.
- Le conservateur d'huile.
- Le tube d'évacuation des gaz pour les transformateurs à puissance de 1000 kVA et plus.

I.5 Type de transformateur :

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux dispositions principales qui sont ;

- Transformateur cuirassé
- Transformateur à colonnes

I.5.a. Transformateur cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux cotés. la cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobines.**Fig. (I.5)**

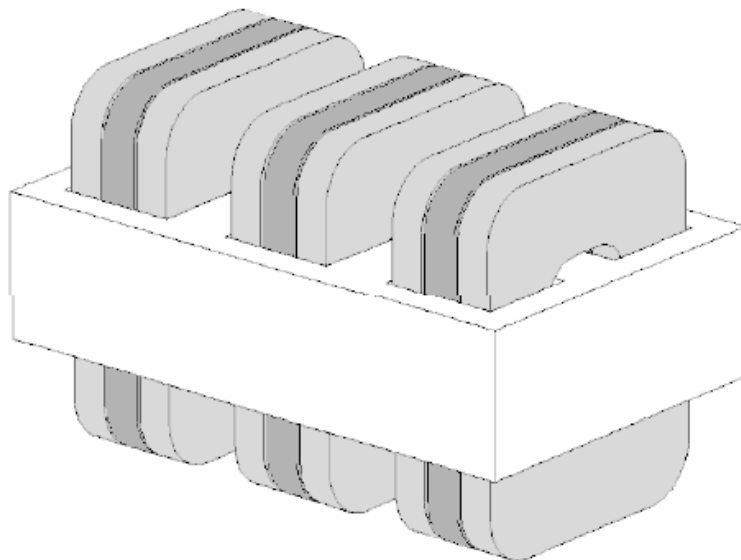


Fig. (I.5) : transformateur cuirassé

➤ **Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé**

Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce que permet d'avoir un courant à vide relatif plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans le transformateur à colonne. Mais il présente aussi certains inconvénients : ses enroulements sont moins accessibles à l'agent refroidissant, l'examen et la réparation sont plus difficiles et demande d'avantage de matériaux isolants pour la haute tension.

1.5.b. Transformateur à colonne

Le transformateur à colonne est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses à fin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs.

Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.

Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux. **Fig. (I.6)**

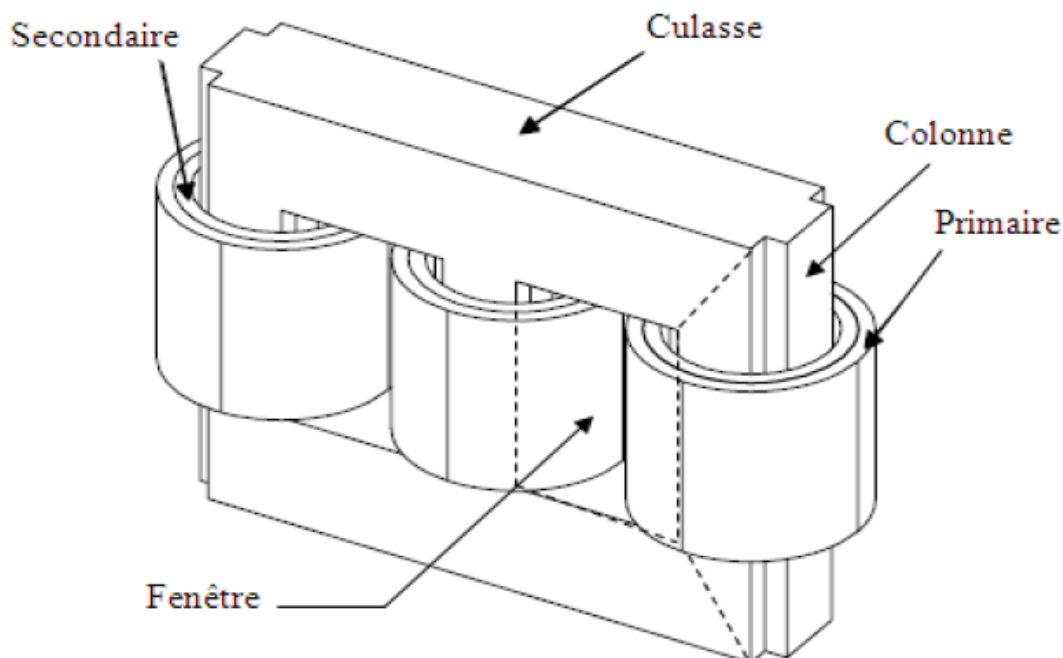


Fig. (I.6) : transformateur à colonne

I.5.c. Transformateur à huile minérale (immergé)

Le transformateur est disposé dans un bain d'huile qui assure l'isolement et le refroidissement. Ce transformateur est moins onéreux et a des pertes moindres que le transformateur sec. Il présente cependant des risques d'incendie et de pollution : Un défaut interne peut provoquer une surpression et une déformation de la cuve telles que des fuites d'huile peuvent apparaître. Suivant les circonstances, cela peut entraîner l'inflammation de l'huile ou encore une explosion. Les fuites d'huile peuvent aussi provenir d'un joint défectueux ou de la rupture d'une canalisation. Les huiles qui se répandent peuvent polluer la nappe phréatique. Il faut donc prévoir sous le transformateur une fosse d'évacuation ou un bac de rétention d'huile. La combustion des huiles dégagent des produits toxiques et génèrent des fumées opaques gênant l'intervention des secours. **Fig. (I.7)**



Fig. (I.7) : transformateur immergé

I.5.d. Transformateurs secs

Les enroulements BT et les enroulements HT sont concentriques et enrobés dans une résine époxy. Le transformateur sec peut être disposé dans une enveloppe de protection qui permet de l'isoler du monde extérieur et d'assurer l'évacuation de la chaleur à travers de ses parois.

Le transformateur sec présente les meilleures garanties de sécurité contre l'incendie et contre la pollution (pas de fuite de liquide, pas de vapeurs nocives en cas d'incendie). **Fig. (I.8)**

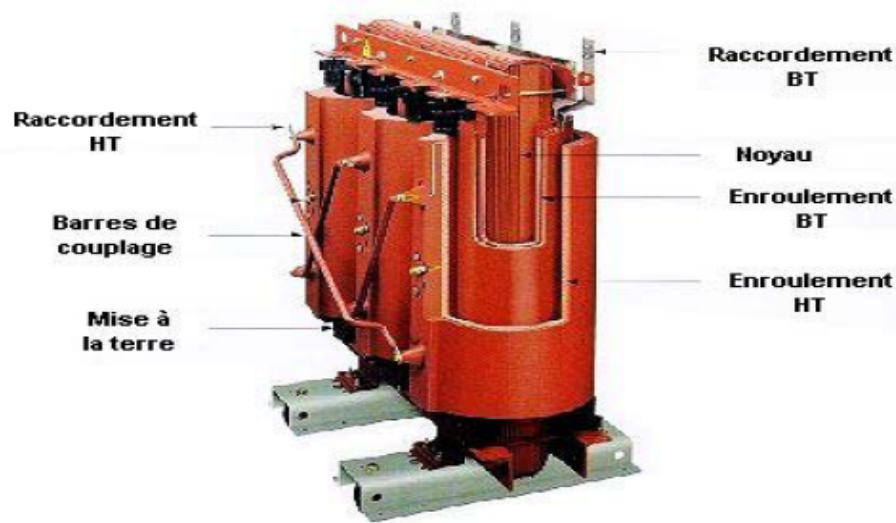


Fig. (I.8) : transformateur sec

I.6 Couplage des enroulements[4]

Les enroulements sont en général concentriques pour minimiser les fuites de flux.

Le conducteur électrique utilisé dépend des applications, mais le cuivre est le matériau de choix pour toutes les applications à fortes puissances. Pour les petites puissances, il suffit d'utiliser des conducteurs magnétiques émaillés pour assurer cette isolation. Dans les applications à plus fortes puissances, on entoure les conducteurs de papier diélectrique imprégné d'huile minérale pour assurer cette isolation.

Pour les fortes puissances, on utilise des conducteurs multibrins pour limiter l'effet de peau ainsi que les pertes par courant de Foucault.

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ces enroulements couplés en étoile ou en triangle. De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zigzag. **Tab.(I.1)**

	COUPLAGE		
	Etoile Y	Triangle D	Zigzag Z
CôtéHT	Y	D	Z
CôtéBT	y	d	z

Tab.(I.1) : Représentation des différents couplages d'un transformateur

Le couplage zigzag est obtenu en divisant les trois bobines d'un enroulement en six bobines. Pour avoir une phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des colonnes différentes en sens inverse.

I.6.1 Groupe de couplage

Pour un transformateur triphasé, les enroulements peuvent être connectés de trois manières différentes :

- En étoile, représenté par la lettre Y.
- En triangle, représenté par la lettre D.
- En zigzag, représenté par la lettre Z.

Le couplage en étoile au primaire et au secondaire (Yy) est utilisé surtout pour les transformateurs de très haute tension, car il permet de réduire la tension aux bornes des enroulements d'un facteur $\sqrt{3}$ et donc de réduire d'autant l'isolation.

Le couplage en étoile au primaire et en triangle au secondaire (Yd) est utilisé pour connecter les générateurs de centrales électriques et de machines industrielles. Le courant traversant les bobines est réduit d'un facteur $\sqrt{3}$, ce qui est intéressant dans ces applications où le courant est particulièrement fort. Côté réseau, pour les mêmes raisons que précédemment, il est préférable de privilégier l'économie d'isolation.

Dans les réseaux de distribution électrique, un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (Yz) est courant, car le couplage zigzag permet de réduire le déséquilibre de tension entre phases. Les particuliers étant connectés en monophasé, la charge n'est pas toujours bien répartie entre les phases et il est utile de lutter contre le phénomène.

Le couplage a également un rôle déterminant dans la détermination de l'impédance homopolaire du transformateur et dans la transmission du courant de 3^e harmonique du primaire au secondaire.

Les couplages les plus utilisés :

- Le couplage étoile-étoile (Y y).
- Le couplage étoile-triangle (Y d).
- Le couplage étoile-zigzag (Y z).

I.6.2 Schémas de couplage :

a/ Etoile-étoile

Il permet la sortie du point neutre, très utile en BT. Deux tensions sont disponibles : tension simple et tension composée. **Fig. (I.9)**

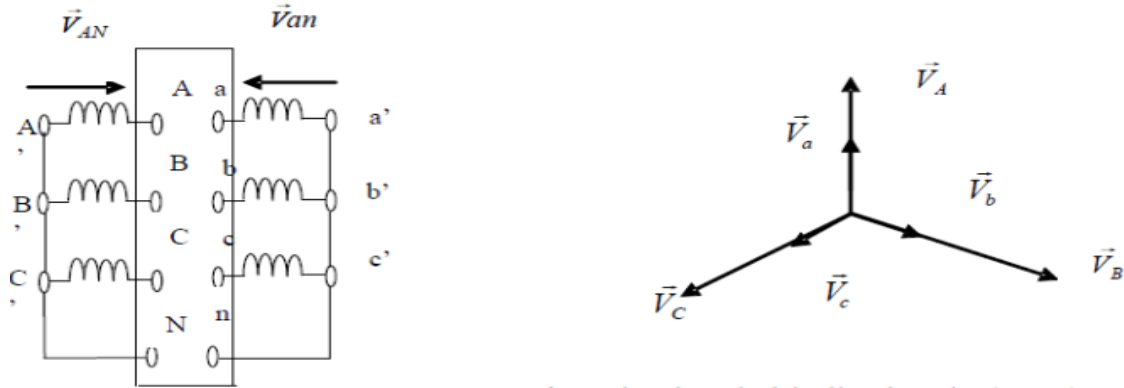


Fig. (I.9) : couplage Yy

b/ Etoile-triangle

Il nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile, il n'y a pas de neutre possible. **Fig. (I.5)**

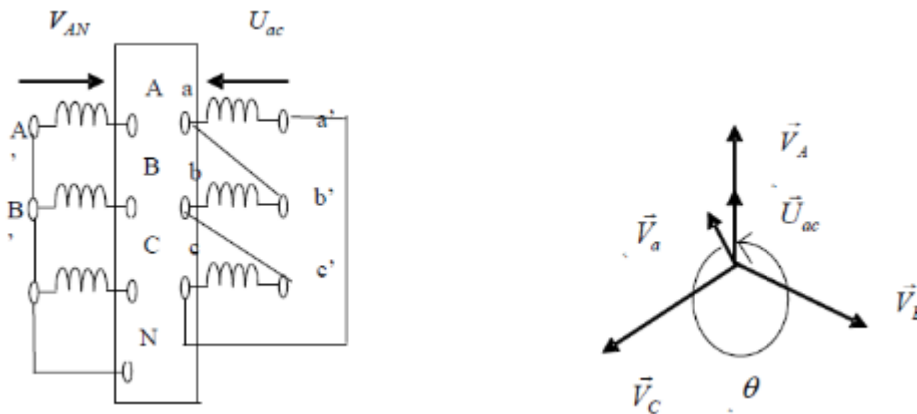


Fig. (I.5) : couplage Yd

c/ Etoile- zigzag

Chaque enroulement comprend deux demi bobines placées sur des noyaux différents ; les sorties de la deuxième demi bobine sont inversées. Les f.é.m. de chaque demi-bobine sont déphasées de 120° . Avec le couplage zigzag, on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseau BT déséquilibré. **Fig. (I.6)**

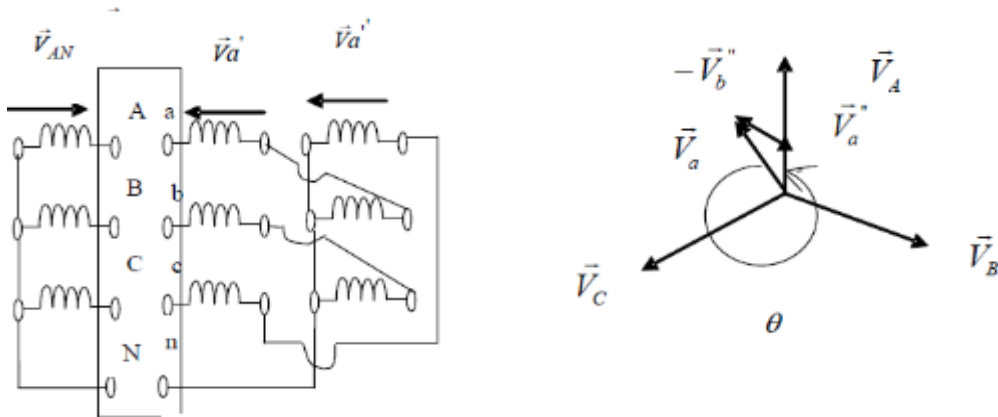


Fig. (I.6) couplage Yz

I.6.3 Choix du couplage [5]

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- La charge peut nécessiter la présence du neutre (par exemple réseau BT).
Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag.
- Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre I_n est V_A Supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag.
- Coté haute tension, on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spires à utiliser).
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle.

I.7.Fonctionnement du transformateur [6]

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'inductions magnétique variable Φ circule dans le circuit magnétique induit dans chacun des enroulements, une force électromotrice proportionnelle dans le temps au taux de changement $d\Phi/dt$ et au nombre de spires que comporte cet enroulement. L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale. Il est donc traversé par un courant sinusoïdal et donne naissance à travers le circuit magnétique à un flux sinusoïdal. Ce flux engendre alors une force électromotrice induite E_1 dans l'enroulement primaire et E_2 dans l'enroulement secondaire. Aux niveaux des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdale dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire, mais dont l'amplitude est différente.

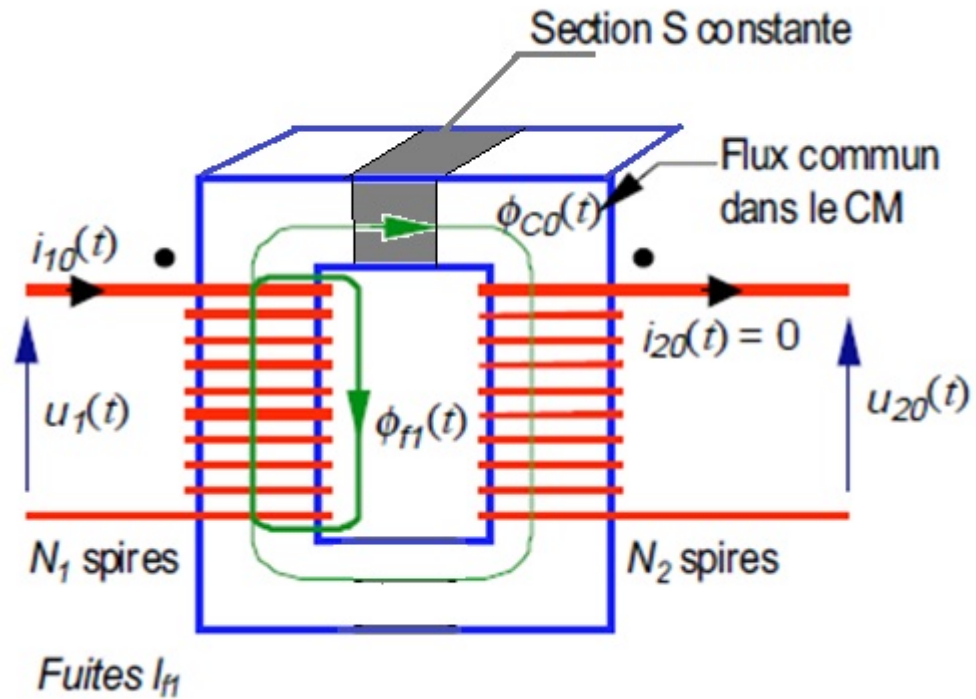


Fig. (I.7): notations de fonctionnement du transformateur

I.8 Rendement du transformateur :

Le rendement d'un transformateur est égal à la puissance absorbée par le secondaire sur la somme des puissances :

$$\eta = \frac{\text{puissance fournie par le secondaire}}{\text{puissance totale absorbée au primaire}} = \frac{P_2}{P_1} \tag{I.1}$$

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$V_1; V_2$: tension primaire et secondaire

$I_1 ; I_2$: courant primaire et secondaire

$\cos \varphi_1; \cos \varphi_2$: facteurs de puissance de primaire et secondaire

I.9 Puissances du transformateur

Le transformateur parfait transmet intégralement au secondaire la puissance reçue au primaire.

S_1 : puissance apparente au absorbée primaire.

S_2 : puissance fournie au secondaire.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{I.2}$$

Le transformateur conserve le déphasage φ .

la puissance active est comme suite :

$$P = S \cos \varphi \quad (\text{I.3})$$

la puissance réactive Q :

$$Q = S \sin \varphi \quad (\text{I.4})$$

Comme S et φ sont conservés alors il en va de même pour P et Q .Par contre dans le cas du transformateur idéal ; l'égalité des puissances apparentes.

$$S_1 = S_2 \text{ soit : } V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Dans le transformateur idéal conserve les puissances actives, réactives et apparentes, il conserve aussi le déphasage.

I.10 Les Pertes dans le transformateur

I.10 .1 Les Pertes dans les enroulements

a) Les pertes par effets joule

Les pertes par effets joules dans les enroulements sont appelées également pertes cuivre, elles dépendent de la résistance de ces enroulement et de l'intensité du courant qui les traverse, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

$$P_J = \sum_i R_i I_i^2 \quad (\text{I.5})$$

R_i : Résistance de l'enroulement,

I_i : Intensité du courant qui le traverse.

Les pertes par effets joules, fonction du courant imposé augmentent avec la résistance et la température.

b) Les pertes supplémentaires

Ce sont des pertes dues aux courants de Foucault dans les enroulements ou dans les pièces métalliques avoisinantes.

$$P_{cc} = P_j + P_s \quad \longrightarrow \quad P_s = P_{cc} - P_j \quad (\text{I.6})$$

P_{cc} : ce sont les pertes dues à la charge.

Les pertes supplémentaires, fonction de la tension induite, varient en sens inverse que les pertes joule.

I.10 .2 Les Pertes dans le Circuit Magnétique

Les pertes dans le fer comprennent les pertes par courants de Foucault et les pertes par hystérésis.

a) Les Pertes par Courants de Foucault

Le circuit magnétique à une induction sinusoïdal "B" est le siège des courants induits appelés courants de Foucault.

Ces courants qui circulent dans des plans perpendiculaires aux lignes d'induction tendent à s'enrouler autour de ces lignes.

Ils produisent par effet joule un dégagement de chaleur dans le circuit magnétique, ces pertes sont données par la relation suivante :

$$P = K. \rho e^2 B_m^2 f^2 \quad \text{W/kg} \quad (\text{I.7})$$

Telque:

B_m : Induction max (T).

f : Fréquence (Hz).

e : Epaisseur de la masse (m).

K : Coefficient déterminé par mesure sur un échantillon.

ρ : Résistivité ($\Omega \text{ m}$).

Pour réduire ces pertes, on est amené à utiliser des tôles minces isolées entre elles.

b) Les Pertes Par Hystérésis

La surface du cycle d'hystérésis s'exprime en joule /m³. Elle correspond à un échauffement du matériau dû aux frottements des moments magnétiques.

Ainsi la puissance perdue par hystérésis est donnée par :

$$P_h \approx K f V S_h \approx f V (B_{\max})^2 \quad (\text{I.8})$$

- K : Coefficient déterminé par mesure sur un échantillon
- f : est la fréquence de l'excitation magnétique
- V : est le volume de fer subissant le cycle
- S_h : est la surface du cycle qu'on admet être proportionnelle à $(B_{\max})^2$

Pour les réduire, on doit utiliser des tôles de qualité, qui ont des cycles d'hystérésis très étroits.

I.11 Mise en parallèle des transformateurs triphasés

Pour des raisons économiques, techniques et de redondance, il peut être parfois intéressant de brancher plusieurs transformateurs en parallèle plutôt qu'un seul de plus forte puissance. Dans ce cas plusieurs conditions doivent être remplies

Les conditions nécessaires pour brancher deux transformateurs triphasés en parallèle sont:

- Même tension primaire et secondaire
- Même rapport de transformation
- Même déphasage ou indice horaire (ou indice horaire compatible)
- Même couplage
- Même tension de court-circuit

N.B Les tensions de court-circuit relatives (exprimées en pourcentage) des transformateurs doivent être identiques, avec une certaine tolérance.

Exemples sur la compatibilité de l'indice horaire. Fig. (I.10), Fig. (I.11)

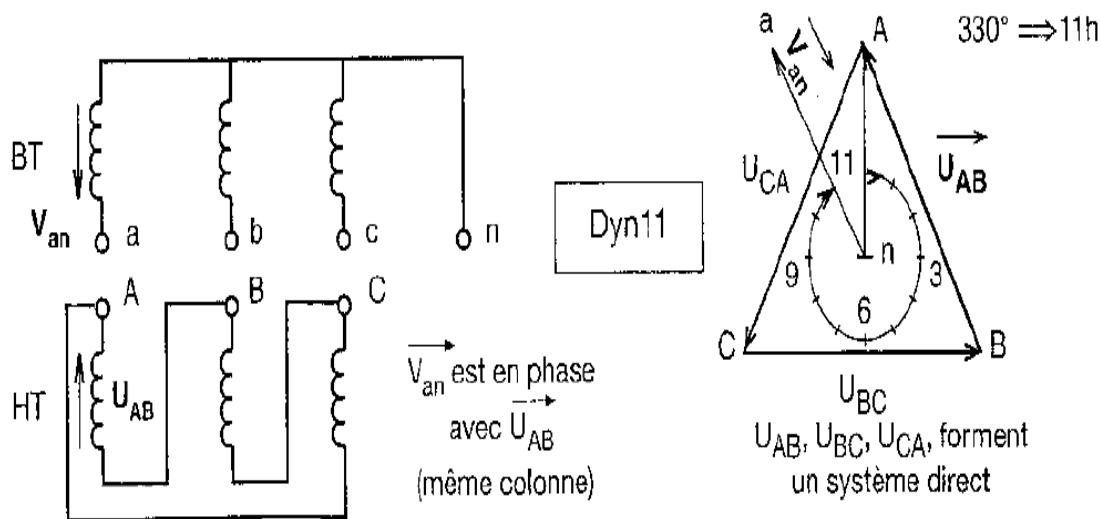


Fig. (I.10) indice horaire

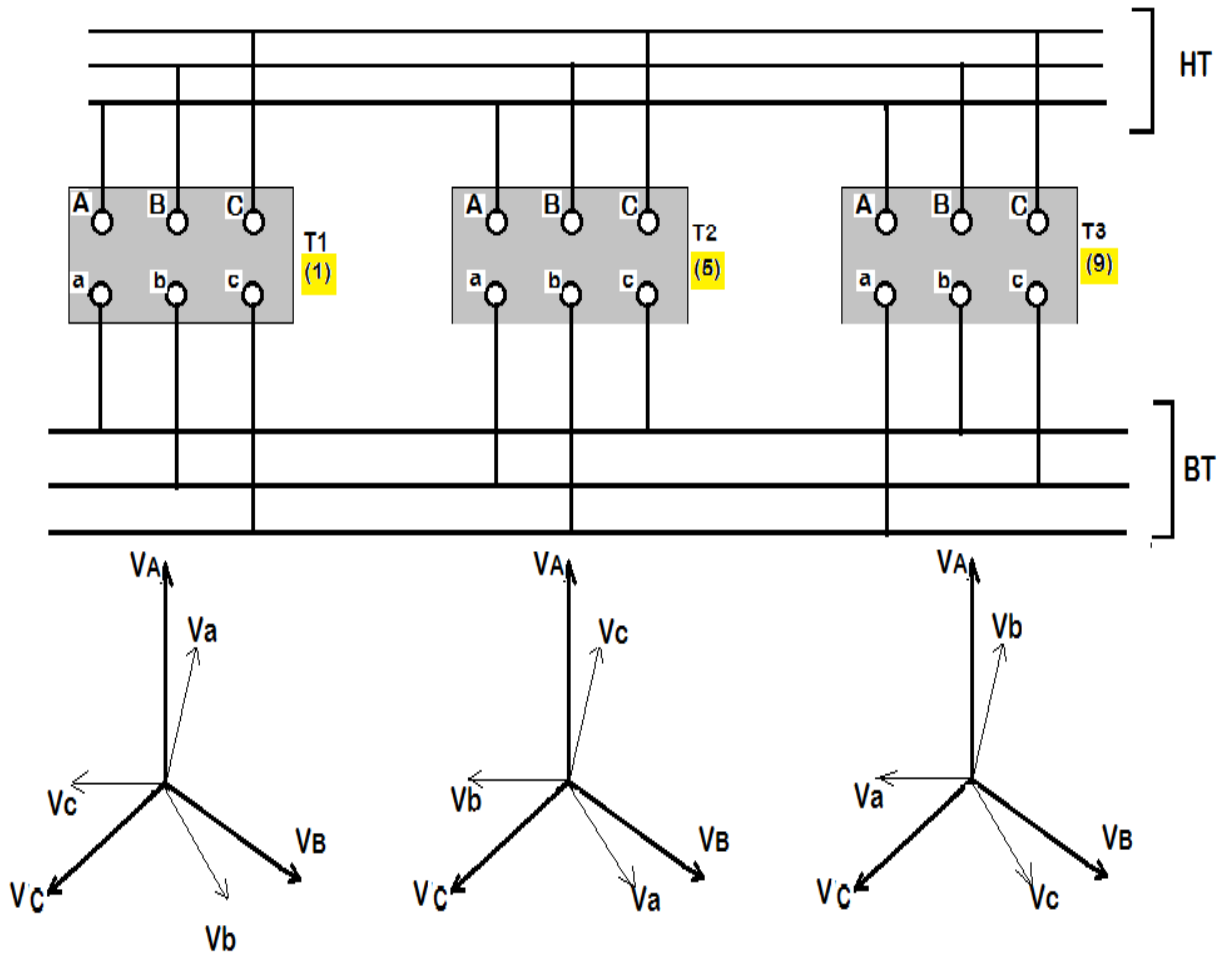


Fig. (I.11) Compatibilité des indices horaires

I.12 Rapport de transformation

Le rapport de transformation qui relie les grandeurs analogues du primaire et du secondaire ne dépend plus uniquement des nombres de spires mais aussi du mode de couplage des enroulements. Dès lors qu'on parle d'un transformateur triphasé, on se doit donc d'en préciser les différents couplages.

a) Le rapport de transformation par colonne m_c :

Il est défini comme étant le rapport de nombre de spires secondaire par le primaire.

$$m_c = \frac{N_2}{N_1} \tag{I.9}$$

b) Le rapport de transformation par phase m_{ph} :

C'est le rapport de la tension composée secondaire à vide par la tension primaire composée :

$$m_{ph} = \frac{U_2}{U_1} \tag{I.10}$$

I.13 les contraintes

Un réseau électrique doit fournir une énergie électrique avec une meilleure qualité possible. Cette qualité se dégrade avec l'apparition des anomalies dont la durée peut conduire à des arrêts des fonctionnements prolongés.

Pour éviter ces anomalies et mettre au point des systèmes de protection on doit connaître les différentes contraintes et leurs natures.

Conclusion

Les transformateurs fonctionnent grâce à une technologie fiable qui existe déjà depuis des décennies. En choisissant les matériaux adéquats, de dimensions et une conception appropriée, il est possible de réduire considérablement les pertes d'un transformateur, avec une moyenne de 70%. Ainsi, les transformateurs industriels offrent de possibilités économiques.

En effet, en achetant un transformateur, il faut non seulement prendre en compte le prix d'achat, mais aussi le coût global de cycle de vie. Ce coût comprend à la fois les pertes à vide et les pertes en charge. Sur le plan économique, le transformateur ayant le plus faible coût global représente la meilleure option. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un modèle à haute efficacité. Il est ensuite essentiel de procéder à une étude du réseau afin de déterminer les niveaux d'harmoniques du réseau relié au transformateur, étant donné que ces harmoniques peuvent avoir de graves répercussions à la fois sur la durée de vie et sur les pertes du transformateur.

Introduction

Les transformateurs sont les équipements les plus importants dans un réseau électrique .Ils sont soumis à plusieurs contraintes qui sont les effets d'actions physiques ou chimiques. Les contraintes normales sont celles qui entraînent une usure et un vieillissement lent du matériel. Les contraintes anormales étant celles qui provoquent un vieillissement prématuré ou destruction immédiate du matériel. Les courts-circuits, les surcharges, les surtensions de foudre ou de manœuvre peuvent provoquer des défauts mécaniques comme les vibrations en régime permanent ou les efforts électrodynamiques sur les bobines.

II.1. les courts circuits et les surcharges [7]

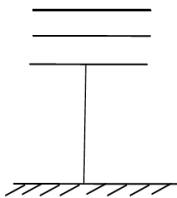
Une surcharge est une intensité électrique supérieure à celle prévue par l'appareil ou par le circuit électrique. En générale, il y a surcharge quand trop d'appareils sont branchés sur le même circuit. Les transformateurs doivent pouvoir résister ; sans dommage, aux surintensités auxquelles ils sont soumis. Ces surintensités sont principalement dues Aux courants de court-circuit.

Un courant de court -circuit se produit généralement lors de la fermeture d'un circuit électrique quelconque sur une impédance nulle ou de faible valeur. C'est le cas d'une mise à la terre accidentelle d'un point d'une ou plusieurs phases d'un réseau ou d'un matériel électrique.

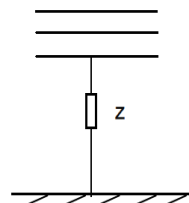
A) Types de court-circuit

Il existe principalement deux types de court-circuit :

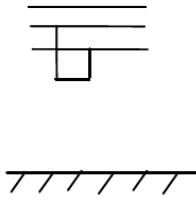
- Les courts circuits symétriques :
 - il s'agit des courts-circuits triphasés isolés ou mis à la terre.
- Les courts circuits dissymétriques :
 - des courts-circuits monophasés (phase-terre).
 - des courts-circuits biphasé isolé ou biphasé à la terre:(phase-phase) ou (phase-phase-terre).



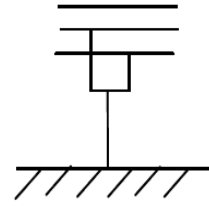
a) court-circuit monophasé



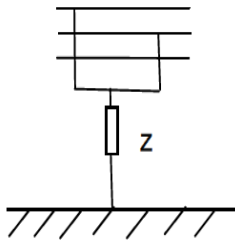
b) court-circuit monophasé à travers une impédance



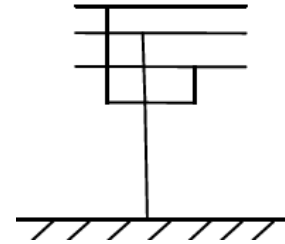
c) court-circuit biphasé isolé



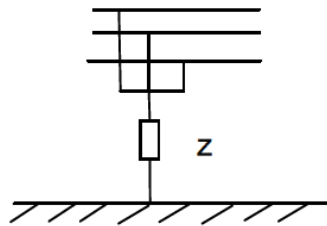
d) court-circuit biphasé terre



e) court-circuit biphasé terre à travers une impédance



g) court-circuit triphasé



f) court-circuit biphasé terre à travers une impédance

B) Les types de surcharges

- Les surcharges accidentelles ou récurrentes
- Les surcharges permanentes
- Les surcharges de très courtes durées

❖ Effets des surintensités

- De créer des efforts électrodynamiques entraînant des contraintes mécaniques élevées entre les bobines et entre bobinage et câblages ;
- De provoquer, dans les enroulements et isolant liquide des contraintes thermique par l'élévation excessive de température.

C) Méthode de calcul des courants de court-circuit [8]

Pour le calcul des courants de court-circuit plusieurs méthodes sont proposées par les normes.

➤ Méthode des impédances

Cette méthode permet de calculer les courants de court-circuit en tout point d'une installation avec une bonne précision. Elle consiste à totaliser séparément les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut, depuis et y compris la source jusqu'au point considéré ; puis à calculer l'impédance correspondante. Le courant de court-circuit I_{cc} est enfin obtenu par l'application de la loi d'Ohm.

$$I_{cc} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \sum Z} \quad (\text{II.1})$$

U_n est la tension nominale

Z est l'impédance totale

Toutes les caractéristiques des différents éléments de la boucle de défaut doivent être connues.

➤ Méthode de composition

La méthode est utilisable quand les caractéristiques de l'alimentation ne sont pas connues. L'impédance amont du circuit considéré est calculée à partir de l'estimation du courant de court-circuit

à son origine, le $\cos \Phi = \frac{R}{X}$ est considéré comme identique à l'origine comme au point du défaut. En d'autres termes cela consiste à admettre que les impédances élémentaires de deux tronçons successifs de l'installation possèdent des arguments suffisamment voisins pour justifier le remplacement des additions vectorielles par additions algébriques des impédances. Cette approximation permet d'obtenir la valeur des courants de court-circuit avec une précision suffisante pour ajouter un circuit.

➤ Méthode conventionnelle

Cette méthode permet sans connaître les impédances ou les courants de courts-circuits de la partie amont de l'installation du circuit considéré, de calculer les I_{ccmin} et les courants de défaut à l'extrémité d'une canalisation. Elle est basée sur l'hypothèse que la tension à l'origine du circuit est égale 80 % de la tension nominale de l'installation pendant la durée du court-circuit ou du défaut.

II.2. Les surtensions [9]

On qualifie de surtension toute tension fonction de temps qui dépasse la tension de crête de régime permanent. Les surtensions dans les transformateurs sont provoquées soit par une cause interne, soit par une cause externe

➤ **Les causes internes :**

- Coupure ou déclenchement de courant inductif ou capacitif
- Commutation de l'électronique de puissance
- Apparition d'un défaut
- Disparition d'un défaut
- Perte d'une charge

➤ **Les causes externes**

- Foudre frappant les lignes ou les pylônes ou bien les fils de garde.

II.2.1 les type des surtensions

II.2. 1.1 Surtensions atmosphériques [10]

Le courant injecté par le coup de foudre augmente rapidement (de $1 \mu\text{s}$ à $10 \mu\text{s}$) à une valeur crête, ensuite diminue lentement. Pour minimiser le nombre de coup de foudre sur les lignes, on doit tenir compte de différents facteurs, comme : la hauteur des pylônes, le nombre et l'emplacement des fils de gardes, le nombre de disque isolateurs par chaîne, l'impédance de pylônes.

a) Coups de foudre directs

Les coups de foudre direct touchent souvent les conducteurs (lignes) de transport de l'énergie électrique. La foudre se manifeste par l'injection d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA dans une ligne.

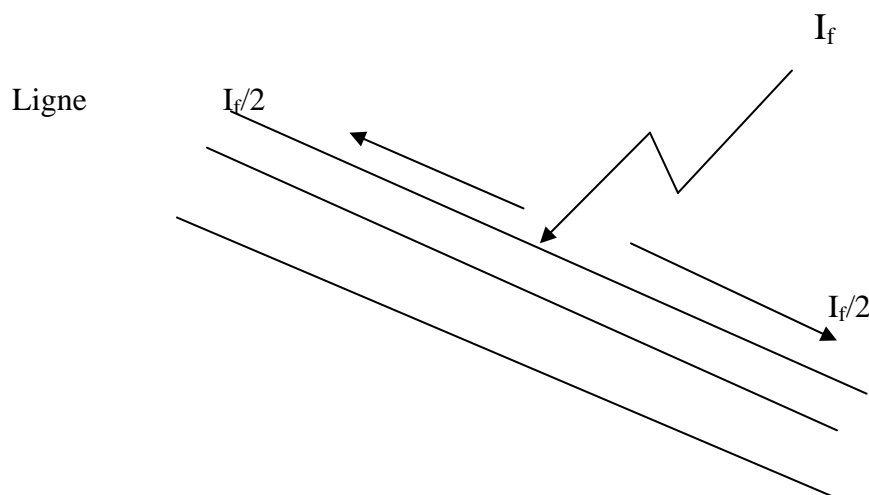


Figure (II .1): Schéma d' un coup de foudre direct

Cette onde de courant se propage de part et d'autre du point d'impact. Elle provoque une surtension donnée par la formule suivante :

$$U(t) = Z_c \cdot I_f / 2 \quad (\text{II.2})$$

- Z_c : est l'impédance caractéristique de la ligne (300-1000 Ω).
- I_f le courant d foudre injecté

Cette surtension peut provoquer le claquage de la chaîne d'isolateur qu'elle rencontre si elle dépasse la tension de tenue de cette dernière.

b) Coups de foudre indirects

Les coups de foudre indirect tombent généralement sur le pylône ou le fils de garde et résultent en une augmentation de la tension de la masse métallique du pylône par rapport à la terre. La surtension U correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV. Fig (II.2)

$$U = R \cdot \frac{I}{4} + \frac{1}{4} L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.3})$$

avec R , résistance en onde raide de la prise de terre et L , l'inductance du pylône.

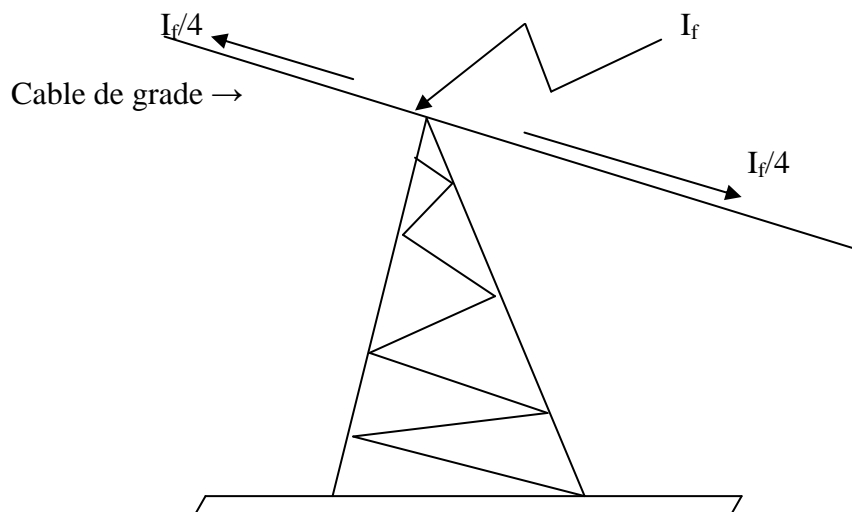


Figure (II.2) Schéma d'un coup de foudre sur un câble de garde

II.2.1.2 Surtension de manœuvre[11]

Ces surtensions sont des impulsions de tension apparaissant lors de la commutation (ouverture/fermeture) de circuit comportant des éléments inductif telle que ; les inductances, l'enroulement de moteurs ou transformateurs .Les surtensions de manœuvre dépendent uniquement des caractéristiques propres du réseau électrique, et se traduisent par des régimes transitoires complexes et se manifestent par des oscillations fortement amorties.

II.2.1.3 Surtension à fréquence industrielle

Les surtensions à fréquences industrielles (50 Hz ou 60 Hz) sont causées très souvent par

- Un défaut à la terre
- Une rupture du conducteur neutre
- Un défaut d'un régulateur de tension d'un alternateur ou d'un régulateur en charge d'un transformateur.

Ces surtension sont de longue durée (quelques secondes à quelques minutes) et ne sont pas bien amorties.

II.2.1.4 Ferro-résonance

Ce phénomène est de nature oscillatoire. Il peut prendre naissance par l'interaction de la capacité d'un réseau avec une inductance non linéaire ; Particulièrement celle présentée par un transformateur à vide. Il en résulte des surtensions entretenues ou non sur des réseaux à forte capacitance (câble armé en particulier) qui peuvent entraîner des avaries aux transformateurs et aux câbles eux-mêmes.

II.2. 2. Les caractéristiques de déférentes surtensions .tab (II.1)

surtension	durée	Raideur de front de montée ou fréquence	Amortissement en fonction de la distance
atmosphérique	Très courte (μs)	Très élevée (1000 kV/ μs)	fort
manœuvre	Courte (ms)	Moyenne (1 à 200 kHz)	moyenne
A fréquence industrielle	Longue(s)	Fréquence de réseau	Faible

Les effets de la surtension

- Claquage des isolants.
- Augmentation le courant magnétisant des transformateurs.
- Défaut d'isolement entre spire d'un même enroulement.
- Réduction de la continuité de service par des interruptions longues ou courte.

II.2.3 Propagation de l'onde de surtension [12]

L'onde se propage le long de la ligne a une vitesse

$$V = \sqrt{1/LC} \quad (\text{II.4})$$

ou L et C sont respectivement l'inductance et la capacité par unité de longueur de la ligne.

Cette vitesse est de l'ordre 300 000 km/s dans une ligne aérienne et de 100 à 150 000 km/s dans un câble isolé. Au cours de sa propagation, l'onde s'aplatit, s'amortit et devient peu à peu moins dangereuse.

Conclusion

Les transformateurs sont des appareils électriques sensibles et de grandes importances, dans leurs fonctionnements subissent des défaillances. Voici quelques uns des defaults pouvant arriver sur les transformateurs :

- Courts circuits
- Surtension
- Fuite d'huile
- Point chaud régleur

Introduction

En vue d'étudier les phénomènes physiques dans les transformateurs, nous présentons les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature.

III. Principaux modèles des transformateurs de puissance

En vue d'étudier les phénomènes physiques dans les transformateurs, nous présentons les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature.

III.1. Modèle de Morched [13]

Ce modèle est utilisé dans EMTP (Electro Magnetic Transients program) pour modéliser le transformateur en haute fréquence. Supposons un transformateur de 'n' bornes (y compris HT et BT), l'équation matricielle qui relie les tensions et les courants des bornes est (III-1) ou sous la forme réduite (III-2).

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

$$[Y][V]=[I]$$

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

La **figure III.1** présente le modèle d'un transformateur considéré comme une boîte noire de n bornes.

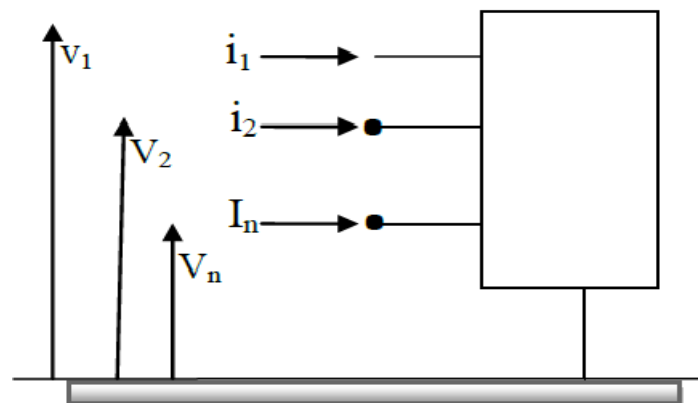


Fig. III.1 modèle d'un transformateur

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

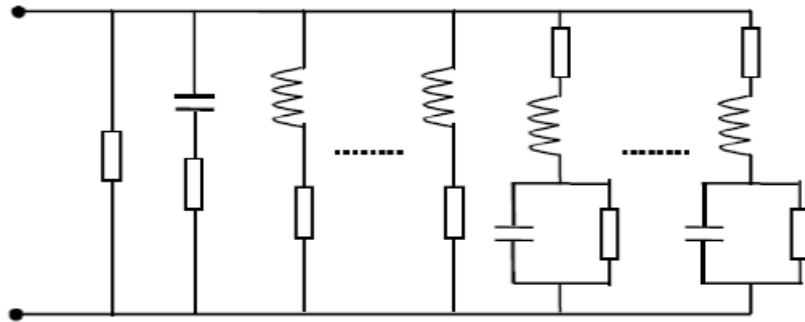


Fig. III.2 Circuit équivalent pour un élément de la matrice d'inductances

Le circuit équivalent sera établi en suite pour pouvoir être introduit dans EMTP. Cependant, pour réduire le calcul, ce modèle a fait une hypothèse simplificatrice en considérant que la matrice $[Y]$ est symétrique, ce qui n'est pas toujours valable. De plus, une autre difficulté provient de la détermination des éléments de la matrice $[Y]$ qui est aussi compliquée lorsqu'elle est réalisée en haute fréquence.

L'avantage de ce modèle, c'est qu'il permet de modéliser tous les types de transformateurs à condition d'avoir les valeurs de la matrice admittance.

III.2. Modèle de Leon [14]

Dans leurs travaux, Leon et Semlyeh, ont présenté le développement d'un modèle du transformateur de puissance en haute fréquence. Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés :

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

• Pour chaque colonne du circuit magnétique du transformateur, un système de trois matrices est calculé et puis transformé sous forme d'une équation d'état. Ensuite un circuit de Foster en série fig. (III.3) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

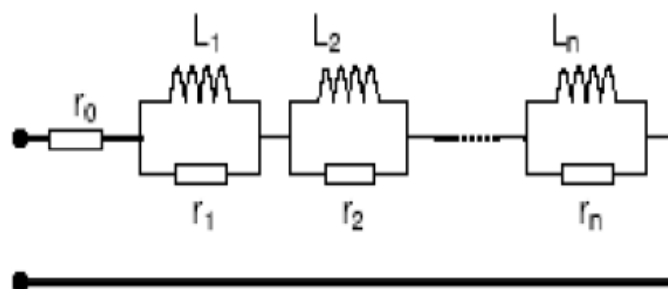


Fig. III.3 Circuit de Foster en série

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

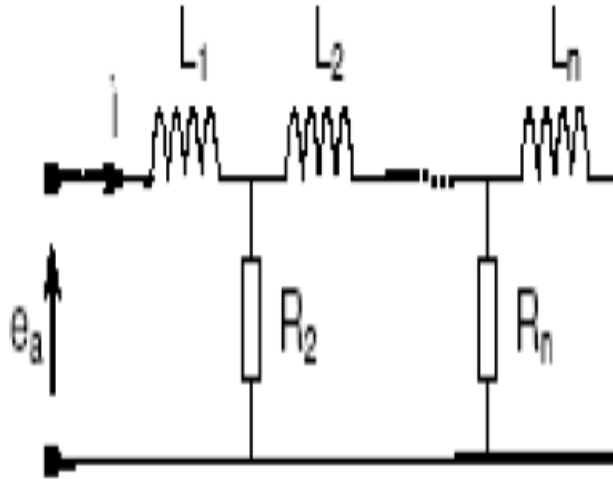


Fig. III.4 Modèle de Cauer pour le noyau de fer.

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

Fig. III.3 Circuit de Foster en série

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

III.3.Modèle de Chimklai[15]

Dans ce modèle, les auteurs ont proposé une méthode simple pour modéliser un transformateur de puissance. Ce modèle Fig. (III.5) se base sur le modèle classique (à 50Hz) du transformateur. Ensuite pour modéliser le transformateur en HF, les capacités et les circuits R, L, C, sont synthétisés par les mesures et ajoutés dans le circuit du modèle classique. En effet, chaque circuit rajouté représente un phénomène qui se produit en haute fréquence.

Les capacités représentent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer...etc.

Cette idée est la base afin d'établir plusieurs modèles qui sont développés par la suite.

Cette méthode de modélisation d'un transformateur est à la fois très simple et efficace.

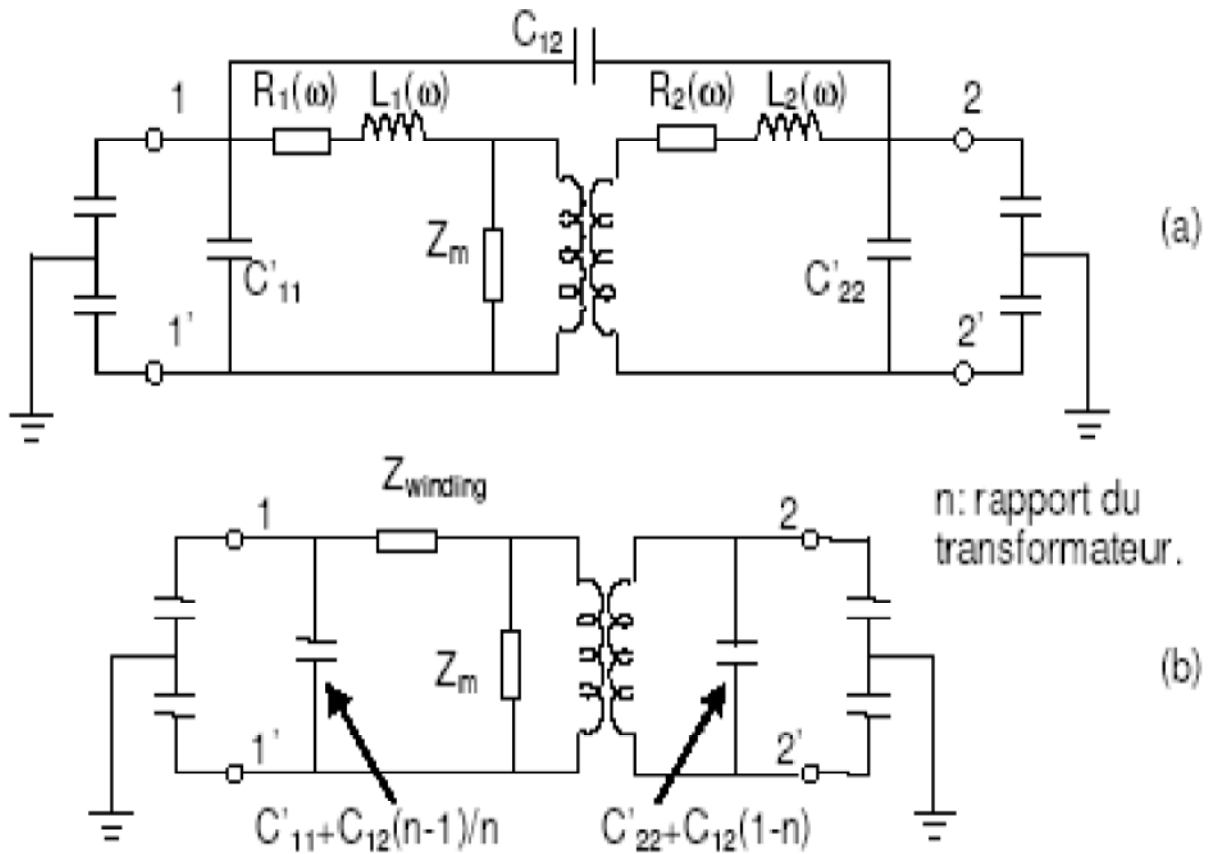


Fig. III.5 Modèle du transformateur de Chimklai :

a)- circuit d'origine. b)- circuit simplifié.

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

- La considération de la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, dite l'impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$) comme dans la Fig. (III.6). Cette impédance est synthétisée par une méthode d'approximation non linéaire pour un circuitRLC.

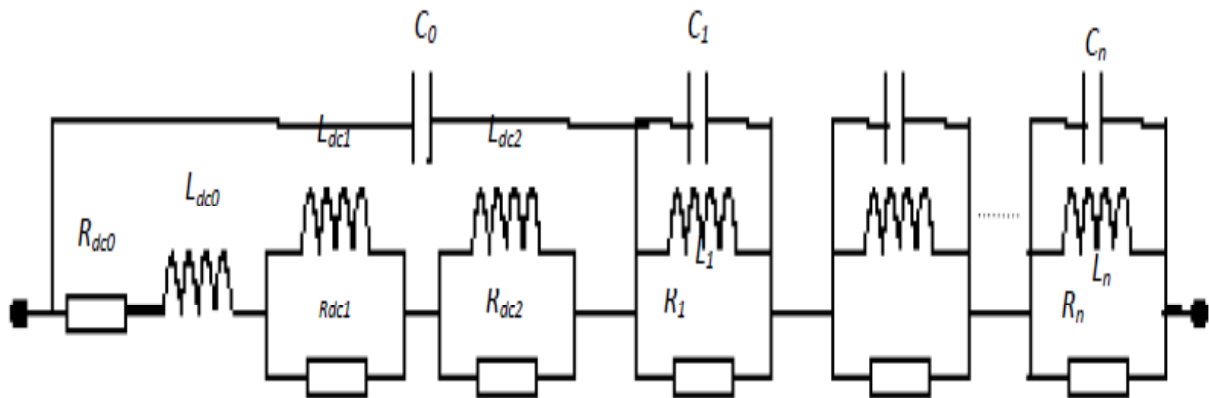


Fig.III.6 Impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$)

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

L'étude constitue une bonne base pour développer la modélisation du transformateur. Pourtant, elle présente encore des limites : les phases sont symétriques et la fréquence jusqu'à laquelle le modèle reste valable étant de 100 kHz.

III.4. Modèle de Gustavsen [8]

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

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

III.5. Modèle d'Andrieu [16]

Andrieu et al ont développé un modèle de transformateur de distribution triphasée à deux enroulements par des principes comme dans le modèle de Chimklai Fig. (III.7) Pour modéliser un transformateur en HF, les phénomènes suivants sont pris en compte :

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

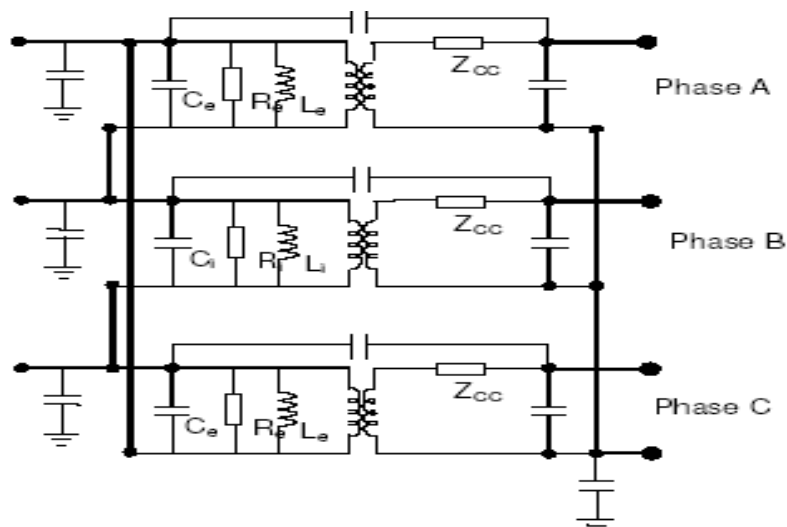


Fig.III.7 Modèle d'Andrieu.

Les auteurs ont également proposé une procédure, dans laquelle les mesures nécessaires sont fixées pour développer un modèle en HF. Ces mesures sont les mesures des capacités, les mesures des grandeurs électriques en court-circuit et en circuit ouvert. Mais la fréquence limite dans laquelle le modèle est valable reste inférieure à 1MHz. Pour une fréquence plus haute on constate des désaccords entre le résultat de la simulation et la mesure. Le circuit équivalent de l'impédance Z_{cc} est montré dans la fig. (III.8):

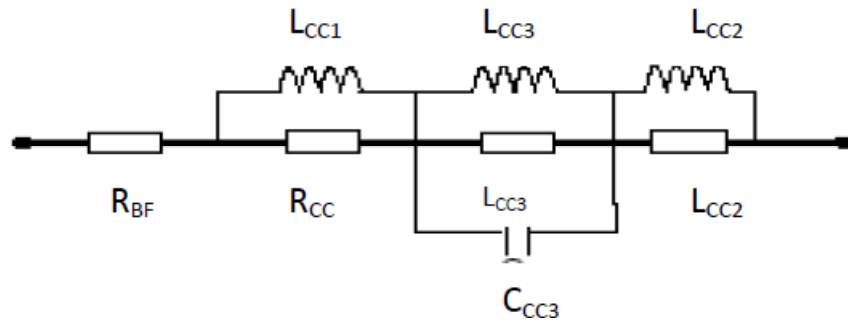


Fig.III.8 Circuit équivalent de Z_{cc} .

III.6. Modèle de Noda[17]

Noda a montré le développement d'un modèle de transformateur de puissance en HF. Ce modèle suit le même principe que celui de Chimklai. Donc à partir du modèle à 50Hz, en HF il tient compte :

- Des capacités entre les enroulements et entre les enroulements et la masse (C_{s1}, C_{s2}, C_{sm}).
- De l'effet de peau du conducteur et du noyau (Z_{skin}).
- Des résonances créées par les inductances de l'enroulement et capacités entre les spires (Y_1, Z_1).
- Chaque phénomène sera représenté par un circuit équivalent. Le modèle complet est montré dans la Fig. (III.9) :

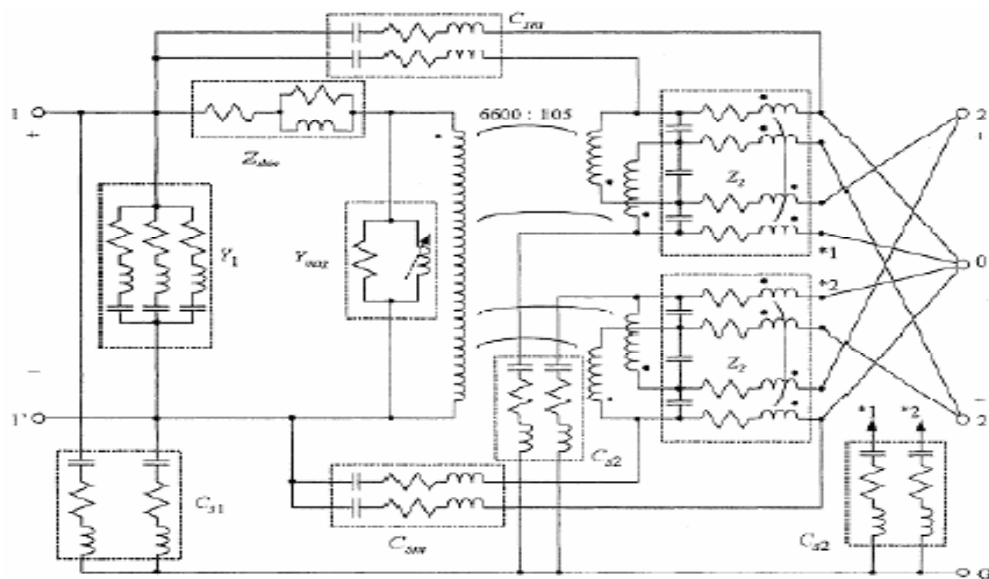


Fig. III.9 Modèle de Noda.

Ce travail a donné un bon résultat sur la modélisation du transformateur en haute fréquence (HF). Il a mis en œuvre des méthodes simples pour synthétiser les circuits équivalents représentant les phénomènes comme les résonances, ou les transit par voie de capacités. Mais en raison de la structure particulière monophasée, la disposition particulière de l'enroulement BT (divisé en quatre), le modèle reste encore difficile à appliquer. Fig. (III.9) Modèle de Noda.

III.7. Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles [18]

Parmi ces types de modèle, c'est ce modèle qui a été utilisé dans notre travail.

On peut assimiler le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc à celui d'un système de capacités et d'inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances, inductances et capacités. Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement atteint dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulations mises en œuvre. Le transformateur est discrétisé par spires, par galettes ou par des bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres éléments. Entre les éléments, il existe des capacités de couplage et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse, Fig. (III.10).

Quel que soit le type de représentation, les paramètres correspondant à chaque élément sont calculés en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques de bobinage ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau.

Ce modèle est le plus répandu et utilisé à l'heure actuelle. Cependant le nombre de paramètres à calculer est important. Le schéma est modifié, plus au moins, selon l'intérêt de chaque étude dont les paramètres sont déterminés, soit par la mesure, soit par des calculs analytiques directs de la géométrie. Un autre modèle assez simple est basé sur un circuit essentiellement composé d'inductances, de capacités et de résistances en parallèles qui représentent les pertes. Les résistances sont omises. A travers l'analyse du fonctionnement de plusieurs transformateurs, les auteurs ont pu estimer les pertes par courant de Foucault par des résistances en parallèles avec les inductances de fuites et empiriques dépendant de la configuration du transformateur choisie.

La configuration du transformateur choisie est représentée par la figure III.10

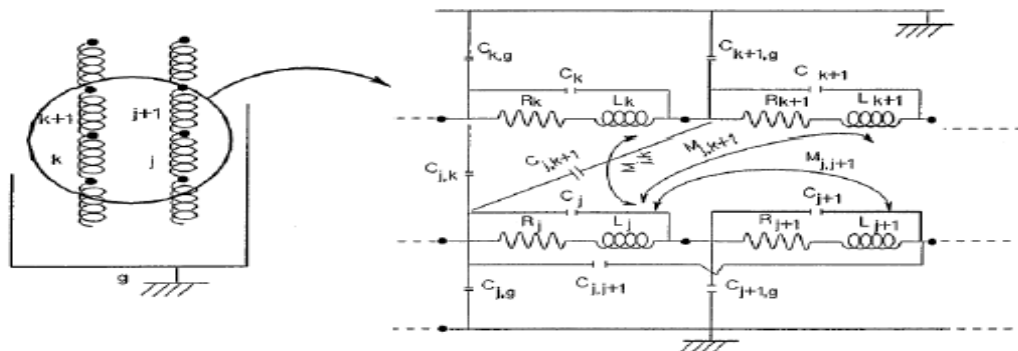


Fig. III.10 couplage de l'élément j avec les autres éléments.

Conclusion

L'utilisation des modèles mathématiques associée à un schéma équivalent s'avère nécessaire pour appréhender certaines caractéristiques des transformateurs et leurs comportements en régime transitoire (ondes de choc,.....).

Introduction

Pour représenter correctement le transformateur tel qu'il se comporte, le circuit équivalent doit tenir compte de :

- La résistance ohmique des enroulements au primaire R_1 et au secondaire R_2 ;
- La réactance de fuite au primaire X_{1f} et au secondaire X_{2f} ;
- Le courant d'excitation I_ϕ ;
- Les pertes par hystérésis et par courants induits dans l'acier.

IV.1. Schéma équivalent d'un transformateur soumis aux surtensions [19]

Etant donnée que les phénomènes qui se produisent dans les trois phases d'un transformateur traversées par les mêmes ondes de surtensions sont identiques, donc on se limite au long de cette analyse à un schéma équivalent monophasé de l'enroulement HT du transformateur illustré sur la figure suivante :

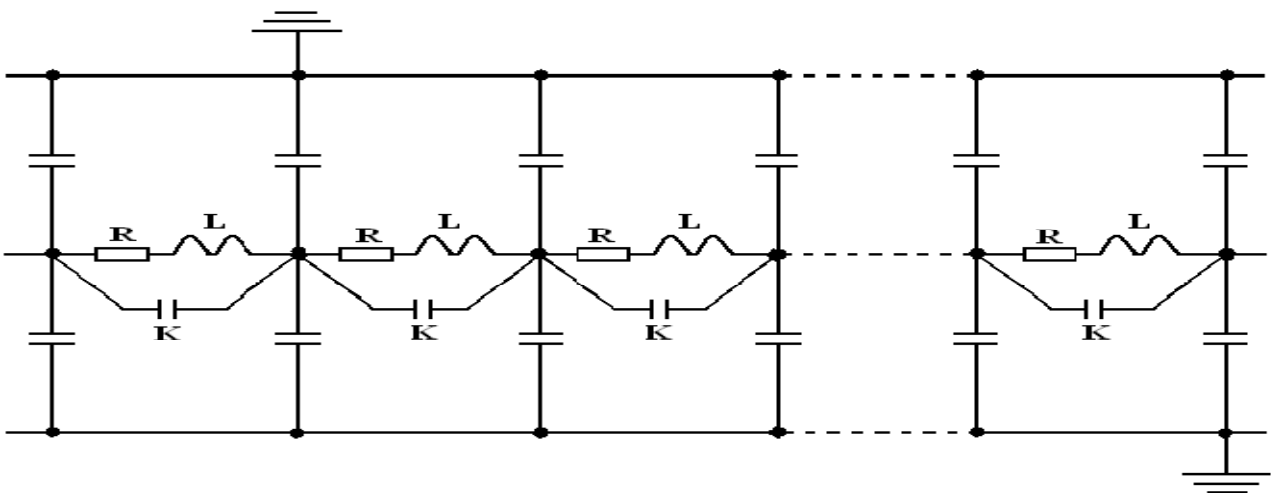


Fig (IV.11) : Schéma électrique équivalent complet de l'enroulement HT.

IV.2. Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT [20]

Durant notre étude nous supposons que dans les transformateurs de grandes puissances il existe toujours un enroulement connecté en triangle jouant le rôle d'un écran magnétique, nous assurerons aussi que les ondes agissantes sur les transformateurs sont de fréquences suffisamment importantes pour pouvoir négliger l'influence du noyau sur l'enroulement, on néglige également la résistance des enroulements et la transmission des phénomènes transitoires entre eux. Le schéma représenté sur la figure (III.11) correspond à cette simplification.

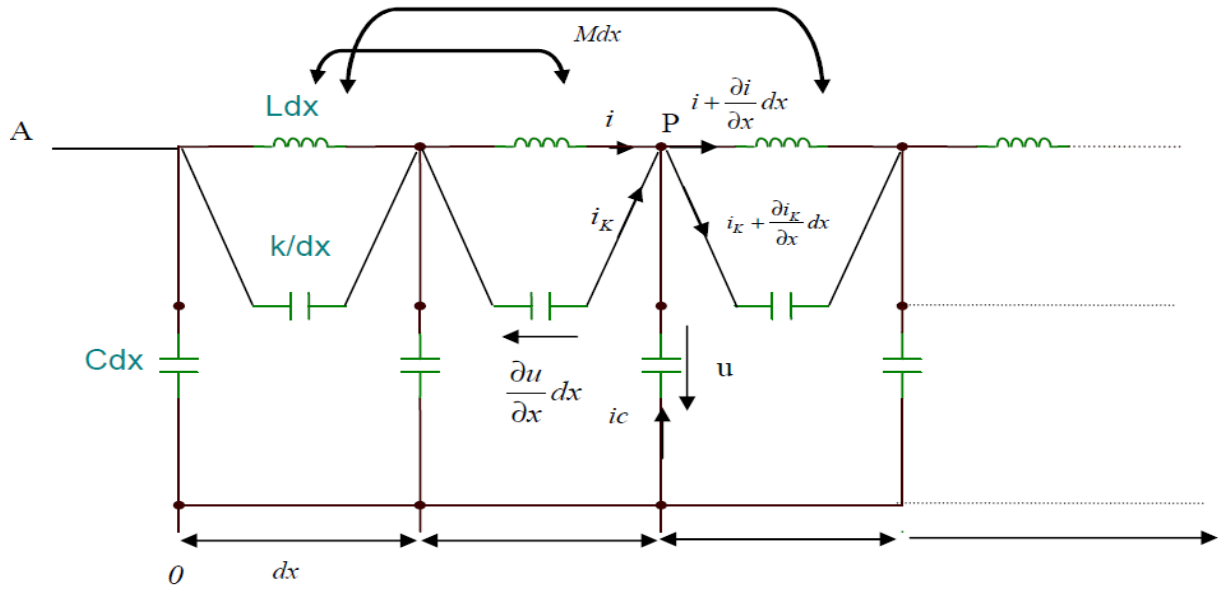


Figure (IV.12) Schéma équivalent de l'enroulement haute tension du transformateur

L (H/m) : Inductance propre des éléments de l'enroulement.

M (H/m) : Inductance mutuelle entre enroulements.

K (F/m) : capacité longitudinale entre enroulements.

C (F/m) : capacité transversale de l'enroulement.

a) Equations du circuit

L'application de l'équation de Kirchhoff au nœud P donne :

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

$$\text{D'ou: } i_c = -\frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx \quad [\text{A}] \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Comme : } i_c = c dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad [\text{A}] \quad (\text{IV.2})$$

De (IV.1) et (IV.2) on a :

$$\frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx = -c dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{IV.3})$$

Sur la capacité K, on a la relation suivante :

$$i_k = - \frac{K \partial^2 u}{dx \partial x \cdot \partial t} dx$$

$$\text{D'où: } i_k = -K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$$

$$\text{Et: } \frac{\partial i_k}{\partial x} = -K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \text{ [A/m]} \quad (\text{IV.4})$$

Sur l'inductance L on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x} dx = -l dx \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\text{D'où: } \frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\text{Et: } \frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x}$$

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

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} \text{ [A/m]} \quad (\text{IV.5})$$

En sommant (4) et (5) ; on obtient :

$$\frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} - K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \text{ [A/m]} \quad (\text{IV.6})$$

En égalant (3) et (6) puis en multipliant membre à membre $L \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$, on aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t} = 0 \text{ [A/m]} \quad (\text{IV.7})$$

La solution de l'équation (7) est de la forme :

$$u = U \cos(\omega t) \cdot \sin(\beta x)$$

$$\omega = 2\pi f :$$

D'où Ω est la pulsation, f étant la fréquence.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

β : est la constante de propagation.

λ : est la longueur d'onde.

Cette solution représente une onde stationnaire.

IV.3. Répartition initiale de la tension sur un enroulement du transformateur [21]

Lorsqu'on étudie la répartition initiale de la tension en régime transitoire, sur un bobinage, la contribution des inductances est nul car le courant ne parcourt plus les spires à cause de leur forte réactance d'induction ($L\omega$) et ne circule qu'à travers les capacités transversales (C) et les capacités longitudinales (K). C'est donc uniquement la répartition due à la présence des capacités que l'on prend en compte.

IV.3. a) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est mis à la terre

Pour calculer la distribution initiale de la tension, on admet que les réactances ($L\omega$) égale à l'infinie, et on considère que la répartition de la tension ne dépend que des capacités.

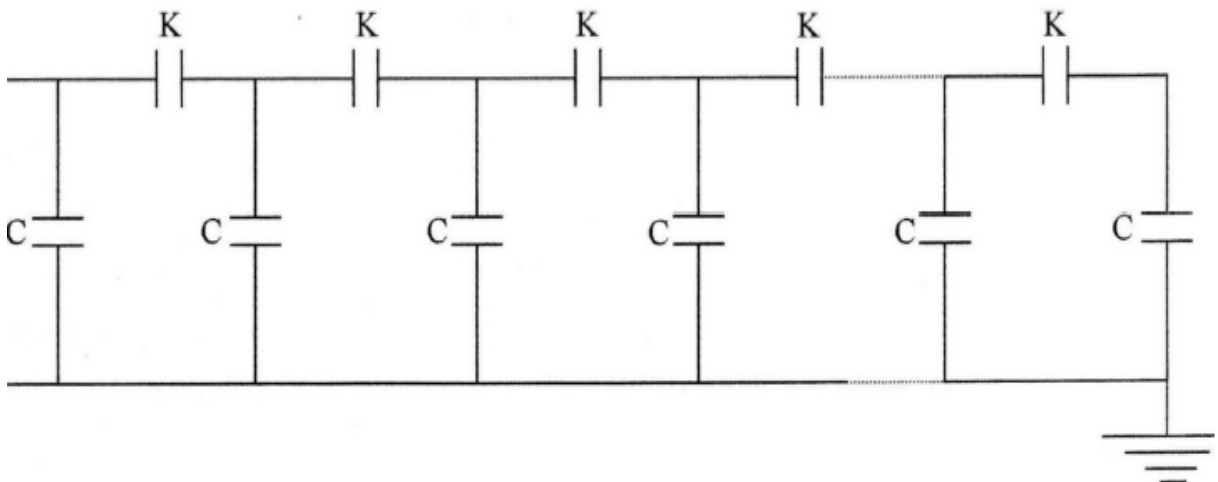


Figure (IV.13.) : Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition initiale de la tension

Examinons le schéma de la figure (IV.13) et admettons que le neutre de l'enroulement est mis à la terre.

❖ Si $C = 0$

S'il n'y avait pas de capacités par rapport à la terre ($C=0$), toutes les capacités K seraient en série et le circuit de la (fig. IV.13) serait parcouru par un courant de même valeur. On obtient alors une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement (identique à la répartition au régime permanent).

On distingue alors deux cas :

- Le neutre est mis à la terre : la répartition est représentée par une droite inclinée réunissant les points M et N qui correspondent respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement qui se trouve sous la tension U et à sa fin, dont le potentiel est nul (fig. IV.14).
- Le neutre est isolé de la terre : la répartition est représentée par une droite horizontale M' N' (fig. IV.15).

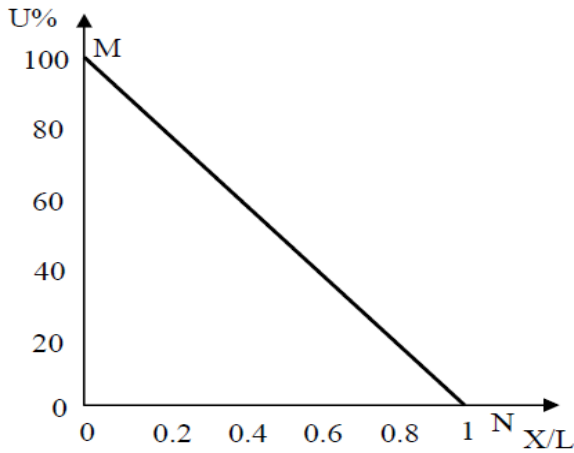


Fig. (IV.14). Neutre mis à la terre

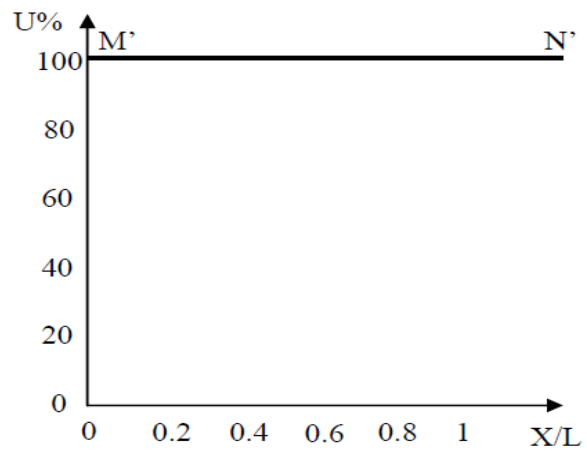
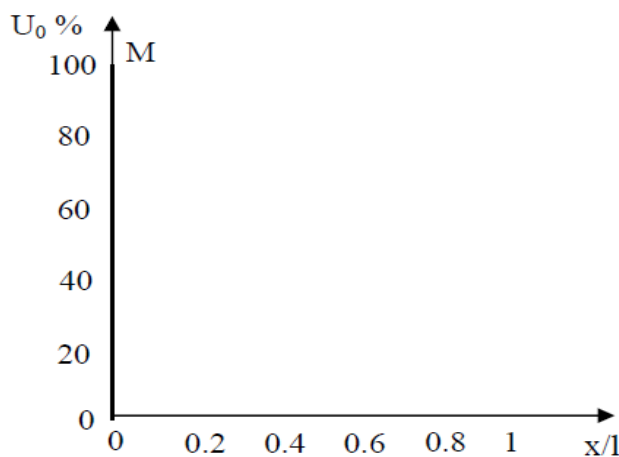


Fig. (IV.15). Neutre isolé de la terre

❖ Si $K = 0$

Dans ce cas le courant de ligne se dirige vers la terre seulement à travers la première capacité C depuis le commencement de l'enroulement. Cela veut dire que toute la tension est concentrée sur la première spire qui est donc soumise à une très forte surtension, une telle répartition est représentée par une droite verticale réunissant les points M et O.

La répartition initiale réelle de la tension le long de l'enroulement se situe entre les droites MN et MO correspond respectivement aux limites ($C = 0$ et $K = 0$).

Fig. (IV.16). (Si $K=0$)

Pour le calcul de la répartition initiale de la tension, dans l'hypothèse où ($L \rightarrow \infty$), l'équation (IV.7) devienne :

$$-c \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + K \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad [\text{A/ms}] \quad (\text{IV.8})$$

Pour ($t=0$) : l'équation (IV.8) s'écrit :

$$-C u_0(x) + K \frac{\partial^2 u_0(x)}{\partial x^2} = 0 \quad [\text{C/m}] \quad (\text{IV.9})$$

On divise les deux membres de l'équation par K, on aura :

$$\frac{\partial^2 u_0(x)}{\partial x^2} - \frac{C}{K} u_0(x) = 0 \quad [\text{V/m}^2] \quad (\text{IV.10})$$

L'équation (IV.10) est une équation différentielle de 2^{ème} degré, tel que sa solution est de type :

$$u_0(x) = A e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x} \quad (\text{IV.11})$$

Avec : $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$: est le facteur de la répartition initiale.

➤ **Détermination des constantes A et B :**

Les conditions aux extrémités et aux limites d'après la figure (IV.11) nous donnent :

- Pour $x = 0$: (entrée de l'enroulement) ;

$$u(x, 0) = u(0, 0) = U \quad (\text{IV.12})$$

- Pour $x=1$: (point où le neutre mis à la terre) ;

$$u(x, 0) = u(1, 0) \quad (\text{IV.13})$$

En introduisant les équations (IV.12) et (IV.13) dans l'expression (IV.11), on aura :

- ❖ Pour $x = 0$:

$$U = A + B \Rightarrow B = U - A$$

- ❖ Pour $x = 1$:

$$A e^{\alpha 1} + e^{-\alpha 1} = 0$$

Après les calculs, on trouve :

$$A = -U \frac{e^{-\alpha 1}}{e^{\alpha 1} - e^{-\alpha 1}}$$

$$B = U \frac{e^{-\alpha 1}}{e^{\alpha 1} - e^{-\alpha 1}}$$

En injectant A et B dans l'expression (IV.12), on obtient :

$$u_0(x) = U \left(\frac{e^{\alpha(1-x)} - e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \right) \quad (\text{IV.14})$$

Ou :

$$u_0(x) = U \frac{\text{sh}[\alpha(1-x)]}{\text{sh}(\alpha l)}$$

Cette analyse mathématique montre que la tension le long de l'enroulement est répartie suivant une loi exponentielle.

IV.3.b) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est isolé de la terre

Examinons le schéma de la figure (IV.17) et admettons que le neutre de l'enroulement est isolé de la terre.

Si $C=0$:

Nous aurons une répartition uniforme de la tension représentée par la droite horizontale (M'N') de la figure (IV.15).

Si $K=0$:

Nous aurons la répartition initiale de la tension représentée par la droite verticale (M'O) de la figure (IV.16).

La répartition réelle de la tension le long de l'enroulement se situe entre les droites (M'N') et (M'O), correspond respectivement aux limites ($C = 0$, $K = 0$).

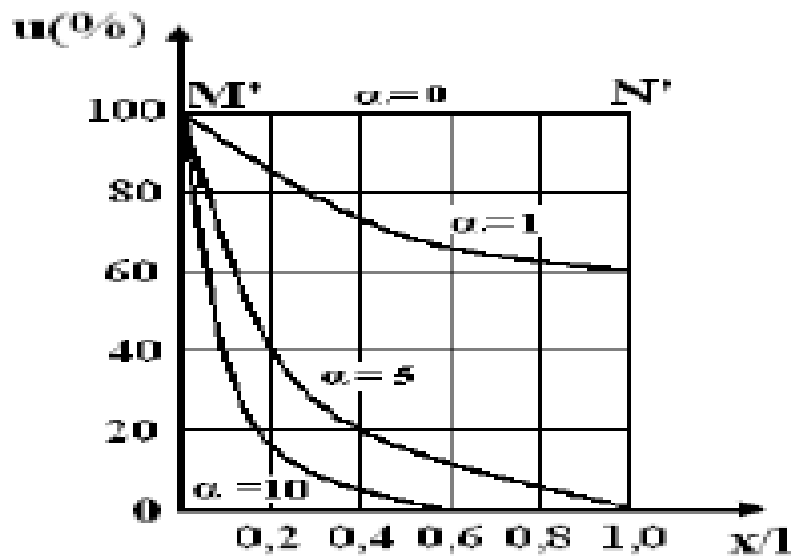


Fig. (IV.17) : Répartition initiale selon la valeur de α

✓ Les conditions aux extrémités sont inchangées tandis que les conditions aux limites seront modifiées par rapport au cas étudié précédemment.

❖ Pour $x = 0$:

$$u(x, 0) = u(0, 0) = U \quad (\text{IV.15})$$

❖ Pour $x = 1$: (Dans ce cas le courant égal à zéro)

$$i + i_k = 0$$

Dans l'hypothèse où ($L \rightarrow \infty$), l'équation (IV.6) devienne :

$$\frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} = -K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \Rightarrow \int \frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx = -K \int \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} dx$$

$$(i + i_k)_{x=1} = -K \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=1} = 0$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=1} = 0 \quad (\text{IV.16})$$

On introduisant (IV.15) et (IV.16) dans (IV.11) on aura :

❖ Pour $x = 0$:

$$U = A + B$$

❖ Pour $x = 1$:

$$A\alpha e^{\alpha 1} - B\alpha e^{-\alpha 1} = 0$$

En calculant, on détermine que :

$$A = U \frac{e^{-\alpha 1}}{e^{\alpha 1} + e^{-\alpha 1}}$$

$$B = U \frac{e^{\alpha 1}}{e^{\alpha 1} + e^{-\alpha 1}}$$

En injectant A et B dans (12), on aura :

$$u_0(x) = U \frac{e^{-\alpha 1}}{e^{\alpha 1} + e^{-\alpha 1}} e^{\alpha x} + U \frac{e^{\alpha 1}}{e^{\alpha 1} + e^{-\alpha 1}} e^{-\alpha x}$$

Ou :

$$u_0(x) = U \frac{ch[\alpha(1-x)]}{ch(\alpha 1)} \quad (\text{IV.17})$$

Aussi cette analyse mathématique montre que la tension le long de l'enroulement est répartie suivant une loi exponentielle

IV.4 Répartition finale de la tension [22]

Les courbes de répartition de la tension le long de l'enroulement représentées sur les figures (IV.18) et (IV.19) correspondent aux régimes transitoires, après un certain intervalle de temps suffisant les capacités seront chargées l'onde de surtension se répartie le long de l'enroulement, c'est 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 dans la figure (IV.20), de fonction $u(x) = U(-\frac{1}{l}x + 1)$ correspondante à $\alpha = 0$ de la figure (IV.21). 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 à l'axe des abscisses dans la figure (IV.21) de fonction $u(x) = U = \text{cte}$ correspondante à $\alpha = 0$ de la figure (IV.21)

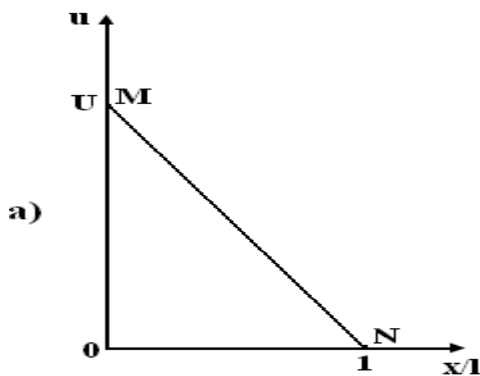


Fig. (IV.20).neutre mis à la terre

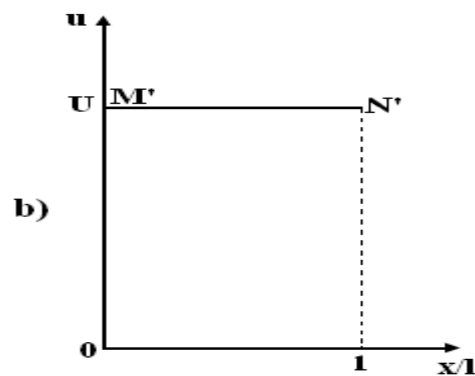


Fig. (IV.21).neutre isolé de la terre

IV.5 les conséquences de l'onde de surtension sur le transformateur

Dans ce paragraphe on va prendre en considération les principaux effets dus à la propagation de l'onde de surtension. A noter, que si l'onde arrive par la haute tension, elle peut atteindre tous les circuits électriques. Ces effets qui concernent donc tous les niveaux de tension sont :

- Claquage des isolants qui entraîne la mise hors service de transformateur et les perturbations des conditions normales.
- Destructions matérielles, fusion d'éléments, incendies, explosions.
- Les surtensions de courte durée augmentent le courant magnétisant des transformateurs, d'autant plus que leur circuit magnétique est saturé.
- Des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs.
- Les défauts d'isolement entre spires d'un même enroulement.
- Réduction de la continuité de service par des interruptions longues ou courtes.

IV.6. Régime transitoire de la tension [22]

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. 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 (IV.15) constituent les axes aux tours desquels s'effectuent les phénomènes oscillatoires, les limites des oscillations se trouvent dans les aires hachurées représentées sur la figure (IV.16).
-

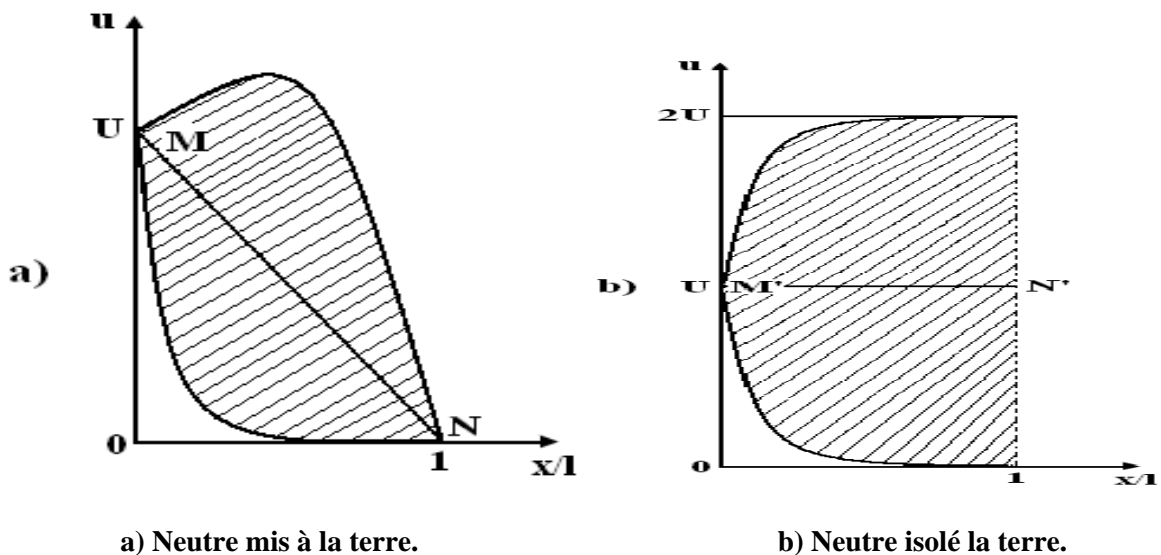


Figure (IV.22) : Limites des oscillations de l'onde de surtension dans l'enroulement.

La décomposition en série de Fourier de la différence entre la répartition initiale 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 (IV. 22.a).

Pour un neutre isolé de la terre on obtient une série d'harmoniques comprenant (1, 3, 5, ...etc.) en quart d'onde figure (IV 22.b).

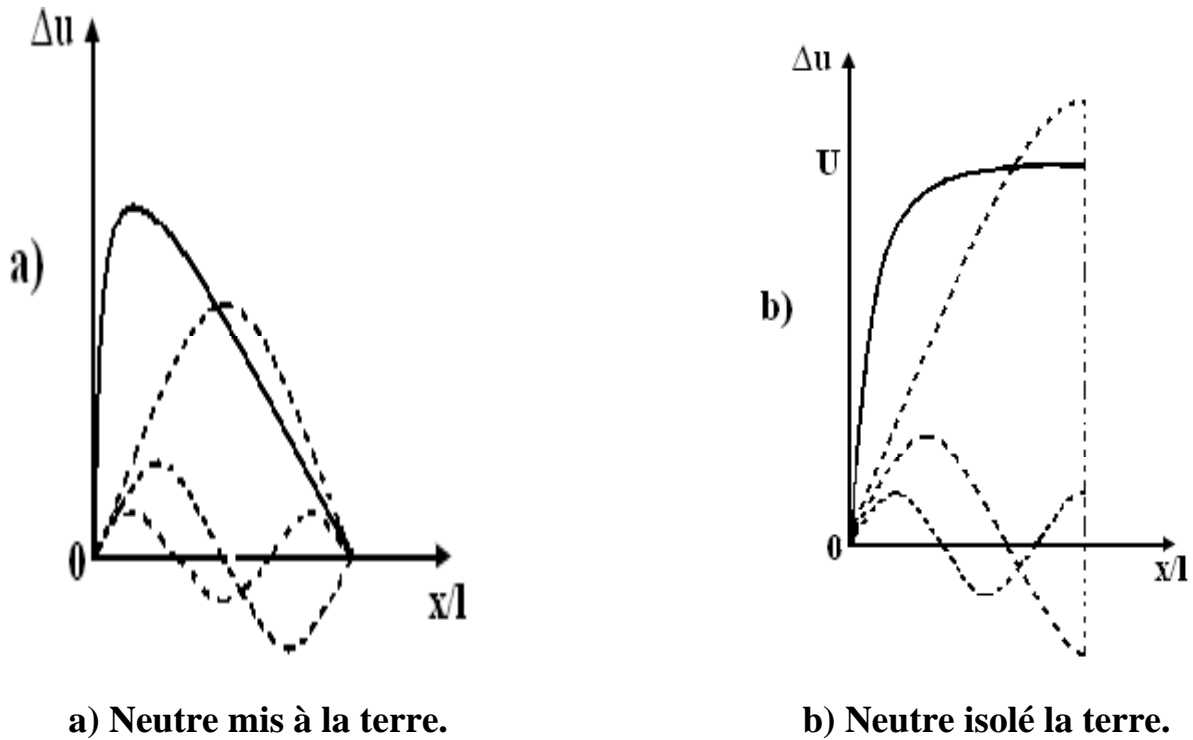


Figure (IV.23) : Phénomène transitoire dans l'enroulement.

L'onde qui pénètre dans l'enroulement se difforme continuellement, la figure (III.24) représente la répartition de la tension le long de l'enroulement pour différents instants

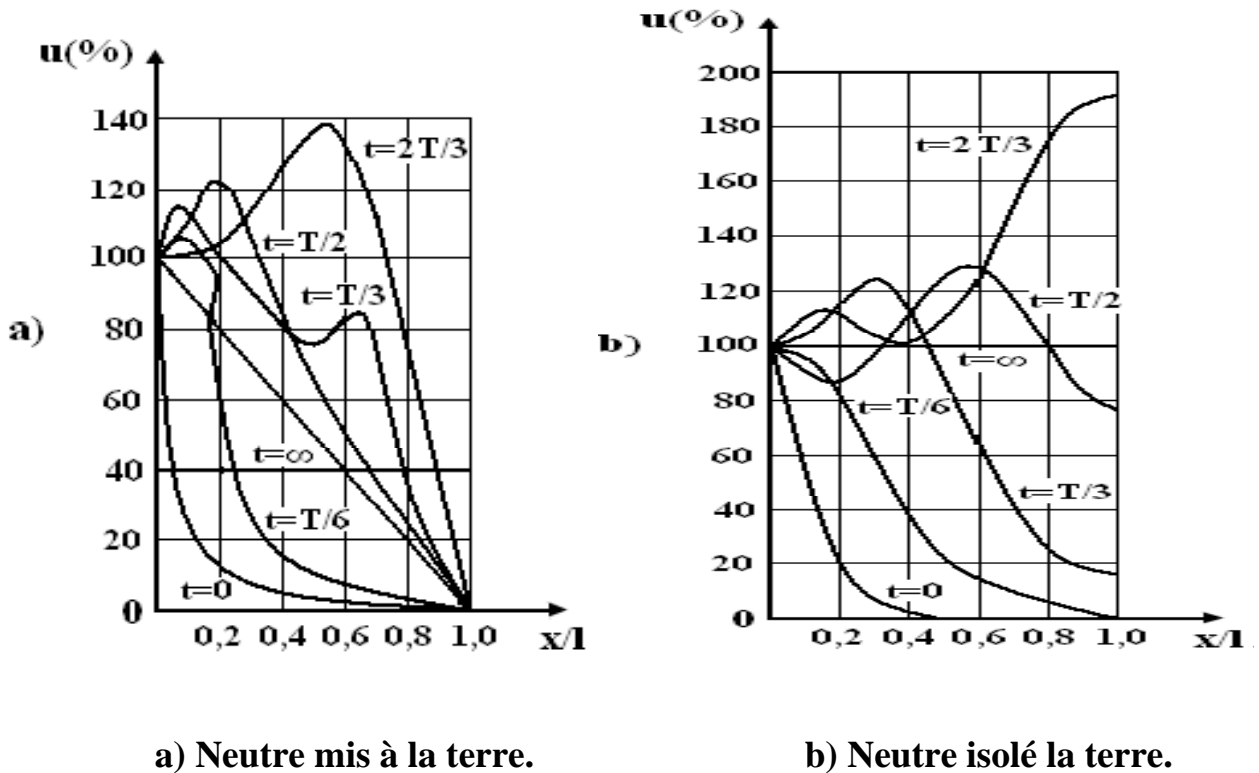


Figure (IV.24) : Phénomène transitoire dans l'enroulement.

Le potentiel variant 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, autrefois adopté par le constructeur. Dans ce cas le transformateur peut subir une avarie qui aura pour résultat sa mise hors service.

Conclusion

Le modèle que nous avons jugé plus convenable pour notre étude est celui basé sur les inductances propres et mutuelles, car il permet de traduire les différents phénomènes qui se produisent le long des enroulements du transformateur. La modélisation des transformateurs de grande puissance et l'étude de leurs comportements internes (la répartition de la tension le long de l'enroulement) est indispensable pour trouver de bonnes procédures dans le calcul des paramètres du modèle et d'avoir une bonne précision dans les résultats.

Introduction

Tout réseau de distribution électrique englobe une grande quantité de matériel supplémentaire pour la protection des générateurs, des lignes de transport et des transformateurs. Ces derniers peuvent être affectés par plusieurs défauts comme : un mauvais refroidissement, une surcharge, un court-circuit ou touché par la foudre. Pour remédier à ces divers menaces ; on fait appel aux différentes méthodes et dispositifs de protections.

V.1 Le dispositif de protection [23]

C'est un ensemble d'organes destinés à protéger soit les équipements, soit le personnel, soit les deux à la fois.

V.2 Rôle du dispositif de protection

Le dispositif de protection a pour rôle de détecter les défauts, d'élaborer les données, d'informer, et de couper.

Ces dispositifs de protection permettent d'éviter les conséquences des incidents qui peuvent être dangereuses pour les personnes et pour le matériel. Pour cela, ils doivent :

- Assurer la protection des personnes contre tout danger électrique.
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles il est soumis le matériel.

V.3 propriétés du dispositif de protection :

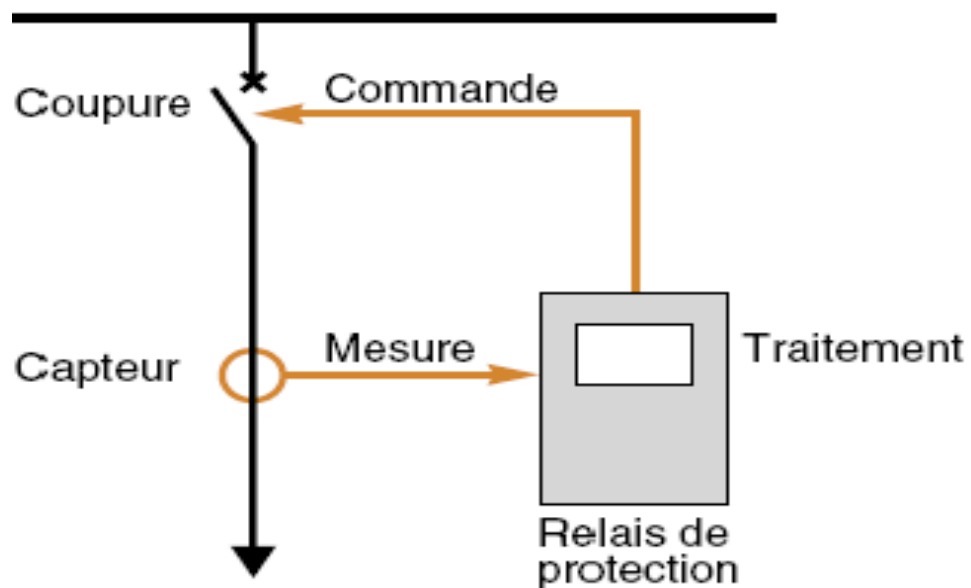
On dit qu'un système de protection est adéquat ou bon si et seulement si il présente les qualités suivantes :

- **Fiabilité**: déclenchement suite à un défaut réel, et éviter les déclenchements intempestifs.
- **Disponibilité** : c'est la capacité de d'intervention lors de l'apparition d'un défaut.
- **Rapidité d'action** : afin d'éviter les effets néfastes du défaut.
- **Sensibilité** : détecter la moindre variation de la grandeur surveillée.
- **Consommation** : la consommation doit d'être réduite au maximum.
- **Sélectivité** : déconnecter seulement les appareils encadrant le défaut de manière à maintenir sous tension les parties saines.

V.4 Constitution d'un système de protection

Un système de protection est constitué :(Fig.V.1)

- D'un organe de mesure.
- D'un organe de comparaison (relais).
- D'un organe d'exécution d'ordre des manœuvres.



FigV.1 : Schéma de principe de la chaîne de protection.

IV.5 Régime du neutre[24]

Dans les transformateurs, le régime de neutre joue un rôle très important. Lors d'un défaut d'isolement ou de mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre. Les régimes de point neutre les plus usuels sont les suivants :

- Neutre isolé.
- Neutre relié à la terre par une résistance.
- Neutre relié à la terre par une réactance.
- Neutre relié directement à la terre ($Z=0$)

V.6 Moyens de protection [25]

V.6.1 Disjoncteurs

Dans le cas des protections, les disjoncteurs servent à interrompre les courants, y-compris les courants de court-circuit, circulants dans le réseau. En règle générale, un disjoncteur a besoin de 1 à 3 cycles pour s'ouvrir, ce qui correspond à 20 jusqu'à 60 ms pour un réseau 50 Hz. La norme spécifie une coupure en 2 cycles pour les disjoncteurs de tension assignée supérieure ou égale à 245 kV. Suivant le moyen utilisé pour éteindre l'arc électrique lors de l'ouverture ou de la fermeture du circuit, les disjoncteurs MT et HT peuvent être :

- Disjoncteur à l'huile.
- Disjoncteurs à air comprimé.
- Disjoncteur à haute tension au SF6.
- Disjoncteur auto-pneumatique.

a) Disjoncteur à l'huile

Lorsqu'un arc est amorcé dans l'huile, plusieurs types de gaz sont produits (tel que l'hydrogène). L'évaporation de l'huile permet de générer un soufflage de l'arc qui va le refroidir et provoquer la coupure du courant. Ces disjoncteurs avaient pour principaux inconvénients de nécessiter de nombreux éléments de coupure en série (pour tenir la tension), et de nécessiter un entretien important et délicat (remplacement de l'huile usagée). Ils ont été supplantés par les disjoncteurs à SF₆ qui nécessitent peu de maintenance et ont une longue durée de vie.(Fig .V.2)



Fig .V.2 : Disjoncteur l'huile

b) Disjoncteur à air comprimé

Le gaz contenu dans les disjoncteurs à air comprimé est maintenu sous haute pression(20 à 35 bars) à l'aide d'un compresseur. Cette haute pression permet d'assurer la tenue diélectrique et de provoquer le soufflage de l'arc pour la coupure. Et ce soufflage intense exercé dans ces disjoncteurs a permis d'obtenir de très hautes performances (courant coupé jusqu'à 100kA sous haute tension) et avec une durée d'élimination du défaut très courte permettant d'assurer une bonne stabilité du réseau en cas de défaut.

L'inconvénient de ces disjoncteurs est leur bruit très important à l'ouverture et aussi il nécessite un entretien périodique, en particulier, de leur compresseur.(Fig .V.3)



Fig.V.3 : Disjoncteur à air comprimé

c) Disjoncteur à haute tension au SF₆ (hexafluorure de soufre)

Le disjoncteur SF₆ est de type soufflant, conçu pour des tensions de réseau de 75.5 à 800 kV pour des pouvoirs de coupure jusqu'à 63 kA. La conception de l'élément de coupure est basée sur l'expérience acquise des techniques de soufflage de conceptions antérieures.(Fig.V.4)

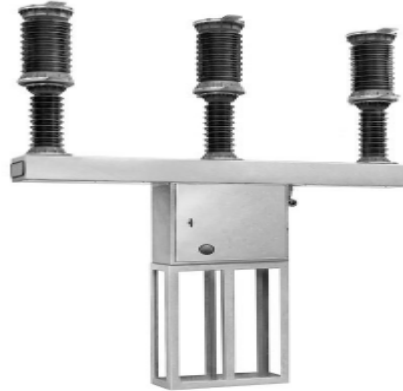


Fig. (V.4) : Disjoncteur au SF₆

• Caractéristiques des disjoncteurs SF₆

Sur le plan technique, plusieurs caractéristiques des disjoncteurs SF₆ peuvent expliquer leurs succès :

- La simplicité de la chambre de coupure qui ne nécessite pas de chambre auxiliaire pour la coupure.
- L'autonomie des appareils apportée par la technique auto-pneumatique (sans compresseur de gaz).
- La possibilité d'obtenir les performances les plus élevées, jusqu'à 63 kV, avec un nombre réduit de chambres de coupure : une seule chambre est nécessaire en 245 kV.
- Une durée d'élimination de défaut courte.
- Une grande endurance électrique qui permet de garantir une durée d'au moins 52ans.
- Un faible niveau de bruit.

d) Disjoncteur auto-pneumatique

Lorsque le disjoncteur est en position "fermé", le courant transite par des contacts dits "permanents" qui sont situés sur le diamètre extérieur de la partie active. Lors d'un déclenchement du disjoncteur, la partie mobile se déplace vers le bas, entraînant la séparation des contacts permanents. Le courant passe alors par une autre série de contacts, appelés "contacts d'arc". Quand la partie mobile a fait une course suffisante, les contacts d'arc se séparent, ce qui provoque l'amorçage d'un arc entre ces contacts. Les contacts d'arc sont réalisés avec des matériaux à base de tungstène de manière à pouvoir supporter sans dommage les effets de l'arc électrique.

Pendant la manœuvre d'ouverture, le disjoncteur produit lui-même la compression du gaz nécessaire au soufflage de l'arc. Le déplacement relatif du cylindre de soufflage par rapport au piston fixe crée une surpression dans le cylindre qui s'évacue à l'intérieur de la buse et refroidit l'arc, permettant ainsi son extinction. (Fig.V.5)

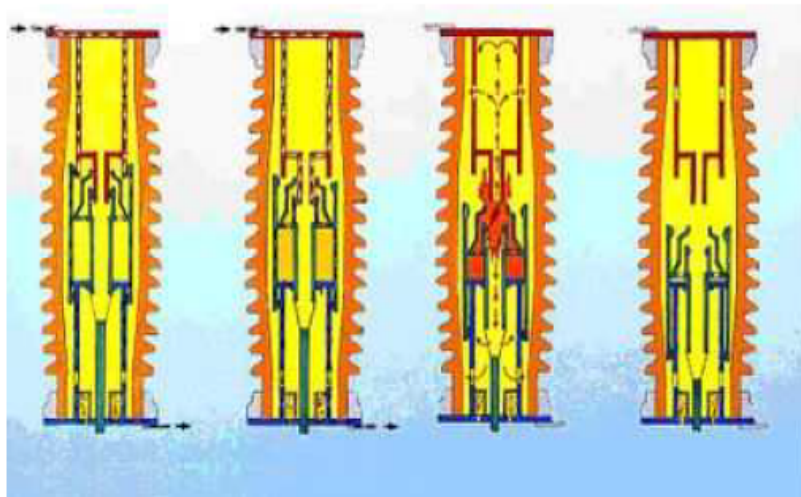


Fig. (V.5) : Principe des disjoncteurs auto pneumatique.

Fonctions assurées par le disjoncteur

a) Protection contre les surcharges

La protection contre les surcharges est assurée par la coupure du circuit surchargé avant un échauffement anormal de la canalisation, C'est le rôle des déclencheurs thermiques qui peuvent détecter de faibles surcharges.

Le principe de fonctionnement est analogue à celui du relais thermique. Il est basé sur la différence de dilatation de deux lames de métal, l'une ayant un coefficient de dilatation petit et l'autre très élevé.(Fig.V.6)

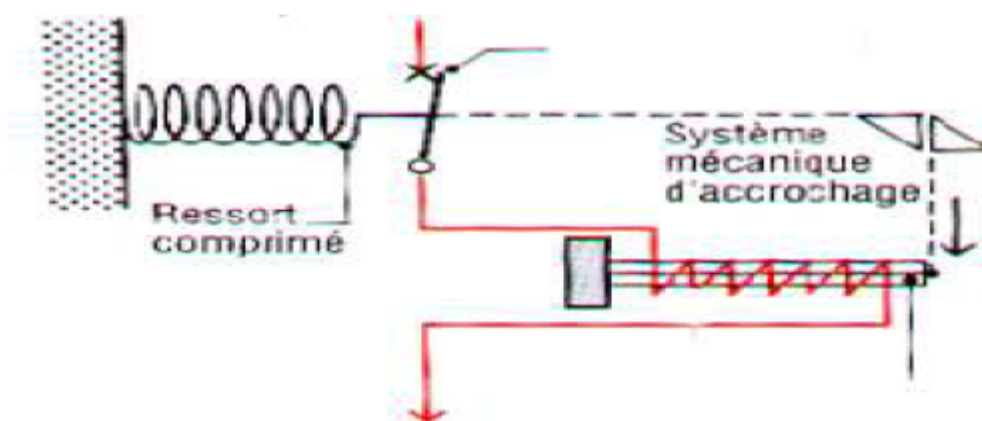


Fig. (V.6) : Fonctionnement de la protection contre La surcharge

En cas de surcharge, le bilame se déforme et entraîne dans le sens de la flèche le système d'accrochage qui libère la partie pôle de coupure. Le ressort qui était comprimé se détend et provoque une coupure brusque du circuit électrique.

N.B : La coupure n'est pas instantanée.

b) Protection contre les courts-circuits

C'est le rôle des déclencheurs électromagnétique. Ceux-ci interviennent au-delà des courants de surcharge et jusqu'à l'intensité maximale du courant de court-circuit. Le courant de court-circuit (I_{cc}) n'est limité que par l'impédance de la ligne.(Fig.V.7)

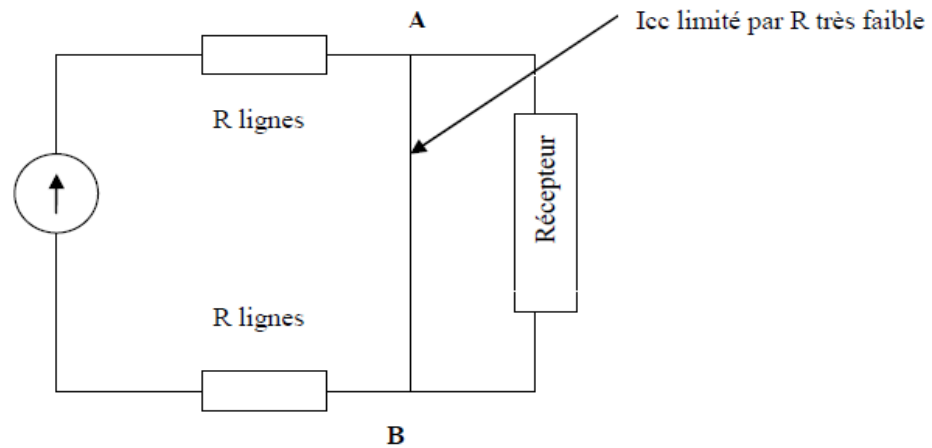


Fig. (V.7) : court-circuit aux bornes d'un récepteur

Un courant de court-circuit peut atteindre des milliers d'ampères. Il est impératif que le disjoncteur coupe rapidement le circuit afin d'éviter toute détérioration.

Dans tous les cas le temps de coupure doit être très court afin de limiter les effets néfastes du court-circuit sur le matériel.

NB : La coupure est quasi-instantanée.

La protection contre les courts-circuits est assurée par un déclencheur magnétique.

Ce déclencheur est basé sur la création d'un champ magnétique lors du passage d'un courant dépassant une valeur fixée suite à un dimensionnement.

Le système comporte un circuit magnétique ayant une partie mobile, et une bobine parcourue par un courant.

L'association du circuit magnétique et de la bobine donne un électro-aimant.(Fig.V.8)

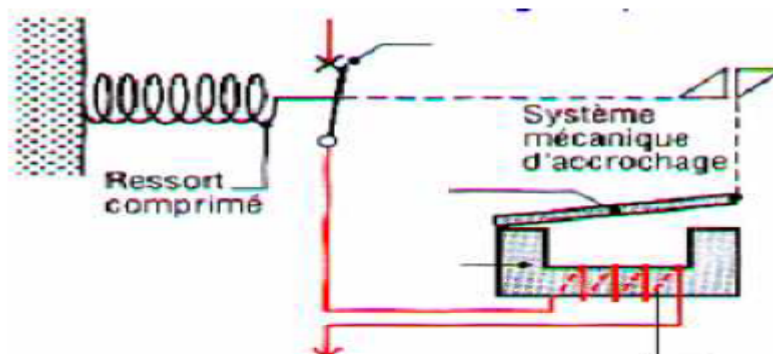


Fig. (V.8) : Protection contre les courts circuits

V.6.2 Les Relais [26]

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent une ou plusieurs informations (signaux) à caractère analogique (courant, tension, puissance, fréquence, température, ...etc.) et le transmettent à un ordre binaire (fermeture ou ouverture d'un circuit de commande) lorsque ces informations reçues atteignent les valeurs supérieures ou inférieures à certaines limites qui sont fixées à l'avance. Donc le rôle des relais de protection est de détecter l'existence de conditions anormales par la surveillance continue de l'état du réseau concerné, et de déterminer quel est le disjoncteur qui doit s'ouvrir et lui alimenter son circuits de déclenchement.

V.6.2.1 choix du relais

Un relais est désigné selon la grandeur surveillée (tension, courant, puissance, impédance,...)

- Relais à maximum de courant RMA.
- Relais à maximum ou minimum de tension RMV.
- Relais à minimum d'impédance RMZ.
- Relais directionnel de puissance RDW.
- Relais à minimum de réactance RMX.

V.6.2.2 Différents types des relais

En distingue plusieurs types de relais

1. Le relais électromécaniques

Ce relais est basé sur le principe d'un disque d'induction, actionné par des bobines alimentées par des variables électriques du réseau via des transformateurs de tension. Un ressort de rappel réglable détermine la limite de l'action du disque sur un déclencheur (point de réglage). Les équipements électromécaniques sont des assemblages de fonctions : détection de seuils et de temporisation. Ils ont l'avantage d'être robustes, de fonctionner sans source d'énergie auxiliaire et d'être peu sensibles aux perturbations électromagnétiques. Ces relais se démarquent par leur solidité et leur grande fiabilité, pour cette raison, leur entretien est minime, ils sont réputés pour leur fiabilité dans les environnements de travail les plus délicats. Il est néanmoins souhaitable de les contrôler régulièrement, et la périodicité d'inspection dépend des conditions d'exploitation.

Les inconvénients de ces dispositifs, qui demeurent néanmoins largement rencontrés, sont :

- Le risque d'être hors d'état de fonctionner entre deux périodes de maintenance,
- Le manque de précision, le dispositif étant sensible à son environnement et aux phénomènes d'usure,
- Il est aussi difficile d'obtenir des réglages adaptés aux faibles courants de court-circuit,
- Son coût de fabrication est élevé,

A cause de ces inconvénients, ce type de protection tend à disparaître à l'heure actuelle.

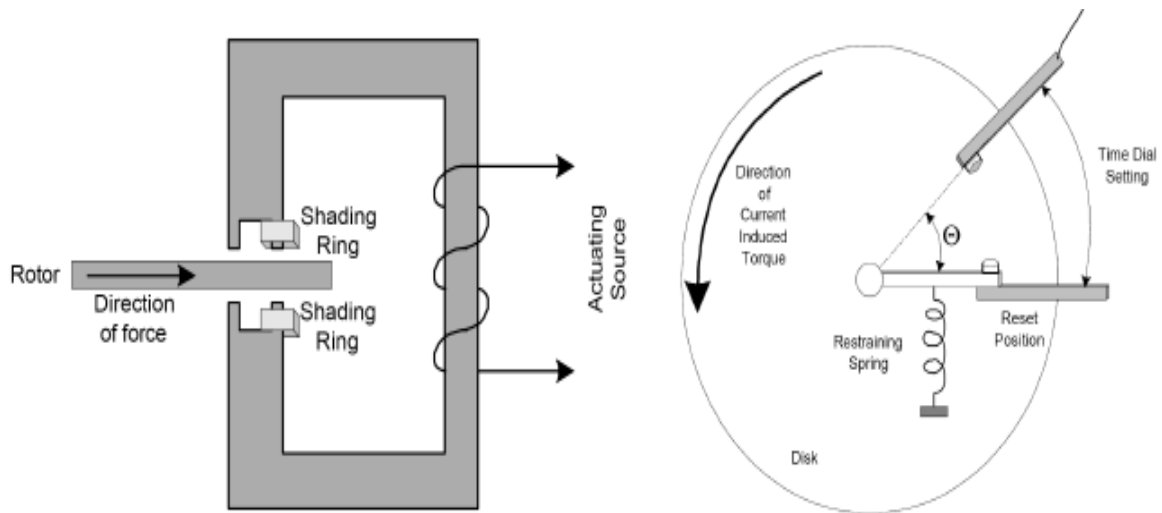
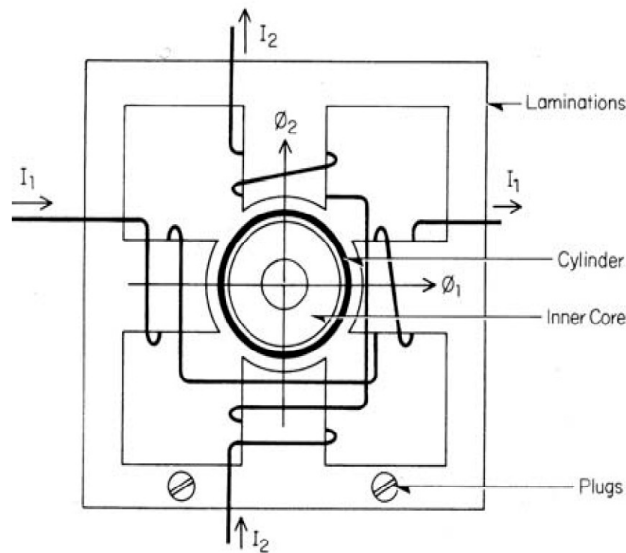


Fig.V.9: Relais électromagnétique à induction par disque simple.



FigV.10 : Relais électromagnétique à induction par disque cylindrique.

2. Relais à induction magnétique

Un courant alimente les bobines fixes de l'électro-aimant, ce dernier produit des champs magnétiques, ceux-ci créent des courants induits qui font tourner le disque.

3. Relais à balance

C'est un relais dont l'équipage mobile est constitué par un fléau de balance soumis à l'action de deux forces antagonistes.

4. Relais thermique

Il comporte un élément actif chauffé par le passage de l'intensité de courant absorbé par l'appareil à protéger. Cet élément est une lame bimétallique qui se déforme sous l'effet de l'augmentation de la température engendrée par la surintensité.

5. Relais statique

Il comporte des circuits intégrés linéaires au silicium composés de portes et circuit logique, et plus récemment ils comportent des mémoires et des microprocesseurs. L'utilisation de ces composants a permis la mise au point des caractéristiques plus sophistiquées.

Les relais statiques remplacent de plus en plus les relais électromagnétiques pour les avantages suivant :

- Plus précis.
- Plus sensible.
- Plus rapide.
- Longue durée de vie.
- Faible consommation et moins encombrant.

Malgré tous ces avantages, les relais statique possèdent des manques tels que la limitation des fonctions.

6. Relais de Bucholz

Les relais de Bucholz sont montés essentiellement sur les grands moteurs tandis que les DGPT (1et 2) sont montés essentiellement sur les transformateurs de distribution à couvercles scellés.

❖ Schéma de principe et son fonctionnement

Le corps du relais (voir figure ci-dessous) renferme deux flotteurs b1 et b2 qui peuvent pivoter respectivement autour des axes 01 et 02 et commander ainsi les contacts à mercure c1 et c2. Ces deux contacts ferment (ou ouvrent sur demande) chacun un circuit.

Le circuit du contact c1 actionne signal d'alarme. Le circuit du contact c2 actionne le dispositif de déclenchement.

Le relais de Bucholz protège toujours le transformateur en cas de fuite du diélectrique à condition toutefois qu'elle se manifeste au-dessous de relais.(Fig.V.11)

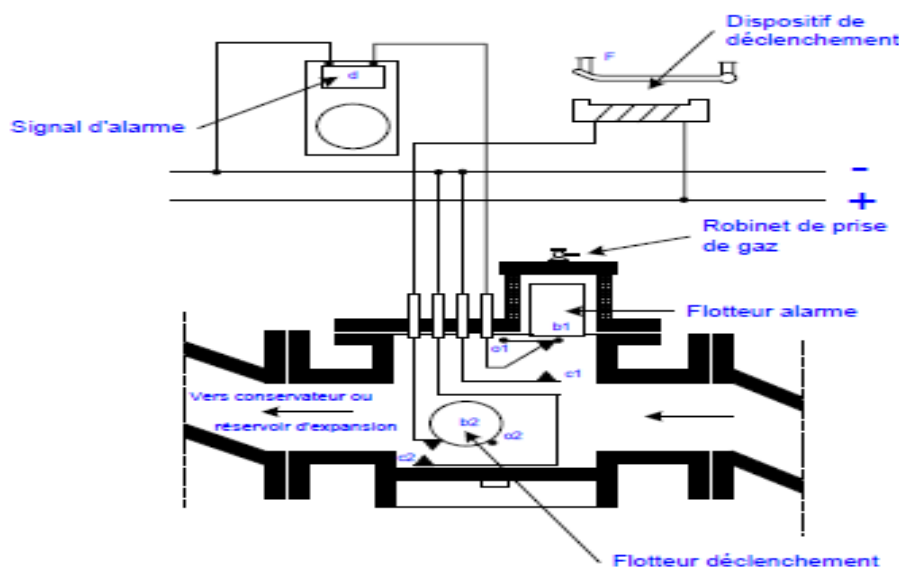


Fig. (V.11) : Relais Bucholz

Il a pour rôle les détections des anomalies internes (court-circuit, mauvais contact dans les connexions, détérioration de l'isolation...). Lors d'un dysfonctionnement un jet d'huile vers le conservateur entraîne le déplacement d'un flotteur qui coupe la liaison entre le transformateur et le réseau.

V.6.3 Le fil de garde

Le fil de garde est un conducteur non isolé disposé aux sommets des pylônes, il sert à intercepter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tensions, on le relie solidement à la terre dans chaque pylône. Il ne porte normalement aucun courant, pour cette raison il est ordinairement en acier. Fig. (V.12)

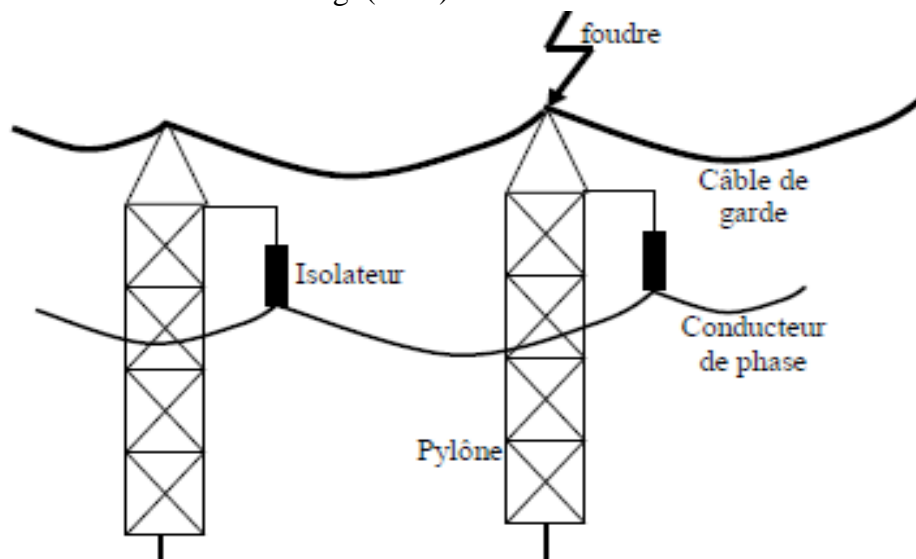


Fig. (V.12) : câble de garde

V.6.3.1 Rôles du câble de garde

Le câble de garde (ou câble protecteur) est constitué d'un ou plusieurs conducteurs de diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à un niveau supérieur à ceux-ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône. Le câble de garde, dont le but initial est de protéger les conducteurs de phases d'une ligne ou d'un poste contre les impacts directs de foudre, joue un certain nombre de rôles parallèles :

- Rôle statique.
- Rôle dynamique.

a) Rôle statique

Le câble de garde contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phases d'une ligne placés sous un nuage orageux. Ceci n'est valable que si les conducteurs de phases sont laissés flottants, ce qui en pratique n'est jamais le cas. En effet, les lignes sont alimentées ou mises à la terre pour des raisons de sécurité.

b) Rôle dynamique

Les rôles dynamiques du câble de garde sont du type :

- Protection contre l'impact direct de la foudre.
- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.
- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension sur les lignes de télécommunications.

•

V.6.4. Les éclateurs [27]

Ils sont composés de deux électrodes situées l'une face à l'autre dans un milieu qui peut être l'air ambiant (éclateurs à air), ou du gaz (éclateurs à gaz). Au-delà d'une certaine tension entre les électrodes, un amorçage se produit et le courant passe en formant un arc électrique. Les éclateurs permettent de dévier des courants de foudre importants. Les éclateurs sont utilisés en (HTB) et en (HTA), ils sont placés sur les points des réseaux particulièrement exposés à l'entrée des postes HTA/BT. On distingue plusieurs types d'éclateurs

1. Éclateur à cornes

Ils sont constitués de deux électrodes reliées, l'une au conducteur et l'autre à la terre. Ces deux électrodes sont montées sur une chaîne d'isolateur rigide. Les éclateurs utilisés en HTA comportent en général entre leurs électrodes une tige anti-oiseaux. (Fig.V.13)

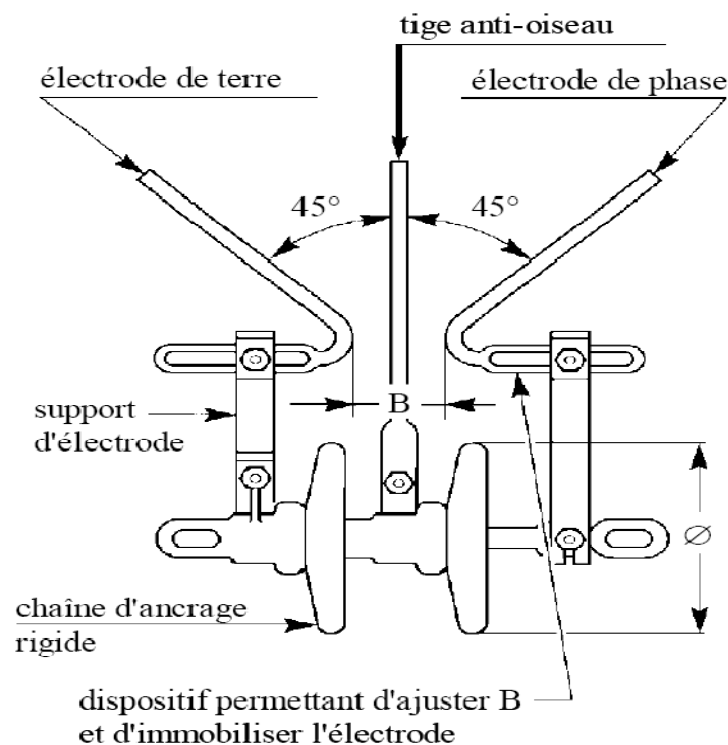


Fig.V.13 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux

2. Eclateurs à tige

Les éclateurs à tige sont utilisés à l'intérieur des postes et sur les réseaux à neutre mis à la terre où le courant de défaut franc à la terre peut atteindre 300A.

V.6.5 Les fusibles[28]

C'est l'appareil de protection le plus répandu dans les réseaux de distribution. Sa fonction première est de protéger les équipements contre les surcharges et les courts-circuits. Un des avantages de l'utilisation est son coût et sa simplicité d'opération, cependant il nécessite une intervention humaine pour être remplacé. (Fig. V.14)

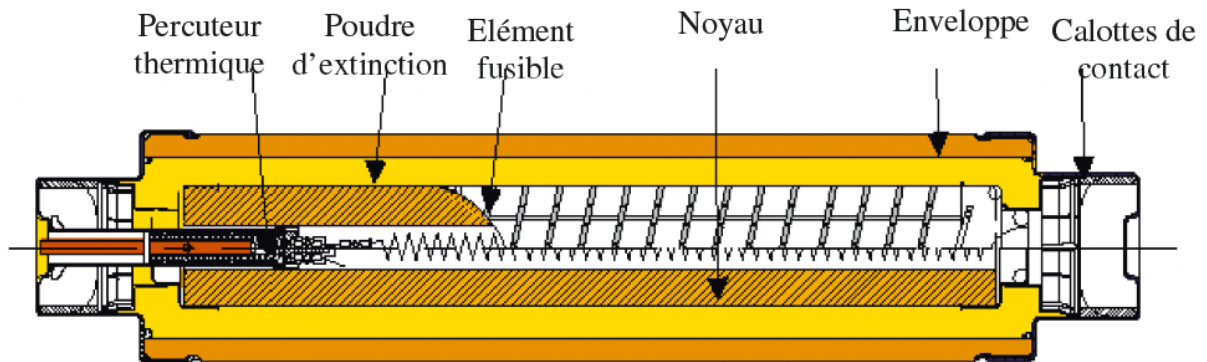


Fig. V.14 Coupe schématique d'un fusible HTA.

V.6.6 Le parafoudre[29]

C'est un dispositif de protection des appareillages électriques ou électroniques contre les surtensions électriques transitoires générées par la foudre ou certains équipements industriels.

Pour une tension élevée, à résistance (R) faible, le courant passe à la terre (équivalent d'un interrupteur fermé). Lorsque la tension est voisine de la tension de service, la résistance (R) est élevée, le courant est coupé (équivalent d'un interrupteur ouvert) sans déclencher le départ.

Il est constitué de plusieurs résistances non linéaires, au carbure de silicium associées en série avec un ou plusieurs éclateurs. L'ensemble est rempli d'un gaz sec (Azote). Ce type est appelé parafoudre à expulsion.

V.6.6.1 Type des parafoudres

a) Parafoudres à résistances variables et éclateurs

Les modèles au carbure de silicium (SiC) ne sont pas capables de supporter de manière permanente la tension de service car leur courant résiduel est trop important et génère un dégagement de chaleur inadmissible. Ils sont donc associés à un dispositif éclateur en série capable d'interrompre le courant résiduel et de tenir la tension de service.

➤ Caractéristiques

Ce type de parafoudre est caractérisé par :

- sa tension d'extinction, ou tension assignée, qui est la tension à fréquence industrielle la plus élevée sous laquelle le parafoudre peut se désamorcer spontanément. Elle doit être supérieure à la plus forte surtension temporaire à fréquence industrielle susceptible d'apparaître sur le réseau.
- ses tensions d'amorçage suivant les formes d'onde (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre...); elles sont définies statistiquement.
- son pouvoir d'écoulement de courant de choc, c'est-à-dire la capacité de dissipation d'énergie. On traduit généralement la capacité d'absorption par la tenue à des ondes rectangulaires de courant

b) Parafoudre à oxyde de zinc

➤ Construction

Les parafoudres à résistance variable avec éclateur sont les plus répandus dans les installations HT et MT en exploitation depuis quelques années. La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleures.(Fig.V.15)

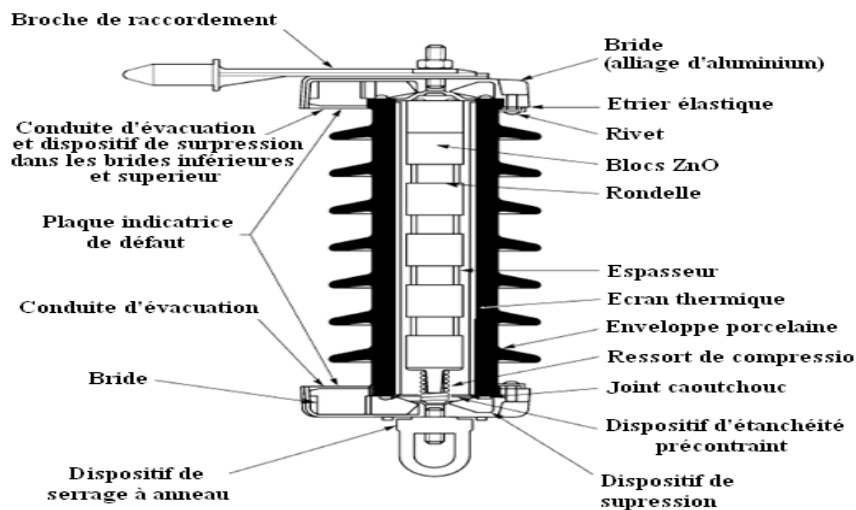


Fig. (V.15) : Parafoudre à Oxyde de Zinc en enveloppe porcelaine

V.6.6.2 Avantage des parafoudres

Leurs avantages est de ne pas présenter de courant de suite et d'éviter que le réseau soit mis en court-circuit, puis hors tension après amorçage. Leurs avantages sur les éclateurs sont :

- ✓ Une dispersion moins grande de la tension d'amorçage.
- ✓ Une extinction spontanée de l'arc, le parafoudre limite l'amplitude et la durée des courants de suites sans que les disjoncteurs du réseau n'aient à fonctionner.
- ✓ Une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après l'amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde de tension coupée.
- ✓ Une insensibilité (jusqu'à un certain point) aux agressions extérieures.
- ✓

V.6.6.3 Distance de protection

Le parafoudre ne joue son rôle protecteur que sur une distance limitée L . Ce paramètre est étroitement lié au niveau de protection du parafoudre (tension résiduelle U_p) et à la raideur S du front de l'onde. Sa valeur est calculée avec l'équation donnée ci-dessous, et suppose le cas le plus défavorable avec réflexion d'onde complète à une extrémité ouverte. Sachant que les parafoudres n'offrent pas tous le même niveau de protection, leur distance de protection varie également. Plus la distance séparant le parafoudre et l'équipement est courte, meilleure est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection maximale, le parafoudre doit être installé près de l'équipement, voire directement intégré à celui-ci. Cette notion de distance de protection doit impérativement être prise en compte lors de l'implantation, dans un poste, des parafoudres ou des éclateurs de protection des matériels.

$$S = K_i \frac{K_c}{K_m} L \quad (\text{m}) \quad (\text{IV.1})$$

K_i : coefficient dépendant du niveau de la protection.

K_c : coefficient dépendant du nombre des descentes.

K_m : coefficient dépend du matériau utilisé pour réaliser l'isolation.

Conclusion

L'apparition et la propagation d'un défaut dans les transformateurs et les réseaux électriques engendre des effets néfastes sur ces derniers. C'est pour cette raison qu'il faut l'éliminer le plus rapidement possible, et pour cela en fait appel à des dispositifs de protection. Ce dernier a pour rôle de ;

- Assurer la protection des personnes contre tout danger électrique.
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles il est soumis le matériel.

Introduction

Le phénomène de surtension affecte généralement les enroulements du transformateur de puissance, afin de limiter l'impact de ce phénomène en fait appel aux parafoudres qui sont fréquemment places sur les lignes en amont des transformateurs, leurs rôle est d'abaisser la valeur crête de la tension apparaissant aux bornes des bobines. L'objectif de ce chapitre est l'étude de l'influence du régime de neutre avec ou sans parafoudre sur les surtensions dans l'enroulement de transformateur. En se basant sur les résultats obtenus par simulation sous ORCAD 16.3 de l'enroulement HT du transformateur.

VI.1. Caractéristiques du transformateur [10]

Comme application notre étude s'est portée sur le transformateur (110kV/125MVA) portant les indications suivantes :

a) Caractéristiques électriques

- Puissance nominale apparente : $S_n = 125$ MVA
- Tension de service nominale : $U_n = 121$ kV
- Pertes de puissance à vide : $\Delta P_0 = 120$ kW
- Tension de court-circuit : $U_{ck} = 10,5\%$
- Courant à vide : $I_0 = 0,55\%$
- Fréquence de service de transformateur : $f = 50$ Hz
- Facteur de répartition initiale de la tension : $\alpha = 3,00$

b) Caractéristiques géométriques

- $d_{extHT} = 1640$ mm : diamètre extérieur de l'enroulement haute tension.
- $d_{intHT} = 1160$ mm : diamètre intérieur de l'enroulement haute tension.
- $d_{extBT} = 1120$ mm : diamètre extérieur de l'enroulement basse tension.
- $d_{intBT} = 920$ mm : diamètre intérieur de l'enroulement basse tension.
- $L_{en} = 2380$ mm : Longueur de l'enroulement.
- $a = 1900$ mm: La distance entre deux éléments haute tension.
- $b = 140$ mm : La distance de l'enroulement haute tension et toutes partie mises à la terre.

Le type de couplage utilisé dans ce transformateur est l'étoile triangle. L'enroulement a été divisé en 6 éléments de longueurs égales.

c) Paramètres calculés du transformateur

- La résistance de l'enroulement HT correspondant à la fréquence de 50 Hz : $R_{tr} = 0,32\Omega$
- La résistance d'un élément de l'enroulement : $R_{élé} = R_{tr} / 6 = 0,0533 \Omega$
- L'inductance propre de l'enroulement HT : $L_{tr} = 2546 \mu H$
- L'inductance propre d'un élément de l'enroulement : $L_{élé} = L_{tr} / 6 = 424,33 \mu H$
- La capacité transversale de l'enroulement HT : $C_{tr} = 0,0002 \mu F$
- La capacité transversale d'un élément de l'enroulement : $C_{tr} / 6 = 0,000033 \mu F$
- La capacité longitudinale de l'enroulement HT : $K_{tr} = 0,00395 \mu F$
- La capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement : $K_{tr} \cdot 6 = 0,0237 \mu F$

VI.2 Le principe de la simulation sous ORCAD 16.3

On saisit le schéma sous Orcad capture, à l'aide de symboles qui sont contenus, dans des bibliothèques que l'on chargera obligatoirement à partir du répertoire Pspice, et suivant les besoins. Une fois le schéma fini et vérifié, on crée le profil de simulation. C'est ce fichier qui va définir quel type de simulation l'on désire réaliser. Il faut donc que le schéma soit correct. En changeant la netlist, OrcadPspice va chercher les modèles de simulations dans les bibliothèques. Il faut alors ouvrir le logiciel Probe pour afficher les résultats. Il restera alors à interpréter les résultats, et les faire sortir sur imprimante en cas de besoin. Le principe de la simulation des enroulements HT de transformateur consiste :

- Appliquer une surtension de 2MV à côté de l'enroulement HT avec neutre isolé de terre
- Appliquer une surtension de 2MV à côté de l'enroulement HT avec neutre mis à la terre à travers des différentes valeurs de résistance.
- Appliquer une surtension de 2MV à côté de l'enroulement HT avec neutre mis à la terre à travers des différentes valeurs de l'inductance.
- Appliquer une surtension de 2MV à côté de l'enroulement HT avec un parafoudre pour les 3 cas précédent.
- Relever les courbes des tensions sur les différents nœuds pour chaque schéma équivalent.

VI.3. Schéma équivalent de l'enroulement sur ORCAD 16.3

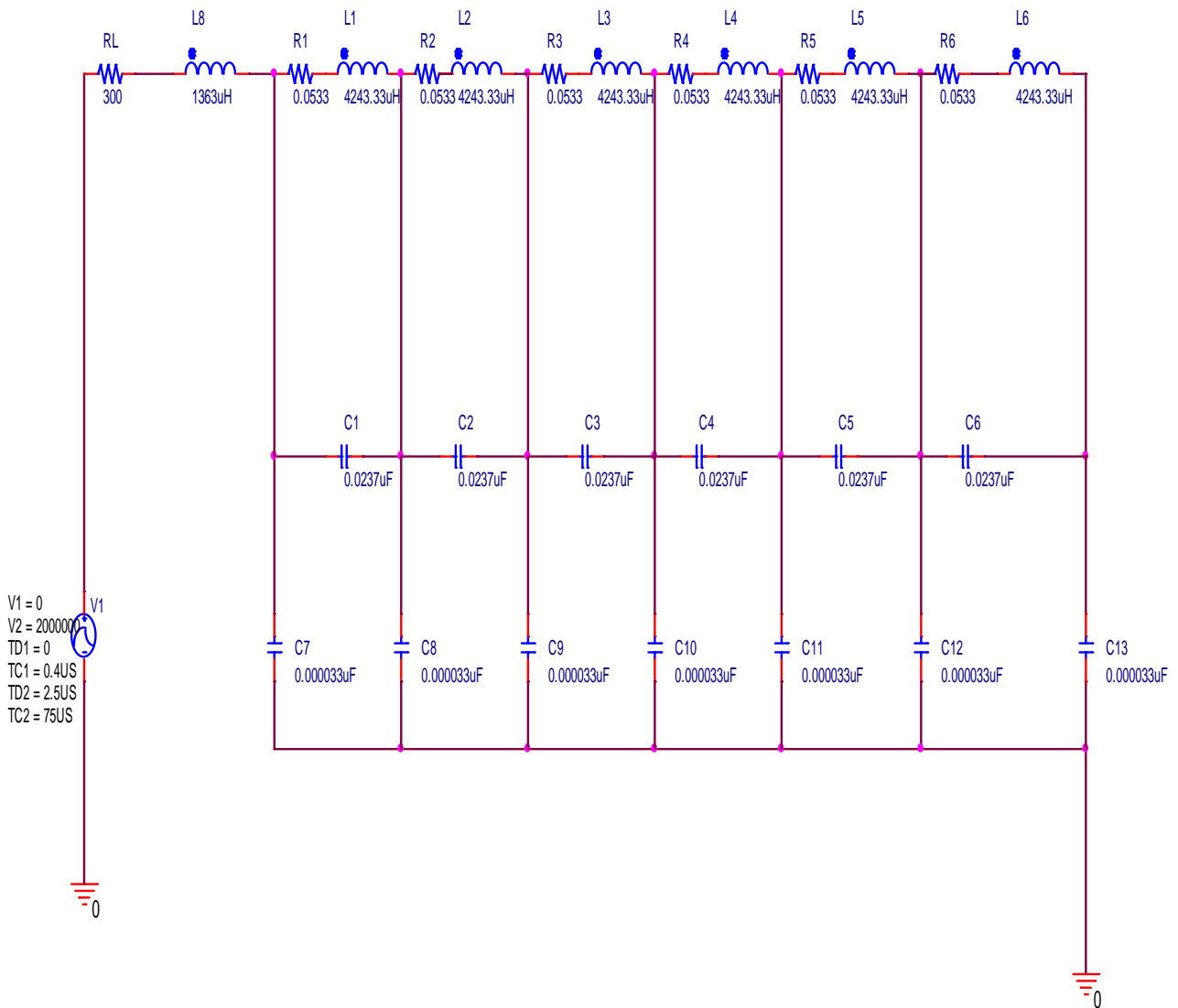


Fig. VI.1 : Schéma block de simulation de l'enroulement HT (sous orcad 16.3)

Pour justifier ce modèle, il est important de remarquer qu'en fonctionnement normal, à la fréquence industrielle, le passage du courant s'effectue à travers les résistances et les réactances des enroulements. Les courants de fuite à travers les capacités existantes entre spires, entre gallettes, entre enroulements ou entre enroulements et masse sont négligeables. On tient compte des capacités dans notre modélisation car en régime transitoire les réactances inductives deviennent très grandes tandis que les réactances capacitatives diminuent.

VI.4. Simulation sur Orcad 16.3 avec le neutre mis à la terre

On mit à la terre la sortie du transformateur, la figure suivante représente les valeurs de la tension à la sortie de transformateur.

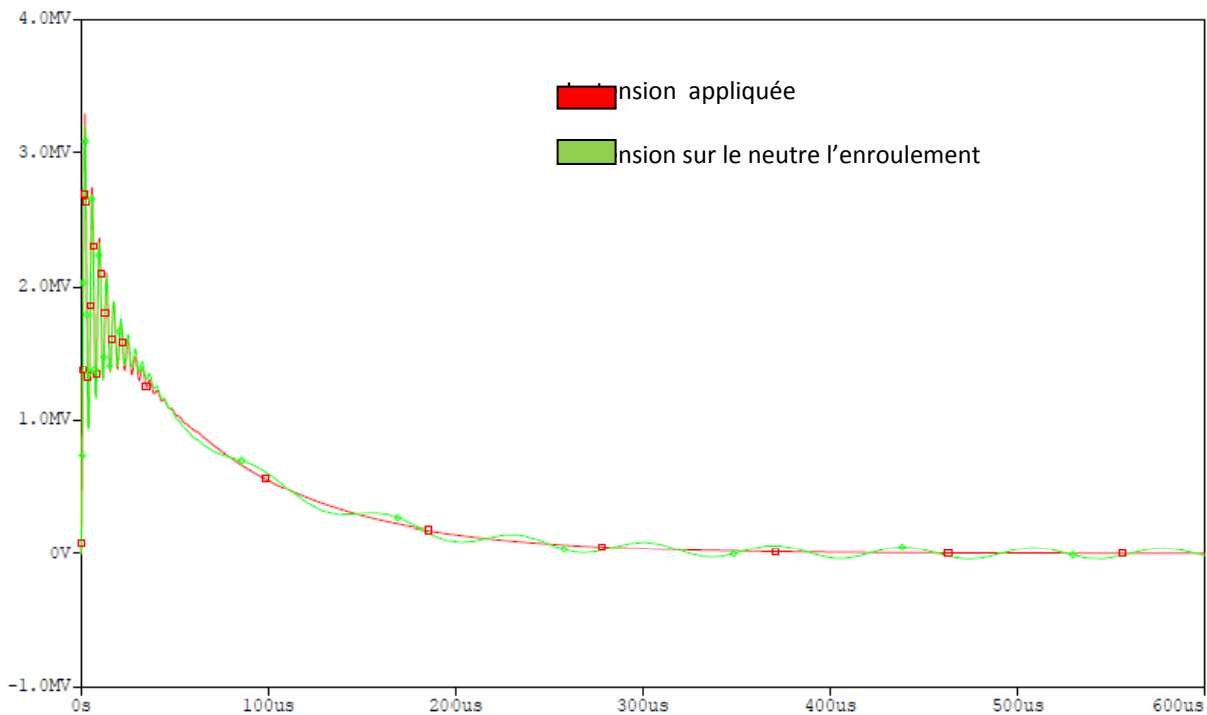


Fig. VI.2 Surtension sur le neutre isolé de la terre

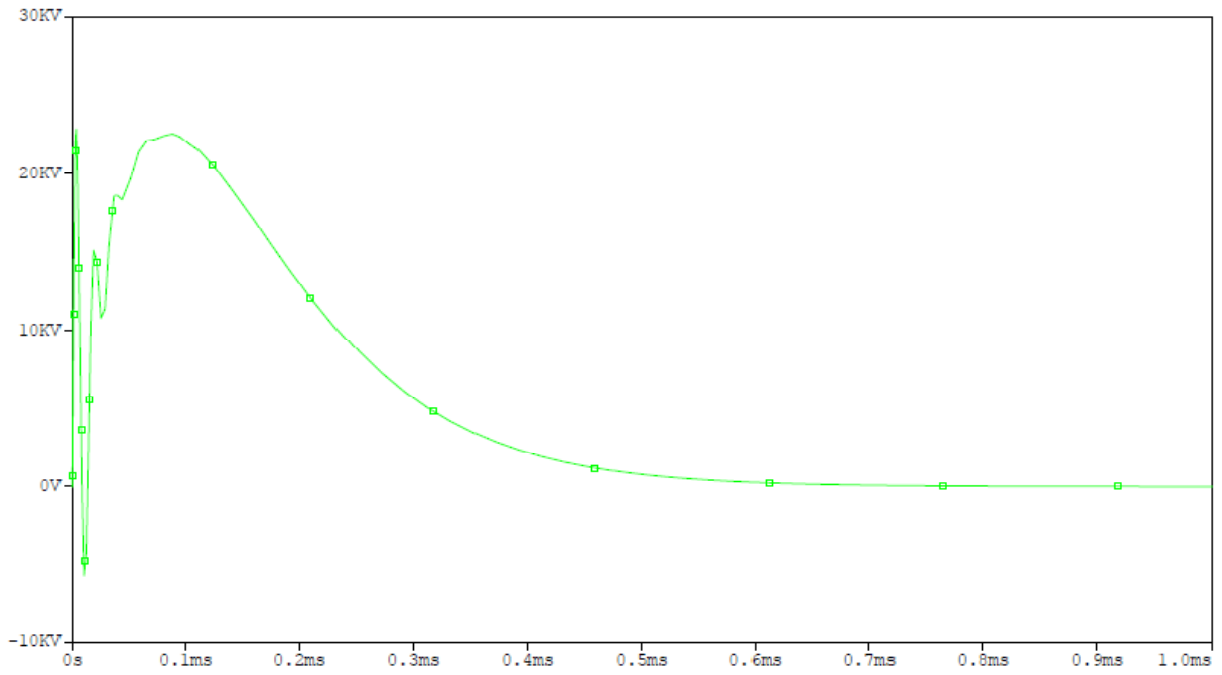
VI.4.1 interprétation des résultats

Quand le neutre de l'enroulement est isolé de la terre on remarque que la tension est plus grande que la tension appliquée à l'entrée de l'enroulement, et cela provoque des oscillations dangereuses pouvant aller au doublement de la surtension initiale.

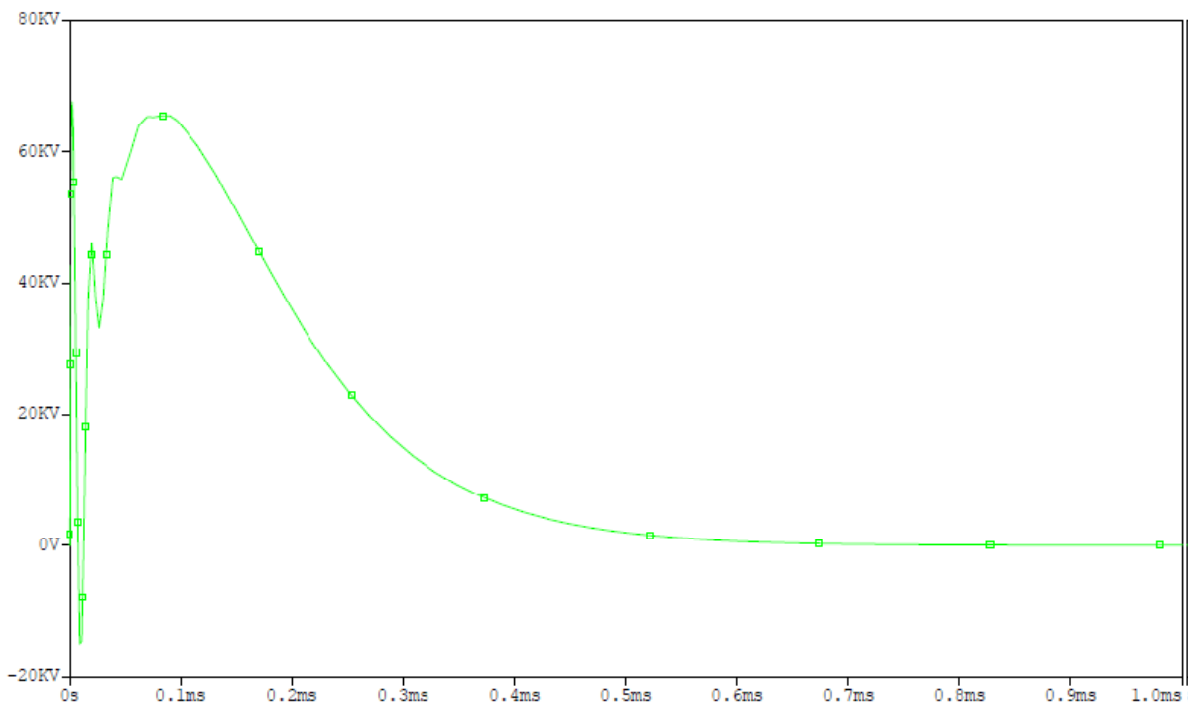
VI.5. Simulation sur ORCAD 16.3 avec le neutre mis à la terre

VI.5.1. Neutre mis à la terre à travers une résistance

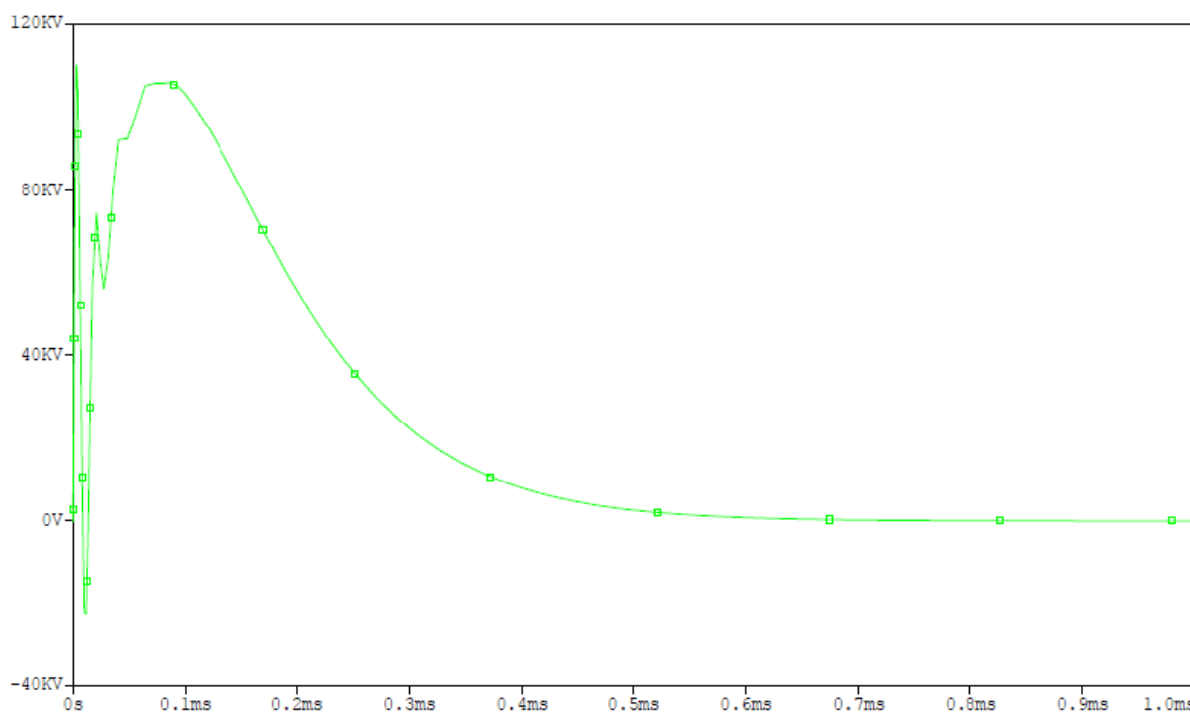
Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis à la terre à travers une résistance. Les figures ci-dessous représentent la tension sur le neutre pour des différentes valeurs de la résistance :



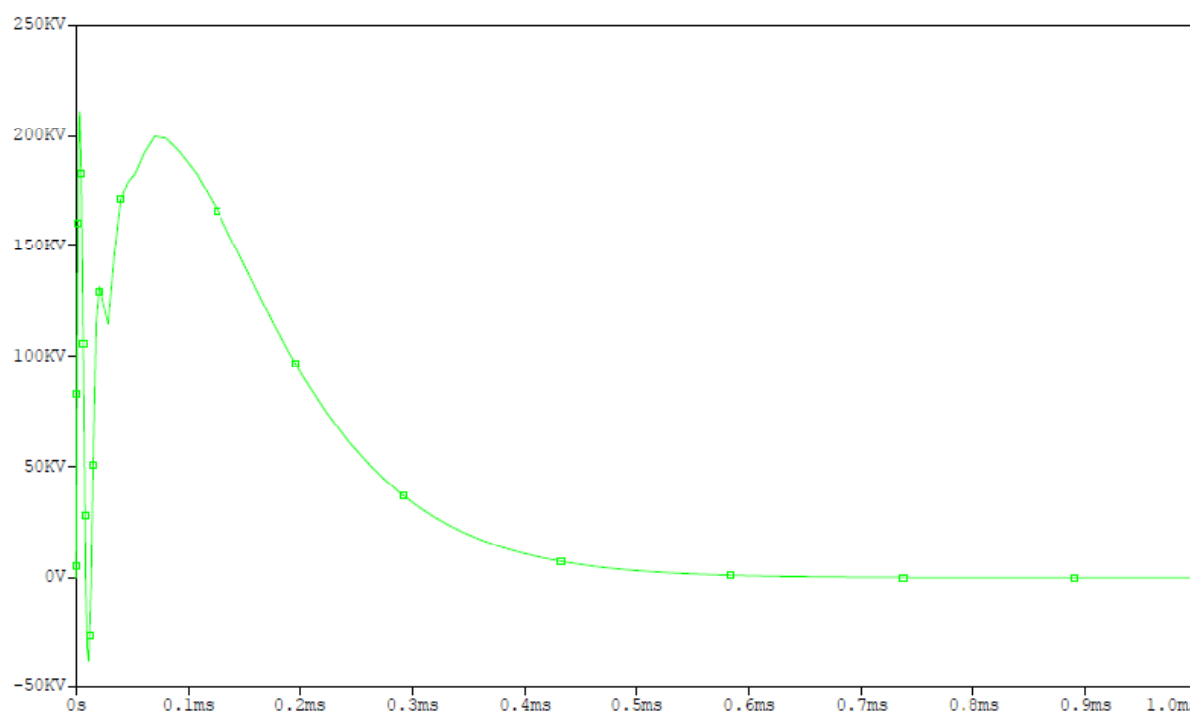
R= 10 Ω



R= 30 Ω



R= 50 Ω



R= 100 Ω

Fig. . (VI.2.3.4.5) : La tension sur le neutre mis à la terre à travers une résistance

VI.5.2. Interprétation des résultats

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de résistance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

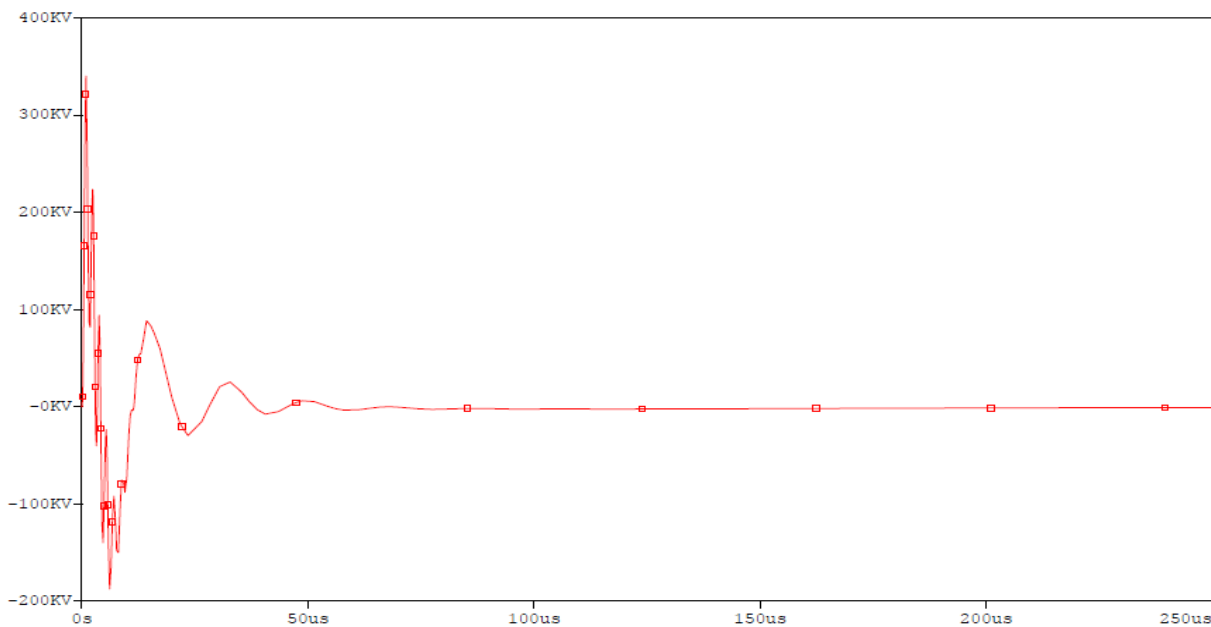
R=10Ω	R=30Ω	R=50Ω	R=100Ω
22.90kV	67.44kV	110.32kV	210.85kV

Tableau (V.1) : Valeurs maximales de la tension sur le neutre

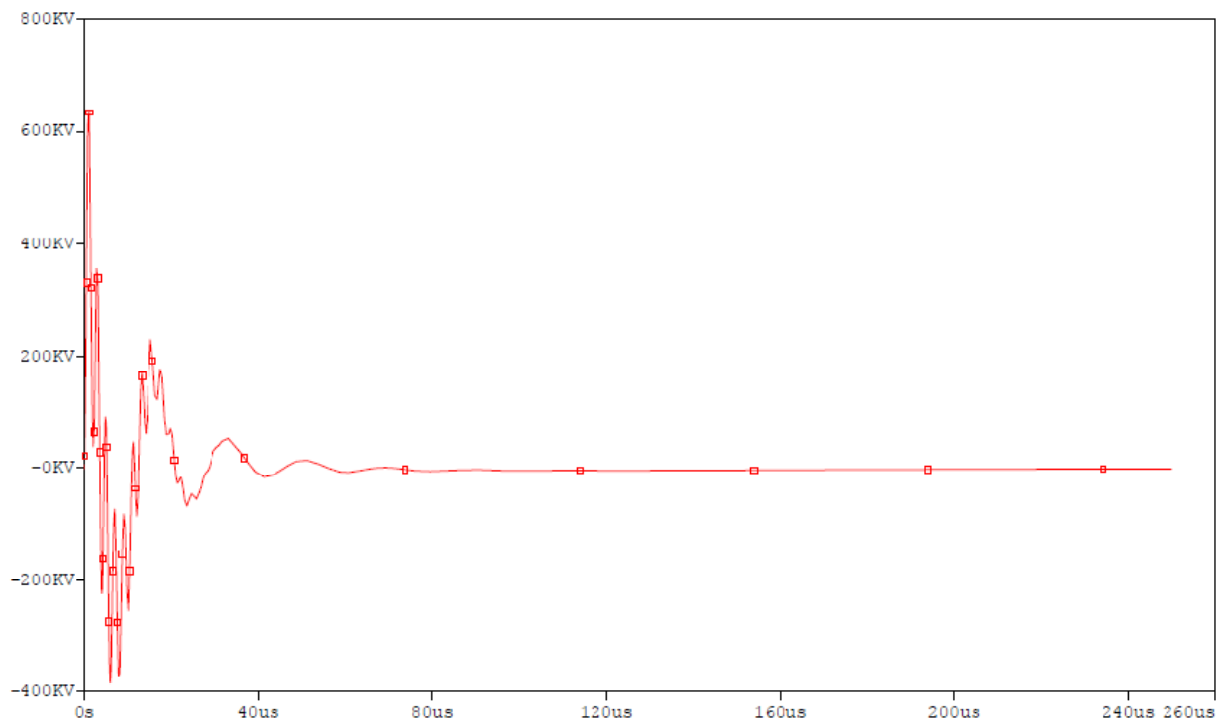
On observe que pour les différentes valeurs de la résistance, la valeur de la tension à la sortie de l'enroulement est inférieure à la tension appliquée à l'entrée. Car avec la mise à la terre de neutre il y'aura une réflexion de l'onde incidente avec un coefficient qui peut aller jusqu'à $N = -1$ (réflexion totale) alors une annulation de la surtension. La liaison proportionnelle entre valeurs de la résistance est celles de la tension montre que quand on augmente la résistance on s'approche de régime isolé.

VI.5.3. Neutre mis à travers une inductance

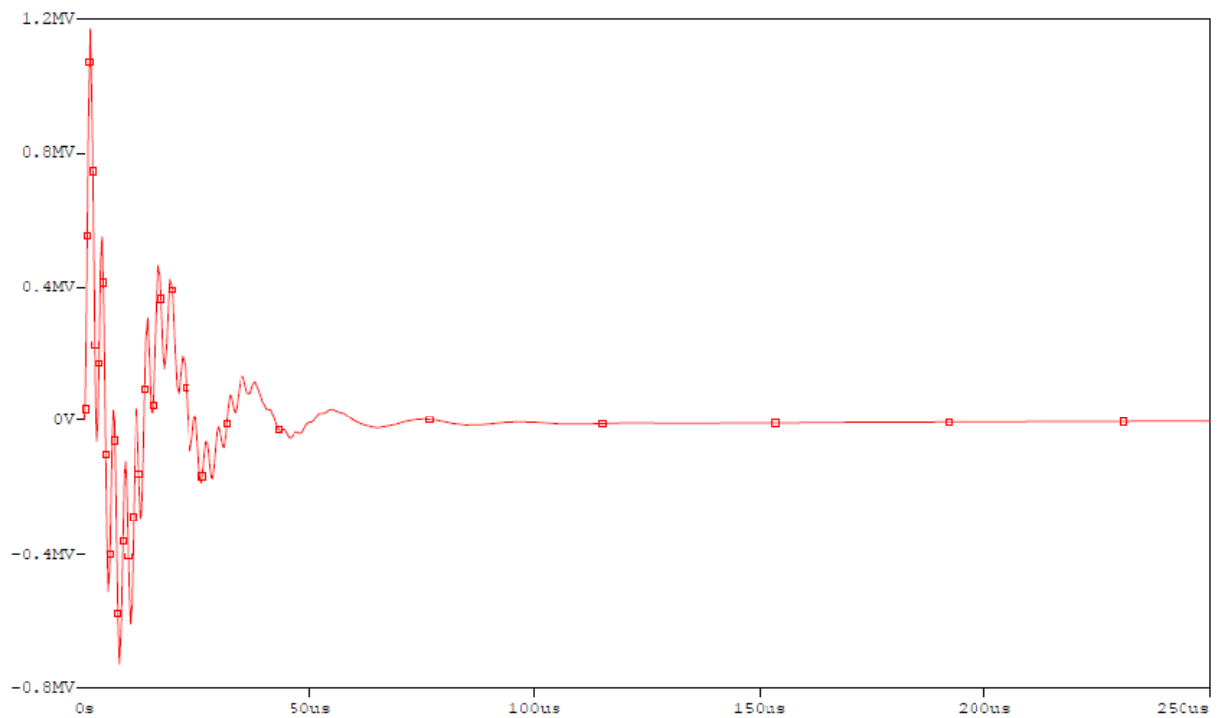
Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis à la terre à travers une inductance, les figures ci-dessous représentent la tension sur le neutre pour des différentes valeurs de l'inductance :



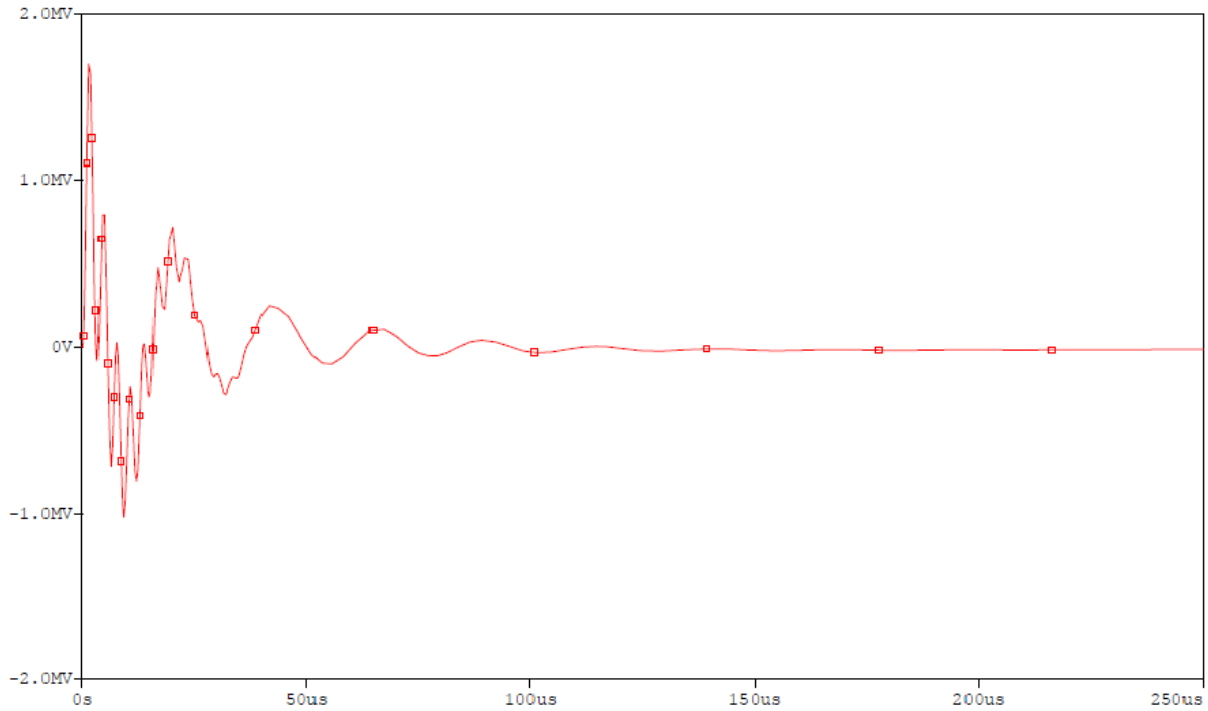
L = 0,00022H



L = 0,00045 H



L = 0,00095 H



L = 0,00195 H

Fig. (VI.5.6.7) : la tension sur le neutre mis à la terre à travers une inductance

V.5.4 .Interprétation des résultats

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de résistance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

L = 0,00022H	L=0.00045 H	L = 0,00095H	L = 0,00195H
340.556kV	638 .055	1167.00kV	1698.30kV

Tab (VI.2) : Valeurs maximales de tension sur le neutre

On observe que pour les différentes valeurs de l’inductance, la valeur de la tension à la sortie de l’enroulement est inférieure à la tension appliquée à l’entrée. La liaison proportionnelle entre valeur de l’inductance est celle de la tension montre que quand on augmente la inductance on s’approche au régime de neutre fortement impédant ou bien le régime de neutre isolé.

VI.6. Schéma équivalent de l'enroulement HT avec l'application d'un parafoudre :

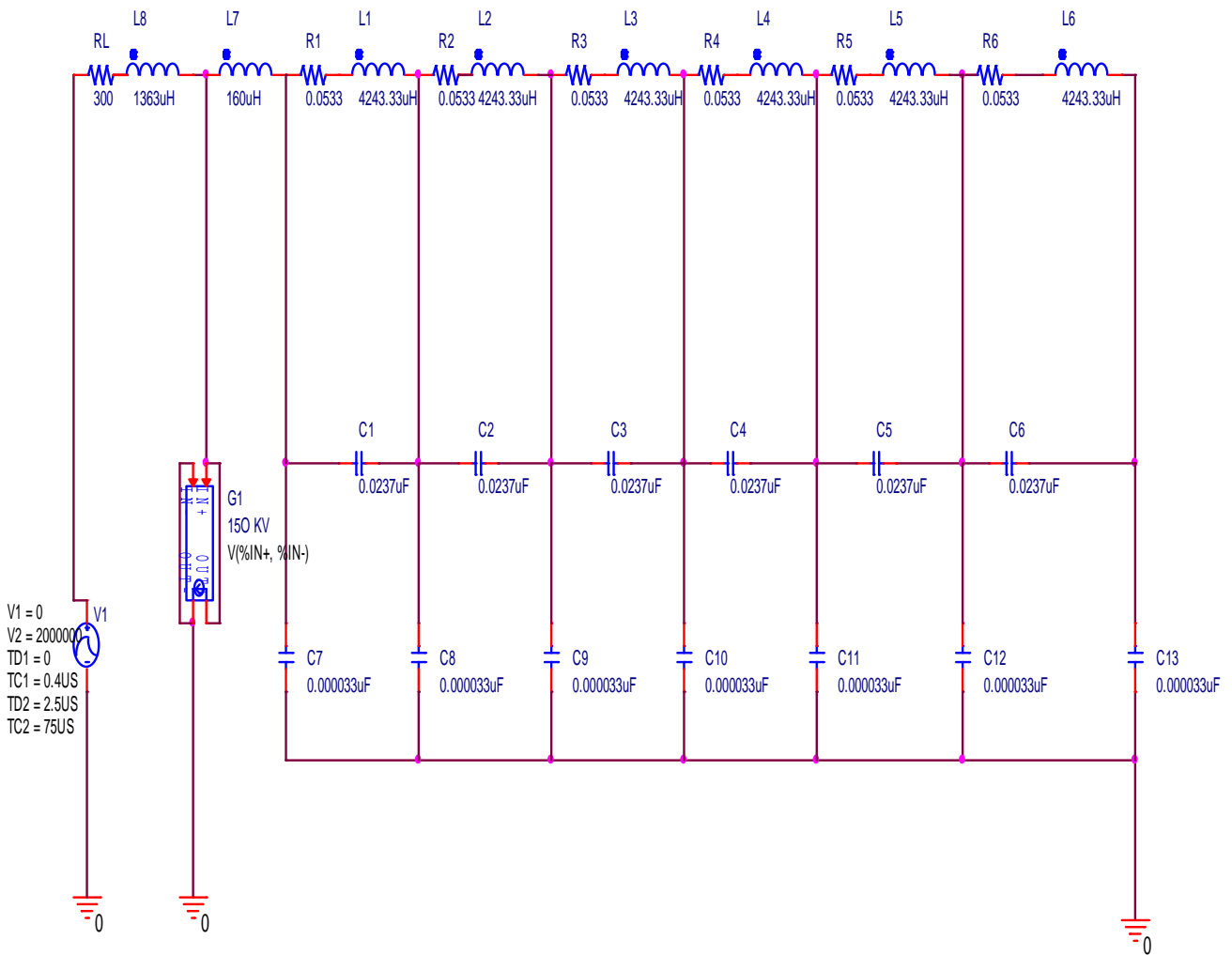


Fig. (VI.8) Schéma block de simulation de l'enroulement HT avec parafoudre (ORCAN 16.3)

Dans notre travail on a opté pour le parafoudre 150 KV installé en amont par rapport aux enroulements HT de transformateur 110KV. Portant les caractéristiques suivantes

Tension de parafoudre (KV)	de	Caractéristiques (VOLT-AMPER)
150		(0 0) (255kV 1) (260kV 10) (270kV 100) (285kV 1kA) (305kV 3kA) (330kV 5kA) (365Kv 10kA)

Tableau(VI.3) : Caractéristiques de parafoudre [17]

VI.7.Simulation par ORCAD 16.0 de l'enroulement HT avec neutre isolé de la terre

Dans ce cas on a effectué une simulation de l'enroulement HT dont le neutre isolé de la terre et un parafoudre installé à son entrée, les résultats sont illustrés par les figures ci- dessous :

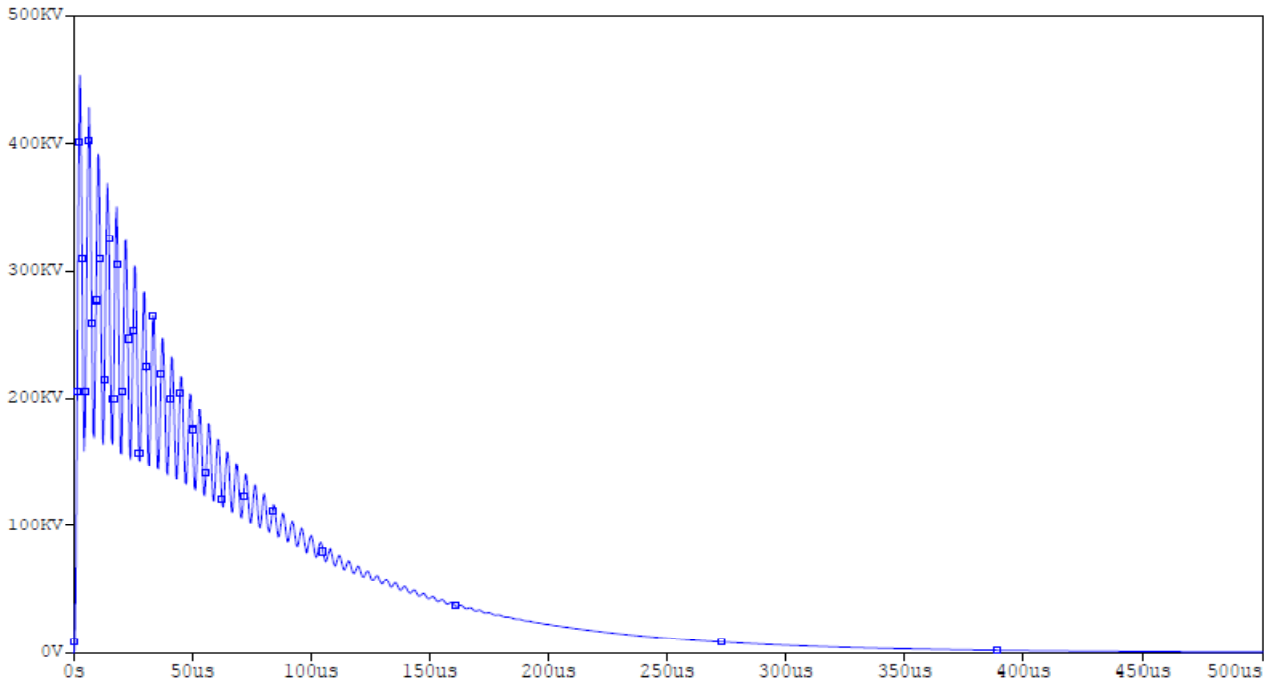


Fig. (VI.9):La tension à l'entrée de l'enroulement HT

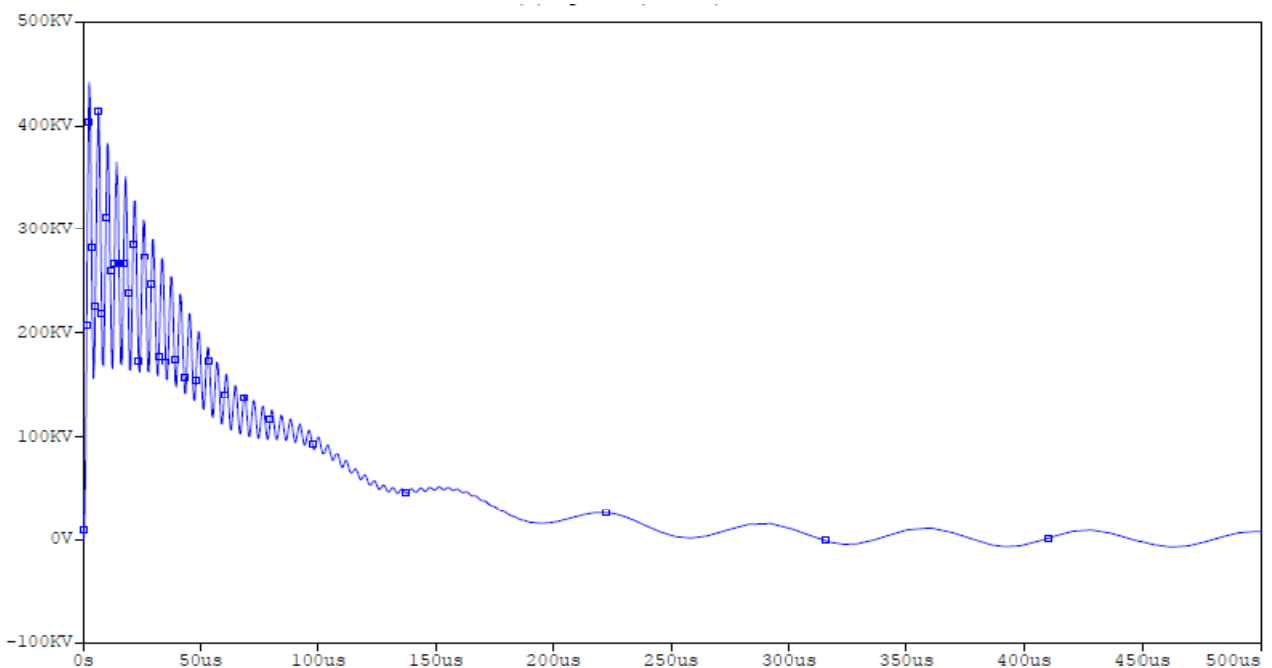


Fig. (VI.10):La tension à la sortie de l'enroulement HT

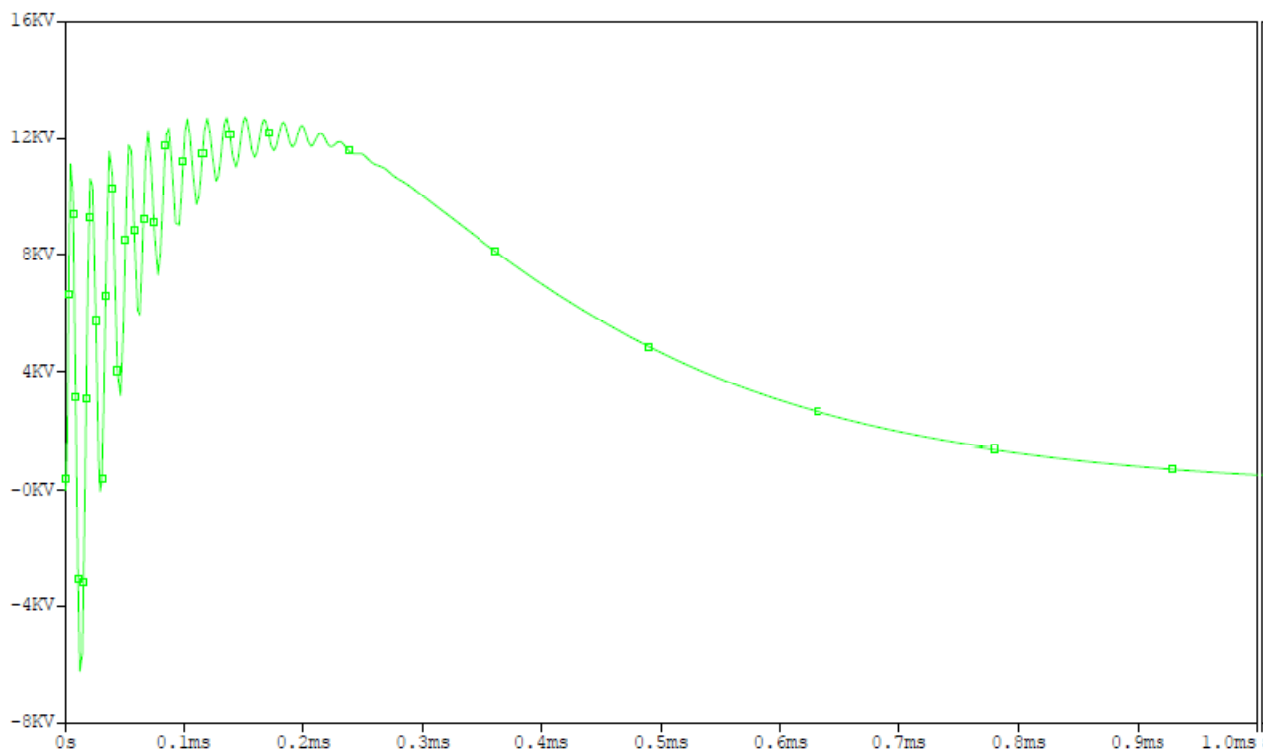
VI.7.1. Interprétation des résultats

On remarque que la valeur de la tension à l'entrée de l'enroulement HT est de 452.5kV est celle de la sortie est de 441.60kV, elles sont inférieures à la tension appliquée, ce qui explique le parafoudre installé a limité la surtension.

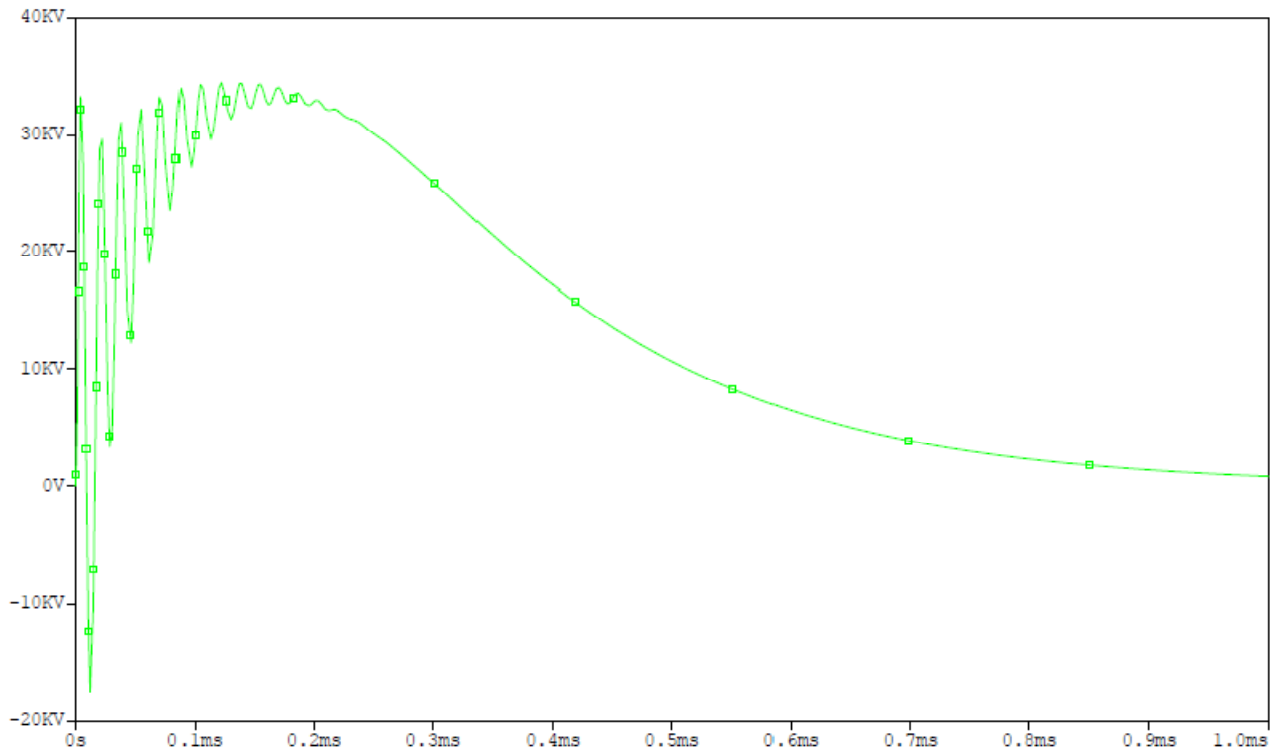
VI.8. Simulation par ORCAD 16.3 de l'enroulement HT avec neutre mis à la terre

VI.8.1. Mis à la terre à travers une résistance

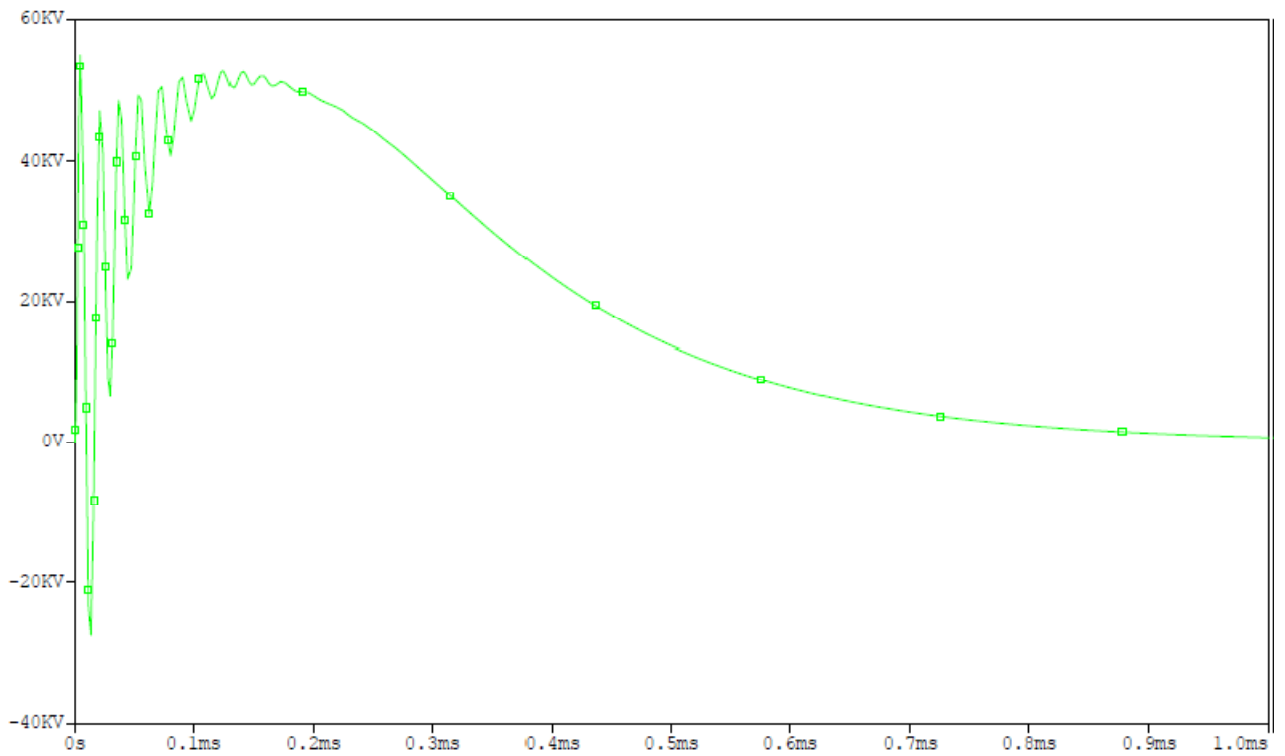
Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis à la terre à travers une résistance avec un parafoudre installé à son entrée, les figures ci-dessous représentent les résultats pour des différentes valeurs de la résistance :



R=10Ω



R=30Ω



R=50Ω

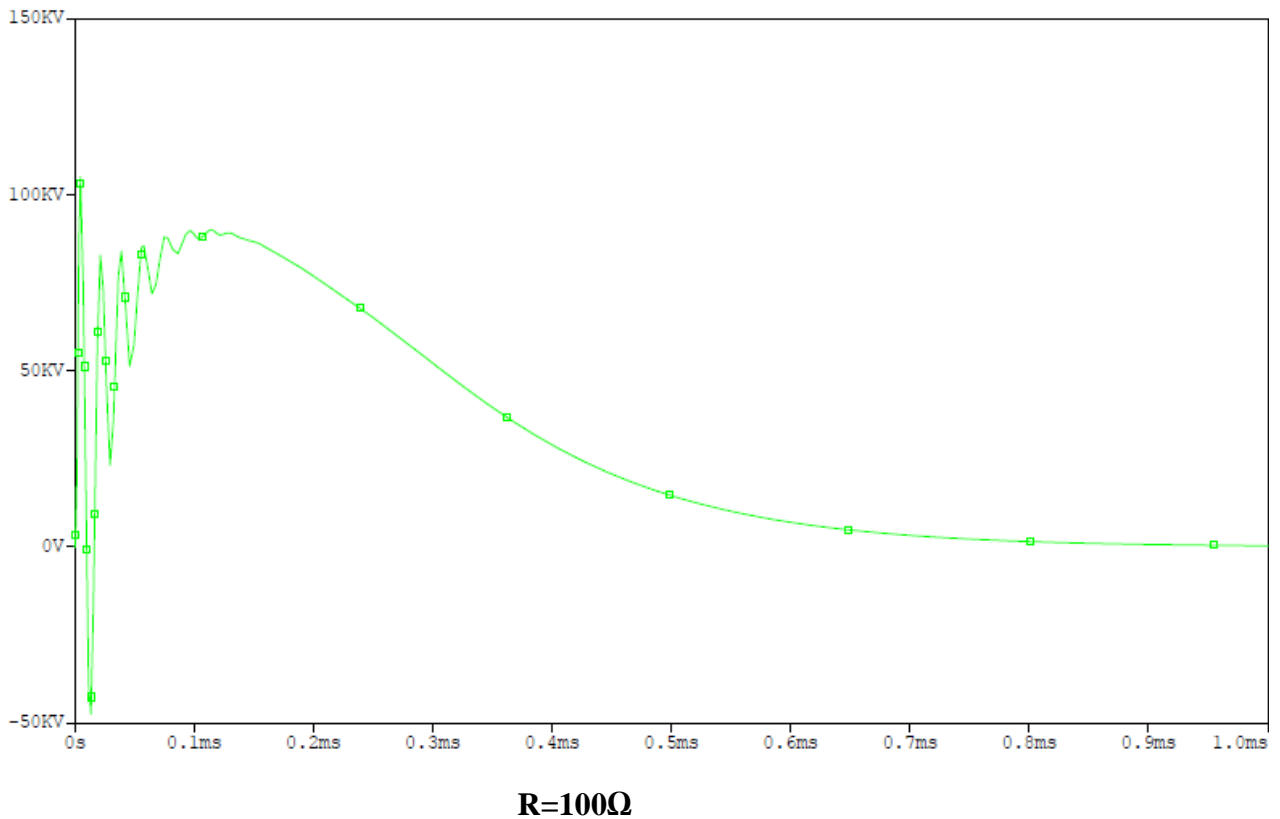


Fig. (VI.11.12.13) : La tension sur le neutre de l’enroulement mis à la terre à travers une résistance (application de parafoudre)

VI.8.2. Interprétation des résultats

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de résistance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

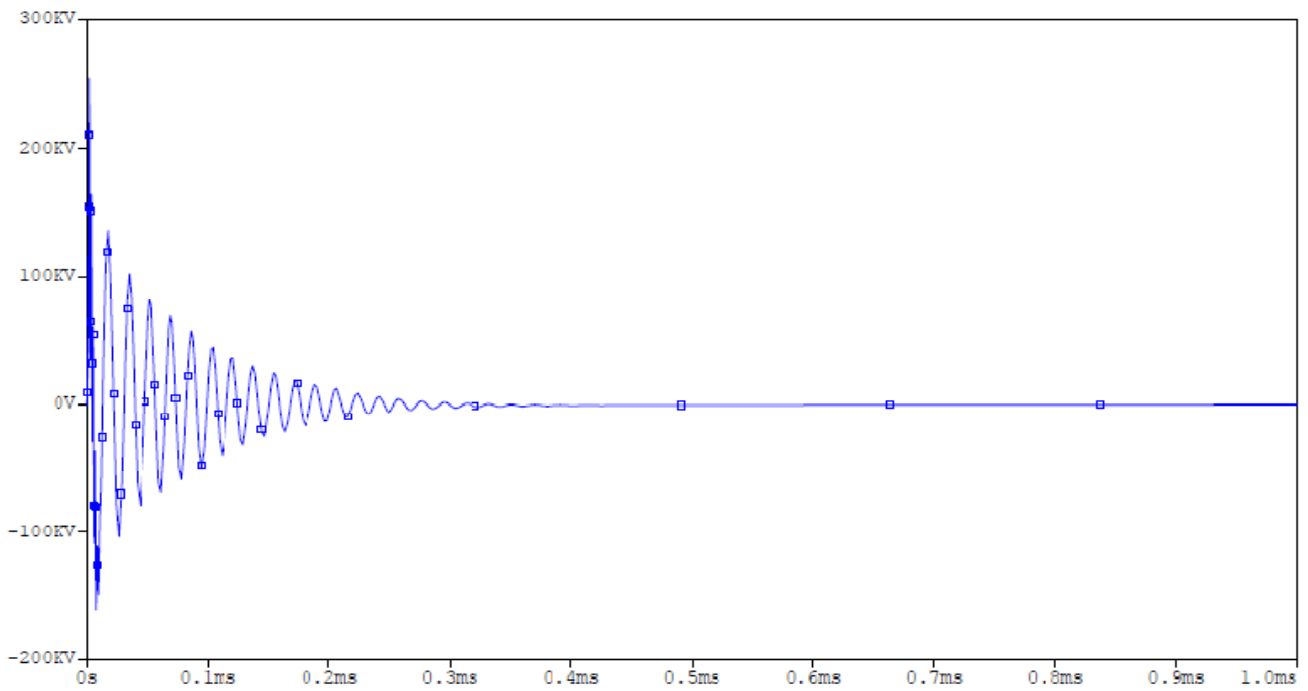
R=10Ω	R=30Ω	R=50Ω	R=100Ω
12.5kV	34.40kV	55.13kV	105.40kV

Tableau (IV.4) : Valeurs maximales de tension sur le neutre mis à la terre à travers une résistance

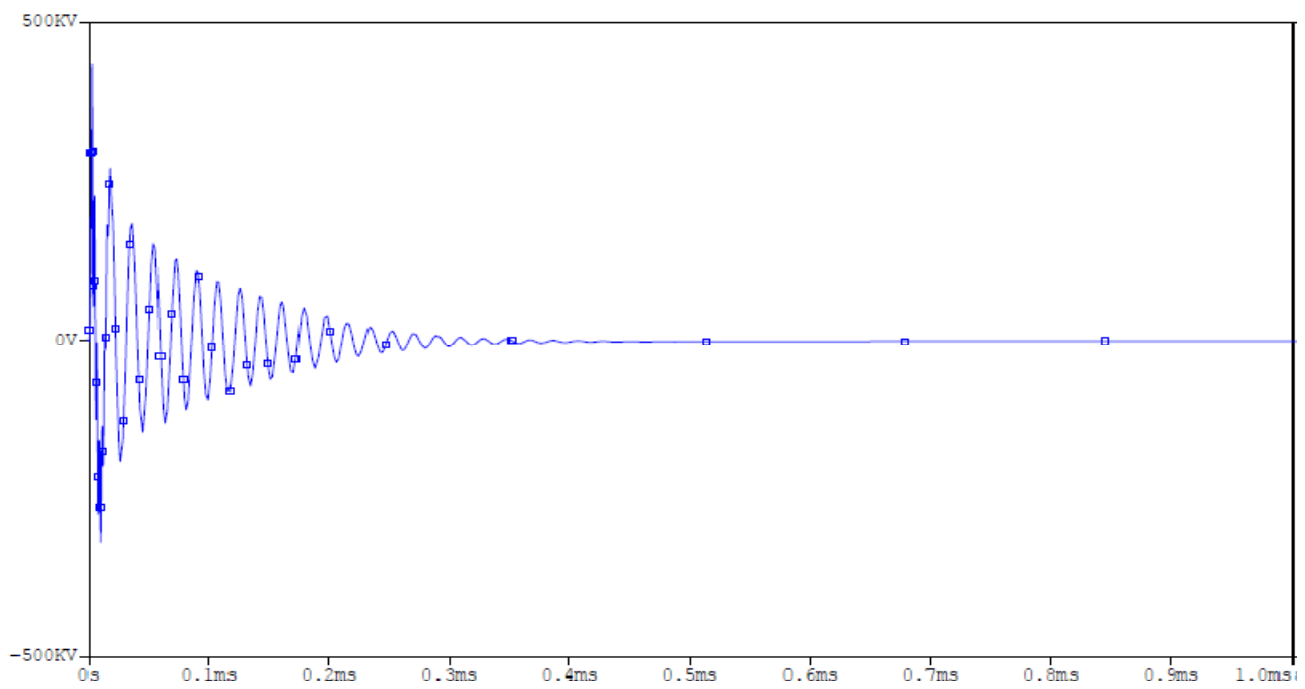
On observe que pour les différentes valeurs de la résistance, la tension sur le neutre ou bien à la sortie de l’enroulement est vraiment inférieure à la tension appliquée. Il ya eu une limitation énorme de la surtension par le parafoudre.

VI.8.3. Mis à la terre à travers une inductance

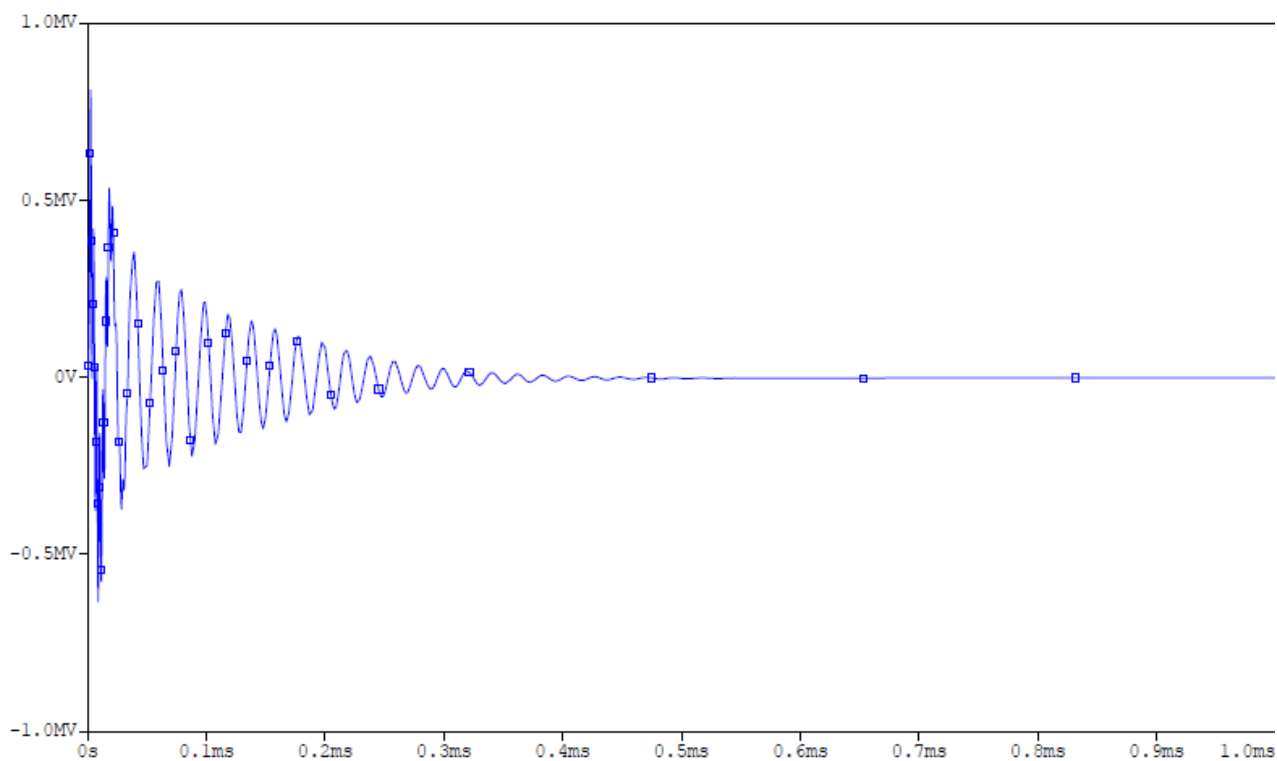
Dans ce cas on va effectuer une simulation de l’enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis à la terre à travers une inductance avec un parafoudre installé à son entrée les figures ci-dessous représentent la tension sur le neutre pour des différentes valeurs de l’inductance :



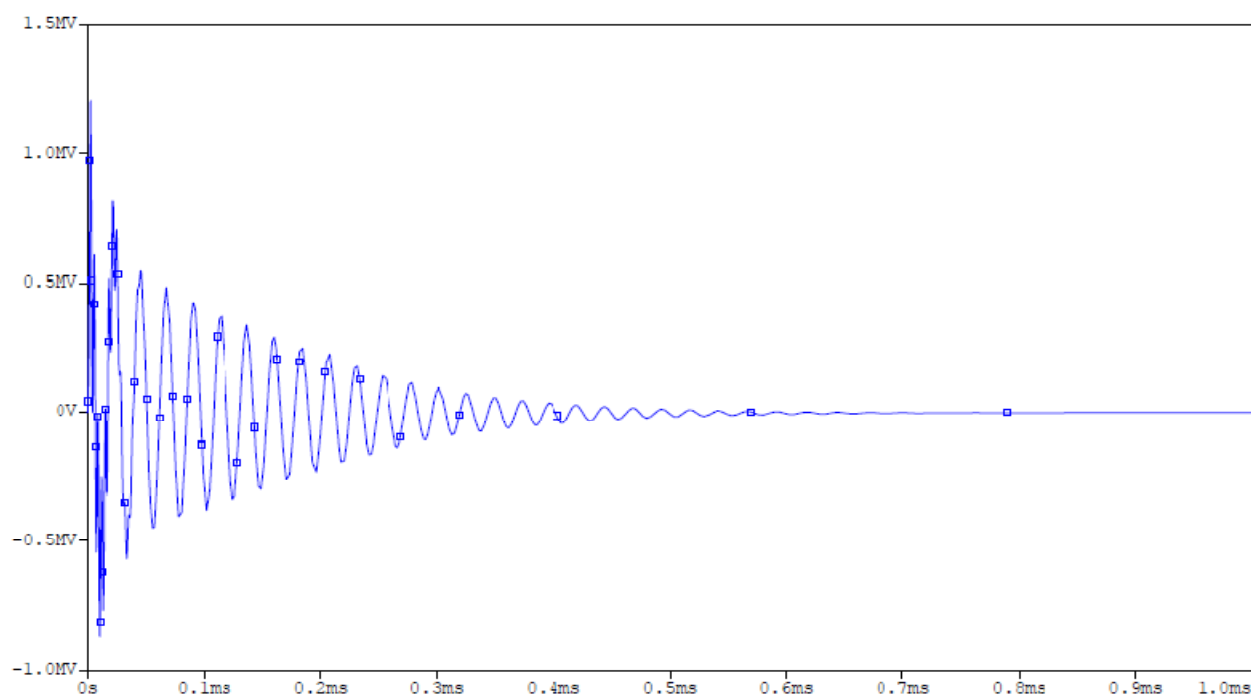
L=0.00022H



L=0.00045H



L=0.00095H



L=0.00195H

Fig. (VI.14.15.16) : La tension sur le neutre de l'enroulement mis à terre à travers une inductance

VI.8.4. Interprétation des résultats

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de l'inductance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

L = 0,00022H	L = 0,00045H	L = 0,00095H	L = 0,00195H
254.45kV	435.20kV	810.8 kV	1200kV

Tab (VI.5) : Valeurs maximales de la tension sur le neutre mis à la terre à travers une inductance

On observe que pour toutes les valeurs de l'inductance, la tension sur le neutre ou bien sur la sortie de l'enroulement est vraiment inférieure à celle appliquée à son entrée. Il y'a eu une limitation de la surtension par le parafoudre.

Conclusion

Le régime du neutre joue un rôle très important dans la protection des équipements électriques à l'exemple des surtensions et les courts circuits.

Isolation du neutre de la terre engendre des risques qui favorisent apparition des défauts multiples. La mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ou réactance amortie la surtension et avec l'application du parafoudre sont meilleurs.

Conclusion générale

Le transformateur est un élément essentiel dans un réseau de distribution de l'énergie électrique. Il est donc important de connaître son comportement lors des différents régimes afin d'élaborer un système de protection qui nous permet d'éviter la destruction de l'équipement et l'interruption de service.

Pour cela on a opté pour la simulation sous le logiciel ORCAD 16.3 de l'enroulement HT d'un transformateur de puissance en tenant compte des différents régimes de neutre que on puisse réaliser et lors de la surtension les valeurs prises sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre.

On a retenu à partir de notre étude, les points suivants :

- La valeur de la surtension sur l'enroulement de transformateur est supérieure à la surtension appliquée quand le neutre est isolé de la terre se qui représente un grand danger pour le transformateur.
- Le neutre mis à la terre à travers une résistance ou une inductance amortie les surtensions et mène souvent à un déclenchement au premier défaut.
- Lors de l'application d'un parafoudre, on observe une limitation de la surtension sur les enroulements de transformateur avec les différents régimes de neutre.
- On a conclu que l'application d'un parafoudre avec le neutre mis à la terre à travers une résistance ou bien une inductance est la solution la plus intéressante et la plus adéquate afin de protéger le transformateur et assurer la continuité de service.

Les surtensions se traduisent souvent par un échauffement de matériels électriques, nous proposons en perspective pour ce travail une étude sur l'évaluation de température des fluides isolants dans les transformateurs.

Nous espérons que ce présent travail puisse être un outil de base et une analyse complémentaire pour les futures études dans le domaine de l'électrotechnique.

Références bibliographiques

- [1] : **P.BOUCHARD et G. OLIVIER** « Electrotechnique » Edition de l'école polytechnique de MONTREAL.
- [2] : **F.BEACLAIR .J.P.DELVINQUIER.J.P.GROS** « Transformateur et inductances », Technique d'ingénieur, E2 130.
- [3] : **ANTHONY LEFEVRE** « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs » thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 27 octobre 2006.
- [4] **BRANDON MIXON,B.S.E.E** « pulsed power conditioning with strongly coupled transformer » Thesis, Graduate Faculty of Texas tech university, Master of science in Electrical Engineering May,2004
- [5] : **PIERRE. MAYE** «Aide mémoire-électrotechnique » Dunod, paris, 2006, ISBN 210 049578 X.
- [6] : **D.BARRILLE, J.P.DAUNIS** « Transformateurs et machines électriques », Dunod 2005
- [7] : **MEZARI NAOUEL** « diagnostique des transformateurs de puissance » mémoire de magister UMMTO.2009
- [8] : **BOUBOZAL NAIMA** « Influence de régime du neutre sur les surtensions et les surintensités dans le réseau électrique » mémoire de magister UMMTO.
- [9] : **R. BELAICHA**, « Contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans les cas des terres mauvaises conductrices »Thèse magister 1984.
- [10] : **N. MUFIDZADA N, T. OTMANE-CHEIF** « Etude de l'influence du noyau sur les surtensions impulsionnelles dans les enroulements du transformateur», Revue IREMOS, 2009.
- [11] : **C.CORROYER ,P.DUVEAU** «Protection des réseaux de transport et de répartition» techniques d'ingénieur traité électrique D 4 806.
- [12] : **M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKY** «Machine Electrique » Tome I. Edition MIR MOSCOU 1996.
- [13] **S. BOUDRA.A** «Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l' intelligence artificielle, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [14] : Cahier N°2 ,SONELGAZ Doctrine de maintenance du réseau de transport, :« Les transformateurs de puissance », GRTE, 2008
- [15] : **M.jose Ignacio ANGUS GOMES, Mlle Ana AZNAR BLANES** « Technique de diagnostic des transformateur de puissance », Formation sur le diagnostic des transformateurs, Ayant lieu à EL-HAMMA, Du 27/10 au 29/10/2007.
- [16] : **H.Houassine** « Etude des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou 2010.
- [17] : **Megger** « FRAX 101 Analyseur de réponse de la fréquence de balayage », FRAX101_DS_fr_V01.
- [18] : **A.RAKOTOMALA** « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régime haute fréquence » , Thèse de doctorat université de LYON 1996
- [19]: **M. AGUET , M .LANOZ.** « Répartition des surtension le long d'un enroulement du transformateur » Bilan de travail Scientifique, série des surtensions 1971.

- [20] **D.VRAZEVIG** , «Technique de haute tension »,édition ENGIYA,MOSCOU ,1989
- [21] **M. KOSTENKO,PIOTROVSKI** «Machine à courant continu - transformateur »édition MIR,MOUSCOU ,1979
- [22] **M. KOSTENKO,PIOTROVSKI** «Machine à courant continu - transformateur » édition MIR,MOUSCOU ,1979
- [23] SCNIEDER ELECTRIQUE « La protection des installations électriques contre la foudre », Novembre 2000.
- [24] : Les schémas de liaison à la terre en haute tension (régimes de neutre), Cahier Technique n°172, B. Lacroix et R.Calvas.
- [25] « **les surtensions et la coordination de l'isolement** » guide de la conception des réseaux électrique industriels Schneider électrique,6883 427/A.
- [26] **WALTER SCHMIDT, FELIX GREUTER**, « Nouvelle approche pour la protection contre les surtensions », Revue ABB 1/2002, édition ABB Switzerland Ltd.
- [27] **MICHEL GRACIER et JOSEPH PINEL**, protection contre les perturbations, origine des perturbations, Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique D 4172, an 2002.
- [28] **R.Belaicha**, « Contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans les cas des terres mauvaises conductrices »Thèse magister 1984.
- [29] technique de l'ingénieur traité génie électrique D4577.Année 2002.