

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou**



**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electrotechnique**



MEMOIRE

En vue de l'Obtention du Diplôme

Master professionnel

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème
Thème

**Détermination des paramètres d'un
transformateur de puissance en régime
permanant et transitoire**

Proposé et dirigé par :

Mr: T. Belassel

Etudié par :

Mr: AGGUINI Kamal

Mr: HASSAINE Si Ahcene

Promotion 2013

Remerciements



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

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

*Nos remerciements et nos respects s'adressent
au personnel de L'Entreprise Electro-industries et
particulièrement à Mme Saadi pour leur
disponibilité.*

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

Merci à tous.



*M AGGUINI Kamal
M HASSAINE Sihcen*



Dédicaces

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

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



*M^r HASSAINE SI AHCENE
M^r AGGUINI Kamal*

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance	
I.1. Définition	3
I.2. Principe de fonctionnement	3
I.3. Construction générale d'un transformateur	4
I.3.1 .Circuit magnétique.....	4
I.3.1.a .Transformateur à colonnes.....	5
I.3.1.b .Transformateur cuirassé	5
I.3.2 .Section du noyau.....	7
I.3.3 .Les enroulements	8
I.4 .Transformateur ordinaire de phase	9
I.5 .Transformateur immergé dans l'huile et transformateur sec	9
I.5 .1 .Transformateur à l'huile.....	9
I.5.1.1 .Caractéristiques des huiles minérales	9
I.5.1.2 .Rôle des huiles isolantes	10
I.5.2 .Transformateur sec	10
I.6 .Groupe de couplage.....	11
I.6.1 .Couplage normalisés	11
I.6.1.1 .Couplage étoile- étoile	11
I.6.1.2 .Couplage triangle-étoile	12
I.6.1.3 .Couplage étoile-zigzag.....	12
I.7 .Les contraintes.....	13
I.7.1 .Surtension.....	13
I.7.1. a. Propagation de l'onde de surtension.....	14
I.7.1. b. Durée des surtensions	14
I.7.2 .Court-circuit.....	17

I.7.3 .Surcharges	17
I.7.4 .Les décharges partielles	18
I.7.5 .Régime déséquilibré.....	19
I.8 .Protection de transformateur.....	19
I.8.1 .Moyens de protection	20
I.8.2 .Protection contre les surtensions externes.....	20
a. Les éclateurs.....	20
b. Les parafoudres	21
I.8.3 .Protection contre les surintensités et les surcharges	24
I.8.4 .Protection contre les défauts internes	24
Conclusion	25

Chapitre II : Modèles mathématiques d'étude

Introduction	27
II. Principaux modèles des transformateurs de puissance	27
II.1.Modèle à 50 Hz.....	27
II.1.1.Phénomènes électromagnétiques.....	28
II.1.1.a .Couplage parfait (transformateur idéal)	29
II.1.1.b .Couplage imparfait	30
II.1.2 .Pertes cuivre.....	30
II.1.3 .Calcul des résistances (grandeurs électriques)	30
II.1.4 .Grandeurs magnétiques	29
II.1.5 .Phénomènes électrostatiques	31
II.1.6 .Pertes diélectriques	31
II.1.7 .Mesure des impédances d'un transformateur.....	31
a) Essai à vide.....	31
b) Essai en court-circuit	32

II.2 .Généralité sur le modèle haute fréquence (HF)	34
a .Modèle détaillé	34
b .Modèle entrée-sortie	35
II.2.1 .Modèle de Morched	35
II.2.2 .Modèle de Leon	36
II.2.3 .Modèle de Chimklai	38
II.2.4 .Modèle de Gustavsen	39
II.2.5 .Modèle d'Andrieu	39
II.2.6 .Modèle de Noda	41
II.2.7 .Le modèle RESEL	42
II.2.8 .Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles .	43
Conclusion	45

Chapitre III : Phénomène transitoire dans les transformateurs

III.1.Introduction	46
III.2.Equation de circuit.....	47
III.3.Répartition de la tension le long d'un bobinage dont le neutre est mis à la Terre	50
III.3.1.hypothèses simplificatrices	50
III.3.2. Répartition initiale de la tension.....	51
Cas où le neutre est mis à la terre	51
Cas où le neutre est isolé de la terre	51
Cas où le neutre est mis à la terre	52
Cas où le neutre est isolé de la terre	52
a. Démonstration	53
b. Le gradient de tension	55
c. Répartition finale de la tension.....	56
III.4.Phénomène transitoire de tension	57
Conclusion	59

Chapitre IV : Procédure de calcul des paramètres

Introduction	60
IV.1.Modèle adopté pour le transformateur sans la prise en compte du noyau.....	60
IV.1.1.Equations du schéma équivalent adopté.....	61
IV.1.1.1.Equations des tensions	61
❖ Equations des tensions pour l'enroulement HT	61
❖ Equations des tensions pour l'enroulement BT	62
IV.1.1.2. Equations des courants.....	63
❖ Equations des courants pour l'enroulement HT	63
❖ Equations des courants pour l'enroulement BT	64
IV.2.2.Représentation matricielle des équations du modèle	65
IV.3.3.Procédure de calcul des paramètres des enroulements HT et BT.....	68
a) Caractéristiques géométriques	69
b) Caractéristiques électriques	69
IV.3.3.1.calcul des éléments résistifs	70
IV.3.3.2.Calcul des éléments inductifs et les coefficients des mutuelles σ_{jj}	70
a) Inductances propre de l'enroulement HT	70
b) Inductances propre de l'enroulement BT	71
c) Calcul de coefficients entre les deux enroulements HT et BT	71
IV.3.3.3.Calcul des éléments capacitifs.....	72
➤ Calcul des capacités transversales C	73
➤ Calcul des capacités longitudinales K_{HT} et K_{BT}	74
Conclusion	75

Chapitre V : Détermination des paramètres des enroulements du transformateur

Introduction.....	76
V.1. Caractéristiques du transformateur	76
V.1.1. Caractéristiques électriques	76
V.1.2. Caractéristiques géométriques	76
V.2. calcul des éléments résistifs	77
V.3. Calcul des éléments inductifs et les coefficients des mutuelles σ_{jj}	78
V.3.1. Inductances propre de l'enroulement HT	78
V.3.2. Inductances propre de l'enroulement BT	79
V.3.3. Calcul de coefficients entre les deux enroulements HT et BT	79
V.4. Calcul les coefficients des mutuelles	82
V.4.1. Calcul de coefficients entre les éléments de l'enroulement HT	82
V.4.2. Calcul de coefficients entre les éléments de l'enroulement BT	82
V.4.3. Calcul de coefficients entre les deux enroulements HT et BT	83
IV.5. Détermination des capacités transversales C et longitudinale K	84
IV.5.1. Relations empiriques pour le calcul des capacités C et K	84
V.5.2. Calcul des capacités longitudinales K des enroulements primaire et Secondaire.....	85
a) Pour le primaire.....	85
b) pour le secondaire	86
Conclusion générale	87

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de comportement d'un transformateur de puissance en régime permanent et transitoire et la détermination des paramètres de schéma équivalent en tenant compte les deux régimes .Et pour cela nous avons adopté un modèle de calcul sans l'influence du noyau magnétique, qui nécessite la connaissance des caractéristiques électriques tel que les pertes à vide et en court circuit , la tension et la puissance nominale du transformateur, pour déduire les valeurs des éléments résistifs Ainsi que la géométrie du transformateur, en se basant sur la disposition des enroulements par rapport au noyau et à la cuve a fin de calculer les éléments inductifs et capacitifs.

Mots clés : transformateur de puissance, régime transitoire,

Introduction

En exploitation, l'enroulement d'un transformateur est soumis à la fois aux surtensions internes et externes. Les surtensions internes sont créées par des modifications brutales des variables de la topologie du réseau, et les surtensions externes par des décharges d'origine atmosphérique.

Lorsqu'une surtension de foudre ou de manœuvre apparaît en un point du réseau, elle se propage suivant les lois de la théorie de propagation des ondes. L'onde mobile se réfléchit sur une irrégularité se trouvant sur son parcours, dans la ligne électrique. Ces irrégularités sont habituellement constituées par des matériels d'exploitation électriques, tels que des transformateurs ou des postes, les surtensions transitoires, pouvant mettre en danger l'isolation de matériels d'exploitation et de lignes, dans le domaine de moyenne tension, sont essentiellement provoquées par des coups de foudre [1].

De tous les matériels de distribution, les transformateurs de puissance, qui sont pour la plupart raccordés à des réseaux aériens, paraissent les plus affectés par les surtensions dues aux coups de foudre [2].

La Connaissance des sollicitations auxquelles est soumise l'isolation du transformateur est donc particulièrement importante pour le calcul de l'isolement et la conception technologique de l'appareil ainsi que pour l'analyse des avaries survenues en cours d'exploitation. Le calcul des surtensions et du risque de claquage est cependant complexe en raison des nombreux paramètres qui entrent en jeu et des caractéristiques de ces paramètres.

Par exemple, les transitoires dus à la foudre dépendent particulièrement de quelques paramètres de la ligne de transport. La détermination des différents paramètres électriques tels que les éléments constituent le schéma équivalent d'enroulement de transformateur représente une étape déterminante pour une meilleure exploitation de ces dispositifs. Ce qui permet également de prédire son comportement aux différentes contraintes pour éviter sa détérioration, et élargir sa durée de vie en vue de minimiser son coût d'exploitation [2].

Le modèle retenu pour le transformateur de puissance est un réseau composé de résistances, d'inductances, et de capacités, et par conséquent, possède des modes propres de résonance électrique, fonction de la structure interne du transformateur (paramètres géométriques, électriques et magnétiques). Par ailleurs, ces éléments du schéma équivalent du transformateur sont dépendants de la fréquence.

Afin de bien mener cette étude, nous avons structuré notre travail en cinq chapitres dont voici les principaux contours :

Le Premier chapitre est consacré a une présentation générale sur des différentes éléments du transformateur ainsi les différentes appareilles de protection associées.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons d'abord les principales méthodes existantes dans la littérature, pour modéliser et pour étudier les surtensions dans les transformateurs de puissance. Cette partie a pour but de déduire les inconvénients et les avantages de chaque méthode, afin de retenir un modèle qui simule le plus fidèlement possible le comportement du transformateur de puissance, en régime transitoire.

Une étude théorique sur les phénomènes transitoires apparaissant dans les enroulements du transformateur suite à une surtension de type impulsionnel, fera l'objet du troisième chapitre

Dans le quatrième et cinquième chapitre, nous exposons la méthode utilisée pour le calcul des paramètres du modèle du transformateur, puis on termine avec une application.

Notre mémoire se termine par une conclusion générale.



CHAPITRE I

Généralités sur les transformateurs de puissances

I.1. Définition

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'amplitude généralement différentes afin de l'adapter aux différents 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, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, nombres de phases) de l'énergie électrique à courant alternatif.

Seuls les transformateurs de puissance permettent, très économiquement, de minimiser les pertes en ligne, en assurant le transport de l'énergie à longue distance sous tension élevée (200KV et 400KV et plus), puis d'abaisser ensuite cette tension, étape par étape, pour alimenter les réseaux de distribution régionaux et locaux, jusqu'à la tension d'alimentation domestique [3].

I.2. Principe de fonctionnement

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable Φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement $\frac{d\Phi}{dt}$ et au nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation de courant secondaire.

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure (I.1)

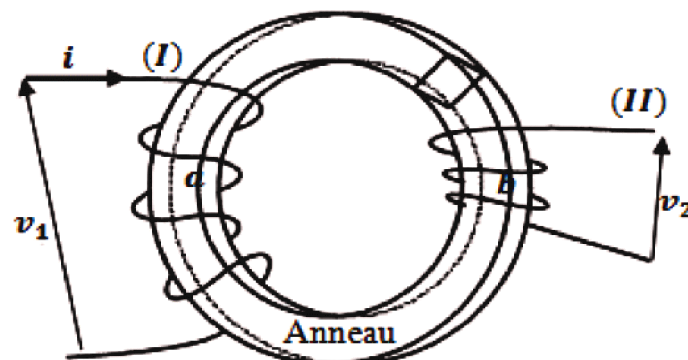


Fig. I.1 : Circuits magnétiques et électriques liés

I.3. Construction générale d'un transformateur

Le transformateur de puissance figure (I.2) se compose essentiellement d'un circuit magnétique et circuit électrique

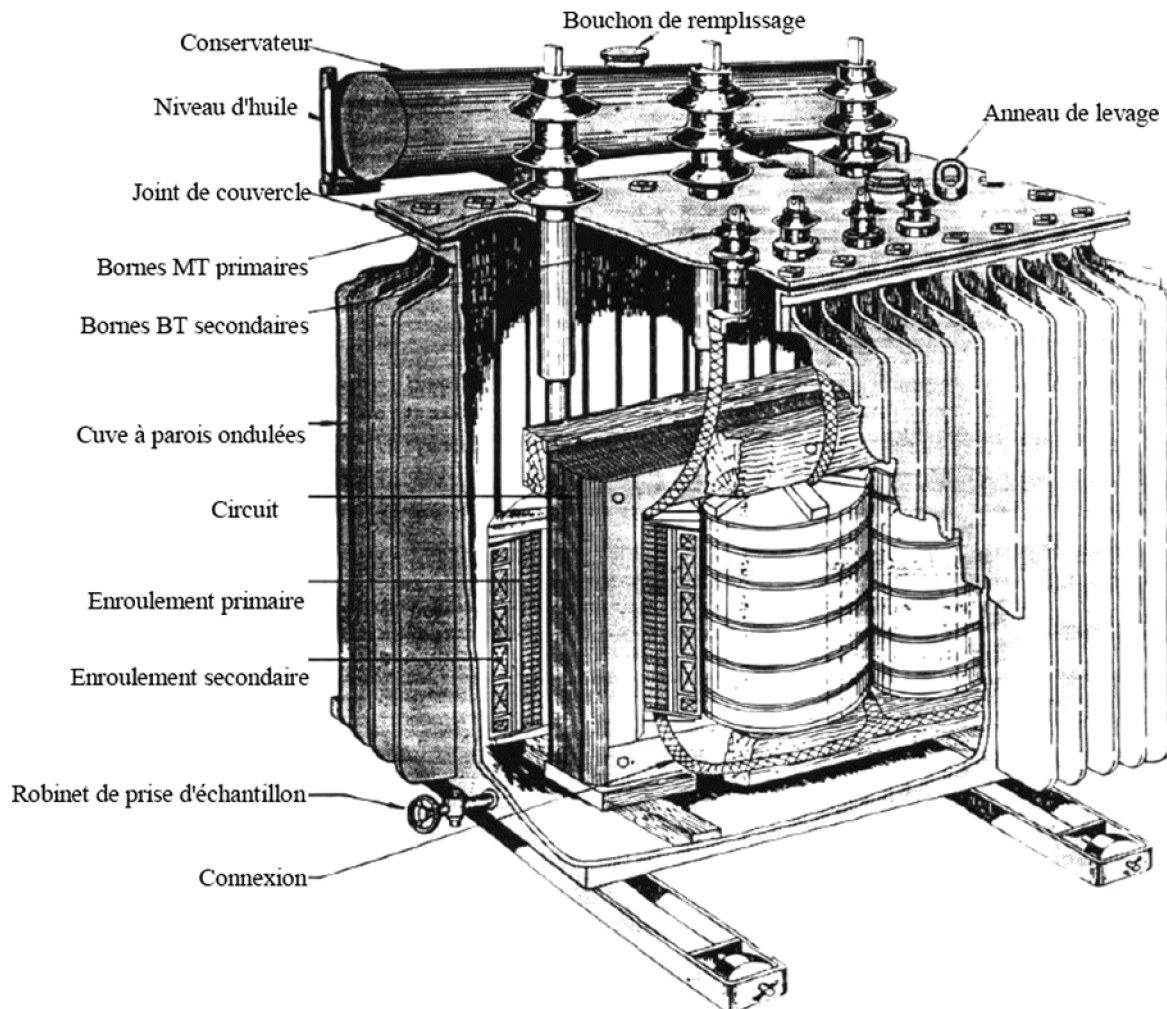


Fig. I.2 : Transformateur à cuve à radiateur

I.3.1. Circuit magnétique

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétique haute perméabilité et a grains orientés, isolées électriquement entre elles. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique. On parvient à résoudre ce problème en prenant des mesures à savoir [3] [4] :

- Emploi d'aciers spéciaux présentant, grâce à des additifs, une résistivité élevée.
- Emploi d'acier magnétiquement doux ayant une petite surface du cycle d'hystérésis et de faible perte par hystérésis.

- Emploi de tôles dont l'épaisseur est choisie tel que les courants de Foucault soient pratiquement sans effet.

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

I.3.1.a. Transformateur à colonnes

Le Transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se ferme à ses extrémités via des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique (Fig. I-3). 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 [4].

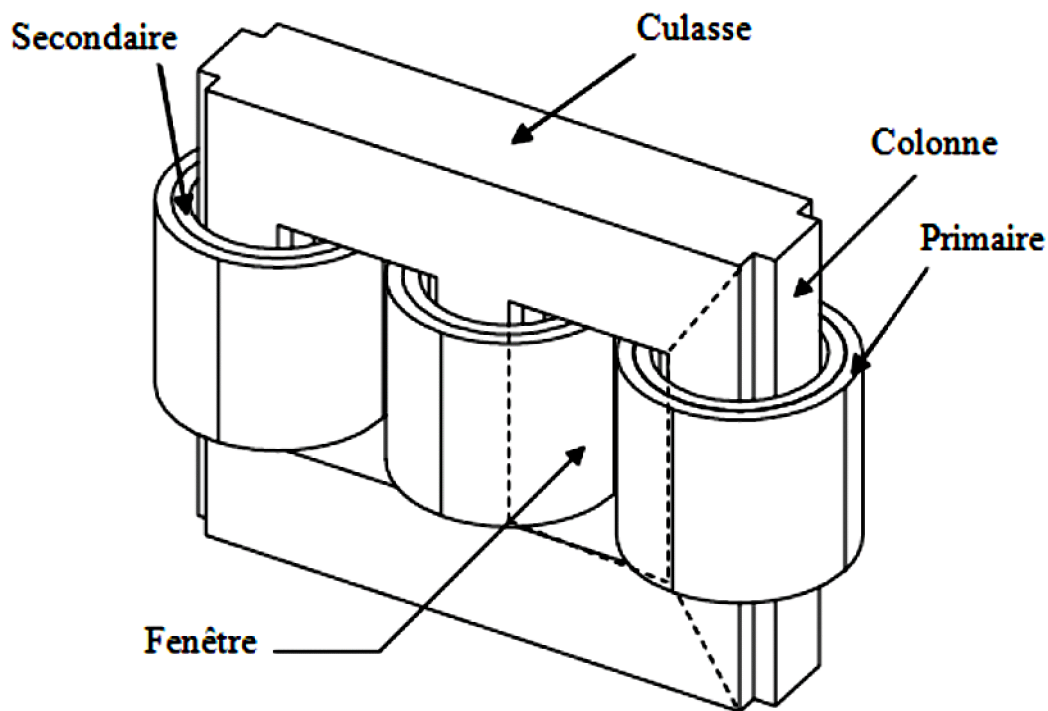


Fig. I.3: Transformateur à colonnes .

Selon la gamme de puissance des transformateurs, les conducteurs peuvent être sous forme de fils massifs, de section circulaire ou carrée, de types méplat, ou encore laminés en fines feuilles.

❖ Limitations des transformateurs à colonnes

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquent, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. Par ailleurs ce type de construction qui a fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30KVA), présente quelque difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 KVA) et des tensions plus élevées. Pour des tensions supérieures à 220 KV, certains constructeurs ont abandonné la construction du transformateur à colonne au profit de la structure cuirassée.

I.3.1.b .Transformateur cuirassé

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines Rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et des enroulements.[4]

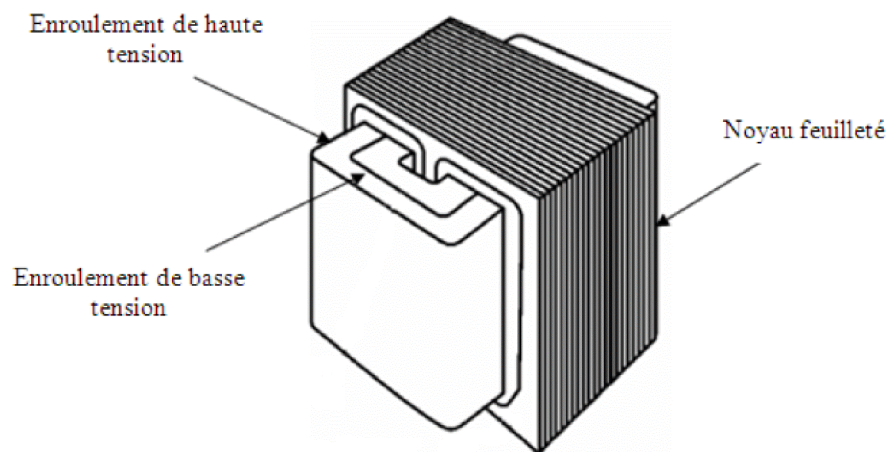


Fig. I.4 : transformateur type cuirassé

Ces Transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des Effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

❖ Les écrans électrostatiques

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquent, le nombre de spires et le rapport volumique entre les

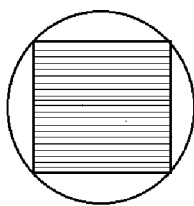
matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. Par ailleurs ce type de construction qui a fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30 KVA), présente quelque difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 KVA) et des tensions plus élevées. Pour des tensions supérieures à 220 KV, certains constructeurs ont abandonné la construction du transformateur à colonne au profit de la structure cuirassée.

❖ **Avantage et inconvénients du transformateur cuirassé**

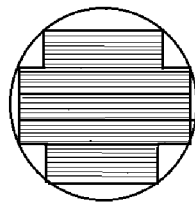
Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relativement plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans 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. [4]

I.3.2. Section du noyau

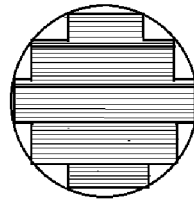
- ❖ **La section circulaire** : est celle qui résiste le mieux aux efforts électrodynamiques, on est alors conduit à adopter les bobinages enroulés sur cylindre de révolution.
- ❖ **Section carré** : elle est employée uniquement pour les petites puissances.
- ❖ **Section à un ou deux gradins** : elle convient pour des puissances de quelques dizaines de KVA.
- ❖ **Section à plusieurs gradins** : lorsque la puissance du transformateur augmente, la section droite de la colonne croit également et l'emploi correct de la place disponible exige la multiplication des gradins



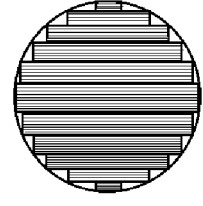
Section carrée



Section à 1 gradin



Section à 2 gradins



Section à plusieurs gradins

Fig.1.5: les différents noyaux de circuit magnétique

I.3.3. Les enroulements

Les enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

Pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

- Il faut diminuer les intervalles entre les enroulements pour diminuer le champ de dispersion magnétique, ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance réactive.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégage sous forme calorifique.
- Les enroulements doivent résister à l'élévation de température, les courts circuits et les surtensions lors du fonctionnement du transformateur.

Il existe trois types d'enroulement, qui sont déterminés en fonction de la puissance et la tension imposées par le cahier des charges, à s'avoir :

- Enroulements concentriques en couche en fil rond en vernis ;
- Enroulements concentriques en méplat isolé au papier ;
- Enroulements concentriques alternés en méplat isolé au papier ;
- Enroulements concentriques à galettes en fil rond isolé au papier ;

La réalisation des bobines s'effectue sous plusieurs formes, on trouve :

➤ ***Les bobinages concentriques***

Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques concentriques.

➤ ***Les bobinages en galettes***

Les enroulements sont constitués de galettes superposées et alternées appartenant successivement au primaire et au secondaire, et séparées les une des autres par une rondelle isolante.

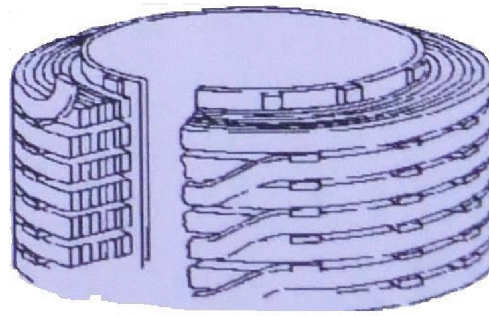


Fig. I.6 : bobinages en galettes

➤ *Les bobinages mixtes*

C'est un mélange entre les deux premiers bobines (galette et concentrique), le bobinage est concentrique mais l'enroulement HT est en galette.

I.4. Transformateur ordinaire de phase

Du point de vu de leurs applications, les transformateurs ordinaires de phase (monophasé, biphasé, et triphasé), groupés dans trois ou cinq colonnes se classent en trois catégories :

- Les transformateurs pour les grands réseaux et les grandes centrales, leur puissance varie de 100 à 400MVA
- Les transformateurs pour réseaux de répartition qui alimentent les lignes à moyenne tension, leur puissance varie de 5 à 30 MVA
- Les transformateurs de distributions destinés a l'alimentation des utilisateurs de l'énergie électrique en basse tension (380 ou 220 V) leur puissance varie de 5 a 2000 KVA

I.5. Transformateur immergé dans l'huile et transformateur sec [5]

Selon le type de refroidissement on distingue : les transformateurs à l'huile et les transformateurs secs.

I.5 .1. Transformateur à l'huile

L'emploi d'une huile minérale en tant que moyen de refroidissement et d'isolement n'est pas nouveau. Aujourd'hui, l'huile minérale est toujours utilisée comme isolant parce qu'elle offre non seulement le meilleur compromis prix/performances, mais également un haut niveau de

compatibilité avec les autres matériaux utilisés dans les transformateurs. D'autres fluides bien plus coûteux, tels que les huiles silicone, certains types d'esters, etc..., sont réservés à des applications particulières pour lesquelles le prix élevé peut être justifié

Les huiles et liquides isolants sont utilisés comme imprégnants d'isolants solides et produits de remplissage de matériels électriques très divers: transformateurs, condensateurs, disjoncteurs, etc...

Ces appareils présentent des pertes d'énergie qui, aussi faibles soient-elles (0,1 à 1% de la puissance nominale), provoquent une élévation de la température. Celle-ci peut être limitée par l'emploi d'huile ou de liquide ou par refroidissement naturel (convection) ou forcé (circulation).

90 à 95% des liquides isolants sont représentés par les huiles minérales, dont l'importance commerciale s'explique par la facilité de les obtenir (à partir des coupes pétrolières) et par leur prix, le plus bas de tous les isolants. Cette masse d'huile ne représente cependant qu'une infime partie (2%) de l'ensemble des lubrifiants.

Les trois fonctions principales d'une huile isolante sont :

- évacuer les pertes d'énergie;
- isoler au sens strict (c'est-à-dire ralentir l'oxydation de l'isolation solide) ;
- isoler au sens électrique ;

A côté de ces trois fonctions fondamentales, il y a lieu d'ajouter la fonction de résistance à l'incendie, dont le pouvoir d'extinction des arcs électriques, et le pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement.

I.5.2. Transformateur sec

Les transformateurs immergés dans l'huile liquide à base minérale ou de silicone sont plus répandus pour les plus fortes puissances et les niveaux de tension élevés, mais présentent des risques de fuite, d'incendie et la pollution de l'environnement. Cela a permis de laisser la place aux transformateurs avec technologie sèche, avec des enroulements enrobés (imprégnés). Le système d'isolation électrique est remplacé par une résine (époxyde) et l'air. Des résines ont été développées pour résister aux contraintes électriques et aux contraintes mécaniques, thermiques qui apparaissent dans un transformateur en service. L'aspect favorable est son comportement non inflammable et léger. Ce genre de transformateur est le plus appropriés pour la distribution de l'électricité en degré élevé de sûreté.

I.6. Groupe de couplage

Le groupe de couplage désigne l'association des couplages des enroulements choisis pour la haute tension et pour la basse tension. L'enroulement haute tension d'un transformateur triphasé de nombre de spires N_1 peut être connecté en étoile (symbole y) ou en triangle (symbole D). L'enroulement basse tension avec un nombre de spires N_2 peut être connecté en étoile (symbole Y), en triangle (symbole d) ou zigzag (symbole z) les systèmes des tensions du primaire et du secondaire d'un transformateur triphasé sont en général déphasés avec un angle α . Comme cette angle est multiple de $\pi/6$, on définit l'indice horaire par : $I = \alpha (\pi/6)$

I.6.1. Couplage normalisés [6]

Trois couplages sont particulièrement utilisés en pratique : ce sont les couplages normalisés Yy 0, Dy 11 Yz11

I.6.1.1. Couplage étoile- étoile

Pour le couplage étoile- étoile, les tensions aux bornes des bobines du primaire et du secondaire de la même colonne sont des tensions simples (Fig.7-a). Ce qui permet de construire le diagramme vectoriel (Fig.7-b). Le rapport de transformation est $m = N_2/N_1$ le déphasage α de basse tension par rapport a la haute tension est nul, ce qui donne un indice horaire $I=0$

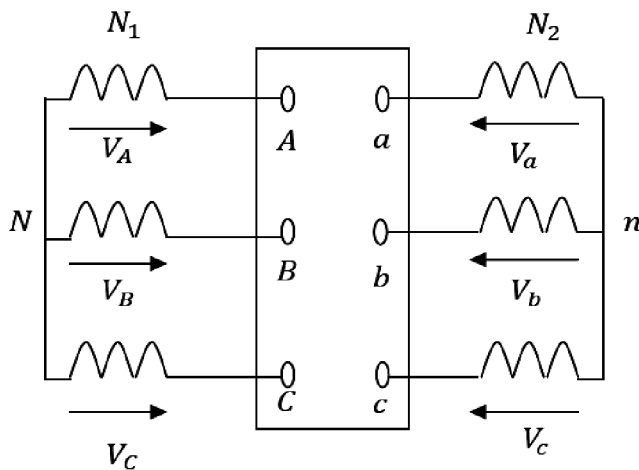


Fig7.a: Couplage Yy 0

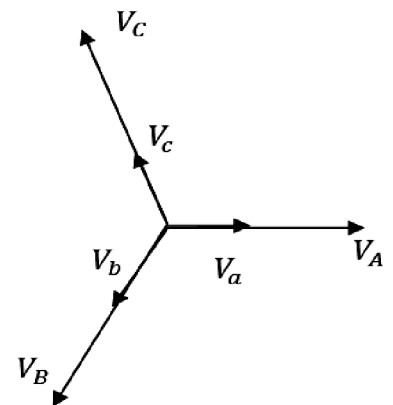


Fig7.b: Diagramme vectoriel

I.6.1.2. Couplage triangle-étoile

Pour le couplage triangle- étoile la tension aux bornes d’une phase du primaire est une tension composée, alors que la tension aux bornes de la phase correspondant du secondaire est une tension simple (fig.8-a). Le rapport de transformation est $m = \sqrt{3} \cdot (N_2/N_1)$. Le déphasage \square Entre les tensions du primaire et le secondaire est de $(-\pi/6)$. Ce qui veut dire l’indice horaire Est I=11 (Fig.8-b).

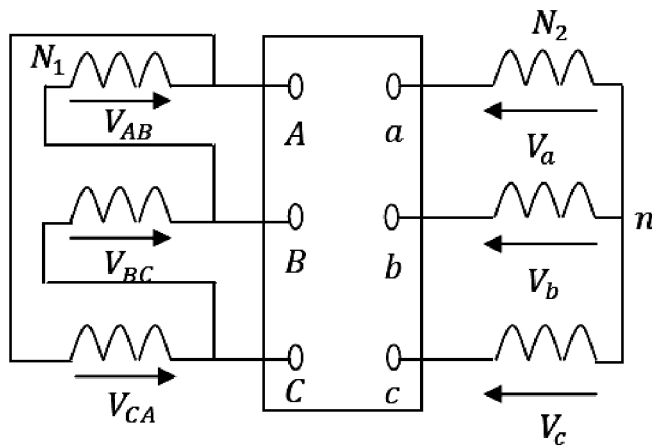


Fig.8.a: Couplage Dy 11

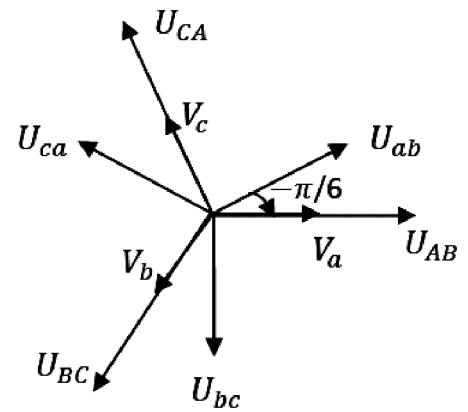


Fig.8.b: Diagramme vectoriel

I.6.1.3. Couplage étoile-zigzag

Pour le couplage étoile-zigzag (Fig.9-a), la tension aux borne d’une phase du primaire est une tension simple alors qu’une tension aux bornes d’une phase du secondaire est la somme des deux tensions aux bornes de demi bobines ce qui permet de construire le diagramme vectoriel (Fig.9-b). Le rapport de transformation est $m = \sqrt{3} \cdot (N_2/N_1)$ Le déphasage \square entre les tensions est de $(-\pi/6)$, en choisissant la première détermination position positif de l’angle, ce qui veut dire l’indice horaire est I=11

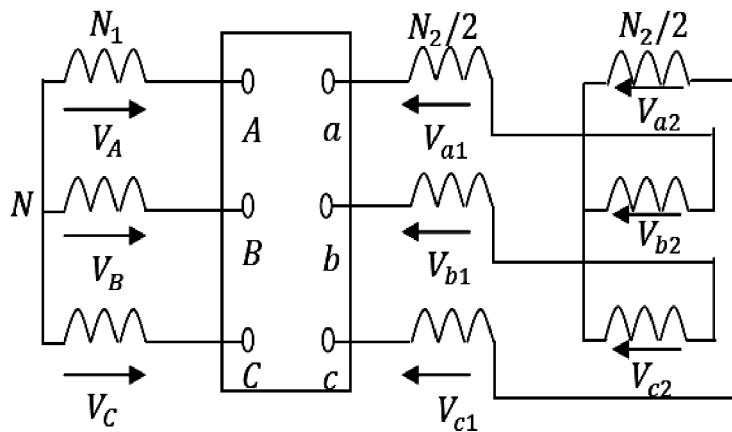


Fig.9.a : Couplage Yz 11

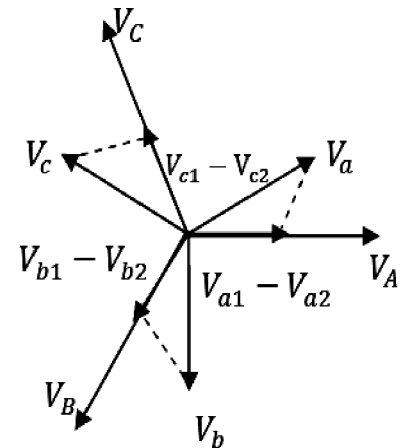


Fig.9.b : Diagramme vectoriel

I.7. Les contraintes [6]

Un réseau électrique doit fournir une énergie 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.

Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs, leurs causes, leurs conséquences.

I.7.1. Surtension

Les surtensions sont dangereuses sur un réseau de distribution car elles soumettent les isolants à des contraintes qui risquent de les détruire ou du moins de les vieillir.

Les surtensions peut être causées par :

- Contact avec une ligne de plus forte tension.
- Coupure brutale d'une ligne.
- Coups de foudre direct ou indirect.

Les conséquences des surtensions sont :

- Dans le cas ou la surtension persiste, elle risque d'entraîner des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs.

- En cas de claquage de l'isolant, elles ont pour conséquence immédiate un court-circuit même s'il s'agit seulement d'un arc dans l'air, celui-ci persiste sur les réseaux de tension supérieure à quelques milliers de volts, même après disparition de la surtension.
On a alors le courant de suite qui ne sera coupé que par isolement de la ligne ou de l'appareil atteint.
- Les surtensions de longue durée augmentent le courant magnétisant des transformateurs, d'autant plus que leur circuit magnétique est saturé.

I.7.1. a. Propagation de l'onde de surtension [7]

L'onde se propage le long de la ligne à une vitesse $V = \pm \sqrt{\frac{1}{LC}}$ où L et C sont respectivement l'inductance et la capacité par unité de longueur de la ligne.

Cette vitesse est de l'ordre 300000 Km/s dans une ligne aérienne de 100 à 150000 Km/s dans un câble isolé. Au cours de sa propagation, l'onde s'aplatit, s'amortit et devient peu à peu moins dangereuse. L'onde subit des modifications, si elle rencontre des obstacles au cours de sa propagation, par exemple :

- A l'extrémité d'une ligne ouverte, le courant s'annule et la surtension double.
- Sur une ligne en court-circuit, la tension s'annule et le courant double.
- A une bifurcation, il se produit une onde réfléchie sur la ligne d'arrivée et une onde incidente affaiblie sur les départs.
- Lorsque l'onde passe d'une ligne aérienne à une ligne isolée, la tension de l'onde diminue et l'intensité augmente.

I.7.1. b. Durée des surtensions

La tension de claquage dépend de l'amplitude et de la durée de l'application de la contrainte diélectrique, et c'est donc aussi sur la durée que se base la classification de celle-ci

Une distinction est faite entre les chocs de manœuvre d'après la durée du front. Les chocs dont les durées du front vont jusqu'à $20\mu s$ sont considérés comme étant des chocs de foudre figure (Fig. I-11), et ceux qui ont une durée du front plus longue comme étant des chocs de manœuvre figure (Fig. I-10)

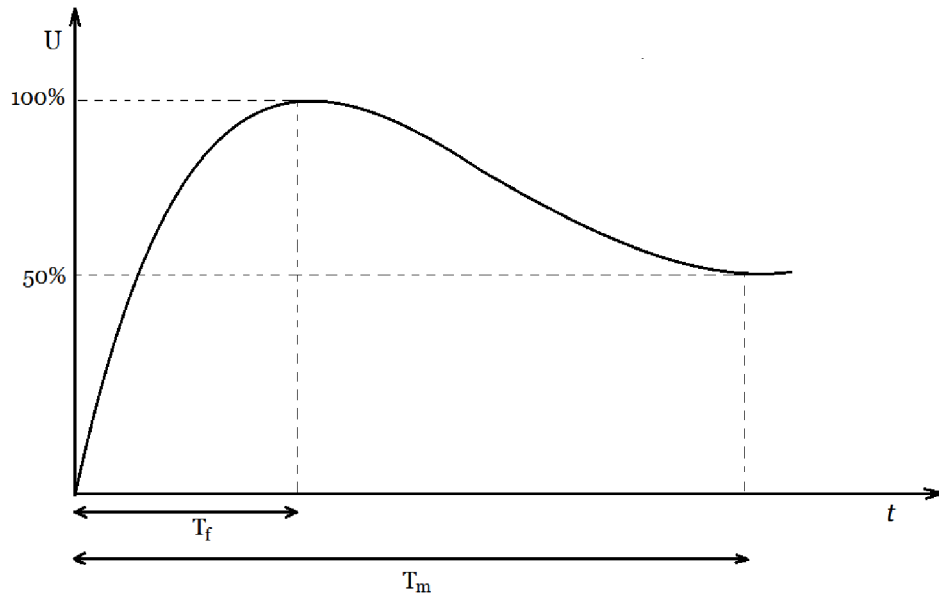


Fig. I.10: onde de choc de manœuvre

Ou : T_f : durée de front.

T_m : durée jusqu'à la mi-amplitude.

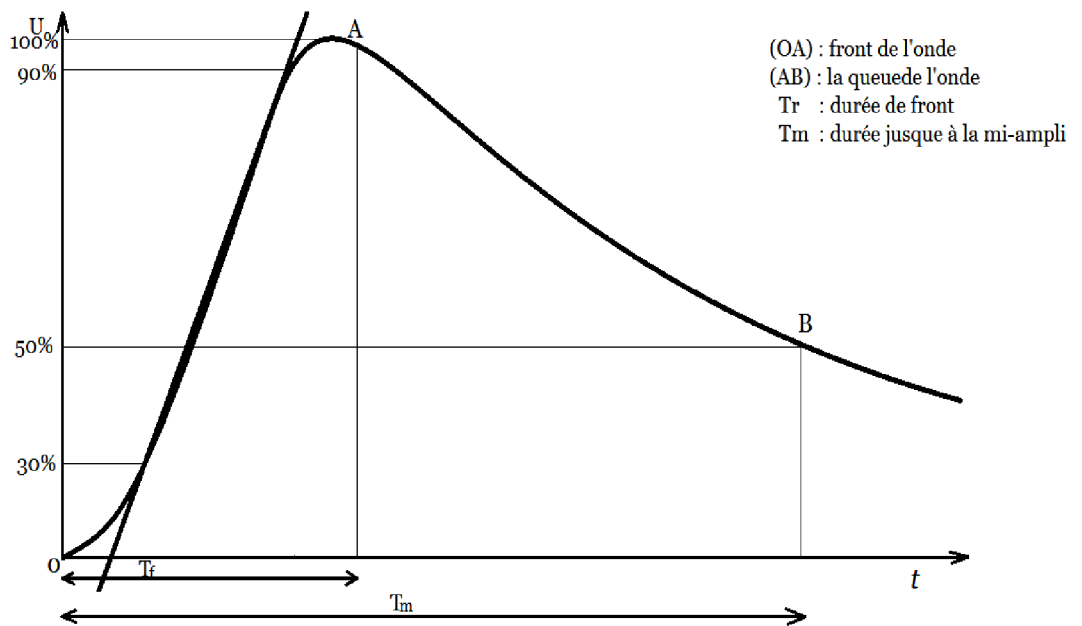


Fig. I.11 : onde de choc de foudre

Les études ont montré que les surtensions l'enclenchement et de déclenchement dépassent la tension simple nominale de 2 à 5 fois. Les surtensions dues aux avaries dépassent cette tension de 7 à 8 fois, et les surtensions dues aux causes atmosphériques la dépassent de 7 à

12 fois. Les surtensions qui dépassent la tension de ligne de service de 2,5 fois sont considérées sans danger mais lorsqu'elle dépasse la tension de service 3,5 fois, elle présente un danger.

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

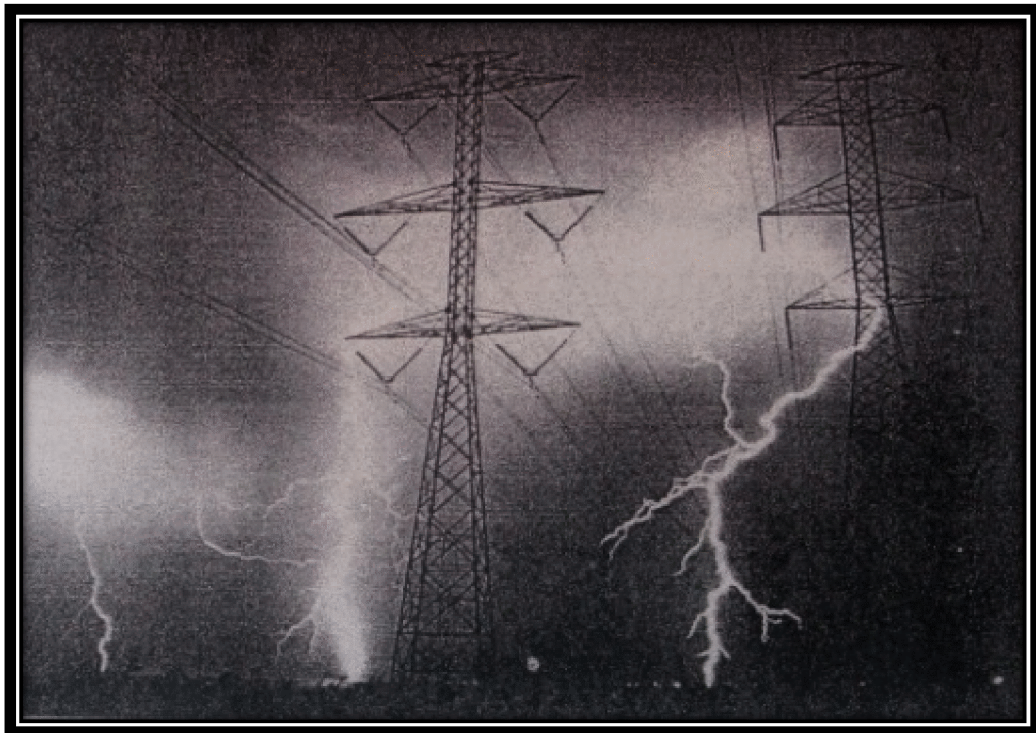


Fig. I.12 : coup de foudre sur réseau de transport

I.7.2. Court-circuit

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolement relatif de deux conducteurs de tension différente à la même source, sans interposition d'une impédance convenable.

Le court-circuit peut être causé par :

- Installation intérieurs : frottement – écrasement – rupture de conducteur contact avec le conducteur voisin.....
- Lignes aériennes : coup de foudre – balancement de conducteur chutés des branches.....
- Lignes souterraines : mouvement de terrain – infiltration d'humidité – coup de pioche....
- Postes : avarie d'un appareil – vieillissement, détérioration ou claquage des isolants

Les conséquences des surintensités sont :

- La chaleur de l'arc ou celle dépensée dans le contact imprévu, peut faire fondre les métaux environnants, carboniser les isolants et même déclencher les incendies.
- Les efforts électrodynamiques des courants de court-circuit sont très dangereux, les enroulements des transformateurs sont véritablement secoués. Ils peuvent même causer un décalage galettes.
- L'échauffement de tous les conducteurs traversés par le courant de court-circuit est très important, il concentre ses effets sur les points faibles : bornes des transformateurs.
- Les effets de la tension, s'ils font courir moins de danger au matériel, n'en sont pas moins gênants, la tension devient quasi-nulle au voisinage du court-circuit.

I.7.3. Surcharges

Les surcharges sont dues essentiellement à une augmentation de la demande d'énergie, mais parfois aussi à un dimensionnement incorrect des équipements qui composent les installations électriques.

Les surcharges se caractérisent par des courants supérieurs aux courants maximums admissibles. Si ces courants se maintiennent trop longtemps ils peuvent d'une part endommager les matières isolantes et d'autre part provoquer la rupture des conducteurs par suite de la dégradation de leur résistance mécanique.

Les conséquences des surcharges sont :

Un régime de charge d'un transformateur au-delà des valeurs de la plaque signalétique a les conséquences suivantes :

- Les températures des enroulements, des calages, des connections, des isolants et de l'huile vont augmenter, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables.
- L'induction magnétique du flux de fuite en dehors, du circuit magnétique augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courant de Foucault dans les parties métalliques embrassées par le flux de fuite.
- Comme la température varie, les taux d'humidité et teneur en gaz dans l'isolation et dans l'huile sont modifiés.
- Les traversées, les changeurs de prises, les connexions d'extrémités de câble et les transformateurs de courant sont également soumis à des contraintes plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.

Par conséquent il y a un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolation du transformateur sur de nombreuses années.

I.7.4. Les décharges partielles

Les phénomènes de décharge partielle (DP), tels que définis par la norme IEC 60270, sont des décharges disruptives localisées d'une petite partie d'un système d'isolement électrique solide ou liquide sous l'effet d'une forte contrainte de tension[6]

Si une DP ne conduit pas immédiatement à la mise hors service d'un appareil, elle est toutefois préjudiciable dans la mesure où elle conduit à une dégradation des matériaux (en particulier solides) sous l'action de diverses contraintes :

- Contrainte thermique générée localement par la décharge (par exemple carbonisation du carton d'un transformateur).
- Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (par exemple ozone ou acide nitrique).

L'extension de la décharge est limitée soit parce que le champ électrique local n'est pas suffisant pour provoquer sa propagation totale (décharge couronne dans un gaz ou un liquide, par exemple), soit parce que la propagation est bloquée par un isolant dont le champ de claquage est plus élevé (en général un solide).

La détection et la surveillance des décharges partielles sont d'une importance capitale car les phénomènes de DP précèdent fréquemment un claquage d'isolant de l'équipement haute tension, pouvant entraîner des pannes et des réparations très coûteuses.

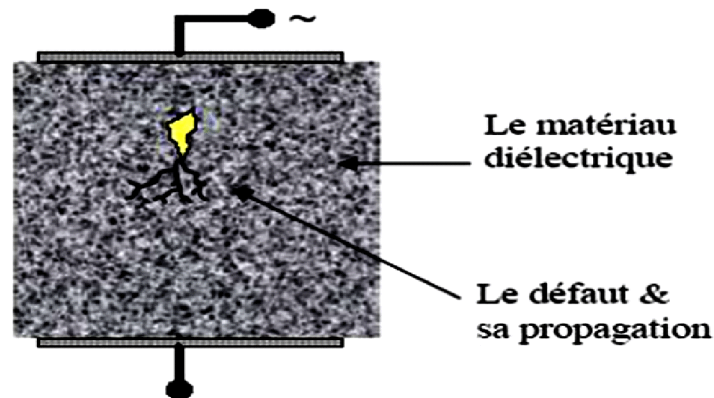


Fig. I.13 : Décharge partielle dans un diélectrique

I.7.5. Régime déséquilibré

Le régime déséquilibré correspond à un incident sur l'une des trois phases du réseau. La composante homopolaire du courant dans les bobines devient importante, entraînant un déséquilibre des ampères-tours du circuit magnétique et par conséquent une augmentation des pertes supplémentaires dans le fer et le cuivre provoquant des surchauffes locales considérables.

I.8. Protection de transformateur

Le transformateur est l'un des éléments des réseaux électrique qui atteint le plus haut degré de fiabilité. Cependant, si les contraintes en régime permanent peuvent être facilement prises en considération pour le dimensionnement, les contraintes en grande variation relèvent du traitement statique. Il ya donc lieu de tenir compte de l'éventualité de défauts en exploitation, d'apprécier leurs conséquences et de mettre en œuvre les moyens de les pallier.

L'interruption d'alimentation due à un défaut, peut, suivant sa durée et le système alimenté, être de peu de conséquences ou prendre l'aspect d'une catastrophe.

La protection est une question à traiter du point de vue économique, en considérant la probabilité d'un type de défaut, les conséquences de sa manifestation éventuelle (perte de production, cout de

remise en état, dommages au matériel) et le cout de l'efficacité de la ou des protections destinées à l'empêcher ou à le limiter [6].

I.8.1. Moyens de protection [8]

La qualité essentielle qui leur est demandée est discerner nettement et surement les conditions anormales, et de ne pas réagir intempestivement aux circonstances normales de service (manœuvre, variation admises de courant, tension, fréquence).

I.8.2. Protection contre les surtensions externes

A chaque classe de tension nominale correspond un niveau de tenue aux surtensions externes. Ainsi, pour la tension nominale de 63 kV, le niveau de tension de choc de foudre est de 350 kV, tandis que pour une tension de 400 kV, aux niveaux de choc de foudre de 400 kV, aux niveaux de choc de foudre de 1425 kV ou de 1300 kV est associé un niveau de surtension de manœuvre de 1050 kV, et au niveau de choc de foudre 1175 kV est associé un niveau de surtension de manœuvre de 950 kV.

L'installation doit être équipée de moyens qui abaissent les surtensions en service jusqu'à des valeurs inférieures aux niveaux assignés, avec une marge suffisante.

Les éclateurs et les parafoudres sont les dispositifs utilisés pour limiter les surtensions de fortes amplitudes. ils sont généralement dimensionnés pour intervenir sur les surtensions de foudre

a. Les éclateurs

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre, a l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour passage des ondes à la terre et protège ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air

Entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur (Fig. I-14)

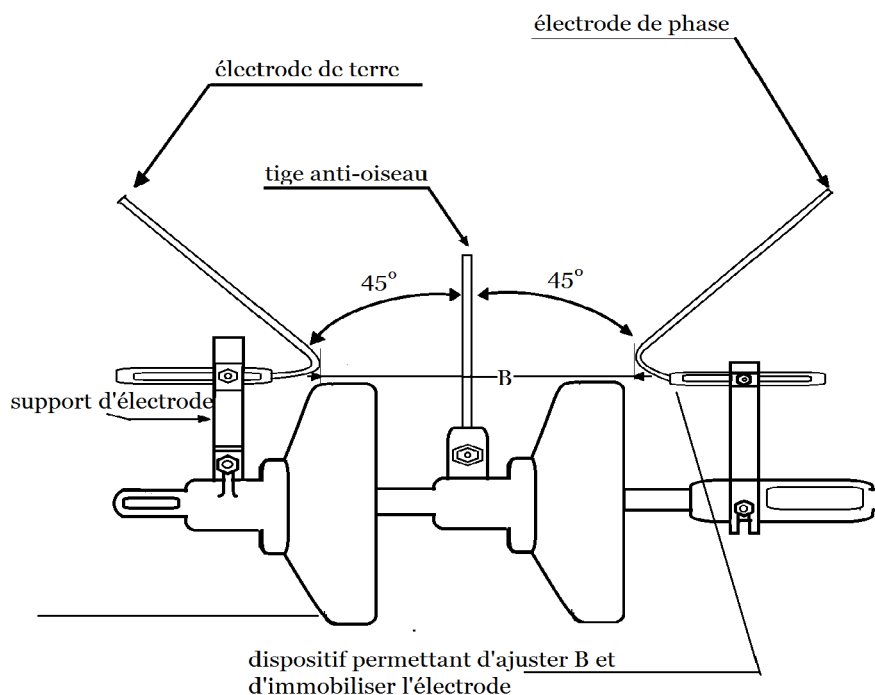


Fig. I.14 : éclateur MT avec une tige anti-oiseau

b. Les parafoudres :

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

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

- Peu de dispersion de leur tension d'amorçage.
- Retard à la conduction quasiment nul.
- Une extension spontanée de l'arc.
- Une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde de tension coupée.
- Une insensibilité (jusqu'à un certain point) aux influences externes.

Différents modèles ont été conçus, seuls les types les plus répandus seront présentés dans la suite de ce chapitre. Parafoudre figure (I-14) est constitué d'une ou plusieurs résistances non linéaires (varistances), associées en série avec un ou plusieurs éclateurs. L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).

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

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

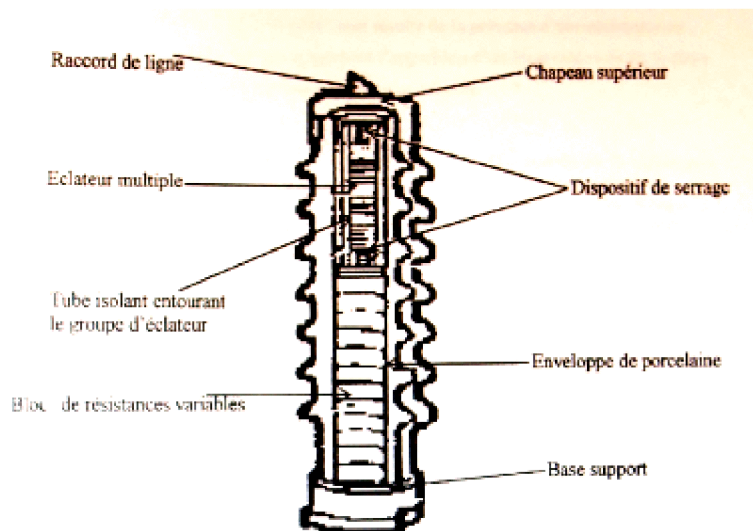


Fig. I.15 : Parafoudre à moyenne tension conventionnel.

✚ Fonctionnement :

Dans les conditions normales de service, les éclateurs ne sont pas conducteurs.

Lorsque la tension dépasse un certain seuil (niveau d'amorçage), les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les résistances du parafoudre. Lorsque la tension augmente, les valeurs de ces résistances diminuent rapidement et limitent ainsi la surtension.

Après le passage de l'onde de courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre décroît, mais la non linéarité des caractéristiques entraîne une décroissance plus rapide du courant. Une fois la tension revenue à la valeur normale du réseau, le courant se trouve donc, limité à une intensité assez faible (courant de suite) et peut-être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage à zéro.

✚ Parafoudre à Oxyde de Zinc (ZnO)

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

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

Pour les réseaux de distribution.

L'absence de l'éclateur fait que le parafoudre à ZnO est continuellement conducteur mais, sous la tension nominale du réseau protégé, avec un courant de fuite à la terre très faible (inférieur à 10mA).

Leur principe de fonctionnement est très simple et repose sur la caractéristique non linéaire des résistances à ZnO. Cette non-linéarité est telle que la résistance passe de $1,5\text{M}\Omega$ à $15\ \Omega$ entre la tension de service et la tension au courant nominal de décharge.

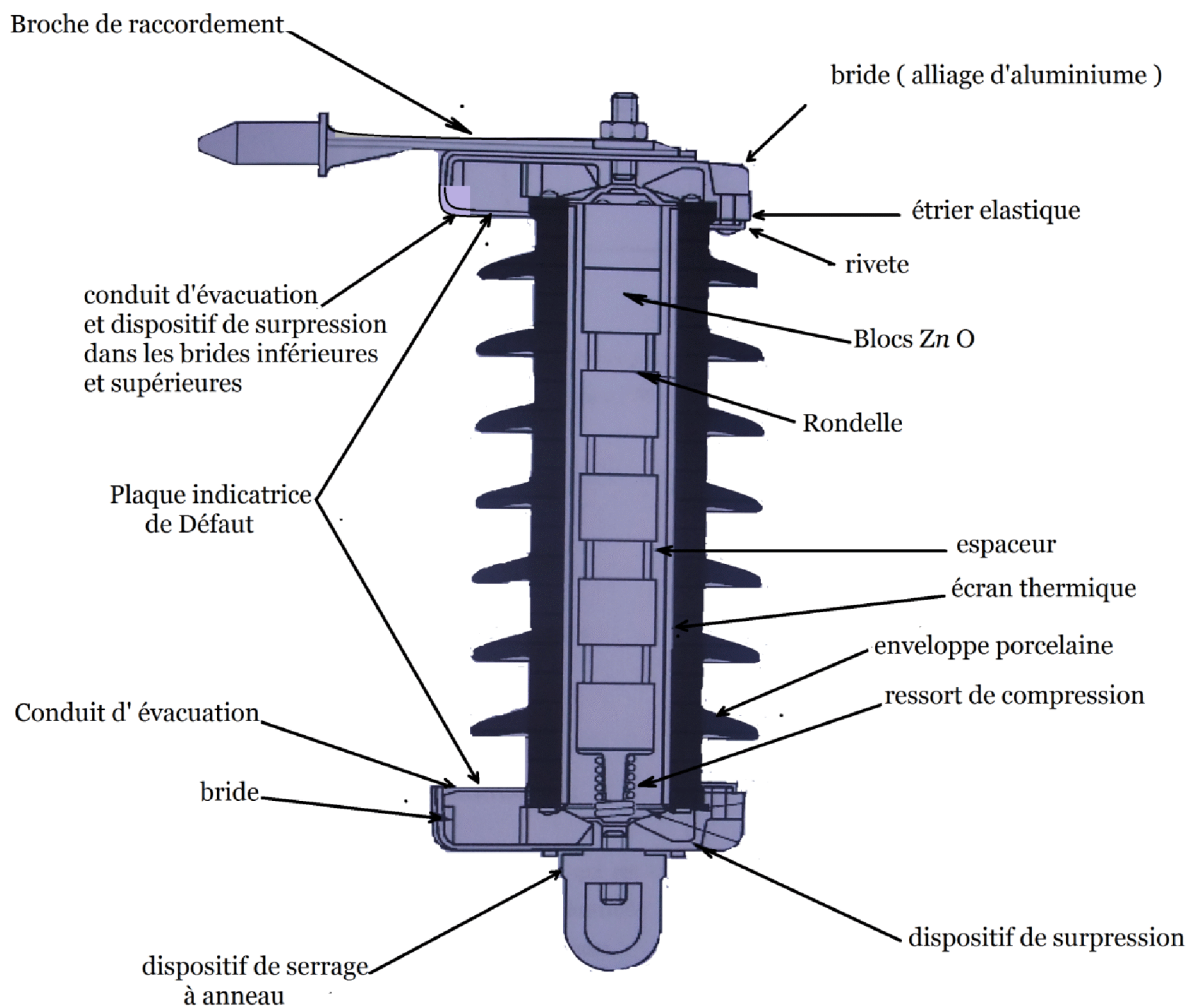


Fig. I.16 : Parafoudre à Oxyde de Zinc en enveloppe porcelaine

I.8.3. Protection contre les surintensités et les surcharges

En ce qui concerne les surcharges, le thermomètre classique monté sur tous les transformateurs peut être muni de contact «alarme» et «déclenchement» signalant une température anormale puis dangereuse de l'huile. Cette indication exige d'être complétée par celle d'autres appareils, car elle ne donne pas d'information sur la température du point chaud des enroulements.

L'image thermique est le meilleur moyen de suivre l'état de charge d'un transformateur. Ce relais baignant dans l'huile à la partie supérieure de la cuve comporte une résistance alimentée par un courant proportionnel à celui de l'enroulement surveillé.

L'échauffement et la constante de temps sont réglables. L'image thermique suit donc la température du point le plus de l'enroulement et peut signaler le dépassement de la limite autorisée. Indirectement, compte tenu de la charge du transformateur, elle permet de contrôler le fonctionnement du système de la réfrigération.

Des relais à maximum d'intensité prévus pour des courants de fonctionnement instantané de 3 à 6 In ont une temporisation réglable entre 0 et 6 à 10 secondes.

Les relais indirects sont utilisés dans les installations importantes à commande centralisées. Ils assurent les mêmes fonctions, l'influence de la température ambiante étant en général compensée, ce qui permet de déterminer l'échauffement dû au courant. Leur réglage et leurs caractéristiques de fonctionnement sont plus précis.

Les relais à maximum d'intensité sont également directs ou indirects. Prévus pour des courants de fonctionnement instantané de 3 à 6 In, ils ont une temporisation réglable entre 0 et 6 à 10 secondes. Les remarques faites pour les relais de surcharge peuvent leur être appliquées.

I.8.4. Protection contre les défauts internes

Une grande partie des incidents internes provoquent un dégagement de gaz plus ou moins abondant et rapide, susceptible d'être détecté. Le relais Buchholz, monté sur la tubulure reliant la cuve au conservateur d'huile, comporte deux flotteurs à contacts mettant chacun en évidence un type de défaut :

- Production lente de gaz donnant lieu à alarme (point chaud, ionisation, maladie du fer Mauvais contacts, défaut d'étanchéité de la pompe, baisse du niveau d'huile, due a une fuite);

- Production brutale de gaze ou surpression interne provoquant un ordre de déclenchement instantané (court-circuit entre spire, amorçage à la masse, efforts électrodynamique violent).

La construction robuste du relais Buchholz et son fonctionnement simple et sûr font qu'il est très largement utilisé.

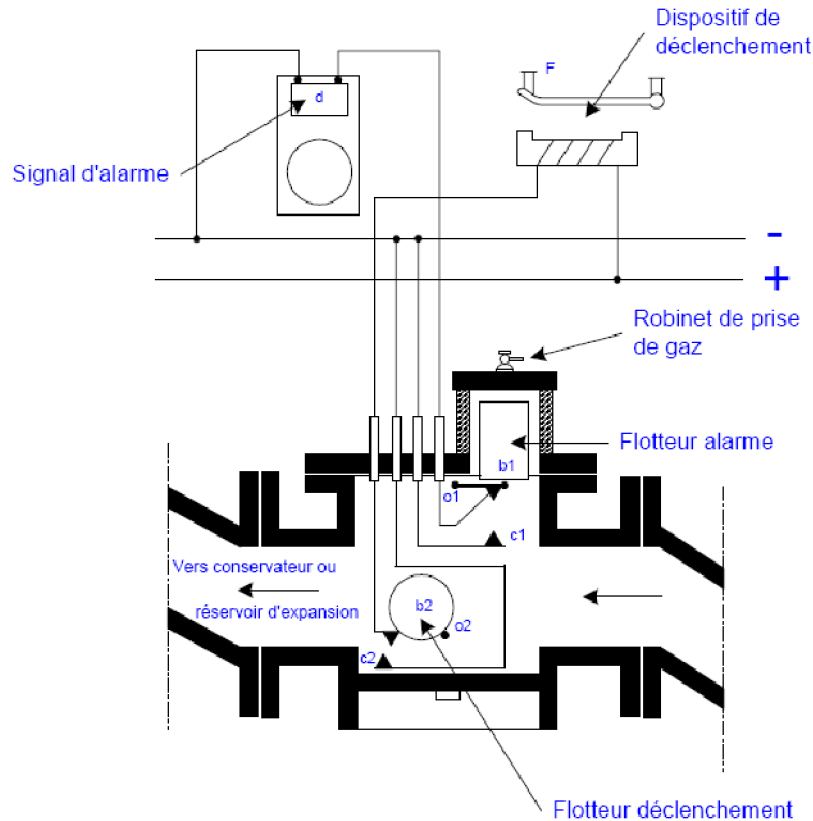


Fig. I.17 : Relais Buchholz

❖ Le fonctionnement de relais Buchholz

Le corps du relais (voir figure I.17) 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 un signal d'alarme. Le circuit du contact c2 actionne le dispositif de déclenchement.

Le relais Buchholz protège toujours le transformateur en cas de fuite de diélectrique à condition toutefois qu'elle se manifeste au-dessous du relais.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisés une présentation générale sur les transformateurs de puissance, dans les réseaux d'exploitation, les transformateurs sont soumis à de nombreuses

contraintes naturelles lors de leur fonctionnement. Une surveillance et une maintenance permanente sont nécessaires pour assurer la fiabilité de leur fonctionnement



CHAPITRE II

Modèles mathématiques d'étude

Introduction

La modélisation des transformateurs de puissance a traditionnellement occupé beaucoup d'attention durant des années, pour leur importance dans les systèmes de puissance, le grand intérêt porté à l'étude de ces derniers permet de réaliser un développement remarquable dans le domaine de la conversion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

La compréhension des phénomènes électromagnétiques qui régissent leur fonctionnement et la détermination des différentes pertes et les paramètres électriques constitue une étape déterminante pour une meilleure exploitation de ces dispositifs.

Ce qui permet également de prédire son comportement aux différentes contraintes pour éviter sa détérioration, et élargir sa durée de vie en vue de minimiser son coût d'exploitation.

II. 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

II.1. Modèle à 50 Hz

Considérons deux enroulements de n_1 et n_2 spires, qui sont traversés par le même flux d'induction magnétique

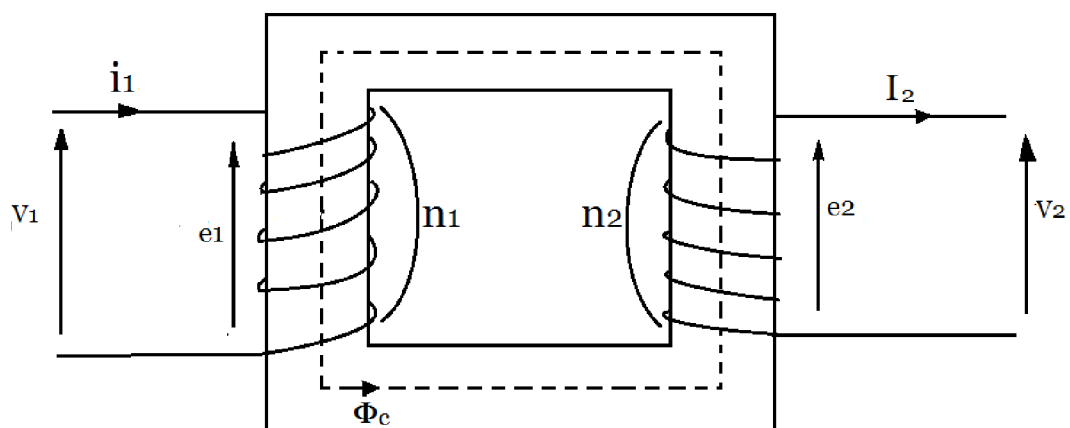


Fig. II.1 Deux bobines couplées sur un circuit magnétique

Le modèle élémentaire à 50Hz pour ce type de transformateur est montré dans la figure II-1. Ce modèle comporte un transformateur réel avec le rapport $m = \frac{n_1}{n_2}$ et les inductances les résistances.

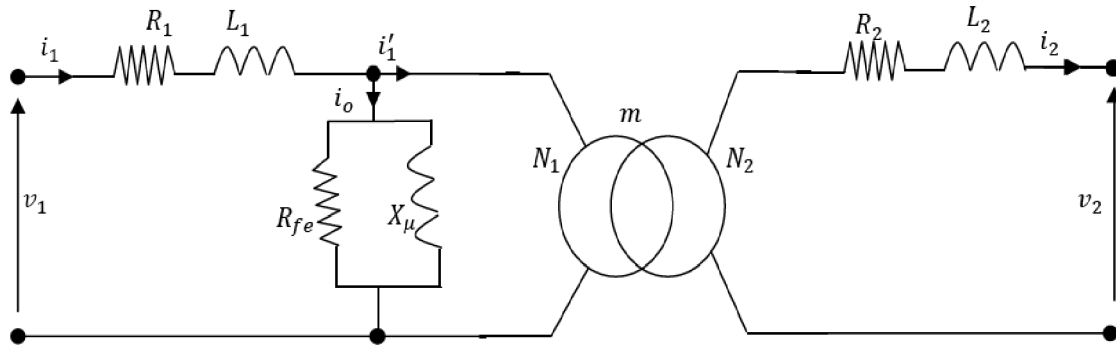


Fig. II.2 Schéma équivalent d'un transformateur réel[6]

En désignant par R_1, R_2, L_1, L_2 les résistances et inductances de fuites des enroulements primaire de N_1 spires et du secondaire de N_2 spires ; R_{fe} résistance du circuit magnétique et X est la réactance de magnétisation du circuit magnétique correspondant à ce flux.

II.1.1. Phénomènes électromagnétiques

Il existe un champ magnétique dans le bobinage du aux fuites de champ magnétique. Ces élément se traduisent, en plus des résistances, par deux circuits prenant en compte ces fuites inductances L_1 et L_2 .

Dans les enroulements, les phénomènes magnétiques peuvent être résumés par un coefficient d'inductance liant le flux au courant qui lui donne naissance.

$$\begin{cases} \Phi_c = L_c i_1 + M_{12} i_2 \\ \Phi_c = L_c i_1 + M_{21} i_1 \end{cases}$$

Φ_c est le flux commun à toutes les spires.

Lorsque les fréquences des courants liés à la charge augmentent, le trajet des lignes de fuite est modifié et diminue par la même occasion les valeurs de l'inductance.

Sachant qu'une tension variable, par l'intermédiaire du flux, induit une force électromotrice non seulement, dans le conducteur qui porte ce courant mais également dans tout conducteur placé à proximité. Ces forces sont données comme suit :

$$\begin{cases} e_1 = N_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases}$$

Un transformateur réel est fondamentalement caractérisé par le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = -R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_c}{dt} \\ N_1 i_1 + N_2 i_2 = \mathcal{R} \phi_c = N_1 i_0 \end{cases}$$

La réluctance est l'analogie magnétique de la résistance. Elle vaut classiquement pour un tube de flux de longueur L et de section S constante :

$$\mathcal{R} = \frac{\mu S}{l} \quad \text{II.1}$$

II.1.1.a. Couplage parfait (transformateur idéal)

La fonction première du transformateur est d'assurer un couplage entre ses deux enroulements, couplage qui trouve son origine dans l'existence d'un flux commun à ceux-ci.

Le couplage est parfait lorsque la totalité du flux est commun aux deux enroulements. Le transformateur idéal néglige les pertes cuivre, aucune hystérésis et les pertes de courant de Foucault dans les enroulements, et assume le couplage idéal (Dix-2004).

Les courants et tension sont alors liés par le rapport de transformation, noté m et défini par :

$$m = \frac{e_2}{e_1} = \frac{-i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{II.2}$$

II.1.1.b. Couplage imparfait

En pratique, il est impossible de coupler parfaitement deux enroulements : du fait que dans les dispositifs réels il existe toujours un «flux de fuite» qui réduit le flux commun. L'importance de cette réduction est caractérisée par le coefficient de couplage dont la valeur dans ce cas est inférieure à l'unité.

$$K = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

II.1.2. Pertes cuivre

Un schéma équivalent doit également modéliser les effets dissipatifs dans les enroulements, elles s'expriment par la formule suivante :

$$P_{j.tot} = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2$$

II.1.3. Calcul des résistances (grandeurs électriques)

La résistance de chaque enroulement est en fonction de la longueur de fil l_{fil} , de sa surface et de sa résistivité. Sa relation générale est donnée par :

$$R = \frac{\rho(T) \cdot l_{fil}}{S}$$

Pour obtenir la résistivité électrique du matériau $\rho(T)$, comme on ne connaît pas la température du cuivre ou l'aluminium a priori, l'utilisation doit l'estimer en fonction de la norme de l'enroulement.

$$\rho(T) = \frac{1}{\sigma(T)} = \sigma_0 (1 - \alpha T)$$

σ : Conductivité électrique du milieu [$S \cdot m^{-1}$]

σ_0 : est la résistivité électrique du matériau à $0^\circ C$

$1,72 \times 10^{-8}$ [$\Omega \cdot m$] pour le cuivre

$2,69 \times 10^{-8}$ [$\Omega \cdot m$] pour l'aluminium

α : est le coefficient de température du matériau soit :

$3,93 \times 10^{-3}$ pour le cuivre

$4,03 \times 10^{-3}$ pour l'aluminium

La dépendance fréquentielle des pertes dans le conducteur de l'enroulement est liée aux courants de Foucault. Ces derniers sont dus à la variation dans le temps du champ magnétique. En effet les courants de Foucault engendrent une augmentation des pertes et une réduction du flux magnétique total. Ces pertes peuvent se décomposer suivant deux origines : les pertes propres dues à l'effet de peau par le biais du champ magnétique créé par le conducteur sur lui-même et celles dues aux effets de proximité par le biais d'un champ créé par les autres conducteurs. L'effet de peau et de proximité sont la source de pertes Joule additionnelles. Les pertes augmentent alors la température des enroulements et par conséquent leurs résistances.

II.1.4. Grandeurs magnétiques

Ceci est schématisé par une réactance X_μ en parallèle aux bornes du primaire du transformateur. La réactance est liée à la réluctance équivalente de circuit magnétique par la relation suivante :

$$X_m = \omega N_1^2 \frac{1}{\mathcal{R}}$$

$$\omega = 2\pi f$$

II.1.5. Phénomènes électrostatiques

Dans le transformateur il y'a différentes capacités distribuées le long des enroulements ; entre Conducteurs; entre enroulement haute et basse tension ; entre bobinages et écran ou masse mécanique. Ces éléments sont la conséquence du champ électrostatique dont l'effet est beaucoup accentué en haute fréquence.

II.1.6. Pertes diélectriques

Les pertes diélectriques dues à des courants de déplacement dans les isolants sont pour la plupart du temps négligeables par rapport aux autres pertes. Le facteur de dissipation $\tan \delta$ est de l'ordre 10^{-4} à 10^{-2} , Ces pertes sont importantes lorsque les éléments actifs interviennent, car leur isolation contient une teneur d'humidité élevée, et peuvent être modélisées par un réseau de résistances et de condensateurs en cascade et en parallèle

Leur expression est de la forme suivante :

$$P_d = v^2 \cdot \omega \cdot \tan \delta \cdot C$$

v : est la tension en volt. C : est la capacité (F). ω : est la pulsation (rad/s).

II.1.7. Mesure des impédances d'un transformateur

On peut déterminer le vecteur des impédances d'un transformateur au moyen d'un essai à vide et d'un essai en court-circuit.

a) Essai à vide

Lors de l'essai à vide, la tension nominale est appliquée à un des enroulements (disons le primaire). Les valeurs de E_p, E_s, I_0 et la **puissance active (P_m)** sont mesurées (Fig. II-3), lors d'un essai à vide, les pertes joule dans l'enroulement alimenté sont négligeables.

On peut donc écrire :

- 1- Puissance apparente absorbée par le noyau :

$$S_m = E_p I_0$$

- 2- Puissance réactive absorbée par le noyau :

$$Q_m = \sqrt{S_m^2 - P_m^2}$$

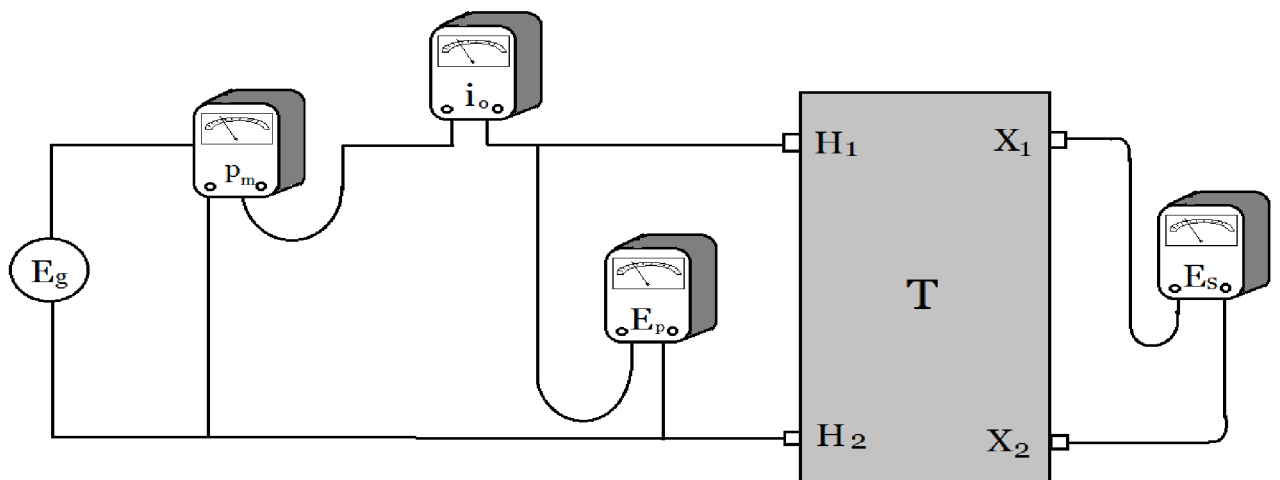


Fig. II.3 Essai à vide et détermination de R_m, X_m et rapport de transformation m

3- Valeur de R_m :

$$R_m = \frac{E^2 p}{P_m}$$

4- Valeur de X_m :

$$X_m = \frac{E^2 p}{Q_m}$$

5- Rapport de transformateur :

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_p}{E_s}$$

b) Essai en court-circuit

Lors de l'essai en court-circuit, un des enroulements est en court circuit (disons le secondaire) et une tension E_c , beaucoup plus petite que la tension est augmentée graduellement de façon à obtenir un courant n'excédant pas le courant nominal. On mesure alors E_p , I_c et la puissance active P_c (Fig. II-4)

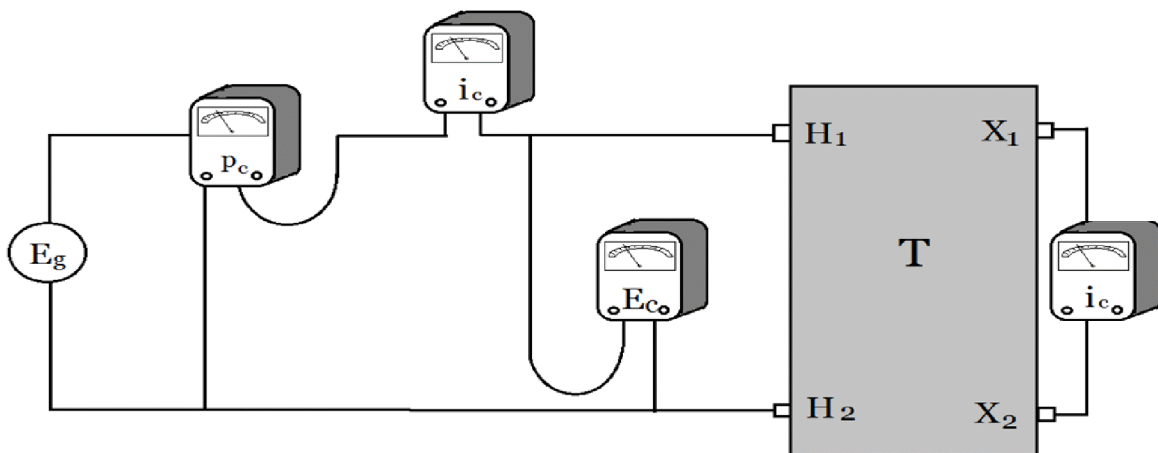


Fig. II.4 Essai en court-circuit et détermination de R_p , X_p et Z_p

Ces lectures donnent l'information suivante :

1- Impédance totale du transformateur rapportée au primaire :

$$Z_p = \frac{E_c}{I_c}$$

2- Résistance totale du transformateur rapportée au primaire :

$$R_p = \frac{P_c}{I^2 c}$$

3- Réactance de fuite totale du transformateur rapportée au primaire :

$$X_p = \sqrt{Z^2 p - R^2 p}$$

On peut aussi déterminer la valeur R_p en mesurant les résistances R_1 et R_2 des enroulements primaire et secondaire. On a alors $R_p = R_1 + m^2 R_2$

II.2. Généralité sur le modèle haute fréquence (HF)

En HF, même si nous négligeons l'effet non-linéaire du noyau de fer, la modélisation du transformateur devient plus complexe par rapport à celle à 50 Hz en raison de plusieurs phénomènes :

- Effets des courants de Foucault dans le noyau de fer et dans les conducteurs de l'enroulement
- Actions des capacités qui apparaissent entre les spires et entre les spires et la masse.

De nombreux travaux ont été réalisés pour essayer de trouver un modèle unique du transformateur en HF. Cet objectif est loin d'être atteint en raison des dépendances des phénomènes énumérés ci-dessus liés aux différentes structures de chaque transformateur.

En réalité, nous avons constaté que la modélisation du transformateur de puissance est normalement basée soit sur l'étude du régime transitoire, soit sur la distribution de tension dans l'enroulement pour dimensionner les isolants contre les surtensions. Les modèles du transformateur peuvent être donc classés en deux grandes tendances :

- a. **Modèle détaillé** Ce type de modèle consiste à représenter le transformateur par un grand réseau de capacités et d'inductances. Le calcul de ces paramètres nécessite la résolution des équations électromagnétique complexes et des informations sur les matériaux et la géométrie détaillée de chaque transformateur. Comme chaque spire est modélisée en détail, ce type de modèle est plutôt destiné à l'étude de la distribution de tension dans les enroulements

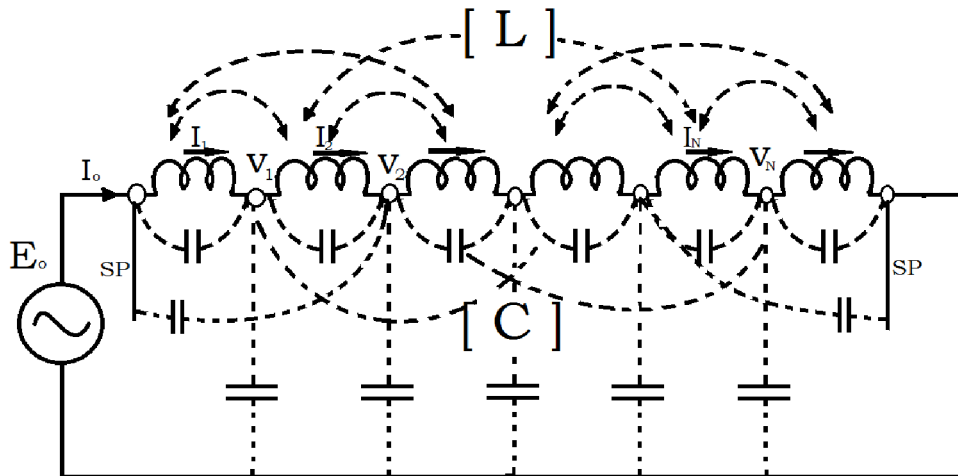


Fig. II.5 : Exemple du circuit équivalent détaillé d'un enroulement

b. modèle entrée-sortie

Dans ce type de modèle, le transformateur est considéré comme une boîte noire et la modélisation se base sur les caractéristiques en domaine fréquentiel des impédances du transformateur vues de ses bornes. A partir de ces caractéristiques un circuit équivalent sera développé. Ce modèle est convenable pour l'étude de l'interaction entre le transformateur et le réseau

II.2.1. Modèle de Morched [9]

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 matricielles qui relie les tensions et les courants des bornes (II- a) ou sous la forme réduite (II- b).

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

$$[Y][V]=[I] \quad \text{II.b}$$

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

La figure (II-5) présente le modèle d'un transformateur :

- Une matrice d'inductances de fuite entre les paires de spires (ou sections /gallettes).
- Une matrice de capacités entre spires (ou sections /gallettes) 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. (II-7) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

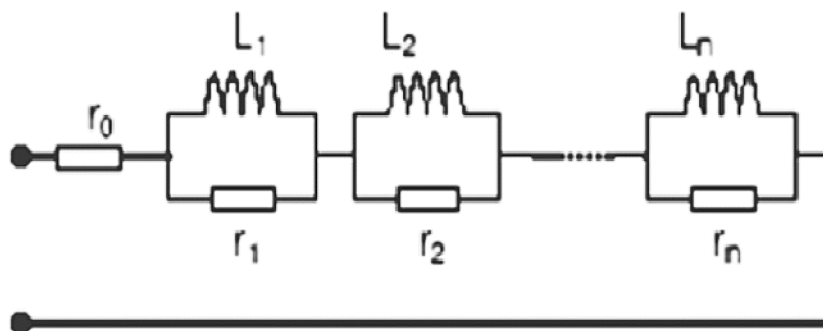


Fig. II.7 circuit de Foster en série

Pour le noyau, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de Cauer, fig. (II-8).

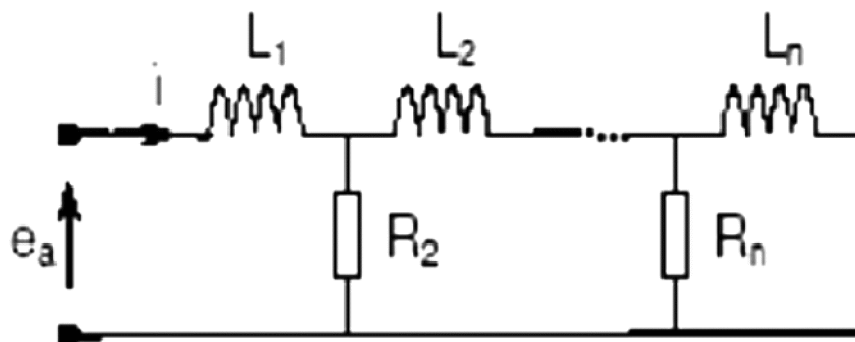


Fig. II.8 Modèle de Cauer pour le noyau de fer

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.

II.2.3. Modèle de Chimklai [6]

Dans ce modèle, les autres ont proposé une méthode simple pour modéliser un transformateur de puissance. Ce modèle Fig. (II-9) 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 HF. Les capacités représentent les phénomènes électriques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer... etc.

Cette idée est la base pour établir plusieurs modèles qui sont développés par la suite. Cette méthode de modélisation d'un transformateur est à la fois très simple et efficace.

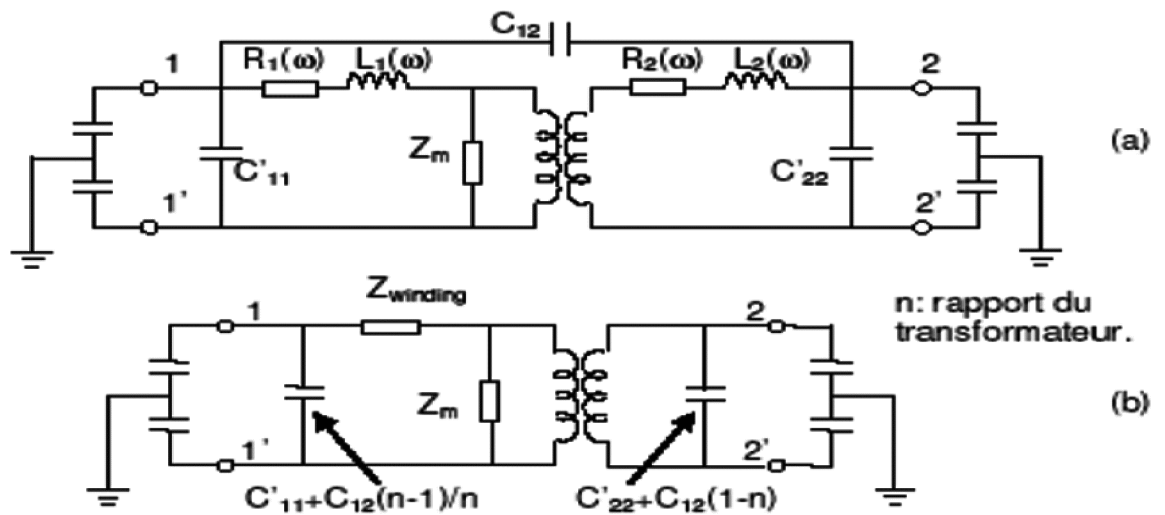


Fig. II.9 Modèle du transformateur de Chimklai

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 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. (II-10).

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

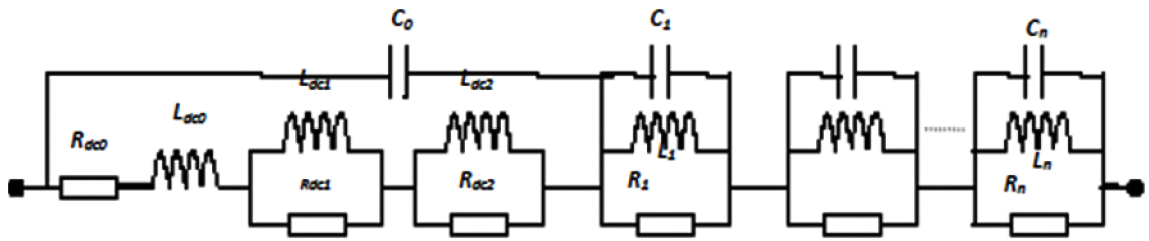


Fig. II.10 Impédance de l'enroulement (Zwinding)

- Le rajout d'un système de capacités dont les capacités entre enroulement, 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.

II.2.4. Modèle de Gustavsen [6]

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 «vector fitting» 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.

II.2.5. Modèle d'Andrieu [6]

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. (II-9) 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}).

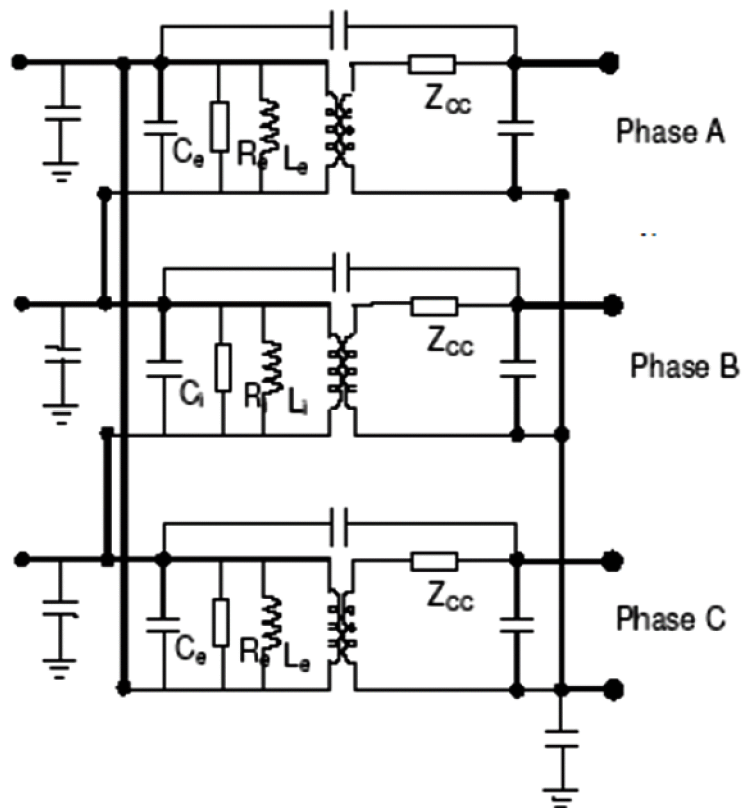


Fig. II.11 Modèle d'Andrieu

Les auteurs ont également proposé une procédure, dans laquelle les mesures nécessaires sont fixées pour développer un modèle en HF. Ces mesures sont les 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 1 MHz. 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. (II-12)

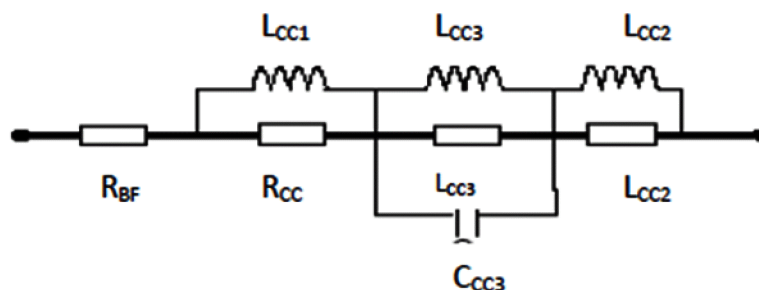


Fig. II.12 Circuit équivalent de Z_{cc}

II.2.6. Modèle de Noda [6]

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}).
- Des résonances créée par les inductances de l'enroulement et capacités entre les spires ($Y1, Z1$).
- De l'effet de peau du conducteur et du noyau (Z_{skin}).

Chaque phénomène sera représenté par un circuit équivalent. Le modèle complet est montré dans la Fig. (II-13) :

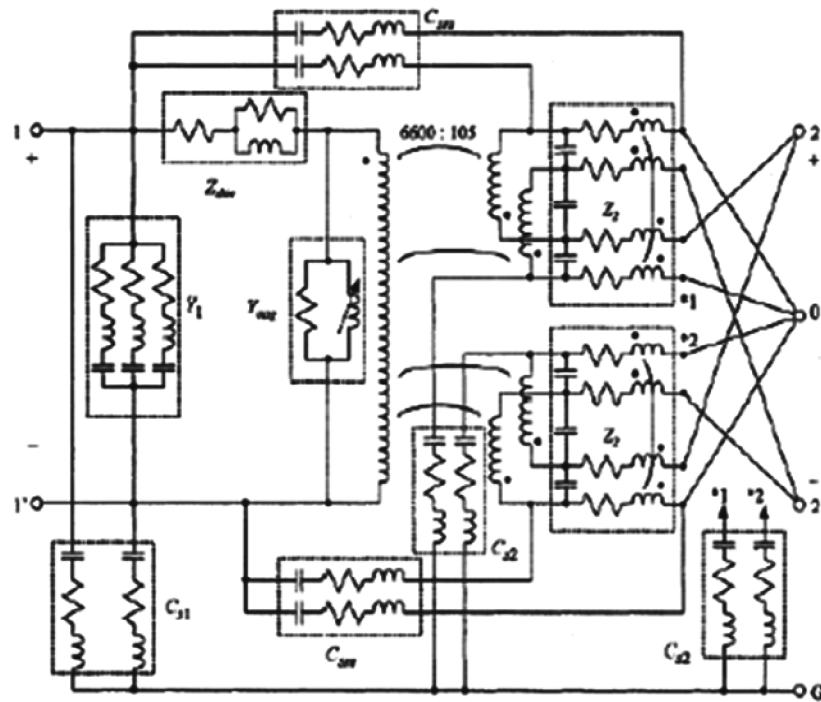


Fig. II.13 Modèle de Noda

Ce travail a donné un bon résultat sur la modélisation du transformateur en 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 le modèle reste encore difficile à appliquer.

II.2.7. Le modèle RESEL [2]

Ce modèle est développé par des Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité de France (EDF), et a comme but principal d'étudier les phénomènes transitoires dans les réseaux électriques, en particulier dans les transformateurs, dans le domaine temporel. Son utilisation, pour modéliser un transformateur nécessite deux types de schémas, couplés entre eux:

- un schéma (Figure II.14.b) qui traduit le comportement électrique du transformateur, composé de forces électromotrices: $n_1 \frac{d\Phi_1}{dt}$ et $n_2 \frac{d\Phi_2}{dt}$ de plusieurs cellules RL: r_1 résistance du primaire, et r_2 , résistance du secondaire (l'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateurs),

- et un schéma (Figure II.14.c) qui traduit son comportement magnétique, composé d'un réseau de réluctances (R_{f1} et R_{f2} : réluctances de fuites, et R_{i2} : réluctance principale) et de forces magnétomotrices ($n_1 i_1$ et $n_2 i_2$).

Le couplage entre ces deux schémas se fait de la manière suivante: les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique, et les sources du circuit magnétique liées aux courants dans les enroulements.

La prise en compte des effets de la fréquence se fait par une décomposition du circuit magnétique en éléments de géométries simples, pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement aisée. Les réluctances ainsi calculées se composent de cellules RL.

Aussi, l'introduction des éléments (impédances) complexes nous permet de tenir compte de l'effet de peau. Cependant, on peut citer deux inconvénients majeurs du code de calcul RESEL: il ne traite que des éléments de réseau à constantes localisées, et comme on a précisé plus haut, ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur, mais plutôt une analyse temporelle.

La Figure (II.14) illustre le principe du modèle RESEL.

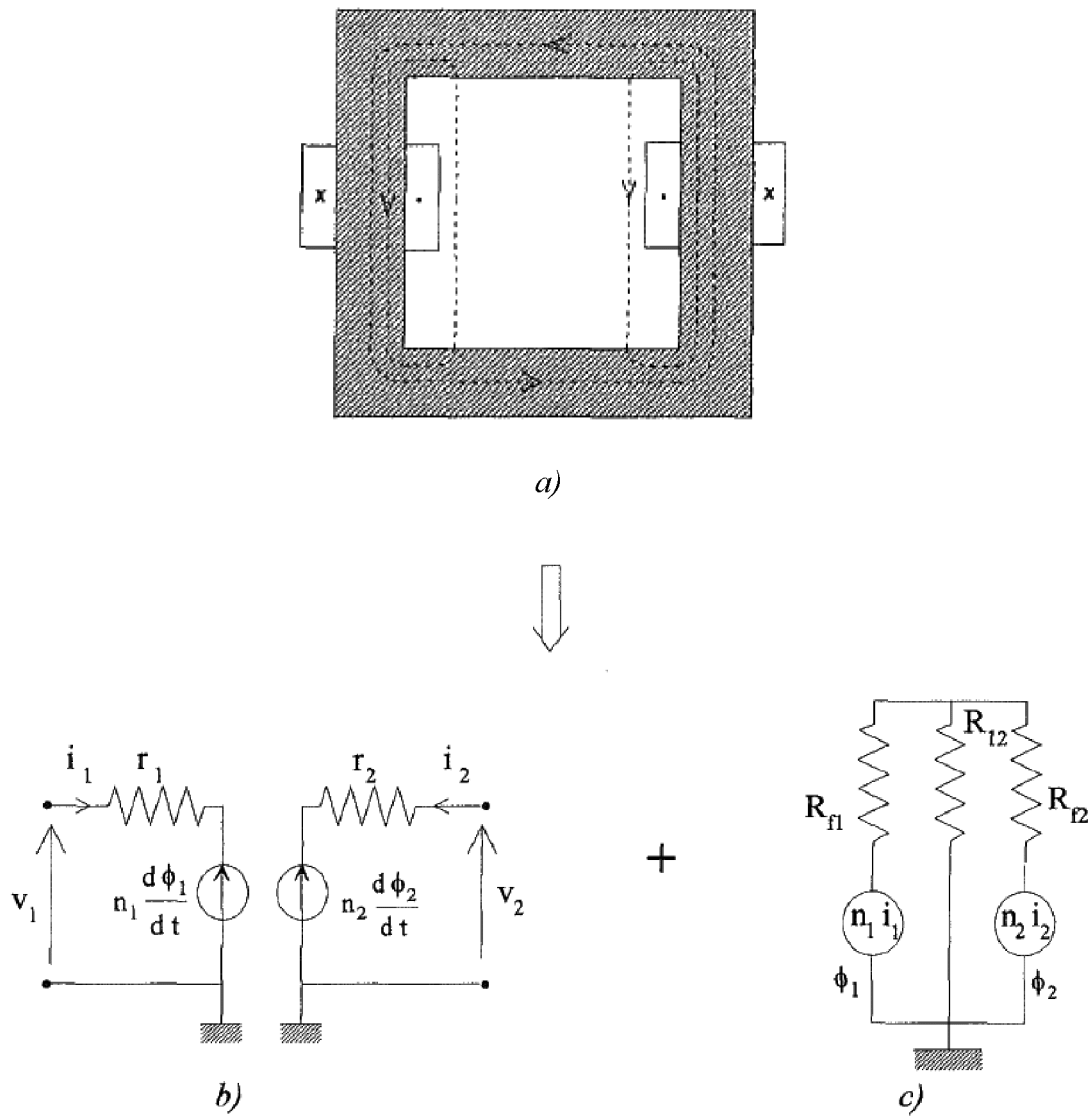


Fig. II.14 : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL

- a) Coupe transversale d'un transformateur à 2 enroulements
- b) Le circuit électrique correspondant
- c) Le circuit magnétique correspondant

II.2.8. Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles[2]

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[26].

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 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. (II-15).

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.

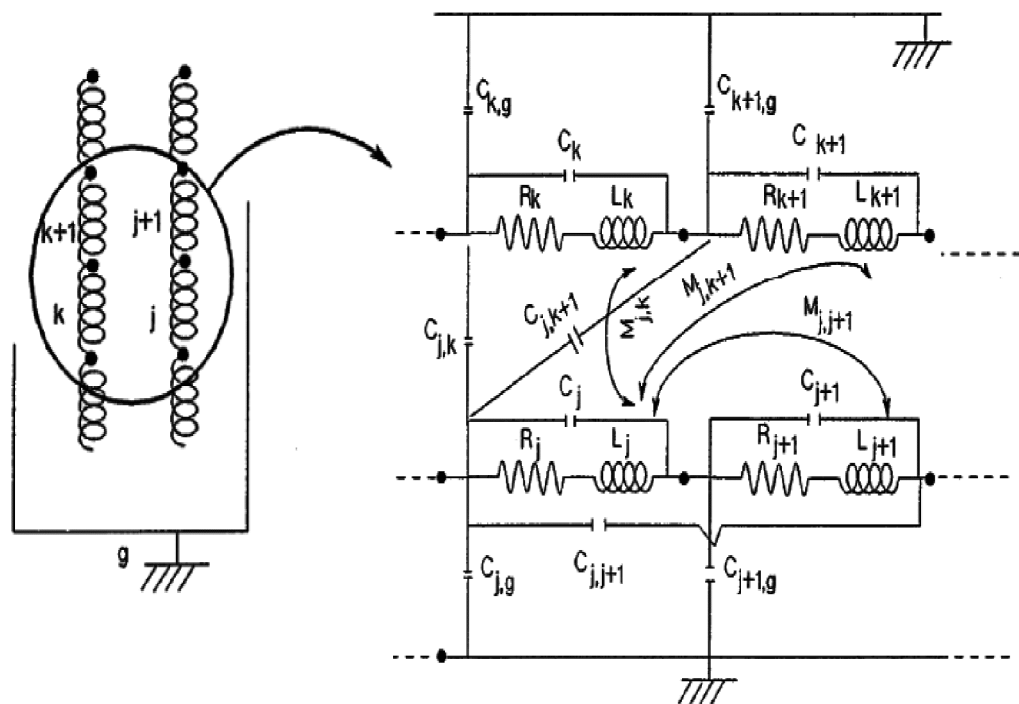


Fig. II.15 couplage de l'élément j avec les autres éléments

Conclusion :

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



CHAPITRE III

**Régime transitoire dans un transformateur soumis
aux surtensions**

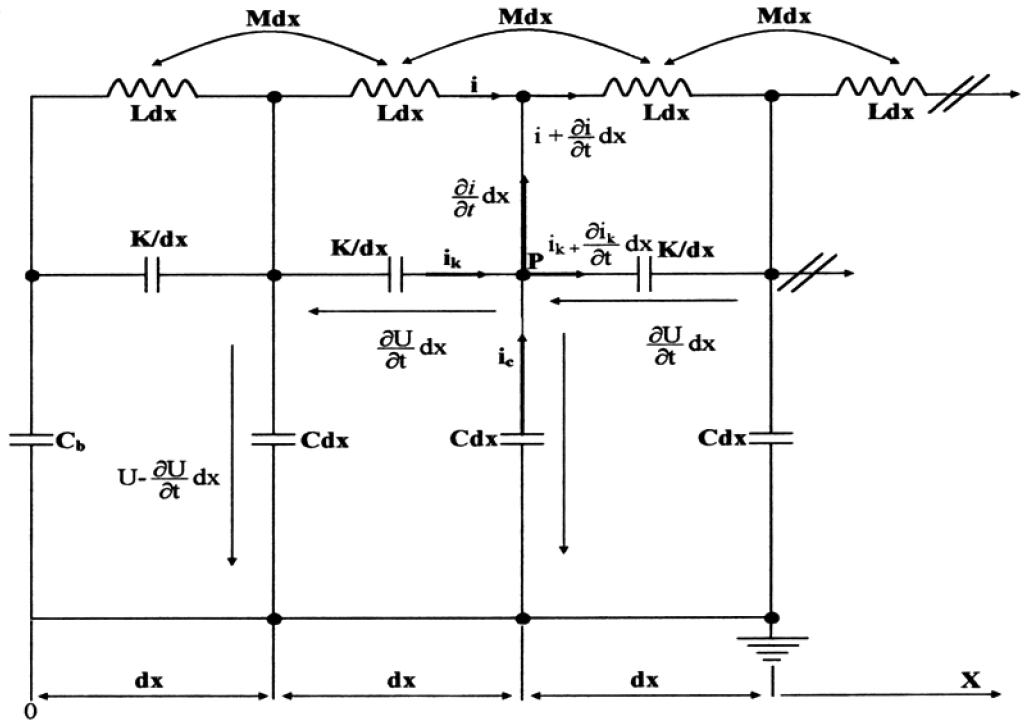


Fig.III .2: Schéma équivalent de l'enroulement sans l'influence du noyau

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

M (H/m) : inductance linéique mutuelle.

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

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

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

III.2.Equation de circuit

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

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

$$\text{D'où } i_c = \left(\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} dx \right) \quad [A] \quad \text{III.2}$$

Comme :

$$i_c = -cdx \frac{\partial u}{\partial t} \quad [A] \quad \text{III.3}$$

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

$$\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} dx = -cdx \frac{\partial u}{\partial t} \quad [A/m] \quad \text{III.4}$$

Sur la capacité K, on a la relation suivante :

$$i_k = -\frac{K}{dx} \frac{\partial^2 u}{\partial u \cdot \partial t} dx \quad [A] \quad \text{III.5}$$

D'où :

$$i_k = -K \frac{\partial^2 u}{\partial u \cdot \partial t} \quad [A] \quad \text{III.6}$$

Et :

$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = -K \frac{\partial^2 u}{\partial u \cdot \partial t} \quad [A/m] \quad \text{III.7}$$

Sur l'inductance L, on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x} dx = -L dx \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad [V] \quad \text{III.8}$$

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

Et :

$$\frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} \quad [A/s] \quad \text{III.10}$$

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

$$\frac{\partial i}{\partial x} = - \frac{1}{L} \frac{\partial u \cdot dt}{\partial x^2} \quad [\text{A/m}] \quad \text{III.11}$$

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

$$\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} = - \frac{1}{L} \frac{\partial u \cdot dt}{\partial x^2} - k \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad [\text{V/m}] \quad \text{III.12}$$

En égalant (III.4) et (III.12) puis en multipliant membre à membre par $L \frac{\partial u}{\partial t}$

On aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + Lk \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t} = 0 \quad [\text{A/m}] \quad \text{III.13}$$

On obtient une équation de la même forme pour le courant. La solution de l'équation(II.13) est de la forme :

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

f : Étant la fréquence.

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

λ : est la longueur d'onde

Cette solution représente une onde stationnaire.

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

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

III.3.1. hypothèses simplificatrices

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

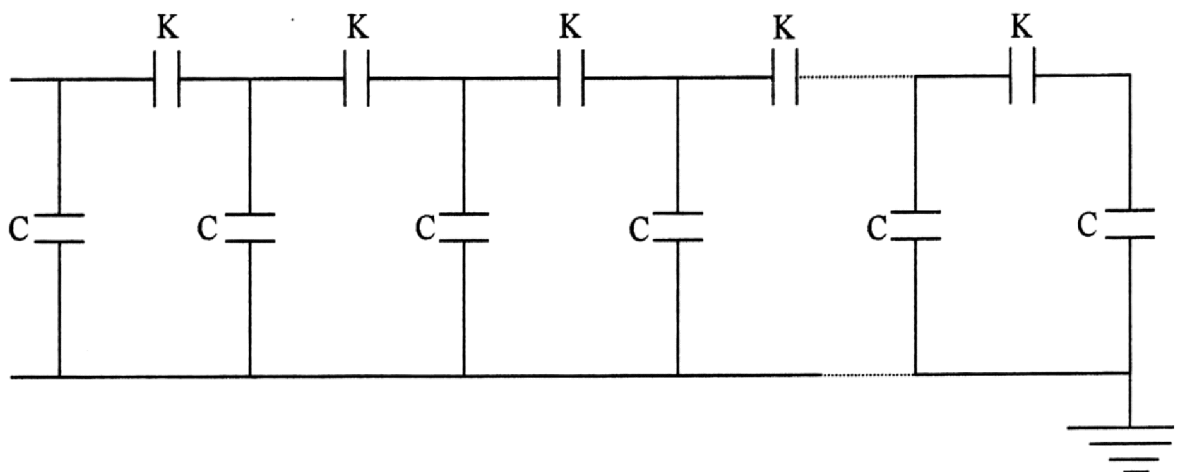


Fig. III.3 : schéma équivalent simplifié de l'enroulement (HT) Lors d'un Phénomène ondulatoire [3]

III.3.2. Répartition initiale de la tension [10]

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

- ❖ S'il n'y avait pas de capacités par rapport à la terre ($C=0$), toutes les capacités K seraient en série et le circuit de la figure (III.3) serait parcouru par un courant de la même valeur. Nous obtiendrions alors une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement (identique à la répartition au régime permanent).
 - **Cas où le neutre est mis à la terre :** la répartition est représentée par une droite inclinée réunissant les point M et N qui correspondent respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement qui se trouve sous la tension U et à sa fin dont le potentiel est nul figure (III.4).
 - **Cas où le neutre est isolé de la terre :** la répartition est représentée par une droite horizontale $M'N'$ figure (III.5).

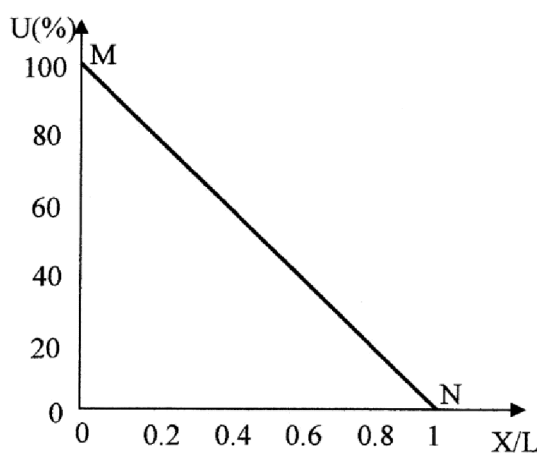


Fig.III.4

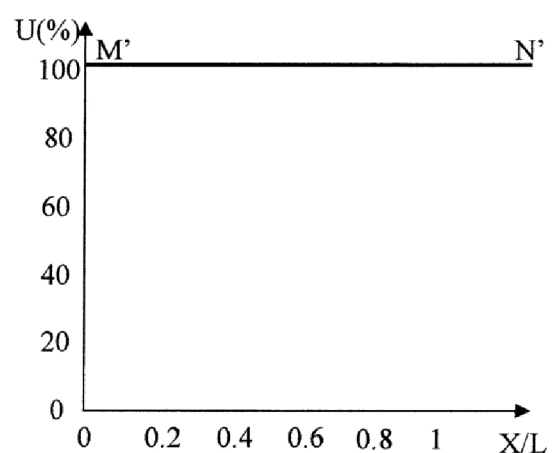


Fig.III.5

- ❖ S'il n'y avait pas de capacités K ($K=0$), le courant de la ligne se dirigerait vers la terre à travers la première capacité depuis le début de l'enroulement.

Cela signifie, que toute la tension est concentrée dans la première spire qui est donc soumise à une forte surtension.

- **Cas où le neutre est mis à la terre :** la répartition de la tension est représentée par une droite verticale réunissant le point M à l'origine des coordonnées figure(III.6).
- **Cas où le neutre est isolé de la terre :** la répartition est identique à la précédente figure (III.7).

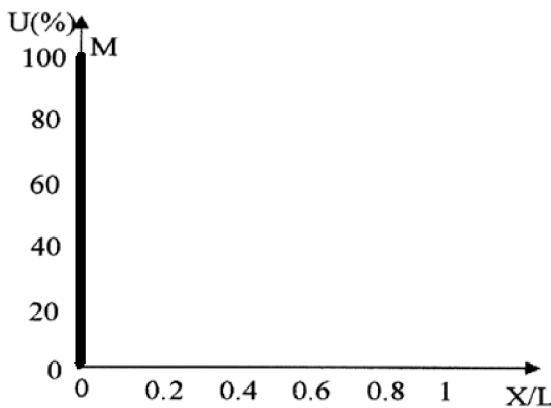


Fig.III.6

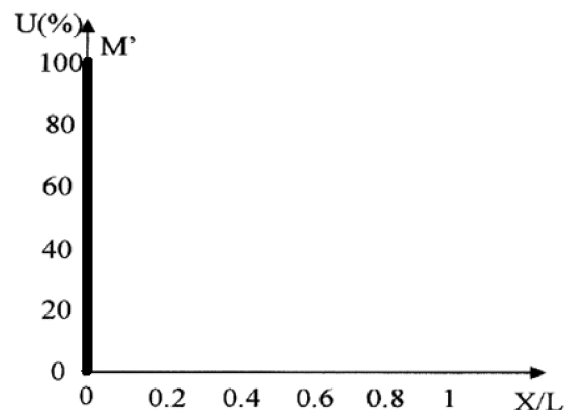


Fig.III.7

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

$$u_{ox} = U_{Choc} \cdot \frac{Sh\alpha (l-x)}{Sh(\alpha_1)} \quad \text{III.14}$$

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

$$u_{ox} = U_{Choc} \cdot \frac{Ch\alpha (x-l)}{Ch(\alpha_1)} \quad \text{III.15}$$

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

l : longueur totale de l'enroulement.

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}}$$

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

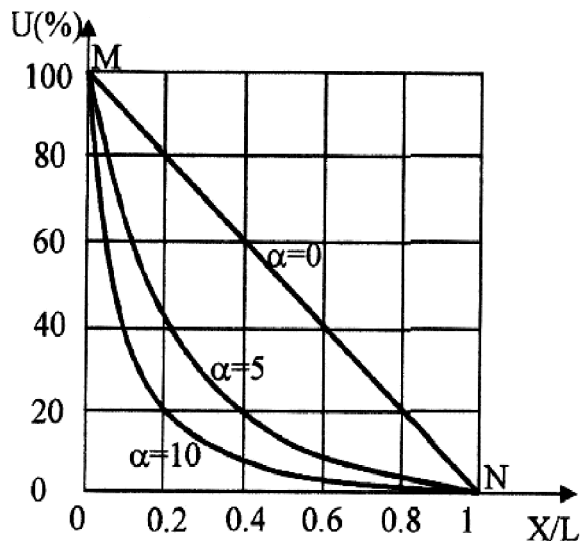


Fig.III.8 neutre mis à la terre

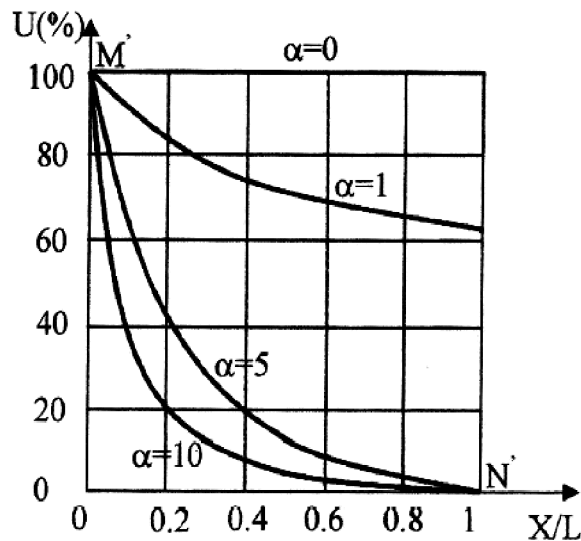


Fig.III.9 neutre isolé de la terre

a. Démonstration

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

$$-C \frac{\partial u}{\partial t^2} + K \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad [A/m] \quad \text{III.16}$$

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

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

L'équation (II.16) devient :

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

Ou bien :

$$\frac{\partial^2 U_{x0}}{\partial x^2} - \frac{C}{K} U_{x0} = 0 \quad [V/m^2] \quad \text{III.18}$$

La solution de cette équation est :

$$U_{X0} = A \cdot \exp(\alpha x) + B \cdot \exp(-\alpha x) \quad \text{III.19}$$

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

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

$$U_{X0} = 1 \text{ pu} \quad \text{III.20}$$

Pour $x = 1$ (point mis à la terre)

$$U_{X0} = 0 \text{ pu} \quad \text{III.21}$$

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

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

$$\text{Pour } x = 1 : A \cdot \exp(\alpha) + B \cdot \exp(-\alpha) = 0 \quad \text{III.23}$$

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

$$U_{X0} = \frac{\exp[\alpha(1-x)] - \exp[-\alpha(1-x)]}{\exp(\alpha) - \exp(-\alpha)} \quad \text{III.24}$$

Qui peut s'écrire en fonction hyperbolique comme suit :

$$U_{X0} = \frac{\text{Sh}[\alpha_1(1-x)]}{\text{Sh}(\alpha_1)} \cdot U_{Choc} \quad \text{III.25}$$

Si le neutre est flottant :

$$U_{X0} = \frac{\text{Ch}\alpha(x-1)}{\text{Ch}(\alpha_1)} \cdot U_{Choc} \quad \text{III.26}$$

b. Le gradient de tension [10]

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

D'après les figures (III.10) et (III.11), on remarque que le plus grand gradient de tension a lieu au début de l'enroulement sur ses premières spires. La valeur de ce gradient est déterminée par la dérivée première $\frac{du_x}{dX}$

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

$$th\alpha \approx Ch\alpha \approx 1$$

Cas où le neutre est mis à la terre :

$$\left[\frac{du_x}{dX} \right]_{x=0} = -\alpha \quad [\text{Pu}]$$

$$\left[\frac{du_x}{dX} \right]_{x=0} = -\alpha u_{Choc} \quad [\text{Kv}]$$

Cas où le neutre est isolé de la terre :

$$\left[\frac{du_x}{dX} \right]_{x=0} = -\alpha \quad [\text{Pu}]$$

$$\left[\frac{du_x}{dX} \right]_{x=0} = -\alpha u_{Choc} \quad [\text{Kv}]$$

Cette formule nous montre qu'à l'instant initial, la partie de l'enroulement la plus proche de l'entrée se trouve sous tension de $\alpha = 10$ à 15 fois plus grande qu'une répartition uniforme de la tension. D'où la nécessité de prendre des précautions pour

Protéger les isolants contre le claquage.

C. Répartition finale de la tension [10]

Lorsque le point neutre est mis à la terre, la répartition finale de la tension est représentée par une droite inclinée MN figure (III.10) et lorsque le neutre est isolé, tout l'enroulement acquit à l'instant final le même potentiel représenté sur la figure (III.11) par une droite parallèle à l'axe des abscisses.

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

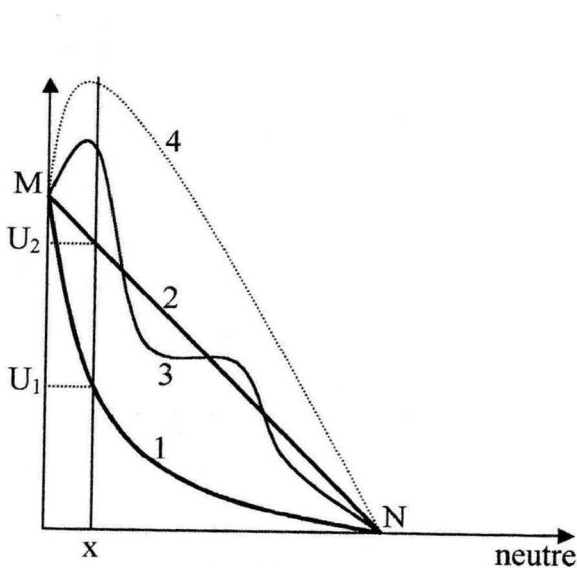


Fig. III.10 : neutre à la terre.

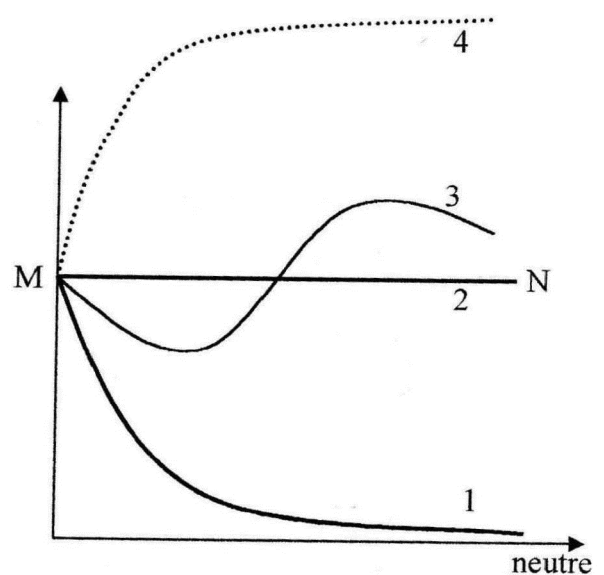


Fig. III.11 : neutre isolé.

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

III.4. Phénomène transitoire de tension

Pour les hypothèses les plus simples, l'expression cherchée est obtenue comme intégrale d'une équation différentielle de quatrième ordre au moins et la théorie stipule que :

- ❖ Le phénomène ayant lieu dans l'enroulement est périodique et s'amortit suivant une fonction exponentielle, la tension varie dans l'espace suivant l'axe x , c'est à dire suivant la longueur de l'enroulement et dans le temps en chaque point de l'enroulement.

- ❖ La répartition finale de la tension (droite MN et M'N' sur les figure(III.12.a) et (III.12.b) peut être considérée comme des axes autour des quelles se produit le phénomène oscillatoire.

Des limites des oscillations possibles se trouvent dans des aires hachurées figures (III.12.a) et (III.12.b), on peut développer la différence entre la répartition initiale et finale de la tension en série d'harmoniques. Pour les transformateurs à neutre mis a la terre, on obtient une série comprenant 1, 2,3 etc...., quart d'onde figure (III.12.c), et pour les transformateurs à neutre isolé, on obtient une série comprenant 1, 3,5 etc., quart d'onde figure (III.12.d).

Dans le temps des harmoniques supérieures pulsent à la fréquence f_n proportionnelle à l'ordre de l'harmonique V .

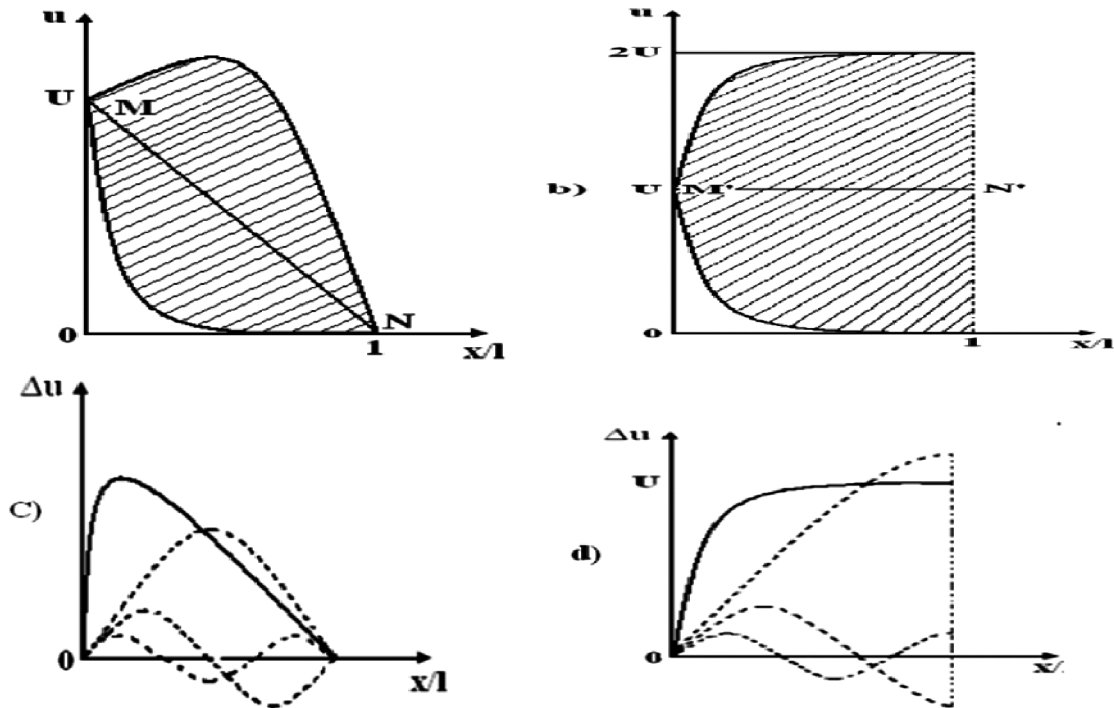


Fig.III.12 : Phénomène transitoire dans l'enroulement d'un transformateur
a) et c) neutre mis a la terre
b) et d) neutre isolé de la terre

Les tensions harmoniques de différents ordres se propagent dans l'enroulement à des vitesses différentes. Pour cette raison, l'onde qui pénètre dans l'enroulement se déforme continuellement (figure (III.13.a) pour un neutre mis à la terre figure (III.13.b) pour un neutre isolé) représente approximativement la répartition de la tension le long de l'enroulement aux différents instants. Sur les courbes, le temps est désigné en fraction de périodes d'oscillations depuis l'établissement de la répartition initiale de la tension. De plus, l'analyse permet de conclure que la résistance de l'enroulement d'un transformateur n'est pas une grandeur constante mais une fonction de l'onde de l'harmonique. En ce qui concerne la résistance de l'enroulement et la déformation de l'onde, un transformateur diffère nettement d'une ligne de transport qui est dotée d'une impédance caractéristique constante pour toutes les ondes et impulsions et sur laquelle une onde se propage avec une déformation plus petite que celle du transformateur ($1\mu s/Km$ pour la ligne). D'une manière identique sont analysés des phénomènes plus complexes qui se produisent dans le transformateur. Lorsqu'arrive une impulsion aperiodique de forme quelconque [10].

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

transformateur peuvent apparaître de grandes variations de tension entre l'enroulement de transformateur en un point donné et la terre.

Dans chacun de ces cas, le transformateur peut subir une avarie qui aura pour résultat la mise hors service.

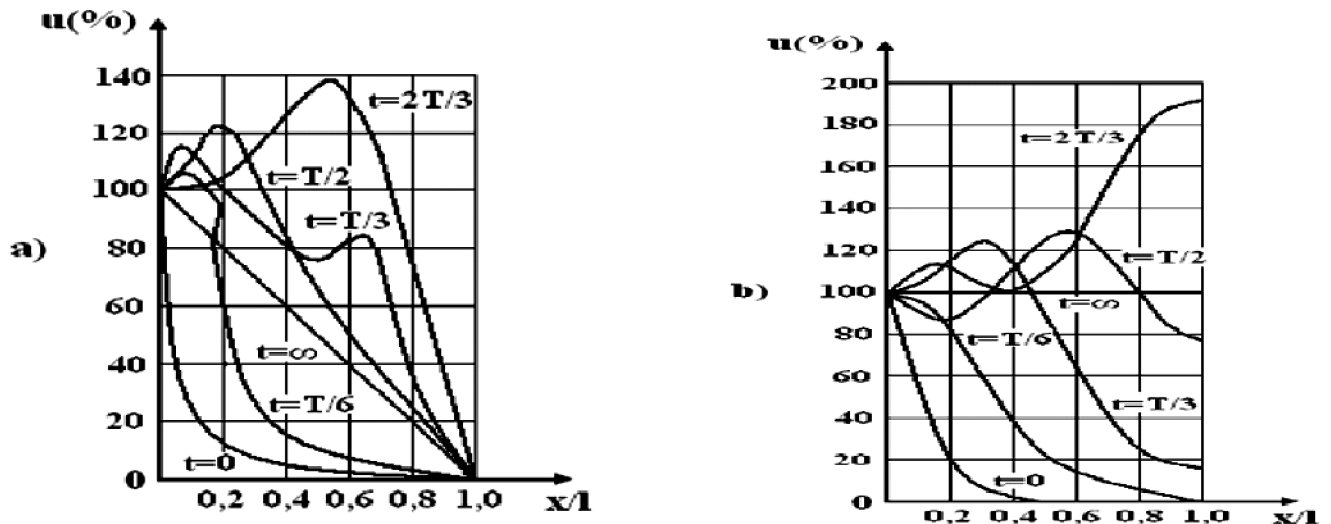


Fig. III.13 : Répartition de la tension le long de l'enroulement à différents instants pour :

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

Conclusion

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

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

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle du transformateur de puissance adopté en tenant compte des équations mathématiques du schéma équivalent dit traditionnel du transformateur sans tenir compte du noyau magnétique. Ensuite on présente la procédure de calcul des paramètres des enroulements du transformateur de puissance en vue d'une étude du comportement de ce dernier en régime haute fréquence.

IV.1. Modèle adopté pour le transformateur sans la prise en compte du noyau [7]

Heller et Veverka, ont assimilé le comportement d'un enroulement de transformateur soumis à une onde de choc à celui d'un système de condensateurs et d'inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances, d'inductances et de capacités.

On discrétise l'enroulement par un ensemble fini de spires ou 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 inductances. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse, comme on l'a montré sur la Fig. IV.1 représente le schéma équivalent aux deux enroulements HT et BT

Quel que soit le type de représentation, les éléments sont calculés en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage ainsi que des caractéristiques géométriques du noyau magnétique.

Le schéma équivalent du transformateur sans l'influence du noyau est représenté par la figure IV.1

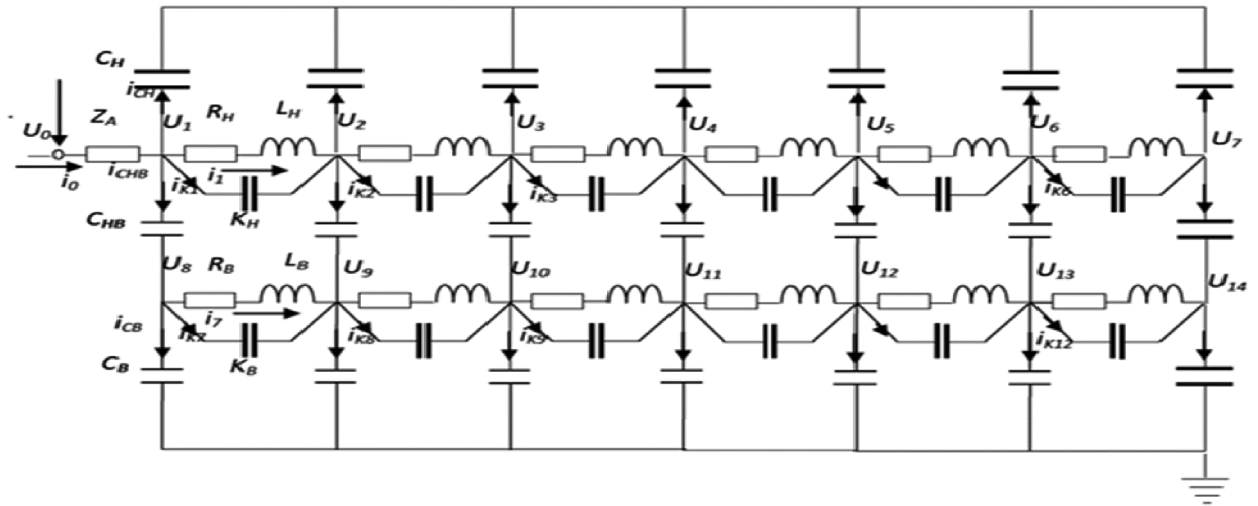


Fig. IV.1 : Schéma équivalent du transformateur sans l'influence du noyau

IV.1.1. Equations du schéma équivalent adopté

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la figure IV.1 nous permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courants des enroulements HT et BT, ici on donne un exemple d'un enroulement discrétisé en 6 éléments et le raisonnement serait le même pour une discrétisation en n éléments, cependant le choix est limité à 6 puisque après ce nombre la précision de calcul reste sensiblement constante.

IV.1.1.1. Equations des tensions

u_0 et i_0 sont respectivement la tension appliquée et le courant à l'entrée de l'enroulement soumis à cette dernière.

$$u_0(t) = U_{max} \sin w_t \quad \text{avec} \quad U_{max} = V\sqrt{2} \quad (IV.1)$$

$$u_0 - u_1 = Z_A i_0 \quad (IV.2)$$

Les équations différentielles des tensions pour l'enroulement HT du transformateur subdivisé en 6 éléments, sont

❖ Equations des tensions pour l'enroulement HT

Les équations différentielles des tensions pour l'enroulement HT du transformateur subdivisé en 6 éléments, sont:

$$u_1 - u_2 - R_{Hi1} = L_H \frac{di_1}{dt} + M_{H12} \frac{di_1}{dt} + M_{H13} \frac{di_3}{dt} + M_{H14} \frac{di_4}{dt} + M_{H15} \frac{di_5}{dt} + M_{H16} \frac{di_6}{dt} - M_{HB17} \frac{di_7}{dt} - M_{HB18} \frac{di_8}{dt} - M_{HB19} \frac{di_9}{dt} - M_{HB110} \frac{di_{10}}{dt} - M_{HB111} \frac{di_{11}}{dt} - M_{HB112} \frac{di_{12}}{dt}$$

$$U_2 - u_3 - R_{Hi2} = M_{H21} \frac{di_1}{dt} + L_H \frac{di_2}{dt} + M_{H23} \frac{di_3}{dt} + M_{H24} \frac{di_4}{dt} + M_{H25} \frac{di_5}{dt} + M_{H26} \frac{di_6}{dt} - M_{HB27} \frac{di_7}{dt} - M_{HB28} \frac{di_8}{dt} - M_{HB29} \frac{di_9}{dt} - M_{HB210} \frac{di_{10}}{dt} - M_{HB211} \frac{di_{11}}{dt} - M_{HB212} \frac{di_{12}}{dt}$$

Généralisation:

Pour $1 \leq k \leq 6$

$$U_k - U_{k+1} - R_{Hik} = L_H \frac{di_m}{dt} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^6 M_{km} \frac{di_m}{dt} - \sum_{m=7}^{12} M_{HBkm} \frac{di_m}{dt} \quad (IV.3)$$

❖ Equations des tensions pour l'enroulement BT

$$U_8 - U_9 - R_{Bi7} = -M_{HB71} \frac{di_1}{dt} - M_{HB72} \frac{di_2}{dt} - M_{H73} \frac{di_3}{dt} - M_{H74} \frac{di_4}{dt} - M_{H75} \frac{di_5}{dt} - M_{H76} \frac{di_6}{dt} + L_B \frac{di_7}{dt} - M_{B78} \frac{di_8}{dt} + M_{B79} \frac{di_9}{dt} + M_{B710} \frac{di_{10}}{dt} + M_{B711} \frac{di_{11}}{dt} + M_{B712} \frac{di_{12}}{dt}$$

$$U_9 - U_{10} - R_{Bi8} = -M_{HB81} \frac{di_1}{dt} - M_{HB82} \frac{di_2}{dt} - M_{H83} \frac{di_3}{dt} - M_{H84} \frac{di_4}{dt} - M_{H85} \frac{di_5}{dt} + M_{H86} \frac{di_6}{dt} + L_B \frac{di_8}{dt} + M_{B87} \frac{di_7}{dt} + M_{B89} \frac{di_9}{dt} + M_{B810} \frac{di_{10}}{dt} + M_{B811} \frac{di_{11}}{dt} + M_{B812} \frac{di_{12}}{dt}$$

Généralisation

Pour $8 \leq k \leq 13$

$$U_k - U_{k+1} - R_{Bik-1} = L_B \frac{di_{(k-1)}}{dt} - \sum_{\substack{m=8 \\ k-1 \neq m}}^{12} M_{(k-1)m} \frac{di_m}{dt} + \sum_{m=1}^6 M_{HB(k-1)m} \frac{di_m}{dt} \quad (IV.4)$$

IV.1.1.2. Equations des courants

❖ **Equations des courants pour l'enroulement HT**

Au nœud (1) à l'entrée du transformateur on a :

$$i_0 = i_{K1} + i_{CHB1} + i_{CH1} + i_1 \quad (IV.5)$$

$$i_0 - i_1 = i_{K1} + i_{CHB1} + i_{CH1} \quad (IV.6)$$

Avec :

$$i_{K1} = K_H \frac{d(u_1 - u_2)}{dt} \quad (IV.7)$$

$$i_{CHB1} = C_{HB} \frac{d(u_1 - u_8)}{dt} \quad (IV.8)$$

$$i_{CH1} = C_H \frac{du_1}{dt} \quad (IV.9)$$

En introduisant III.7, III.8 et III.9 dans III.5, on obtient

$$i_0 - i_1 = (K_H + C_H + C_{HB}) \frac{du_1}{dt} - K_H \frac{du_2}{dt} - C_{HB} \frac{du_8}{dt} \quad (IV.10)$$

Au nœud (2) correspondant à la tension u_2 on a

$$i_1 + i_{K1} = i_2 + i_{K2} + i_{CH2} + i_{CHB2} \quad (IV.11)$$

$$i_1 - i_2 = i_{K2} + i_{CH2} + i_{CHB2} - i_{K1} \quad (IV.12)$$

Avec :

$$i_{K2} = k_H \frac{d(u_2 - u_3)}{dt} \quad (IV.13)$$

$$i_{CHB2} = C_{HB} \frac{d(u_2 - u_9)}{dt} \quad (IV.14)$$

$$i_{CH2} = C_H \frac{du_2}{dt} \quad (IV.15)$$

On introduit III.15, III.14 et III.13 dans III.12 et on obtient

$$i_1 - i_2 = -K_H \frac{du_1}{dt} + (2K_H + C_{HB} + C_H) \frac{du_2}{dt} - K_H \frac{du_3}{dt} - C_{HB} \frac{du_9}{dt}$$

$$i_2 - i_3 = -K_H \frac{du_2}{dt} + (2K_H + C_{HB} + C_H) \frac{du_3}{dt} - K_H \frac{du_4}{dt} - C_{HB} \frac{du_{10}}{dt}$$

Généralisation

Pour $1 \leq k \leq 5$

$$i_k - i_{k+1} = -K_H \frac{du_k}{dt} + (2K_H + C_{HB} + C_H) \frac{du_{k+1}}{dt} - K_H \frac{du_{k+2}}{dt} - C_{HB} \frac{du_{k+3}}{dt} \quad (IV.16)$$

❖ **Equations des courants pour l'enroulement BT**

Au nœud (8) correspondant à la tension u_8 on

$$i_{CHB1} = i_7 + i_{K7} + i_{CB1} \quad (IV.17)$$

$$-i_7 = i_{K7} + i_{CB1} - i_{CHB1} \quad (IV.18)$$

Avec =

$$i_7 = C_{HB} \frac{du_1}{dt} - (C_{HB} + K + C_B) \frac{du_8}{dt} + K_B \frac{du_9}{dt} \quad (IV.19)$$

Au nœud (9) correspondant à la tension u_9 on

$$i_7 + i_{K7} + i_{CHB2} = i_8 + i_{K8} + i_{CB2} \quad (IV.20)$$

$$i_7 - i_8 = i_{K8} + i_{CB2} - i_{K7} + i_{CHB2} \quad (IV.21)$$

Avec :

$$i_{CB2} = C_B \frac{d(u_9 - 0)}{dt} \quad (IV.22)$$

$$i_{CHB} = C_{HB} \frac{d(u_2 - u_9)}{dt} \quad (IV.23)$$

$$i_{K7} = K_B \frac{d(u_8 - u_9)}{dt} \quad (IV.24)$$

$$i_{K8} = K_B \frac{d(u_9 - u_{10})}{dt} \quad (IV.25)$$

En substituant III.19, III.20, III.21 et III.22 dans III.18 on obtient

$$i_7 - i_8 = -C_{HB} \frac{du_2}{dt} - K_B \frac{du_8}{dt} + (2K_B + C_B + C_{HB}) \frac{du_9}{dt} - K_B \frac{du_{10}}{dt}$$

$$i_8 - i_9 = -C_{HB} \frac{du_3}{dt} - K_B \frac{du_9}{dt} + (2K_B + C_B + C_{HB}) \frac{du_{10}}{dt} - K_B \frac{du_{11}}{dt}$$

Généralisation

Pour $7 \leq k \leq 11$

$$i_k - i_{k+1} = -C_{HB} \frac{du_{k-5}}{dt} - K_B \frac{du_{k+1}}{dt} + (2K_B + C_B + C_{HB}) \frac{du_{k+2}}{dt} - K_B \frac{du_{k+3}}{dt} \quad (IV.26)$$

IV.2.2. Représentation matricielle des équations du modèle

Après avoir établi les équations régissant le schéma équivalent d'une phase du transformateur, et après l'intégration des équations (III.3),(III.4), (III.16) et (III.26), on obtient :

$$\int_0^t (u_k - u_{k+1})dt = \sum_{j=1}^{2n} M_{kj} i_k + R_k \int_0^t i_k \quad (IV.27)$$

Pour les courants, on distingue deux cas:

- Pour l'enroulement HT

$$\int_0^t (i_k - i_{k+1})dt = K_H U_K + (2K_H + C_{HB} + C_H)U_{K+1} - K_H U_{K+2} - C_{HB}U_{K+8} \quad (IV.28)$$

- Pour l'enroulement BT

$$\int_0^t (i_k - i_{k+1})dt = -C_{HB}U_{k+5} - K_B U_{k+1} + (2K_B + C_{HB} + C_B)U_{k+2} - K_B U_{k+3} \quad (IV.29)$$

Les trois équations ainsi obtenues peuvent se mettre sous la forme condensée suivante :

$$\mathbf{U} = \mathbf{C}^{-1} \int_0^t \Delta \mathbf{I} dt \quad (IV.30)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{M}^{-1} \int_0^t (\Delta \mathbf{U} - \mathbf{R} \mathbf{I}) dt \quad (IV.31)$$

Dont

$$\Delta \mathbf{I} = (I_k - I_{k+1}) \quad \text{et} \quad \Delta \mathbf{U} = (U_k - U_{k+1})$$

U et I sont les vecteurs des tensions et des courants :

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

C^{-1} et M^{-1} sont respectivement les matrices inverses des capacités et des inductances des enroulements.

Avec :

$$C = \begin{bmatrix} C_H & C_{HB} \\ C_{HB} & C_B \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad M = \begin{bmatrix} M_H & M_{HB} \\ M_{HB} & M_B \end{bmatrix}$$

C_H et C_B sont les matrices de capacités des enroulements HT et BT respectivement.

$$C_H = \begin{bmatrix} C'_{HT} & -K_{HT} & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ -K_{HT} & C_{HT} & -K_{HT} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -K_{HT} & C_{HT} & -K_{HT} & 0 & & & & \vdots \\ \vdots & 0 & & \ddots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & \ddots & & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & -K_{HT} & C_{HT} & -K'_{HT} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -K_{HT} & C'_{HT} \end{bmatrix}$$

$$C_B = \begin{bmatrix} C'_{BT} & -K_{BT} & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ -K_{BT} & C_{BT} & -K_{BT} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -K_{BT} & C_{BT} & -K_{BT} & 0 & & & & \vdots \\ \vdots & 0 & & \ddots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & \ddots & & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & -K_{BT} & C_{BT} & -K'_{BT} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -K_{BT} & C'_{BT} \end{bmatrix}$$

C_{HB} est la matrice des capacités entre les enroulements HT et BT et elle s'exprime par :

$$C_{HB} = \begin{bmatrix} -C_{BT} & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & -C_{BT} & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -C_{BT} & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Dans ces matrices :

$$\begin{aligned} C'_{HT} &= C_H + C_{HB} + K_H & C_{HT} &= C_H + C_{HB} + 2K_H \\ C'_{BT} &= C_B + C_{HB} + K_B & C'_{BT} &= C_B + C_{HB} + 2K_B \end{aligned}$$

M_H et M_B sont les matrices des inductances des enroulements HT et BT respectivement

$$M_H = \begin{bmatrix} L_H & M_{H12} & M_{H13} & \dots & M_{H1n} \\ M_{H21} & L_H & M_{H23} & \dots & M_{H2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & M_{Hn-1,n} \\ M_{Hn1} & M_{Hn2} & \dots & M_{Hn,n-1} & L_H \end{bmatrix}$$

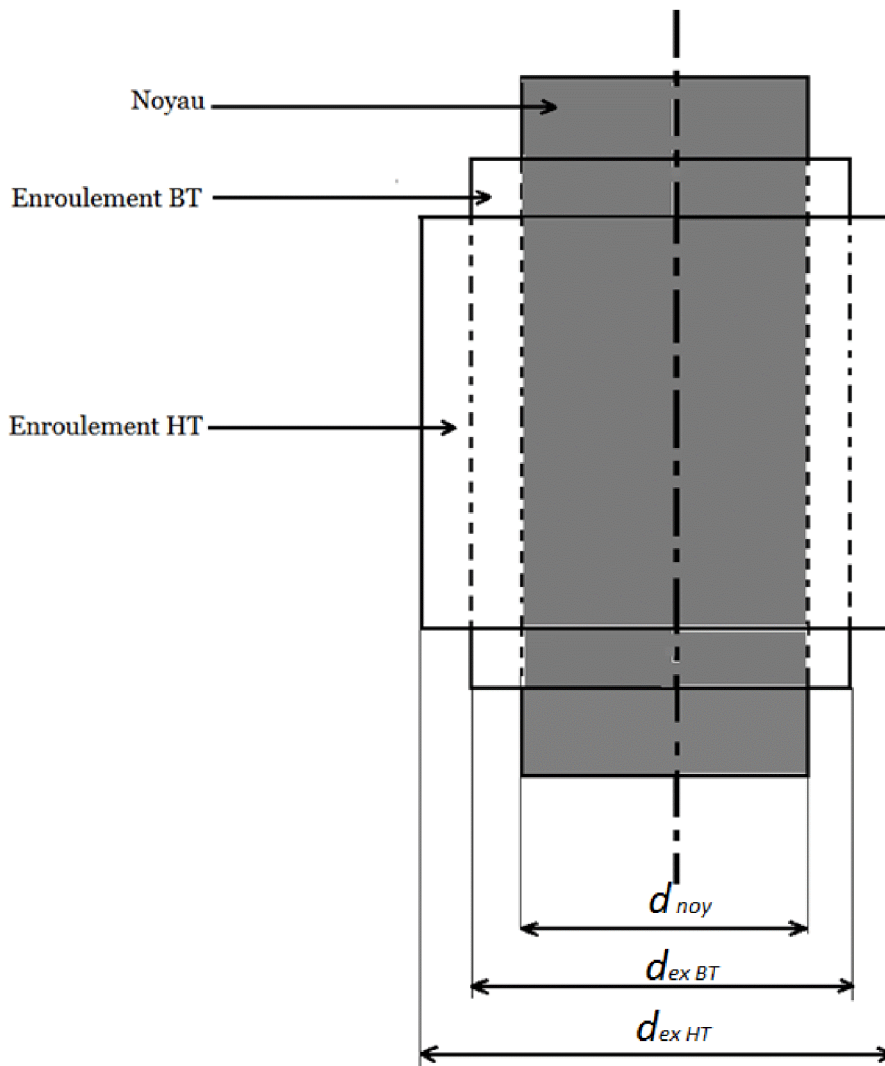
$$M_B = \begin{bmatrix} L_B & M_{B12} & M_{B13} & \dots & M_{B1n} \\ M_{B21} & L_B & M_{B23} & \dots & M_{B2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & M_{Bn-1,n} \\ M_{Bn1} & M_{Bn2} & \dots & M_{Bn,n-1} & L_B \end{bmatrix}$$

M_{HB} est la matrice des inductances mutuelles entre les enroulements HT et BT

$$M_{HB} = \begin{bmatrix} M_{HB} & M_{HB12} & M_{HB13} & \dots & M_{HB1n} \\ M_{HB21} & M_{HB} & M_{HB23} & \dots & M_{HB2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & M_{HBn-1,n} \\ M_{HBn1} & M_{HBn2} & \dots & M_{HBn,n-1} & M_{HB} \end{bmatrix}$$

IV.3.3. Procédure de calcul des paramètres des enroulements HT et BT

Le calcul de ces paramètres est axé sur les caractéristiques électro-géométriques du transformateur, le dispositif géométrique d'enroulement de transformateur est représenté sur la figure. (IV .2)



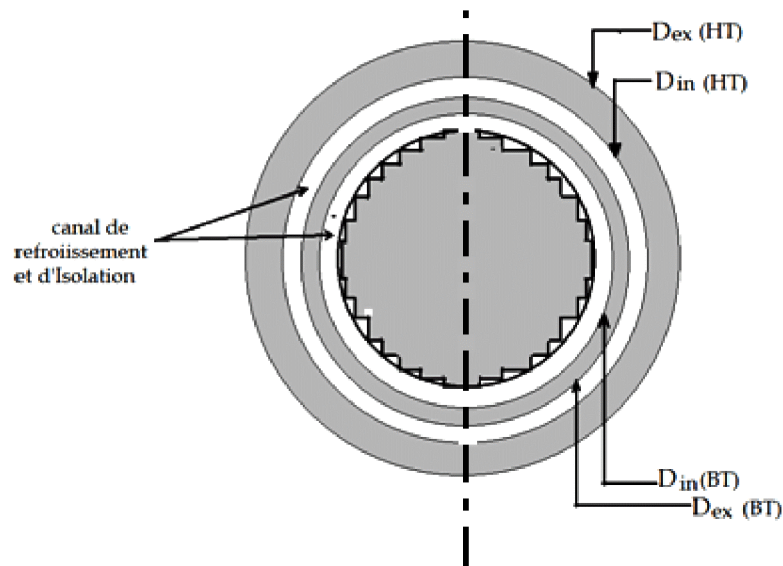


Fig. IV.2 : Coupe générale de la colonne

a) Caractéristiques électriques

- ✓ Puissance nominale apparente : $S_n = 200 \text{ MVA}$
- ✓ Tension nominale de l'enroulement haute tension : $U_{HT} = 500 \text{ KV}$
- ✓ Tension nominale de l'enroulement basse tension : $U_{BT} = 15,75 \text{ kv}$
- ✓ Pertes de puissance à vide : $P_0 = 175 \text{ kW}$
- ✓ Perte de puissance en court-circuit : $P_{cc} = 700 \text{ kW}$
- ✓ Tension de court-circuit : $U_{cc} = 12,5\%$
- ✓ Courant à vide : $I_0 = 0,35 * I_n \%$
- ✓ Fréquence de service de transformateur $f = 50 \text{ hz}$

b) Caractéristiques géométriques

- ✓ Diamètre extérieur de l'enroulement haute tension : $d_{extHT} = 2770 \text{ mm}$
- ✓ Diamètre intérieur de l'enroulement haute tension : $d_{intHT} = 1760 \text{ mm}$
- ✓ Diamètre extérieur de l'enroulement basse tension : $d_{extBT} = 2770 \text{ mm}$
- ✓ Diamètre intérieur de l'enroulement basse tension : $d_{intBT} = 1150 \text{ mm}$
- ✓ Diamètre du noyau : $d_n = 1100 \text{ mm}$
- ✓ Diamètre de la cuve $d_c = 5000 \text{ mm}$
- ✓ Longueur de l'enroulement : $L_{en} = 2360 \text{ mm}$

IV.3.3.1. calcul des éléments résistifs

R_{1HT} : est la résistance de l'enroulement HT à la fréquence de 50 Hz donnée par la relation

$$R_{1HT} = \frac{P_{cc} U_{nHT}^2}{S_n^2} \quad (IV.32)$$

Comme l'enroulement est constituée de n éléments, donc la résistance d'un élément HT est :

$$R_{HT} = \frac{R_{1HT}}{n} \quad (IV.33)$$

R_{2BT} : est la résistance de l'enroulement BT à la fréquence de 50 Hz donnée par la relation :

$$R_{2BT} = \frac{P_{cc} U_{nBT}^2}{S_n^2} \quad (IV.34)$$

Comme l'enroulement est constitué de n éléments, donc la résistance d'un élément BT est :

$$R_{BT} = \frac{R_{2BT}}{n} \quad (IV.35)$$

IV.3.3.2. Calcul des éléments inductifs et les coefficients des mutuelles σ_{jj}

a) Inductances propre de l'enroulement HT [11]:

$$L_{tot} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (IV.36)$$

Avec la différence dans la tension nominale de service de chaque enroulement :

$$L_H = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{nHT}^2}{S_n} \quad (IV.37)$$

$$L_{HT} = \frac{L_H}{n} \quad (IV.38)$$

L_{HT} : L'induction totale d'un élément de l'enroulement HT

b) Inductances propre de l'enroulement BT

$$L_B = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U^2_{nBT}}{S_n} \quad (IV.39)$$

$$L_{BT} = \frac{L_B}{n} \quad (IV.40)$$

L_{BT} : l'induction totale d'un élément de l'enroulement BT

c) Calcul de coefficients entre les deux enroulements HT et BT

- Les inductances L_{HT} et L_{BT} , sont les inductances d'un élément des enroulements comportant respectivement les inductances propres L'_{HT} et L'_{BT} , les inductances mutuelles entre les différents éléments de l'enroulement d'un coté et les mutuelles entre l'élément d'un enroulement primaire et les éléments du seconde enroulement.

Donc pour calculer L'_{HT} et L'_{BT} , on est dans l'obligation de passer par le calcul des coefficients des mutuelles σ_{ij} [11].

- Le calcul des coefficients des mutuelles entre les éléments du même enroulement se fait en fonction de $\frac{a}{b_{HT}}$ pour HT, puis en fonction de $\frac{a}{b_{BT}}$ pour BT, celles entre les éléments des deux enroulements en fonction de $\frac{a}{\sqrt{b_{HT}b_{BT}}}$.

Après le calcul de tous les coefficients de mutuelles, le calcul des inductances propres des enroulements se fera d'après les formules qui suivront :

$$L'_{HT} = \frac{L_{HT}}{1 \sum \sigma_{BB} + \sum \sigma_{HB}} \quad (IV.41)$$

$$L'_{BT} = \frac{L_{BT}}{1 \sum \sigma_{BB} + \sum \sigma_{HB}} \quad (IV.42)$$

Telles que :

$$a = \frac{l}{n}$$

$$b_{HT} = \frac{d_{intHT} + d_{extHT}}{4} - \frac{d_{noyau}}{2}$$

$$b_{BT} = \frac{d_{intBT} + d_{extBT}}{4} - \frac{d_{noyau}}{2}$$

a : la distance entre les éléments adjacents de l'enroulement

b_{BT} : la distance entre l'élément BT et le noyau.

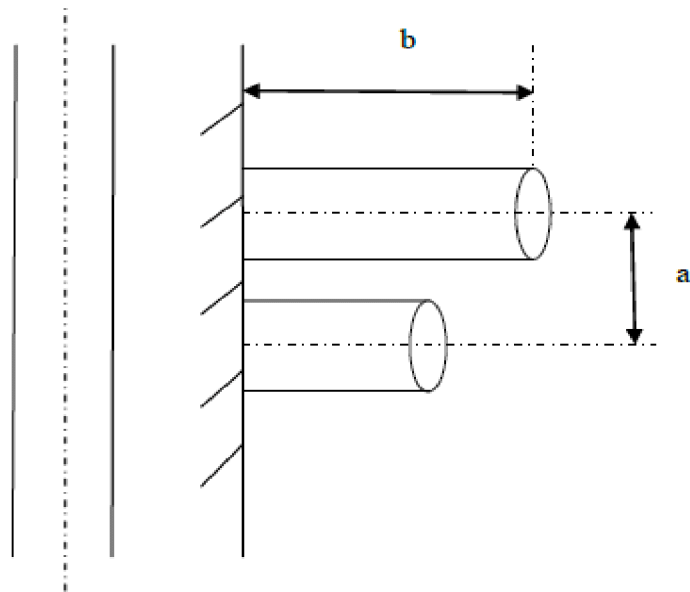


Fig. IV.3 : disposition schématique des spires

IV.3.3.3 Calcul des éléments capacitifs [12]

Dans cette partie de ce chapitre, nous déterminons les éléments capacitifs (capacités de couplage entre les galettes et entre les galettes et la masse) du schéma équivalent du transformateur. Ces paramètres sont calculés directement à partir de la géométrie du transformateur, qui est discrétisée en plusieurs galettes (bobine, ensemble de bobines).

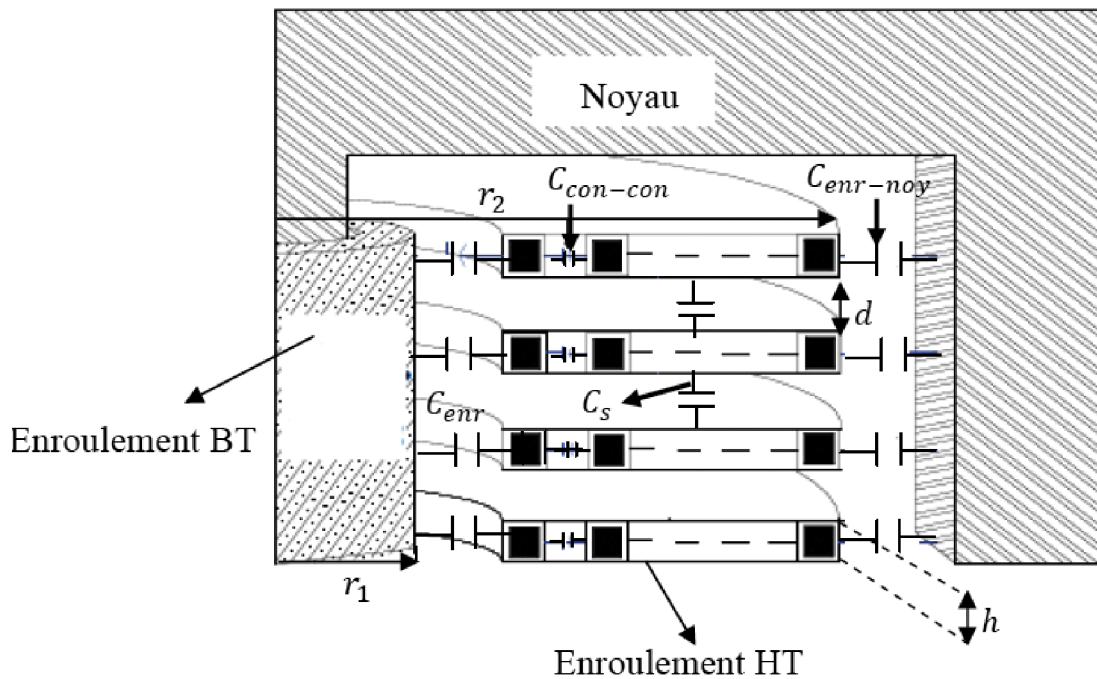


Fig. IV .4 : Représentation de l'effet électrostatique par différentes capacités

➤ **Calcul des capacités transversales C**

Le calcul de la capacité entre l'enroulement HT et la masse (cuve) se fera par la formule Suivante :

$$C_{1tot} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l \frac{d_{cuv} + d_{exHT}}{d_{cuve} - d_{exHT}} \tag{IV.43}$$

Ou :

ε_0 : Est la permittivité absolue de l'air.

ε_r : Est la permittivité relative d'huile.

La capacité transversale C_{HT} d'un élément entre l'enroulement HT et la masse est donnée par la formule suivante:

$$C_{HT} = \frac{C_{1tot}}{\text{Nombre d'éléments}+1} \tag{IV.44}$$

Le calcul de la capacité entre l'enroulement BT et le noyau se fera par la formule suivante :

$$C_{2tot} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l \frac{d_{intBT} + d_n}{d_{intBT} - d_n} \quad (IV. 45)$$

La capacité transversale C_{BT} d'un élément entre l'enroulement BT et le noyau est donnée par la formule suivante :

$$C_{BT} = \frac{C_{2tot}}{\text{Nombre d'éléments}+1} \quad (IV. 46)$$

La capacité totale C_{HBtot} entre les enroulements HT et BT est donnée par la formule suivante

$$C_{12tot} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l \frac{d_{intHT} + d_{extBT}}{d_{intHT} - d_{extBT}} \quad (IV. 47)$$

La capacité transversale C_{HBT} d'un élément entre les enroulements HT et BT est donnée par la formule suivante :

$$C_{HBT} = \frac{C_{12tot}}{\text{Nombre d'éléments}+1} \quad (IV. 48)$$

➤ **Calcul des capacités longitudinales K_{HT} et K_{BT}**

Connaissant les valeurs des capacités C_{HT} , C_{BT} et C_{HBT} , on peut passer facilement au calcul des Capacités longitudinales K_{HT} , K_{BT} par la formule suivantes :

$$K_{ntot} = \frac{C_n \Sigma}{\alpha^2} \quad (IV. 49)$$

α : est le facteur de la repartion initiale de la tension donné par le constructeur .

Avec :

$$C_{1\Sigma} = C_{1tot} + \frac{C_{12tot} C_{2tot}}{C_{12tot} + C_{2tot}}$$

$$C_{2\Sigma} = C_{2tot} + \frac{C_{12tot} C_{1tot}}{C_{12tot} + C_{1tot}}$$

$$K_{1tot} = \frac{C_{1\Sigma}}{\alpha^2} \quad (IV. 50)$$

La capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement HT est donné par :

$$K_{HT} = K_{1tot} \cdot n \quad (IV.51)$$

$$K_{2tot} = \frac{C_{2\Sigma}}{\alpha^2} \quad (IV.52)$$

La capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement BT est donné par :

$$K_{BT} = K_{2tot} \cdot n \quad (IV.53)$$

Conclusion :

Nous avons rappelé dans ce chapitre les propriétés électriques d'un transformateur. Chaque phase de transformateur peut être représenté par un circuit équivalent comprenant une résistance, une inductance série et par deux capacités shunt. Ainsi le calcul des paramètres inductifs et capacitifs des transformateurs. Les valeurs de ses paramètres sont déterminées par les formules que on a vu dans ce chapitre. Elles dépendent de plusieurs phénomènes que nous avons cités.



CHAPITRE IV

Procédure de calcul des paramètres



CHAPITRE V

Détermination des paramètres d'enroulement du transformateur

Introduction :

Après une étude purement théorique du phénomène transitoire dans les enroulements en cas de surtensions, un calcul judicieux des paramètres du transformateur s'impose. En effet, l'analyse numérique du phénomène ne peut aboutir à des résultats intéressants qu'en connaissant les valeurs des capacités C et K , de l'inductance L , et de la résistance R . cette partie fera donc l'objet de ce chapitre.

V.1. Caractéristiques du transformateur

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

V.1.1. Caractéristiques électriques

- ✓ Puissance nominale apparente : $S_n = 200\text{MVA}$
- ✓ Tension nominale de l'enroulement haute tension : $U_{HT} = 500\text{KV}$
- ✓ Tension nominale de l'enroulement basse tension : $U_{BT} = 15,75\text{kv}$
- ✓ Pertes de puissance à vide : $P_0 = 175\text{kW}$
- ✓ Perte de puissance en court-circuit : $P_{cc} = 700\text{kW}$
- ✓ Tension de court-circuit : $U_{cc} = 12,5\%$
- ✓ Courant à vide : $I_0 = 0,35 * I_n \%$
- ✓ Fréquence de service de transformateur $f = 50\text{hz}$

V.1.2. Caractéristiques géométriques

- ✓ Diamètre extérieur de l'enroulement haute tension : $d_{extHT} = 2770\text{ mm}$
- ✓ Diamètre intérieur de l'enroulement haute tension : $d_{intHT} = 1760\text{ mm}$
- ✓ Diamètre extérieur de l'enroulement basse tension : $d_{extBT} = 1280\text{ mm}$
- ✓ Diamètre intérieur de l'enroulement basse tension : $d_{intBT} = 1150\text{ mm}$
- ✓ Diamètre du noyau : $d_n = 1100\text{ mm}$
- ✓ Diamètre de la cuve $d_c = 5000\text{ mm}$
- ✓ Longueur de l'enroulement : $L_{en} = 2360\text{ mm}$

V.2.calcul des éléments résistifs

R_{1HT} : est la résistance de l'enroulement HT à la fréquence de 50 Hz donnée par la relation

$$R_{1HT} = \frac{P_{cc} U_{nHT}^2}{S_n^2} = \frac{700 \cdot 10^3 \cdot (500 \cdot 10^3)^2}{(200 \cdot 10^6)^2} = 4,375 \Omega$$

La résistance de l'enroulement dépend de la forme de l'onde appliquée, elle donnée par les formules suivantes

- Dans le cas d'une impulsion de forme rectangulaire R_{\blacksquare} égale :

$$R_{\blacksquare} = 1,6 \frac{R_{1HT}}{\sqrt{\omega t_h}} = 1,6 \frac{4,375}{\sqrt{6.28.50.100.10^{-6}}}$$

$$R_{\blacksquare} = 39,5 \Omega$$

- Dans le cas d'une impulsion triangulaire R_{Δ} égale a :

$$R_{\Delta} = 1,0575 \frac{R_{1HT}}{\sqrt{\omega t_h}} = 1,0575 \frac{4,375}{\sqrt{6.28.50.100.10^{-6}}}$$

$$R_{\Delta} = 26,11 \Omega$$

ω : étant la pulsation correspondante à la fréquence de 50Hz

$$\omega = 2 \pi f$$

t_h : est la durée de la longueur de l'onde

$$t_h = 50 \mu s$$

Comme l'enroulement est constituée de n éléments, donc la résistance d'un élément HT est :

$$R_{HT} = \frac{R_{1HT}}{n} = \frac{4,375}{6} = 0,729 \Omega$$

R_{2BT} : est la résistance de l'enroulement BT à la fréquence de 50 Hz donnée par la relation:

$$R_{2BT} = \frac{P_{cc} U_{nBT}^2}{S_n^2} = \frac{700 \cdot 10^3 \cdot (15,75 \cdot 10^3)^2}{(200 \cdot 10^6)^2} = 0,0043 \Omega$$

Comme l'enroulement est constitué de n éléments, donc la résistance d'un élément BT est :

$$R_{BT} = \frac{R_{2BT}}{n} = \frac{0,0043}{6} = 0,00072 \Omega$$

V.3.Calcul des éléments inductifs et les coefficients des mutuelles σ_{jj}

V.3.1.Inductances propre de l'enroulement HT

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

Avec la différence dans la tension nominale de service de chaque enroulement :

$$L_H = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{nHT}^2}{S_n} = \frac{1}{6,28 \cdot 50} \frac{12,5}{100} \frac{(500 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} = 0,497 H$$

L'induction totale de l'enroulement est donnée par :

$$L_{totHT} = K_l * L_H$$

K_l : facteur de précision qui tient compte de la forme d'onde.

Pour une onde impulsionnelle triangulaire $K_l = 0,65$.

$$L_{totHT} = 0,65 * 0,497$$

$$L_{totHT} = 0,323 H$$

$$L_{HT} = \frac{L_H}{n} = \frac{0,497}{6} = 0,082 H$$

L'induction totale d'un élément de l'enroulement HT

$$L_{tot} = K_l * L_{HT} = 0,65 * 0,082$$

$$L_{tot} = 0,0533 \text{ H}$$

V.3.2. Inductances propre de l'enroulement BT

$$L_B = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{nBT}^2}{S_n} = \frac{1}{6,28.50} \frac{12.5}{100} \frac{(15,75 \cdot 10^3)^2}{200 \cdot 10^6} = 0,0005 \text{ H}$$

$$L_{BT} = \frac{L_B}{n} = \frac{0,0005}{6} = 8,22 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

L_{BT} : l'induction totale d'un élément de l'enroulement BT

V.3.3. Calcul de coefficients entre les deux enroulements HT et BT

- Les inductances L_{HT} et L_{BT} , sont les inductances d'un élément des enroulements comportant respectivement les inductances propres L'_{HT} et L'_{BT} , les inductances Mutuelles entre les différents éléments de l'enroulement d'un coté et les mutuelles entre l'élément d'un enroulement primaire et les éléments du seconde enroulement. Donc pour calculer L'_{HT} et L'_{BT} , on est dans l'obligation de passer par le calcul des coefficients des mutuelles σ_{ij} .

- Le calcul des coefficients des mutuelles entre les éléments du même enroulement se fait en fonction de $\frac{a}{b_{HT}}$ pour HT, puis en fonction de $\frac{a}{b_{BT}}$ pour BT, celles entre les éléments des deux enroulements en fonction de $\frac{a}{\sqrt{b_{HT}b_{BT}}}$.

Après le calcul de tous les coefficients de mutuelles, le calcul des inductances propres des enroulements se fera d'après les formules qui suivront :

$$L'_{HT} = \frac{L_{HT}}{1 + \sum \sigma_{HH} + \sum \sigma_{HB}}$$

$$L'_{BT} = \frac{L_{BT}}{1 + \sum \sigma_{BB} + \sum \sigma_{HB}}$$

Telles que :

$$a = \frac{l}{n} = \frac{2360}{6} = 393,33 \text{ mm}$$

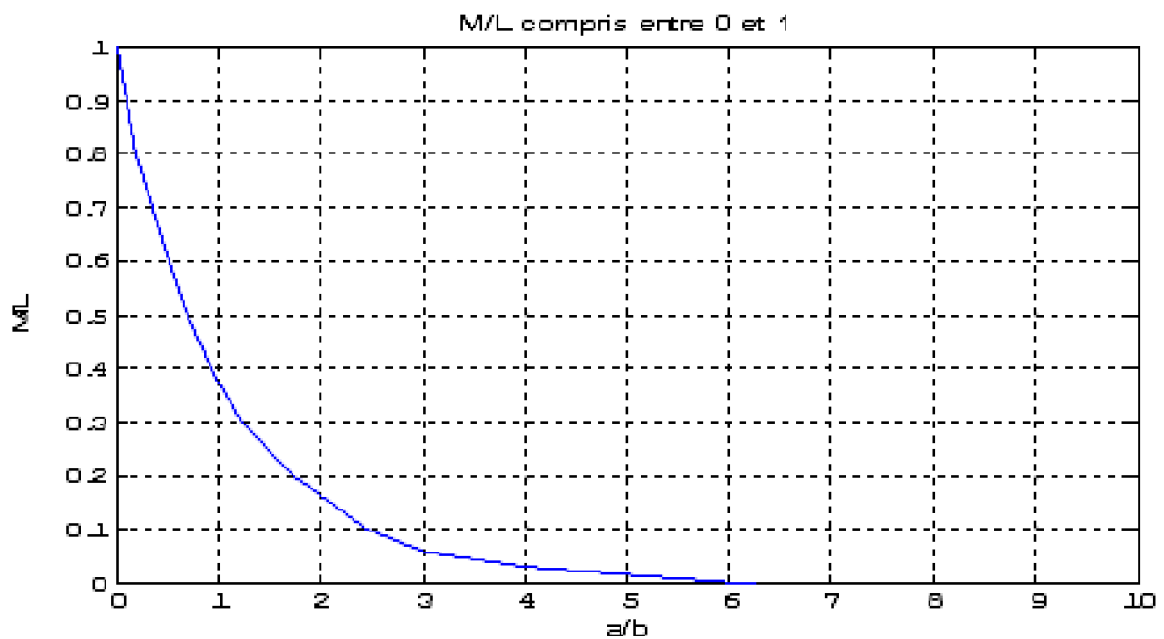
$$b_{HT} = \frac{d_{intHT} + d_{extHT}}{4} - \frac{d_{noyau}}{2} = \frac{1760 + 2770}{4} - \frac{1100}{2} = 582,5 \text{ mm}$$

$$b_{BT} = \frac{d_{intBT} + d_{extBT}}{4} - \frac{d_{noyau}}{2} = \frac{1150 + 1280}{4} - \frac{1100}{2} = 57,5 \text{ mm}$$

a : la distance entre les éléments adjacents de l'enroulement

b_{HT} : la distance entre l'élément HT et le noyau

b_{BT} : la distance entre l'élément BT et le noyau



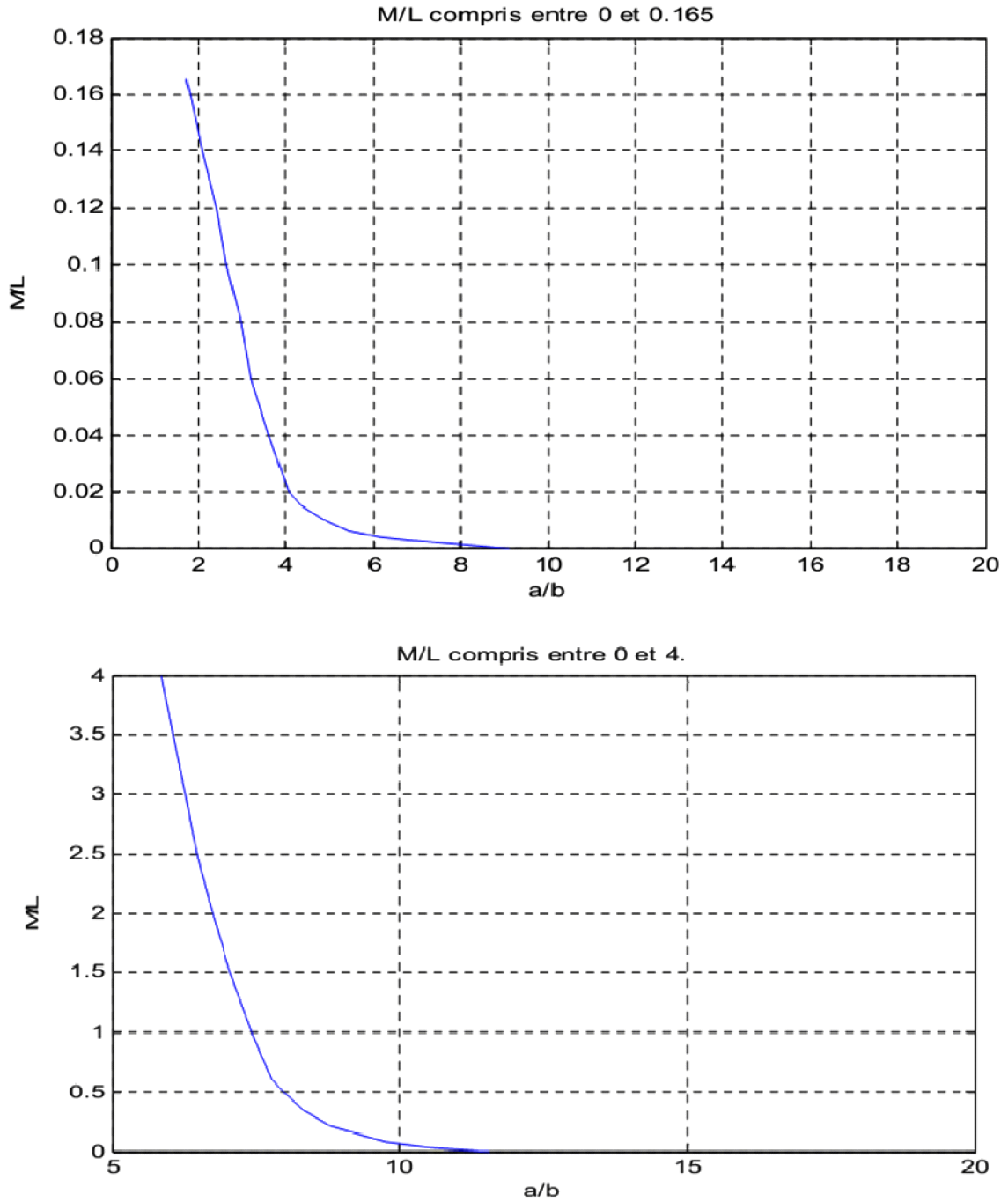


Fig. V.1 : Représentation de la fonction $M/L=f(a/b)$

V.4.Calcul les coefficients des mutuelles

V.4.1.Calcul de coefficients entre les éléments de l'enroulement HT

N°	a (mm)	b_{HT} (mm)	$\frac{a}{b_{HT}}$	$\sigma_{HH} = \frac{M_{HH}}{L}$
1	393,33	582,5	0,6752	0,53
2	786,66	582,5	1,3504	0,28
3	1180	582,5	2,0257	0,15
4	1573,33	582,5	2,7009	0,075
5	1966,66	582,5	3,3762	0,04

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

V.4.2.Calcul de coefficients entre les éléments de l'enroulement BT

N°	a (mm)	b_{BT} (mm)	$\frac{a}{b_{BT}}$	$\sigma_{BB} = \frac{M_{BB}}{L}$
1	393,33	57,5	6,8405	0,007
2	786,66	57,5	13,6810	0,00003
3	1180	57,5	20,5217	0,000001
4	1573,33	57,5	27,3622	0.0000001
5	1966,66	57,5	34,2027	0.00000001

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

V.4.3. Calcul de coefficients entre les deux enroulements HT et BT.

$$\sqrt{b_{HT} \cdot b_{BT}} = \sqrt{582,5 \cdot 57,5} = 183.01$$

N°	a (mm)	b _{HT} (mm)	b _{BT} (mm)	$\frac{a}{\sqrt{b_{HT} \cdot b_{BT}}}$	$\sigma_{HB} = \frac{M_{HB}}{L}$
1	0	582,5	57.5	0	0,032
2	393,33	582,5	57.5	2,1492	0,005
3	786,66	582,5	57.5	4,2984	0,0009
4	1180	582,5	57.5	6,4477	0,00013
5	1576,33	582,5	57.5	8,6133	0,000017
6	1966,66	582,5	57.5	10,7461	0,000003

Tableau (V.3) : calcul des mutuelles entre les éléments des deux enroulements.

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

$$L'_{HT} = \frac{L_{HT}}{1 + \sum \sigma_{HH} + \sum \sigma_{HB}}$$

$$L'_{BT} = \frac{L_{BT}}{1 + \sum \sigma_{BB} + \sum \sigma_{HB}}$$

$$\sum \sigma_{HH} = 1,075$$

$$\sum \sigma_{BB} = 0.00703111$$

$$\sum \sigma_{HB} = 0.03805$$

Après calcul, on aura :

$$L'_{HT} = 0,056 \text{ H (l'inductance propre d'un élément de l'enroulement primaire)}$$

$$L'_{BT} = 7,86 \cdot 10^{-5} \text{ H (l'inductance propre d'un élément de l'enroulement secondaire)}$$

IV.5.Détermination des capacités transversales C et longitudinale K

IV.5.1.Relations empiriques pour le calcul des capacités C et K

Le calcul de la capacité entre l'enroulement HT et la masse (cuve) se fera par la formule

Suivante :

$$C_{1tot} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l \frac{d_{cuv} + d_{exHT}}{d_{cuve} - d_{exHT}} = 8,85 \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2,360 \frac{5000 + 2770}{5000 - 2770}$$

$$C_{1tot} = 891,18 \text{ pF}$$

Ou :

ε_0 : Est la permittivité absolue de l'air.

ε_r : Est la permittivité relative d'huile.

La capacité transversale C_{HT} d'un élément entre l'enroulement HT et la masse est donnée par la formule suivante:

$$C_{HT} = \frac{C_{1tot}}{\text{Nombre d'éléments}+1} = \frac{891,18}{7} = 127,311 \text{ pF}$$

Le calcul de la capacité entre l'enroulement BT et le noyau se fera par la formule suivante:

$$C_{2tot} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l \frac{d_{intBT} + d_n}{d_{intBT} - d_n} = 8,85 \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2,360 \frac{1150 + 1100}{1150 - 1100}$$

$$C_{2tot} = 11509,64 \text{ pF}$$

La capacité transversale C_{BT} d'un élément entre l'enroulement BT et le noyau est donnée par la formule suivante :

$$C_{BT} = \frac{C_{2tot}}{\text{Nombre d'éléments}+1} = \frac{11509,64}{7} = 1644,23 \text{ pF}$$

La capacité totale C_{HBTot} entre les enroulements HT et BT est donnée par la formule suivante

$$C_{12tot} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l \frac{d_{intHT} + d_{extBT}}{d_{intHT} - d_{extBT}} = 8,85 \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2,360 \frac{1760 + 1280}{1760 - 1280}$$

$$C_{12tot} = 1620 \text{ pF}$$

La capacité transversale C_{HBT} d'un élément entre les enroulements HT et BT est donnée par la formule suivante :

$$C_{HBT} = \frac{C_{12tot}}{\text{Nombre d'éléments} + 1} = \frac{1620}{7} = 231,42 \text{ pF}$$

V.5.2. Calcul des capacités longitudinales K des enroulements primaire et Secondaire

Connaissant les valeurs des capacités C_{HT} , C_{BT} et C_{HBT} , on peut passer facilement au calcul de capacités longitudinales K_{HT} , K_{BT} par la formule suivantes

a) Pour le primaire :

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

Avec :

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

$$C_{1\Sigma} = C_{1tot} + \frac{C_{12tot} C_{2tot}}{C_{12tot} + C_{2tot}} = 891,18 + \frac{1620 \cdot 11509,64}{1620 + 11509,64}$$

$$C_{1\Sigma} = 2311,29 \text{ pF}$$

$$K_{1tot} = 2311,29 \text{ pF}$$

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

$$K_{HT} = K_{1tot} \cdot n$$

$$K_{HT} = 2311,29 \cdot 6 = 13867,74 \text{ pF}$$

b) pour le secondaire :

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

$$C_{2\Sigma} = C_{2tot} + \frac{C_{12tot}C_{1tot}}{C_{12tot} + C_{1tot}} = 11509,64 + \frac{1620 \cdot 891,18}{1620 + 891,18}$$

$$C_{2\Sigma} = 12084,55 \text{ pF}$$

$$K_{2tot} = 12084,55 \text{ pF}$$

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

$$K_{BT} = K_{2tot} \cdot n$$

$$K_{BT} = 12084,55 \cdot 6 = 72507,3 \text{ pF}$$



CONCLUSION GENERALE



BIBLIOGRAPHIE

Conclusion générale

Le comportement d'un réseau électrique lors des phénomènes transitoires dépend du fonctionnement de chacun de ses organes constituants. Il est donc important de connaître le comportement de chacun d'eux pour pouvoir déterminer le comportement de l'ensemble du réseau électrique considéré, notamment le comportement du transformateur de puissance.

Notre travail est consacré à étudier et à déterminer les paramètres du circuit équivalent du transformateur.

Dans un premier temps, nous avons énuméré quelques méthodes existantes dans la littérature qui traitent la modélisation et les études des surtensions dans le transformateur de puissance.

En seconde lieu, nous avons adopté un modèle de calcul sans l'influence du noyau, qui nécessite la connaissance des caractéristiques électriques tel que les pertes en court circuit, la tension et la puissance nominale du transformateur, pour déduire les valeurs des éléments résistifs. Ainsi que la géométrie du transformateur, en se basant sur la disposition des enroulements par rapport au noyau et à la cuve en tenant compte des différents diamètres, la distance entre les éléments adjacents, la distance entre l'élément et le noyau, ainsi que les caractéristiques diélectriques d'isolant, tout ça dans le but de calculer les éléments inductifs et capacitifs.

Enfin, il est important de préciser qu'en régime transitoire, lors d'une action de surtension impulsionnelle les valeurs des résistances et les réactances inductives deviennent très grande comparés a celles de régime de 50Hz, tandis que la réactance capacitive diminue beaucoup on peut admettre que lors des surtensions le courant passe seulement par les réactances capacitives.

Nous espérons que ce présent travail, pourra être un outil de base et une analyse complémentaire pour les futures études, qui viendront compléter le présent travail concernant l'étude des régimes transitoires dans les transformateurs de puissance.



ANNEXES

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
R_{HT} [Ω]	2,187	1,093	0,729	0,546	0,437	0,364	0,312	0,273	0,243	0,218

Tableau-1-[Annexe] Les valeurs de la résistance R_{HT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	
R_{BT} [Ω]	0,00215	0,00107	0,000716	0,000537	0,00043	0,000358	0,000307	0,000268	
Nombres d'éléments	18	20							
R_{BT} [Ω]	0,00215	0,00107							

Tableau-2-[Annexe] Les valeurs de la résistance R_{BT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
L_{HT} [H]	0,248	0,124	0,082	0,062	0,049	0,041	0,035	0,031	0,027	0,024

Tableau-3-[Annexe] Les valeurs de l'inductance L_{HT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
L_{BT} [mH]	0,250	0,125	0,083	0,062	0,05	0,041	0,035	0,031	0,027	0,025

Tableau-4-[Annexe] Les valeurs de l'inductance L_{BT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
C_{HT} [pF]	297,06	178,23	127,31	99,02	81,01	68,55	59,41	52,42	46,90	42,43

Tableau-5-[Annexe] Les valeurs De la capacité transversale C_{HT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
C_{BT} [pF]	3836,54	2301,92	1644,23	1278,84	1046,32	885,35	767,3	677,03	605,8	548,07

Tableau-6-[Annexe] Les valeurs De la capacité transversale C_{BT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
C_{HBT} [pF]	540	324	231,4	180	147,27	124,61	108	95,29	85,26	77,14

Tableau-7-[Annexe] Les valeurs De la capacité transversale C_{HBT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
K_{HT} [n F]	4,622	9,244	13,866	18,488	23,11	27,732	32,35	36,97	41,59	46,22

Tableau-9 -[Annexe] Les valeurs de la capacité longitudinale K_{HT} pour les différents nombres d'éléments

Nombres d'éléments	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
K_{BT} [n F]	24,16	48,33	72,50	96,67	120,84	145	169,17	193,34	217,51	241,7

Tableau-10-[Annexe] Les valeurs De la capacité longitudinale K_{BT} pour les différents nombres d'éléments
