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



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

Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : Machines Electriques

Présenté par :

BOUBOUZAL NAIMA

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'UMMTO (Tizi-Ouzou)

Thème

Influence de régime du neutre sur les surtensions et les surintensités dans le réseau électrique

Soutenu publiquement le / / devant le jury composé de :

M ^r MUFIDZADA NAHID	Professeur	UMMTO	Président
M ^r OTMANE-CHERIF TAHAR	Maître de Conférences A	UMMTO	Rapporteur
M ^r RACHEK M'HEMED	Maître de Conférences A	UMMTO	Examinateur
M ^r MOUDOUD MUSTAPHA	Maître de Conférences B	UMMTO	Examinateur

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser à Monsieur OTMANE CHERIF Tahar Maitre de conférences classe A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou mes plus vifs remerciements pour m'avoir accordé sa confiance, je tiens à lui témoigner ma profonde gratitude pour ses encouragements, son indulgence et sa sympathie au long de ce travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Monsieur MUFIDZADA Nahid Professeur à UMMTO d'avoir accepté de présider le jury, je tiens à lui témoigner ma profonde gratitude pour l'aide précieuse qu'il ma apportée durant ce travail, pour ses conseils avisés et ses suggestions.

Je tiens également à remercier Monsieur RACHEK M'Hemed Maitre de conférences classe A à UMMTO d'avoir acceptée d'examiner ce mémoire.

Je tiens également à remercier Monsieur MOUDOUD Mustapha Maitre de conférences classe B Pour nous avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Je pense aussi à tous mes amis, et à tous ceux qui m'ont accompagné par leur accueil, leur présence, leurs discussions, leur générosité, leur patience, leur soutien, trouvent dans ces quelques lignes toute ma gratitude et mon amitié sans que je n'aie besoin de les citer un(e) à un(e).

Milles mercis à mes parents, mes frères et sœurs pour leur aide si précieuse, leur indispensables soutiens, leur patience sans failles.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre II Théorie des transformateurs	
Introduction	3
I-1 Processus de dimensionnement	3
I-1-1 Dimensionnement magnétique	3
I-1-2 Dimensionnement électrique	4
I-1-3 Optimisation du bobinage	4
I-1-4 Optimisation mécanique et thermique	4
I-2 Distribution et conversion d'énergie	4
I-2-1Transformateurs à colonnes	5
I-2-1-1 les bobinages	6
I-2-1-3 Le circuit magnétique	8
I-2-1-4 La cuve de transformateur	8
I-2-1-5 Le couvercle de cuve et sorties	8
I-2-2 Transformateur cuirassé	8
I-3 Principe de fonctionnement	10
I-4-1 Schéma équivalents en régime triphasé équilibré	10
I-4-2 Modèles de transformateur monophasé	11
I-4-2-1Le transformateur parfait	14
I-4-2-2 Transformateur réel	16

I-5 Différent modèles de représentation du transformateur	18
I.5.1 Modèles basé sur la mesure	19
I.5.3. Les modèles mathématiques	21
I.5.4 Modèle de RESEL	23
I.5.5 Modélisation par inductances propre et mutuelles	24
I.5.6 Modélisation par inductances de fuites	24
I.5.8 modélisation du transformateur à partir de calcul de champ	25

Chapitre II Les différentes Surtensions

26
26
28
29
30
30
30
32
35
35
38
2 2 3 3 3 3 3

Chapitre III Modélisation et calcul des paramètres

Introduction	39
40 III.1 Les différents régimes du neutre	39
III.2 Types de court circuit	40

II.2.2 Méthode de calcul des courants de court-circuit	41
II.3 Description de réseau à étudier	42
III.3.1 Caractéristique des éléments du réseau	42
III.3.2 Les paramètre du schéma modélisé	44
III.4 Modèle adopté pour le transformateur	48
III.4 .1 Equation du schéma équivalent adopté	48
III.4.2 Représentation matricielle	50
III .5 Procédure de calcul des paramètres	50
III.5.1Calcul des éléments résistifs	50
III.5.2 Calcul des éléments inductifs et les coefficients des mutuelles δ_{ij}	51
III .5.3 Calcul des éléments capacitifs	53

Chapitre IV Application et discussion des résultats

IV. 4.1 Monophasé neutre isolé de la terre	55
IV 4.2 Monophasé le neutre et mise à la terre à travers une résistance	59
IV 4.3Monophasé le neutre et mise à la terre à travers une résistance variable	62
IV4.4 Monophasé le neutre et mis à la terre à travers une inductance	63
IV.4.5 Court-circuit biphasé le neutre isolé de la terre	67
IV.4.6 Cour circuit triphasé	69
Conclusion	71
IV.4. Simulation de l'enroulement du transformateur sur Orcad 10.5	71
IV 4.1isolé de la terre	72
IV.4.2 Mise à la terre à travers une résistance	73
IV 4.3Mise à la terre à travers une inductance	74

IV 4.4 Simulation de l'enroulement lors d'application de parafoudre	
Conclusion générale	80

Introduction générale

Actuellement, la très grande majorité de l'énergie électrique consommée dans le monde est acheminée par l'ensemble des réseaux électriques existants. En un peu plus d'un siècle, ce qui représente le terme de « réseau électrique » est passé de la mutualisation de quelques unités de production à une interconnexion généralisée au niveau des continents tout entiers. Si les étendues et les ramifications qui caractérisent ces réseaux en multipliant les performances et les potentiels, il faut savoir qu'elles en font également des systèmes complexes, gérés par une multitude d'intervenants et tiraillés par des contraintes technico-économiques de plus en plus pesantes.[1]

Sur le plan purement technologique, les contraintes sont principalement liées au fait que l'énergie électrique ne se stocke pratiquement pas, et que par conséquent l'intégralité des transferts d'énergie est gérée en « temps réel » de telle manière à conserver à la fois les valeurs normalisées des tensions et de la fréquence, ainsi que des marges de puissance permettant d'assurer la sureté du système. Parallèlement à cela, les particularités géographiques, la répartition des populations et des lieux de consommation, l'interconnexion internationale, l'aspect imprévisible des avaries, etc..., sont autant de contraintes supplémentaires qui façonnent la réalité technique est stratégique des réseaux d'aujourd'hui. Le réseau électrique est un acteur incontournable et extrêmement familier de notre vie quotidienne .Ses rares défaillances font réaliser à chacun à quel point nos sociétés sont dépendantes. De part cette proximité, l'étudier, appréhender ses contraintes, connaitre son mode de fonctionnement constituent une approche très instructives et absolument centrale dans « culture électrotechnique ».

Les lignes de transport d'énergie électrique constituent une partie essentielle d'un réseau électrique qui doit assurer la continuité de l'alimentation en électricité aux consommateurs. Ce qui n'est pas toujours le cas, car ces lignes de transport sont souvent exposées à des défauts qui peuvent interrompre ce service et engendre des pertes financières importantes. En effet, un transformateur relié à une ligne THT est soumis à différents types de surtensions. Les surtensions internes sont créées par les modifications brutales des variables de la topologie du réseau et les surtensions externes par des décharges d'origine atmosphérique.

Dans un réseau, le régime du neutre joue un rôle très important. Lors d'un défaut, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre. [2]

Ce travail s'articule autour de l'influence du régime de neutre sur les surtensions et les intensités des courants de court circuit dans le réseau électrique.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

-Le premier chapitre est consacré à la théorie des transformateurs, il recense les principaux types de transformateurs de puissance au travers de leurs spécificités conceptuelles. Nous présentons les différents modèles qui simulent le plus fidèlement possible le comportement du transformateur au régime transitoire.

-Le deuxième Chapitre traite les différentes surtensions. Nous exposons dans un premier temps les définitions des surtensions. Dans un second temps nous nous somme intéressés à la répartition des surtensions le long d'un transformateur. Pour l'étude de ce phénomène on se limite à un schéma équivalent d'un enroulement du coté haute tension du transformateur et enfin en présente le parafoudre comme moyen de protection du transformateur contre les surtensions.

-Le troisième chapitre à pour objet de présenter les modèles réseau- transformateur et le calcul des paramètres ; Nous donnons un aperçu sur les calculs des courants de court-circuit et les différentes méthodes utilisées,

-Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus du modèle réseau-transformateur. Le traitement numérique est effectué avec le logiciel de simulation Orcad 10.5.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale dans laquelle nous présentons un résumé des résultats obtenus et quelques perspectives.

Introduction

Un transformateur est une machine électrique qui convertie une tension électrique alternative en tension d'une autre valeur en conservant la fréquence.

Le transformateur ne possède pas de pièces en mouvement, il est qualifié de machine statique.

Les transformateurs permettent de transmettre une puissance électrique. La tension et le courant alternatif fournis au primaire sont transformés en une ou plusieurs tensions et courants secondaires. Cette transformation se fait à travers un circuit magnétique; les primaires et les secondaires sont parfaitement isolés.

I.1 Processus de dimensionnement

Le processus de dimensionnement comprend quatre étapes.

-le dimensionnement magnétique.

-le dimensionnement électrique et des isolants.

-l'optimisation du bobinage.

-l'optimisation thermique et mécanique [3].

I.1.1 Dimensionnement magnétique :

Ce dimensionnement doit permettre

-le choix du matériau magnétique ;

-le choix des dimensions du circuit magnétique ;

-le choix du nombre de spires, de l'induction de travail et de la perméabilité apparente afin de :

➢ limiter les pertes ;

- ➢ éviter la saturation ;
- obtenir la valeur d'inductance primaire et les tensions secondaires désirées [3].

I.1.2 Dimensionnement électrique

Pour les fréquences industrielles, on prendra des fils pleins avec une densité de courant de 2 à 5 A/mm^2 .

Les épaisseurs d'isolants et des lignes de fuite doivent être déterminées pour respecter les règles définies dans les normes et éviter le risque de perforation ou de contournement [3].

I.1.4 Optimisation mécanique et thermique :

Pour une implantation commode, une mécanique doit être trouvée pour chaque bobinage.

Elle devra permettre

- de tenir les contraintes d'environnement
- d'évacuer les pertes totales (magnétique, électrique, diélectrique).

I.2 Distribution et conversion d'énergie

Le transformateur peut fonctionner en élévateur ou abaisseur de tension. La Fig.I.1 et Fig.I.2 représentent respectivement un transformateur triphasé élévateur et abaisseur de tension [4].



Figure. I.1 Transformateur triphasé élévateur de tension [4]



Figure. I.2 Transformateur triphasé abaisseur de tension 20000/380V [4]

La puissance des transformateurs varie de quelque kVA à plusieurs centaines de MVA. Les tensions d'usage commencent, à quelque centaine de volts, sur les réseaux de distribution, pour atteindre plusieurs centaines de kilovolts en sortie des centres de production. Le choix d'un type de transformateur sur cette large gamme dépend non seulement des contraintes électriques, mécaniques et thermiques, mais également des problèmes d'encombrements et économiques. Toutefois, la majorité des équipements commercialisés concerne les transformateurs de distribution d'une puissance allant de quelques dizaines à quelques centaines de kVA [5].

I.2.1Transformateurs à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le coulage tout en minimisant le volume des conducteurs. Les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mise en jeux [5].



Figure I.3 Transformateur triphasé à colonne [5].

Le transformateur triphasé est composé de trois paires de bobinages indépendantes et par la suite connectées entre elles selon différents schémas.

I.2.1.1 les bobinages

Les enroulements sont conçus par une juxtaposition de couches radiales et successives, composées elle-même de multiples spires.

Les couches extérieures et intérieures sont respectivement associées aux bobinages haute et basse tension.

Les nombres de spires primaires et secondaire sont imposés par les nivaux de tensions utilisées, en corrélation avec la valeur d'induction dans le circuit magnétique, la section de celui-ci, la fréquence et le rapport de transformation.

Les conducteurs sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autre pour leurs bonnes conductivité thermique, massique [3].

Couplage de transformateur triphasé

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ses enroulements couplés en étoile ou en triangle.

De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zig-zag.

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

- Dimensionnement des enroulements :
- An très haute tension, on aura intérêt à choisir un couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que : U' = U/3

-Pour les très forts courants, on préférera le montage triangle ou chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité : $J = I/\sqrt{3}$

-Fonctionnement déséquilibré :

-Aux faibles déséquilibres ($\leq 10\%$.I Ligne), primaire et secondaire seront couplé en étoile avec conducteur de neutre.

-Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire en zig-zag.

-Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilisera un montage triangle étoile pour économiser du cuivre au secondaire [6].

> Rapport de transformation

Par définition $M = U_{ab} / U_{AB}$

Ce rapport dépend non seulement du nombre de spires primaires est secondaires, mais aussi du couplage au primaire et au secondaire.

> Indice horaire

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaire et secondaires et homologue, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par les mêmes lettres (V_A, V_a) ou (U_{AB}, U_{ab})

En pratique le déphasage θ obtenu est toujours un multiple de 30[°]

 θ : retard d'une tension BT sur son HT

L'indice horaire I est : $I = \theta / 30^{\circ}$ $0 \le I \le 11$ (entier) [6]

I.2.1.3 Le circuit magnétique

Le circuit magnétique est feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault.

L'assemblage des travers avec le noyau est soigné de façon à éviter les entrefers qui diminuent le flux magnétique [7].

I.2.1.4 La cuve de transformateur

La constitution de la cuve du transformateur est liée aux calculs thermiques du transformateur. A l'heure les transformateurs les plus répondus sont les transformateurs dans lesquelles le noyau est les enroulements sont placés dans une cuve remplie d'huile. Il existe différentes formes de cuves selon la puissance du transformateur [7].

I.2.1.5 Le couvercle de cuve et sorties

Le couvercle de la cuve est un élément important, on y place plusieurs pièces à savoir :

-Les isolateurs de sortie des enroulements.

-Le conservateur d'huile dans les transformateurs.

-Le tube d'évacuation de gaz [7].

I.2.2 Transformateur cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux cotes (Fig. I-4). La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors d'une excellente rigidité mécanique associé à une grande capacité. En contrepartie, le confinement résultant rend plus difficile le refroidissement de l'ensemble. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes, voire dévastateurs de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées au champ électrique dans les bobinages [8].



Figure. I.4 Transformateur cuirassé

Le bobinage

Les enroulements sont répartis en plusieurs sous groupes de bobines sont appelé (galettes) ou (disque) à cause de leur géométrie en forme de spires concentrique et de faibles hauteurs. Les galettes sont alternées entre la haute et la basse tension afin de diminuer les fuites magnétiques et le gradient de tension. En outre cette topologie offre l'avantage d'engendrer des forces en opposition entre chaque galette lors de court –circuit [8].

La cuve

De plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique.

Les écrans électrostatiques :

Des feuilles métalliques à haute résistivité et de faible épaisseur sont employées pour réduire les contraintes entre les spires. Celles-ci sont insérées entre les feuilles isolantes des bobines haute tension.

Les deux types de transformateurs que nous venons de présenter ne sont néanmoins

pas les seuls.

I.3 Principe de fonctionnement :

L'un des deux bobinages joue le rôle de primaire, il est alimenté par une tension variable et donne naissance à un flux magnétique variable dans le circuit magnétique. Le circuit magnétique conduit avec le moins réluctance possible les lignes de champ magnétique créé par le primaire dans les spires de l'enroulement secondaire. D'après la loi de Faraday, ce flux magnétique variable induit une force électromotrice dans le deuxième bobinage appelé secondaire de transformateur [9]

Afin de pouvoir faire toutes les prédéterminations de fonctionnement d'un transformateurs triphasé il est indispensable d'élaborer des modèles équivalents.

I.4.1 Schémas équivalents en régime triphasé équilibré :

On suppose un fonctionnement en régime sinusoïdal équilibré de transformateur

-Le primaire est alimenté par une source triphasée équilibrée.

- Le secondaire débite sur une charge elle-même équilibrée.

-Les trois colonnes du transformateur sont supposées identiques (même réluctance).

Nous prendrons comme exemple le transformateur étoile triangle représente sur

la figure I-5.

Les enroulements couplés en étoile sont alimentés par une source triphasée équilibrée, ils constituent le primaire de transformateur. Les enroulements couplés en triangle jouent le rôle de secondaire.



Figure. I.5 Transformateur triphasé étoile triangle

Le fonctionnement étant parfaitement équilibré, les équations de fonctionnement sont données par les relations (I.1, I.2, I.3)

Les équations s'écrivent en désignant par r_1, r_2, L_1, L_2 les résistances et inductances de fuites de bobinages et par \Re la réluctance de chacune des colonnes : [9]

$$v_{1} = r_{1} \cdot i_{1} + L_{1} \frac{di_{1}}{dt} + n \frac{d\Phi_{1}}{dt} \qquad U_{13} = -r_{2} \cdot j_{1} - L_{2} \frac{dj_{1}}{dt} - n \frac{d\Phi_{1}}{dt} \qquad n \cdot i_{1} + n j_{1} = \Re \Phi_{1} \qquad (I.1)$$

$$v_{2} = r_{1}.i_{2} + L_{1}\frac{di_{2}}{dt} + n\frac{d\Phi_{2}}{dt} \qquad U_{21} = -r_{2}.j_{2} - L_{2}\frac{dj_{2}}{dt} - n\frac{d\Phi_{2}}{dt} \qquad n.i_{2} + n.j_{2} = \Re\Phi_{2} \quad (I.2)$$

$$v_{3} = r_{1} \cdot i_{3} + L_{1} \frac{di_{3}}{dt} + n \frac{d\Phi_{3}}{dt} \qquad U_{32} = -r_{2} \cdot j_{3} - L_{2} \frac{dj_{3}}{dt} - n \frac{d\Phi_{3}}{dt} \qquad n \cdot i_{3} + n \cdot j_{3} = \Re \Phi_{3} \quad (I.3)$$

Considérons les équations (I.3) relatives à la première colonne du transformateur et aux deux bobinages quelle porte, ces équations sont identiques a celle du transformateur monophasé [9].

I.4.2 Modèles de transformateur monophasé

I.4.2.1Le transformateur parfait :

Le transformateur parfait est défini comme un transformateur qui ne présente pas de pertes joules ($r_1 = r_2 = 0$) et dont le circuit magnétique est parfait : pas de fuites magnétiques

 $(L_1 = L_2 = 0)$ et la réluctance nulle $(\Re = 0)$.

Le circuit magnétique canalisant alors parfaitement les lignes de champ, il n'y a plus lieu de distinguer le flux de fuite et le flux commun à toute spire. Nous désignerons par Φ le flux à travers une section droite du circuit magnétique [9].

Les équations de fonctionnement deviennent alors :

$$u_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$u_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt} \tag{I.4}$$

 $n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = 0$

En désignant par $m = \frac{n_2}{n_1}$ le rapport de transformation du transformateur, ces équation

se réduisent à

$$u_{1} = n_{1} \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{u_{2}}{u_{1}} = -m \qquad (I.5)$$

$$\frac{i_{2}}{i_{1}} = -\frac{1}{m}$$

Le symbole du transformateur parfait est donné par fig. (I.6) et le diagramme de Fresnel associé à son fonctionnement fig. (I.7)



Figure .I.6 Le transformateur parfait



Figure .I.7 Diagramme de Fresnel.

Dans la représentation du transformateur parfait, les bobinages primaire et secondaire n'apparaissent plus et sont seulement symbolisés par deux bornes. Seul le repérage des bornes par point permet de retrouver les orientations des différentes grandeurs : flux, courant et tension.

Deux bornes pointées sont dites bornes homologues. Les tensions se développant sur deux bobinages différents sont en phase si elles sont orientées de la même façon par rapport aux bornes homologues, en position de phases dans le cas contraire.

Les relations liant courants et tension primaire d'écrire : $u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$; cette relation montre que la puissance absorbée par le primaire est à chaque instant égale à la puissance fournie par le secondaire du transformateur. Il en résulte plusieurs conséquences :

-le transformateur parfait à un rendement égal à 1 ;

-à vide, le courant appelé par le primaire du transformateur est nul ;

-aucune énergie n'est emmagasinée dans le circuit magnétique transformateur [9].

I.4.2.2 Transformateur réel

Transformateur sans pertes Joule ni fuites magnétiques

Dans ce modèle, nous introduisons en partie les imperfections du circuit magnétique dont la réluctance \Re n'est plus nulle, les pertes fer ne sont plus négligées .En revanche, les résistances et inductances de fuites sont toujours considérées comme nulles.

$$u_{1} = n_{1} \frac{d\Phi}{dt}$$

$$u_{2} = -n_{2} \frac{d\Phi}{dt}$$

$$(I.6)$$

$$n_{1}.i_{1} + n_{2}.i_{2} = \Re\Phi$$

Si nous considérons le fonctionnement à vide du transformateur alimenté sous la tension u_1 , les équations de fonctionnement deviennent, en tenant compte du fait que $i_2 = 0$ et en désignant par i_{10} le courant primaire à

$$u_{1} = n_{1} \frac{d\Phi}{dt} \qquad (I.7)$$

$$u_{1} = n_{1} \frac{d\Phi}{dt} \qquad n_{1}\dot{i_{10}} = \Re\Phi$$

Le courant i_{10} s'identifie au courant dans une bobine à noyau de fer alimentée par une tension alternative sinusoïdal équivalent i_{10} pour lequel nous nous fixons les contraintes suivantes :

 $-i_{10}$ et i_{10} ont même valeur efficace ;

 $-i_{10}$ et i_{10} donnent la même consommation de puissance active

 i_{10} entraîne une consommation de puissance réactive de la part de transformateur

Dans ces conditions, nous pourrons donc remplacer dans les équations de fonctionnement de transformateur, $\Re \Phi$ par $n_1 i_{10}$ se qui conduit à :

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = n_1 i_{10}$$

 $n_1(i_1 - i_{10}) + n_2i_2 = 0$ (I.8)

Nous retrouvons les équations d'un transformateur parfait alimenté sous tension u_1 , délivrant la tension u_2 et traversé par les courants : $i_{1t} = i_1 - i_{10}$ au primaire et par i_2 au secondaire.

Nous pouvons alors donner le schéma équivalent de transformateur, fig. (I.8).



Figure . I.8 Schéma équivalent du transformateur sans pertes Joule ni fuite magnétiques

Le diagramme de Fresnel traduisant le fonctionnement de ce transformateur est représenté par la figure (I.9).



Figure .I.9 Diagramme de Fresnel du transformateur

L'équation relative à la tension primaire écrite en valeurs efficaces complexe conduit à :

$$U_1 = jn_1 w \Phi \tag{I.9}$$

Soit en module :

$$U_{1} = n_{1}w\Phi = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}n_{1}f.\Phi_{M}$$
 (I.10)

f étant la fréquence de la tension d'alimentation et Φ_M la valeur maximale du flux à travers une section du circuit magnétique. Cette relation est plus connue sous le nom de Boucherot :

$$U_1 = 4,44.n_1.f.\Phi_M \tag{I.11}$$

-Le courant à vide dépendant d'une manière non linaire de la tension d'alimentation, les valeurs de R et L dépendent aussi de cette tension.

-Ce courant représente le courant nécessaire pour magnétiser le circuit magnétique et compenser les pertes fer, il a pour valeur efficace quelque % du courant primaire nominal.

-Si les pertes fer sont suffisamment faibles, le courant à vide i_{10} traverse l'inductance magnétisante. Les équations de fonctionnements permettent d'écrire :

$$\Phi = \frac{n_1 i_{10}}{\Re} \qquad \text{et} \qquad u_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (\text{I..12})$$

Ce qui conduit à : $u_1 = \frac{n_1^2}{\Re} \frac{di_{10}}{dt} = L \frac{di_{10}}{dt}$ permettant d'exprimer l'inductance magnétisante en fonction du nombre de spires du bobinage primaire et de la réluctance du circuit magnétique : $L = \frac{n_1^2}{\Re}$ [9]

Transformateur réel

Lorsque on prend en compte toutes les imperfections du transformateur en introduisant les résistances et inductances de fuite et donc en distinguant le flux commun Φ_c à toute les spires et les flux de fuites relatifs aux bobinages primaire et secondaire :

$$u_{1} = r_{1}.i_{1} + L_{1}\frac{di_{1}}{dt} + n_{1}\frac{d\Phi_{c}}{dt}$$

$$u_{2} = -r_{2}.i_{2} - L_{2}\frac{di_{2}}{dt} - n_{2}\frac{d\Phi_{c}}{dt}$$

$$(I.13)$$

$$n_{1}.i_{1} + n_{2}.i_{2} = \Re\Phi_{c} = n_{1}.i_{10}$$

Nous pouvons transformer ces équations pour nous ramener au modèle défini dans le paragraphe précèdent pour lequel les tensions primaire et secondaire sont respectivement

 u_1 ' et u_2 '; les courants i_1 et i_2 .

$$u_{1}^{'} = u_{1} - r_{1}i_{1} - L_{1}\frac{di_{1}}{dt} = n_{1}\frac{d\Phi_{c}}{dt}$$

$$u_{2}^{'} = u_{2} + r_{2}i_{2} + L_{2}\frac{di_{2}}{dt} = n_{2}\frac{d\Phi c^{c}}{dt}$$

$$n_{1}(i_{1} - i_{10}) + n_{2}i_{2} = 0$$
(I.14)

Ces équations sont traduites par le schéma équivalent donné par la figure (I.10).En posant

 $i_{1t} = i_1 - i_{10}$; le transformateur parfait apparaissant dans ce schéma a pour rapport de transformation $m = \frac{n_2}{n_1}$



Figure. I.10 Transformateur réel

Les éléments de ce schéma étant peu accessible expérimentalement.

En considérant que la chute de tension dans r_1 et l_1 est faible devant les valeurs de u_1 et u_1 , nous pouvons déplacer l'association en parallèle de R et L pour la ramener « en tête » comme indiqué sur la figure I.11.Cette approximation est connue sous le nom d'hypothèse de Kapp.



Figure .I.11 Transformateur réel dans le cadre de l'hypothèse de Kapp.



Figure I.12 Schéma équivalent de transformateur réel

La résistance totale r_s, et l'inductance de fuite totale l_s ramenée du coté secondaire

Ce schéma donne lieu à un diagramme particulier de Fresnel traduisant le fonctionnement en régime alternatif sinusoïdal : Le diagramme de Kapp.

I.5 Différent modèles de représentation du transformateur

Un transformateur relié à un réseau HT est soumis à différents types de tensions (surtensions dues aux ondes de chocs rapides aux oscillations internes). D'où l'importance

d'avoir un modèle qui simule le plus fidèlement possible le comportement du transformateur au régime transitoire. Nous présentons les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients dans les quelles la modélisation des transformateurs est développée, à savoir l'approche temporelle et l'approche fréquentielle [10].

I.5.1 Modèles basé sur les mesures

Le principe de cette méthode consiste à construire un transformateur prototype, similaire à celui étudié, de taille réelle ou de taille réduite, et d'y faire les mesures nécessaires, dans le but d'obtenir le maximum de données, pour la modélisation. [10]

Mesure sur un prototype de taille réelle

Cette méthode est naturellement la plus précise, à condition que les différents paramètres (Paramètres géométriques, électriques et magnétiques) du prototype soient les mêmes que celui du transformateur étudié. Par conséquent, les résultats obtenus, en effectuant des mesures sur un prototype, n'est valable que pour le même type du transformateur .Pour un autre type de transformateur de paramètres géométriques, électriques et magnétiques différentes, il faut construire un autre prototype, et c'est son principal inconvénient. Cette méthode se révèle donc couteuse et longue à mettre en œuvre. De plus il est difficile de créer en laboratoire les mêmes sollicitations rencontrées lorsque le transformateur secs conçus en bobines enrobées et blindées, les investigation et mesures sont pratiquement impossible à réaliser , l'enrobage excluant l'accès aux spires de l'enroulement, et sont en tous cas difficiles pour les transformateur de grande puissances, mais malgré ces inconvénient, cette méthode a l'avantage d'être applicable pour tout type de transformateur, il faut remarquer cependant que la fiabilité des résultats obtenus par cette méthode dépend fortement de la qualité des mesures effectuées (précision des appareils de mesure , et surtout du câblage)[10].

Mesure sur un prototype de taille réduite

Prototype de taille réduite avec similitude géométrique

Elle consiste à construire un transformateur prototype de taille réduite, et d'effectuer des mesures a partir des lois des similitudes physiques, en utilisant les résultats des mesures effectuées, on remonte au comportement ou aux paramètres du transformateur de taille réelle.

Cette méthode peut donnée des résultats fiables, outre les mêmes inconvénients que sous cités précédemment on rencontre les difficultés liées à la fidélité du modèle et aux problèmes de facteur d'échelle en effet il est difficile de construire un prototype qui respecte chaque détail du transformateur réel, alors que c'est une des conditions nécessaires, pour avoir des résultats fiables. De même la réduction de l'échelle du temps, qui est une conséquence de la réduction des dimensions géométrique du prototype, nécessite l'emploi d'ondes à front très raide, qui sont elles mêmes difficiles à réaliser.[10]

I.5.2 Autre type de prototype

Le modèle électromagnétique combiné, le noyau de fer (noyau magnétique) du prototype est identique à celui du transformateur réel, par contre le nombre de spires peut être différent. Une chaine de condensateur modélise la partie diélectrique. L'utilisation de cette méthode nécessite la connaissance préalable du comportement général du transformateur étudie, afin que le choix de nombre de spires, qui est différent de l'original, et l'ajout de capacités n'influencent en rien les résultats attendus, enfin, cette méthode a les mêmes inconvénients que ceux cités précédemment [10].

I.5.3. Les modèles mathématiques

La modélisation des transformateurs de puissance, en régimes Haute Fréquences (HF) et sous onde de choc, par un procédé expérimental (mesures), quoique précis, est relativement long à mettre en œuvre et couteux. C'est pourquoi on lui préfère le second modèle plus souple, qui utilise un schéma électrique équivalent. On décrit les différents types de modèle mathématiques existants dans la littérature [10].

Le modèle universel EMTP

Le code de calcul universel EMPT (Electromagnetic Transients Program) est utilisé pour étudier les comportements des réseaux électriques en régime transitoire. Il est utilisé comme un standard dans des études temporelles et fréquentielles. L'utilisation de ce code de calcul, pour modéliser un transformateur consiste à représenter ce dernier par un schéma électrique équivalent, comprenant :

-des transformateurs parfaits

-une branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer

-des inductances de fuite des groupes (galettes, couches, ou bobines)

-des résistances des enroulements, et des capacités de couplage.

La figure (I.13) illustre un exemple de schéma équivalent d'un transformateur de type cuirassé, avec trois galettes, en vue de traitements par le code de calcul EMTP.

Les différents paramètres du schéma équivalent représenté sur la figure sont déterminés, soit par le calcul numérique ou analytique, à partir de la géométrie de transformateur, et en faisant des hypothèses simplificatrices (symétrie, perméabilité du noyau magnétique constante...,). Soit par mesure (essai à vide, essais en court- circuit,....) [10].



- a) Coupe transversal du transformateur
- b) Circuit équivalent

Figure I.13 Schéma équivalent du transformateur en vue de traitements par EMTP

Le principal avantage de l'utilisation du modèle EMPT est qu'on peut effectuer des études d'interaction du transformateur, avec le réseau, dans des configurations quasi-réelles (présence de protection,...).En effet, outre les éléments linaires (résistances et inductances linéaires), il traite aussi les éléments non linaires, tels que les parafoudre.

Mais aussi, dans certains cas, l'utilisation du code de calcul EMTP, pour modéliser un transformateur monophasé à deux enroulements égaux (haute tension et basse tension), Le modèle EMTP n'est pas symétrique, et l'inductance de court-circuit n'est pas la même, vue du primaire et du secondaire , Le modèle EMTP est bien adapté pour les études des réseaux(avec une modélisation globale du transformateur), mais il ne convient pas aux études internes du transformateur [10].

I.5.4 Modèle de RESEL

RESEL c'est un modèle développé par des Ingénieurs d'études et de recherche 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 temporelle. Son

Chapitre I

utilisation pour modéliser un transformateur nécessite deux types de schémas, couplé entre eux :

-schéma (figure 3 b) qui traduit le comportement électrique du transformateur composé de forces électromotrices : $\stackrel{\emptyset}{-}$ $\stackrel{\emptyset}{-}$, et de plusieurs cellules RL : r_1 résistance de primaire et r_2 résistance de secondaire (l'association des cellules dépend de technique de bobinage du transformateur)



Figure I.14 Modélisation d'un transformateur à l'aide

du code de calcul RESEL

Coupe transversale d'un transformateur à deux enroulements

- a) Le circuit électrique correspondant
- b) Le circuit magnétique correspondant

- un schéma figure (3c) qui traduit son comportement magnétique, composé d'un réseau de réluctances (\Re_{f1} et \Re_{f2} réluctance de fuites et \Re_{12} réluctances principales) et de forces magnétomotrices ($n_1 i_1$ et $n_2 i_2$)

La prise en compte des effets de la fréquence se fait par la décomposition du circuit magnétique en éléments de géométrie simple, pour les quelles la résolution des équations de Maxwell est relativement aisée les réluctances ainsi calculées se composent des cellules RL. Aussi l'introduction des éléments (impédances) complexes ne permet de tenir compte de l'effet de peau. Cependant, on peut citer des inconvénients majeur de code de calcul RESEL il ne traite que des éléments de réseau à constante localisées, il ne permet pas une analyse fréquentielle symétrique du transformateur mais une analyse temporelle [10].

I.5.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles

Le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc est assimilable à celui d'un système de condensateur, de résistance et d'inductances, c'est le principe de modèle de transformateur de puissance basé sur les inductances propre et mutuelle .Selon l'étude envisagée, c'est-à-dire selon qu'on s'intéresse au phénomène de propagation où aux mode de résonance du transformateur ces paramètres peuvent être répartis ou concentrés

Le transformateur est discrétisé par spires, ou galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes (figure I.15). Au point de vue inductif, chaque élément est représenté par son inductance propre. Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre les éléments il existe des capacités de couplages, et pour chaque éléments une capacité par rapport à la masse. Ces éléments sont calculés, en fonction des caractéristiques géométriques et magnétique du noyau magnétique, ils peuvent aussi être déterminés expérimentalement [10].



Figure I.15 Schéma de principe de la modélisation par inductances

Propres et mutuelles

- a) Transformateur simplifié à 8 spires
- b) Schéma équivalent de la galette

Chapitre I

Le principal intérêt de ce modèle une fois que l'on a les éléments du schéma équivalent, c'est qu'il peut être traité par n'importe quel logiciel de plus il est bien adapté pour le calcul de la réponse temporelle consécutive à une excitation par onde de choc rapide.

L'inconvénient de ce modèle cause de la grande valeur de la perméabilité du noyau magnétique qui augmente le couplage entre les bobinages, le calcul d'inductance de fuite à partir des inductances propres et mutuelles ne sera pas précis, du fait que ces valeurs sont très proches. Ceci donnera l'avantage à un modèle basé sur l'inductance de fuite [10].

I.5.6 Modélisation par inductances de fuites

La présence du noyau magnétique, avec une grande perméabilité, augmente le couplage entre les bobinages. Il arrive donc que les valeurs des inductances propres soient très proches de celles des mutuelles. De même, on a vu aussi que l'évaluation exacte de la matrice inductance ne signifie pas que les effets de fuite (inductance de fuite) soient corrects. Les valeurs des inductances propres étant très proches de celle des mutuelles. Le calcul des inductances de fuite, à partir de ces dernières donnera des valeurs imprécises. Par ailleurs, il arrive que le transformateur se trouve dans une situation de court-circuit, et dans ce cas sont les inductances de fuite qui jouent un rôle important. Dans ces cas, il est nécessaire d'utiliser une méthode (modèle) basée sur les inductances de fuite, pour avoir une meilleure précision [10].

I.5.6 Modèle issu du principe de la dualité magnétique électrique

Pour la dualité magnétique électrique on établit d'abord un schéma équivalent électrique, en utilisant des règles de passage (appelé aussi analogie de HOPKINSON)

L'utilisation de la méthode basé sur le principe de la dualité magnétique électrique permet de s'affranchir de ce problème, et permet d'avoir un modèle beaucoup plus fin .Par ailleurs, elle permet une bonne représentation des pertes par courants de Foucault dans le circuit magnétique et dans le cuivre.

Cependant, malgré les performances de ce modèle, il présente un inconvénient majeur. En effet, si on modélise un transformateur, en se basant seulement sur cette approche, les inductances de fuites ne seront pas représentées correctement, ces dernières sont déduites directement du flux de fuite, en négligent l'épaisseur de bobinage [10].

I.5.8 Modélisation du transformateur à partir du calcul de champ

A partir de l'utilisation du code de calcul de champ (calcul de la répartition de l'induction et de champ magnétique dans un volume étudié), on peut calculer les paramètres

(Inductances, résistances, capacités) d'un transformateur .Ce sont les codes de calcul numériques, basés sur la méthode des éléments finis(MEF) qui sont les plus adaptés et les plus utilisés. De même, à partir des codes de calcul numérique, on peut calculer l'inductance de fuite.

L'intérêt de cette démarche est qu'elle permet de calculer, avec précision, les paramètres du schéma équivalents du transformateur. De même cette technique, tien en compte de la géométrie de tous les éléments (galette, cuve, écran statique, noyau magnétique)[10].

Introduction

Une surtension est toute tension entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phases, dont la valeur de crête dépasse la valeur de crête correspondant à la tension la plus élevée du matériel.

Une surtension est dite de mode différentiel si elle apparaît entre conducteurs de phases ou entre circuits différents. Elle est dite de mode commun si elle apparaît entre un conducteur de phase et la masse ou la terre [11].

Les surtensions dans les transformateurs sont causées par différentes sources :

-Phénomène atmosphérique tel que le coup de foudre frappant les lignes ou les pylônes ou bien les fils de garde [12].

- Les commutations de manœuvre

-Par décharge électrostatique.

- A fréquence industrielle

Le tableau suivant montre les caractéristiques de déférentes surtensions

Surtension	durée	Raideur de front de	Amortissement en
		Montée ou fréquence	fonction de la
			distance
atmosphérique	Très courte (µs)	Très élevée	Fort
		(1000 kV/µs)	
Manœuvre	Courte (ms)	Moyenne	moyenne
		(1 à 200 kHZ)	
A fréquence	Longue (s)	Fréquence du réseau	Faible
industrielle			

II.1.1 Surtensions atmosphériques

Le courant injecté par coup de foudre monte rapidement (de 1μ s à 10μ s) à une valeur crête est habituellement et ensuite diminue lentement.

Des études montrent que 50% des coups de foudre ont une valeur crête supérieure à 45kA[12].

Dans la conception des lignes, pour minimiser le nombre de coup de foudre on doit tenir compte de différents facteurs, principalement : la hauteur des pylônes, le nombre et l'emplacement des fils de gardes, le nombre de disques isolateurs par chaînes, l'impédance des pylônes et l'impédance pylônes terre [12].

Coups de foudre directs

Les coups de foudre directs touchent souvent un conducteur d'une ligne de transport et résultent en l'injection dans la ligne d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. [12]



Figure II.1 Coup de foudre direct

Cette onde de courant se propage de part et d'autre du point d'impact. Elle provoque une surtension de $Z_c.i_f$ ou Z_c est l'impédance caractéristique de la ligne (300-1000 Ω). Cette surtension peut provoquer le claquage de la chaîne d'isolateur qu'elle rencontre.

Coups de foudre indirects

Les coups de foudre indirects tombent généralement sur le pylône ou le fils de garde et résultent en une augmentation de la tension de la masse métallique du pylône par rapport à la terre



Fig. II-2 Coup de foudre indirect

L'augmentation de la tension est :

$$V = R_p \cdot \frac{I}{4} + L_p \cdot \frac{dI}{dt}$$

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

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

II.1.2 Paramètres influençant le niveau de choc sur un transformateur

Les ondes de surtension d'origine atmosphérique qui apparaissent en un point du réseau sont donc des impulsions ou une succession de deux impulsions et leur transmission obéit à des lois particulières.

On sait que les propriétés électriques et la longueur d'une ligne aérienne ou d'un câble souterrain, supposés sans pertes, peuvent être définies à l'aide de trois grandeurs :

-La vitesse de propagation V (qui $V_l = 300m/\mu s$) pour une ligne et($V_c = 150m/\mu s$) pour un câble.

-L'impédance caractéristique Z (qui est d'environ $Z_l = 500 \Omega$) pour une ligne aérienne, et de 10 à 100 fois plus petite pour un câble ($Z_c = 5\dot{a}50\Omega$).

-Le temps de propagation t qui peut se déduire de la longueur l: $t = \frac{l}{v}$.

On sait également que lorsqu' une impulsion se déplace le long d'une ligne à constantes réparties, elle ne subit aucune variation notable (à l'exception d'un affaiblissement dû aux pertes) tant qu'elle ne rencontre pas de variation d'impédances.

Il est assez fréquent d'affirmer que la surtension qui a pris naissance en ligne et qui s'est trouvé limitée par des amorçages vers la terre ou par des contournements d'isolateurs parvient affaiblie en raideur et en amplitude à l'entrée du poste ou à l'entrée du transformateur.

Malheureusement, il arrive souvent à l'entré de poste, le changement d'armement des pylônes ou le passage aéro-souterrain (d'une ligne à un câble) provoque un changement d'impédance caractéristique qui est la cause du phénomène de réflexion qui se manifeste parfois à l'entré du transformateur lui –même dés l'instant que le temps de parcours de la dernière section protégée ne peut plus être considérée comme négligeable devant le temps propre du front de l'onde.

Cette considération impose de placer les appareils de protection, parafoudre par exemple, le plus prés possible des bornes d'entrée du transformateur qui doit être en tout état

de cause à une distance ne dépassant pas 20 à 30m, il s'agit d'une liaison aérienne, et 10à 15m s'il s'agit d'une liaison par câbles.

Il arrive aussi que les caractéristiques de la ligne n'aient pu jouer le rôle limiteur c'est se qui se passe lors de certain coup de foudre intéressant les trois conducteurs d'une ligne : trois ondes progressives simultanées parviennent à l'entrée de poste à un niveau plus élevé que dans le cas usuel de supports mis à la terre. Mais, le plus grave dans ce cas particulier du choc tripolaires est que, même si chacune des trois surtensions se trouve limités convenablement, elles vont parcourir simultanément les trois enroulements de phases du transformateur et parvenir au point neutre. Si ce dernier n'est pas mis à la terre par une impédance suffisamment faible de point de vue haute fréquence, y provoquer par effet de réflexion des oscillations dangereuses pouvant aller jusqu'au doublement de la surtension initiale [13].

II.1.3 Surtension de manœuvre.

Des surtensions transitoires peuvent apparaître lors de la mise hors circuit d'une charge inductive telle que : transformateur à vide, inductances, ou inductances alimentées par un transformateur, et cela même lorsque le courant à couper n'excède pas une centaine d'ampères [14].

➢ Lorsque le réseau d'alimentation est de puissance élevée par rapport au transformateur à connecter, il a tendance à imposer sa loi et l'on ne rencontre guère de surtensions lors d'un enclenchement de transformateur. Par contre, si le réseau d'alimentation est de puissance limitée, l'important appel de courant d'enclenchement représente une perturbation et le retour à un état stable ne peut se faire qu'après une série d'oscillations transitoires de la tension aux bornes de transformateur.

> Ferro-résonance

Ce phénomène est de nature oscillatoire. Il peut prendre naissance par l'interaction de la capacité d'un réseau avec une inductance non linéaire, particulièrement celle présenté par un transformateur à vide. Il en résulte des surtensions entretenues ou non sur des réseaux à forte capacitance (câble armée en particulier) qui peuvent entraîner des avaries aux transformateurs aux câbles eux-mêmes [14].

29

II.1.3 Surtension à fréquence industrielle

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

-un défaut à la terre

-une rupture du conducteur neutre

-un défaut d'un régulateur de tension d'un alternateur ou d'un régulateur en charge d'un transformateur

Ces surtensions sont de longue durée (quelques secondes à quelques minutes) et ne sont pas bien amorties [14].

Surtensions causées par défaut d'isolement

Dans un réseau triphasé à neutre isolé où impédant, une phase mise à la terre fait monter les tensions des deux autres phases par rapport à la terre à 1.732 fois leurs valeurs normales [14].

La rupture de continuité de neutre

Les réseaux de distribution sont généralement triphasés, de nombreux appareillages sont monophasés. En fonction du besoin de chacun des abonnés BT, des déséquilibres de tension peuvent se produire. Le cas le plus contraignant est en fait la rupture du neutre qui peut induire une montée en potentiel dommageable pour des appareils prévus pour fonctionner sous une tension simple et qui se trouve alors sous une tension proche de la tension composée[14].

II.2 Répartition des surtensions le long d'un transformateur

Lorsqu'une surtension transitoire parvient à l'entrée d'un bobinage de transformateur, elle se propage le long de celui-ci, la répartition de la tension qui en résulte est un phénomène très complexe durant lesquelles les tensions entre les différentes bobines et même entre les différentes spires de l'enroulement peuvent dépasser de plusieurs fois la tension de régime permanent de fonctionnement du transformateur. Nous allons étudier dans se qui suit le cas le plus simple des surtensions dans un transformateur lorsqu' un seul enroulement est soumis à une onde de surtension, l'autre borne peut être mise ou isolé de la terre [15].

II.2.1 Schéma équivalent.

Pour l'étude de ce phénomène on se limite à un schéma équivalent d'un enroulement du coté haute tension du transformateur, fig.II.3, en négligeant les résistances des enroulements et la transmission des phénomènes transitoires d'un enroulement à un autre [16].


Figure.II.3 Schéma équivalent de l'enroulement haute tension du transformateur

➢ Equation du circuit

L'application de l'équation de Kirchhoff au nœud P sur la figure II.2 donne

$$i + i_k - (i + \frac{\partial i}{\partial x}dx) - (i_k + \frac{\partial i_k}{\partial x}dx) - ic = 0$$
(II.1)

D'où :

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

Comme :

$$i_c = -c \frac{\partial u}{\partial t} dx \tag{II.3}$$

En égalant (II.2) et (II.3) on a :

$$\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} = -c\frac{\partial u}{\partial t}$$
(II.4)

Sur la capacité $\frac{k}{dx}$ on a la relation :

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

D'où

$$i_k = -k \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \tag{II.6}$$

$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = -k \frac{\partial^3 u}{\partial x^3 \partial t}$$
(II.7)

Sur l'inductance L on a la relation :

(II.8)

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

D'où :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t}$$
(II.09)
Et
$$\frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x}$$
(II.10)

En multipliant les deux membres de l'équation II.10 par $\frac{\partial t}{\partial r}$:

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} \tag{II.11}$$

En sommant II.11 et II.7 on obtient :

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

En égalent II.4 et II.12 puis en multipliant membre par membre l'équation obtenue par

$$L\frac{\partial u}{\partial t}$$
 on aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - Lc \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + Lk \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0$$
(II.13)

La solution de l'équation (II.13) est de la forme $u = U_0 \cos \omega t \sin \beta t$ elle représente une onde stationnaire.

 ω est la pulsation. $\omega = 2\pi f$.

 β est la constante de propagation. $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ est la longueur d'onde.

II.2.2 Répartition initiale de la tension sur un enroulement du transformateur

Lorsqu' on étudie la répartition initiale de la tension en régime transitoire, sur un bobinage, la contribution des inductances est nulle car le courant ne parcourt plus les spires à cause de leur forte réactances d'induction (ωL) et ne circule qu'à travers les capacités transversales(C). C'est donc uniquement la répartition due à la présence des capacités que l'on prend en compte [17].

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

Pour calculer la distribution initiale de la tension, on admet que les réactances (ωL) sont égales à l'infinie, et considère que la répartition de la tension ne dépond que des capacités fig II.4.



Figure .II.4 Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition initiale de la tension[17].

Dans l'hypothèse ou $L \rightarrow \infty$ l'équation II.13 devient :

$$-c\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + k\frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0$$
(II.14)

Au temps t=0 on pose $u(x,0) = u_x$

L'équation II.14 devient

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{c}{k} u_x = 0 \tag{II.15}$$

La solution de l'équation II.15 est de type :

$$u_x = A \exp(\alpha . x) + B \exp(-\alpha . x)$$
(II.16)

Où
$$\alpha = \sqrt{\frac{c}{k}}$$

Les paramètres A et B de l'équation (II.16) sont déterminés par les conditions initiales et aux limites.

Conditions initiales et aux limites :

Pour
$$x = 0$$

 $u_x = 1pu$
Pour $x = l$ (point mis à la terre)
 $u_x = 0$
En introduisant u_x dans (II.16) on aura
Pour $x = 0$, $1 = A + B$ d'où $B = 1 - A$
Pour $x = l$, $0 = A \exp(\alpha l) + B \exp(-\alpha l)$
On aura

$$A = \frac{\exp(-\alpha . l)}{\exp(\alpha . l) - \exp(-\alpha . l)}$$
$$B = \frac{\exp(\alpha . l)}{\exp(\alpha . l)}$$

$$=\frac{1}{\exp(\alpha .l)-\exp(-\alpha .l)}$$

En remplaçant valeur de A et B dans (II.16) on obtient :

$$u_{x} = \frac{\exp[\alpha(l-x)] - \exp[-\alpha(l-x)]}{\exp(\alpha l) - \exp(-\alpha l)}$$
(II.17)

Oui peut s'écrire sous la forme hyperbolique

$$u_x = \frac{sh[\alpha(l-x)]}{sh(\alpha,l)}$$
(II.18)

 Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est isolé de la terre

Condition initiale et aux limites

Pour
$$x = 0$$

 $u_x = 1pu$

Pour
$$x = l$$
 (II.19)

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x=1} = 0 \quad pu \tag{II.20}$$

En introduisant II.19 et II.20 dans II.16 on aura

Pour
$$x = 0, 1 = A + B$$
 d'où $B = 1 - A$ (II.21)

Pour
$$x = l$$
, $0 = rA \exp(rl) + B \exp(-rl)$ (II.22)

En combinons les équations II.21 et II.22 on aboutie a

$$A = \frac{\exp(-\alpha l)}{\exp(\alpha l) - \exp(-\alpha l)}$$

En introduisant la valeur de A dans II.16 on aura

$$u_{x} = \frac{\exp[r(l-x)] + \exp[-r(l-x)]}{\exp(rl) + \exp(-rl)}$$
(II.23)

Qui peut s'écrire sous la forme hyperbolique suivante

$$u_x = \frac{ch[r(l-x)]}{ch(rl)}$$
(II.24)

II.2.3 Répartition finale de la tension sur un enroulement du transformateur

Le passage de la répartition initiale de la tension à la répartition finale en chaque point de l'enroulement est un phénomène transitoire .A la fin de ce phénomène et après un intervalle de temps, l'onde de la tension se repartit uniformément le long de l'enroulement [18].

II.3 Protection des équipements contre les surtensions

La protection des équipements électriques (transformateur,....) contre les surtensions plus élevée que son niveau de tenue d'isolation (BIL) peut être faite en connectant en parallèle avec l'équipement (entre phase et terre) un élément de protection comme montré à la figure (II.5).



Figure II.5 Protection d'un équipement électrique par un élément parallèle.

Le rôle de l'élément de protection est de maintenir sa tension à un niveau maximal inférieur au niveau de tenue de l'équipement. La différence entre la tension de claquage de l'équipement et le niveau de protection maximal est la marge de protection.

L'élément de protection parallèle doit posséder les caractéristiques suivantes :

-Son impédance doit être la plus grande possible durant le fonctionnement normal du réseau afin de minimiser les pertes en régime permanent.

-Durant les surtensions, il doit être capable de dissiper ou stoker l'énergie du régime transitoire.

- Après les surtensions, il doit être capable de revenir à l'état 'circuit ouvert' [13].

Parafoudre à oxyde de zinc

Le parafoudre à oxyde de zinc (Metal-oxide surge arrester) est le dispositif de protection le plus utilisé dans les réseaux électriques.

La figure II.6 illustre les domaines d'application des parafoudres à ZnO.



Figure II.6 Domaine d'application des parafoudres [13].

Ces parafoudres ne peuvent être utilisés pour limiter les surtensions temporaires (TOV) à la fréquence de réseau .Il sont conçu pour pouvoir résister à des surtensions temporaires sans subir de dommage.

Le parafoudre ZnO est constitué d'un empilement de résistance non linaires à oxyde de zinc. A des tensions normales, la résistance de parafoudre est extrêmement élevée. Le courant en régime permanent est dans l'ordre de μA et les pertes sont de quelque watts.

Durant les surtensions, la résistance diminue rapidement à des valeurs très faibles se qui limite la tension à une valeur sécuritaires (inférieur au niveau de claquage).L'énergie des transitoires est dissipée dans la résistance. Après que la surtension soit passé, la résistance revient naturellement à sont état.

La figure II.7 montre la caractéristique V-I d'un parafoudre à ZnO typique connecté entre une phase et la terre d'un réseau de 420kV (avec le neutre et mise à la terre) [13].



Figure II.7Caractéristique V (I) d'un parafoudre à ZnO typique dans un système 420KV [13]

Structure des parafoudres à oxyde de zinc.

Le parafoudre à ZnO est constitué d'un empilement de résistances non linaires (Varistances) dans une enveloppe en porcelaine ou en matière synthétique (Fibre de verre résine)[13].



résistances à ZnO sont en général de forme cylindrique.



Source: Siemens

Figure II.8 Parafoudre à oxyde de zinc [13].

Conclusion

Un transformateur relié à une ligne HT est soumis à différents types de surtension, dont la connaissance est très importante en vue de meilleure exploitation de transformateur.

Introduction

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

C'est le cas également d'une connexion accidentelle entre phases ayant une impédance négligeable pour la limitation de courant de court -circuit .On dit aussi que c'est un courant de défaut dés lors que cela représente un fonctionnement anormal du système et de ces équipements. Les courants de défauts sont caractérisés par des valeurs très élevées.

Dans un réseau, le régime du neutre joue un rôle très important. Lors d'un défaut d'isolement, ou de la mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre [19].C'est pour cette raison qu' avant les calculs des paramètres du schéma équivalent on présente les différents régimes du neutre et les différentes formes de courants de court- circuit.

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

-amortir convenablement les surtensions

-limiter l'importance des dégâts et des perturbations dus à un défaut à la terre

-permettre la réalisation de protections simples et sélectives.

La connexion du neutre à la terre peut être réalisé directement, ou par l'intermédiaire d'une résistance ou d'une réactance linéaire ou non linéaire. Dans le premier cas, on dit que l'on a un neutre directe à la terre et dans le second cas, que le neutre et impédant.

Lorsqu'il n'existe aucune liaison intentionnelle entre le point neutre et la terre, on dit que le neutre est isolé.

III.1 Les différents régimes du neutre

Les différents modes de raccordement du point neutre à la terre sont

- le neutre directement mis à la terre
- le neutre isolé, ou fortement impédant
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une résistance
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance accordée (bobine de Peterson)[20]

III.2.1 Types de court circuit

Il existe principalement deux types de court circuit :[20]

- Les courts circuits symétrique : il s'agit des courts circuits triphasés isolés ou à la terre
- Les courts circuits dissymétriques :
 - > il s'agit des courts circuits monophasés (phase-terre)
 - > court circuit biphasé isolé (phase-phase) ou à la terre (phase- phase- terre)





- a) CC monophasé (phase -terre)
- b) CC monophasé à travers une impédance





c) CC biphasé isolé



d) CC biphasé terre



e) CC biphasé terre à travers une impédance



f) CC triphasé terre



g) CC triphasé



h) CC triphasé terre à travers

Figure III.1 Les différents courts-circuits

II.2.2 Méthode de calcul des courants de court-circuit

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

Méthode des impédances

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

$$I_{cc} = \frac{U_n}{\sqrt{3}\sum Z}$$

Ou U_n est la tension nominale

Z est l'impédance totale

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

Méthode de composition

La méthode est utilisable quand les caractéristiques de l'alimentation ne sont pas connues. L'impédance amont du circuit considéré est calculée à partir de l'estimation du courant de court-circuit à son origine, le $cos\varphi = \frac{R}{x}$ est considèré comme identique à l'origine comme au point du défaut. En d'autres termes cela consiste à admettre que les impédances élémentaires de deux tronçons successifs de l'installation possèdent des arguments suffisamment voisins pour justifier le remplacement des additions vectorielles par additions algébriques des impédances.

Cette approximation permet d'obtenir la valeur des courants de court-circuit avec une précision suffisante pour ajouter un circuit.

Méthode conventionnelle

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

On s'intéresse, dans notre étude, au calcul des courants de court- circuit monophasé, biphasé et triphasé dans un réseau, figure III.2, avec les différents régimes de neutre et cela par simulation sous Logiciel Orcad 10.5

III.3 Description du réseau à étudier

C'est un réseau de 220kV, constitué de deux centrales : la première comprend quatre alternateurs et quatre transformateurs élévateurs, et quant à la deuxième elle comprend quatre alternateurs et deux transformateurs. Les deux centrales sont connecté a un jeu de barre, l'une à travers deux lignes en parallèles de 150 km tandis que l'autre est connecté directement alimentant un réseau par deux lignes en parallèles de 250 km et deux charges, S₁ à travers deux lignes en parallèles de 100 km et S₂ par une ligne de 200 km (Fig III .2)

III.3.1 Caractéristiques des éléments du réseau :

	Alternateur A1	Alternateur A2		
S _n	125 MVA (P _n =100MW)	40 MVA (P _n =32 MW)		
V _n	10,5 kV	10,5kV		
In	6,875kA	2,2kA		
Cosa	0,8	0,8		
X _d	0.192	0,153		
X _d	1,907	2,648		
X ₀	0,097	0,074		
Xz	0.234	0.187		

Alternateurs :

Tableau III.1 : Caractéristiques d'un alternateur

Transformateurs :

	Transformateur T1	Transformateur T2
S _n	125MVA	80MVA
V _n	220/10.5 kV	220/10.5kV
ΔP_{cc}	380 kW	79 kW
ΔΡ0	120 MW	315 kW
Ucc %	11%	11%
Io	0.55%	0,45%

Tableau III.2 : Caractéristiques d'un transformateur

Lignes :

	Ligne 1	Ligne 2	Ligne 3	Ligne 4
l, Km	150	200	100	250
D _m ,m	7	7	7	7
d ₀ , mm	21.5	21.5	21,5	21.5
r ₀ , Ω/Km	0,13	0,13	0,13	0,13

Tableau III.3 : Caractéristiques des lignes

Le réseau électrique :

 $\mathbf{S_{cc}} = 5000 \text{ MVA}$ $\mathbf{E_r} = 1$

 $X_r = 0,2$

Charge :

	Ch1MVA	Ch2 MVA
Sch	160	100

Tableau III.4 : Caractéristiques des charges

Jeu de barre

Sur le quel les lignes l₂, l₃, l₄ sont connectées. Caractérisé par Cjb et Gjb

$$C_{jb} = 0,1 \div 0,15 \ \mu F$$

 $G_{jb} = 3.10^{-6} \Omega^{-1}$



Figure III.2 Schéma du réseau considéré

III.3.2 Les paramètres du schéma modélisé :

Transformateur T₁

Calcul des inductances :

$$L_{T1} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{2.3,14.50} \frac{11}{100} \frac{220^2}{125} = 0.1356H$$
(III. 1)

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = \frac{L_{T1}}{2.4} = \frac{0.1356}{2.4} = 0.01695H$$

f : la fréquence du réseau

 $U_{cc}\colon$ la tension du court circuit des transformateurs

U_n: la tension nominale du transformateur

Remarque :

Vue qu'on a quatre transformateurs en parallèles on divise la valeur de l'inductance par quatre puis par deux puisque on considére un seul enroulement du transformateur.

Ligne l_1

Les inductances :

$$X_{0} = 0,144.\log \frac{2D_{m}}{d_{c}} + 0,016 = 0,144.\log \frac{2.7000}{21.5} + 0.016 = 0,4211\Omega/km$$
(III.2)
$$X_{0} = 0.4211\Omega/km$$

 $X_0 = L_0 \cdot \omega$ d'où

$$L_0 = \frac{X_0}{\omega} = \frac{X_0}{2\pi f} = \frac{0.4211}{2.3,14.50} = 1.34.10^{-3} H/km$$

$$L_0 = 0,134.10^{-3} H/km$$

$$L_{l1} = L_0. l_1 = 1,34. 10^{-3}. 150 = 0.201 H$$

$$L_4 = L_5 = L_6 = \frac{L_{l1}}{2} = 0,1005H$$

X₀ : la réactance kilométrique des lignes

D_m: distance moyenne entre les conducteurs des phases des lignes

d_c : diamètre des conducteurs des phases

L₀: Inductance kilométrique des lignes

Remarque :

On a divisé l'inductance par deux car en à deux lignes en parallèles.

Les Capacités :

$$B_{0} = \frac{7,58.10^{-6}}{\log \frac{D_{m}}{r_{c}}} = \frac{7,58.10^{-6}}{\log \frac{7000}{10,75}}$$
(III.3)
$$B_{0} = 2,69.10^{-6}\Omega/km$$

 $B_0 = C_0 \cdot \omega$ d'où

$$C_0 = \frac{B_0}{\omega} = \frac{B_0}{2\pi f} = \frac{2,69.10^{-6}}{2.3,14.50} = 8,57.10^{-9} \text{F/km}$$

$$C_{\ell 1} = C_0 l_1 = 8,57.10^{-9} l_2 = 1285,5.10^{-9}$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 2.C_{\ell 1} = 2,568 \mu F$$

B₀ : la conductibilité kilométrique des lignes

r_c: Rayon des conducteurs des phases

C₀: la capacité kilométrique des lignes

Les résistances :

$$R_{L1} = R_0 \cdot l_1 = 0,13.150 = 19,5\Omega$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{R_{\ell 1}}{2} = 9,75\Omega$$

R₀ : la résistance kilométrique des lignes

Transformateurs T₂

Calcul des inductances :

$$L_{T2} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{2.3,14.50} \frac{11}{100} \frac{220^2}{80} = 0,2119H$$

$$L_{T2} = 0,2119H$$

$$L_7 = L_8 = L_9 = \frac{L_{T2}}{2.2} = \frac{0,2119}{2.2} = 0,05298H$$

Remarque

On a divisé l'inductance par deux car on a deux transformateurs en parallèles puis par deux car on considère juste un seul enroulement du transformateur.

Ligne ℓ_4 et ℓ'_4

a) Les inductances

$$X_0 = 0,144.\log \frac{2D_m}{d_c} + 0.016 = 0,144.\log \frac{2.7000}{21,5} + 0,016 = 0,4211\Omega/km$$

$$X_0 = 0,4221 \Omega/\mathrm{km}$$

$$X_{0} = L_{0}.\omega d'ou \quad L_{0} = \frac{X_{0}}{\omega} = \frac{X_{0}}{2\pi \cdot f} = \frac{0.4211}{2.3,14.50} = 1.34.10^{-3} H/km$$
$$L_{0} = 1.34.10^{-3} H/km$$
$$L_{14} = L_{0}.l_{4} = 1.34.10^{-3}.250 = 0.335H$$
$$L_{10} = L_{11} = L_{12} = \frac{L_{L4}}{2} = 0.1675$$

b) Les capacités

$$B_0 = \frac{7,58.10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_c}} = \frac{7,58.10^{-6}}{\log \frac{7000}{10,75}} = 2,69.10^{-6} \Omega/km$$

 $B_0 = C_0.\,\omega$

$$C_0 = \frac{B_0}{\omega} = \frac{B_0}{2\pi . f} = \frac{2,69.\ 10^{-6}}{2.3,14.50} = 8,57.\ 10^{-9} F/km$$
$$C_0 = 8,57.\ 10^{-9} F/km$$

$$C_{L4} = C_0 \cdot l_4 = 8,57 \cdot 10^{-9} \cdot 250 = 2187,5 \cdot 10^{-9} F$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 2. C_{\ell 4} = 4,374 \mu F$$

c) les résistances

$$R_{L4} = R_0. \ell_4 = 0,13.250 = 32,5\Omega$$

$$R_4 = R_5 = R_6 = \frac{R_{L4}}{2} = 16,25\Omega$$

Le réseau électrique

$$X_r = 9,68\Omega$$
$$X_r = L_r.\omega$$

$$L_r = L_{13} = L_{14} = L_{15}$$

$$L_r = \frac{X_r}{\omega} = \frac{X_r}{2.\pi.f} = \frac{9,68}{3,14} = 0,03082H$$

III.4 Modèle adopté pour le transformateur :

Le comportement d'un enroulement de transformateur soumis à une onde de choc est assimilé à un système d'éléments .On discrétise l'enroulement par un ensemble fini d'élément, chaque élément et représenté par sa résistance, son inductance propre qui est couplé mutuellement avec les autres inductances, entre les éléments il existe des capacités de couplage et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse.[23]



Figure III.3 Représente le schéma équivalent d'un enroulement HT de transformateur

III .4.1 Equations du schéma équivalent adopté

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la figure nous a permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courant des enroulements HT.

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 [24] et[25].

> Equations des tensions pour l'enroulement HT

$$u_{1} - u_{2} = R.\,i_{1} + L.\frac{di_{1}}{dt} + M_{12}.\frac{di_{2}}{dt} + M_{13}.\frac{di_{3}}{dt} + M_{14}.\frac{di_{4}}{dt} + M_{15}.\frac{di_{5}}{dt} + M_{16}.\frac{di_{6}}{dt}$$
$$u_{2} - u_{3} = R.\,i_{2} + L.\frac{di_{2}}{dt} + M_{21}.\frac{di_{1}}{dt} + M_{23}.\frac{di_{3}}{dt} + M_{24}.\frac{di_{4}}{dt} + M_{25}.\frac{di_{5}}{dt} + M_{26}.\frac{di_{6}}{dt}$$
$$u_{3} - u_{4} = R.\,i_{3} + L.\frac{di_{3}}{dt} + M_{31}.\frac{di_{1}}{dt} + M_{32}.\frac{di_{2}}{dt} + M_{34}.\frac{di_{4}}{dt} + M_{35}.\frac{di_{5}}{dt} + M_{36}.\frac{di_{6}}{dt}$$

$$u_{4} - u_{5} = R.i_{4} + L.\frac{di_{4}}{dt} + M_{41}.\frac{di_{1}}{dt} + M_{42}.\frac{di_{2}}{dt} + M_{43}.\frac{di_{3}}{dt} + M_{45}.\frac{di_{5}}{dt} + M_{46}.\frac{di_{6}}{dt}$$
$$u_{5} - u_{6} = R.i_{5} + L.\frac{di_{5}}{dt} + M_{51}.\frac{di_{1}}{dt} + M_{52}.\frac{di_{2}}{dt} + M_{53}.\frac{di_{3}}{dt} + M_{54}.\frac{di_{4}}{dt} + M_{56}.\frac{di_{6}}{dt}$$
$$u_{6} - u_{7} = R.i_{6} + L.\frac{di_{6}}{dt} + M_{61}.\frac{di_{1}}{dt} + M_{62}.\frac{di_{2}}{dt} + M_{63}.\frac{di_{3}}{dt} + M_{64}.\frac{di_{4}}{dt} + M_{56}.\frac{di_{5}}{dt}$$

Généralisation

Généralisations le système d'équation (III.4) pour n éléments de bobines montés en série comme suit :

$$1 \le k \le n$$
$$u_k - u_{k+1} = R.\,i_k + L.\frac{di_k}{dt} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n M_{kl}.\frac{di_l}{dt} \quad (III.5)$$

> Equations des courants pour l'enroulement HT

$$i_{0} - i_{1} = -K \cdot \frac{du_{2}}{dt} + (C + K) \frac{du_{1}}{dt}$$

$$i_{1} - i_{2} = -K \cdot \frac{du_{1}}{dt} + (C + 2K) \frac{du_{3}}{dt} - K \cdot \frac{du_{3}}{dt}$$

$$i_{2} - i_{3} = -K \cdot \frac{du_{2}}{dt} + (C + 2K) \frac{du_{3}}{dt} - K \cdot \frac{du_{4}}{dt}$$

$$i_{3} - i_{4} = -K \cdot \frac{du_{3}}{dt} + (C + 2K) \frac{du_{4}}{dt} - K \cdot \frac{du_{5}}{dt}$$

$$i_{4} - i_{5} = -K \cdot \frac{du_{4}}{dt} + (C + 2K) \frac{du_{5}}{dt} - K \cdot \frac{du_{6}}{dt}$$

$$i_{5} - i_{6} = -K \cdot \frac{du_{5}}{dt} + (C + 2K) \frac{du_{6}}{dt} - K \cdot \frac{du_{7}}{dt}$$

$$i_{6} - i_{7} = -K \cdot \frac{du_{6}}{dt} + (C + K) \frac{du_{7}}{dt}$$
(III.6)

Avec :

$$i_0 = \frac{u_0 - u_1}{dt}$$
 et $i_7 = \frac{1}{R_n} u_7$

Généralisation

Le système sera généralisé à n éléments comme suit :

Pour $1 \le k \le n-1$

$$i_{k} - i_{k+1} = -K \cdot \frac{du_{k}}{dt} + (C + 2K) \frac{du_{k+1}}{dt} - K \cdot \frac{du_{k+2}}{dt} \qquad (III.7)$$

Pour k =0

$$i_0 - i_1 = (C + K)\frac{du_1}{dt} - K.\frac{du_2}{dt}$$

-0

Λ-

Pour k=n

$$i_n - i_{n+1} = -K \cdot \frac{du_n}{dt} + (C + K) \frac{du_{n+1}}{dt}$$

III.4.2 Représentation matricielle

Le système d'équation s'écrira :

De la forme AU = LI' + RI

- 1 -							Įυ	•••	U		
$\begin{bmatrix} -\iota_1 \\ \iota_1 - \iota_2 \end{bmatrix}$	$\Gamma C + K$	-K	0		ך 0	$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$	0		0		0]
$ i_1 - i_2 $	<i>−K</i>	C + 2K	-K		0	$, u_{2}$	0		0		
$ \dot{i}_{2} - \dot{i}_{4} =$					0	$\frac{d}{ u_4 }^{ u_3 }_+$			0	+ 0	
$ i_4 - i_5 $			•••		0	$dt u_5 $	0		0		
$\begin{vmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{i} $			-K	C + 2K	-K	$ \mathbf{u}_{\mathbf{c}} $			0		
<i>i</i>	L 0		0	-K	$C + K^{\perp}$	$\begin{bmatrix} u_{7} \\ u_{7} \end{bmatrix}$	0		1		
- 6 -						,	L		R_n	U	

Sous la forme matricielle

$$BI = CU' + YU + I_0$$

$$U' = (-C^{-1}Y)U + (C^{-1}B)I + (-C^{-1}I_0)$$

III .5 Procédure de calcul des paramètres

Le calcul des paramètres du transformateur est basé sur les caractéristiques géométriques de transformateur

III.5.1Calcul des éléments résistifs

 \mathbf{R}_0 : est la résistance de l'enroulement HT à la fréquence 50HZ.

$$R_0 = \frac{\nabla P_{cc}. U_n^2}{S_n^2} \quad (III.8)$$

 ∇Pcc : sont les pertes de puissances en court circuit.

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

La relation suivante, exprime la dépendance entre la résistance de l'enroulement R_{∇} au cas d'application d'une onde de tensions impulsionnelle [26].

$$R_{\nabla}=K_1.R_0$$

K₁: est le facteur de précision de la résistance

Comme l'enroulement est constitué de n éléments

La résistance d'un élément HT est

$$R_{HT}=\frac{R_{\nabla}}{n}$$

III.5.2 Calcul des éléments inductifs et les coefficients des mutuelles δ_{ij}

Inductance propre de l'enroulement HT

Le calcul de l'inductance totale de l'enroulement revient à calculer l'inductance L_{cc} du régime de court circuit [27].

$$L_{tot}' = K_2.L_{cc}$$

K₂: est la facteur qui tient compte de la forme d'onde appliquée à l'enroulement.

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

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

 U_{cc} : est la tension de court circuit du transformateur.

f : fréquence de service.

Les inductances mutuelles sont calculées par la fonction suivante :

$$\frac{M_{ij}}{L} = \mathbf{F}(\frac{a}{b})$$

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

b : est la distance entre l'enroulement et le noyau

a et b dépendent des caractéristiques géométriques de l'enroulement et du noyau $d_{ext} = 1782mm$ $d_{int} = 1110mm$ $d_n = 870mm$ $\ell = 2237mm$

La longueur d'un élément de l'enroulement est donc : a = $\frac{2237}{10}$

a= 223,7mm

La valeur de b est donnée par :

 $b = r_{moyHt} - r_n$

$$r_{moyHT} = \frac{r_{extHT} + r_{intHt}}{2} = \frac{891 + 555}{2} = 723mm$$
$$b = 723 - 435 = 288mm$$



Figure. III.4 Caractéristiques géométriques du transformateur

Connaissant a et b, on détermine les valeurs des inductances mutuelles qui seront résumées dans le tableau **III.5**

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

$$L = \frac{L'}{1 + \sum \sigma}$$

(*III*.9)

N° de la	a	b	a/b	M _{ij}	$\sigma = M_{ij}$
mutuelle	(mm)	(mm)		(µH)	
1	223,7		0,7767	1912	0,5
2	447,4		1,5534	880	0,23
3	671,1	288	2,3301	460	0,12
4	894,8		3,1068	230	0,06
5	1118,5		3,8835	115	0,03
6	1342,2		4,6602	57,5	0,02
7	1565,9		5,4369	30,60	0,008
8	1789,6		6,2136	11,5	0,003
9	2013,3		6,9903	7,65	0,002

Tableau III.5 : Les inductances mutuelles

III.5.3Calcul des éléments capacitifs

Calcul des capacités transversales C

Le calcul de la capacité entre l'enroulement HT et la masse (cuve) est donnée par la formule suivante : [28]

$$C_{1tot} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{cuv} + d_{exHT}}{d_{cuv} - d_{exHT}}$$
(III.10)

 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 :

$$C_{HT} = \frac{C_{1tot}}{Nombre \ d' \acute{e}lement + 1}$$
(III. 11)

> Calcul des capacités longitudinales K_{HT}

 $Connaissant \ les \ valeurs \ des \ capacités \ C_{HT}, \ on \ peut \ passer \ facilement \ au \ calcul \ des \\ capacités \ longitudinales \ K_{HT} \ par \ la \ formule \ suivante \ [28] :$

$$C_{ent.Tr} = \frac{1}{U_0} \cdot K_{tot} \cdot U_0 \cdot \alpha \qquad (III.12)$$
$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}} \quad d'ou \quad C_{ent.Tr} = \sqrt{K_{tot} \cdot C_{tot}}$$

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

IV.1 Application et discussion des résultats :

Le schéma du réseau donné par la figure III-2 a été modélisé et implémenté sous environnement Orcad 10.5, ceci pour les déférents régimes de neutre.

IV.1.1 Court-circuit monophasé lors de neutre isolé de la terre :



Figure IV.1.1 Le schéma équivalent du réseau considéré le c.c est au début de la ligne 2(point K₁)



Le neutre mis à la terre

Figure IV.1.2 Courant de court circuit monophasé sur le point K1, de la 1^{ere} Phase.



Figure IV.1.3 Le schéma équivalent du réseau le c.c est à la fin de la ligne $2(point K_2)$



le neutre mis à la terre

Figure IV.1.4 Courant de court circuit sur le point K2

Discussion des résultats :

Les valeurs maximales des courants de courts circuits sur le point K1 sont très élevées par rapport au point K2, lorsque le neutre est mis directement à la terre les courants de

	K1	K2
Isolé de la terre	Icc=19 kA	$I_{cc}=2,3kA$
Mise directe à la terre	Icc=32kA	$I_{cc}=2,5$ kA

court circuit sur le point K1 sont plus dangereux. Le tableau si dessous représente les différentes valeurs.

Tableau IV.1.Les courants de courts circuits

IV.1.2 Court-circuit Monophasé le neutre est mis à la terre à travers une résistance

Le schéma du réseau monophasé avec neutre mis à la terre à travers une résistance est donné par la figure IV.1.5, on fait varier la valeur de résistance de 15Ω à 80Ω on relève les différentes valeurs de courant de court -circuit sur le point K₁.



Figure IV.1.5 Le schéma équivalent du réseau considéré le neutre est mis à la terre à travers une résistance



R=30Ω



 $R=80\Omega$

Figure IV.1.6 Courant de court –circuit lors de mise à la terre du neutre à travers une résistance

Discussion des résultats :

On remarque qu'en faisant varier la résistance de 15Ω à 80 Ω les courants de court-circuit diminue ,comme indiqué dans le tableau IV.2

	R=15Ω	R=30Ω	R=60Ω	R=80Ω
I_{cc} (kA)	22	20,5	19,5	19,2

Tableau IV.2.Les courants de courts circuits sur le point K₁

Les valeurs maximales des courants de court -circuit avec neutre mis à la terre à travers une résistance sont moins dangereux par rapport au neutre mis directement à la terre.

1.3 Court-circuit Monophasé le neutre est mis à la terre à travers une résistance variable

Le schéma du réseau ou le court circuit monophasé avec neutre mis à la terre à travers une résistance variable est donné par la figure IV.1.7.



Figure IV.1.7 Le schéma équivalent du réseau considéré : Le neutre est mis à la terre à travers une résistance variable



Figure IV.1.8 Courant de c.c. Le neutre est mis à la terre à travers une résistance variable **Discussion des résultats :**

Le courant de court -circuit lorsque le neutre est mis à la terre à travers une résistance variable et moins dangereux par rapport au neutre mis direct à la terre et la valeur de courant de court -circuit Icc=18,5 kA est très proche de neutre isolé de la terre

1.4 Le courant de court-circuit monophasé la mise à la terre à travers une inductance

Le schéma modélisé du réseau avec le court -circuit monophasé ou le neutre est mis à la terre à travers une inductance est donné par la figure IV.1.9.En faisant varier les valeurs de l'inductance on relève les différentes valeurs maximales de courant de court -circuit.



Figure IV.1.9 Le schéma équivalent du réseau considéré le neutre est mis à la terre à travers une inductance



L=0,0159H



Figure IV.1.10 Courant de court circuit la mise à la terre à travers une inductance
Le courant de court circuit lorsque le neutre est mis à la terre à travers une inductance et moins dangereux par rapport au neutre mis directement à la terre et les valeurs maximales des courants de court -circuit pour les différentes valeurs des inductances sont donnés par le tableau IV.3

	L=0,0095H	L=0,0159H	L=0,0222H	L=0,0286H
I_{cc} (kA)	28,5	27,5	26,5	25,5

Tableau IV.3.Les courants de courts circuits pour les différentes valeurs d'inductances

1.5 Court-circuit biphasé le neutre isolé de la terre :

Le schéma modélisé de réseau avec court -circuit biphasé sur le point K1 est donné par la figure 1.11



Figure IV.1.11 Schéma de réseau considéré avec court circuit biphasé





On constate que les valeurs des courants de court-circuit diminuent légèrement lorsque le neutre est isolé de la terre (25kA). Par rapport au cas où le neutre est mis à la terre (27,5kA).

4.5 Court-circuit triphasé :

Le schéma modélisé de réseau avec court circuit triphasé sur le point K1 est donné par la figure 1.13



Figure 1.13 Schéma de réseau considéré avec court circuit triphasé



Figure IV.1.14 Courant de court circuit triphasé

On constate que les valeurs maximales des courants de court circuit ne diminuent pas lorsque le neutre est isolé de la terre (26,58kA), mis à la terre (26,72kA).

Conclusion

D'après cette étude on constate le courant de court circuit triphasé et plus dangereux que le courant de court circuit monophasé, et le courant de court circuit prés de la source et plus sévère .En effet le neutre mis à la terre à travers une résistance ou inductance limite les courants de court -circuit.





Figure IV.2.1 Schéma équivalent de l'enroulement HT du transformateur



Figure IV.2.2 Surtension sur le neutre isolé de la terre

La valeur de la tension sur le neutre de l'enroulement isolé de la terre (3500kV) est plus grande que la tension appliquée à l'entré de l'enroulement, le neutre isolé de la terre provoque la réflexion des oscillations dangereuses pouvant aller jusqu'au doublement de la surtension initiale.

4.2 Mise à la terre à travers une résistance

Le neutre du transformateur est mis à la terre à travers une résistance, les figures IV.2.3 représentent les valeurs de la tension sur le neutre de l'enroulement du transformateur pour les différentes valeurs de la résistance.



Figure IV.2.3.Le neutre est mis à la terre à travers une résistance

Pour les différentes valeurs de la résistance on obtient les valeurs sur le neutre de l'enroulement résumé dans le tableau IV.4

R =10Ω	$R = 20\Omega$	$R = 50\Omega$	R =100Ω
17,37kV	34,39kV	83,39kV	158,59kV

Tableau IV.4 La tension sur le neutre du transformateur pour les différentes résistances

La valeur de la tension à la sortie de l'enroulement est inférieure à la tension appliquée pour les différentes valeurs de la résistance.

2.3 Le neutre du transformateur est mis à la terre à travers une inductance

En mis à la terre la sortie du transformateur à travers une inductance, les figures IV.4 représentent les valeurs de la tension à la sortie de l'enroulement du transformateur pour les différentes valeurs de l'inductance.



Figure IV.2.4 Mise à la terre à travers une inductance

Pour les différentes valeurs de l'inductance on a obtenu les valeurs de la tension résumé dans le tableau IV.5.

L =0.0022H	L = 0.0045H	L =0.0095H	L=0.0195H
417,78kV	474,47kV	580,26kV	895,19kV

 Tableau IV.5 .Les tension sur le neutre de l'enroulement.

La valeur de la tension à la sortie de l'enroulement est inférieure à la tension appliquée pour les différentes valeurs de l'inductance.

Conclusion

Le neutre de l'enroulement isolé de la terre présente un grand danger pour le transformateur, mais la mise à la terre à travers une résistance ou bien inductance est une solution intéressante.



2.4 Simulation de l'enroulement lors d'application du parafoudre

Figure IV.2.5 Tensions de l'enroulement lors d'application du parafoudre.



La tension sur le neutre de l'enroulement isolée de la terre



Figure IV.2.6 La tension sur le neutre d'enroulement la mise à la terre à travers une résistance



Figure IV.2.7 La tension sur le neutre de l'enroulement la mise à la terre à travers une inductance

En appliquant une surtension d'ordre de 2200kV, le maximum de la tension sur le neutre d'enroulement isolé de la terre est d'ordre de 1117 kV et la tension à l'entrée de l'enroulement est de 704kV. Dans ce cas, la valeur de la tension est presque deux fois plus importante que la tension à l'entrée de l'enroulement, les deux tensions obtenues sont inférieures à la tension appliquée. La surtension est limitée par le parafoudre

En introduisant une résistance inférieure ou égale à 100Ω , ou une inductance d'ordre 0,0195H limite les surtensions.

Conclusion générale

Un défaut sur le réseau HT de transport et d'interconnexion peut conduire à un incident de grande ampleur privant d'alimentation une partie importante du territoire. Lors d'un défaut les valeurs prises par les courants de défauts, les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre.

On détermine le mode de mise à la terre en réalisant un compromis entre trois exigences souvent contradictoires :

- amortir convenablement les surtensions

-Limiter l'importance des dégâts et des perturbations dus à un défaut à la terre

- permettre la réalisation d'une protection simple et sélective.

Le neutre isolé entraine des risques de surtensions élevées qui favorisent l'apparition de défauts multiples, l'emploi de matériels sur isolés, une surveillance de l'isolement obligatoire.

Le neutre mis à la terre entraine très généralement un déclenchement obligatoire au premier défaut, mais, par contre, il amortie les surtensions et conduit à des protections simples sélectives, faibles. Il autorise l'emploi de matériel et en particulier de câble ayant un niveau d'isolement plus réduit que pour le neutre isolé.

La mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ou réactance sont souvent les solutions les plus intéressantes.

On a retenu de notre étude les points suivants :

- Le courant de court circuit triphasé et plus dangereux que le courant de courtcircuit monophasé, et le courant de court -circuit prés de la source et plus sévère que ce loin de la source.
- Lors le de la mise directe à la terre les valeurs des courants de défauts sont maximales, le neutre isolé de la terre permet de réduire les courants de court circuit, en effet le neutre à travers une résistance ou inductance minimise les courants de court circuit.

Les courants très élevés se rencontrent la plupart de temps en cas des défauts triphasé. Ils ne sont alors limités que par les impédances naturelles du réseau. Certaines compagnies d'électricités adoptent des dispositions constructives (installation de réactance de limitation par exemple) pour en réduire le niveau, la limitation peut également être obtenue en jouant sur le schéma d'exploitation débouclage partiel des réseaux au point ou le courant de court-circuit risque de dépasser les valeurs admissibles.

En cas de défaut à la terre, Le niveau des courants de court-circuit dépend très fortement du mode de mise à la terre des points neutre des réseaux. L'interposition d'une impédance dans cette mise à la terre permet de réduire les courants de court –circuit et aussi les surtensions.

Dans de nombreux pays comme l'Algérie aucune mesure particulière n'est prise pour limiter les courants de défauts à la terre ; les points neutres sont, en général raccordés à la terre.

De même ; les courants de court circuit à la terre peuvent être considérablement réduits par le choix de schéma d'exploitation mais aussi par la nature de court circuit lui-même ,certain défauts à la terre peuvent être très résistants (amorçage avec la végétation conducteur tombé au sol par exemple) et la résistance de défauts contribue alors à la réduction du courant de défaut ,il apparait donc que le niveau des courants de défauts peut descendre à des valeurs très faibles, par fois inferieur aux courants de charge normaux, De telle conditions sont particulièrement contraignantes pour les protections qui doivent être très sensible a avoir une dynamique de fonctionnement importante, Ces aspects ne doivent jamais être perdue de vue lorsque l'on a concevoir un système de protection .

Les contraintes à considérer pour concevoir le plan de protection des réseaux THT de transport et d'interconnexion découle des spécifications de ces réseaux et des conditions de fonctionnement qui en résultent. Ces conditions imposent aux protections les performances suivantes.

- Rapidité d'élimination des défauts
- Sélectivité d'élimination des défauts
- Fiabilité des protections statique analogiques
- Niveau des courants de défauts

D'une autre part on a retenue de notre étude de l'influence de la mise à la terre sur les surtensions

- La valeur de la surtension sur le neutre de l'enroulement du transformateur est supérieure à la surtension appliquée lorsque le neutre est isolé de la terre.
- > La surtension sur le neutre de l'enroulement est inférieure à la surtension appliquée lors de la mise à la terre à travers une résistance ou inductance jusqu'à 100Ω .

Le choc tripolaire est le cas le plus grave des surtensions. Nous suggérons une étude des surtensions dans les trois enroulements du transformateur.

Les défauts et les surtensions se traduisent toujours par un échauffement du matériels électrique, nous proposons en perspective pour ce travail une étude sur l'évaluation des températures de fluide isolant du transformateur.

Bibliographie

[1] L.LASNE « électrotechnique» édition Dunod ,2008 .

[2] **P.AURIOL** « Contribution à l'étude numérique des régimes transitoires dans les réseaux à très haute tension » .Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon, 1972

[3] **F.BEACLAIR .J.P.DELVINQUIER.J.P.GROS** « Transformateur et inductances » Technique d'ingénieur, E2 130

[4] M.LOPEZ FERNANDEZ « Transformer in practice» edited by VIGO SPAIN 2006.

[5] J. BOURBOUN « Technologie des postes HTA/BT » édition 2010

[6]B.HOCHART « Le transformateur de puissance » édition Lavoisier 1988

[7] J. CHATELAIN «Traité d'électricité» édition Géorgie ,1982

[8] **A.LEFEVER** .**A** «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateur». Thése doctorat, école polytechnique de Nantes, 2006

[9] D.BARRILLE, J.P.DAUNIS « Transformateurs et machines électriques », Dunod 2005

[10] **A.RAKOTOMALA** « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régime haute fréquence », Thèse de doctorat université de LYON 1996

[11] **N. MUFIDZADA N, T. OTMANE-CHEIF** « Etude de l'influence du noyau sur les surtensions implusionnelles dans les enroulements du transformateur»,2009

[12] « les surtensions et la coordination de l'isolement » guide de la conception des réseaux électrique industriels Schneider électrique,6883 427/A.

[13] **HOANG LE-Huy** « Surtensions et parafoudres» GEL 22230 appareillage électrique université de LAVAL 2008.

[14] **C.CORROYER ,P.DUVEAU** «Protection des réseaux de transport et de répartition» techniques d'ingénieur traité électrique D 4 806

[15]F. AFFOLTER «Haute tension » Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud , Suisse 2000

[16] **M. AGUET , M .LANOZ.** « Répartition des surtension le long d'un enroulement du transformateur » Bilan de travail Scientifique, série des surtensions 1971.

[17] D.VRAZEVIG, «Technique de haute tension »,édition ENGIYA, MOSCOU, 1989

[18] **M. KOSTENKO, PIOTROVSKI** «Machine à courant continu - transformateur » édition MIR, MOUSCOU , 1979

[19] IVANOV, A .SMOLENSKI «Machines électrique », édition MIR MOUSCOU, 1983

[20]**J.C SABONNADIERE ,N. HADJSAID** «Lignes et réseaux électrique » ,édition LAVOISERL 2007

[21] **F.SAUTIRIAU** , «Mise à la terre de neutre dans un réseau industriel haute tension» cahier technique Merlin Gerin n° 62/1991

[22]**J.SCHLABACH** «Short-circuit currents» The institution of electrical engineer LONDON 2005.

[23] **J. MIKULOVIE**, **M.SAVIE** « Calculation of transients in transformer winding determination of winding parameters », Electrical power and Energy2005

[24] **N.MUFIDZADA**, **T.OTMANE-CHERIF**, **M.MEGHARBI**« dans les Précision de calcul des surtensions dans les enroulements des transformateurs» Electrichestvo (Electrical technology Russia), N° 1, Page 56-57, Moscou, **2003**.

[25] **T.OTMANECHERI F,N.MUFIDZADA,N.BENAMROUCHE** «Influence of the number of the nodes in the windings equivalent circuit the surage voltages in the transformer» International review on modeling and simulation, Italy ,vol,1,N°2,2008

[26] **B. GUELLEUR, A. VEVERKA** « Les processus impulisionnels dans les machines électriques », MOSCOU 1973

[27]**A. LOKHANINE** « Détermination des inductances des transformateurs », MOUSCOU 1976

[28]A.LOKHANINE, V.POGOSTINE «Calcul des Capacités des enroulements de transformateur HT » Lvov 1973.

Résumé

Dans un réseau, le régime du neutre joue un rôle très important. Lors d'un défaut, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre.

Ce travail s'articule autour de l'influence du régime de neutre sur les surtensions et les intensités des courants de court circuit dans le réseau électrique. Le traitement numérique est effectué avec le logiciel de simulation Orcad 10.5.

On a retenu de notre étude les points suivants :

- Le courant de court circuit triphasé et plus dangereux que le courant de courtcircuit monophasé, et le courant de court -circuit prés de la source et plus sévère que ce loin de la source.
- Lors le de la mise directe à la terre les valeurs des courants de défauts sont maximales, le neutre isolé de la terre permet de réduire les courants de court circuit, en effet le neutre à travers une résistance ou inductance minimise les courants de court circuit.

D'une autre part on a retenue de notre étude de l'influence de la mise à la terre sur les surtensions

- La valeur de la surtension sur le neutre de l'enroulement du transformateur est supérieure à la surtension appliquée lorsque le neutre est isolé de la terre.
- > La surtension sur le neutre de l'enroulement est inférieure à la surtension appliquée lors de la mise à la terre à travers une résistance ou inductance jusqu'à 100Ω .

En cas de défaut à la terre, Le niveau des courants de court-circuit dépend très fortement du mode de mise à la terre des points neutre des réseaux. L'interposition d'une impédance dans cette mise à la terre permet de réduire les courants de court –circuit et aussi les surtensions.

Mots clé

Réseau, transformateur, surtension, surintensité, régime du neutre, Orcad 10.5