

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



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

Projet de fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

Option : Réseaux Électriques

Thème

*Étude des surtensions dues à la
ferro-résonance en phases incomplètes*

Proposé et dirigé par : MUFIDZADA Nahid

Présenté par : MEGHEZZI Arezki

SIDI SAID Abdenour

Promotion 2013

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la force pour réaliser ce mémoire.

On tient à remercier très vivement Monsieur MUFIDZADA Nahid, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour la confiance qu'il nous a accordé en nous proposant ce thème. Que toute notre gratitude lui soit exprimée pour nous avoir encadré et encouragé tout au de ce travail.

Que tous ceux et toutes celles qui nous ont soutenu et aidé à mener à bien ce travail, trouvent également ici l'expression de nos remerciements.

Enfin, on remercie, toutes les personnes sans lesquelles ce travail n'aurait pu être mené à terme.

Nous remercions les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

Introduction.....	3
I-1) Organisation d'un réseau de transport d'énergie.....	3
I-2) Type des réseaux	4
I-2.1) Le réseau de transport.....	4
I-2.2) Le réseau de répartition.....	4
I-2.3) Le réseau de distribution.....	4
I-3) Éléments constituant les réseaux électriques.....	4
I-3-1) Éléments de puissance.....	5
I-3.1.a) Les lignes électriques	5
I-3.1.b) Le transformateur de puissance.....	8
I-3.1.c) Les Jeux de Barres.....	15
I-3-2) Éléments de mesure, conduite et de surveillance.....	16
I-3.2.a) Télécommunications et Téléconduite.....	16
I-3.2.b) Matériels de mesure (les réducteurs de mesure).....	18
I-3-3) Éléments de protection.....	19
I-3.3.1) Défaut.....	19
I-3.3.2) Les anomalies dans un réseau électrique.....	20
I-3.3.3) Les postes électriques.....	21
I-3.3.4) Appareillage de protection.....	23
I-3.3.4.a) Matériels de protection contre les surintensités.....	23
I-3.3.4.b) Matériel de protection contre les surtensions.....	25
Récapitulation.....	26

Chapitre II : Les surtensions et la coordination de l'isolement

Introduction.....	27
II-1) Les surtensions.....	27
II-1.1) a) Définition.....	27
b) Origine des surtensions.....	27
c) Classification des surtensions.....	28
d) Effets des surtensions.....	28
II-1.2) Formes de tensions normalisées.....	29
a) Surtension de manœuvre.....	29
b) Surtension à fréquence industriels	33
c) Surtensions par décharges électrostatiques.....	35
d) Surtensions d'origine atmosphérique.....	35

II-2) Coordination de l'isolement dans une installation électrique industrielle.....	40
Généralités :	40
II-2.1) Distance d'isolement et tenue en tension	40
a) Distance d'isolement.....	40
b) Tenue en tension	41
II-2.2) Réduction des risques et du niveau des surtensions.....	41
II-3) Les dispositifs de protection contre les surtensions	42
a) Les éclateurs	42
b) Les parafoudres	42
c) Le câble de garde.....	45
d) Régimes de neutre	45
II-3.d.1) Les modes de liaison à la terre	46
1) Neutre isolé, ($Z_N = \infty$).....	46
2) Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ($Z_N = R$)	46
3) Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance de compensation.....	47
4) Le neutre mise à la terre directe ($Z_N = 0$)	47
II-3.d. 2) Difficultés et critères de choix	47
Récapitulation:	49

Chapitre III : La ferrorésonance

Introduction	50
III-1) Résonance et ferrorésonance.....	50
III-1.1) Résonance.....	50
III-1.1.a) Résonance série.....	50
III-1.1.b) Résonance parallèle.....	52
III-1.2) Ferrorésonance.....	53
III-1.2.a) Ferrorésonance série.....	53
III-1.2.b) Ferrorésonance parallèle.....	55
III-1.3) Différence entre la ferrorésonance et la résonance.....	57
III-1.4) Conditions et interprétation physique de la ferrorésonance.....	57
III-1.5) Exemple simple de ferrorésonance dans un transformateur monophasé.....	57
III-1.5.a) Mise en équations.	58
III-1.5. b) Constatations	59
III-1.5. b.1) Multiplicité des solutions. Valeur critique de la tension.	59
III-1.5. b.2) Dépendance et sensibilité aux conditions initiales.....	60
III-1.5. b.3) Phénomène de saut. Sensibilité au paramètre tension.....	60
III-2) Approche physique de la ferrorésonance.....	61
III-3) Classification des régimes ferrorésonants.....	64

III-4) Différentes approches pour l'étude de la ferrorésonance	67
III-4.1) Méthode analytique.....	67
III-4.2) Simulation par analogie.....	67
III-4.3) Essais réels sur le terrain.....	68
III-4.4) Mesures en laboratoire	68
III-4.5) Logiciels de calcul numérique (simulateurs)	68
III-5) Exemples de situations de réseaux électriques propices à la ferrorésonance	70
III- 5.1) Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un disjoncteur ouvert.....	70
III-5.2) Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé.....	70
III-5.3) Transformateur condensateur de tension.....	71
III-5.4) Transformateur alimenté accidentellement sur une ou deux phases.....	72
III-5.5) Transformateurs de tension et transformateurs HT/MT à neutre isolé.....	73
III-5.6) Réseau à neutre inductif	74
III-5.7) Transformateur alimenté par un réseau très capacitif et de faible puissance de court-circuit.....	75
III-5.8) Poste en piquage ou en antenne sur une ligne à double terre.....	75
III-5.9) Renvoi de tension sur une ligne longue ou reprise de service sur un réseau très capacitif.....	76
Récapitulation	77
 Chapitre IV : Application et discussion des résultats	
Introduction	78
IV.1) Description du modèle à étudier	78
IV.1.1) Caractéristiques de la ligne	78
IV.1.2) Caractéristiques du transformateur de puissance	80
IV. 2) Simulation et interprétation des résultats	81
IV. 2.1) Surtension de ferrorésonance avec neutre mis à la terre à travers une impédance	82
IV. 2.1.1) Neutre mis à la terre à travers une résistance	82
IV. 2.1.1.a) Résultats des simulations	83
IV. 2.1.1.b) Interprétation des résultats	88
IV. 2.1.2) Neutre mis à la terre à travers une inductance	88
IV. 2.1.2.a) Résultats des simulations	89
IV. 2.1.2.b) Interprétation des résultats.....	91
IV. 2.1.3) Analyse harmonique	91
IV. 2.2) Configuration neutre isolé de la terre avec le transformateur chargé	93
IV. 2.2.a) Résultats des simulations	93
IV. 2.2.b) Interprétation des résultats	96
IV. 2. 3) Configuration neutre isolé de la terre avec un parafoudre à la fin de la ligne	96
IV. 2. 3.a) Résultats des simulations	96
IV. 2. 3.b) Interprétation des résultats	97
Conclusions :	97
Conclusion générale	98

Introduction générale

Introduction générale :

Les réseaux électriques contiennent de grandes quantités d'éléments comportant des inductances ayant des valeurs considérables (alternateurs, transformateurs, réactances,...). D'autre part les lignes de transport possèdent des grandes capacités par rapport à la terre et entre phases. En plus, pour régler la tension et augmenter la fiabilité de fonctionnement simultanément, on connecte soit en série, soit par rapport à la terre des réactances capacitives. Ces inductances et capacités créent dans les mailles des réseaux électriques des oscillations complexes.

Les inductances et capacités des mailles des réseaux électriques sont branchées à des charges, et connectées aux bornes de sources de grandes puissances, dans les régimes normaux les oscillations ne peuvent pas se développer dans les mailles du réseau. Lors des différentes commutations on aura une reconfiguration des contours de ces mailles, et dans lesquels des oscillations assez fortes peuvent se créer, qui amènent à des surtensions élevées. Ces surtensions ont un caractère de résonance, ayant principalement une grande durée d'existence. Néanmoins, plusieurs surtensions de résonances se créent lors des diverses avaries dans les réseaux électriques. D'habitude, la partie en avarie du réseau est rapidement débranchée par les relais de protection.

L'analyse des surtensions de résonances est très difficile parce que la plupart des inductances de ces réseaux ont des noyaux de fer, dont la caractéristique de magnétisation est non linéaire. Les processus transitoire dans ces circuits électriques sont décrits par les équations différentielles, dont la résolution correcte et précise, ne peut pas être exprimée ni par des fonctions élémentaires, ni par des fonctions spéciales, c'est pour cette raison que l'étude des oscillations dans les circuits non linéaires, requière l'utilisation de différentes méthodes qualitatives, basées sur l'étude de la physique du processus dans un schéma concret, pour obtenir la corrélation quantitative des méthodes d'approximations et expérimentales. Le phénomène de résonance dans les circuits non linéaires est divisé en quatre groupes :

- a) Résonance harmonique : c'est-à-dire dans un circuit non linéaire, se créent des oscillations de résonances avec une fréquence égale à la fréquence de la source, lors de cette forme de résonance, les oscillations en outre de la fréquence du fondamentale ont de haute fréquences, mais les oscillations de fréquence fondamentale sont prépondérantes.
- b) Résonance ultra-harmonique : c'est-à-dire les oscillations ont des fréquences plus grandes que la fréquence de la source.
- c) Résonance de subharmonique: les oscillations se produisent à des fréquences inférieures à la fréquence de la source.
- d) Résonance paramétrique : l'apparition de cette forme résonance, est liée au changement périodique dans le temps de l'un des paramètres du circuit (l'inductance ou la capacité).

Ces quatre formes de résonance non linéaire, peuvent se créer dans les réseaux électriques, l'existence de lignes de longue distance, augmente l'intérêt de l'étude de ces oscillations non linéaire dans ce genre de circuits.

La présence dans ces circuits, de condensateurs de compensation longitudinale et d'inductances avec noyau de fer, donne une grande possibilité de la création des différentes d'oscillations, par conséquent des surtensions de ferrorésonance.

La ferrorésonance apparaît à la suite d'un régime transitoire, lors de surtensions atmosphériques, enclenchement ou déclenchement de transformateurs ou de charges, apparition ou élimination de défaut... Il y a possibilité de transition brutale d'un état stable normal à un autre état stable ferrorésonant caractérisé par de fortes surtensions et par des taux d'harmoniques importants dangereux pour le matériel, donc à des dysfonctionnements. Mais pour protéger les réseaux de ce phénomène il est nécessaire de bien les connaître, et les caractériser puis trouver des solutions permettant de l'éviter ou minimiser leurs actions.

Pour éviter les conséquences de la ferrorésonance (déclenchement intempestif de protection, destruction de matériels tels que transformateurs de puissance ou de mesure de tension, pertes de production ...) il faut d'abord bien étudier le phénomène, puis le prédire et le savoir l'identifier et en fin l'éviter.

Le cas considéré dans ce présent travail est un exemple pratique de configurations de réseaux d'énergie électrique à risque de création de ferrorésonance, qui est celui d'un système classique, une ligne haute tension alimentant un transformateur de puissance, et cela en phases incomplètes ou bien via un système déséquilibré. Notre travail consiste à l'étude des surtensions dues à la ferrorésonance en phases incomplètes, pour analyser et prédire le comportement ferrorésonant dans ce circuit, nous ferons appel à au logiciel de simulation numérique MATLAB.SIMULINK, en simulant les divers cas possibles. Cette étude se subdivise en quatre chapitres

- Le premier chapitre expose une présentation des acteurs de l'étude à savoir, le réseau électrique, son rôle où l'on s'intéresse aux réseaux de distribution avec leurs différentes architectures, ensuite les différents régimes d'avaries.
- Le deuxième exposera les différents types de surtensions, leurs origines et leurs actions sur les réseaux électriques, et surtout leurs l'influences sur les isolations des éléments de ce dernier.
- Dans le troisième chapitre on présentera une approche du phénomène de la ferrorésonance ainsi que toutes les situations pouvant lui donner lieu sur un réseau électrique.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'étude et la modélisation en régime transitoires du système considéré, afin d'élaborer un modèle approprié dont les paramètres sont déterminer en utilisant les caractéristiques et données géométriques de tous les éléments.
- En fin, dans la dernière partie on détail les différents résultats et la discussion des résultats obtenus des simulations de notre système en phases incomplètes, ainsi que la proposition de solutions appropriés.
- On termine par une conclusion générale.

Chapitre I:

Généralités sur les réseaux électriques

Introduction :

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des éléments destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie électrique depuis les centrales de générations jusqu'aux consommateurs, l'énergie électrique n'étant pas directement stockable, par contre les réseaux assure la liaison à tout instant dans l'équilibre production-consommation.

Le réseau est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques (Fig1.1). Les postes électriques permettent de répartir l'énergie électrique et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. [1]

I -1) Organisation d'un réseau de transport d'énergie :

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doit satisfaire les exigences suivantes :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 7 \%$ de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 0,5$ Hz.
- Fournir l'énergie à un prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
- Veiller à la protection de l'environnement. [2]

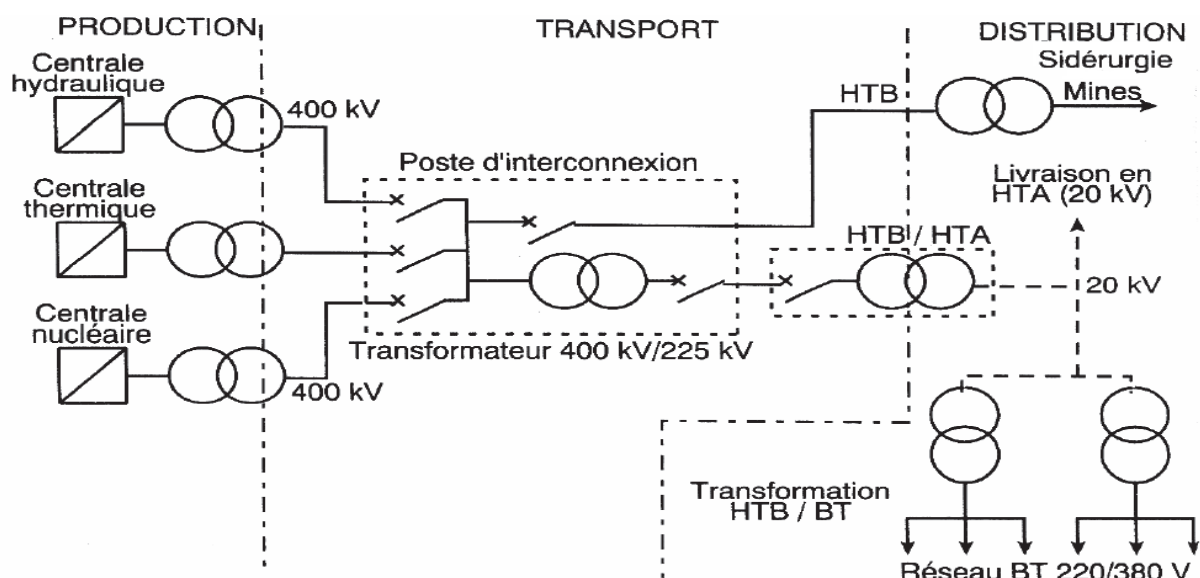


Fig1.1 : Organisation d'un réseau électrique [1]

I -2) Type des réseaux :

Chaque type de structure possède des spécificités et des modes d'exploitation très différents. Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure:

I -2.1) Le réseau de transport :

Dans notre pays les réseaux de transport sont à haute tension (HTB) (de 60 kV à 400 kV) et ont pour but de transporter l'énergie électrique des grands centres de production vers les régions consommatrices. Les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit, ainsi qu'une structure maillée (ou interconnectée). Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité si l'exploitant du réseau de transport respecte la règle dite du "N-1" (possibilité de perdre n'importe quel élément du réseau sans conséquences inacceptables pour les consommateurs). [3]

I -2.2) Le réseau de répartition :

Les réseaux de répartition ont souvent une structure bouclée dans les régions faiblement consommatrice, ils sont à haute tension (de l'ordre de 30 à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'énergie électrique. L'énergie y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des centrales électriques de moyennes puissances (inférieures à environ 100 MW). Les réseaux de répartition sont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région. [3]

I -2. 3) Le réseau de distribution :

Les réseaux de distribution sont généralement basés sur une structure arborescente de réseau : à partir d'un poste de transformateur, l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation HTA/BTB. Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension. [3]

- les réseaux moyenne tension (anciennement MT devenu HTA de 3 à 50 kV)
- les réseaux basse tension (anciennement BT devenu BTB de 110 à 600 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestique

I -3) Éléments constituant les réseaux électriques :

Le réseau électrique est constitué non seulement de matériel haute tension (dit matériel de puissance), mais également de nombreuses fonctions périphériques telles que la téléconduite ou le système de protection.

I -3-1) Éléments de puissance :

I -3.1-a) Les lignes électriques :

Les lignes électriques relient les postes entre eux. À l'intérieur d'un poste, on trouve pour chaque niveau de tension un jeu de barre qui relie les départs lignes et les départs transformateurs. [5]



Fig1.2 : Lignes à haute tension.

I -3.1.a.1) Définition :

Les lignes aériennes sont constituées par des conducteurs de phase fixés par des isolateurs sur des pylônes métalliques, des poteaux en béton ou en bois (Fig1.2). L'air assure l'isolement entre conducteur et par rapport à la terre. Les lignes de transports d'énergie possèdent trois conducteurs pour les trois phases. Afin de limiter les pertes de puissance par effet couronne, on peut trouver un faisceau de 2 à 3 conducteurs à la place d'un conducteur simple. Les conducteurs utilisés sont en aluminium ou on alliages aluminium acier. [8,5]

I -3.1.a.2) Rôle des lignes électriques :

Le transport de l'énergie électrique du producteur aux consommateurs se fait à l'aide de lignes électrique, qui constituent les artères d'un système d'énergie électrique. [5]

I -3.1.a.3) Types de lignes :

Les lignes électriques peuvent être classées suivant plusieurs critères :

- Situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles) ;
- Classe de tension : lignes à basse tension, moyen tension, et lignes à haute tension.
- Nature de la tension : continue, alternative monophasé ou triphasée.

I -3.1.a.4) La contrainte thermique des conducteurs

Cette contrainte thermique aussi appelée $I^2.t$ et s'exprime en $A^2.s$. La contrainte thermique correspond à l'énergie dissipée par unité de résistance du circuit, que l'on pourrait aussi exprimer en J/Ω (joule/ohm). En fait, si l'énergie est dissipée sur un temps assez important, le câble a le temps de se refroidir par dissipation thermique. La valeur de la contrainte thermique est alors supérieure à la valeur donnée précédemment.

I -3.1.b) Les lignes souterraines et câbles

I -3.1.b.1) Définition : Les lignes souterraines sont constituées par un ou plusieurs câbles unipolaires ou par un câble multipolaire. [5]

I -3.1.b.2) Un câble unipolaire : comprend un conducteur de phase unipolaire en cuivre ou en aluminium entouré par un isolant (papier imprégné à l'huile, gaz sous pression, polyéthylène), une gaine métallique, une protection contre l'humidité et des agressions mécaniques et chimiques (Fig1.3). Les câbles sont utilisés pour le transport de l'énergie électrique à l'intérieur des localités, pour faire la liaison entre ligne aérienne et un poste de couplage, et pour la traversée de large fleuves ou de mer. [7]



Fig1.3 : model de câble unipolaire

I -3.1.b.2.a) L'âme du câble : elle assure le transit du courant, c'est la partie métallique parcourue par le courant, elle est en cuivre, en aluminium ou en alliage d'aluminium acier. Elle peut être massive, rigide, souple ou même extra-souple (câble de soudure).

I -3.1.b.2.b) L'isolant : il doit avoir une bonne capacité d'isolement (sa capacité à tenir un champ électrique sur des distances inférieures à celles de l'air). C'est de lui que dépend la température de fonctionnement d'un câble.

I -3.1.b.2.c) L'écran métallique : il assure le retour du courant de défaut vers le poste, l'étanchéité intérieure extérieure (huile) et extérieure intérieure (humidité).

I -3.1.b.2.d) La gaine de protection extérieure : elle assure l'isolement électrique de l'écran métallique par rapport à la terre et la protection mécanique de l'écran métallique. Elle porte un marquage identifiant le câble.

I -3.1.b.2.e) L'écran semi-conducteur interne :

Si l'isolant est soumis à un champ électrique inégal, il y a rapidement « claquage » du câble. Le semi-conducteur uniformise le champ électrique autour de l'âme. Le semi-conducteur est constitué de : Polyéthylène + noir de carbone ou de Papier + noir de carbone

b.2.f) L'écran semi-conducteur externe :

Écran Semi-conducteur Externe Écran Semi-conducteur Interne



Fig1.4 L'écran semi-conducteur interne et externe

I -3.1.c) Pylône :

Les pylônes supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques (Fig1.5). Un pylône électrique peut supporter plusieurs ternes, (de 2 à 8 ternes). Les pylônes sont soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace.

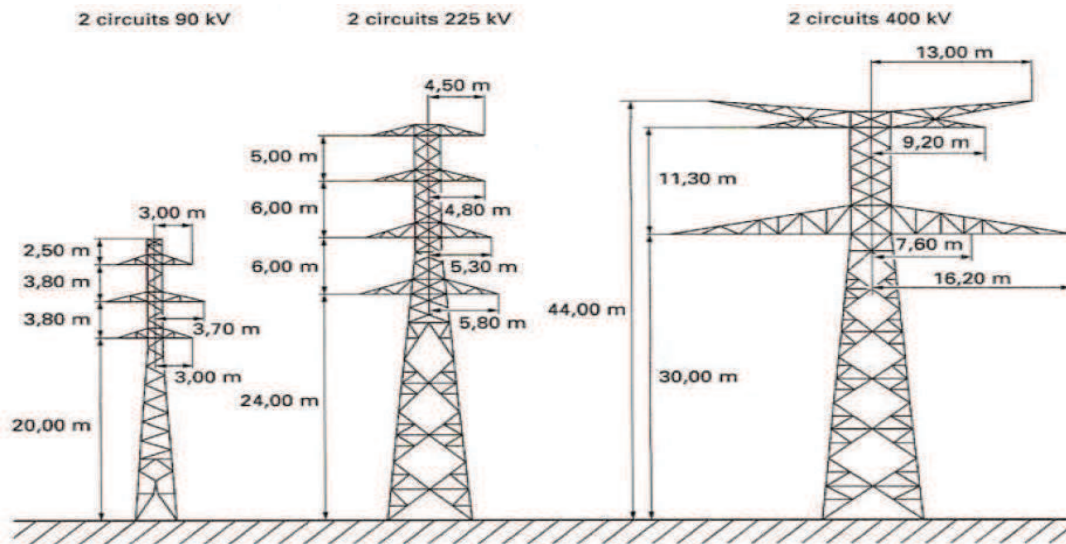


Fig1.5 : Silhouette des familles des supports de lignes aériennes [6]

I -3.1.d) Les isolateurs :

Les conducteurs des lignes aériennes doivent être fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs qui sont réalisés en verre ou en porcelaine. Généralement, les isolateurs ont la forme d'une assiette et sont associés entre eux pour former une chaîne d'isolateurs (Fig1.6), ils doivent présenter une rigidité diélectrique suffisante pour tenir la tension de service sans qu'ils produisent ni percement de l'isolation ni arc de contournement. [8]

Il existe différents types d'isolateurs : normal, cloche, plat, aérodynamique, anti-pollution, chapeau chinois.

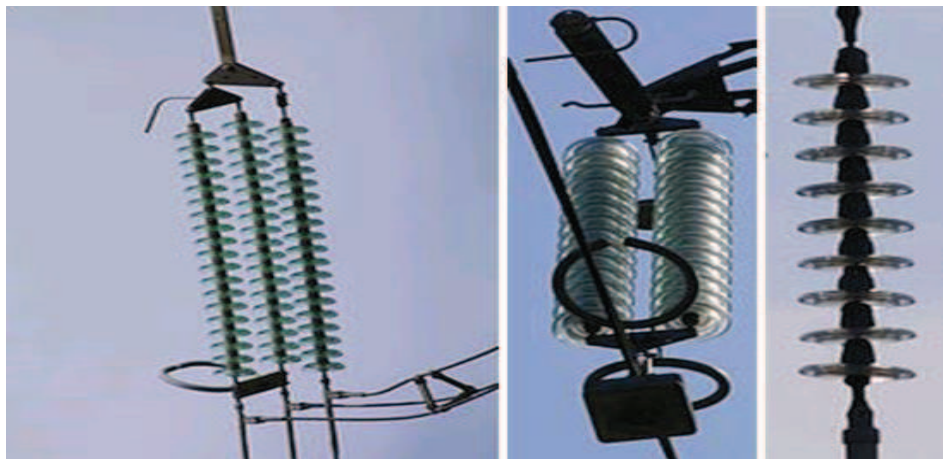


Fig1.6 : Chaîne isolateurs

I -3.1.e) Transformateur de puissance :

Le transformateur permet de modifier la tension et le courant dans les réseaux électriques. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique. La construction habituelle des transformateurs triphasés est le transformateur à trois ou quatre colonnes. La somme des 3 flux déphasé de 120° étant nulle en régime équilibré, on peut même renoncer à la colonne centrale avec épargne supplémentaire de matériel pour les transformateurs à quatre colonnes. [2,9]

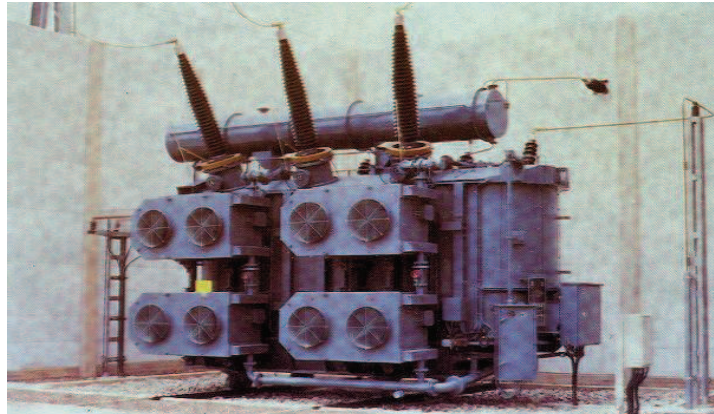


Fig1.7: Transformateur de puissance

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques (Fig1.7). Sa définition selon la CEI est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique ». Son principal utilité est de réduire les pertes dans les réseaux électriques. Il peut être monophasé ou triphasé et recevoir divers couplages : étoile, triangle et zig-zag. [3]

I -3.1.e.1) Classification des transformateurs : [10]

Les transformateurs se classifient selon leurs puissances apparentes, on distingue :

- Petits transformateurs : $1 \text{ KVA} < S < 25 \text{ KVA}$
- Transformateurs de distribution : $25 \text{ KVA} < S < 2 \text{ MVA}$
- Transformateurs pour le transport de l'énergie : $S > 2 \text{ MVA}$ jusqu'à 1 GVA

I -3.1.e.2) Principe de fonctionnement:

C'est un transformateur virtuel sans aucune perte (Fig1.8). Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances. [3]

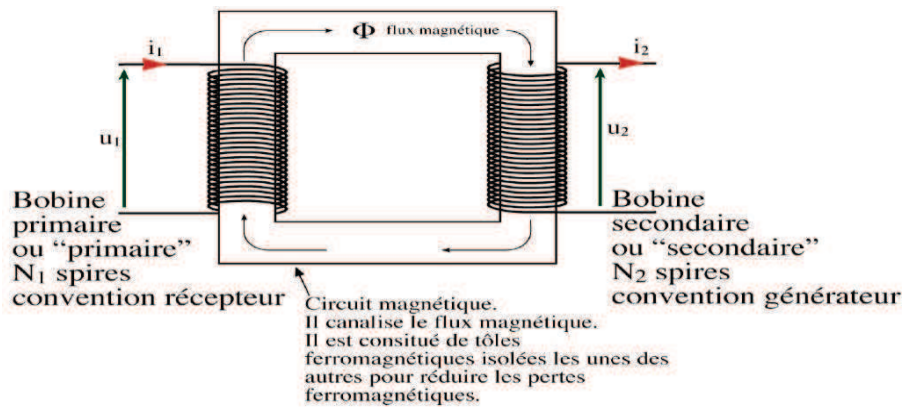


Fig1.8 : Transformateur monophasé idéal

Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux sont négligées, le rapport du nombre de spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine totalement le rapport de transformation du transformateur.

$$\frac{U_2}{U_1} \simeq \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

Comme on néglige les pertes, la puissance est transmise intégralement, c'est pourquoi l'intensité du courant dans le secondaire sera dans le rapport inverse

De l'égalité des puissances apparentes : $S_1 = S_2$ soit : $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ on tire:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

I -3.1.e.3) Pertes, rendement d'un transformateur

Comme toute machine électrique, le transformateur occasionne des pertes de puissance. Ces pertes sont causées par :

- L'effet Joule dans les deux enroulements
- L'hystérésis et les courants de Foucault dans le fer

Dans les conditions normales de fonctionnement, le rendement des transformateurs est très élevé ; il peut atteindre 99,5 % pour les transformateurs de grande puissance. La quantité de chaleur occasionnée par les pertes dans le fer dépend de la valeur maximale du flux $\Phi_{\max}$, laquelle dépend elle-même de la tension appliquée au primaire. D'autre part, la puissance dissipée en chaleur dans les enroulements dépend de l'intensité du courant qui les parcourt. L'échauffement d'un transformateur dépend donc de la puissance apparente qui le traverse. [2]

I -3.1.e.4) Limitation des pertes fer :

Pour réduire les pertes par hystérésis il faut choisir un matériau ferromagnétique avec un cycle d'hystérésis le plus étroit possible. Pour réduire les pertes par courants de Foucault, le noyau est feuilleté. C'est à dire qu'il est constitué de tôles vernis, donc isolées les unes des autres. La taille des boucles de courant de Foucault est alors limitée par l'épaisseur de la tôle. Plus les boucles sont petites, plus les pertes sont réduites. [3]

I -3.1.e.5) Couplage

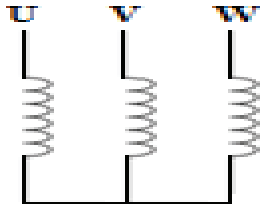


Fig1.9a : Schéma de la connexion étoile

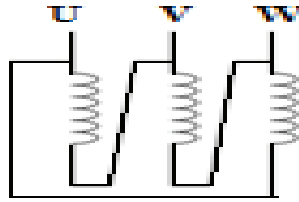


Fig1.9b : Schéma de la connexion triangle

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

- En étoile, représenté par la lettre Y ;
- En triangle, représenté par la lettre D ;
- En zig-zag, représenté par la lettre Z.

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

Le couplage en étoile au primaire et en triangle au secondaire (Yd) est utilisé pour connecter les générateurs de centrales électriques et de machines industrielles. Le courant traversant les bobines est réduit d'un facteur $\sqrt{3}$, ce qui est intéressant dans ces applications où le courant est particulièrement fort. Côté réseau pour les mêmes raisons que précédemment il est préférable de privilégier l'économie d'isolation. Dans les réseaux de distribution électrique un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (Yz) est courant, car le couplage zigzag permet de réduire le déséquilibre de tension entre phases. Les particuliers étant connectés en monophasé, la charge n'est pas toujours bien répartie entre les phases et il est utile de lutter contre le phénomène. Le couplage a également un rôle déterminant dans la détermination de l'impédance homopolaire du transformateur.

I -3.1.e.6) Noyau et enroulements :

Le rôle du noyau est de guider le flux magnétique entre le primaire et le secondaire. La densité du flux doit être aussi haute que possible sans que le noyau entre en saturation. Cela permet de réduire la taille du transformateur et ainsi son prix et ses pertes fer. De nombreux types de circuits magnétiques sont possibles pour la conception d'un transformateur de puissance. Pour les transformateurs triphasés la plus courante est l'option à 3 colonnes. Un autre type répandu est le modèle à 5 colonnes : 3 colonnes bobinées au centre et 2 latérales non bobinées de section inférieure à celles bobinées. Le troisième type de conception répandu est le circuit magnétique cuirassé à 7 branches.

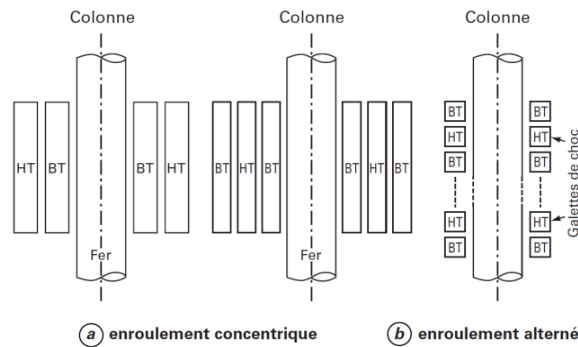


Fig1.10: Disposition classique des enroulements autour du noyau magnétique

Un enroulement est l'« ensemble des spires formant un circuit associé à l'une des tensions pour lesquelles le transformateur a été établi ». Traditionnellement on appelle l'enroulement qui reçoit la puissance active de la source d'alimentation en service « enroulement primaire » et celui qui délivre la puissance active à une charge, « enroulement secondaire ».

Les enroulements sont quasiment toujours réalisés en cuivre, bien qu'on trouve également de l'aluminium pour des raisons de coût dans les transformateurs de faible puissance. Ces matériaux ont en effet d'excellente conduction électrique ce qui limite les pertes cuivres. La section de la bobine dépend du courant la traversant et détermine sa forme : jusqu'à 5 mm² la section est ronde, au-delà rectangulaire avec un rapport 2/1. La principale contrainte à prendre en compte lors de la conception d'un enroulement est sa résistance au courant de court-circuit, il faut qu'il puisse évacuer la chaleur et ne casse pas sous l'effet de la contrainte mécanique. Les bobines (primaire, secondaire, tertiaire) sont enroulées de manière coaxiale autour des colonnes bobinées du noyau magnétique.

Les contraintes mécaniques croissant avec le nombre de spires, et décroissant avec le diamètre de celles-ci, on place le secondaire proche du noyau et le primaire à son extérieur afin de garder ces contraintes dans un domaine acceptable. Cette disposition limite également la demande d'isolation entre bobine et noyau magnétique, le secondaire ayant une tension inférieure au primaire. De plus, dans le cas où le transformateur possède un enroulement de réglage, celui-ci est connecté en général au primaire, cela présente de nombreux avantages : connexion plus facile, courant plus faible et pilotage à flux constant possible.

I -3.1.e.7) Courbe de saturation et courbe d'hystérésis :

Si on augmente graduellement la tension U_p au primaire d'un transformateur, le secondaire étant ouvert. Le flux mutuel Φ_M augmente proportionnellement à la tension. Par conséquent, le courant d'excitation augmente graduellement. Cependant, dès que l'acier commence à se saturer, la composante I_m , doit augmenter brusquement afin de créer le flux requis. [2]

La (Fig1.11a) montre la courbe de saturation E vs I_o d'un transformateur de 500 kVA, 15 kV/600 V, prise du côté de l'enroulement à haute tension. Tant que le flux mutuel est inférieur au coude de la courbe de saturation $O-I$ de l'acier, le courant d'excitation reste faible et sensiblement proportionnel à la tension. Mais au-delà ce coude, le courant augmente brusquement. Cette condition anormale de fonctionnement provoque une augmentation modérée des pertes dans le fer, mais entraîne une très forte augmentation du courant d'excitation.

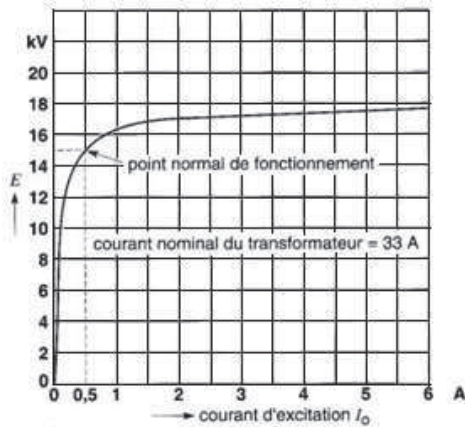


Fig1.11a: Courbe de saturation

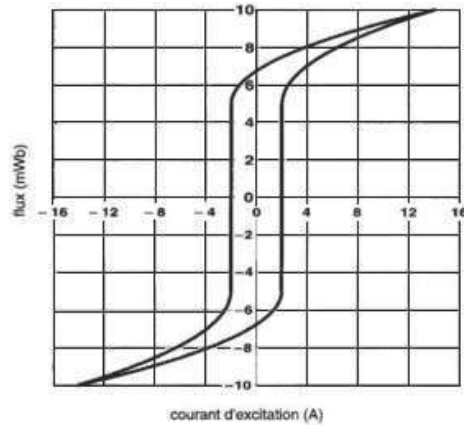


Fig1.11b : Courbe d'hystérésis

Le courant d'excitation I_0 augmente brusquement dès que l'on dépasse la tension nominale de 15 kV.

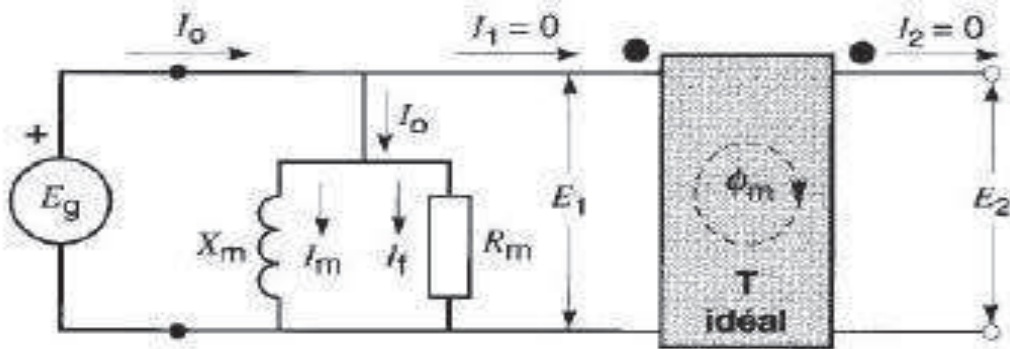


Fig1.12 : Circuit d'un transformateur idéal comportant un noyau réel

On observe sur la (Fig1.11a) que le courant d'excitation est de 0,5 A alors que le courant de pleine charge est de 33 A. C'est dire qu'en régime normal, I représente seulement $0,5/33 = 1,5 \%$ du courant nominal. La densité de flux crête dans les transformateurs est généralement comprise entre 1,5 T et 1,7T, ce qui correspond approximativement au coude de la courbe de saturation.

On peut appliquer sans problème une tension de 10 % supérieure à la tension nominale, mais si l'on doublait cette tension, le courant d'excitation excéderait le courant de pleine charge de l'enroulement. La relation non linéaire entre la tension et le courant d'excitation révèle que les impédances R_m et X_m (Fig1.12) ne sont pas aussi constantes qu'on pourrait le croire. Alors que R_m demeure assez constante, X_m diminue rapidement lorsqu'on dépasse la densité de flux normale.

Toutefois, en régime normal, les transformateurs fonctionnent près de leur tension nominale, si bien que l'on peut considérer que R_m et X_m demeurent pratiquement constantes, même lorsque la charge varie.

La non-linéarité de la courbe de saturation provoque une distorsion du courant d'excitation, même lorsque le flux est sinusoïdal. Lorsqu'on connaît la forme de la courbe d'hystérésis donnant la relation flux/courant du noyau (Fig1.11b), on peut déduire la forme d'onde du courant d'excitation.

I -3.1.e.8) Isolation :

L'isolation qu'elle soit solide ou liquide doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Dans le domaine du transport et de la distribution d'électricité, les transformateurs isolés aux résines d'enduction, au SF6 et au papier imprégné à l'huile minérale. [9]

- **L'isolation papier :**

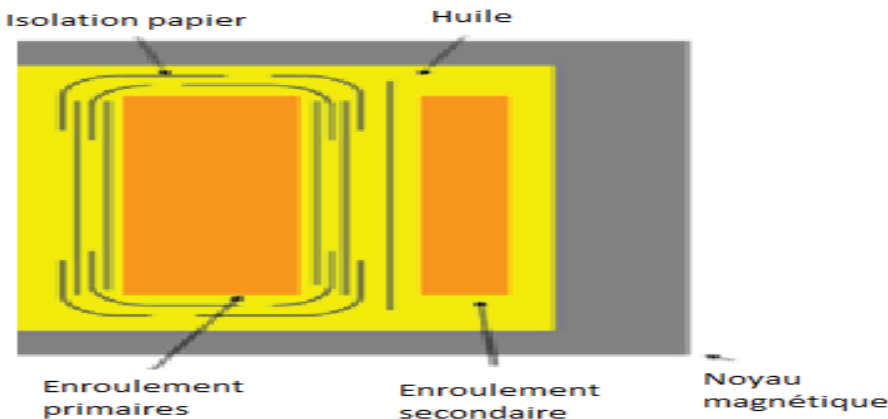


Fig1.13 : Système d'isolation typique avec des barrières en papier séparées par de l'huile [3]

L'isolation papier consiste en des couches de papier superposées, imprégnées d'huile puis séchées (Fig1.13). Les pores du papier atteignent alors une grande rigidité diélectrique, des pertes diélectriques faibles et une constante diélectrique proche de celle de l'huile.

Il est à noter que le papier associé à l'huile a de bien meilleures propriétés diélectriques que le papier ou l'huile séparément. La présence d'humidité dans l'isolation est très néfaste pour ses propriétés.

- **L'huile :**

Les transformateurs de puissance sont traditionnellement remplis d'huile minérale spécifique. Elle permet l'isolation diélectrique des enroulements entre eux ainsi que le refroidissement du transformateur.

. I -3.1.e.9) Le système de refroidissement :

Le système de refroidissement d'un transformateur a pour but de maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables.

Un système de refroidissement est caractérisé par un code de quatre lettres. La première lettre désigne le fluide de refroidissement interne : O pour l'huile minérale (99 % des cas), K pour les liquides isolant ayant un point de feu $>300^{\circ}\text{C}$, L pour les liquides à point de feu non mesurable. La seconde lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement interne : N pour naturel, F pour forcé (présence d'une pompe, mais l'huile circule librement), D pour forcé et dirigé (pompe et l'huile est forcée et dirigée à travers les enroulements). La troisième lettre indique le fluide de refroidissement externe : A pour air, W pour eau. Enfin la quatrième lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement externe : N pour naturel, F pour forcé (ventilateurs).

I -3.1.e.10) Cuve :

Les cuves des transformateurs sont faites de tôles d'acier. Elles doivent pouvoir résister aux forces exercées lors du transport du transformateur. Leur couvercle est amovible et scellé grâce à des boulons ou une soudure. Il est incliné d'au moins 1° afin d'évacuer les eaux de pluie. Afin de garantir l'étanchéité, des joints en caoutchouc synthétique sont utilisés. L'étanchéité doit être parfaite, la cuve est testée sous vide pour contrôler ce point. Par ailleurs, pour résister aux conditions extérieures les cuves sont peintes à l'aide d'un revêtement résistant à la corrosion. [11]

I -3.1.e.11) Composants associés au transformateur de puissance [3]

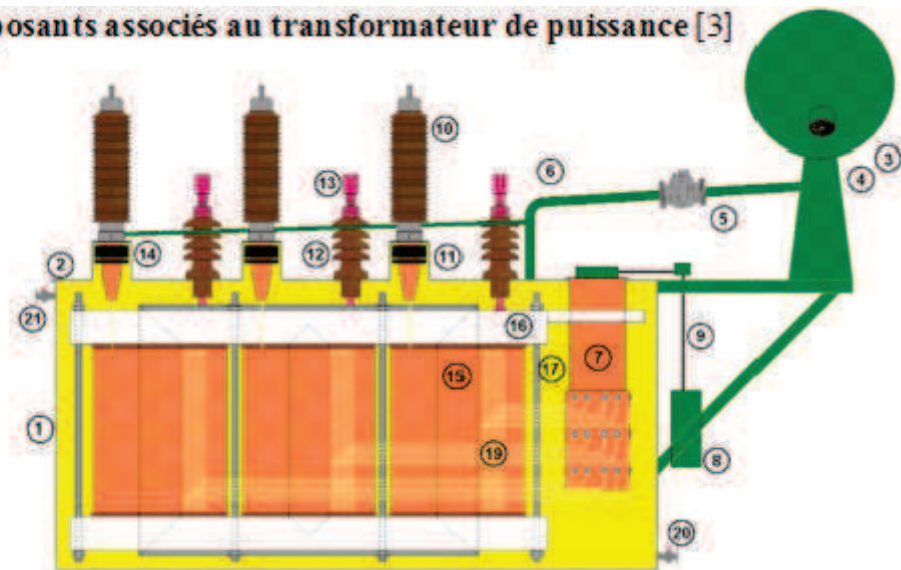


Fig1.13: Composants associés au transformateur de puissance

- | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1. Cuve | 9. Transmission mécanique du | 17. Élément mécanique |
| 2. Couvercle | changeur de prises | maintenant le noyau |
| 3. Conservateur | 10. Connexion du primaire | magnétique et les |
| 4. Indicateur de niveau d'huile | 11. Traversée | enroulements ensemble |
| 5. Relais Buchholz | 12. Connexion du secondaire | 18. (non représenté) |
| 6. Tuyau d'huile | 13. Contact du secondaire | 19. Connexion du changeur de |
| 7. Changeur de prises | 14. Transformateur de courant | prises aux enroulements |
| 8. Moteur électrique du | 15. Enroulements | 20. Robinet d'huile |
| changeur de prises | 16. Noyau magnétique | 21. Robinet d'air |

En plus de son noyau magnétique, de ses enroulements et de son isolation, un transformateur dispose de nombreux composants secondaires. Certains sont indispensables comme un dispositif permettant la dilatation de l'huile (le conservateur est présenté ici), d'autres ne le sont pas comme le changeur de prises. Ceux présentés ici correspondent à un transformateur de puissance « classique ».

I -3.1.e.12) Les défauts dans les transformateurs

Ils peuvent être de nature différente :

- Électrique : mauvais contact dans les connexions et les changeurs de prise.
- Électromagnétique : divers surtensions.
- Diélectrique : amorçage et décharge partielle entre les enroulements des phases, entre les différentes parties d'un enroulement ou bien entre l'enroulement et la masse.
- Électrodynamique : effort dû à un court-circuit interne ou externe.
- Thermique : échauffement anormal, vieillissement des isolations, pollution d'huile.
- Mécanique : vibration, fuite, fonctionnement défectueux du changeur de prise.

I -3.1.f) Les Jeux de Barres

Dans la distribution électrique un jeu de barres désigne un conducteur de cuivre ou d'aluminium qui conduit de l'électricité dans un tableau électrique, à l'intérieur de l'appareillage électrique ou dans un poste électrique. Le terme officiel est barre omnibus, mais il n'est guère employé.

Selon la définition donnée par la Commission Electrotechnique Internationale, il s'agit d'un conducteur de faible impédance auquel peuvent être reliés plusieurs circuits électriques en des points séparés.

- Ils permettent de séparer les postes en « tronçons » et ainsi multiplier les possibilités d'alimentation.
- Ils sont reliés entre eux par un Couplage et parfois des Tronçonnements.

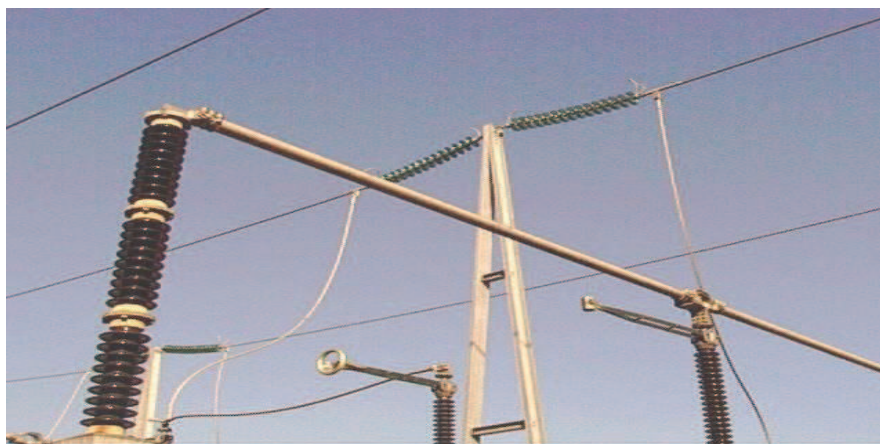


Fig1.14 : Jeu de Barre en tube

I -3-2) Éléments conduites, de surveillances et de mesures :

I -3.2.1) Éléments télécommunications et téléconduite :

I -3.2.1.a) Éléments télécommunications :

La communication est la transmission d'information d'un endroit à un autre, l'information se présente sous forme de signaux divers qui ont une signification précise pour l'émetteur et pour le récepteur les signaux peuvent être des sons (phone) ou data (numérique ou analogique). La télécommunication est utilisée pour la sécurité et l'exploitation des réseaux de transport et cela nécessite des moyens de transmission importants, permettant l'échange de nombreuses informations entre différents points des réseaux. Un système de télécommunication comprend deux éléments principaux :

1. Les équipements d'émission / réceptions.
2. La voie ou le canal de transmission.

I -3.2.1.a.1) Les Équipements d'émission / réception : parmi les équipements utilisés

- **Les CPL :** Courant Porteur sur Ligne d'énergie, qui permettent la transmission de différentes informations des communications téléphoniques, des données, des signaux de protection en modulant un signal basse fréquence (BF) de 0 à 4 kHz en un signal haute fréquence (HF) de 40 à 500 KHz en utilisant la ligne haute tension comme support de transmission.
- **F.H :** Faisceau Hertzien c'est un équipement Multiplexeur utilisant les ondes hertziennes comme support de transmission.
- **Les équipements F.O :** équipements Fibre Optique (PDH, SDH...) utilisent la F.O comme support de transmission.
- **Le canal de transmission :** parmi les canaux de transmission utilisés :
 - **La ligne HT :** Les sociétés d'électricités utilisent depuis longtemps leurs propres lignes haute tension pour transmettre des informations de façon sûre. La réalisation d'une liaison CPL nécessite un Circuit bouchon, un dispositif de couplage à la ligne d'énergie et une boîte d'accord.
 - **La fibre Optique:** Le support F.O est utilisé pour transmettre les informations par le biais de la lumière, elle comprend ainsi deux milieux : le cœur, dans lequel l'énergie lumineuse se trouve confinée, grâce à un second milieu la gaine, dont l'indice de réfraction est plus faible.

I -3.2.1.a.2) Le Circuit Bouchon :

C'est un circuit constitué d'une bobine, une résistance et une capacité montées en parallèle présente une impédance relativement élevée à une bande de fréquence, est inséré dans les lignes de transmission à haute tension pour éviter toute perte excessive de puissance des signaux à courant porteur

- Il est associé à un Transformateur Condensateur de Tension
- Il permet l'utilisation des Courants Porteurs en Ligne

I -3.2.1.a.3) Dispositif de couplage :

Boite d'accord: l'adaptation de l'impédance de la ligne HT/THT avec l'impédance du câble coaxial qui est de 75Ω et un dispositif de protection contre les surtensions provoquées par une défaillance éventuelle du condensateur de couplage ou des éclairs...

I -3.2.1.b) Éléments de téléconduite :

La téléconduite est l'opération qui consiste à la surveillance et la commande des postes électriques à distance, la centralisation des informations se fait sur un poste appelé PC : Poste de Commande d'où se fait l'émission de la télécommande et le point télécommandé appelé PA: poste asservi. Pour cela, l'on dispose d'équipements de Téléconduite suivants :

1) Les Contrôles Commandes Numériques CCN.

2) Les Remot Terminal Unit RTU.

- **Télécommandes Doubles** : Commandes d'ouverture ou de fermeture d'un sectionneur ou d'un disjoncteur.
- **Télécommandes Simples** : Augmente, diminue les régleurs en charge des transformateurs.
- **Demande de contrôle générale** : Pour avoir un état global du poste (rapatriement des positions de tous les organes du poste).

La conduite s'effectue depuis des centres de conduite régionaux (dispatchings) ou nationaux. Ceux-ci disposent d'instruments de téléconduite (des SCADA, notamment) comprenant des dispositifs permettant :

- de commander les organes de coupure (disjoncteurs, sectionneurs),
- de connaître la position de ces organes,
- de mesurer un certain nombre de grandeurs (tension, intensité, fréquence),
- de signaler des dysfonctionnements (alarmes).

Outre les éléments ci-dessus permettant la conduite à distance, on trouve également des dispositifs locaux, pouvant réaliser de façon automatique des manœuvres destinées à sauvegarder le fonctionnement du système électrique ou à rétablir le service lorsque celui a été interrompu. Un important réseau de voies de télécommunication fiables et sécurisées est nécessaire pour échanger ces informations entre le centre de conduite et les postes qu'il exploite. Le matériel de surveillance est destiné à l'analyse a posteriori des incidents. Il comprend essentiellement des consigneurs d'état chargés de relever la position des organes de coupure, et des pédrographes qui, grâce à un système de mémoire, restituent l'évolution des tensions et des courants pendant le déroulement des incidents.

Lorsque des clients sensibles se trouvent à proximité du poste, des qualimètres, destinés à mesurer les coupures brèves, peuvent aussi être installés. Les données fournies par ces équipements sont consultées sur place. Par commodité, elles peuvent être transmises à distance, mais la fiabilité demandée aux voies de transmission utilisées est moins importante que dans le cas précédent.

I -3.2.2) Matériels de mesure (les réducteurs de mesure) :

Ils sont caractérisés par :

- Deux bornes primaires P1 et P2.
- Un rapport de transformation.
- Une classe de précision en %.
- Une puissance de précision en VA.

I -3.2.2.a) Le Transformateur de Tension (TT) :

- Le primaire et le secondaire sont bobinés.
- Il est chargé de réduire la tension à mesurer.
- La tension présente au secondaire est de 100 volts / $\sqrt{3}$ pour une valeur de tension nominale au primaire.



Fig1.15 : symbole de transformateur de tension

I -3.2.2.b) Le Transformateur Condensateur de Tension (TCT) :

C'est un diviseur capacitif associé à un petit transformateur bobiné, ce qui lui permet l'installation d'un circuit bouchon. Il a la même fonction que le TT mais d'une précision moindre.



Fig1.16 : symbole de Transformateur Condensateur de Tension

I -3.2.2.c) Le Transformateur de Courant (TC) :

- Le primaire et le secondaire sont bobinés.
- Pour une valeur nominale au primaire, le courant au secondaire est fixé à 5A ou 1A suivant le matériel basse tension utilisé.
- Plusieurs rapports de transformation possibles.
- Plusieurs circuits secondaires :
 - mesure,
 - protection,
 - différentielle de barres.



Fig1.17 : symbole de Transformateur de Courant

I -3.2.2.d) Le Transformateur de Courant (TC Tore) :

Son enroulement primaire est le conducteur lui-même.

Ils sont utilisés pour les protections « masse cuve » des transformateurs...

Ils sont aussi installés autour des sorties de transformateur (Bushing).

I -3.2.2.e) Le transformateur déphaseur :

Alors que certaines lignes entrent en surcharge d'autres sont sous chargées le transformateur déphaseur peut forcer l'échange d'énergie dans un sens ou dans l'autre en modifiant l'angle de déphasage. [2]

I -3-3) Éléments de protection :

I- 3.3.1) Défaut

I- 3.3.1.a) Définition :

Un défaut est caractérisé par un phénomène non conforme au fonctionnement normal d'un réseau et pouvant dans certain cas, conduire à un effondrement électrique de celui-ci et la mise en danger de son environnement.

I- 3.3.1.b) Causes :

Les causes aptes à déclencher un défaut dans les réseaux sont nombreuses et peuvent avoir pour origine :

- Des phénomènes propres aux réseaux (par exemples rupture d'une colonne de sectionneur, perforation d'une isolation interne de transformateur d'un poste par fatigue diélectrique).
- Des événements indépendants du réseau (par exemple, chute d'un arbre sur une lige ou rupture d'un poteau électrique à la suite d'un accident de voiture, coup de foudre sur une ligne).

I- 3.3.1.c) Interdépendance des surtensions et des surintensités :

Il est fréquent qu'une surtension produise un court-circuit (l'inverse peut aussi arriver). Un système de protection bien conçu doit donc tenir compte de ces deux types d'anomalies et de leurs interdépendances. [5]

I -3.3.2) Les anomalies dans un réseau électrique : [13,14]

❖ **Les courts-circuits :** [15] Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tensions différentes ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau. Les courts-circuits sont de natures et de types différents. On distingue :

- Les courts-circuits monophasés à la terre.
- Les courts-circuits biphasés à la terre où isolés de la terre.
- Les courts-circuits triphasés à la terre où isolés de la terre.

Le courant de court-circuit (triphasé) est une donnée essentielle pour le dimensionnement des équipements électrique.

Les courts-circuits peuvent provoquer des dégâts économiques importants s'ils ne sont pas éliminés rapidement par les systèmes de protection.

❖ **Les surtensions :** On distingue différents types de surtension telle que :

- Les surtensions de manœuvres.
- Les surtensions d'origine atmosphérique.
- Les surtensions à fréquence industrielle.
- les surtensions électrostatiques.

❖ **Les surcharges:** La surcharge d'un appareil est caractérisée par un courant supérieur au courant admissible, les origines de surcharges sont :

- Les courts-circuits.
- Les reports de charge.
- Les pointes de consommation.
- L'enclenchement des grandes charges.

Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes sur le réseau et accélère le vieillissement des équipements de réseau.

❖ **Les oscillations :** Les oscillations de la tension et du courant sont dues aux variations plus ou moins rapides de la charge qui agit directement sur la vitesse de rotation (fréquence) des machines de production de l'énergie électrique. Elles sont liées directement à la mécanique des machines électriques, c'est la raison pour laquelle on les appelle phénomènes transitoires électromécaniques.

❖ **Les déséquilibres :** Les déséquilibres sont généralement dus à la mauvaise répartition des charges sur les trois phases. Ils apparaissent surtout dans les réseaux de distribution, ils donnent naissance à la composante inverse du courant, cette composante provoque :

- Des chutes de tension supplémentaires.
- Des pertes de puissance.
- Des échauffements.

I -3.3.3) Les postes électriques :

Les postes de couplage existent sous divers exécutions :

- Les postes de couplage extérieures, à isolation à air ;
- Les postes de couplage intérieures, à isolation à air ;
- Les postes de couplage extérieures et intérieures, blindés à isolation SF6.
- Les postes de couplage extérieures et intérieures mixtes, comportant des isolations à air (jeu de barre) et au SF6 (sectionneurs et disjoncteurs).

Les postes électriques sont les nœuds du réseau électrique. Ce sont les points de connexion des lignes électriques. Les postes des réseaux électriques peuvent avoir 2 finalités :

- l'interconnexion entre les lignes de même niveau de tension : cela permet de répartir l'énergie sur les différentes lignes issues du poste ;
- la transformation de l'énergie : les transformateurs permettent de passer d'un niveau de tension à un autre.

De plus, les postes électriques assurent des fonctions stratégiques :

- assurer la protection du réseau : un système complexe de protection permet qu'un défaut sur un seul ouvrage n'entraîne pas la mise hors tension de nombreux ouvrages, ce qui risquerait de mettre une vaste zone hors tension. Cette protection est assurée par des capteurs qui fournissent une image de la tension et du courant à des relais de protection, lesquels élaborent des ordres de déclenchement à destination des disjoncteurs ;
- permettre l'exploitation normale du réseau : présence de plusieurs jeux de barre et de couplage afin de pouvoir prendre différents schéma électriques ;
- assurer la surveillance du réseau : la tension du réseau et l'intensité dans les lignes sont surveillées dans les postes électriques, via des transformateurs de mesure, de tension et de courant.

Exemples de postes de couplages :

❖ Poste 220 KV

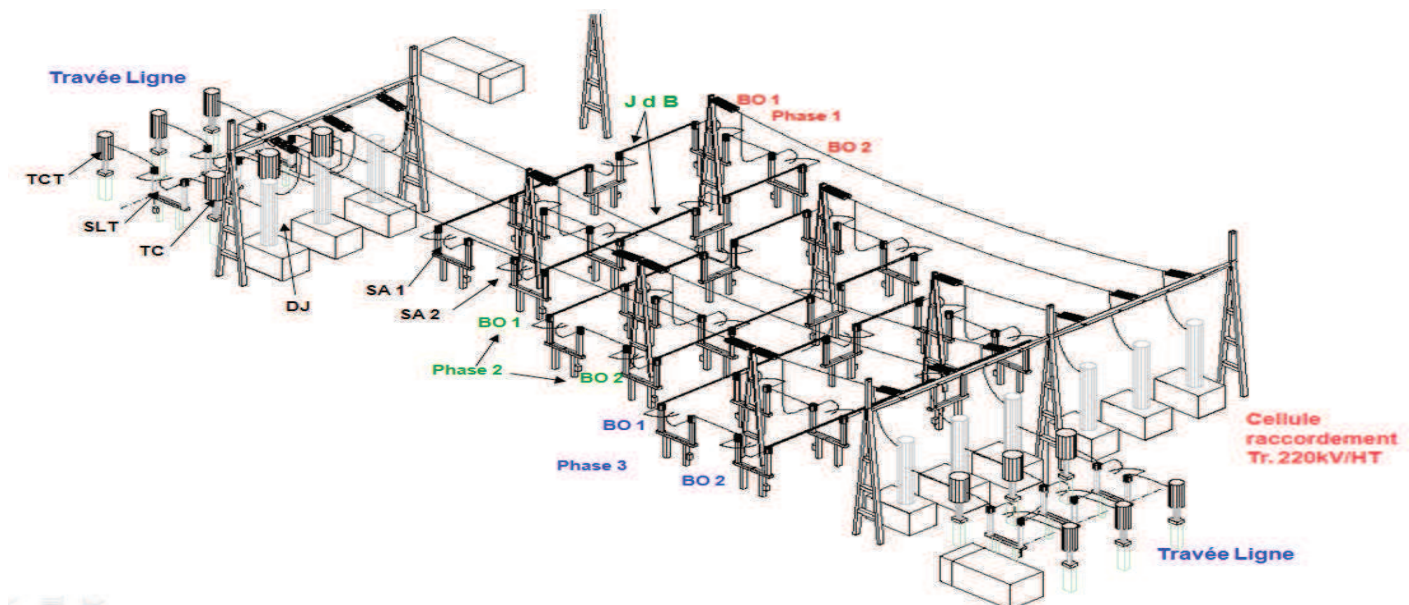
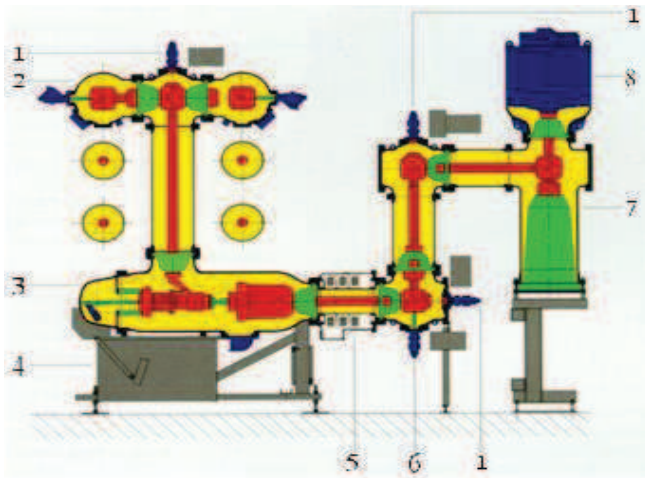


Fig1.18 : Vue partielle d'un poste 220 kV

❖ Les postes GIS (Gaz Insulated Substation)



1. Sectionneur de mise à la terre
2. Sectionneur de jeu de barres
3. Disjoncteur
4. Mécanisme de commande
5. Transformateur de courant
6. Sectionneur de départ
7. Boîte d'extrémité de câble
8. Transformateur de tension

Fig1.19 : Coupe d'une travée à double jeu de barres avec départ à câbles

❖ Postes électriques moyenne tension (postes urbains) :

La notion de poste urbain implique des obligations pour répondre à :

- L'évolution éventuelle du quartier.
- L'amélioration de la qualité de service.
- La prise en considération de la sensibilité accrue de la population à son cadre de vie.

Ils doivent assurer l'insertion des équipements électriques d'un poste traditionnel au sein d'une concentration immobilière et humaine.

A chaque sensibilité locale correspond une réponse particulière et donc une conception adaptée de poste urbain

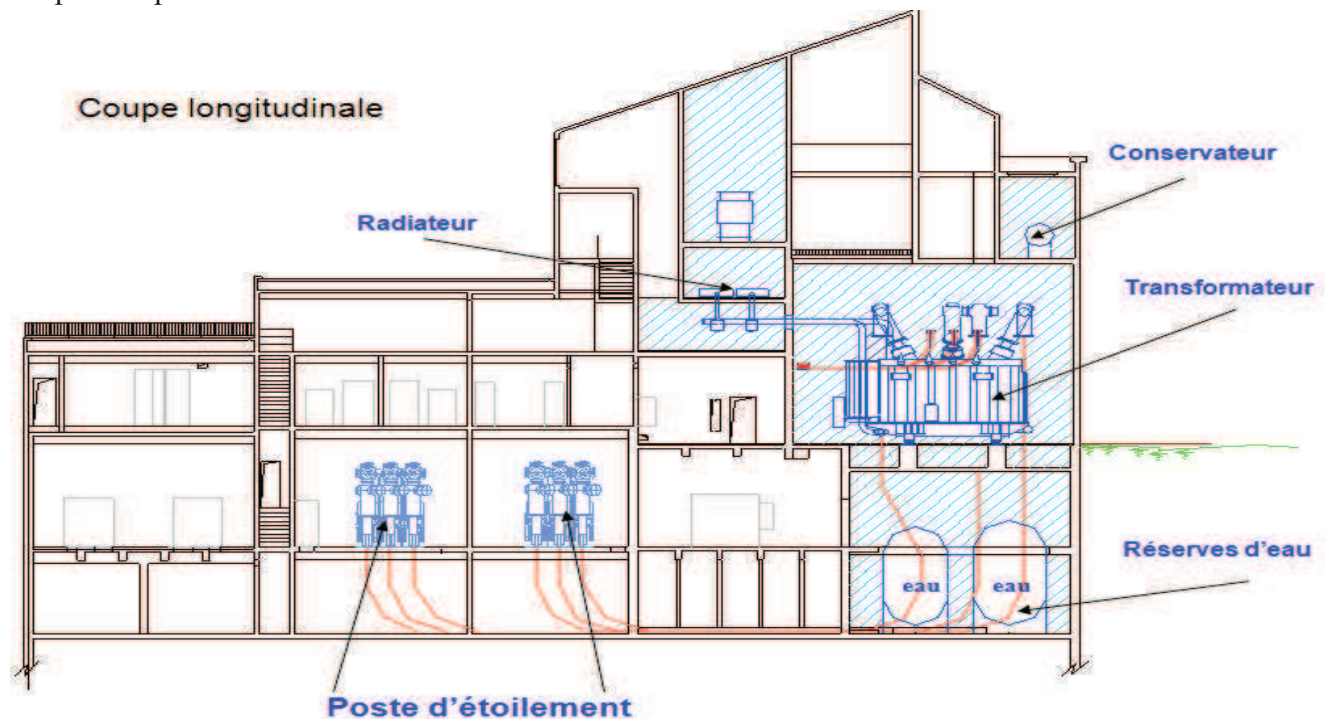


Fig1.20 : Poste urbain

I -3.3.4) Appareillage de protection [5]

I -3.3.4.a) Matériels de protection contre les surintensités :

I -3.3.4.a.1) Les disjoncteurs : c'est un appareil de commutation (ou de manœuvre), leurs rôles est :

- D'ouvrir un circuit en charge : manœuvre d'exploitation (I_n).
- D'ouvrir un circuit en défaut : élimination du courant de court-circuit (I_{cc}).

C'est l'appareil de coupure en charge, dont l'ouverture n'est pas considérée comme une coupure visible; et aussi c'est l'appareil de rétablissement du courant en cas de défaut (court-circuit par exemple), il permet donc la protection des machines et des réseaux en cas d'anomalie, en assurant l'ouverture du circuit sur ordre automatique émanant des relais de mesures (protection) ; il peut également effectué des réenclenchements sur ordre automatique émanant des réenclencheur. Un disjoncteur est constitué principalement :

- Des pôles principaux comportant chacun des contacts fixes des contacts mobiles, un dispositif de coupure de l'arc électrique (chambre de coupure).
- Des pôles auxiliaires de commande, de control :
 - un mécanisme de commande
 - un châssis

Un disjoncteur est caractérisé par :

- sa tension nominal un qui conditionne les distances d'isolement.
- son intensité nominale I_n qui conditionne les sections de passage des contacts.

❖ Les différents types de disjoncteurs :

- L'air comprimé (soufflage de l'arc)
- L'huile (extinction de l'arc)
- L'Hexafluorure de soufre ou SF₆ (extinction et soufflage de l'arc)
- Les disjoncteurs à vide

❖ Exemples de disjoncteurs :

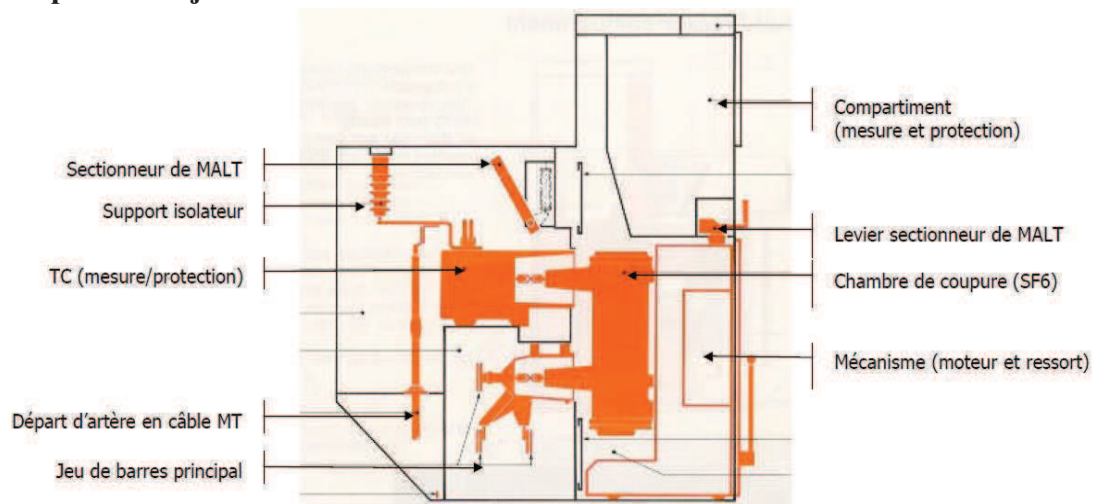


Fig1.21 : Conception de base d'une cellule disjoncteur moyenne tension

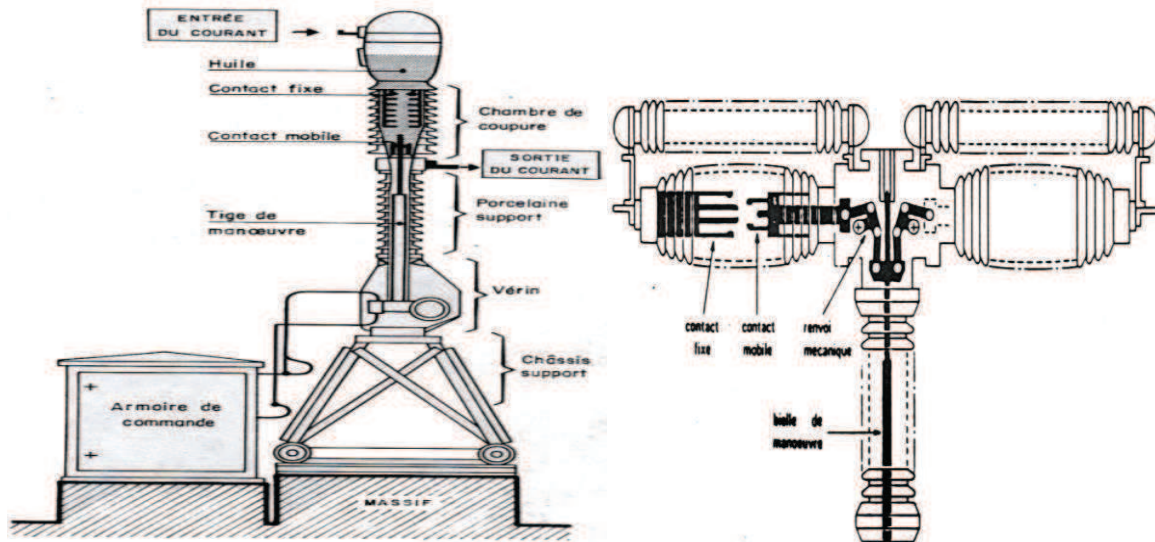


Fig1.22a : Disjoncteur à Huile

Fig1.22b : Le Disjoncteur au SF6, en coupe

I -3.3.4.a.2) Le sectionneur:

Cet appareil ne se manœuvre qu'en absence de circulation de courant (les disjoncteurs étant ouverts)

❖ Plusieurs types de sectionneurs :

Son rôle :

- Connecter ou déconnecter deux circuits.
- Mettre une ligne aérienne à la terre après ouverture du disjoncteur (cas du sectionneur de terre).
- Assurer en position ouverte une distance d'isolement satisfaisante entre les deux circuits.
- Il n'a aucun pouvoir de coupure d'intensité ($< 0.5 \text{ A}$).
- Il assure une coupure visible (sécurité).

Il doit être capable de supporter:

- Le courant de charge (I_n) et de court-circuit (I_{cc}).
- La tension de service, les surtensions et les chocs de foudre.
- Les conditions climatiques et la pollution.

Ils sont utilisés pour la mise sous tension ou hors tension :

- Un jeu de barres par le Sectionneur de Sectionnement (SS).
- Entre ligne et disjoncteur par le Sectionneur de Ligne (SL).
- Entre barres et disjoncteur par le Sectionneur d'Aiguillage (SA).
- Des transformateurs, par le Sectionneur à Rupture Brusque (SRB).
- Mettre sous tension ou hors tension un tronçon de ligne ou de câble (la manœuvre est toujours exécutée hors circulation de courant).
- Les sectionneurs sont à commande manuelle, électrique et électrique téléconsignable ou télécondamnables.

❖ Exemples de sectionneurs :

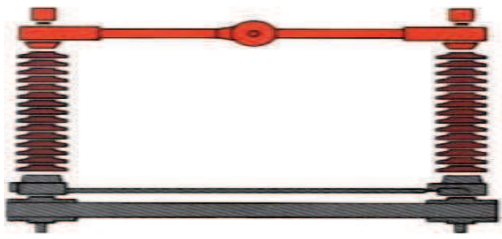


Fig1.23a : Le sectionneur à deux colonnes en position fermée

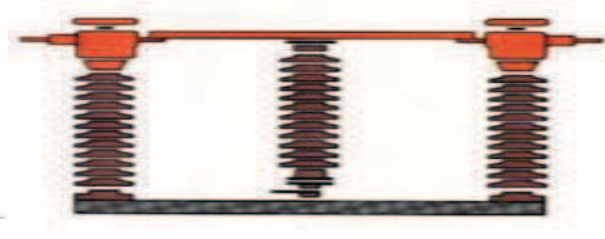


Fig1.23b : Le Sectionneur à Trois Colonnes en position fermée

I -3.3.4.a.3) Fusibles :

Le fusible est l'appareil de protection le plus fréquemment et le plus largement utilisé dans les circuits électriques surtout en basse tension. Le fusible fond dans le cas où le courant qui le traverse dure plus longtemps que son temps de résistance. Cette propriété limite son utilisation aux circuits où les courants d'appel sont très élevés et circulent pendant un temps considérable comme dans les moteurs. Les fusibles peuvent être utilisés, soit comme protection contre les surcharges ou les courts-circuits. Le principe de son fonctionnement est d'entraîner la fusion d'une partie conductrice au moyen d'un échauffement provoqué par pertes Joules ($RI^2.t$). [16,17]

I -3.3.4.a.2) Les Bobines de Point Neutre :

- Le neutre est relié à la terre au travers d'une BPN pour limiter le courant de court-circuit.
- Son fonctionnement se rapproche de la résistance de Neutre.
- Elle prend en compte la partie réactive du courant de défaut.

I -3.3.4.b) Matériel de protection contre les surtensions :

En ce qui suit un aperçu des éléments de protection contre les surtensions, que nous détaillerons au prochain chapitre.

I -3.3.4.b.1) Éclateurs :

Les éclateurs sont constitués de deux électrodes séparées par une mince couche d'air. Les disques sont formés d'un mélange de matières céramiques et de carbure de silicium. Cette substance a la propriété d'offrir une résistance qui varie inversement avec la tension qui lui est appliquée: sa résistance est d'autant plus faible que la tension est plus élevée. Lorsque la tension entre le fil de ligne et le sol est normale, la couche d'air entre les électrodes des éclateurs s'oppose à tout passage du courant. Lorsque la tension sur la ligne dépasse une certaine valeur, un arc s'amorce dans les éclateurs et relie effectivement la ligne à la terre à travers la série de disques qui ne présentent alors qu'une faible résistance. La charge électrique accumulée sur la ligne s'écoule dans le sol. Dès que la décharge est terminée, les disques présentent à nouveau une résistance élevée, l'arc s'éteint et la tension redevient normale. [2]

I -3.3.4.b.2) Parafoudres :

Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter les surtensions imposées réseau. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des fils de la ligne à protéger et la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre de faible résistance, généralement de moins d'un ohm. [2]

I -3.3.4.b.3) Câbles de garde :

C'est des conducteurs non isolés disposés au sommet des pylônes de la ligne. Ces conducteurs, appelés fils de garde, servent à intercepter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tension de la ligne. On les relie solidement à la terre à chaque pylône. [2]

Récapitulation :

Dans ce chapitre consacré au réseau de transport de l'énergie électrique, nous avons vu qu'un réseau utilise en plus des lignes de transport, différents équipements regroupés dans les postes de transformation et d'interconnexion. Ces équipements comprennent les transformateurs, disjoncteurs, sectionneurs, inductances shunt, condensateurs série, appareils de compensation, parafoudres, appareils de mesure, systèmes de protection, systèmes de conduite etc.

Aussi, nous avons vus les différentes anomalies qui perturbent le bon fonctionnement du réseau électrique, parmi lesquelles; les surtensions de divers types, ces dernières causent de multiples dégâts aux matériels électriques, c'est pour cela que nous leurs consacrons le prochain chapitre avec plus de détails.

Chapitre II :

Les surtensions et la Coordination d'isolement

Introduction

Les surtensions sont des phénomènes perturbateurs important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres :

- toute la gamme de puissance et tous les niveaux de tension sont concernés.
- elle peut être à l'origine de perturbations momentanées dans la continuité de service, donc de dégradations de la qualité des alimentations,
- elle peut causer des destructions de matériel, et en conséquence de longues interruptions de service des installations,
- elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre).

Différents types de surtension peuvent apparaître dans les réseaux électrique. Il faut donc trouver des solutions et des dispositifs permettant de diminuer leur amplitude et choisir le niveau d'isolement des équipements afin de réduire les risques de défaut à un niveau acceptable. [19]

II -1) Les surtensions :

II -1.1.a) Définition :

Une surtension est toute tension entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phase, dont la valeur de crête dépasse la valeur de crête correspondant à la tension la plus élevée pour le matériel, définie par la norme CEI 71-1.

Elles peuvent apparaître entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel ($U_m\sqrt{2}$), ou bien entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre et sont dites de mode commun ($U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$). [5]

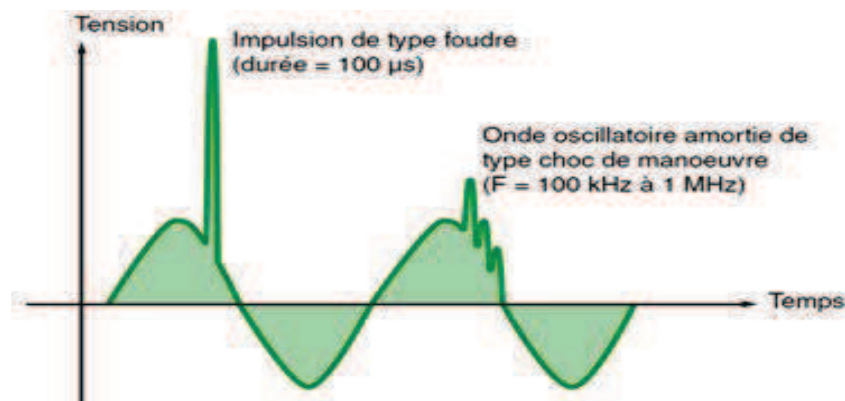


Fig2.1 : Exemple de surtension

II -1.1b) Origine des surtensions : Les surtensions peuvent être d'origine interne ou externe :

➤ Origine interne

Ces surtensions sont causées par un élément du réseau considéré et ne dépendent que des caractéristiques et de l'architecture du réseau lui-même.

A titre d'exemple, la surtension qui apparaît à la coupure du courant magnétisant d'un transformateur.

- surtension provoquée par un défaut à la terre.
- résonance et ferrorésonance.
- rupture du conducteur neutre.
- surtensions de manœuvre.

➤ **Origine externe :**

Ces surtensions sont provoquées ou transmises par des éléments externes au réseau, dont on peut citer à titre d'exemple les surtensions provoquée par la foudre

II -1.1.c) Classification des surtensions :

La norme CEI 71-1 donne la classification des surtensions selon leur durée et leur forme. Selon la durée, on distingue les surtensions temporaires et les surtensions transitoires :

- **Surtension temporaire** : surtension à fréquence industrielle de durée relativement longue (de quelques dizaines de milliseconde à quelques secondes).
- **Surtension transitoire** : surtension de courte durée ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie.

Les surtensions transitoires sont divisées en :

- Surtension à front lent
- Surtension à front rapide
- Surtension à front très rapide. [20]

II -1.1.d) Effets des surtensions :

Les surtensions dans les réseaux électriques provoquent des dégradations du matériel, une baisse de la continuité de service et un danger pour la sécurité des personnes.

Les conséquences peuvent être très diverses suivant la nature des surtensions, leur amplitude et leur durée. Elles sont résumées dans ce qui suit :

- claquage du diélectrique isolant des équipements dans le cas où la surtension dépasse leur tenue spécifiée
- dégradation du matériel par vieillissement, causé par des surtensions non destructives mais répétées
- perte de l'alimentation suite aux coupures longues causées par la destruction d'éléments du réseau
- perturbation des circuits de contrôle - commande et de communication à courants faibles par conduction ou rayonnement électromagnétique
- contraintes électrodynamiques (destruction ou déformation de matériel) et thermiques (fusion d'éléments, incendie, explosion) causées essentiellement par les chocs de foudre
- danger pour l'homme et les animaux suite aux élévations de potentiel et à l'apparition des tensions de pas et de toucher. [20]

II -1.2) Formes de tensions normalisées :

La norme CEI 71-1 donne les formes d'ondes normalisées utilisées pour effectuer les essais des matériels :

- **Tension de choc de manœuvre** : c'est une tension de choc ayant une durée jusqu'à la crête de 250 μ s et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 2500 μ s.
- **Tension de courte durée à fréquence industrielle** : c'est une tension sinusoïdale de fréquence comprise entre 48 Hz et 62 Hz et de durée égale à 60 s.
- **Surtensions causées par des décharges électrostatiques** : Surtensions à très haute fréquence très courtes (quelques nanosecondes) causées par la décharge de charges électriques accumulées.
- **Tension de choc de foudre** : c'est une tension de choc ayant une durée de front montant de 1,2 μ s et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 50 μ s. [20]

II -1.2.a) Surtension de manœuvre :

Lors des manœuvres de mise sous tension ou de mise hors tension de récepteurs, des surtensions transitoires apparaissent sur le réseau. Ces surtensions sont d'autant plus dangereuses si le courant coupé est inductif ou capacitif. L'amplitude, la fréquence et la durée d'amortissement de ce régime transitoire dépendent des caractéristiques du réseau considéré et des caractéristiques mécaniques et diélectriques de l'appareil de coupure. Elles se manifestent par des ondes de choc ou des oscillations amorties conventionnellement à l'onde de choc positive ou négative normalisée de la figure 2.1. [20]

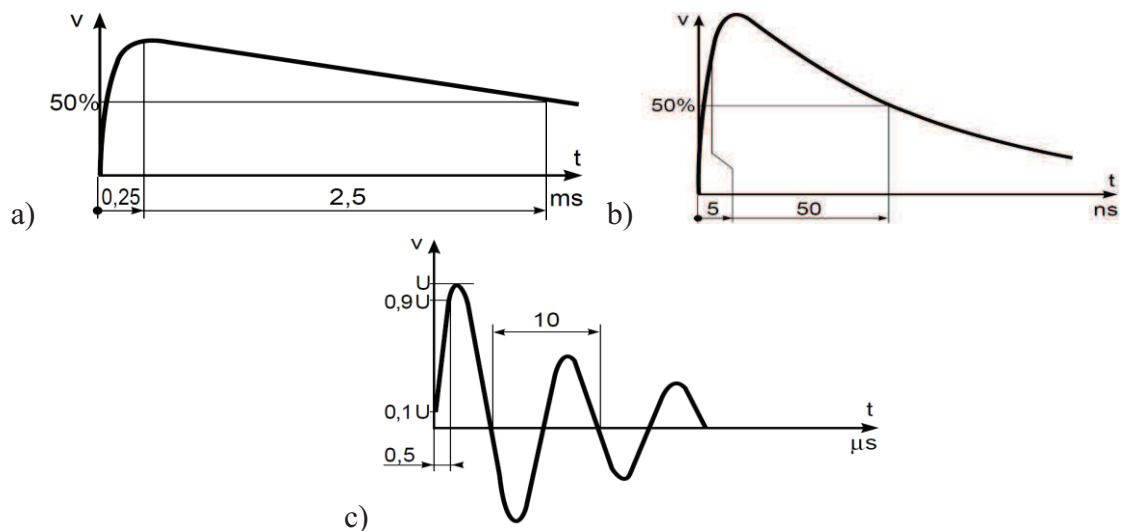


Fig2.2 : Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre :

- a-** onde 250/2500 μ s dite onde longue amortie,
- b-** onde 5/50ns dite onde impulsionnel récurrente (simulant par exemple la fusion d'un fusible),
- c-** onde 0,5 μ s/100 kHz dite onde sinusoïdale amortie.

II -1.2.a.1) Surtensions de manœuvre dues à l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs :

Ce type de surtension a trois phénomènes générateurs : L'arrachement du courant, le réamorçage et le préamorçage.

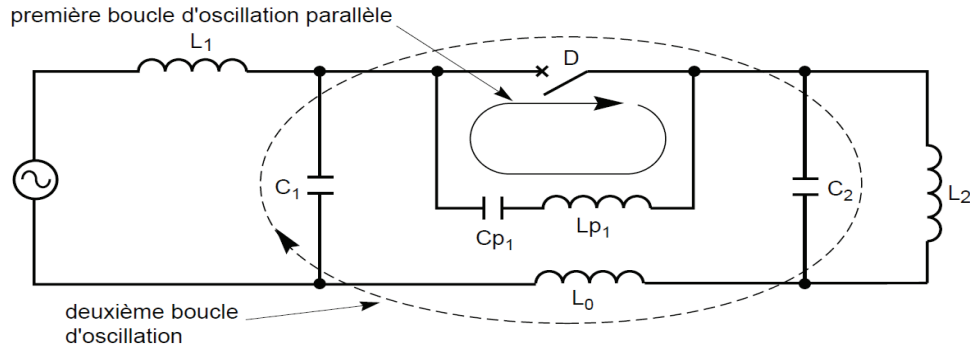


Fig2.3 : Circuit équivalent pour l'étude des surtensions provoquées par l'interruption de courants inductifs,
 C_{p1} , L_{p1} : capacité et inductance du disjoncteur,

➤ L'arrachement du courant :

Lors de la coupure de courants de faibles valeurs, notamment inférieurs au courant nominal du disjoncteur, l'arc qui apparaît occupe un faible volume. Il est soumis à un refroidissement important lié à la capacité du disjoncteur à interrompre des courants très supérieurs. De ce fait, il devient instable et sa tension peut présenter des variations relatives importantes, alors que sa valeur absolue reste très inférieure à la tension du réseau (cas du SF6 ou du vide).

Ces variations de f.é.m. peuvent générer dans les capacités proches, parasites ou volontaires, des courants oscillatoires (Fig2.3) dont la fréquence est élevée : l'amplitude de ces courants peut devenir non négligeable devant le courant 50 Hz et atteindre 10 % de sa valeur. La superposition du courant 50 Hz et de ce courant haute fréquence dans le disjoncteur va entraîner l'existence de plusieurs passages à zéro du courant, au voisinage du zéro de l'onde fondamentale (Fig2.4).

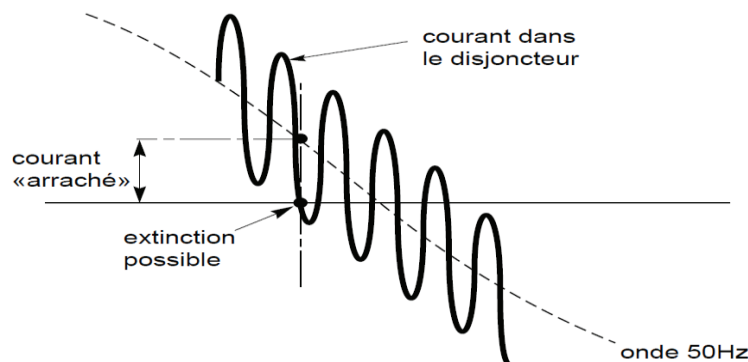


Fig2.4 : Superposition d'un courant oscillant à fréquence élevée au courant à fréquence industrielle.

Le disjoncteur, peu sollicité par ces courants de faibles valeurs, est souvent capable de couper au premier zéro de courant qui se présente. A cet instant, les courants dans les circuits du générateur et de la charge ne sont pas nuls. La valeur instantanée i de l'onde 50 Hz lors de l'extinction de l'arc est dite «courant arraché». En fonction de la nature des impédances mises en jeu, résistives ou inductives essentiellement, l'énergie piégée dans le circuit diffère.

➤ **Le réamorçage.**

Il survient lorsque le phénomène d'arrachement précédemment expliqué a fait apparaître aux bornes du disjoncteur une surtension différentielle que celui-ci n'a pas pu supporter : un arc se produit alors. Cette explication grossière est compliquée par la présence des éléments parasites précédemment cités. Apparaissent alors des réamorçages multiples (hachage), jusqu'à ce que l'écartement des contacts, qui va croissant, les rende impossibles. Ils sont caractérisés par des trains d'onde haute fréquence d'amplitude croissante. Ces trains de surtensions en amont et en aval du disjoncteur peuvent donc être très dangereux pour les matériels comportant des bobinages. Il convient de ne pas confondre avec ce qui est appelé le «réallumage» qui correspond à la réapparition d'une onde de courant à fréquence industrielle et donc à un échec de la coupure sur le zéro de l'onde de courant. [21]

➤ **Le pré amorçage :**

Lors de la fermeture d'un appareil de commutation (interrupteur, contacteur ou disjoncteur) il arrive un instant où la tenue diélectrique entre contacts devient inférieure à la tension appliquée. Pour les appareils à fermeture rapide, par rapport au 50 Hz, le comportement est fonction de l'angle de phase lors de la manœuvre. Un arc s'établit alors entre les contacts et le circuit voit une impulsion de tension correspondant à l'annulation brutale de la tension aux bornes de l'appareil. Cette impulsion peut entraîner l'oscillation des circuits parallèles existants (décharge oscillante des capacités parasites) ainsi que des réflexions sur des ruptures d'impédance, et donc l'apparition de courants de fréquence élevée, par rapport au 50 Hz à travers l'arc. Les surtensions de préamorçage affectent particulièrement, en HT ou MT, les transformateurs à vide lors de leur mise sous tension, et les moteurs au démarrage.

II-1.2a.2) Surtension de manœuvre dues à l'enclenchement et au réenclenchement des lignes :

Ce type de surtension apparaît lors de la mise sous tension d'une ligne ou lors de la remise sous tension de la ligne à la suite d'une ouverture sur défaut. Dans le premier cas les surtensions de manœuvre sont essentiellement dues aux phénomènes de réflexion d'onde. Dans le deuxième cas des phénomènes dus aux charges résiduelles de la ligne peuvent amplifier ces phénomènes de réflexion. Les surtensions dues à l'enclenchement présentent une grande importance pour le choix de l'isolement du réseau THT, pour les autres réseaux (HT et MT), sauf cas particulier, ces surtensions présente moins d'importance.

Phénomène de base :

La fermeture lente d'un appareil sur un tel type de charge entraîne ici aussi un amorçage au voisinage de la crête du 50 Hz, l'échelon de tension appliqué à une extrémité de la ligne ou du câble va se propager et se réfléchir à l'extrémité ouverte. La superposition de l'échelon incident et de l'échelon réfléchi amène une contrainte en tension égale à deux fois l'échelon appliqué, aux amortissements près, et en faisant l'hypothèse que le 50 Hz est assimilable à du continu au regard de ces phénomènes. Ce type de comportement étant lié aux capacités et selfs réparties des conducteurs considérés, les lignes aériennes présentent en plus un couplage entre phases rendant la modélisation assez complexe. C'est surtout dans les lignes de transport (THT) que ce phénomène de réflexion est à prendre en compte, vu le faible écart relatif entre tension de service et tension d'isolement. [21]

II -1.2.a. 3) Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs

Par circuits capacitifs, il faut entendre les circuits constitués de batteries de condensateurs et les lignes à vide.

➤ La mise sous tension de batteries de condensateurs.

Lors de la mise sous tension de batteries de condensateurs, à priori sans charge initiale et dans le cas d'un appareil à manœuvré lente, un amorçage se produit entre les contacts au voisinage de la crête de l'onde 50 Hz. Il apparaît alors une oscillation amortie du système LC de la (Fig2.5). La fréquence de cette oscillation est généralement nettement supérieure à la fréquence du réseau et l'oscillation de tension est sensiblement centrée autour de la valeur crête de l'onde 50 Hz. La valeur de tension maxi observée est alors de l'ordre de deux fois la valeur crête de l'onde 50 Hz.

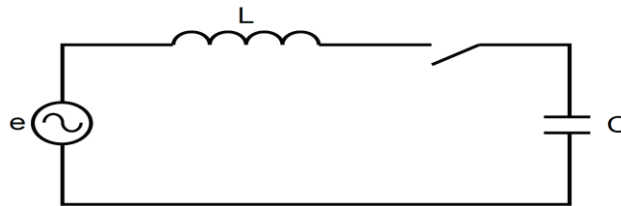


Fig2.5 : schéma de principe d'un circuit de manœuvre de condensateurs.

Avec un appareil à manœuvre plus rapide, l'amorçage ne se produit pas systématiquement au voisinage de la crête, la surtension éventuelle est donc plus faible. Si une batterie de condensateurs est remise en service très peu de temps après sa séparation du réseau, elle possède une tension de charge résiduelle de valeur comprise entre zéro et la tension crête de l'onde 50 Hz. L'amorçage entre contacts se produit au voisinage d'une crête de polarité opposée (claquage sous une contrainte de deux fois la tension crête). L'oscillation précédemment décrite se produit avec une impulsion initiale doublée. La valeur de tension maxi observée peut alors approcher trois fois la tension de crête 50 Hz. Pour des raisons de sécurité, les batteries de condensateurs sont toujours équipées de résistances de décharges permettant d'éliminer les tensions résiduelles avec des constantes de temps de l'ordre de la minute. En conséquence, un facteur de surtension de 3 correspond à des cas bien particuliers.

➤ Coupure de circuits capacitifs.

La coupure de circuits capacitifs pose généralement peu de difficultés. En effet, les capacités restant chargées à la valeur de crête de l'onde 50 Hz après l'extinction de l'arc au zéro de courant, la réapparition de tension aux bornes de l'appareillage se fait selon une onde à 50 Hz. Toutefois, une demi-période après la coupure, l'appareil est soumis à une tension différentielle égale à deux fois la tension crête. S'il n'est pas à même de supporter cette contrainte (ouverture encore insuffisante par exemple) un réallumage peut se produire. Celui-ci est suivi, sous réserve que le circuit le permette (circuit monophasé ou à neutre relié), d'une inversion de tension aux bornes des condensateurs les amenant au maximum à une charge de trois fois la tension de crête (Fig2.6). Le courant s'interrompt à nouveau et un nouveau réallumage peut se produire sous une valeur de cinq fois la tension crête à la demi-période suivante. Ce comportement peut donner lieu à une escalade très importante et doit être évité par un choix d'appareillage permettant de ne pas avoir de réallumage. [21]

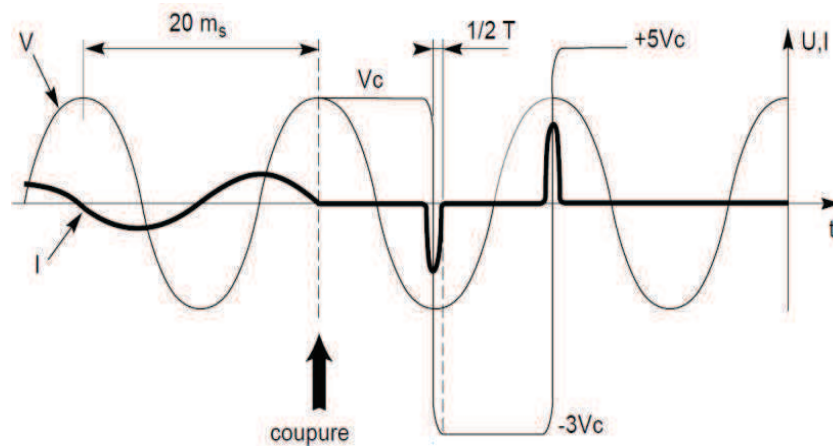


Fig2.6 : escalade de tension lors de la séparation lente d'un banc de condensateurs du réseau.

II -1.2.a.4) Surtension de manœuvre due à l'élimination ou l'apparition d'un défaut :

L'apparition d'un défaut provoque simultanément des surtensions à front lent et des surtensions temporaires. La partie à front lent est générée par la propagation sur réseau de l'échelon de tension du la chute brutale de tension à l'endroit du défaut. En théorie, la combinaison à front lent et des surtensions temporaires peut atteindre 2,7p.u dans les réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par la bobine de Petersen ; cependant, en général les niveaux atteints en réseaux restent inférieurs. [21]

L'élimination d'un défaut provoque aussi simultanément des surtensions à front lent et des surtensions temporaires ; la partie à front lent est générée par la propagation sur le réseau de l'échelon de tension dû à l'élimination du défaut, alors que la partie temporaire résulte de la perte de charge, la partie transitoire seule a des amplitudes qui peuvent atteindre:

- de 1,7 à 1,8 pu sur les réseaux THT à neutre mis à la terre.
- 2,2 pu sur les réseaux HT et MT à neutre isolé ou mis à la terre par la bobine de Petersen.

II -1.2.b) Surtension à fréquence industriels :

Sous cette appellation de fréquence industrielle sont regroupées les surtensions ayant des fréquences inférieures à 500 Hz.

Rappel : les fréquences industrielles les plus fréquentes sont : 50, 60 et 400 Hz.

Les surtensions à fréquence industrielle ont généralement pour origine :

- un défaut à la terre
- une résonance ou une ferrorésonance
- une rupture du conducteur neutre
- un défaut d'un régulateur de tension d'un alternateur ou d'un régleur en charge de transformateur
- une surcompensation de l'énergie réactive suite à un défaut d'un régulateur varométrique
- un délestage de charge, notamment lorsque la source d'alimentation est un alternateur.

II -1.2.b.1) Surtension provoquée par un défaut d'isolement:

Une surtension due à un défaut d'isolement apparaît sur un réseau triphasé, lorsque le neutre est isolé ou impédant. En effet, lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la masse ou la terre (blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, défaut dans un équipement...), la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport la terre, à la tension composée

$U = V \cdot \sqrt{3}$; (Fig2.7)

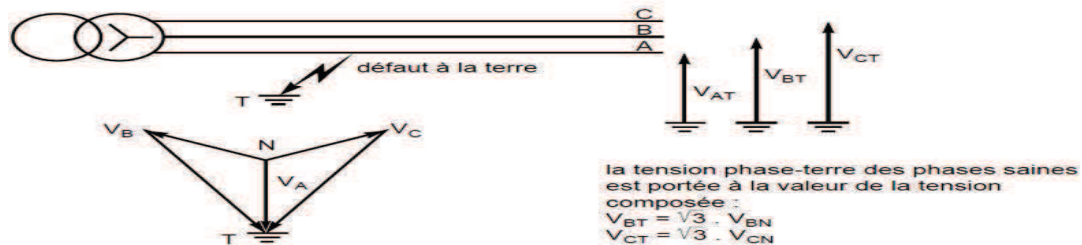


Fig2.7 : surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en défaut d'isolement.

II -1.2.b.2) Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti) :

Une surtension peut se produire lorsqu'une ligne longue est alimentée à l'une de ses extrémités et non chargée à l'autre. Elle est due à un phénomène de résonance qui se manifeste par une onde de tension à croissance linéaire le de la ligne. En effet, avec

- L et C désignant respectivement l'inductance et la capacité totale de la ligne ;
- U_s et U_e étant les tensions à l'extrémité ouverte et à l'entrée de la ligne, le facteur de

surtension est égal à:

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{L.C.\omega^2}{2}} \dots \dots \dots (1)$$

Ce facteur de surtension est de l'ordre de 1,05 pour une ligne de 300 km et de 1,16 pour une ligne de 500 km. Ces valeurs sont sensiblement les mêmes pour les lignes HT et THT. Ce phénomène se produit en particulier lorsqu'une ligne longue est brusquement déchargée.

II -1.2.b.3) La rupture de continuité du neutre :

Si 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 retrouvent alors sous une tension proche de la tension composée. [21]

II -1.2.b.4) Surtensions de ferrorésonance :

La ferrorésonance est un phénomène de résonance non linéaire qui peut affecter les réseaux de transport et de distribution de l'électricité. Elle désigne tous les phénomènes oscillatoires (surtensions ou surintensités transitoires ou permanentes), le plus souvent périodiques, qui se manifestent dans un circuit électrique composé d'une part d'une ou de plusieurs inductances non linéaires (comportant des matériaux ferromagnétiques saturables) et d'autre part d'un réseau comprenant au moins une capacité alimentée par une ou plusieurs sources de tensions généralement sinusoïdales. [26]

NB : On revient en détaille à ce phénomène dans le prochain chapitre.

II -1.2.c) Surtensions par décharges électrostatiques :

Dans un milieu très sec, il est fréquent qu'un être humain chargé électro statiquement par frottement (notamment sur une moquette synthétique) atteigne une tension de plusieurs dizaines de kilovolts. Sa décharge est un courant impulsionnel de quelques dizaines d'ampères. Des perforations de composants électroniques ont été observées suite à ces décharges dont les fronts de montée sont très raides (quelques nanosecondes au maximum). En effet, si la plupart des surtensions induites sont d'origine électromagnétique, certaines sont d'origine électrostatique et intéressent particulièrement les réseaux isolés de la terre. Par exemple, durant les minutes qui précèdent un coup de foudre, lorsqu'un nuage chargé à un certain potentiel se trouve au-dessus d'une ligne, celle-ci prend une charge de sens contraire.

Avant que ne se produise le coup de foudre, qui permet la décharge du nuage, il existe donc entre la ligne et le sol un champ électrique E pouvant atteindre 30 kV/m sous l'effet duquel se charge le condensateur ligne/terre à un potentiel de l'ordre de 150 à 500 kV selon la hauteur de la ligne par rapport au sol. Il en résulte des risques de claquages peu énergétiques au niveau des composants, les moins bien isolés, du réseau. Lors de l'amorçage entre le nuage et la terre, le champ électrique ayant disparu, les capacités se déchargent.

II -1.2.d) Surtensions d'origine atmosphérique

Dans le monde, entre 2000 et 5000 orages sont constamment en formation. Ces orages sont accompagnés de coups de foudre qui constituent un sérieux risque pour les personnes et les matériels. Les foudres frappent le sol à la moyenne de 30 à 100 coups par seconde, soit 3 milliards de coups de foudre chaque année. Comme il peut être constaté, 50% des coups de foudre sont d'intensité supérieure à 33 kA et 5% d'intensité supérieure à 65 kA. L'énergie transportée par le coup de foudre est donc très élevée. [20]

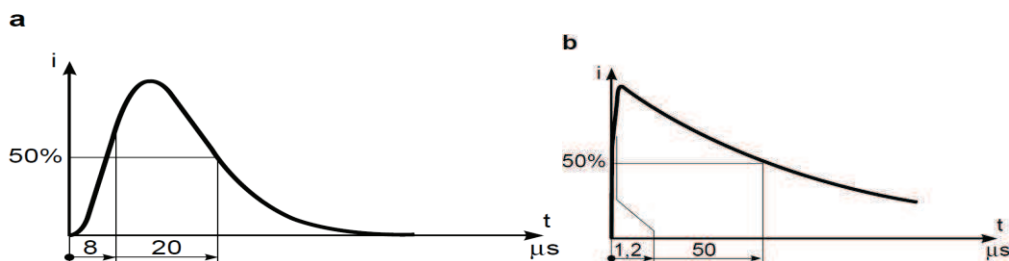


Fig2.8 : Formes des ondes de foudre normalisées : a- onde 8/20 μs dite de courant, b- onde 1,2/50 μs dite de tension.

II -1.2.d.1) Classification des coups de foudre

On a pour habitude de classer les coups de foudre selon le sens de développement du traceur principal (descendant ou ascendant) et suivant la polarité des charges écoulées, ce qui nous mène à distinguer quatre types de coups de foudres:

- **Coup de foudre descendant négatif** : Dans les climats tempérés, la grande majorité (environ 90%) des éclairs sont de type descendant négatif, puisque la base du nuage, chargée négativement, se décharge vers le sol.
- **Coup de foudre descendant positif** : On assiste parfois au développement vers le sol d'un traceur descendant, issu de charges positives de la base du nuage.

- **Coup de foudre ascendant positif** : Ce type de connexion correspond au cas où le champ électrique au sol créé par le nuage est suffisamment intense pour qu'un précurseur puisse se développer du sol vers le nuage. Ceci est généralement le cas dès lors qu'il existe au sol des structures de grande hauteur (plusieurs dizaines de mètres). Ce type de connexion est aussi fréquent dans les régions montagneuses.
- **Coup de foudre ascendant négatif** : A partir de certaines structures de grande hauteur (pic de montagne, pylône de télécommunication, immeuble élevé) il arrive parfois qu'un traceur ascendant progresse spontanément vers le nuage, lorsque les conditions de champ électrique le permettent ; la charge de la base de nuage est alors positive, ce type de coups de foudre est mal connu car il est rare.

II -1.2.d.2) Les effets de la foudre :

La foudre étant une agression naturelle, peut causer des dégâts soit d'ordre direct lié aux risques dus au point d'impact et l'évacuation de l'énergie de la foudre, soit d'ordre indirect dus à la circulation d'un courant de grande amplitude ou au rayonnement électromagnétique de l'éclair qui, par conduction ou induction, va venir perturber le bon fonctionnement des réseaux électrique.

Ces effets, qui concernent donc tous les niveaux de tension, sont :

- thermiques (fusion d'éléments, incendies, explosions).
- mécaniques, dus aux efforts électrodynamiques des conducteurs parallèles proches.
- de choc diélectrique, suite aux montées en potentiel lors de la propagation d'onde à travers les impédances présentées par les conducteurs.
- de perte d'isolement par contournement de l'isolateur d'une phase entraînant un «courant de suite» à la terre à fréquence industrielle.
- d'élévation de potentiel de terre : il est usuel d'atteindre des potentiels de plusieurs centaines de kV au puits de terre de l'équipement HT concerné. La loi de variation, fonction de la distance à la prise de terre, est approximativement hyperbolique, d'où des potentiels, et leurs gradients associés, très grands à proximité des puits de terre, même à plusieurs dizaines de mètres.
- électromagnétiques à haute fréquence (spectre très large) : rayonnement parasite, induction et couplage de circuits.
- également électrochimiques, acoustiques et physiologiques.

II -1.2.d.3) Le mécanisme de foudre :

Le déroulement d'un coup de foudre négatif fait intervenir une série d'impulsions dont la représentation schématisée est donnée sur la (Fig2.9). La première impulsion débute par une série de prédécharges, qui trace un chemin préférentiel (précurseur par pas), du nuage vers le sol pour un coup de foudre descendant, sous la forme d'un canal ionisé. Dès que ce chemin est continu entre le nuage et le sol, la décharge principale va s'effectuer du sol vers le nuage (arc en retour). Cette première impulsion est en général la plus longue et fournit au sol plus d'énergie que les suivantes.

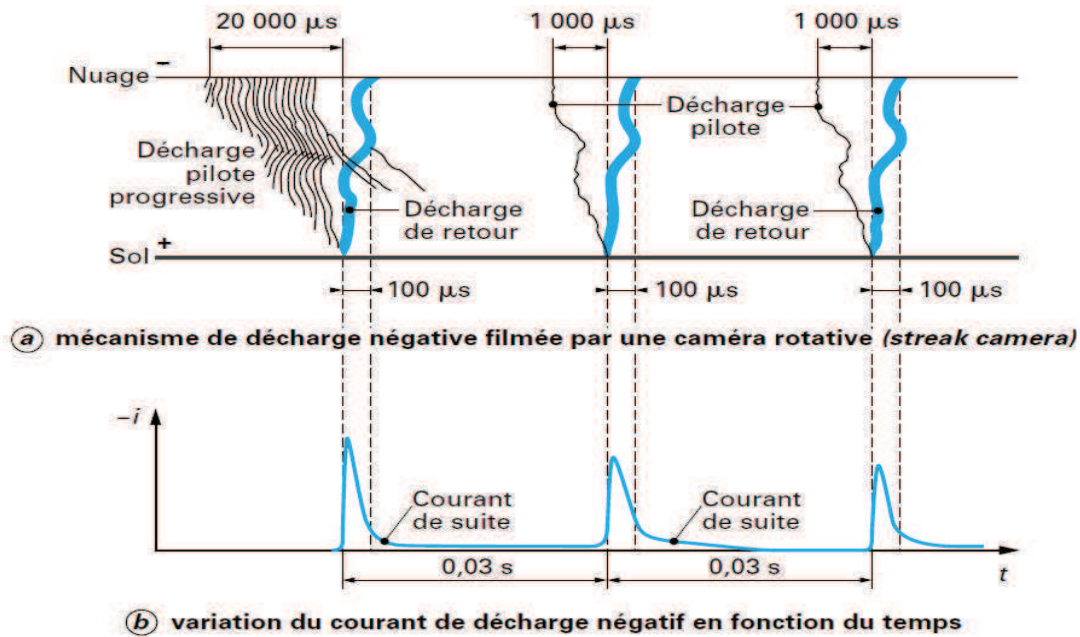


Fig2.9 : le mécanisme de la foudre.

Le schéma équivalent pour les décharges est donné sur la (Fig2.10); les valeurs de la résistance R et de l'inductance L dépendent du chemin pris par le courant de décharge i .

La différence de potentiel correspondante :

$$u = Ri + L \frac{di}{dt}$$

N'est donc pas une donnée intrinsèque du coup de foudre, qui ne peut être défini que par son courant, c'est-à-dire par une surintensité. [22]

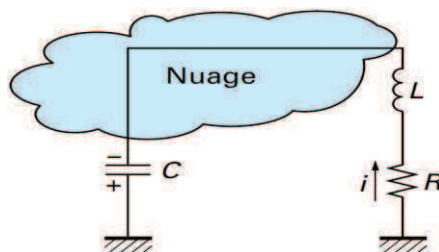


Fig2.10 : Décharges : schéma électrique

II -1.2.d.4) Impacts des coups de foudre :

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique. Une particularité des coups de foudre est leur polarisation : ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif). Environ 10 % sont de polarité inverse, mais ce sont les plus violents. A noter que le front de montée des chocs de foudre retenus par les normes, est de 1,2 μs pour la tension et 8 μs pour le courant. Une distinction est souvent établie entre :

- le coup de foudre «direct» touchant une ligne,
- le coup de foudre «indirect» tombant à proximité d'une ligne, sur un pylône métallique, ou, ce qui revient au même, sur le câble de garde, (mis à la terre, ce câble relie les sommets des pylônes, il est destiné à protéger les conducteurs actifs des coups de foudre directs).

❖ Le coup de foudre direct :

Dans le domaine de l'électrotechnique le coup de foudre «direct» est celui qui atteint directement les installations électriques (lignes aériennes, postes, ...). Son énergie est importante puisque 50 % des coups de foudre dépassent 25 kA crête et 1% sont au-delà de 180 kA. La raideur de ces décharges peut atteindre 100 kA/ μ s. De plus, un coup de foudre est rarement unique, plusieurs impulsions (décharges) séparées de dizaines de millisecondes sont détectables (Fig2.12). Il se manifeste par l'injection dans la ligne, d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. Cette onde de courant, qui peut faire fondre des conducteurs en se propageant de part et d'autre du point d'impact (Fig2.11), provoque une augmentation de tension U qui atteint des valeurs de plusieurs millions de volts, ce qui n'est supportable par aucune ligne. Les effets destructeurs d'un coup de foudre direct sont bien connus : électrocution d'êtres vivants, fusion de composants si ce n'est incendie des bâtiments. [21]

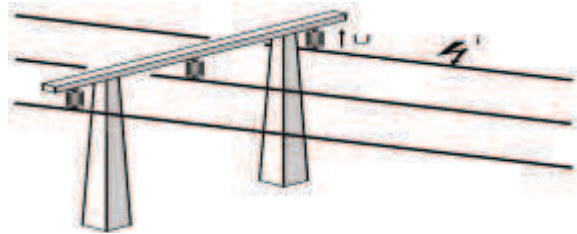


Fig. 2.11 : lors d'un coup de foudre direct, l'onde de courant se propage de part et d'autre du point d'impact.

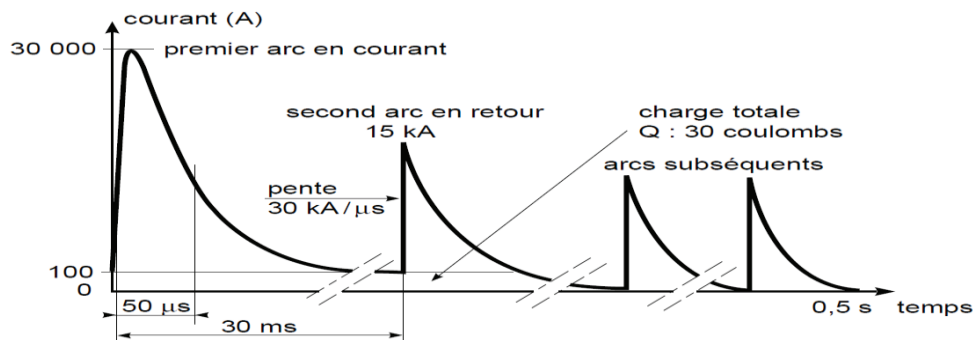


Fig2.12 : forme du courant de foudre nuage-sol négatif.

❖ Le coup de foudre indirect :

C'est la manifestation à distance d'un coup de foudre direct. Lorsqu'il se produit sur un support, ou même simplement à proximité d'une ligne, des surtensions importantes sont générées dans le réseau. Ce deuxième cas, plus fréquent que le précédent, peut se révéler presque aussi dangereux. [21]

- **Si la foudre tombe sur le pylône ou le câble de garde**, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique par rapport à la terre (Fig2.13). La surtension U correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV.

Avec R , résistance en onde raide de la prise de terre et L , l'inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre. Lorsque cette tension atteint la tension d'amorçage d'un isolateur, il se produit un « amorçage en retour » entre la structure métallique et un ou des conducteurs actifs. Pour les tensions de réseau supérieures à 150 kV, cet amorçage en retour est peu probable. La qualité de la prise de terre des pylônes joue un rôle important. A partir de 750 kV, il n'y a pratiquement aucun risque d'amorçage en retour. En dessous de 90 kV, ces câbles ne constituent une protection efficace que si la prise de terre des pylônes est excellente.

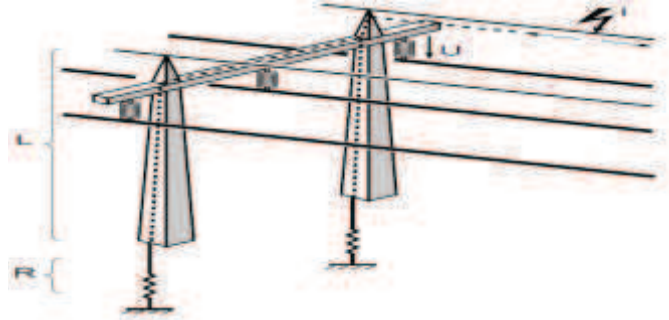


Fig2.13 : lorsque la foudre tombe sur le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique du pylône par rapport à la terre.

➤ **Si la foudre tombe à proximité de la ligne (le rayonnement),** l'écoulement de l'énergie vers le sol provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude à celles obtenues par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la micro seconde), et leur amortissement (apériodique ou pas) très rapide (caractéristiques typiques de ces ondes selon norme CEI 60 : durée de front de 1,2 μ s et durée de queue $\approx$ 50 μ s).

➤ **Les surtensions induites (le couplage capacitif:** lorsque l'onde de tension résultant d'un coup de foudre traverse d'un transformateur MT/BT, la transmission se fait essentiellement par couplage capacitif (Fig2.14). L'amplitude de la surtension ainsi transmise, observée sur le secondaire du côté BT, est inférieure à 10 % de ce qu'elle était du côté MT (généralement inférieure à 70 kV). Ainsi, sur les lignes BT, les surtensions induites sont en général inférieures à 7 kV. [21]

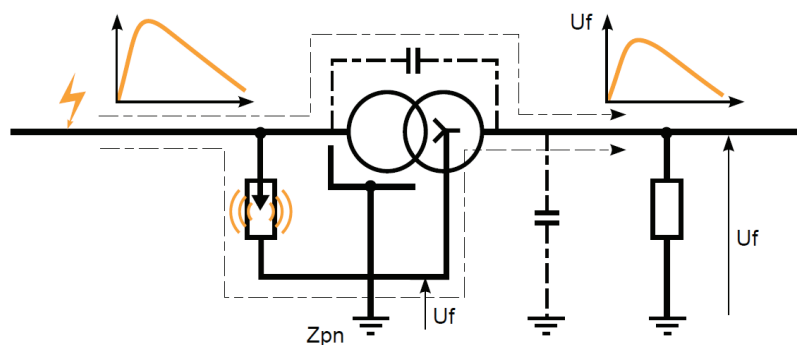


Fig2.14 : la transmission d'une surtension de foudre, de la MT vers la BT, se réalise par le Couplage capacitif des enroulements du transformateur.

II -2) Coordination de l'isolement dans une installation électrique industrielle

Généralités :

La coordination de l'isolement d'une installation consiste à déterminer les caractéristiques d'isolement nécessaires aux divers constituants du réseau, en vue d'obtenir une tenue homogène aux tensions normales, ainsi qu'aux différentes surtensions, pour ensuite pouvoir choisir les matériels de l'installation et les dispositifs de protection. Son but final est de permettre une distribution de l'énergie électrique sûre et optimisée, qui permet de trouver le meilleur rapport économique entre les différents paramètres dépendant de cette coordination :

- coût de l'isolement du matériel
- coût des protections contre les surtensions
- coût des défaillances (perte de l'exploitation et destruction de matériel), tenant compte de leur probabilité d'occurrence.

Le coût du sur-isolement du matériel étant très élevé, il ne peut pas être dimensionné pour tenir les contraintes de toutes les surtensions étudiées. S'affranchir des effets néfastes des surtensions suppose une première démarche qui consiste à s'attaquer à leurs phénomènes générateurs, ce qui n'est pas toujours évident. En effet, si à l'aide de techniques de coupure appropriées les surtensions de manœuvre de l'appareillage peuvent être limitées, il est impossible d'empêcher les coups de foudre. [20]

II -2.1) Distance d'isolement et tenue en tension :

II -2.1.a) Distance d'isolement :

La distance d'isolement est directement liée à la tenue du matériel aux différentes surtensions (Fig2.16). Cette appellation regroupe deux notions :

- **Distance dans les gaz** (air, SF₆, ...), c'est le plus court chemin entre deux parties conductrices.
- **Ligne de fuite** : c'est également le plus court chemin entre deux conducteurs, mais suivant la surface externe d'un isolant solide (isolateur par exemple).

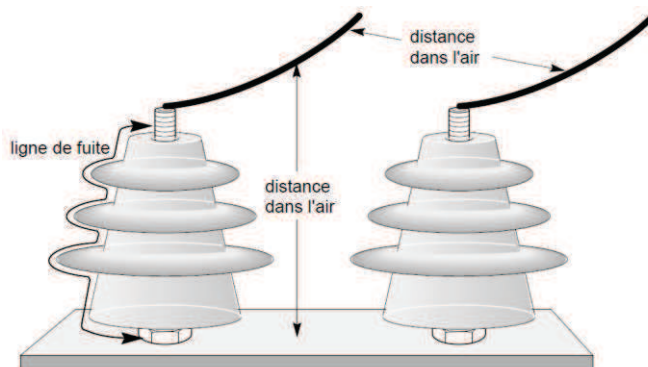


Fig2.16 : distance dans l'air et ligne de fuite.

II -2.1.b) Tenue en tension :

La tenue en tension dépend de la nature de la surtension appliquée (amplitude, forme d'onde, fréquence et durée, ...). Elle est aussi influencée par des facteurs externes tels que :

- vieillissement
- conditions d'environnement (humidité, pollution)
- variation de la pression de l'air ou du gaz isolant.

❖ Tension de tenue :

Le matériel électrique est caractérisé par sa tension de tenue aux différents types de surtensions. On distingue alors :

- la tension de tenue à fréquence industrielle
- la tension de tenue au choc de manœuvre
- la tension de tenue au choc de foudre.

- **Tension de tenue à fréquence industrielle :** Elle correspond à la tenue du matériel aux surtensions à fréquence industrielle susceptibles d'apparaître sur le réseau et dont la durée dépend du mode d'exploitation et de protection du réseau. La tenue du matériel est vérifiée par des essais en appliquant une tension sinusoïdale de fréquence comprise entre 48 Hz et 62 Hz pendant une minute. L'essai est valable pour les fréquences nominales de réseau de 50 Hz et 60 Hz (voir CEI 71-1).

- **Tension de tenue au choc de manœuvre** Elle caractérise la tenue du matériel au choc de manœuvre (uniquement pour les matériels dont la tension normalisée est supérieure ou égale à 300 kV). L'essai du matériel (voir CEI 60-1) est effectué en appliquant une onde de durée de front de montée de 250 μ s et d'une durée de descente jusqu'à la mi-amplitude de 2500 μ s.

- **Tension de tenue au choc de foudre** Elle caractérise la tenue du matériel à l'onde de tension de foudre 1,2 μ s / 50 μ s. Cette tension de tenue concerne toutes les gammes de tension, y compris la basse tension.

II -2.2) Réduction des risques et du niveau des surtensions :

La réduction des risques des surtensions, par conséquent du danger qu'elles représentent pour les personnes et le matériel, est d'autant meilleure si certaines mesures de protection sont respectées :

- limitation des résistances de prise de terre du poste pour la réduction des surtensions à fréquence industrielle
- réduction des surtensions de manœuvre par le choix d'appareillage de coupure approprié (coupure dans le SF6)
- écoulement à la terre des chocs de foudre par un premier écrêtage (parafoudre ou éclateur à l'entrée des postes) avec limitation des résistances de prises de terre et des impédances des pylônes
- limitation de la tension résiduelle du premier écrêtage par le parafoudre HT transmise au réseau aval, en prévoyant un deuxième niveau de protection au secondaire du transformateur
- protection des équipements sensibles en BT (informatiques, télécommunications, automatismes, ...) en leur associant des filtres séries et/ou des limiteurs de surtension. [21]

II -3) Les dispositifs de protection contre les surtensions :

Pour assurer la sécurité des personnes, la protection du matériel ainsi assurer la continuité de service. Il existe plusieurs composants chargés de limiter et/ou de supprimer les surtensions définies précédemment. Parmi les dispositifs utilisés dans la protection des réseaux électriques contre les surtensions on cite :

II -3.a) Les éclateurs :

Fonctionnement :

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre. A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel. La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur (Fig2.17). [20]

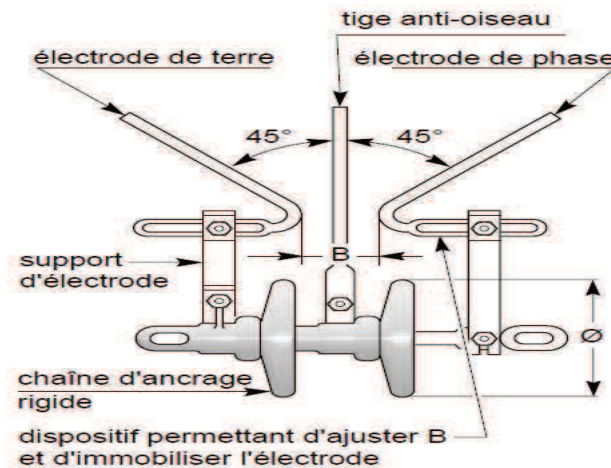


Fig2.17 : un éclateur MT avec tige anti-oiseaux

➤ **Avantages :** Les principaux avantages des éclateurs sont :

- leur faible prix
- leur simplicité
- la possibilité de réglage de la tension d'amorçage.

➤ **Inconvénients :**

- sa tension de mise en conduction élevée et dépendante de la raideur du front d'onde,
- son temps de réponse long et lié à la raideur du front d'onde,
- l'existence d'un courant de suite (extinction difficile),
- une dérive possible de sa tension de seuil.
- l'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase-terre à fréquence industrielle.

Dans le cas des éclateurs à air la tension d'amorçage dépend aussi des conditions atmosphériques (degré d'hygrométrie et pression) et donc de leur lieu d'installation (local humide et altitude) : des variations de 40 % ont pu être observées.

II -3.b) Les parafoudres :

Le parafoudre est un composant du système de protection de l'installation électrique. Ce dispositif est connecté en parallèle sur le circuit d'alimentation des récepteurs qu'il doit protéger. Il peut aussi être utilisé à tous les niveaux du réseau d'alimentation.

C'est le type de protection contre les surtensions le plus utilisé et le plus efficace. Pour palier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et une bonne continuité de service. Les parafoudres à résistance variable avec éclateur sont les plus répandus dans les installations HT et MT en exploitation depuis quelques années. La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleures. [20]

II -3.b.1) Principe de fonctionnement :

Le parafoudre est un dispositif destiné à limiter les surtensions transitoires d'origine atmosphérique et à dériver les ondes de courant vers la terre, afin de limiter l'amplitude de cette surtension à une valeur non dangereuse pour l'installation électrique et l'appareillage électrique. Le parafoudre élimine les surtensions :

- en mode commun, entre phase et neutre ou terre,
- en mode différentiel, entre phase et neutre.

En cas de surtension supérieure au seuil de fonctionnement, le parafoudre

- conduit l'énergie à la terre, en mode commun,
- répartit l'énergie dans les autres conducteurs actifs, en mode différentiel.

II -3.b.2) Quelques exemples des parafoudres :

1) Parafoudre à résistance variable avec éclateur (varistance) :

Ce type de parafoudre associe en série des éclateurs et des résistances non linéaires (varistances) capables de limiter le courant après le passage de l'onde de choc. [20]

• Principe de fonctionnement

Dans ce type de parafoudre, on associe à un éclateur une résistance variable (varistance) qui limite le courant après passage de l'onde de choc.

Après écoulement de l'onde de choc à la terre, le parafoudre n'est soumis qu'à la tension du réseau, et le courant de suite se trouve limité par la varistance.

L'extinction de l'arc se fait systématiquement après le passage à zéro de l'onde à 50 Hz du courant de défaut monophasé à la terre.

La tension résiduelle est maintenue proche du niveau d'amorçage grâce à la variation de la résistance. En effet, cette résistance diminue avec l'augmentation du courant.

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à varistance et éclateurs. La plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC). Certains parafoudres comportent également des systèmes répartiteurs de tension (diviseurs résistifs ou capacitifs) et des systèmes de soufflage de l'arc (aimants ou bobines de soufflage magnétique).

- **Caractéristiques :**

Les parafoudres à résistance variable sont caractérisés par :

- la tension assignée, qui est la valeur spécifiée maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement. Cette tension peut être appliquée de façon continue au parafoudre sans que cela modifie ses caractéristiques de fonctionnement.
- les tensions d'amorçage pour les différentes formes d'onde (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre, ...).
- le pouvoir d'écoulement du courant de choc.

2) Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO) :

Ils sont constitués uniquement de varistances et remplacent de plus en plus les parafoudres à résistances variables et éclateurs. (cf. fig. 23). L'absence d'éclateur fait que le parafoudre à ZnO est continuellement conducteur mais, sous la tension nominale du réseau protégé, avec un courant de fuite à la terre très faible (inférieur à 10 mA). [20]

- **Principe de fonctionnement**

La figure 16 montre que, contrairement au parafoudre à résistance variable avec éclateur, le parafoudre à oxyde de zinc est constitué uniquement d'une résistance variable fortement non linéaire. La résistance passe de 1,5 M Ω à la tension de service (ce qui correspond à un courant de fuite inférieur à 10 mA) à 15 Ω pendant la décharge. Après le passage du courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre devient égale à la tension du réseau. Le courant qui traverse le parafoudre est très faible et se stabilise autour de la valeur du courant de fuite à la terre. Le fort non linéarité du parafoudre *ZnO* fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension (voir Fig2.18). Par exemple, lorsque le courant est multiplié par 107, la tension n'est multipliée que par 1,8.

- **Caractéristiques :** Les parafoudres *ZnO* sont caractérisés par :

- la tension de régime permanent qui est la valeur spécifiée admissible de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliquée de façon continue entre les bornes du parafoudre.
- la tension assignée qui est la valeur maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement dans les conditions de surtension temporaires définies dans les essais de fonctionnement.
- le niveau de protection défini arbitrairement comme étant la tension résiduelle du parafoudre lorsqu'il est soumis à un choc de courant donné (5,10 ou 20 kA selon la classe), de forme d'onde 8/20 μ s
- la tenue aux chocs de courant à front raide (1 μ s), de foudre (8/20 μ s), de longue durée de manœuvre
- le courant nominal de décharge. [20]

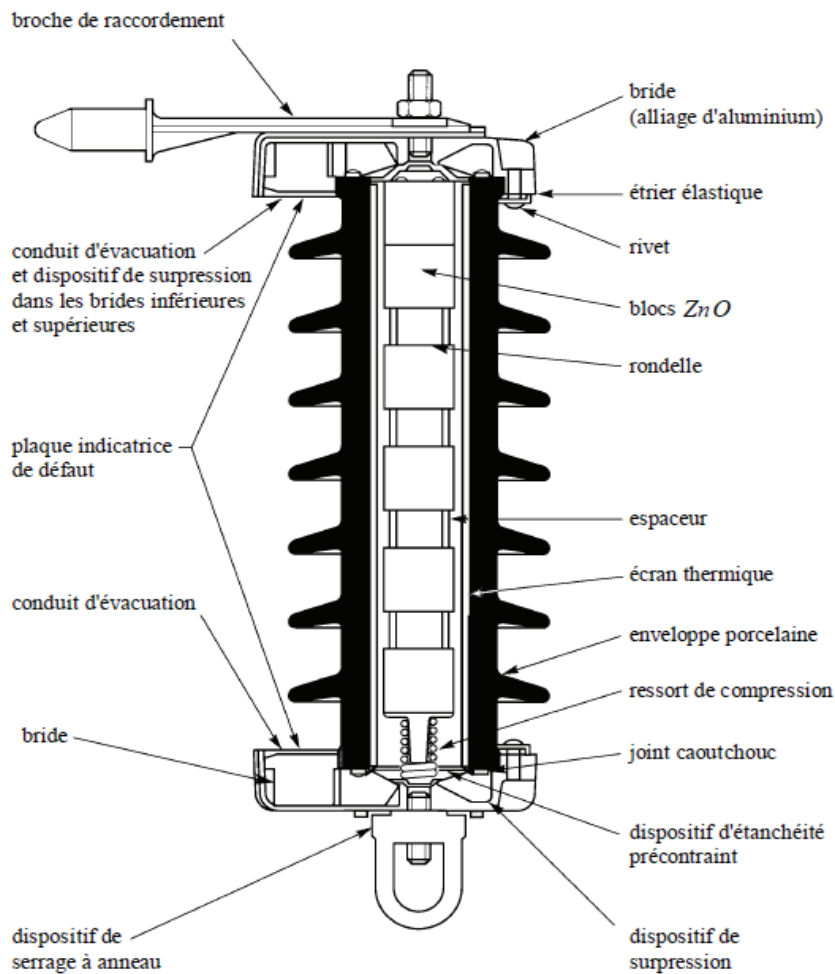


Fig2.18 : Parafoudre Zno en enveloppe porcelaine pour le réseau 20 kV.

II -3.c) Le câble de garde :

Le câble de garde est constitué d'un seul conducteur non isolés, surplombant les lignes électriques, ils sont ordinairement en alum-acier, Il joue un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne. Il est attaché directement au pylône, et ne transporte aucune énergie : il est relié au réseau de terre à chaque pylône et son but est d'attirer la foudre afin qu'elle ne frappe pas les phases de la ligne, évitant ainsi d'éventuelle surtensions perturbant le réseau. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. [2 , 3]

II -3.d) Régimes de neutre :

Le choix de la mise à la terre du neutre des réseaux MT et HT a été pendant longtemps un sujet de controverses passionnées, compte tenu de l'impossibilité de trouver un compromis unique pour les différents types de réseaux. L'expérience acquise permet aujourd'hui d'effectuer un choix pertinent en fonction des contraintes propres à chaque réseau. Dans ce chapitre sont comparés les différents types de liaison à la terre du neutre, qui se distinguent par leur mode de raccordement du point neutre et leur technique d'exploitation. [20]

II -3.d.1) Les modes de liaison à la terre :

Le potentiel du neutre peut être fixé par rapport à la terre par quatre méthodes différenciées par la nature (capacité, résistance, inductance), et la valeur (zéro à l'infini) de l'impédance Z_N de liaison que l'on connectera entre neutre et terre :

1) Neutre isolé, ($Z_N = \infty$)

Dans un tel réseau, un défaut phase terre ne provoque qu'un faible courant par l'intermédiaire des capacités phase-terre des phases saines (Fig2.19). Le courant I_d peut subsister longtemps en principe sans dommages car il ne dépasse pas quelques Ampères (2A par km environ pour un câble unipolaire 6 kV de 150 mm² de section isolé au PRC dont la capacité est de 0,63μF/km).

Il n'est donc pas nécessaire d'intervenir pour éliminer ce 1^{er} défaut, ce qui confère à cette solution l'avantage essentiel de maintenir la continuité de service parce que le courant de défaut très faible permet de ne pas déclencher automatiquement. C'est une solution souvent utilisée pour les réseaux industriels (≤ 15 kV) nécessitant la continuité de service. Mais ce régime du neutre contribue à des fortes surtensions d'amorçage d'arc.

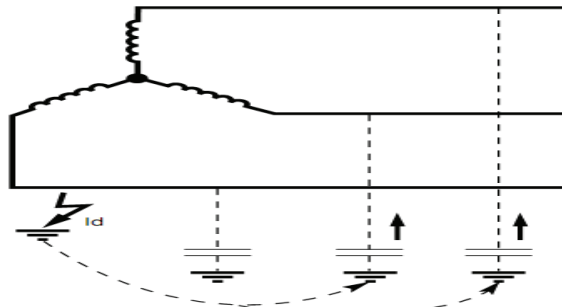


Fig2.19 : neutre isolé de la terre.

2) Mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ($Z_N = R$) :

Dans ce type de schéma, une impédance résistive limite le courant de défaut à la terre I_d , tout en permettant un bon écoulement des surtensions (Fig2.20). Mais par conséquent, des protections doivent intervenir automatiquement pour éliminer le premier défaut.

Dans les réseaux alimentant des machines tournantes la valeur de la résistance est déterminée pour obtenir un courant I_d de 15 à 50 A. Mais il faut que ce courant faible soit néanmoins $I_d \geq 2 I_c$ (I_c : courant capacitif total du réseau) pour réduire les surtensions de manœuvre et permettre une détection simple.

Dans les réseaux de distribution, on adopte des valeurs plus élevées (100 à 1000 A) plus faciles à détecter et permettant l'écoulement des surtensions de foudre. Le schéma de la fig 13 est un bon compromis entre un courant de défaut faible, et des surtensions bien écoulées. Les protections sont simples, sélectives et le courant est limité. On applique ce régime dans les réseaux MT de distribution publique et industrielle.

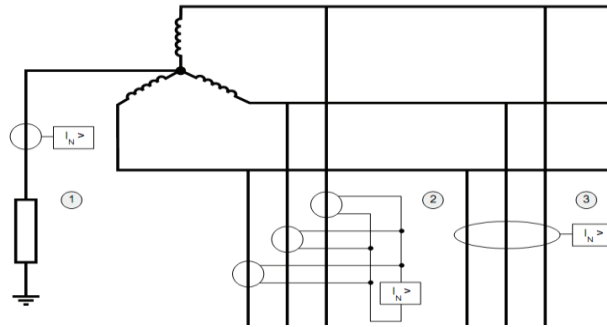


Fig2.20 : neutre mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance

3) Mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance de compensation:

Réactance accordée (bobine de Petersen) Cette solution est parfois utilisée sur les réseaux HT de distribution publique (Fig2.21). Elle est peu utilisée en distribution industrielle. Des relais de protection sensibles à la composante active du courant homopolaire sont nécessaires pour obtenir la sélectivité. Cette solution peut provoquer des surtensions sévères. Ce système permet de diminuer les courants de défaut même si la capacité phase terre est grande.

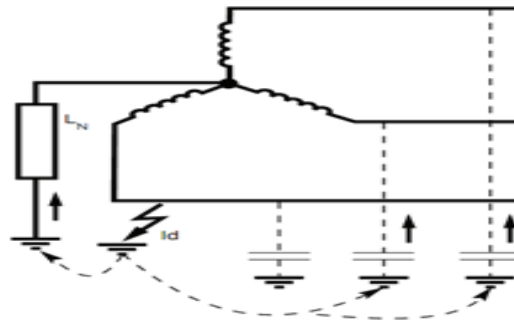


Fig2.21 : neutre mise à la terre par l'intermédiaire d'une réactance de compensation.

4) Le neutre mise à la terre directe ($Z_N = 0$) :

Ce type de mise à la terre limite au mieux les surtensions et la sélectivité des protections ne présente pas de difficultés. Par contre, en cas de défaut à la terre, le courant n'est pas limité, les dégâts et les perturbations sont maximum et le danger pour le personnel est important pendant la durée du défaut. Il n'y a pas de continuité de service, mais pas de protections spécifiques, les protections normales de surintensités de phases agissent pour éliminer le défaut. Cette solution n'est pas utilisée pour la distribution en haute tension.

II -3.d. 2) Difficultés et critères de choix :

Les critères de choix concernent de multiples aspects :

- Techniques (fonction du réseau, surtensions, courant de défaut, etc.),
- D'exploitation (continuité de service, maintenance),
- De sécurité,
- Economiques (coûts d'investissements, d'exploitation),
- Habitudes locales ou nationales.

En particulier, deux considérations techniques importantes sont contradictoires :

➤ **Réduire le niveau des surtensions :**

Des surtensions trop importantes sont à l'origine du claquage diélectrique des isolants électriques, avec des courts-circuits comme conséquence.

Les surtensions ont plusieurs origines :

- Surtensions de foudre auxquelles sont exposés tous les réseaux aériens jusqu'au point de livraison aux usagers,
- Surtensions internes au réseau engendrées par les manœuvres et certaines situations critiques (résonances),
- Surtensions résultant du défaut à la terre lui-même et de son élimination.

➤ **Réduire le courant de défaut à la terre:**

Un courant de défaut trop élevé entraîne toute une série de conséquences :

- Dégâts par l'arc au point de défaut ; en particulier, fusion des circuits magnétiques des machines tournantes,
- Tenue thermique des écrans de câble,
- Dimensions et coût de la résistance de mise à la terre,
- Induction dans les circuits de télécommunications voisins,
- Danger pour les personnes, par élévation du potentiel des masses.

Malheureusement, l'optimisation de l'une de ces exigences entraîne automatiquement la dégradation de l'autre. Ainsi, deux méthodes typiques de mise à la terre du neutre accentuent ce contraste :

- neutre isolé, qui supprime la circulation dans le neutre du courant de défaut terre, mais génère des surtensions plus importantes,
- Le neutre à la terre direct, qui réduit au minimum les surtensions, mais provoque un courant de défaut élevé.

En ce qui concerne les considérations d'exploitation, on notera selon le mode de liaison à la terre du neutre adopté :

- La possibilité ou non de fonctionner lors d'un premier défaut maintenu,
- La valeur des tensions de contact développées,
- La plus ou moins grande simplicité de mise en œuvre de la sélectivité des protections.

Ainsi le choix se portera souvent sur une solution intermédiaire de neutre relié à la terre par impédance. [20]

Synthèse des caractéristiques des régimes de neutre : [16]

Caractéristiques	Régimes de neutre				
	Isolé	Compensé	Résistance	Réactance	Direct
Amortissement des surtensions transitoires	–	+ –	+	+ –	+ +
Limitation des surtensions 50 Hz	–	–	+	+	+
Limitation des courants de défaut	+	+ +	+	+	– –
Continuité de service (autorisation du non déclenchement au premier défaut)	+	+	–	–	–
Protection sélective simple	–	– –	+	+	+
Dispense d'une personnel qualité	–	–	+	+	+

Légende : + bon

– médiocre

Récapitulation:

On a mis en évidence dans ce chapitre les différents types de surtensions, leur caractéristiques ainsi que les problèmes posé par la leur présence dans les installations de production et de distribution d'énergie électrique. Dans le cadre de la coordination de l'isolement on a cité qu'elle que normes recommandées par le comité international d'électrotechnique relatives aux distances d'isolement et aux tensions de tenue. Enfin nous avons passé en revue les différents dispositifs qui permettent d'atténuer les effets néfastes des surtensions.

Parmi les surtensions males connues et males élucidés, les surtensions de ferrorésonance, ce phénomène a déjà été observé de nombreuses fois dans des réseaux, et il est ainsi possible de classifier les comportements que l'on rencontre le plus souvent. Nous verrons au chapitre 3 les circuits typiques pouvant donner lieu à la ferrorésonance ainsi que ses principales caractéristiques. Nous présentons un circuit type, qui fait l'objet de cette étude, en indiquant qu'elle est les méthodes d'étude adaptées pour prédire son comportement et quelles sont les solutions pratiques généralement mises en œuvre pour éliminer les gênes dues à la ferrorésonance dans ce cas dans le chapitre 4.

Chapitre III :

La ferromagnétisme

Introduction

Pour pouvoir porter un jugement éclairé sur les risques de ferrorésonance et pour prendre les bons moyens correctifs qui s'imposent, il est impératif d'avoir une compréhension globale du phénomène de ferrorésonance. Une distinction entre résonance et ferrorésonance nous permet de mettre en évidence les caractéristiques particulières du phénomène de ferrorésonance.

Classiquement, en électrotechnique, on considère que les caractéristiques électriques des composants sont linéaires et, alors, le régime permanent atteint est unique et indépendant des conditions initiales. Des outils d'analyse numérique adaptés permettent de prévoir et d'expertiser les possibilités de ferrorésonance dans un réseau pour l'ensemble des valeurs possibles des paramètres de ce réseau en condition d'exploitation normale ou dégradée. Alors, les méthodes de calcul, basées sur l'approximation linéaire utilisée habituellement par les électriciens, ne permettent pas d'analyser ou de prédire un comportement ferrorésonant dans un circuit.

Les progrès récents dans le domaine des mathématiques et de l'analyse numérique nous permettent maintenant de disposer du cadre mathématique et des outils numériques adaptés à son étude, ces outils nous permettent de mieux comprendre et d'étudier plus finement le phénomène de ferrorésonance.

III.1) Résonance et ferrorésonance

III.1.1) Résonance

La présence d'éléments inductifs L, capacitifs C et résistifs R, raccordés, soit en série, soit en parallèle, donne lieu à des répartitions de courants et de tensions dont les valeurs peuvent être dangereuses pour le matériel.

III.1.1a) Résonance série

La figure (3.1) représente un circuit RLC série aux bornes duquel on applique une tension E_S .

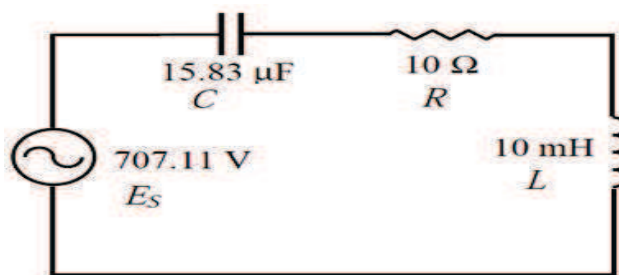


Fig3.1: Circuit linéaire résonant

Le diagramme vectoriel de la figure (3.2) montre que pour certaines valeurs de L et C, les tensions aux bornes de l'inductance et de la capacité peuvent être supérieures à la tension E_S du réseau. La tension E_S est la somme vectorielle des tensions aux bornes de chaque élément :

$$E_S = U_R + U_L + U_C = RI + jL\omega I + \frac{1}{jC\omega} I \dots \dots \dots (2)$$

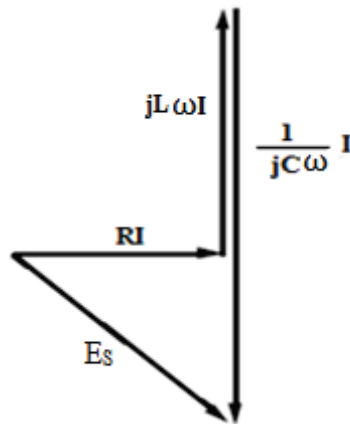


Fig3.2: Représentation de Fresnel d'un circuit RLC série alimenté par une tension E_s .

A la résonance : $jL\omega = \frac{1}{jC\omega}$... (3) On a alors $E_s = R I$; l'inductance et la capacité en série se comportent comme un court-circuit.

Pour L et C données, la pulsation ω_r telle que $LC \omega_r^2 = 1$ (4) est appelée pulsation de résonance. La fréquence de résonance est donnée par:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz) } \dots\dots\dots (5)$$

Les tensions apparaissant aux bornes de l'inducteur, et le condensateur, dans ces conditions peuvent atteindre plusieurs fois la tension de source. Le schéma de la figure (3.3) montre les caractéristiques de la tension aux bornes du condensateur, de l'inductance et le courant de charge quand la fréquence varie de 20 Hertz jusqu'à 600 Hertz. À la résonance, le graphe montre que la tension aux bornes l'inductance et le condensateur atteint des valeurs maximales quand la fréquence normale du circuit est accordé à environ 400 Hertz. Cette condition suggère également que les V_L et V_C excèdent la tension de la source. En outre, le courant dans le circuit est à son maximum parce que l'impédance du circuit est minimum, purement résistive. [24]

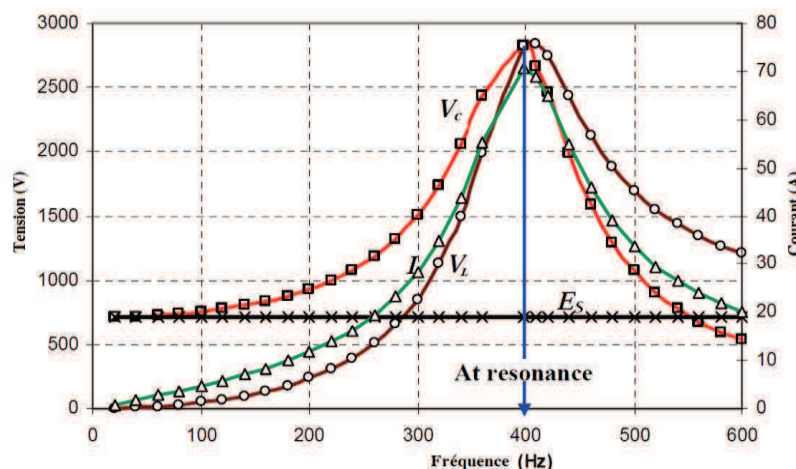


Fig3.3: Caractéristique de V_c , V_L , I et E_s en résonance

On définit alors un facteur de surtension f qui est le rapport de la tension U_L (ou U_C) à la tension d'alimentation E_S : [20]

$$f = \frac{U_L}{E_S} = \frac{L \omega_r I}{RI} = \frac{L \omega_r}{R} = \frac{1}{RC \omega_r} \dots\dots\dots(6)$$

Le circuit linéaire du schéma de la figure (3.1) une fois soumis aux conditions de résonance, produit une réponse prévue et de même forme que la tension de source. Des tensions sinusoïdales apparaissent sur tous les points du le circuit sans aucune déformation figure (3.4).

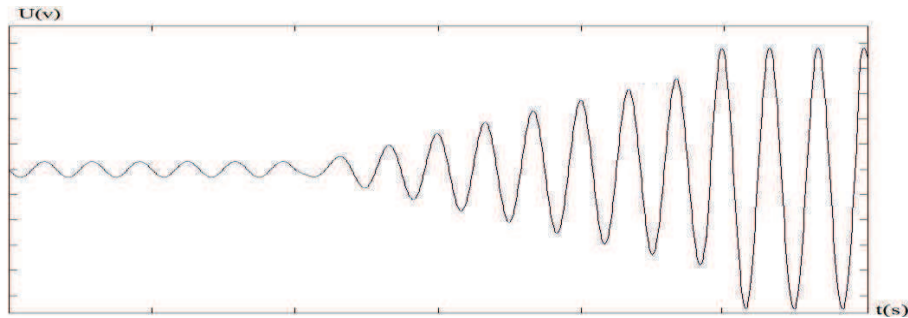


Fig3.4: Exemple de la forme de la surtension de résonance (pas de distorsion)

III.1.1b) Résonance parallèle

La figure (3.5) représente un circuit R, L, C parallèle aux bornes duquel on applique une source de courant J .

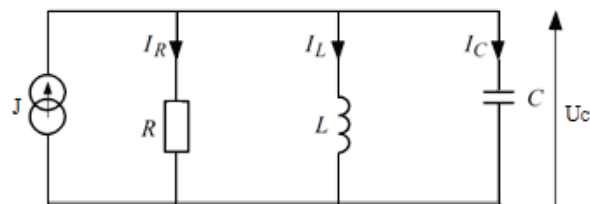


Fig3.5: circuit R, L, C parallèle alimenté par une source de courant J

La tension U est commune aux trois éléments. On a la relation suivante :

$$I = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} + jC\omega \right) U \dots\dots\dots(7)$$

Le phénomène de résonance apparaît lorsque $I_L = -I_C$:

$$\frac{U}{jL\omega} = -jC\omega U, \quad LC\omega^2 = 1 \dots\dots\dots(8)$$

On a alors $U = R J$; l'inductance et la capacité montés en parallèle se comportent comme un circuit ouvert, appelé circuit bouchon.

Pour L et C données, la pulsation ω_r telle que $LC\omega_r^2 = 1$ est appelée pulsation de résonance.

On définit alors le facteur de surtension qui est le rapport entre la tension qui apparaît aux bornes du circuit R, L, C parallèle à la résonance, et la tension qui apparaîtrait à la résonance si l'inductance (ou la capacité) était le seul élément du circuit.

$$f = \frac{RJ}{L \omega_r J}, \quad f = \frac{R}{L \omega_r} = RC\omega_r \dots\dots\dots(9)$$

III.1.2) Ferrorésonance

III.1.2.a) Ferrorésonance série

En revanche, les choses ne sont pas tout à fait les mêmes dans un circuit non-linéaire série, comme ce qui s'est produit la résonance dans le circuit linéaire série. L'inductance linéaire du schéma de la figure (3.1) est remplacée par une inductance non-linéaire (à noyau de fer saturable). Le circuit série se compose d'une source alternative V (ou E_s pour le schéma de la figure (3.7)), une résistance R , un condensateur C et une inductance non-linéaire L_m comme représenté sur le schéma de la figure (3.6). [24]

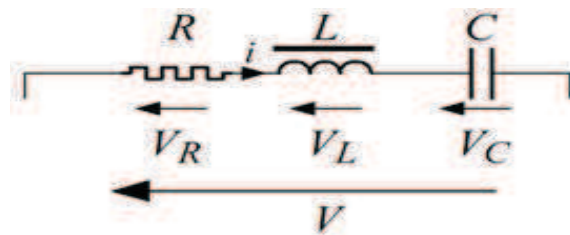


Fig3.6: Circuit ferrorésonant série

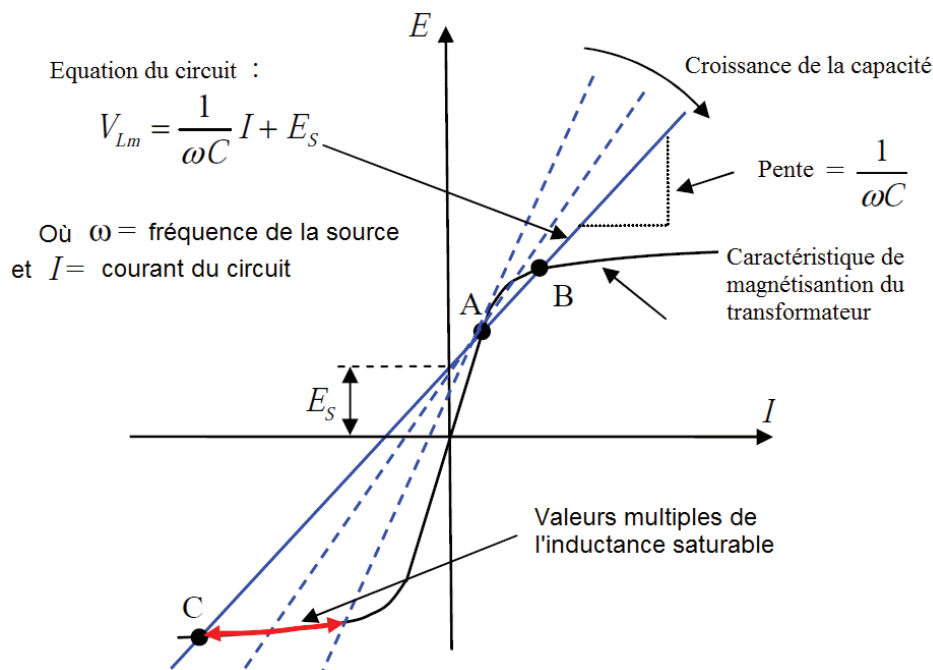


Fig3.7: Caractéristique E-I (ou V-I) du circuit de ferrorésonance

Dans le circuit linéaire, la résonance se produit seulement à une fréquence avec une seule valeur de L et C . D'autre part, le circuit non-linéaire peut présenter des valeurs multiples de l'inductance, en raison de la saturation du noyau de fer, donc ceci implique qu'il y a plusieurs valeurs de la capacité, qui peuvent potentiellement mener à la ferrorésonance à une fréquence donnée, qui sont représenté sur le schéma de la figure (3.7). [24]

Comme pour le circuit parallèle, cette équation peut être résolue graphiquement en fonction de i , en traçant les courbes (fig3.8) :

$$v = \sqrt{V^2 - R^2 I^2} \quad \text{et} \quad v = V_L - \frac{i}{C\omega} \quad \dots\dots\dots(10)$$

La courbe $V_L(I)$ présente une pente très faible lorsque I augmente en raison de la saturation du noyau de fer de la bobine : $V_L(I) = L(I) \times \omega \times V$.

A la saturation, $L(I)$ devient très faible, la tension augmente presque plus lorsque I croît. Le point de fonctionnement du réseau est situé à l'intersection de la courbe (b) d'équation :

$$v = V_L - \frac{i}{C\omega} \quad \text{et l'ellipse (a) d'équation : } v = \sqrt{V^2 - R^2 I^2} \dots\dots\dots(11)$$

Il existe trois points de fonctionnement possibles : M, N, P. M et P sont stables, N est instable. Une perturbation de tension peut faire passer le circuit du point M au point P. Il en résulte un courant important et des surtensions importantes aux bornes de l'inductance et du condensateur. La ferrorésonance peut être évitée si la résistance R est suffisamment élevée pour que l'ellipse (a) reste à l'intérieur de la zone OSA, même lors d'une surtension élevée. [24]

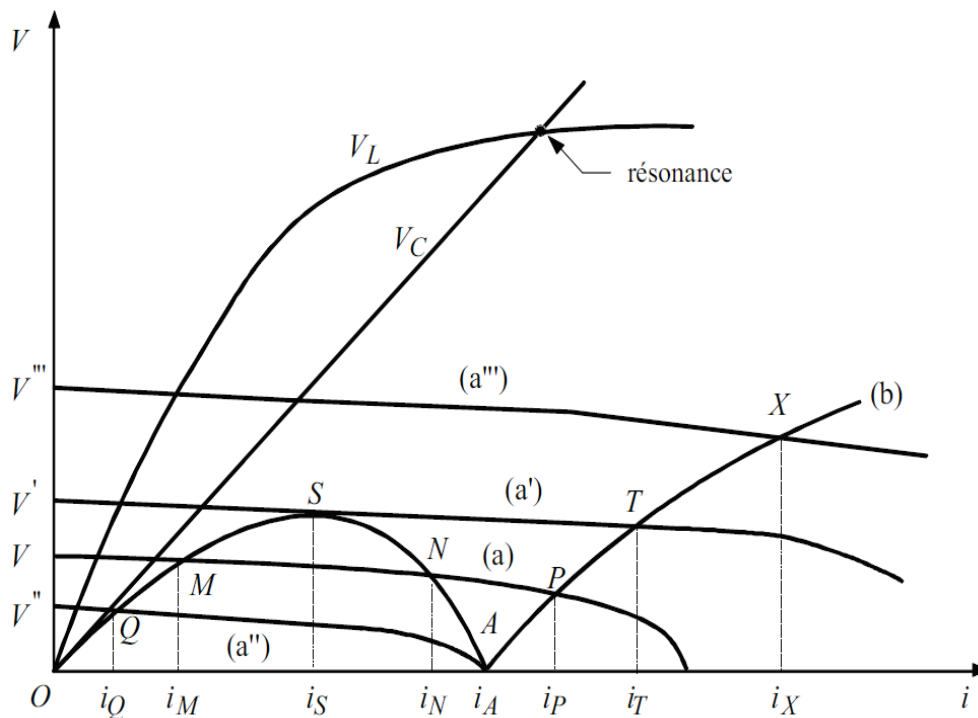


Fig3.8: Ferrorésonance série - résolution graphique

III.1.2.b) Ferrorésonance parallèle

Soit un circuit constitué par un condensateur, une bobine d'induction à noyau de fer saturable et une résistance en parallèle. Soit R la résistance, C la capacité, L l'inductance propre variable avec le courant traversant la bobine et la tension aux bornes du circuit.

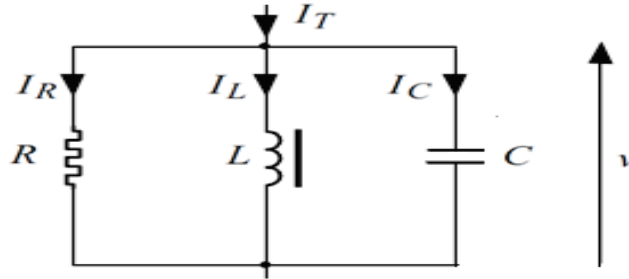


Fig3.9: Circuit ferrorésonant parallèle

Le courant total I_T traversant le circuit est alors donné par la relation (1) :

$$I_T = \frac{V}{R} + j(C\omega V - I_L) \quad \dots\dots\dots(12)$$

On ne peut pas exprimer I_L en fonction de V , en raison de la non-linéarité de L .

Les valeurs efficaces sont données par la relation: $I_T^2 = \frac{V^2}{R^2} + j(C\omega V - I_L)^2 \quad \dots\dots(13)$

On peut alors écrire la relation : $\sqrt{I_T^2 - \frac{V^2}{R^2}} = |C\omega V - I_L| \quad \dots\dots\dots(14)$

Cette équation peut être résolue graphiquement en traçant, en fonction de V , les courbes représentatives des fonctions (fig3.10) : $I = \sqrt{I_T^2 - \frac{V^2}{R^2}} \quad (a), \quad I = |C\omega V - I_L| \quad \dots\dots\dots(15)$

L'intersection des courbes (a) et (b) donne, pour toute valeur de I_T , les solutions en V de l'équation (3) ; la figure (3.10) montre la résolution graphique de cette équation.

La courbe (a) est une ellipse d'équation : $\frac{V^2}{R^2} - I^2 = I_T^2$ dont un des demi-axes est égal à I_T et l'autre à $R I_T$. A chaque valeur du courant total I_T correspond une ellipse.

La courbe $I_L(V)$ présente une pente très importante lorsque V augmente en raison de la saturation du noyau de fer de la bobine : $I_L(V) = \frac{V}{L(V)\omega} \quad \dots\dots\dots(16)$

A la saturation, $L(V)$ devient très faible, le courant augmente alors fortement (fig3.10).

La courbe $I_C = C\omega V$ est une fonction linéaire de V .

La courbe (b) représente l'évolution de $I_C - I_L = (C\omega V - I_L)$ en fonction de la tension.

La portion OSA de la courbe (b) correspond à un courant en avance par rapport à la tension, en raison de la prépondérance du courant capacitif. Au contraire, la partie AB correspond à un courant en retard, le courant inductif étant prépondérant. L'intersection de l'ellipse (a) et de la courbe (b) peut donner :

- un point de fonctionnement Q si l'ellipse (a) est à l'intérieur de l'ellipse (a'') passant par le point A
- 3 points de fonctionnement M, N, P si l'ellipse (a) est comprise entre les ellipses (a') et (a'')
- deux points S, T si l'ellipse (a) est confondue avec l'ellipse (a')
- un seul point X si l'ellipse (a) est extérieure à l'ellipse (a').

❖ Le mécanisme de ferrorésonance :

Le circuit étant initialement au repos, le courant total I_T est nul, ainsi que la tension V , l'ellipse (a) se réduit au point O. Si le courant croît, la longueur des axes de l'ellipse (a) augmente et la tension s'élève, le point de fonctionnement M du régime se déplace sur la branche OS de la courbe (b). Lorsque le courant total dépasse la valeur I_T' pour laquelle l'ellipse (a') coupe la courbe (b) en S, le point de fonctionnement saute brusquement du point M au point T situé sur la branche AB de la courbe (b), puis il se déplace sur cette branche. La tension augmente donc brusquement, passant de V_S à V_T , puis elle continue à croître si le courant I_T augmente. Si maintenant le courant total décroît, le point B se déplace sur la branche AB et y demeure, même si le courant retombe au-dessous de la valeur I_T' correspondant à l'ellipse (a'). Lorsque le courant atteint la valeur I_T , le point de fonctionnement est P au lieu de M.

Celui-ci ne revient sur la branche OS que si le courant tombe au-dessous de la valeur I_T'' correspondant à l'ellipse (a'') passant par le point A. A ce moment, le point B saute brusquement de A à Q, et la tension de V_A à V_Q . On voit donc qu'à une même valeur efficace du courant I_T , peuvent correspondre deux régimes stables, pour lesquels la tension aux bornes du circuit prend des valeurs très différentes, V_M et V_P par exemple. En définitive, si le régime initial correspond à une tension faible (branche OS), avec un courant résultant capacitif, il peut arriver que, par suite d'un brusque changement de régime entraînant un phénomène transitoire (surintensité ou surtension), le courant résultant devienne inductif et que la tension conserve une valeur importante, même lorsque la perturbation a disparu. La ferrorésonance est évitée si la résistance R est suffisamment faible pour que l'ellipse (a) reste à l'intérieur de la zone OSA, même lors d'une surintensité élevée. [20]

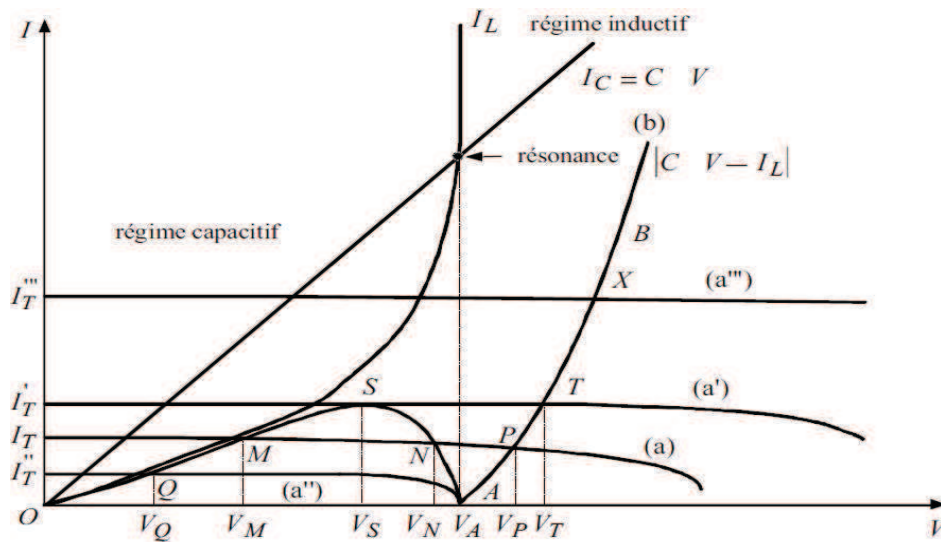


Fig3.10: Ferrorésonance parallèle - résolution graphique

La propriété essentielle et caractéristique du phénomène de la ferrorésonance est de présenter au moins deux régimes stables pour une même excitation, la présence d'inductances aux caractéristiques non linéaires peut conduire à des comportements radicalement différents. Plusieurs régimes permanents différents peuvent apparaître dans un circuit donné. Ces régimes sont généralement anormaux et même dangereux pour le matériel électrique, car ils présentent des surtensions ou des surintensités. [20]

III.1.3) Différence entre la ferrorésonance et la résonance :

Les différences fondamentales d'un circuit ferrorésonant par rapport à un circuit résonant linéaire sont, pour ω donnée :

- la possibilité qu'il a de résonner dans une large plage des paramètres,
- la fréquence des ondes de tensions et de courants qui peut être différente de celle de la source de tension sinusoïdale,
- l'existence de plusieurs régimes permanents stables pour une configuration et des valeurs de paramètres données. Un de ces régimes est le régime « normal » attendu (dans l'hypothèse linéaire), les autres régimes « anormaux » inattendus sont souvent dangereux pour le matériel.

Le régime effectivement atteint dépend des conditions initiales (charges électriques des condensateurs, flux rémanent du matériau constituant le circuit magnétique des transformateurs, instant d'enclenchement). [25]

III.1.4) Conditions et interprétation physique de la ferrorésonance

D'après cette définition de la ferrorésonance quatre conditions sont nécessaires pour l'existence de ce phénomène dans un circuit:

- le circuit doit être excité par une ou plusieurs sources de tensions (habituellement sinusoïdales)
- il doit y avoir un ou plusieurs éléments non linéaires constitués d'un matériau ferromagnétique saturable comme les inductances ou les transformateurs
- il doit y avoir un ou plusieurs condensateurs pour échanger de l'énergie avec l'élément non linéaire
- les pertes doivent être faibles. [27]

III.1.5) Exemple simple de ferrorésonance dans un transformateur monophasé :

Considérons le circuit de la figure (3.11), comprenant l'enroulement primaire d'un transformateur alimenté par une source de tension sinusoïdale de valeur efficace E par l'intermédiaire d'un circuit RC, exemple bien connu de la ferrorésonance série en monophasé. La courbe de saturation du transformateur, en coordonnées V, I , (V et I en valeurs efficaces), est donnée par la figure (3.12).

On note que la courbe de saturation est constituée de trois branches caractéristiques :

- une branche OA sensiblement rectiligne où la loi de variation de $V(I)$ est pratiquement linéaire ; ici, le transformateur n'est pas saturé, il se comporte comme une inductance constante égale à sa valeur à l'origine $L = L_0$; la relation $V(I)$ s'écrit : $V = L_0 \omega I$ avec ω la pulsation de la source ;

- une deuxième branche BC sensiblement rectiligne où le transformateur est très saturé ; dans cette zone, tout se passe comme si le fer se comportait comme l'air (la perméabilité relative μ_r tend vers l'unité), le transformateur est de nouveau équivalent à une inductance constante $L = L_s$; la loi de variation de $V(I)$ est pratiquement : $V = V_0 + L_s \omega I$
- une troisième branche AB intermédiaire appelée coude de saturation où la relation $V(I)$ n'est pas linéaire ; en particulier, on ne peut plus définir une inductance constante équivalente au transformateur.

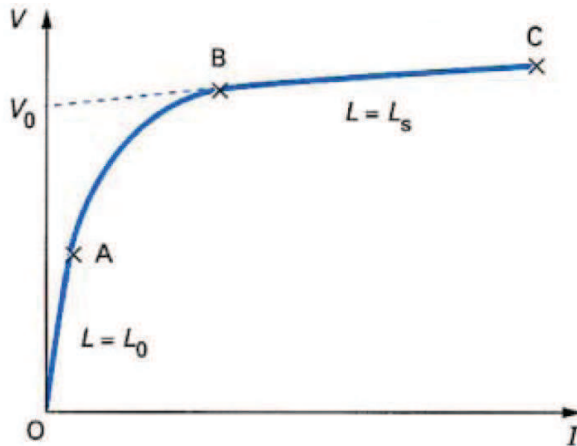


Fig3.12: Courbe de saturation d'un transformateur dans le plan tension efficace-courant efficace en négligeant les harmoniques

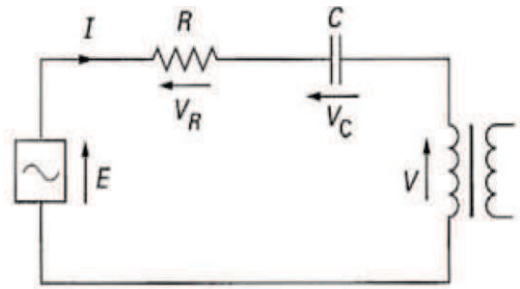


Fig3.11: Circuit ferrorésonant série simple

III.1.5.a) Mise en équations.

Courbes caractéristiques

Pour simplifier l'explication, nous négligeons pour le moment toutes les pertes ($R = 0$) et nous supposons que la source de tension est sinusoïdale et idéale. De même, nous négligeons les harmoniques et admettons que les composantes fondamentales de v et i dans leur décomposition en série de Fourier sont en quadrature de phase (pertes nulles). En notations complexes, l'équation du circuit de la figure (3.11) s'écrit alors :

$$\bar{E} = \bar{V} + \bar{V}_c \text{ avec } \bar{V}_c = -jX_c \bar{I}$$

Où $X_c = 1/\omega_0$ est la réactance de la capacité C ,

ce qui donne, en faisant intervenir les modules de ces grandeurs, (les valeurs efficaces) :

$$|E| = |V| - X_c |I| \text{ et on peut écrire : } E(I) = V - X_c I$$

Nous pouvons donc facilement tracer la courbe $E(I)$ à partir de $V(I)$ et $V_c = X_c I$.

La valeur efficace E de cette grandeur $E(I)$ est représentée sur la figure (3.13a).

Notons que la courbe $E(I)$ présente deux zones quasi linéaires :

- pour les valeurs de I qui ne saturent pas le transformateur ;
- pour les valeurs de I le saturant complètement.

Le point M_0 caractérise le passage du courant d'un état inductif à un état capacitif. Lorsque $E(I)$ est positif ($V < V_c$), E et V sont alors en opposition de phase. L'existence du point M_0 dépend évidemment de la valeur de la capacité C du condensateur pour une fonction $V(I)$ donnée.

À cause des pertes (quoique faibles dans un circuit ferrorésonant), la courbe $E(I)$ réelle est légèrement décalée. En particulier, le point M_0 ne correspond pas à une tension d'alimentation rigoureusement nulle. La source fournit l'énergie nécessaire à l'équilibre des pertes. Pour simplifier nous assimilons ces pertes à celles dissipées dans la résistance R constante placée en série dans le circuit (figure 3.11). Dans ces conditions, la nouvelle courbe $E(I)$ est représentée sur la figure 3.12b.

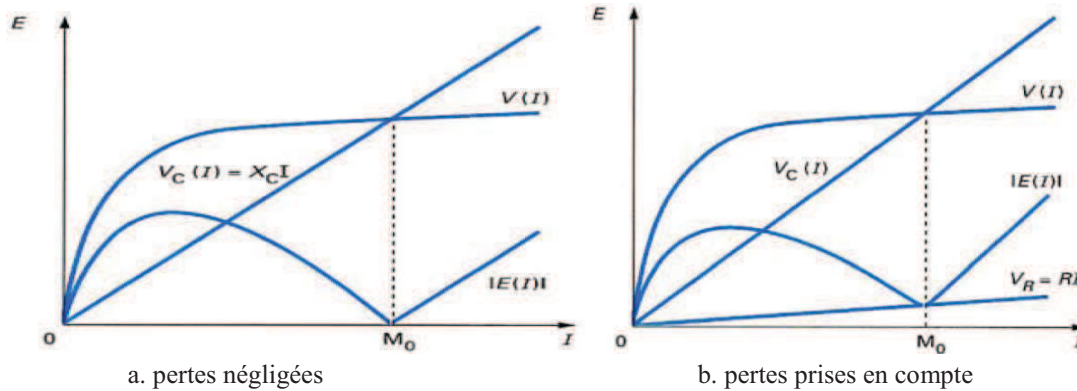


Fig3.12: Courbes de tension en valeurs efficaces

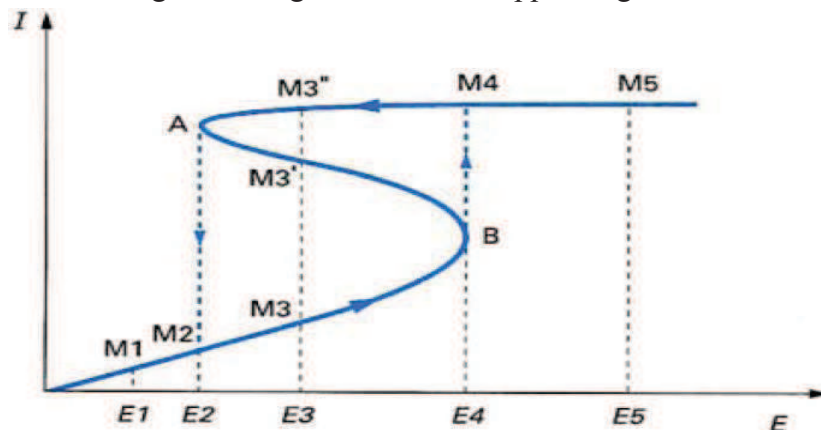
Intéressons-nous aux points de fonctionnement correspondant à diverses valeurs de la tension source E . On peut construire la courbe $I(E)$ (figure 3.13) à partir de la courbe $E(I)$ (figure 3.12b) en échangeant simplement les axes. On obtient une courbe, dite courbe en S typique de la ferrorésonance que l'on retrouve par différentes méthodes. Son analyse va nous permettre de faire certaines constatations qui illustrent des comportements typiques et des notions générales pour la ferrorésonance.

III.1.5. b) Constatations

III.1.5. b.1) Multiplicité des solutions. Valeur critique de la tension. Branche de solution

Selon les valeurs de E (figure 3.13), il existe plusieurs types de comportements.

- Si E est petit, il n'existe qu'un seul point de fonctionnement possible (M_1 pour $E = E_1$) et la figure (3.13) montre que le courant est sensiblement proportionnel à la tension E . Ici, le transformateur n'est pas saturé ; il se comporte comme une inductance linéaire équivalente à son inductance à l'origine. Le régime obtenu est appelé régime normal.



I courant efficace

Fig3.13: Points de fonctionnement correspondant à diverses valeurs de la tension efficace source E

- Il existe une première valeur critique E_2 de la tension source pour laquelle on observe deux points de fonctionnement en M2 et en A. Le régime correspondant au point de fonctionnement M2 est un régime normal ; par contre, celui correspondant au point A est un régime ferrorésonant ; il caractérise la tension source minimale au-delà de laquelle la ferrorésonance risque d'apparaître.
- Pour $E > E_2$, nous avons trois solutions possibles (M_3, M_3', M_3'' pour $E = E_3$). M_3 correspond à un régime normal, M_3'' à un régime ferrorésonant ; M_3' est une solution du système mais elle correspond à un régime instable. Elle ne se maintient pas en régime permanent dans le circuit réel ; la moindre perturbation la fait disparaître et le régime permanent qui se stabilise est le régime normal ou le régime ferrorésonant.
- Une nouvelle valeur critique de la tension source correspond à deux points de fonctionnement B et M4 pour $E = E_4$. Le point B correspond à la limite.
- Pour $E > E_4$, nous ne trouvons qu'un seul point de fonctionnement (M_5 pour $E = E_5$) et le régime ne peut être que ferrorésonant.

Le transformateur est très saturé ; il se comporte comme une inductance dans l'air.

On voit que les valeurs E_2 et E_4 de la tension d'alimentation sont des valeurs limites ou valeurs critiques du paramètre tension d'alimentation. [26]

Les solutions correspondantes situées aux points A et B sur la courbe sont appelées points limites. Ces points divisent la courbe en trois branches : de l'origine au point B, nous avons la branche normale, de B à A une branche instable et au-delà de A, la branche ferrorésonante.

III.1.5. b.2) Dépendance et sensibilité aux conditions initiales

On voit sur cet exemple simplifié mais réaliste que plusieurs régimes stables peuvent exister en régime permanent dans un circuit ferrorésonant. Les solutions M_3 et M_3'' obtenues pour la même excitation E_3 . L'une ou l'autre des 3 solutions M_3, M_3' ou M_3'' apparaît selon la valeur des conditions initiales (charge de la capacité, flux rémanent à l'instant d'enclenchement, etc.). On peut définir une frontière pour les conditions initiales. Si l'on est d'un côté de cette frontière, on converge vers la solution M_3 ; si l'on est de l'autre, on se stabilise sur la solution M_3'' . La solution M_3' correspond à un point de cette frontière.

On comprend dès à présent que, au voisinage du point M_3' , la solution est très sensible aux conditions initiales. La grande sensibilité aux conditions initiales est une caractéristique de la ferrorésonance.

III.1.5. b.3) Phénomène de saut. Sensibilité au paramètre tension

Nous pouvons étudier comment le système se comporte lorsque l'on fait varier lentement sa tension d'alimentation (figure 3.13). En partant de la tension nulle, le point représentatif de la solution passe successivement par les points M_1, M_2, M_3 . Dans cette zone, le point solution dépend continûment de la valeur du paramètre tension. Il en est de même sur la branche ferrorésonante.

Lorsque l'on arrive au point B, et que la tension d'alimentation dépasse la valeur critique E_4 , le point représentatif de la solution ne peut rester au voisinage de B, mais saute au point M4. Physiquement, il y a une variation brutale de l'amplitude du courant : on parle de phénomène de saut. De même, en partant de la branche ferrorésonante, lorsque la tension d'alimentation devient inférieure à la valeur critique E_2 , l'amplitude du régime solution chute brutalement et le point représentatif du régime passe de A en M2.

On voit ainsi que le phénomène dépend continûment du paramètre tension, sauf en des valeurs critiques où son comportement est très sensible à la valeur de ce paramètre.

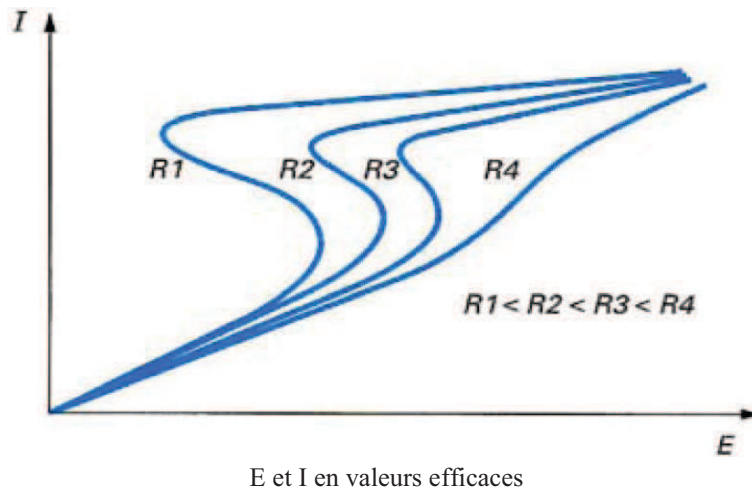


Fig3.14: Influence de la résistance sur le phénomène de ferrorésonance

Nous avons expliqué ce phénomène pour le paramètre tension d'alimentation. Il est similaire pour un autre paramètre comme la résistance représentant les pertes. La figure (3.14), construite à partir de plusieurs courbes $I(E)$ pour différentes valeurs R de la résistance, illustre cela. On note que le phénomène de ferrorésonance est atténué lorsque les pertes augmentent et même que les phénomènes de saut et de multiplicité de solutions disparaissent pour une valeur critique de R (cas $R > R_4$).

Cette discussion, sur un exemple simple avec une modélisation simplifiée, permet de comprendre l'essentiel des caractéristiques de la ferrorésonance. Mais le phénomène est de nature plus complexe que dans cet exemple. En particulier, les régimes pouvant apparaître sont de natures variées ; nous allons, paragraphe 2, en donner une classification. [26]

III -2) Approche physique de la ferrorésonance

L'étude des oscillations libres du circuit de la figure (3.15a) permet d'illustrer ce comportement particulier. Les pertes sont supposées négligeables et la caractéristique $\Phi(i)$ simplifiée de la bobine à noyau de fer est celle représentée figure (3.15b). Malgré ces hypothèses simplificatrices, les formes d'ondes correspondantes (figure 3.15c) sont caractéristiques d'un régime de ferrorésonance périodique.

A l'origine, la tension aux bornes de la capacité est supposée égale à V_0 .

- A l'instant t_0 l'interrupteur K est fermé. Un courant i s'établit et oscille à la pulsation

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (17)$$

Les expressions du flux dans la bobine et de la tension V aux bornes du condensateur sont alors :

$$\phi = (V_0/\omega_1) \sin \omega_1 t; \quad V = V_0 \cos \omega_1 t \quad \dots \dots \dots (18)$$

- Si $V_0/\omega_1 > \phi_{\text{sat}}$, au bout du temps t_1 , le flux ϕ atteint le flux de saturation ϕ_{sat} , la tension v est égale à V_1 et l'inductance de la bobine saturée devient L_s . Comme L_s est très petite devant L , le condensateur se « décharge » brusquement à travers la bobine, sous forme d'une oscillation de pulsation $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$. Le courant et le flux passent par un maximum lorsque l'énergie électromagnétique emmagasinée par la bobine est égale à l'énergie électrostatique $\frac{C V_1^2}{2}$ restituée par le condensateur.
- A l'instant t_2 , le flux revient à ϕ_{sat} , l'inductance prend de nouveau la valeur L et comme les pertes ont été négligées, la tension v qui s'est inversée est égale à $-V_1$.
- A l'instant t_3 , le flux atteint $-\phi_{\text{sat}}$ et la tension v est égale à $-V_2$.

Comme ω_1 est en pratique très petite on peut considérer $V_2 \approx V_1 \approx V_0$.

Par conséquent la période T de l'oscillation est comprise entre $2\pi \sqrt{LC}$ dans le cas non saturé et $2\pi \sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$ dans le cas saturé (avec $t_3 - t_2 \approx 2 \phi_{\text{sat}}/V_0$) ... (19)

La fréquence f correspondante ($f = 1/T$) est donc telle que :

$$\frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C}} \dots \dots \dots (20)$$

Cette fréquence initiale dépend de ϕ_{sat} c'est à dire de la non linéarité et de la condition initiale

En pratique, du fait des pertes $R i^2$ dans la résistance R (principalement à chaque inversion de tension), l'amplitude de la tension V décroît ($V_2 < V_1 < V_0$). Comme la variation de flux $\Delta\phi$ pendant la période $(t_3 - t_2)$ non saturée est telle que $\Delta\phi = 2\phi_{\text{sat}} = \int_{t_2}^{t_3} v dt$, la diminution de v conduit à une diminution de la fréquence. Si les pertes d'énergie (pertes joules, pertes fer ...) sont compensées par l'énergie apportée par une source de tension, la fréquence en diminuant peut se synchroniser sur la fréquence de la source (dans le cas où la fréquence initiale est supérieure à la fréquence du réseau) ou même à une fréquence sous-multiple de celle de la source (dans le cas où la fréquence initiale est plus petite que la fréquence du réseau).

Ceci montre que contrairement à la résonance linéaire, pour une inductance donnée, le phénomène de résonance peut apparaître non plus pour une valeur bien particulière de C mais pour une large gamme de valeurs de C . [25]

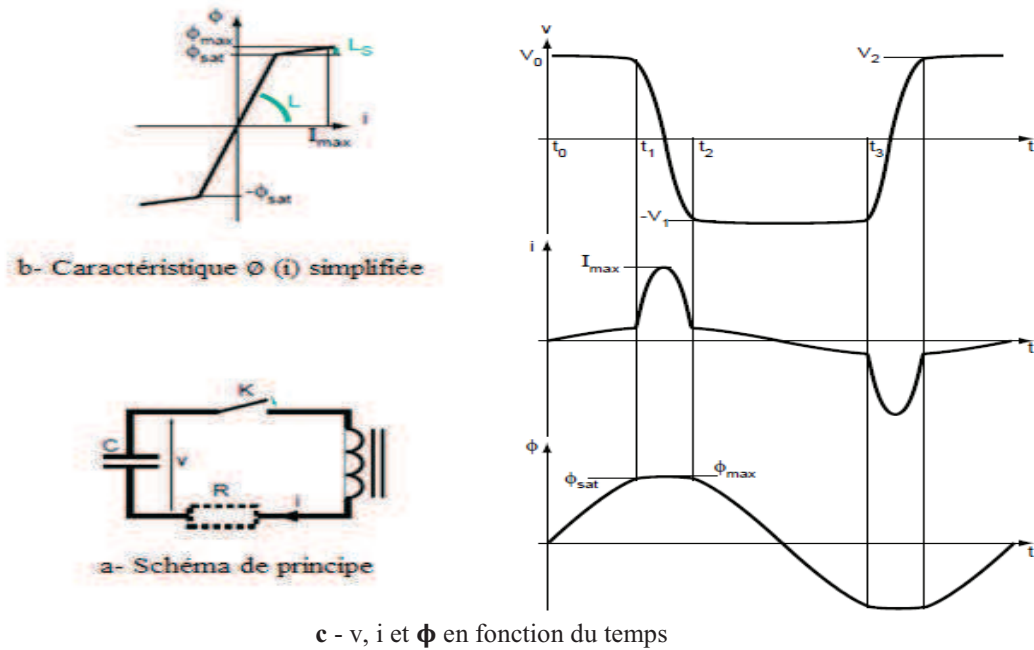


Fig3.15: oscillations libres d'un circuit ferrorésonant série.

Caractéristiques principales

Grâce aux méthodes adaptées précisées dans la suite de ce chapitre, l'étude du circuit de la figure (3.15a) permet de tracer les courbes représentées figure (3.15b et 3.15c). Ces courbes illustrent les caractéristiques de la ferrorésonance :

❖ Sensibilité vis à vis des valeurs des paramètres du réseau :

La courbe de la figure (3.16a) décrit la tension crête V_L aux bornes de l'inductance non linéaire en fonction de l'amplitude crête E de la source de tension sinusoïdale.

En augmentant progressivement l'amplitude crête E à partir de zéro, la courbe de la figure (3.16a) illustre la possibilité de trois comportements différents selon la valeur de E ainsi que le phénomène de saut :

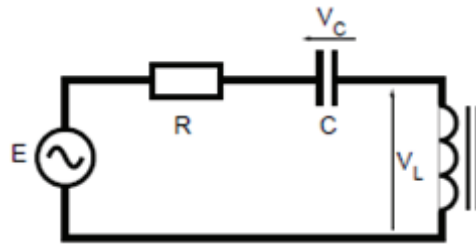
- Pour $E = E_1$ la solution (M_{1n}) est unique et correspond au régime normal (obtenue dans l'hypothèse linéaire),
- Pour $E = E_2$, il existe trois solutions (M_{2n} , M_{2i} , M_{2f}) dont deux sont stables (M_{2n} et M_{2f}). M_{2n} correspond au régime normal. M_{2f} correspond au régime ferrorésonant, la partie de la courbe en pointillés (qui ne peut être obtenue en pratique) correspond à des régimes instables,
- Pour $E = E'_2$, la tension V_L passe brutalement du point M_2 au point M'_2 (phénomène de saut).

Le point M_2 s'appelle point limite,

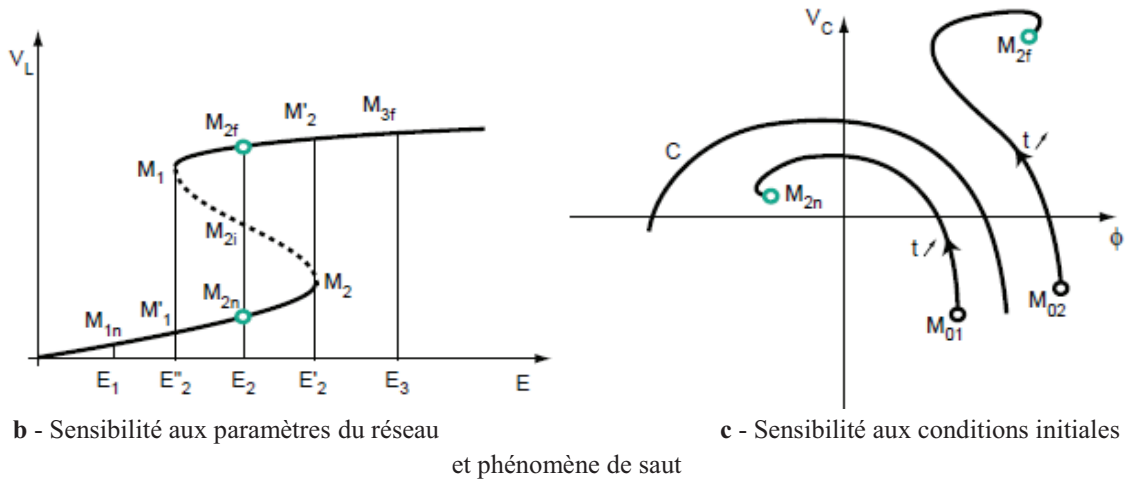
- Pour $E = E_3$, seul le régime ferrorésonant (M_{3f}) est possible.
- Lorsque la valeur de E décroît à partir de E_3 , la solution passe brutalement du point M_1 (deuxième point limite) au point M'_1 .

Le phénomène de saut caractéristique de la ferrorésonance peut aussi être obtenu en considérant un autre paramètre du réseau (la résistance R ou la capacité C par exemple).

Une faible variation de la valeur d'un paramètre du réseau ou un régime transitoire peut provoquer un saut brutal entre deux régimes stables très différents.



a - Circuit de base de ferronance série



b - Sensibilité aux paramètres du réseau

et phénomène de saut

c - Sensibilité aux conditions initiales

Fig3.16: illustration des caractéristiques de la ferronance.

❖ Sensibilité vis à vis des conditions initiales

L'obtention de M_{2n} ou de M_{2f} dépend des conditions initiales. La figure (3.16c) illustre les trajectoires du régime transitoire des couples (Φ, V_c) en fonction du temps pour des conditions initiales (M_{01} et M_{02}) différentes. La courbe C décrit une frontière. Si les conditions initiales (flux rémanent, tension aux bornes du condensateur) se trouvent d'un côté de la frontière, la solution converge vers M_{2n} . Si les conditions initiales se trouvent de l'autre côté, la solution converge vers M_{2f} . Comme le point M_{2i} appartient à la frontière, au voisinage de ce point le régime permanent effectivement atteint est très sensible aux conditions initiales. [25]

III.3) Classification des régimes ferrorésonants

L'expérience des formes d'onde apparaissant sur les réseaux, des expérimentations sur modèles réduits de réseaux ainsi que des simulations numériques permettent de classer les régimes de ferronance en quatre types distincts.

Cette classification correspond au régime permanent, c'est à dire après extinction du régime transitoire. Il est en effet difficile pour un circuit ferronant de distinguer le régime transitoire normal des régimes transitoires ferronants. Ceci ne signifie en aucun cas que les phénomènes de ferronance transitoire ne peuvent pas être dangereux pour le matériel électrique.

Des surtensions transitoires dangereuses peuvent par exemple apparaître plusieurs périodes du réseau après un événement (par exemple à la suite d'un enclenchement d'un transformateur à vide) et persister pendant plusieurs périodes du réseau.

Les quatre types de ferrorésonance que l'on rencontre sont :

- régime fondamental,
- régime sous-harmonique,
- régime quasi-périodique,
- régime chaotique.

On peut reconnaître le type de ferrorésonance :

- ❖ soit par le spectre des signaux courants et tensions,
- ❖ soit par une image stroboscopique obtenue en mesurant le courant i et la tension v en un endroit donné du réseau et en traçant dans le plan v, i les valeurs instantanées à des instants séparés par une période du réseau.

Les caractéristiques de chacun de ces types de ferrorésonance sont précisées ci-dessous.

❖ Régime fondamental (fig3.17a)

Tensions et courants sont périodiques de période T égale à celle du réseau et peuvent comporter plus ou moins d'harmoniques.

Le spectre des signaux est un spectre de raies formé du fondamental f_0 du réseau et de ses harmoniques ($2f_0, 3f_0 \dots$). L'image stroboscopique se réduit à un point éloigné de celui représentant le régime normal.

❖ Régime sous-harmonique (fig3.17b)

Les signaux sont périodiques de période nT multiple de la période de la source. Ce régime est appelé sous-harmonique n ou harmonique $1/n$. Les régimes ferrorésonants sous harmoniques sont généralement de rang impair.

Le spectre présente un fondamental égal à f_0/n (f_0 est la fréquence de la source, n est un entier) et ses harmoniques (la fréquence f_0 fait donc partie du spectre).

Un tracé stroboscopique fait apparaître n points.

❖ Régime quasi-périodique (fig3.17c)

Ce régime (appelé aussi pseudo-périodique) n'est pas périodique. Le spectre est un spectre de raies dont les fréquences s'expriment sous la forme : $nf_1 + mf_2$ (n et m sont des nombres entiers et f_1/f_2 un nombre réel irrationnel). L'image stroboscopique fait apparaître une courbe fermée.

❖ Régime chaotique (fig3.17d)

Le spectre correspondant est continu, c'est à dire qu'il ne s'annule pour aucune fréquence. L'image stroboscopique est constituée de points tous distincts qui occupent une surface dans le plan v, i appelée attracteur étrange. [25]

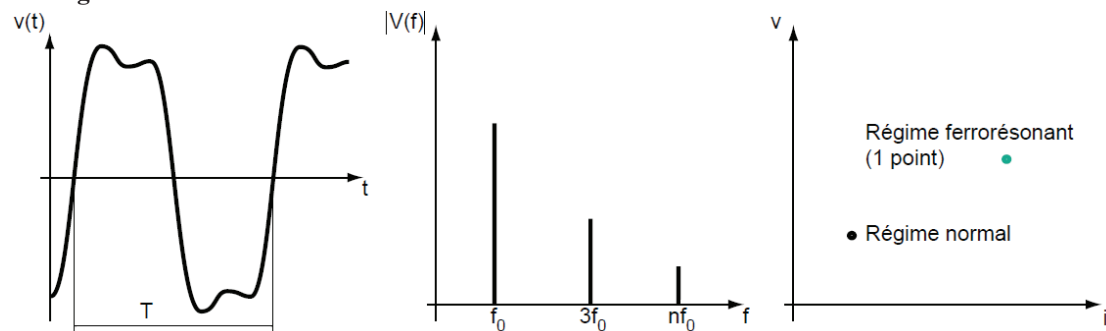
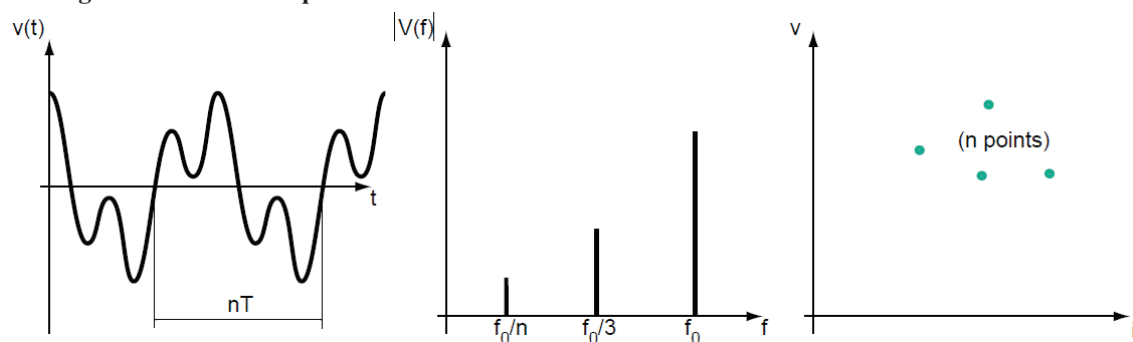
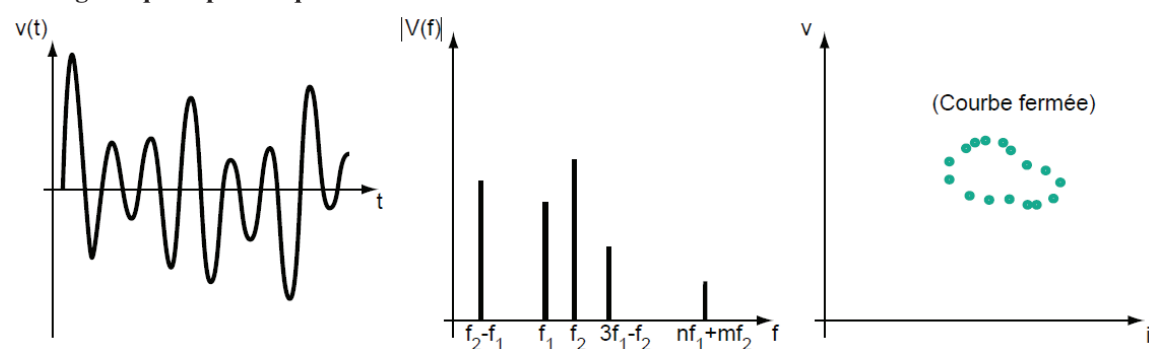
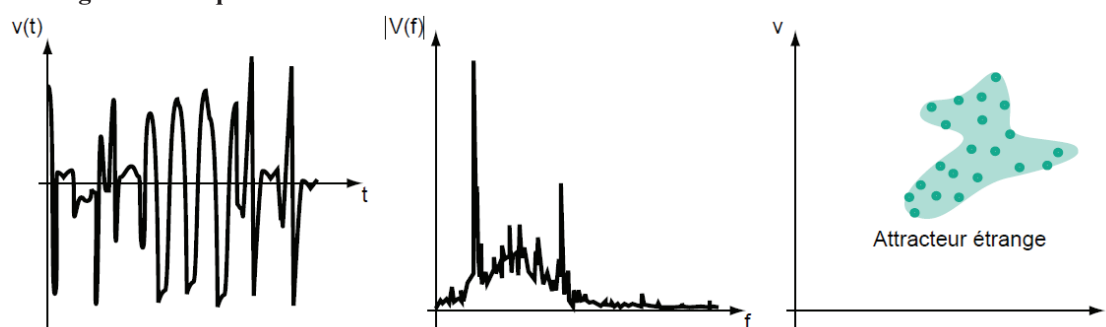
a - Régime fondamental

b - Régime sous-harmonique

c - Régime quasi-périodique

d - Régime chaotique


Fig3.17: illustration des caractéristiques de la ferrorésonance.

En conclusion :

- Le phénomène de ferrorésonance est un phénomène complexe caractérisé par :
 - une multiplicité de régimes permanents pour un circuit donné,
 - une grande sensibilité d'apparition de ces régimes aux valeurs des paramètres du réseau,
 - une grande sensibilité d'apparition de ces régimes aux conditions initiales.
- Une faible variation de la valeur d'un paramètre du réseau ou un régime transitoire peut provoquer un saut brutal entre deux régimes stables très différents et déclencher l'un des quatre types de régimes permanents de ferrorésonance; les régimes les plus souvent rencontrés sont le régime fondamental et le régime sous-harmonique.
- Les taux d'harmoniques anormaux, les surtensions ou les surintensités transitoires ou permanentes, que provoque la ferrorésonance sont souvent dangereux pour le matériel électrique.
- La ferrorésonance permanente est entretenue par l'énergie fournie par la tension du réseau.

III.4) Différentes approches pour l'étude de la ferrorésonance dans les réseaux électriques

Ce paragraphe présente un aperçu des cinq différentes approches d'étude de la ferrorésonance dans les réseaux électriques, que nous classons dans l'ordre de leur apparition dans l'historique littéraire de l'étude de ce phénomène.

III.4.1) Méthode analytique

Les méthodes analytiques utilisées dans la littérature ont les avantages d'étudier les paramètres qui ont une influence sur l'apparition des différents modes ferrorésonants. En plus, définir les frontières entre les régions de fonctionnements sûres et les régions de ferrorésonance, pour déterminer les marges des paramètres qui sont exigés pour la planification du système. Cependant, les inconvénients principaux sont que le modèle du circuit est très simplifié (réduit), et les équations mathématiques obtenues sont complexes et ont besoin du grand temps de calcul. En outre, son inconvénient est que les opérations de commutation et les régimes transitoires associés ne peuvent pas être considérés. [24]

III.4.2) Simulation par analogie

Basée sur une représentation en vrai d'un modèle réduit des éléments du réseau, elle présente l'avantage d'obtenir des résultats en temps réel mais l'inconvénient de la difficulté de représenter un cas réel avec précision.

Cette approche fournit également un environnement sûr au personnel qui réalisent les essais, on employant dans les expériences seulement les basses tensions et intensités de courant. Cependant, les inconvénients principaux sont que l'équipement analogue exige un entretien coûteux (calibrage, remplacement du vieillissement ou composants défectueux), la difficulté de représenter un cas réel avec précision et également exige de grandes surfaces de laboratoire pour l'adaptation des équipements. [24]

III.4.3) Essais réels sur le terrain

Les essais de la ferrorésonance dans les configurations de réseaux électriques existants ont l'avantage d'inclure les éléments sophistiqués et complexes inhérents aux composants du circuit, sans aucune simplification de circuit. Cependant, les inconvénients principaux sont que les composants du réseau sont soumis à de plus grand risque, exposé aux surtensions qui peuvent causer un vieillissement prématuré et de catastrophiques défaillances possibles. En outre, la génération de signaux riches en harmoniques de ces essais, peut également poser des problèmes à d'autres circuits voisins. [24]

III.4.4) Mesures en laboratoire

Les essais à échelle réduite de circuits ferrorésonants en laboratoire ont l'avantage d'étudier les caractéristiques de ferrorésonance des équipements de basse tension d'une façon réaliste. [24]

III.4.5) Logiciels de calcul numérique (simulateurs)

La résolution du système d'équations mathématiques qui décrit le comportement du réseau nécessite l'utilisation d'outils informatiques. Dans le cas de la ferrorésonance les régimes transitoires étant généralement longs, les temps de simulation sont importants et les études coûteuses. [25]

Le phénomène de ferrorésonance étant très sensible aux valeurs des paramètres et aux conditions initiales qui sont mal connues en pratique, il faut faire une étude pour chaque combinaison possible. Ce qui n'est pas réaliste.

Les méthodes précédemment citées ne sont donc pas bien adaptées à la recherche d'une vision globale du comportement d'un réseau.

Pour palier les inconvénients de ces méthodes les mathématiciens ont développé les méthodes suivantes :

- **méthodes de calcul direct du régime permanent**

Elles permettent de calculer le régime permanent sans passer par le calcul du régime transitoire généralement long dans le cas de la ferrorésonance. Parmi les méthodes numériques de calcul du régime permanent on cite :

Les mathématiciens ont développé des méthodes fréquentielles ou temporelles qui permettent de calculer le régime permanent sans passer par le calcul du régime transitoire.

Les méthodes suivantes permettent d'étudier la ferrorésonance périodique (fondamentale sous harmonique). La principale méthode fréquentielle est la méthode de Galerkin.

Les principales méthodes temporelles sont la méthode du point fixe de l'application de Poincaré et la méthode des perturbations.

- **méthode de continuation**

Le cadre mathématique adapté à l'étude globale du comportement des systèmes dynamiques est la théorie des bifurcations dont l'outil principal est la méthode de continuation. Utilisée conjointement avec les méthodes de calcul direct du régime permanent, elle permet de déterminer des zones à risques.

A noter que la simulation numérique temporelle conserve un intérêt certain. Elle permet pour une configuration et des valeurs numériques des paramètres données de préciser les formes d'ondes ainsi que les niveaux de surtensions et de surintensités correspondantes.

Synthèse

Cinq approches différentes ont été développées pour étudier le ferrorésonance dans les réseaux électriques sur plusieurs années. Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients et peut convenir à l'heure de son développement. Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients de chacune de ces approches.

Approche	Avantages	Inconvénients
Méthode analytique	- étudie les paramètres déclenchant les différents modes ferrorésonant - les limites entre les régions sûres et ferrorésonantes peuvent être déterminés.	- circuit doit être simplifié - implique des équations mathématiques complexes - a besoin de grand temps de calcul
Simulation par analogie	- offre plus de flexibilité en représentant circuit réduit réel	- entretien coûteux - exige de grande surface couverte pour adapter les équipements
Essai réels sur le terrain	- comprend tout les composants complexes de sans aucune simplification du circuit.	- les éléments de puissance sont soumis à de grand risque, exposés aux surtensions et aux surintensités - vieillissement prématuré et possibilités d'échec catastrophiques
Mesure de laboratoire	- étudie les caractéristiques de ferrorésonance de l'équipement de basse tension d'une façon réaliste	/
Programme de calcul numérique (simulateur)	- peu coûteux, l'entretien gratuite, pas de grande surface couverte exigée, temps de calcul moins long - pas de risque (danger des surtensions et des surintensités)	- les composants de système d'alimentation sont difficiles à entièrement et largement représenté dans seul un modèle prédéfini de simulation.

III.5) Exemples de situations de réseaux électriques propices à la ferrorésonance

Étant donné la multitude de sources de capacités et d'inductances non linéaires dans un réseau réel et la grande variété de conditions d'exploitation, les configurations potentiellement à risque de ferrorésonance sont indénombrables.

L'expérience a cependant permis de répertorier les principales configurations typiques d'apparition de la ferrorésonance. Quelques exemples classiques sont présentés ci après.

III.5.1) Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un (ou de plusieurs) disjoncteur(s) ouvert(s)

En THT des manœuvres d'exploitation (consignation d'un disjoncteur de couplage ou de tronçonnement de jeu de barres, élimination d'un défaut sur un tronçon de barres ...) peuvent provoquer la ferrorésonance des transformateurs de tension (TT) connectés entre phases et terre. Ces différentes configurations peuvent se ramener au circuit de la figure (3.18). L'ouverture du disjoncteur D déclenche le phénomène en provoquant la décharge de la capacité C à travers le TT qui se sature. L'alimentation du TT par l'intermédiaire des condensateurs C_d (de répartition de tension entre les chambres de coupure du disjoncteur) entretient ensuite le phénomène.

La capacité C représente l'ensemble des capacités à la terre du TT et de la liaison alimentée par l'intermédiaire des capacités du ou des disjoncteurs ouverts.

La ferrorésonance est du type sous-harmonique.

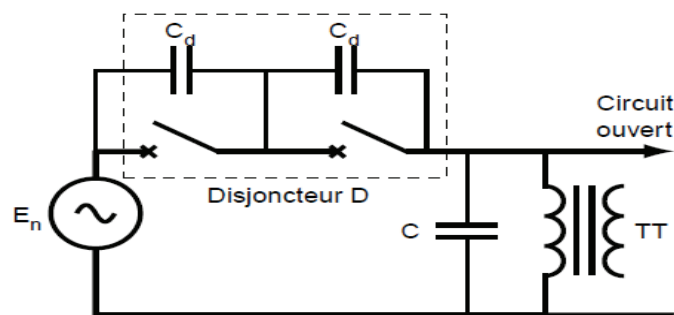


Fig3.18: ferrorésonance d'un transformateur de tension en série avec un disjoncteur ouvert.

III.5.2) Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé

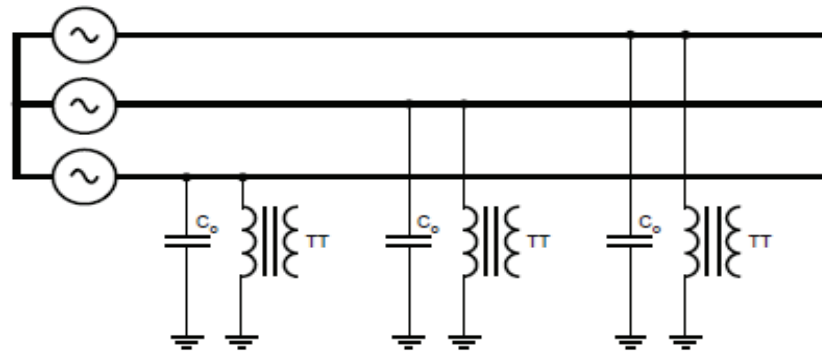
Ce régime du neutre peut être choisi, résulter du couplage d'une source de secours à neutre isolé, ou d'une défaillance du système de mise à la terre.

Des surintensités ou des surtensions passagères dues à des manœuvres en réseau (pertes de charges, élimination de défaut ...) ou à un défaut à la terre par exemple, peuvent déclencher le phénomène en saturant le circuit magnétique d'un ou de deux des TT du circuit ferrorésonant parallèle de la figure (3.19). Le régime ferrorésonant se constate sur les tensions entre phases et terre mais aussi sur la tension du point neutre (V_N).

Il y a déplacement du point neutre et une montée en potentiel par rapport à la terre d'une ou de deux phases. Ce qui peut donner l'impression d'un défaut d'isolement phase-terre au sein du réseau.

Les valeurs des surtensions peuvent dépasser en régime établi la tension composée et provoquer une destruction diélectrique du matériel électrique.

Selon les valeurs relatives de l'inductance de magnétisation du TT et de la capacité C_0 , la ferrorésonance est du type fondamental, sousharmonique ou quasi-périodique.



C_0 : capacité homopolaire du réseau

Fig3.19: ferrorésonance de TT entre phase et terre dans un réseau à neutre isolé.

III.5.3) Transformateur condensateur de tension

Une solution économique pour le passage de la haute à la basse tension est d'utiliser un diviseur de tension capacitif et un transformateur, l'ensemble étant appelé un transformateur condensateur de tension (TCT), figure (3.20).

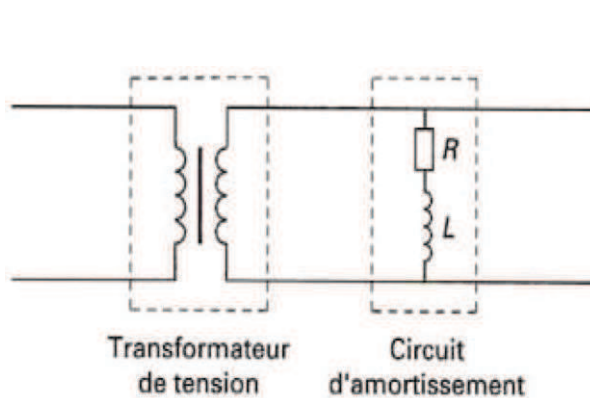


Fig3.20: Schéma électrique d'un transformateur de tension avec circuit d'amortissement

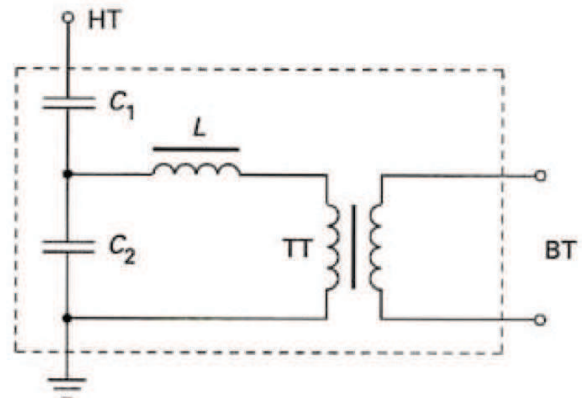


Fig3.21: Schéma électrique d'un transformateur condensateur de tension

Il s'agit, pour ce type d'appareil, d'une ferrorésonance série monophasée où des régimes sous-harmoniques risquent souvent de se stabiliser. Ce phénomène apparaît généralement pendant les essais de tenue au court-circuit du secondaire, au moment de l'ouverture du court-circuit. [26]

III.5.4) Transformateur alimenté accidentellement sur une ou deux phases

Quelques exemples de configurations à risques sont représentés figure (3.22). Ces configurations apparaissent lorsqu'un transformateur à vide ou très faiblement chargé est alimenté sur une ou deux phases suite à une fusion de fusible sur un réseau à moyenne tension, à la rupture d'un conducteur ou à des travaux sous-tension, par exemple à l'occasion de la mise en service d'une armoire de coupure télécommandée (ACT).

Les capacités peuvent être celles d'une ligne ou d'un câble alimentant un transformateur dont les enroulements primaires sont couplés en étoile neutre isolé, neutre à la terre, ou en triangle. Par exemple, le circuit ferrorésonant série est constitué par la mise en série de la capacité phase-terre (entre disjoncteur et transformateur) de la phase « ouverte » et de l'impédance magnétisante du transformateur. Les régimes sont du type fondamental, sousharmonique ou chaotique.

Les capacités entre phases et entre phases et terre, le couplage des enroulements primaires, secondaires, la structure du circuit magnétique (monophasé, à flux libre ou à flux forcé), le régime de neutre du réseau (direct à la terre, impédant, isolé) le mode d'alimentation (sur une ou deux phases) interviennent dans l'établissement d'un régime donné.

Le phénomène se produit généralement lorsque le neutre primaire est isolé. Pour éviter les risques, il est sage d'utiliser des appareillages de coupure omnipolaires.

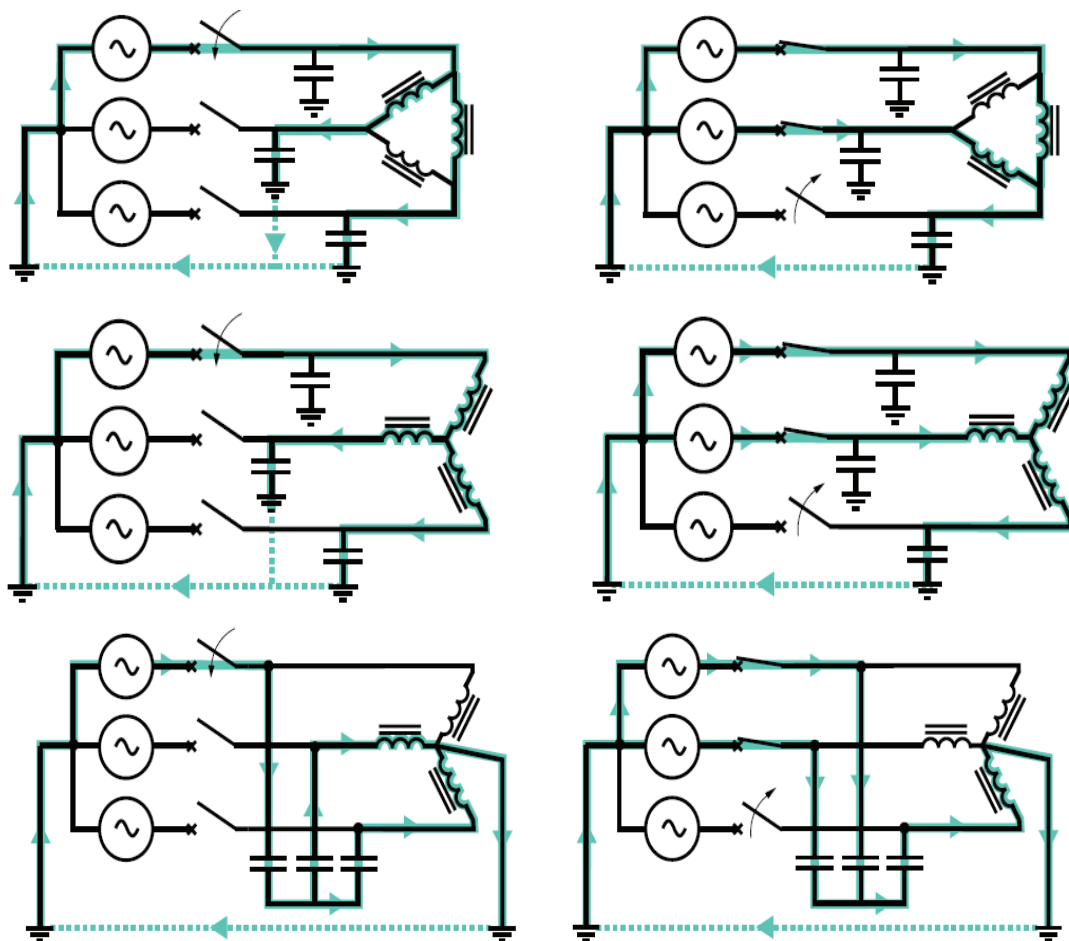


Fig3.22: exemples de systèmes déséquilibrés à risque de ferrorésonance.

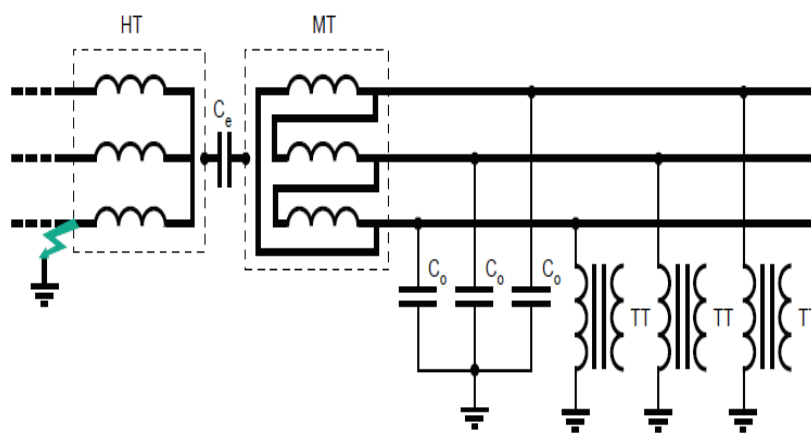
III.5.5) Transformateurs de tension et transformateurs HT/MT à neutre isolé

Le phénomène peut se produire lorsque les neutres HT et MT sont isolés de la terre et que des TT sont raccordés côté MT entre phase et terre et n'alimentent pas de charge (fig3.23).

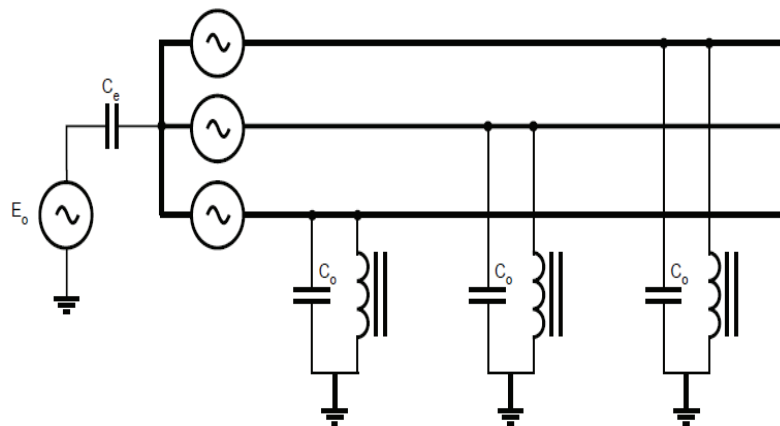
Lors d'un défaut à la terre côté HT en amont du transformateur du poste, le neutre HT monte à un potentiel élevé. Par effet capacitif entre primaire et secondaire des surtensions apparaissent côté MT et peuvent provoquer la ferrorésonance du circuit constitué de la source de tension E_0 , des capacités C_e et C_0 et de l'inductance de magnétisation d'un TT (fig3.23b).

Après que le défaut HT ait disparu, la tension du neutre HT due à un déséquilibre naturel du réseau, peut suffire à entretenir le phénomène. [25]

La ferrorésonance est du type fondamental.



a - Réseau en défaut



b - Schéma équivalent

E_0 : tension homopolaire côté HT

C_e : capacité entre enroulement HT et MT

C_0 : capacité homopolaire du réseau MT

Fig3.23: ferrorésonance de TT entre phase et terre avec transformateur de source à neutres isolés

III.5.6) Réseau à neutre inductif

Les deux configurations de la figure (3.24) sont prédisposées à une ferrorésonance entre une inductance connectée entre le neutre et la terre et les capacités entre phases et terre du réseau.

- Dans le cas des réseaux à basse tension à neutre isolé de la terre, les normes préconisent (CEI 364) ou imposent (NF C 15-100) la mise en œuvre d'un Contrôleur Permanent d'Isolément (CPI). Certains CPI mesurent l'impédance d'isolement d'un réseau par injection d'un courant continu entre réseau et terre. Ils présentent une impédance interne principalement inductive (faible impédance pour le courant continu et impédance importante à la fréquence du réseau). Ils peuvent contribuer à la ferrorésonance.

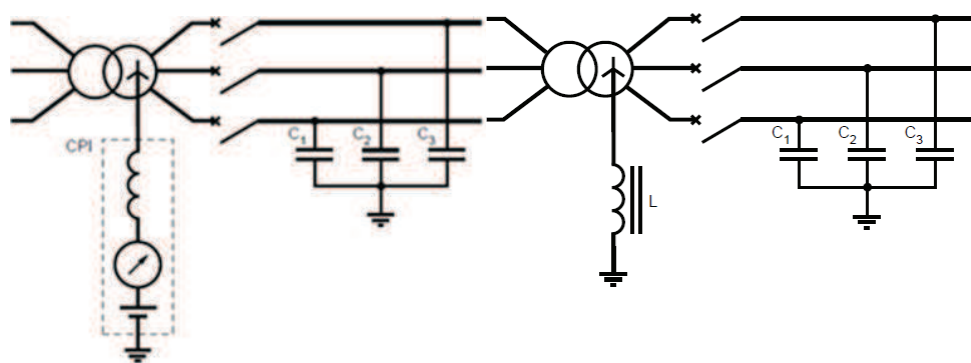
Des surtensions peuvent provoquer une montée en potentiel suffisante du point neutre pour déclencher le phénomène de ferrorésonance entre l'inductance du CPI et les capacités entre phase et terre du réseau (fig3.24a).

- En moyenne tension pour limiter les courants de défaut à la terre et favoriser leur autoextinction, une bobine d'inductance L (telle que $3 L C_0 \omega_0^2 = 1$ où C_0 est la capacité homopolaire du réseau MT et ω_0 la pulsation du réseau) est connectée entre le neutre MT d'un transformateur HT/MT et la terre (bobine Petersen).

Il peut y avoir excitation et entrée en résonance du circuit constitué de la mise en série de l'inductance L et de la capacité $3 C_0$ dans les cas suivants :

- neutre du transformateur HT/MT mis à la terre côté HT et circulation du courant de défaut HT dans la prise de terre du poste source en cas de défaut HT dans le poste source,
- saturation du circuit magnétique du transformateur HT/MT,
- dissymétrie constructive du transformateur,
- dissymétrie naturelle des capacités (C_1, C_2, C_3 de la figure 3.24b) entre les phases et la terre.

Ce qui peut provoquer la saturation de la bobine et ainsi déclencher ou entretenir la ferrorésonance. [25]



a - Inductance interne d'un CPI ou d'une impédance de neutre

b - Régime de neutre compensé

Fig3.24: ferrorésonance dans le cas d'un réseau à neutre inductif.

III.5.7) Transformateur alimenté par un réseau très capacitif et de faible puissance de court-circuit

Le phénomène de ferrorésonance peut apparaître lorsqu'un transformateur de puissance, à vide, est alimenté brusquement par une source de puissance de court-circuit faible devant la puissance nominale du transformateur par l'intermédiaire d'un câble ou d'une ligne longue. Ce qui est par exemple le cas lors d'une reprise de service sur un réseau à moyenne tension (de câbles) public urbain ou industriel mais aussi sur des réseaux publics à moyenne tension ruraux très étendus (fig 3.25) ou dont la proportion de câbles souterrains augmente (fiabilisation et respect de l'environnement). Cette ferrorésonance parallèle (capacité en parallèle sur l'inductance magnétisante du transformateur) est généralement triphasée, à la fréquence fondamentale, ou de type quasipériodique.

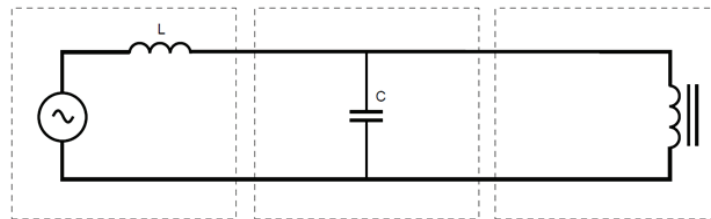
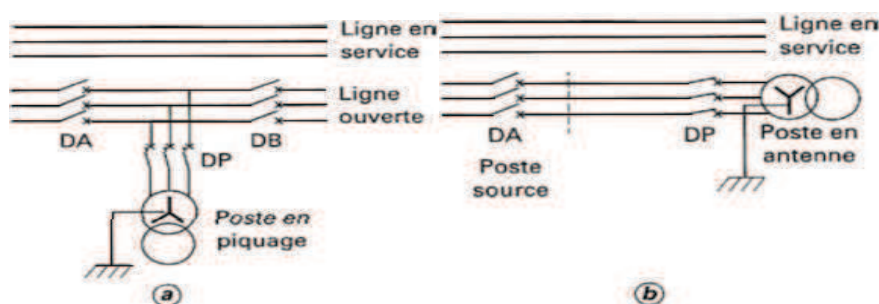


Fig3.25: d'un transformateur de puissance à vide alimenté par un réseau capacitif.

III .5.8) Poste en piquage ou en antenne sur une ligne à double terre

Il s'agit généralement de transformateurs de puissance ou de tension montés en piquage sur un terne d'une ligne à double terre dont l'un est sous tension et l'autre ouvert. Le transformateur peut être raccordé à la ligne ouverte par l'intermédiaire d'un disjoncteur dont un, deux ou trois pôles restent fermés (défaillance du disjoncteur) ; un exemple d'une telle situation est illustré par la figure (3.26a). Un autre cas peut se présenter, le transformateur étant raccordé en antenne au bout d'une ligne ouverte longeant une deuxième ligne sous tension (figure 3.26b). Le transformateur peut être relié en extrémité de ligne ou en un point quelconque de la ligne (poste en piquage alimenté d'un seul côté). [26]



D: disjoncteur

Fig3.26: Exemples d'alimentation de transformateur en piquage ou en antenne sur une ligne à double terre dans un cas d'apparition de ferrorésonance possible

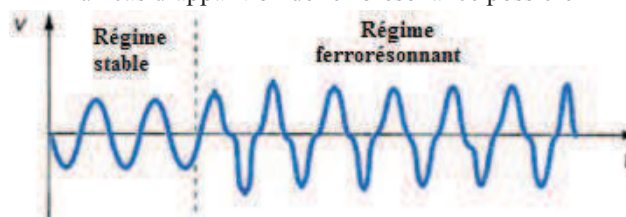


Fig3.27: Ferrorésonance dans un poste en piquage sur un terne d'une ligne à double terre

III .5.9) Renvoi de tension sur une ligne longue ou reprise de service sur un réseau très capacitif

Circuit

Il s'agit ici de ferrorésonance parallèle car la capacité responsable de la ferrorésonance est en parallèle avec l'élément non linéaire. Les situations pratiques rencontrées sont généralement triphasées, mais on peut imaginer des cas monophasés.

Les études sur modèle réduit se font souvent avec un circuit monophasé. La figure (3.28) donne un exemple de modélisation dans un cas monophasé. On y retrouve un modèle d'alternateur pour la source, une cellule en Π pour la ligne et une inductance saturable pour le transformateur.

Les cas de ferrorésonance rencontrés dans les réseaux peuvent apparaître dans les procédures de renvoi de tension sur une ligne longue depuis une source hydraulique, pour tous les cas d'antennes longues alimentant un transformateur de grande puissance, ou lors de reprise de service sur un réseau très capacitif comme un réseau de câbles de grande agglomération, ou un réseau étendu de pays en voie d'industrialisation.

Dans tous les cas, pour que le phénomène apparaisse, il faut que l'impédance de court-circuit du réseau soit faible devant la puissance nominale des transformateurs à vide alimentés et que la fréquence propre du circuit sans les non-linéarités soit faible. Les cas critiques apparaissent lorsque cette fréquence est proche d'un harmonique de rang assez bas de la tension d'alimentation. De plus, il faut bien sûr que le réseau soit très peu chargé. [26]

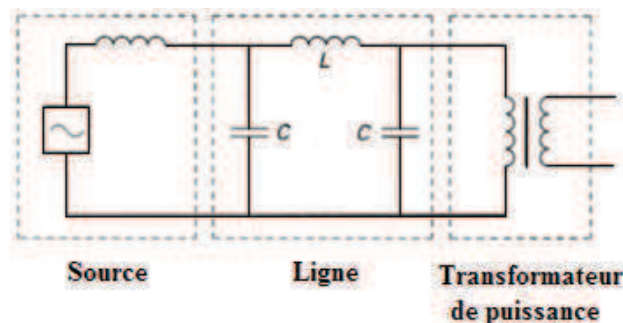


Fig3.28: Schéma équivalent d'un circuit ferrorésonant parallèle (modèle avec deux capacités)

En résumé :

- Les configurations potentiellement à risque de ferrorésonance au sein des réseaux électriques sont indénombrables.
- Les types de ferrorésonance sont variés : monophasée, triphasée, de mode commun ou de mode différentiel.
- L'expérience permet cependant d'identifier quelques configurations à risques qui méritent une attention particulière, telles que :
 - liaisons longues et/ou capacitatives alimentant un transformateur,
 - protection par fusibles dont la fusion conduit à une coupure non omnipolaire,
 - transformateur de puissance ou de tension à vide ou faiblement chargé.
 - transformateur de tension entre phase et terre sur un réseau à neutre isolé. [25]

Récapitulation:

Nous avons vus dans ce chapitre, les principales caractéristiques du phénomène de ferrorésonance, on a indiqué les outils mathématiques qui permettent d'étudier numériquement les circuits ferrorésonants.

Le risque de ferrorésonance est à prendre en compte dès la conception d'une installation électrique, et à base de la maîtrise des risques il faut connaître les configurations dangereuses et les conditions d'existence de ce phénomène. En raison de la puissance de calcul des ordinateurs moderne et des logiciels de simulation des régimes transitoires dans les réseaux électriques, l'approche choisie dans la suite du travail est celle de la simulation numérique par ordinateur.

Parmi les phénomènes susceptibles de déclencher la ferrorésonance, les défauts à la terre (ou les régimes déséquilibrés), et parmi les configurations à risques qui méritent une attention particulière est le transformateur de puissance, sur un réseau faiblement chargé lors de perte d'une phase, cette configuration qui fera l'objet du chapitre 4.

Chapitre IV :

Application et discussion des résultats

Introduction

Ce chapitre consiste à étudier les surtensions de ferrorésonance apparaissant dans un réseau, constitué d'une ligne alimentant un transformateur de puissance après la perte d'une phase, et ensuite analyser l'influence du régime du neutre: isolé de la terre, mis à la terre à travers une résistance, mis à la terre à travers une inductance (bobine de Petersen) et directement mis à la terre. Pour les simulations nous avons choisis le logiciel MATLAB Simulink.

IV.1) Description du modèle à étudier :

Nous allons étudier par voie de simulations numériques, une ligne 110 kV avec un conducteur par phase d'une longueur de 50 km, alimentant un transformateur de puissance de 50 MVA et faiblement chargé, après la qu'une phase est tombée à la terre. Nous considérerons les différents régimes du neutre, la présence ou non d'un parafoudre et enfin mettant une charge sur le transformateur de distributions.

IV.1.1) Caractéristiques de la ligne :

Nous utilisons le schéma équivalent de la ligne et du transformateur de tension nominale 110 kV, avec un conducteur par phase. Le schéma équivalent est représenté sur la figure (4.1).

On prendra dans la suite :

R_0 : résistance kilométrique de la ligne.

L_0 : l'inductance kilométrique de la ligne.

C_0 : capacité kilométrique de la ligne.

On suppose que le conducteur de la ligne est de type AA-185.

Pour ce type de conducteurs, on a les caractéristiques suivantes:

Résistance kilométrique : $R_0 = 0.159 \Omega / \text{Km}$

Nombre de conducteurs par phase: 1, les trois phases placés horizontalement

Diamètre du conducteur $d_c = 18.8 \text{ mm}$

Distance entre phases : $d = 4 \text{ m}$

Fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

$U_n = 110 \text{ KV}$

IV.1.1a) La résistance linéique d'une ligne R_0 :

La résistance qui correspond au courant alternatif est: $R_0 = \frac{\rho}{S} \dots \dots \dots (20)$

$\left\{ \begin{array}{l} \rho : \text{Résistivité du conducteur,} \\ S : \text{Séction du conducteur (mm}^2\text{).} \end{array} \right.$

Pour le conducteur de type AA-185 on a: $R_0 = 0.159 \Omega / \text{Km}$

IV.1.1b) La réactance d'induction linéique X_0 :

C'est la réactance d'induction kilométrique, elle dépend des dimensions du conducteur, des distances entre les conducteurs de différentes phases, de la fréquence et de la perméabilité magnétique du conducteur.

$$X_0 = 0.144 * \log \left(\frac{2 * D_m}{d_c} \right) + 0.016 \dots \dots \dots (20)$$

$\left\{ \begin{array}{l} D_m : \text{distance moyenne entre les conducteurs de phases de la ligne.} \\ d_c : \text{diametre des conducteurs de phases.} \end{array} \right.$

$$D_m = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3} \dots \dots \dots (21)$$

Calcul de l'inductance linéique :

$$X_0 = 0.144 * \log \frac{2D_m}{d_c} + 0.016 \dots \dots \dots (22)$$

Les conducteurs sont au sommet d'un triangle

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{31}}$$

$$D_{12} = D_{23} = d$$

$$D_{31} = 2d$$

$$\Rightarrow D_m = \sqrt[3]{2d^3} = 1.26d = 5.04m$$

Avec :

D_m : Distance moyenne entre les conducteurs.

D_{12} : Distance entre le conducteur 1 et le conducteur 2.

D_{23} : Distance entre le conducteur 2 et le conducteur 3.

D_{31} : Distance entre le conducteur 3 et le conducteur 1.

Alors :

$$X_0 = 0.144 * \log \frac{2 * 5.04 * 10^3}{18.8} + 0.016 \Rightarrow X_0 = 0.41 \Omega / km$$

$$\text{On a : } X_0 = \omega L_0 \Rightarrow L_0 = \frac{X_0}{\omega} \dots \dots \dots (23)$$

$$L_0 = \frac{0.41}{2 * 50 * \pi} = 1.3 * 10^{-3} H / km \dots \dots \dots (24) \quad \Rightarrow \quad L_0 = 1.3 mH / km$$

IV.1.1c) La conductibilité réactive linéique B_0 :

Elle dépend des distances entre les conducteurs de différentes phases, et entre les conducteurs et la terre. C'est pour cette raison que ce paramètre à un caractère de capacité

$$B_0 = \frac{7.58 * 10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_c}} \left\{ \begin{array}{l} D_m : \text{distance moyenne entre les conducteurs de phases de la ligne.} \\ r_c : \text{rayon des conducteurs de phases.} \end{array} \right.$$

Calcul de la capacité linéique :

$$B_0 = \frac{7.58 * 10^{-6}}{\log \frac{2D_m}{d_c}} \dots\dots\dots(25)$$

Tel que d_c est le diamètre de la section du conducteur.

$$B_0 = \frac{7.58 * 10^{-6}}{\log \left(\frac{2 * 5.04 * 10^3}{18.8} \right)} = 2.78 * 10^{-6} (\Omega km)^{-1}$$

$$B_0 = \omega C_0 \Rightarrow C_0 = \frac{B_0}{\omega} \Rightarrow C_0 = \frac{2.78 * 10^{-6}}{2 * \pi * 50} = 8.85 * 10^{-9} F / km$$

$$\Rightarrow C_0 = 8.85 nF / km$$

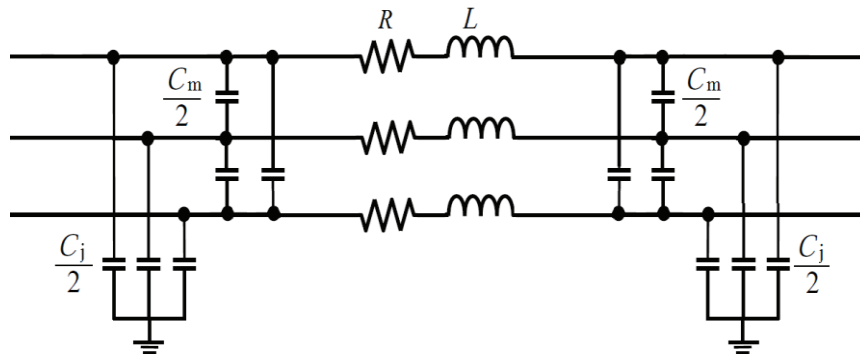


Figure 4.1: Schéma équivalent de la ligne en forme π

IV.1.2) Caractéristiques du transformateur de puissance :

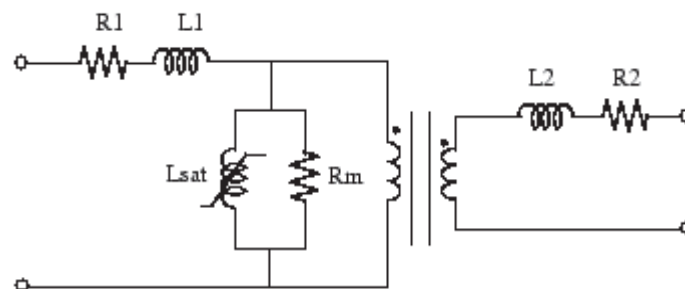


Figure 4.2 : Schéma équivalent du transformateur

Les caractéristiques du modèle utilisé sont les suivantes:

Puissance nominale apparente : $S_n = 50$ MVA

Tension du côté haute tension: $U_1 = 110$ KV,

Tension du côté basse tension: $U_2 = 30$ KV,

Caractéristique de saturation

La caractéristique de saturation du transformateur est définie par la courbe du flux en fonction du courant dans le circuit magnétique du transformateur Figure 4.3.

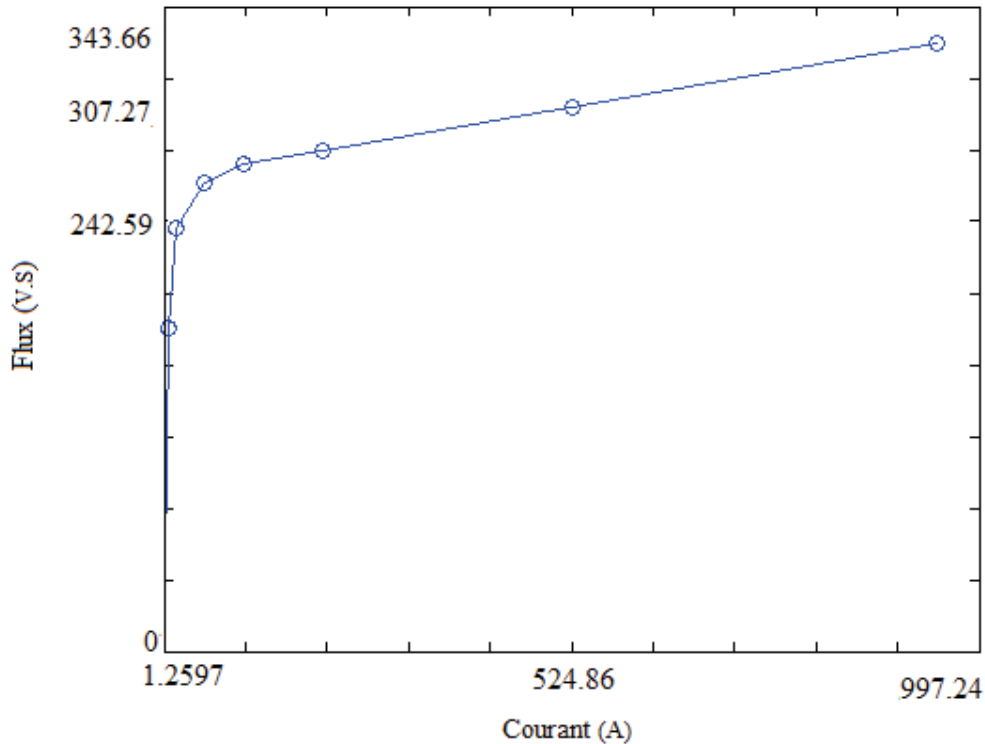


Figure 4.3: Caractéristique mesurée $\Phi=f(I)$ du circuit magnétique du transformateur

IV. 2) Simulation et interprétation des résultats :

Nous considérons la création des surtensions de ferrorésonance dans un régime de phases incomplètes. Dans ce but, on suppose que la phase A est coupée, et le conducteur tombe à la terre figure (4.4). Ce régime d'avarie dans le réseau choisit, est considéré pour les différents régimes du neutre, à savoir la mise à la terre à travers une résistance, mise à la terre à travers une inductance et directement mis à la terre; puis pour le cas où le transformateur est légèrement chargé et ensuit lors de la présence d'un parafoudre, assurant la protection du réseau contre les surtensions. Les résultats des simulations seront donnés en tension de pic et en kilovolts.

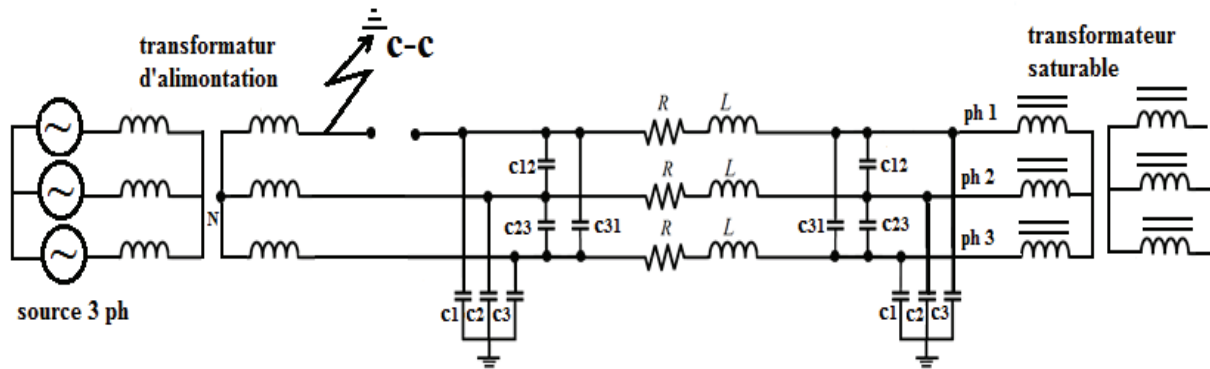


Figure 4. 4: Schéma électrique du réseau considéré avec neutre isolé de la terre

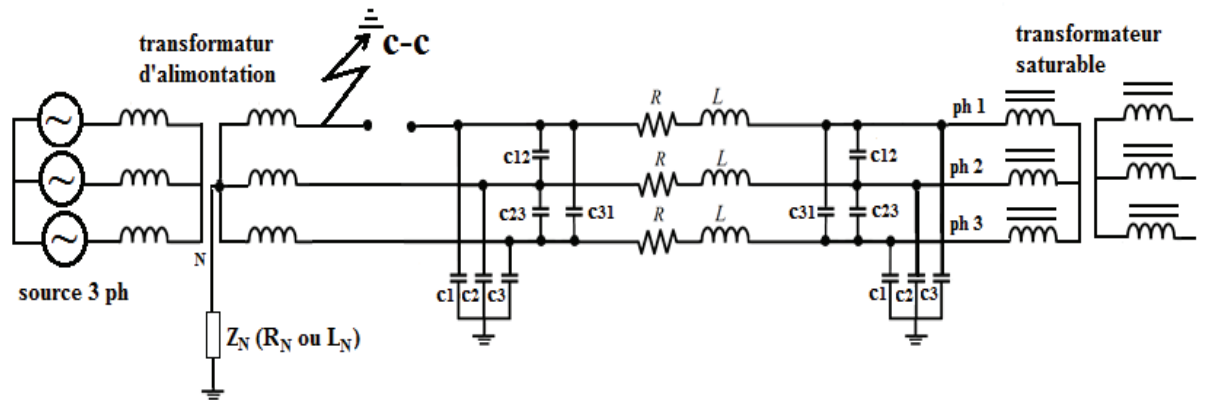


Figure 4. 5: Schéma électrique du réseau considéré avec neutre mis à la terre à travers une impédance

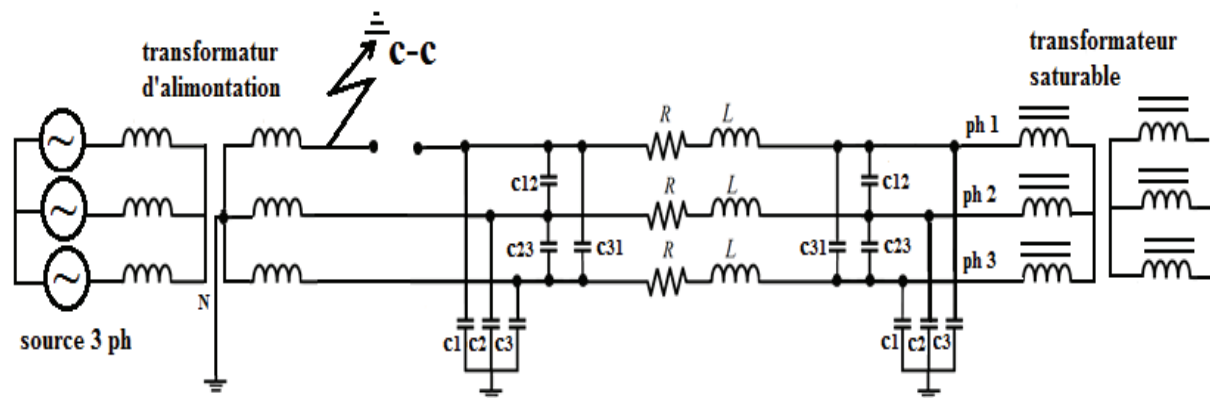


Figure 4. 6: Schéma électrique du réseau considéré avec neutre mis directement à la terre

IV.2.1) Surtension de ferrorésonance lors de Neutre mis à la terre à travers une impédance:

Dans ce qui suit, nous allons considérer les différents régimes du neutre et leur influence sur les surtensions de ferrorésonance.

IV. 2.1.1) Neutre mis à la terre à travers une résistance $Z_N=R_N$:

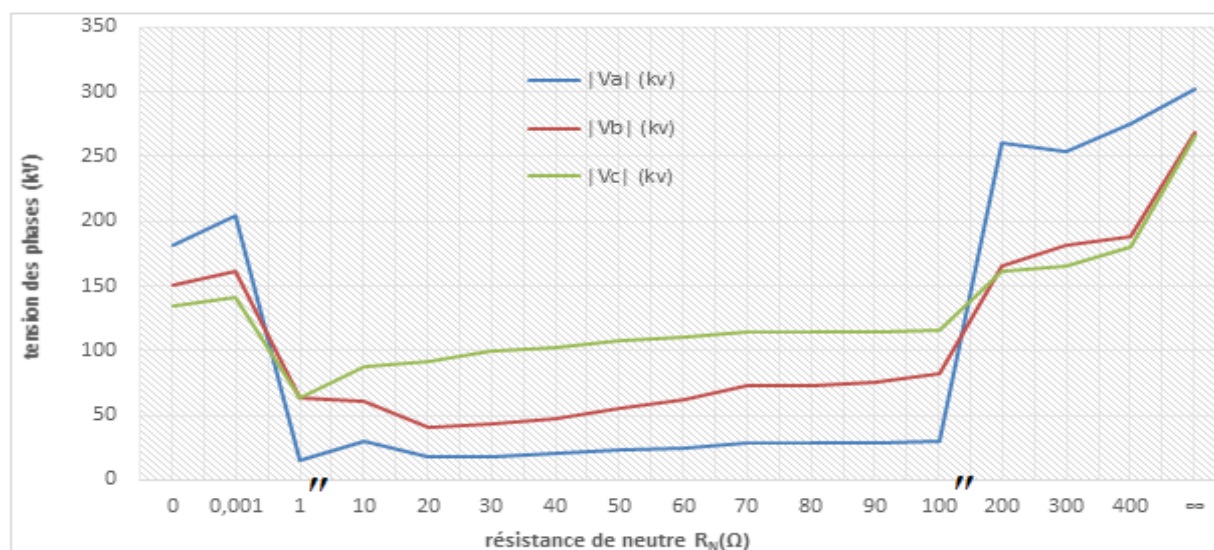
En premier lieu, on considère le neutre mis à la terre à travers une résistance. Pour déterminer l'influence de cette résistance on varie R_N dans l'intervalle $[0, \infty [$.

IV. 2.1.1.a) Résultats des simulations :

$R_N(\Omega)$	$ V_a \text{ (kv)}$	$ V_b \text{ (kv)}$	$ V_c \text{ (kv)}$
∞	302.71	269.48	266.08
600	290.12	188.20	189.83
300	254.27	182	164.71
200	260.01	166.92	161.94
100	29.96	82.53	116.45
80	28.06	75.44	114.88
70	27.87	72.90	113.78
50	22.84	58.55	108.21
30	18.20	43.28	99.32
20	18.15	40.06	92.27
15	17.47	41.20	78.13
10	30.39	61.30	87.87
9	14.58	47.56	80.10
8	9.77	48.44	77.80
6	15.08	51.68	74.68
3	15.28	59.41	75.21
1	14.53	62.73	62.68
0.001	204.10	160.58	141.03
0	181.97	150.37	133.90

Tableau 1 : les tensions des phases en fonction de R_N .

Dans les graphes (1,2 et 3), (") désigne le passage à une autre échelle



Graphique 1 : les courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) en fonction de la résistance de neutre R_N

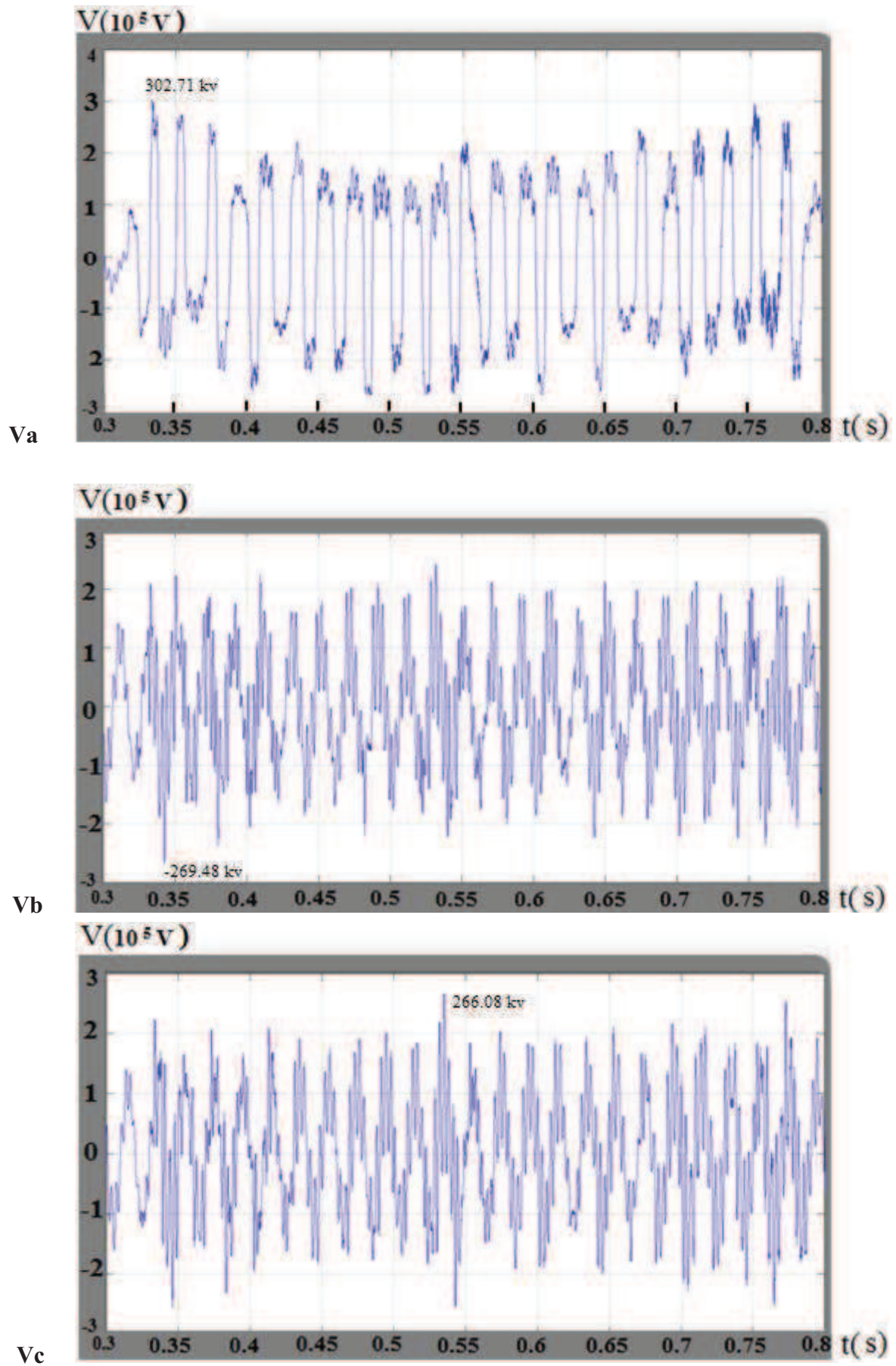


Figure 4.7: Courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) avec neutre isolé de la terre ($R_N = \infty$)

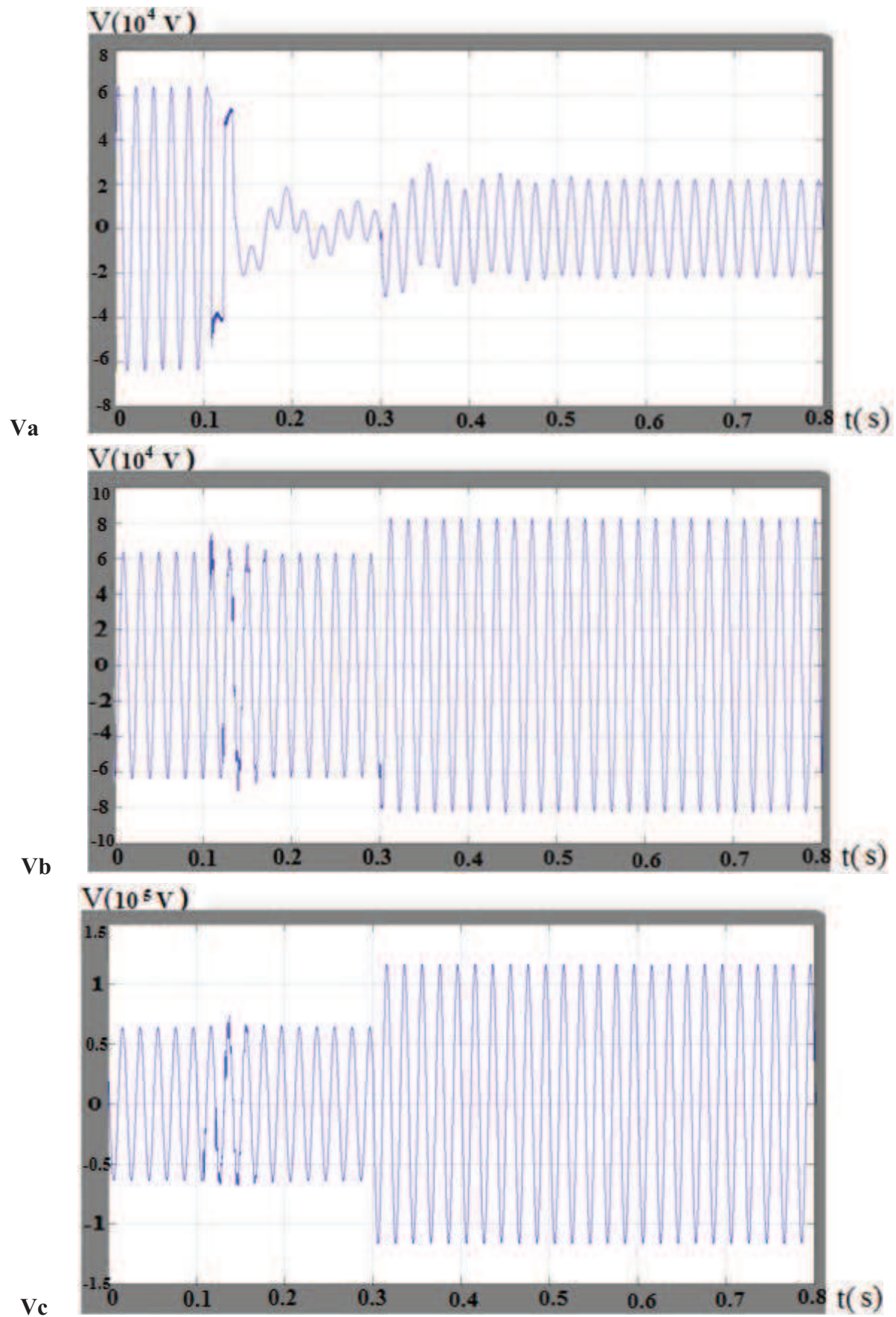


Figure 4.8: Courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) avec neutre mis à la terre à travers une résistance ($R_N=100\Omega$)

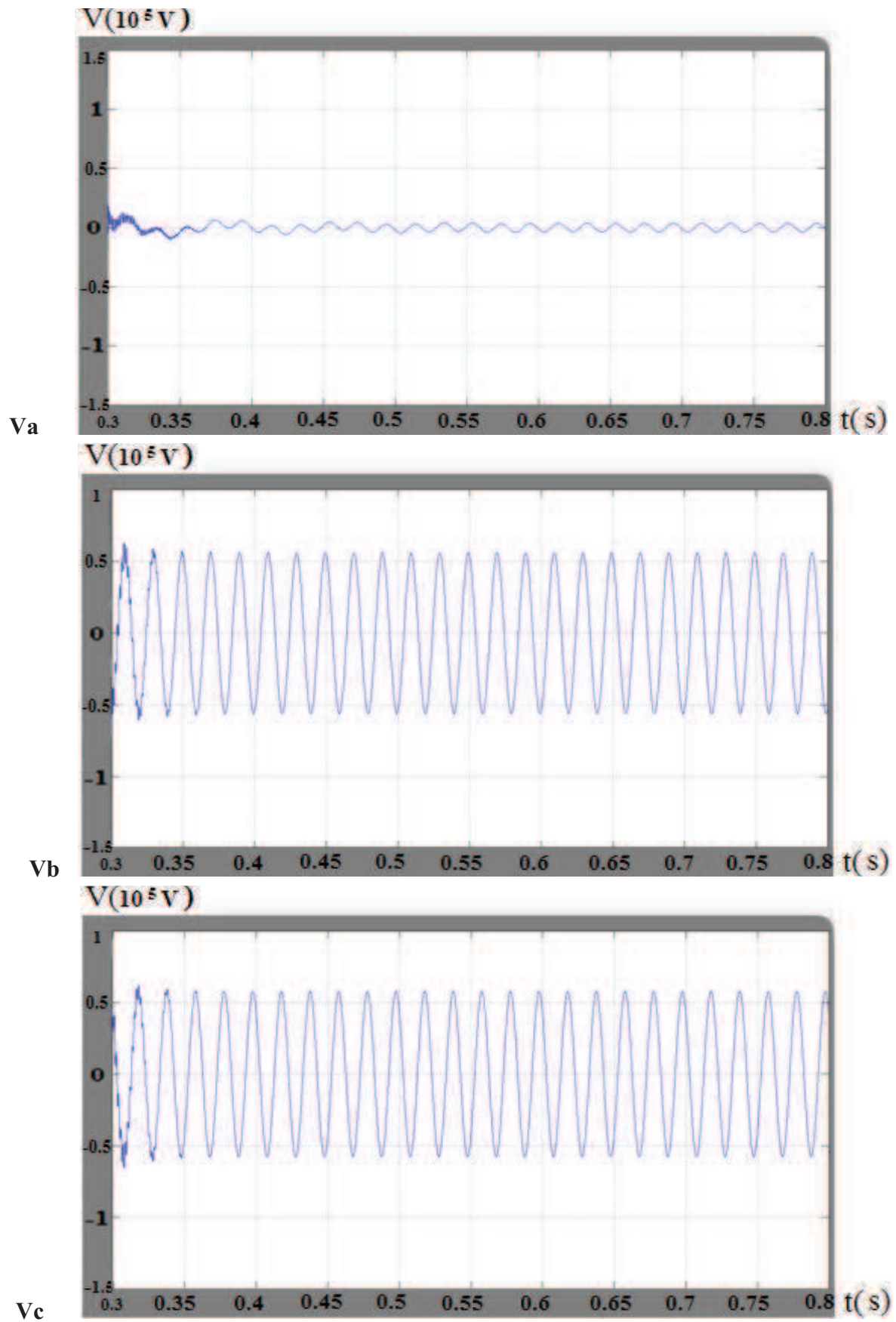


Figure 4.9: Courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) avec neutre mis à la terre à travers une résistance ($R_N=1\Omega$)

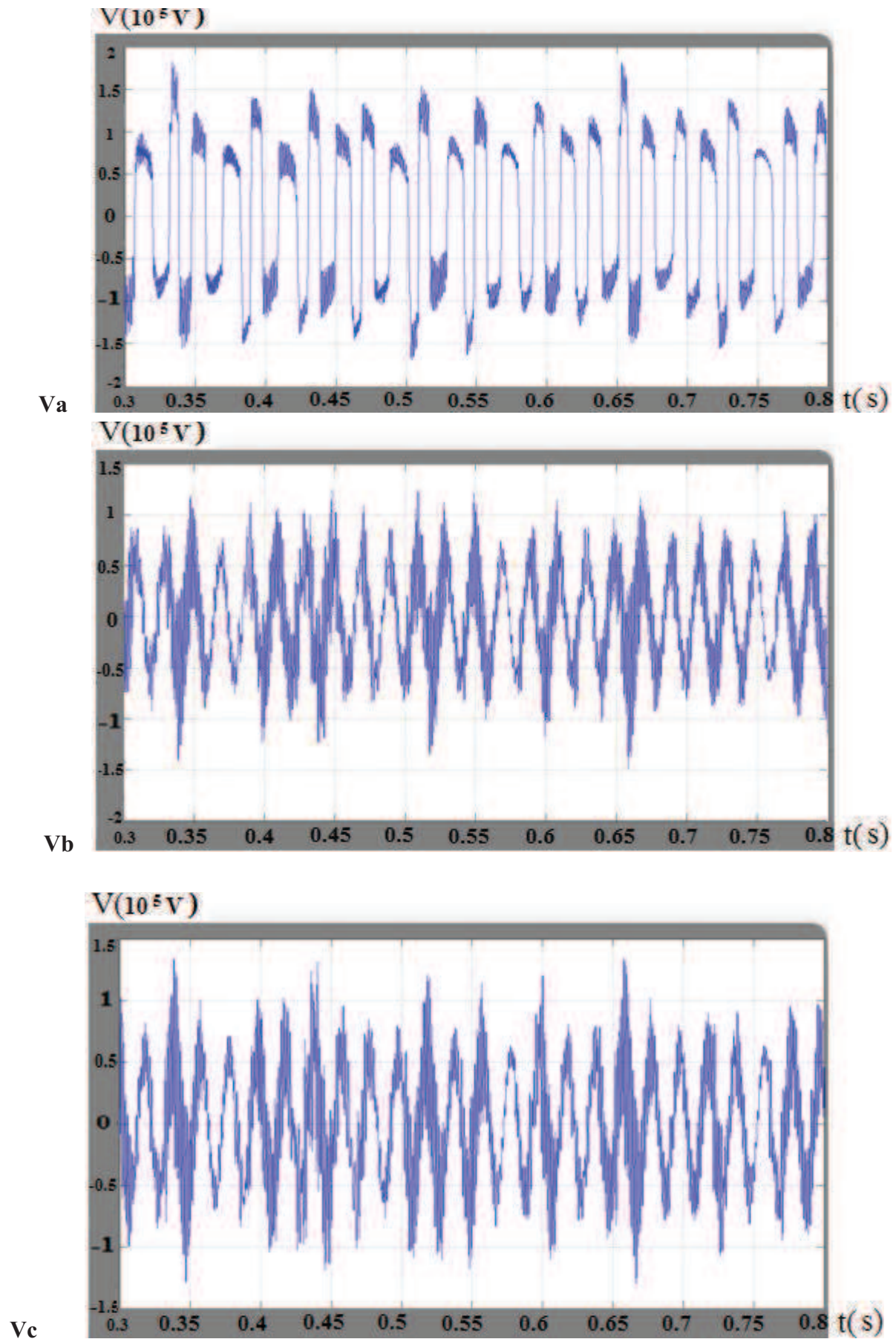


Figure 4.10: Courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) avec neutre directement mis à la terre ($R_N=0\Omega$)

IV. 2.1.1.b) Interprétation des résultats :

L'analyse des résultats du tableau 1 et des figures (4.7, 4.8, 4.9, 4.10), montre une variation des tensions des phases dans la ligne lors du changement des valeurs de la résistance du neutre R_N dans l'intervalle $[0, \infty[$.

Pour les grandes valeurs de R_N (correspondant au neutre isolé de la terre), les tensions des 3 phases augmentent jusqu'aux valeurs limites (303, 270 et 266 kV), ces surtensions de ferrorésonance obtenues, sont de régime quasi-périodique (pseudopériodique), très riche en harmoniques et présentent des pics élevés, qui peuvent atteindre 3.3 fois la tension de phase.

Le neutre mis à la terre à travers une résistance de faible valeur ($1 < R_N < 100 \Omega$), permet de faire disparaître les effets néfastes des harmoniques (figure 4.11a 4.11b), ce qui implique la disparition du phénomène de ferrorésonance.

Pour les très petites valeurs de R_N ($0 < R_N < 1 \Omega$), on observe des surtensions de ferrorésonance élevées par rapport aux tensions de phases en régime normal, ce qui est dû à une résonance non linéaire sur un harmonique correspondant.

IV. 2.1.2) Neutre mis à la terre à travers une inductance $Z_N = X_N(\Omega) = L_N \cdot \omega$:

En deuxième lieu on considère le neutre mis à la terre à travers inductance.

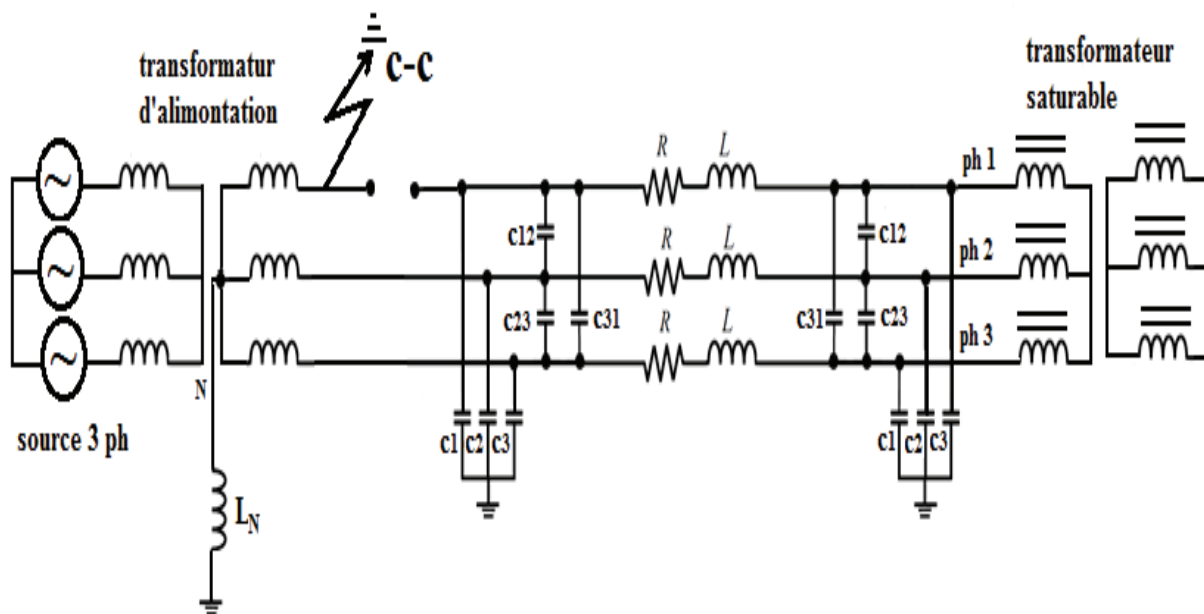
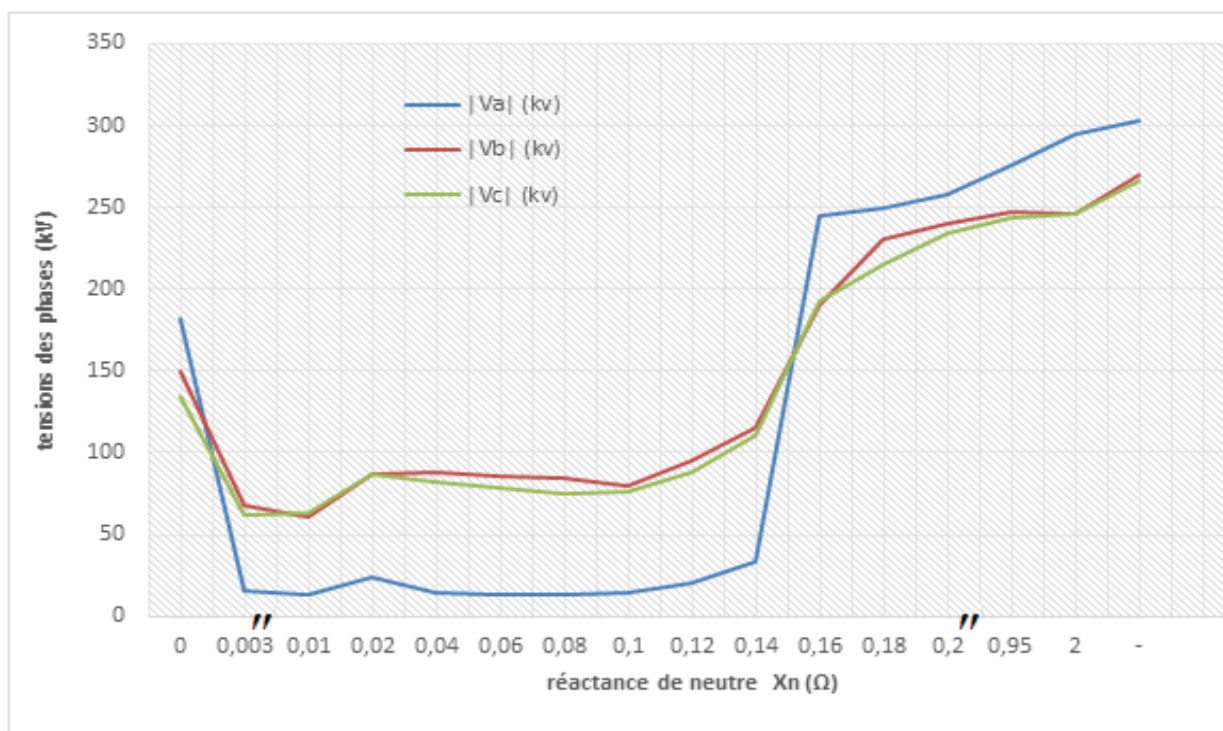


Figure 4. 5: Schéma électrique du réseau considéré avec neutre mis à la terre à travers une impédance

IV. 2.1.2.a) Résultats des simulations :

Tableaux des résultats et courbes des tensions de phase :

$L_N(H)$	$X_n(\Omega) = L_N \cdot \omega$	$ V_a (kv)$	$ V_b (kv)$	$ V_c (kv)$
–	∞	302.71	269.48	266.08
2	628	294.26	246.48	243.16
0.95	300	275.98	247.05	246
0.5	157	273.97	268.40	253.09
0.3	94,2	270.24	256.56	251.63
0.2	62.8	257.74	266.35	233.95
0.15	47.12	245.30	186.94	192.15
0.14	43.98	33.85	115.20	110.95
0.1	31.4	14.79	80.06	76.41
0.07	21.98	23.98	77.46	71.93
0.006	1.88	12.91	61.19	62.78
0.003	0.942	15.27	67.72	62.45
0	0	181.97	150.37	133.90

Tableau 2 : tension des phases en fonction de L_N Graph 2 : courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) en fonction de l'inductance de neutre L_N

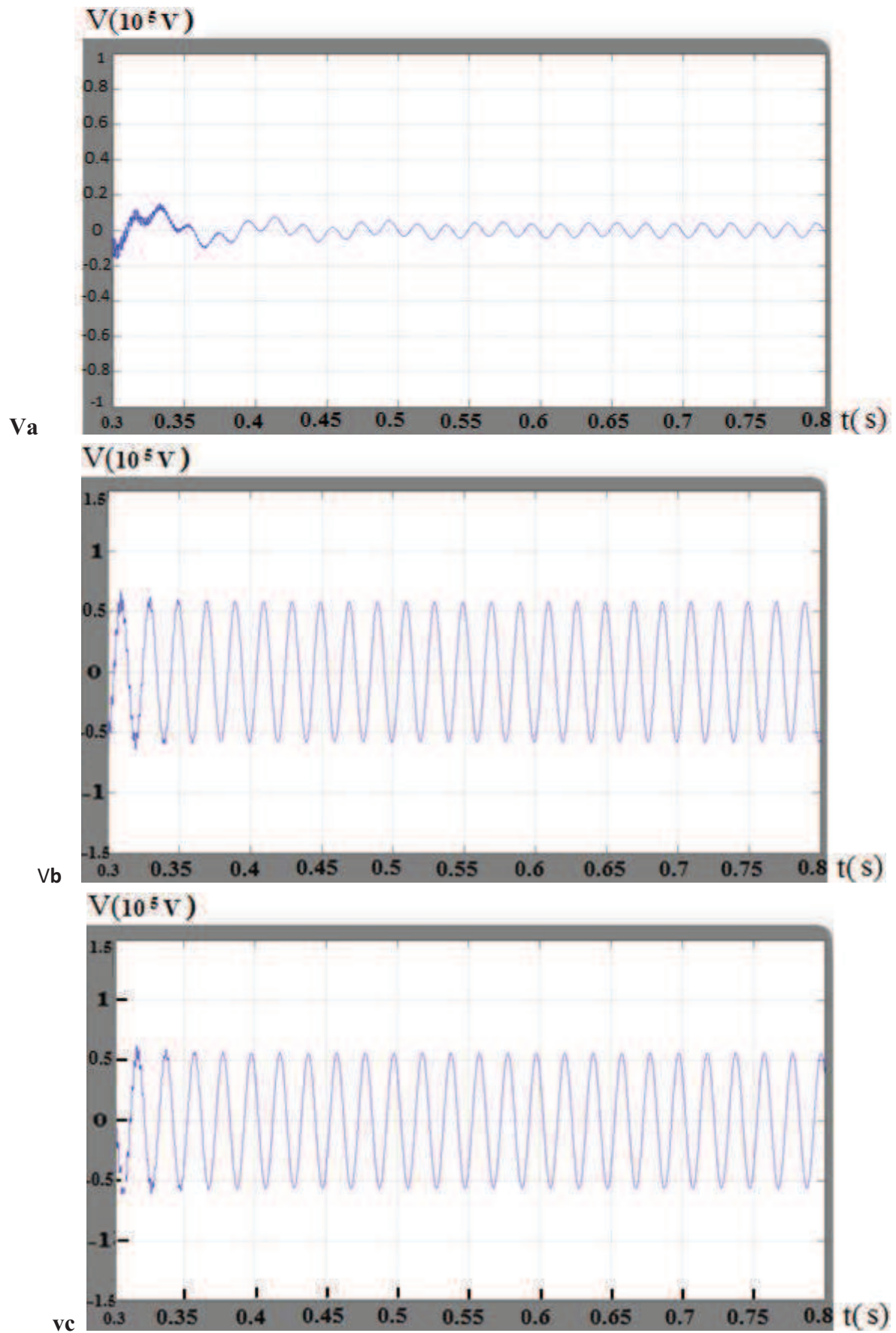


Figure 4.13: Courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) avec neutre mis à la terre à travers une inductance ($L_N=300\text{mH}$)

IV. 2.1.2.b) Interprétation des résultats :

Comme on voit, ces résultats sont presque identiques aux résultats obtenus dans le cas du neutre mis à la terre via une résistance.

IV. 2.1.3) Analyse harmonique :

Du point de vue spectral, l'étude en fréquence revient à appliquer la transformée de Fourier aux équations temporelles du signal de la tension, pour l'illustration on prend la phase B comme exemple.

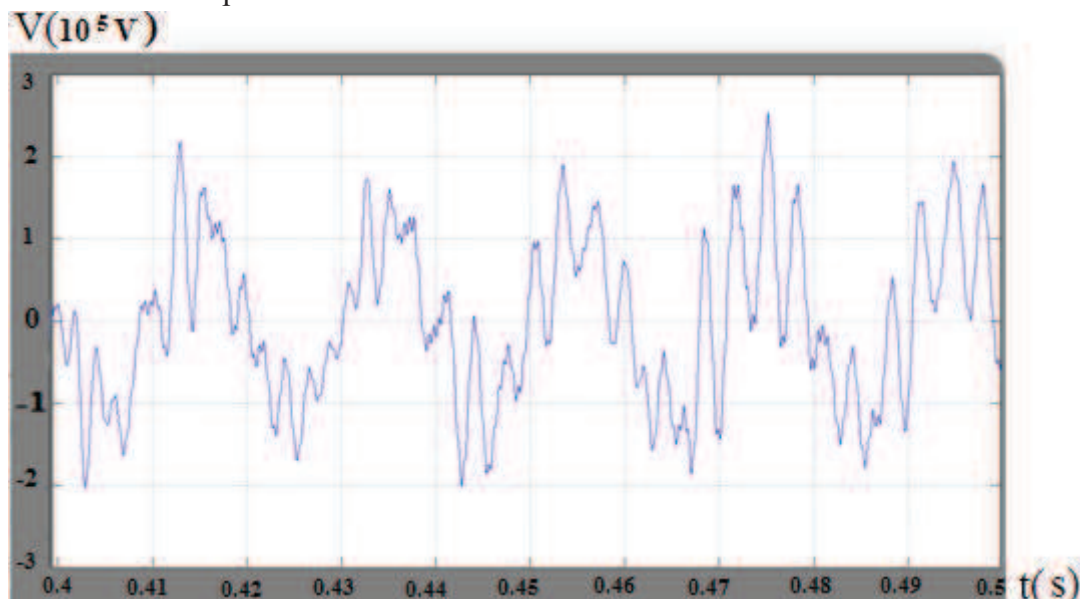


Figure 4.11a: Courbe de la tension de la phase B avec le neutre isolé de la terre

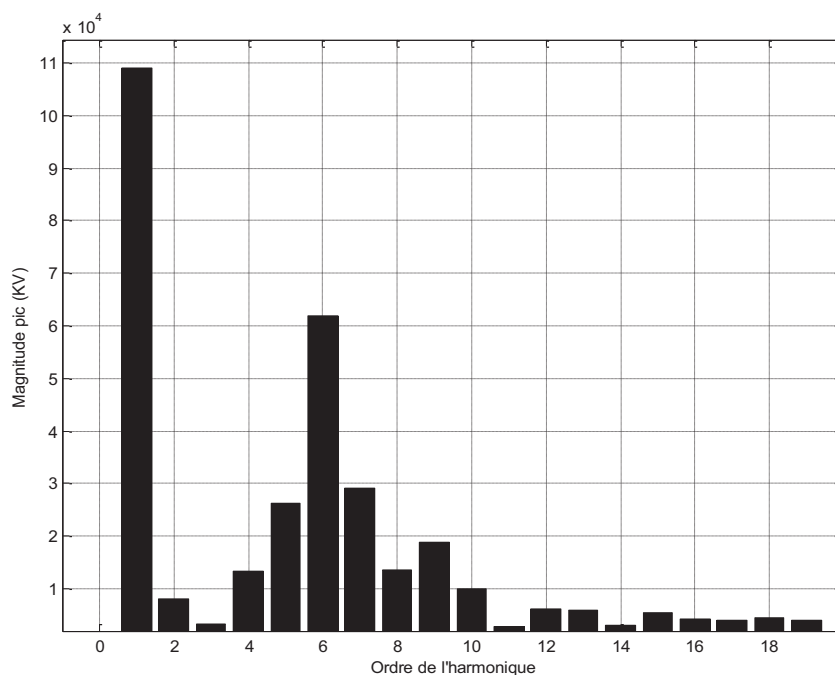


Figure 4.11b: Spectre harmonique du signal de tension de la phase B en série de Fourier avec le neutre isolé de la terre

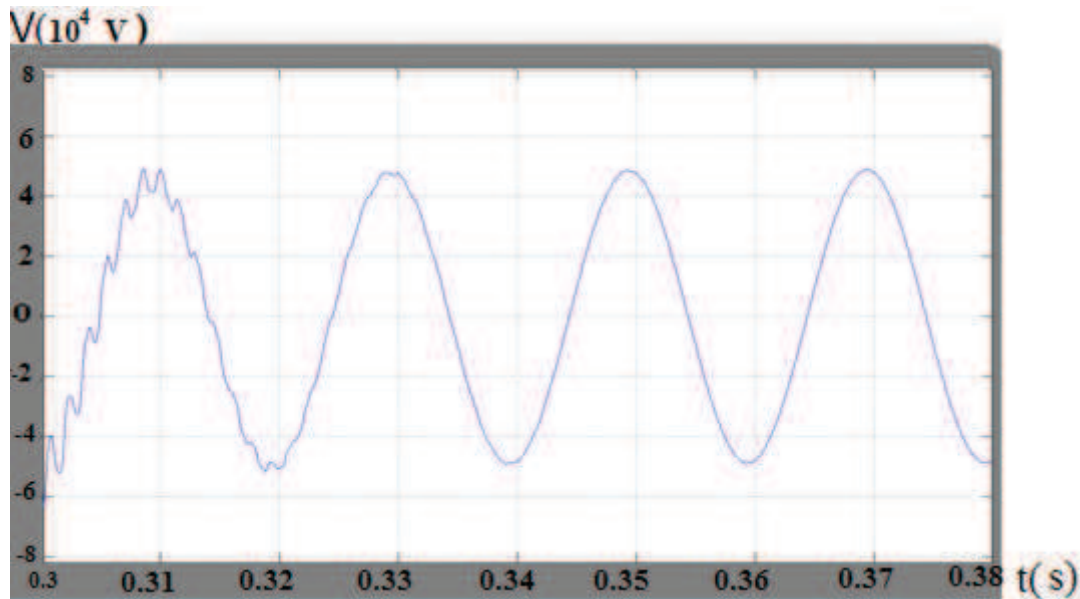


Figure 4.11c: Courbe de la tension de la phase B avec le neutre impédant ($Z_N=10\Omega$)

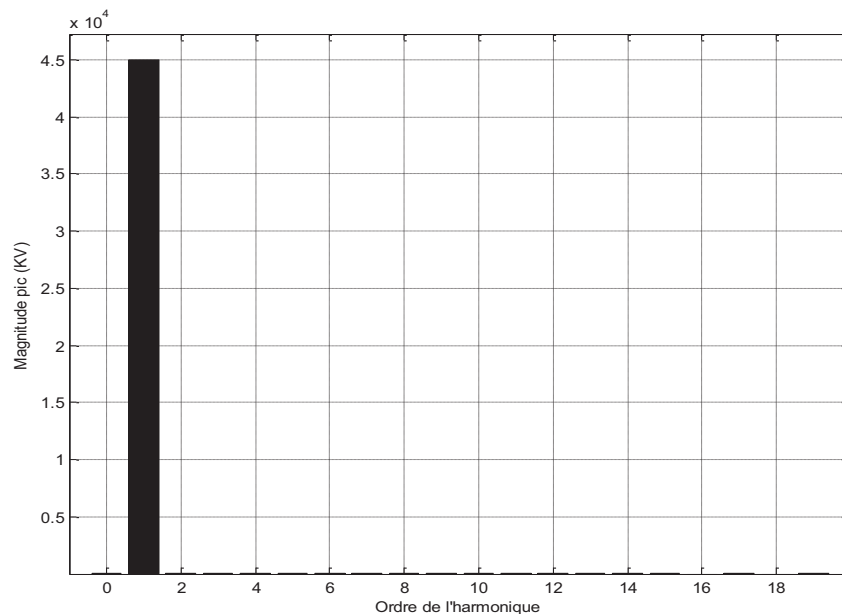


Figure 4.11d: Spectre harmonique du signal de tension de la phase B en série de Fourier, avec le neutre impédant ($Z_N=10\Omega$)

❖ Interprétation des résultats :

L'analyse des résultats des figures (4.11a et 4.11b) montrent que les surtensions de ferrorésonance obtenues, sont très riche en harmoniques, pour le cas où le neutre est isolé de la terre, les harmoniques les plus importants sont le fondamental, c'est-à-dire celui à la fréquence industrielle, et ceux dont l'ordre est entre 4 et 10, par contre pour le cas où le neutre est mis à la terre à travers une impédance de faible valeur ($Z_N=10\Omega$), permet de faire disparaître les harmoniques d'ordre autre que celui à la fréquence de service (figure 4.11c 4.11d).

IV. 2.2) Configuration neutre isolé de la terre avec le transformateur chargé :

Pour étudier l'influence de la charge, on considère une charge sur le transformateur figure (4.14). La charge varie dans l'intervalle [0.01, 45 MVA].

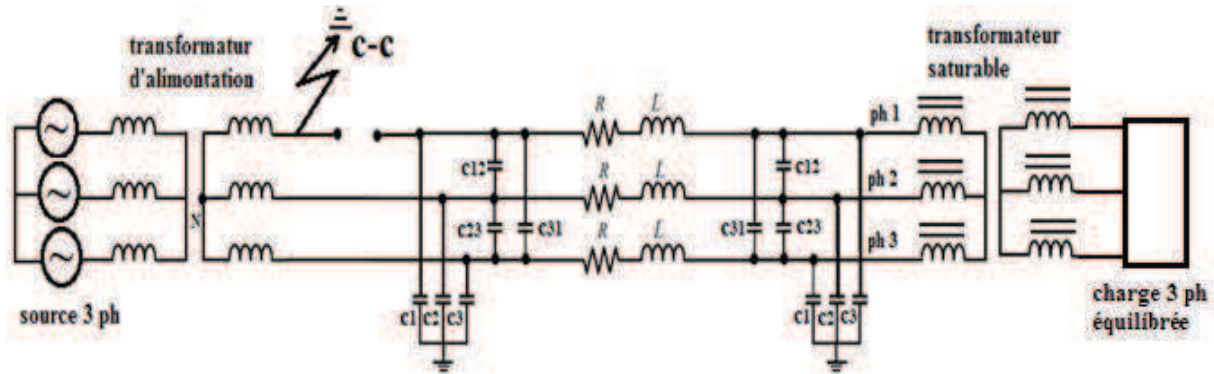


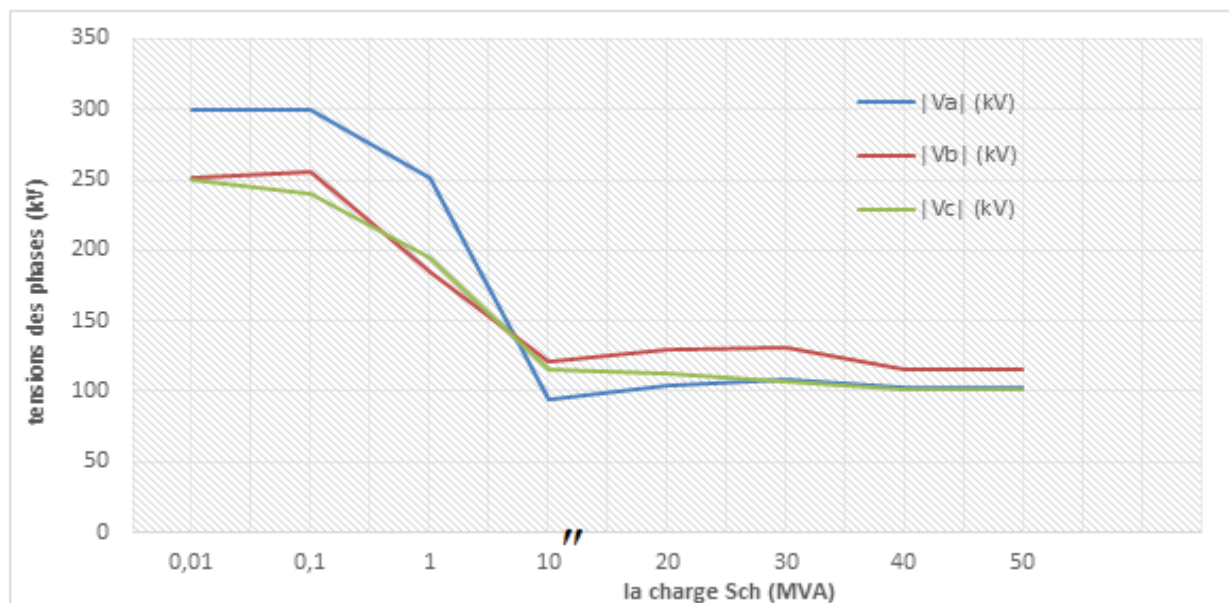
Figure 4. 14: Schéma électrique du réseau considéré (neutre isolé de la terre) avec une charge

IV. 2.2.a) Résultats des simulations :

Tableaux des résultats et courbes des tensions de phase :

S_{ch} (MVA)	0.01	0.1	1	5	10	20	30	40	45
$ V_a $ (kV)	300.19	299.42	252.35	81.08	94.36	104.23	108.81	103.23	102.25
$ V_b $ (kV)	250.96	255.17	185.15	127.15	120.81	129.26	131.49	115.31	115.18
$ V_c $ (kV)	250.25	240.04	195.57	121.57	114.81	112.25	106.82	101.11	100.71

Tableau 3 : surtension des phases en fonction de la charge.



Graph 3 : Courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) en fonction de la charge S_{ch} .

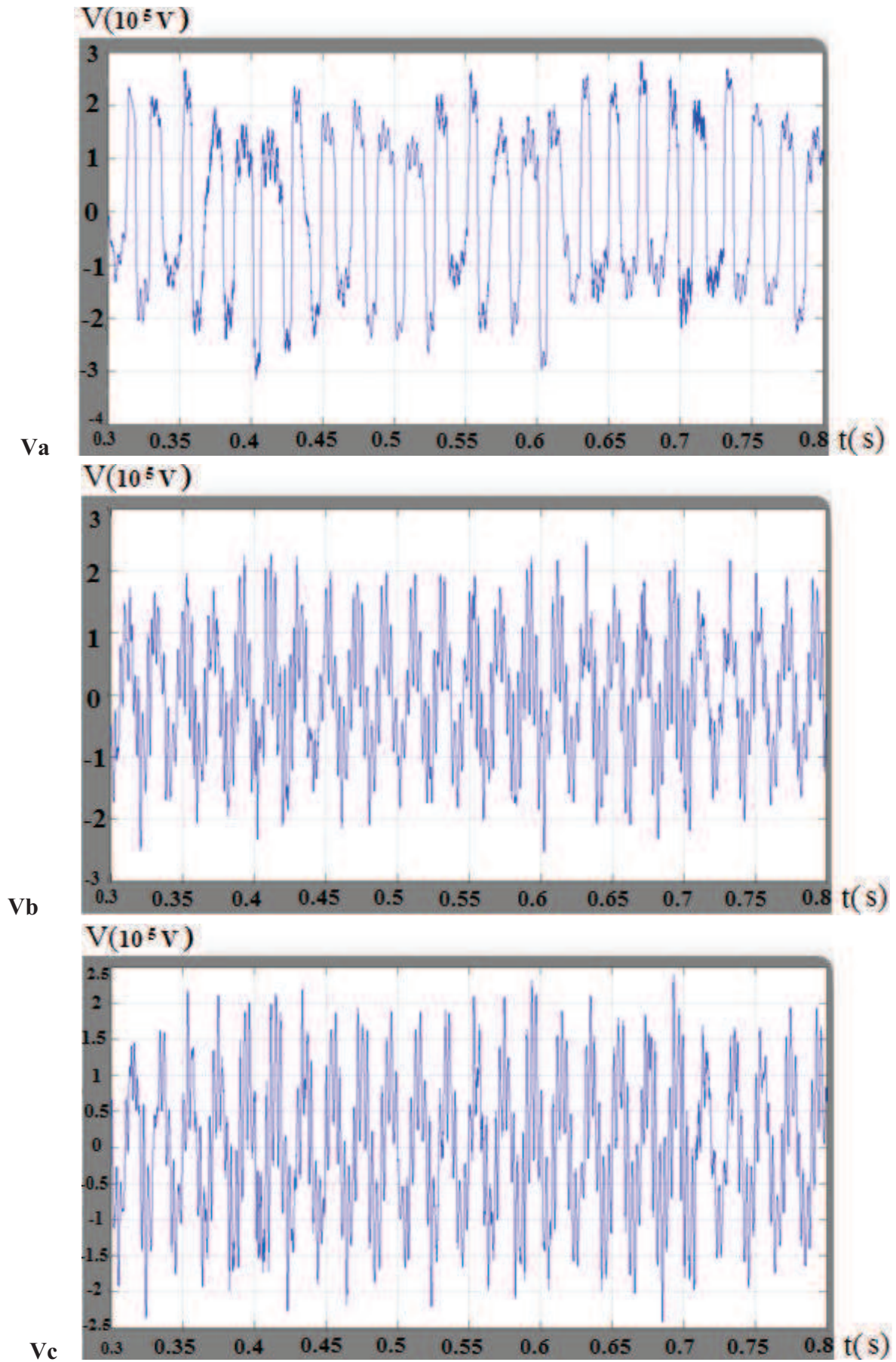


Figure 4.15: Courbes des tensions des phases (Va, Vb, Vc) avec une charge de 0.1MVA

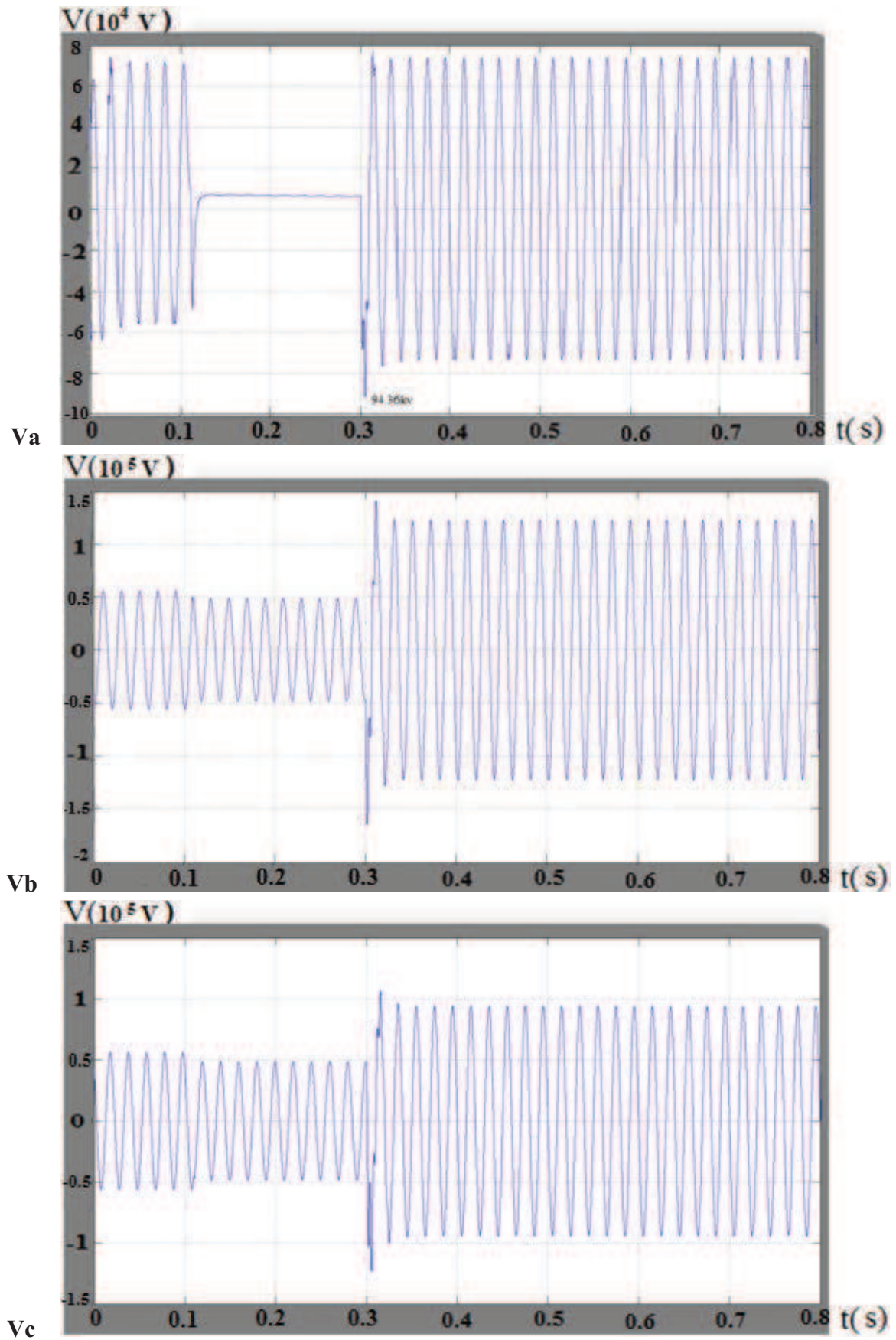


Figure 4.16: Courbes des tensions des phases (V_a , V_b , V_c) avec une charge de 10MVA

IV. 2.2.b) Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus tableau 3 et les figures (4.15 et 4.16), nous remarquons que les surtensions de ferrorésonance apparaissent quand le réseau est faiblement chargé, et une fois que la puissance de la charge atteint 1 MVA, les surtensions ne se créent plus sur la ligne.

IV. 2. 3) Configuration neutre isolé de la terre avec un parafoudre à la fin de la ligne:

Pour cette partie on considère le neutre isolé de la terre, et un parafoudre connecté à la fin de la ligne. Le parafoudre utilisé est à oxyde de zinc ZnO, utilisée pour protéger l'équipement de puissance contre les surtensions.

IV. 2. 3.a) Résultats des simulations :

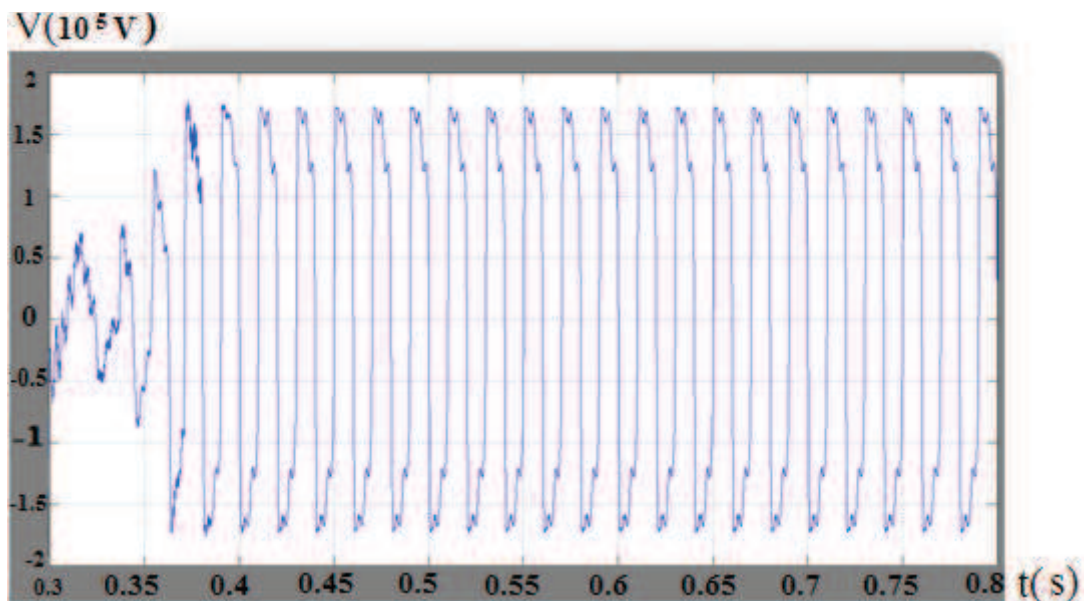


Figure 4.17a: Courbes de la tension de la phase A avec un parafoudre à la fin de la ligne.

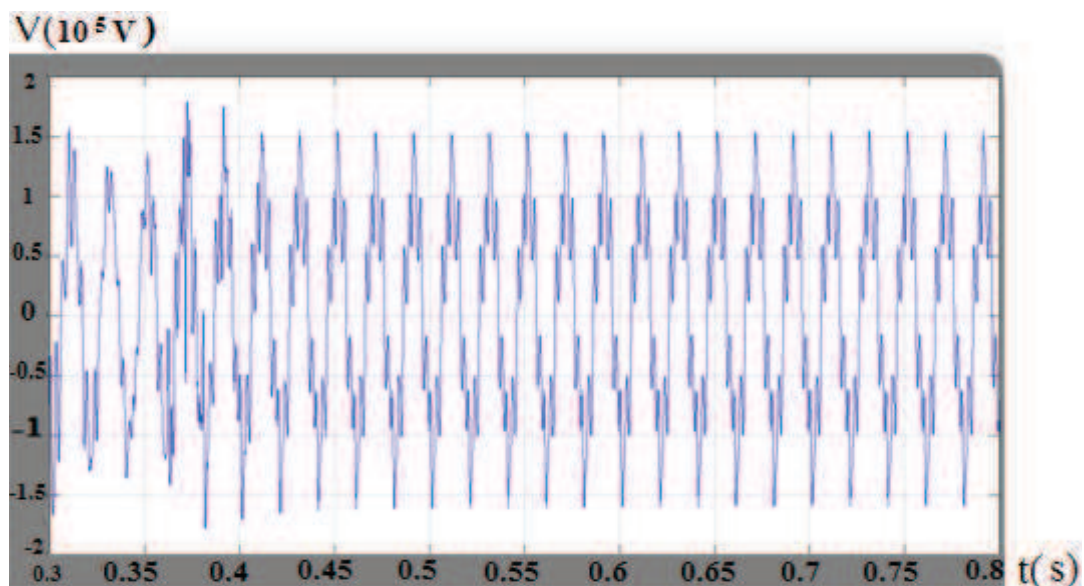


Figure 4.17b: Courbes de la tension de la phase B avec un parafoudre à la fin de la ligne.

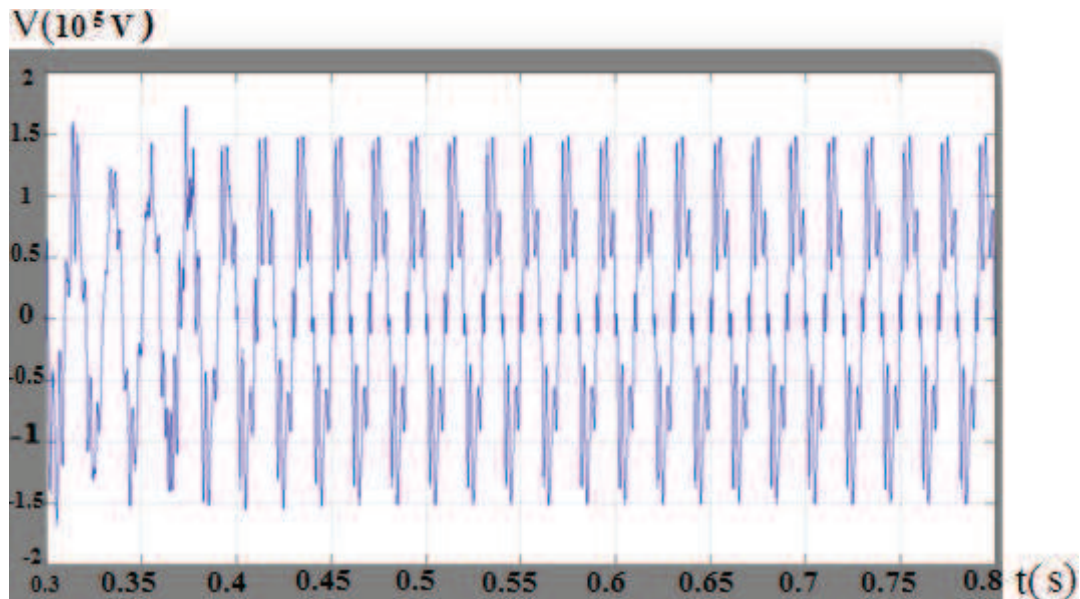


Figure 4.17c: Courbes de la tension de la phase C avec un parafoudre à la fin de la ligne.

IV. 2. 3.b) Interprétation des résultats :

Comme en voit, la présence d'un parafoudre à la fin de la ligne limite les surtensions jusqu'à 170 kV, mais les courbes de surtensions sont encore déformées (figure 4.17a, 4.17b et 4.17c).

Conclusions :

D'après cette étude on constate que les surtensions de ferrorésonance avec le neutre isolé de la terre, sont plus sévères que dans le cas où le neutre est mis : soit directement à la terre soit à travers une impédance de faible valeur ($0 < Z_N < 100 \, \Omega$), ce qui diminue l'augmentation de la tension, et d'éliminer les effets néfastes de ces surtensions sur le réseau électrique et le matériel.

Nous avons vus aussi que ces surtensions apparaissent quand le réseau est faiblement chargé, et que le parafoudre est un élément de protection nécessaire, qui peut limiter les surtensions. En ce qui concerne la distorsion des ondes des tensions et des courants, ce problème peut être résolu par l'application des filtres correspondant.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre travail est consacré à l'étude et l'analyse des surtensions de ferrorésonance dans les lignes et les transformateurs de haute tension, et aussi la détermination de l'influence du régime du neutre sur ces dernières.

Le comportement dynamique d'un transformateur peut être caractérisé de différentes manières. La prise en compte de la saturation du noyau, donc de la non-linéarité, implique que les fonctions à résoudre seront plus compliquées en comparaison avec les modèles linéaires.

Afin de réaliser cette étude, on a d'abord déterminé un modèle (ligne 110 kV de 50 km et un transformateur de puissance), produisant des surtensions de ferrorésonance après la perte d'une phase, puis effectué des simulations en considérant les différents régimes du neutre: isolé de la terre, mis à la terre à travers une résistance, mis à la terre à travers une inductance et directement mis à la terre. Les simulations ont été faites pour différentes valeurs de l'impédance du neutre, c'est-à-dire, pour différents valeurs de la résistance et de l'inductance, pour mieux dimensionner les protections du réseau, de même la simulation a été faite avec la présence d'un parafoudre à la fin de la ligne.

En effet, les résultats obtenus montrent bien, que le réseau en situation de ferrorésonance, crée sur la ligne et dans le transformateur des surtensions de ferrorésonance, ce qui déforme complètement l'onde de tension sur la ligne, car il y a une création excessive d'harmoniques dangereux, en plus de l'élévation très significative en amplitude (jusqu'à 3.3 fois). On trouve que la mise directe à la terre du neutre, diminue considérablement l'amplitude des surtensions, mais l'onde reste très déformée et riche en harmoniques, tandis que la mise à la terre du neutre à travers une inductance, ou une résistance de quelques dizaines d'ohms, supprime complètement les surtensions, et donne à l'onde de tension une forme très acceptable en atténuant les oscillations.

Donc la résistance du neutre, supprime avec succès le comportement ferrorésonant du schéma considéré. En conséquent, le système montre moins de sensibilité aux conditions initiales (déséquilibres) en présence de la résistance sur le neutre.

Les surtensions de ferrorésonance, comme les autres forme des surtensions, peuvent être limitées par les parafoudres. En ce qui concerne la production des harmoniques, ceux-ci peuvent être limités ou éliminés par l'application des filtres correspondants.

En perspectives, il serait intéressant d'entreprendre l'étude des différentes configurations susceptibles de présenter des surtensions de ferrorésonance, et pour les différents niveaux de tension, pour élargir le domaine de connaissance de ce phénomène.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] **Philippe Carrive** : Réseaux de distribution Structure et planification, Techniques de l'Ingénieur.
- [2] **Théodore Wildi et Gilbert Sybille**: Électrotechnique.
- [3] Encyclopédie en ligne Wikipedia.
- [4] Protection des réseaux électriques, Guide de la protection, Cahier technique Schneider.
- [5] **Michel Aguet et Jean- Jacques Morf** : Traité d'électricité.
- [6] **Thierry Debu**: Lignes aériennes. Paramètres électriques, Techniques de l'Ingénieur.
- [7] **Patrick Lagonotte** : Les lignes et les câbles électriques.
- [8] **E.Gillon** : Cours d'électrotechnique, Les machines électriques.
- [9] **Valentin.Crastan** : Les réseaux d'énergie électrique tome 1.
- [10] **Roland Choquet** : La sécurité électrique et technique de prévention.
- [11] **B.Bochart** : Le transformateur de puissance.
- [12] **Bouchahdane.M** : Étude des équipements de protection de la nouvelle ligne 400 kV en Algérie ;
Mémoire magister.
- [13] **Michel Crappe**: Electric Power Systems, Faculté Polytechnique.
- [14] **W.D Stevenson**: Elements of Power System Analysis, 4th éd.
- [15] **B. M Weedy**: Electric Power Systems, 3rd éd, John Wiley & Sons Ltd.
- [16] **L.G Hewistonet Mark Brown** : Guide de la protection des équipements électriques
- [17] **Jacques Marie Broust** : Appareillages et installations électriques industrielles
- [18] **Dymokhovskaya.L.F** : Les surtensions internes dans les lignes de transport, (T-Ingénieur).
- [19] **Benoît de Metz-Noblat**: La foudre et les installations électriques HT, Cahier technique Schneider.
- [20] **Christophe Prévé et Robert Jeannot** : Guide de conception des réseaux électriques industriels.
- [21] **D. Fulchiron**: Surtensions et coordination de l'isolement, Cahier technique Schneider.
- [22] **Michel Graciet et Joseph Pinel** : Protection contre les perturbations, Techniques de l'Ingénieur.
- [23] **Christophe Séraudie** : Surtensions et parafoudres en BT -coordination de l'isolement en BT.
- [24] **Swee Peng Ang** : Ferroresonance simulation studies of transmission systems, these doctorat.
- [25] **Philippe Ferracci** : La ferrorésonance, Cahier technique Schneider.
- [26] **Christophe Kieny et Abdelkader SBA**: Ferrorésonance dans les réseaux, (T-Ingénieur).
- [27] **Richard Gagnon** : Étude de la ferrorésonance dans les réseaux compensés séries et shunt, thèse doctorat.

Normes

CEI 60-1 (1989) : techniques des essais à haute tension. Partie 1 : définitions et prescriptions générales relatives aux essais.

CEI 71-2 (1976) : coordination de l'isolement. Partie 2 : guide d'application.

CEI 99-1 (05.1991) : parafoudres. Partie 1 : parafoudres à résistance variable avec éclateur.

CEI 99-4 (11.1991) : parafoudres. Partie 4 : parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour réseau à courant alternatif.

CEI 71-1 (12.1993) : coordination de l'isolement. Partie 1 : définitions, principes et règles.

Résumé :

Notre travail est consacré à l'étude et l'analyse des surtensions de ferrorésonance dans les lignes et les transformateurs de haute tension, et aussi la détermination de l'influence du régime du neutre sur ces dernières.

Les résultats obtenus montrent bien, que le réseau en situation de ferrorésonance, crée sur la ligne et dans le transformateur des surtensions de ferrorésonance, ce qui déforme complètement l'onde de tension sur la ligne, car il y a une création excessive d'harmoniques dangereux, en plus de l'élévation très significative en amplitude. On trouve que la mise directe à la terre du neutre, diminue considérablement l'amplitude des surtensions, mais l'onde reste très déformée et riche en harmoniques, tandis que la mise à la terre du neutre à travers une inductance, ou une résistance de quelques dizaines d'ohms, supprime complètement les surtensions, et donne à l'onde de tension une forme très acceptable en atténuant les oscillations.

Mots-clés : Réseau électrique, Surtension, Phases incomplètes, Résonance, Ferrorésonance, Inductance non-linéaire, ligne triphasé, transformateur saturable, Régime du neutre.