

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2020



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Par : BRAHMIA Tareq et KOUADRIA Faris

Thème

Modélisation des paramètres des lignes électriques

Soutenu publiquement, le 03/10/2020, devant le jury composé de :

M.KACHI Miloud	professeur	Univ. Guelma	Président
M.REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M.GOUAIDIA Said	MAA	Univ. Guelma	Encadreur

Année Universitaire : 2019/2020

بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله والصلاة والسلام على أشرف المرسلين

*Hommage au
Docteur ALI BOUZIT
Nous étudiants Master 2 ELT :
Option Réseau Electrique*

Tenions à rendre un grand hommage à la mémoire de notre cher regretté

Docteur ALI BOUZIT

Qu'il repose en paix Incha Allah.

Certes les séparations sont toujours douloureuses notamment celles des êtres

Qui nous sont très cher(e)s.

Leurs rendre hommage c'est de continuer à vivre et honorer leur

Passage dans nos vies. Quant à l'oubli " NON ",

Le temps certes apaise cette douleur, mais ne les oublions jamais.

Docteur ALI BOUZIT

Reste toujours présent par l'empreinte très forte laissée parmi nous.

A Dieu nous appartenons et à Dieu nous retournons

إِنَّا لِلّٰهِ وَإِنَّا إِلَيْهِ رَاجِعُونَ

Remerciements

Tous d'abord, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, patience, santé et volonté tout au long de nos études.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire GOUAIDIA Said, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Nos sincères remerciements vont à tous les membres de jury à savoir monsieur KACHI Miloud d'avoir accepté de présider le jury.

Un grand merci à monsieur REMADNIA Mokdad pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et accepté de faire partie de mon jury.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de Guelma, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, avant tout et partout, que j'aime et souhaite les avoir toujours à mes côtés.

La plus merveilleuse mère, que Allah le tout-puissant la protège, pour son grand amour, sa patience et ses prières

Au plus adorable et gentil père au monde, qui m'a tout donné sans rien recevoir en parallèle, que je remercie infiniment de ces services.

Mes chères sœurs (zahra et joumana) qui m'a toujours soutenue et accompagnée même dans mes choix les plus ridicules.

Mes grands-parents sont dans les tombes, Mes grands-mères, mes oncles, mes tantes, mes cousins, mes cousins et quiconque s'appelle brahmia ou zardoudi.

Mon binôme de mémoire Fares

Les gens influents dans ma vie :

Mes amis d'enfance : Ilyes, Amar, Zaki, Ayoub, Minou, Sami, Atef, Saleh, Khairou, Rouft, Bkhcha, Bilal.

Mes amis de l'université : Dalou, Ficha, Zaid, Aimen, Fakhro, Taki, et tous mes collègues de la promotion 2020

Luka

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

La plus merveilleuse mère, que Allah le tout-puissant la protège, pour son grand amour, sa patience et ses prières

Au plus adorable et gentil père au monde, qui m'a tout donné sans rien recevoir en parallèle, que je remercie infiniment de ces services.

Spécial dedie pour ma grande mere dans le tombe allah yer7maha.

Mon binôme de mémoire Tarek loca.

Les gens influents dans ma vie :

Mes collègues de travail.

Mes amis : dayou ,Ilyes, Ficha, Aimen, Zaid, Seif, Lotfi, Mohamed, Racim, et tous mes collègues de la promotion 2020.

FARES

Résumé

L'objectif de notre travail est le calcul des paramètres et les caractéristiques d'une ligne de transport de l'énergie électrique par ordinateur sous logiciel de programmation MATLAB ; Ce langage nous a permis de faire des programmes afin de faciliter à l'utilisateur de réduire le temps de calcul et le risque de l'erreur à chaque fois qu'il souhaite faire des calculs sur les lignes aériennes.

The objective of our work is the calculation of the parameters and the characteristics of an electrical energy transmission line by computer using MATLAB programming software; This language has allowed us to make programs in order to ease the user to reduce the computational buffers and the risk of error.

الهدف من عملنا هو حساب خصائص خطوط نقل الطاقة الكهربائية بواسطة الكمبيوتر باستخدام برنامج الماتلاب , سمحت لنا اللغة بإنجاز برامج من أجل تسهيل العمل للمستخدم و تسريع العملية و التقليل من الأخطاء.

Sommaire

I.1	Introduction.....	6
I.2	La production de L'énergie électrique	6
I.3	Description des réseaux électriques	7
I.4	Les niveaux de tensions	8
I.4.1	Structure des réseaux électriques.....	9
I.5	Réseau de transport THT.....	9
I.5.1	Réseau de répartition HT.....	10
I.5.2	Réseau de distribution	10
I.6	Poste de transformation	10
I.7	Lignes aériennes et câbles souterrains.....	11
I.7.1	Les réseaux HTA aériennes.....	12
I.7.2	Les réseaux HTA souterrains	13
I.8	Conclusion	14
II.1	Introduction.....	15
II.2	Les supports	15
II.3	Les conducteurs.....	16
II.3.1	Types de conducteurs	16
II.4	Les isolateurs.....	17
II.5	Les Pylônes	18
II.5.1	Pylône nappe	18
II.5.2	Pylône classique	19
II.5.3	Pylône tubulaire.....	19
II.6	Câbles de garde	20

II.7	Les paramètres de la ligne électrique	20
II.7.1	Les paramètres longitudinaux	20
II.7.1.1	La résistance de la ligne	20
II.7.1.2	Inductance de la ligne	22
II.7.1.2.1	Définition	22
II.7.1.2.2	Inductance d'un conducteur	22
II.7.1.2.3	Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant 26	
II.7.1.2.4	Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés	27
II.7.1.2.5	Inductance : ligne monophasée à deux fils et ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal.....	28
II.7.2	Les paramètres transversaux	33
II.7.2.1	Conductance	33
II.7.2.2	La capacité de la ligne.....	33
II.7.2.2.1	Capacité d'une ligne monophasée	33
II.7.2.2.2	Capacité des conducteurs en faisceaux	35
II.8	Conclusion	36
III.1	Introduction	37
III.2	Modélisation des lignes aériennes	37
III.2.1	Ligne de transmission courte	38
III.2.2	Ligne de transmission moyenne	39
III.2.3	Ligne de transmission longue	40
III.3	Conclusion.....	42
IV.1	Introduction	43
IV.2	Calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée	43
IV.2.1	Les équations de calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée	43

IV.2.2	Application a une ligne contenant un conducteur par phase (n=1)	44
IV.2.3	Application a une ligne a conducteur de phase en fiscaux de 3 cordes :	46
IV.3	Calcul des caractéristiques de la ligne électrique triphasée	47
IV.3.1	Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne	47
IV.3.2	Les équations de Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne :	47
IV.3.3	Calcul des caractéristiques de la ligne courte :	50
IV.3.3.1	Les équations de Calculs des caractéristiques de la ligne courte :	50
IV.4	Conclusion.....	52
	Conclusion générale	53
	Bibliographie	54

Introduction générale

Depuis plus d'un siècle, une proportion croissante de la population mondiale bénéficie des avantages de l'énergie électrique - une source d'énergie propre, contrôlable et économique qui entraîne des améliorations matérielles de la qualité de vie et de l'efficacité industrielle. À l'heure actuelle, il y a peu d'endroits d'importance économique sur cette planète qui ne disposent pas de courant électrique. Avec les routes et les ponts, le téléphone.... L'électricité est devenue la base même sur laquelle les pays du premier monde ont bâti leur qualité de vie et leur prospérité économique.

En particulier consomme une partie très importante de l'énergie sous forme électrique
Autrement dit, parmi les autres énergies la place de l'énergie électrique est tout à fait centrale, car elle se transporte bien, inodore et autorise des transferts à très bon rendement par ailleurs cette dernière est directement liée à l'ensemble des énergies existantes.

Dans le réseau électrique la ligne joue un rôle très important dans la transmission de l'énergie électrique sur l'ensemble d'un territoire

Où les transferts de l'énergie suivent le schéma dit « du haut en bas » Production - Transport - Distribution.

Selon la longueur on distingue trois types de ligne, la ligne longue ; la ligne moyenne et la ligne courte. Cependant les calculs relatifs aux lignes sont très long et le risque de faire des erreurs est grand, le calcul avec l'outil informatique s'avère nécessaire.

Pour cela on a utilisé des programmes pour le calcul des paramètres et des caractéristiques de différents types de lignes.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les réseaux électriques l'architectures et l'exploitation de ces différents types de réseaux.

Dans Le deuxième chapitre sont présentées des lignes aériennes avec les différents composants qui les constituent ; ainsi qu'une description théorique de calcul des paramètres des lignes électriques. Mentionnant aussi les effets créés par les paramètres transversales (R et L) et longitudinale (C et G) tout au long de la ligne.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des différents types de lignes de transport de l'énergie électrique en utilisant le modèle en Π .

Le quatrième chapitre sera consacré à la programmation sur Matlab pour calculer les paramètres électriques et les caractéristiques des différents types de ligne électrique.

Finalement une conclusion générale achèvera notre présent mémoire.

I.1 Introduction

Le réseau électrique est le réseau du système d'alimentation électrique composé de la centrale électrique, des lignes de transmission, de la sous-station, des transformateurs, des lignes de distribution et du consommateur.

Traditionnellement, les installations de production d'électricité ont été développées dans des endroits éloignés des centres de consommation avec le réseau électrique reliant les deux

Génération - Il existe deux types de génération - centralisée et décentralisée. La production centralisée fait référence à une production à grande échelle loin de la consommation. Cela comprend le nucléaire, le gaz naturel, l'hydroélectricité, les parcs éoliens et les grands panneaux solaires. Le réseau connecte une alimentation centralisée aux consommateurs. La production décentralisée se produit à proximité de la consommation, par exemple solaire sur le toit.

Transmission et distribution - La transmission comprend des transformateurs, des sous-stations et des lignes électriques qui transportent l'électricité de l'endroit où elle est produite jusqu'aux points de consommation. Lorsque l'électricité est à haute tension, les pertes de transmission sont minimisées sur de longues distances et sur les lignes de transmission résistives. Par conséquent, au point de production, les sous-stations contiennent des transformateurs qui augmentent la tension de l'électricité afin qu'elle puisse être transmise.

La transmission est réalisée via des lignes électriques et peut se produire au-dessus ou sous terre. Lorsqu'elle arrive aux points de consommation, une autre sous-station abaisse la tension pour la consommation finale.

I.2 La production de L'énergie électrique

L'énergie électrique n'est pas une énergie primaire, c'est à dire qu'il faut une autre énergie ou d'autre énergie en amont pour la produire

La centrale de production est la composante principale du système électrique. Une centrale peut regrouper sur un même site plusieurs groupes de production.

Elle est destinée à produire de l'électricité par l'intermédiaire des alternateurs. La moyenne tension de production est élevée à une valeur entre 63 et 400 kV à l'aides des transformateurs

situés dans un poste de départ placé au voisinage immédiat de l'usine pour un transport économique de l'énergie.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des centrales capables de produire de l'électricité en grande quantité. Les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques. Les centres de production sont répartis presque uniformément dans l'ensemble du réseau interconnecté, d'autres modes de production existent tels que l'éolien, solaire, marémotrice, géothermale, etc.

La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité. Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles. Alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur. [1]

I.3 Description des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

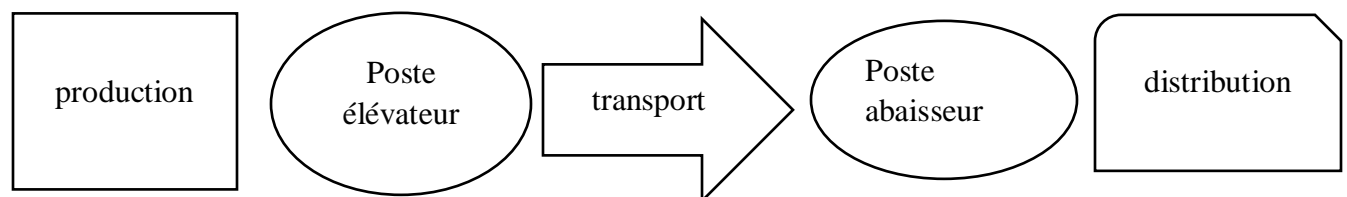


Figure I. 1: Schéma d'un réseau électrique

I.4 Les niveaux de tensions

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit :

- **HTB** → pour une tension composée supérieure à 50 kV
- **HTA** → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- **BTB** → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- **BTA** → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- **TBT** → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V

Les notations de la norme CEI 38 seront parfois utilisées dans ce document avec les définitions suivantes :

- **HT** pour une tension composée comprise entre 35 kV et 220kV
Les valeurs normalisées sont : 45 kV - 66 kV - 110 kV - 132 kV - 150 kV - 220 kV
- **MT** pour une tension composée comprise entre 1000 V et 35 kV
Les valeurs normalisées sont : 3,3 kV - 6,6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV
- **BT** pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V
Les valeurs normalisées sont : 400 V - 690 V - 1000 V (à 50 Hz)

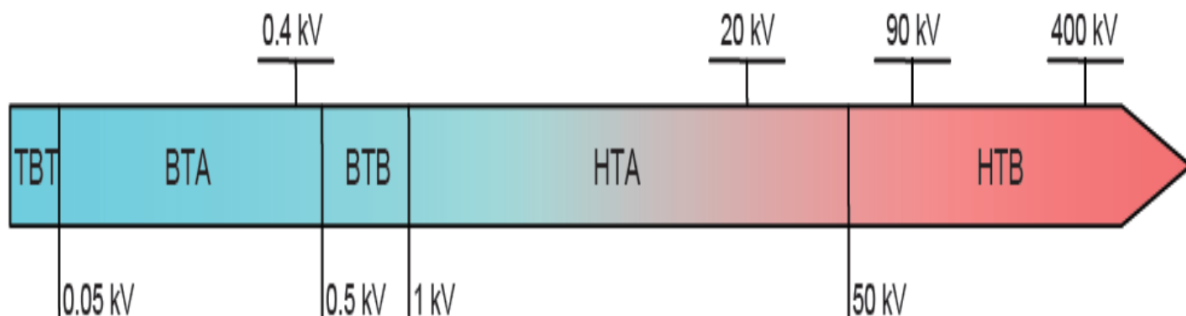


Figure I. 2: Niveaux de tension normalisés [2]

I.4.1 Structure des réseaux électriques

L'architecture d'un réseau de distribution électrique industriel est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise.

Nous allons identifier les différents postes de livraison HTB et HTA, et la structure des réseaux HTA et BT.

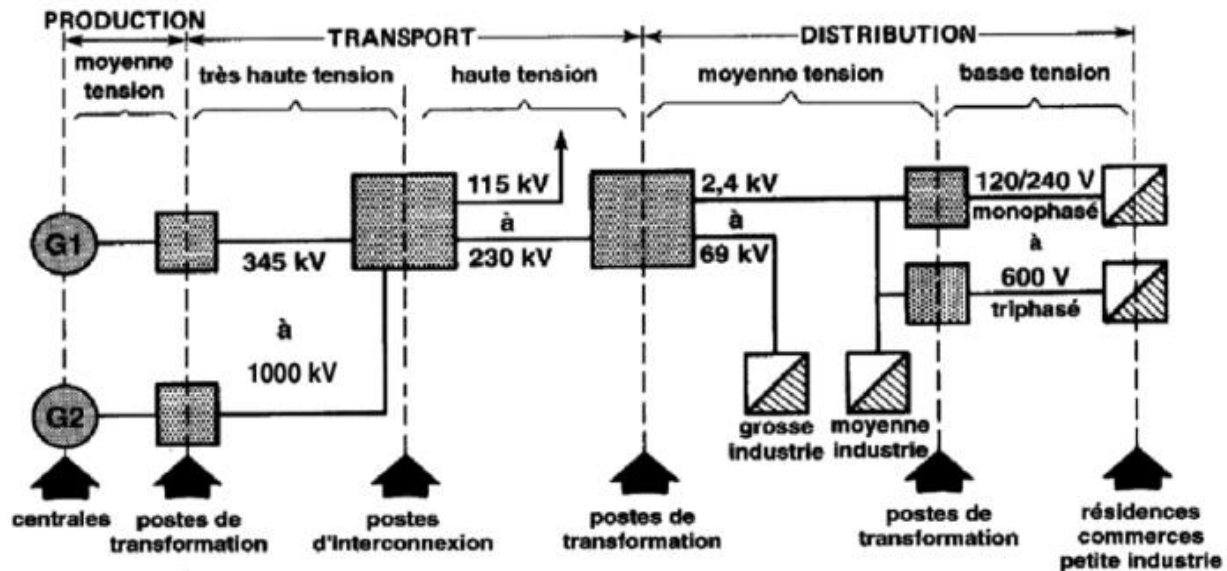


Figure I. 3: Architecture des réseaux électriques.

I.5 Réseau de transport THT

Les lignes THT permettent de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines dont la tension est supérieure à 100 kilovolts (kV) constituent le réseau de grand transport ou d'interconnexion. Elles permettent de relier les régions et les pays entre eux ainsi que d'alimenter directement les grandes zones urbaines. La majorité des lignes THT ont une tension de 400 kV.

Les lignes haute tension constituent le réseau de répartition ou d'alimentation régionale et permettent le transport à l'échelle régionale ou locale. Elles acheminent l'électricité aux industries lourdes, aux grands consommateurs électriques comme les transports ferroviaires et font le lien avec le second réseau. Leur tension est comprise entre 10kV et 100kV.

I.5.1 Réseau de répartition HT

Le deuxième niveau de tension est Le réseau de répartition ($30 \text{ kV} < U < 150 \text{ kV}$) ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Dans un rayon d'environ 100 kilomètres d'un poste de répartition. Ils doivent de ce fait assurer l'alimentation du territoire qu'ils desservent qui sont en général des zones de consommation comme par exemple des grandes agglomérations ou des concentrations d'installations Industrielles qui du fait de leur importance économique doivent être alimentées en permanence. Généralement, le réseau de répartition est aérien Il existe aussi certaines installations de répartition souterraines.

I.5.2 Réseau de distribution

La distribution sert à alimenter les consommateurs en moyenne ou en basse tension (typiquement 400V), grâce à des postes de transformation MT/BT.

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. IL existe deux sous niveaux des tensions :

- Les réseaux à moyen tension (de 3 à 50 kV) ;
- Les réseaux à basse tension (de 110 à 600 V), sur les quels sont raccordés les utilisateurs domestiques. Contrairement aux réseaux de transport et de répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solution technique à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

I.6 Poste de transformation

Un poste de transformation est un élément du réseau électrique qui transmet et distribue l'électricité.

La plupart du temps, le poste de transformation est doté d'un équipement de protection comme le disjoncteur, avec lequel il est possible de couper le courant. Cette protection peut être un parafoudre qui protège le poste de transformation d'éventuelles surtensions produites par la foudre. Il existe plusieurs postes de transformation, selon le KVA (kilovoltampère). Les postes de transformation sont l'une des deux grandes catégories de postes haute tension.

Il élève la tension électrique en vue de la transmission de cette dernière, puis il la fait redescendre afin qu'elle puisse être consommée par les usagers. L'électricité qui arrive chez un particulier passe tout d'abord par un poste de transformation, autrement nommé poste source.

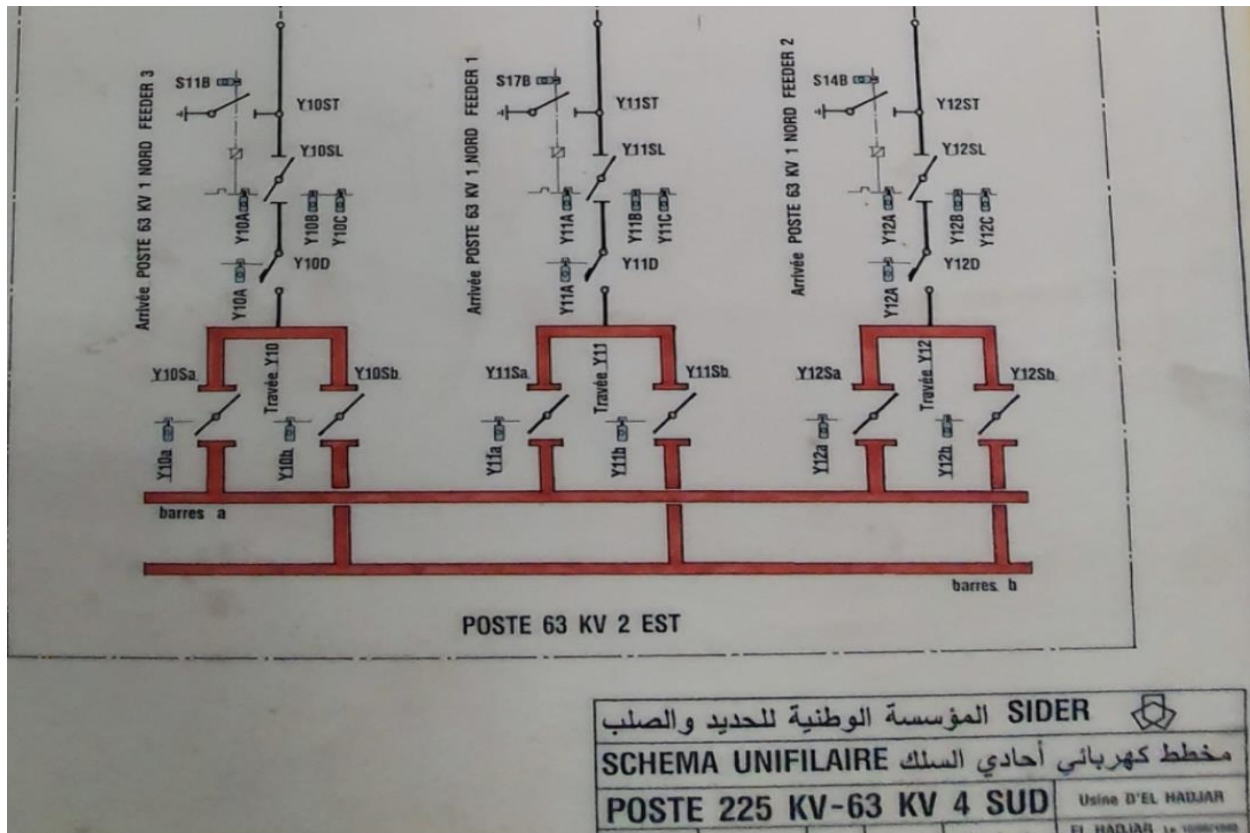


Figure I. 4: Schéma général d'un poste source.

I.7 Lignes aériennes et câbles souterrains

L'électricité est transportée et distribuée par des canalisations électriques aériennes ou souterraines, avec de la haute tension. Les lieux de production sont choisis en fonction du milieu naturel (cours d'eau pour le refroidissement d'une centrale ou la production hydraulique, minerais, gaz...). Il faut donc transporter l'électricité.

En électricité plus la valeur de la tension augmente, plus la valeur de l'intensité diminue. Donc moins on transporte d'intensité et moins on a de chance d'en perdre et plus petite sera la section des conducteurs électriques. La tension véhicule l'intensité et l'intensité est transformée en énergie thermique et mécanique. Le système pourrait paraître simple mais de nombreuses

contraintes sont présentes. La première : le risque d'amorçage (arc électrique dans l'air) à partir de 1000 Volts.

Alors que les conducteurs électriques sont « nus » en aérien, ils ont besoin d'un isolant spécifique en souterrain dont l'épaisseur augmente avec la tension.

I.7.1 Les réseaux HTA aériennes

Les lignes électriques aériennes sont des infrastructures pour la transmission et la distribution d'énergie à longue distance, et elles consistent d'un ou plusieurs conducteurs suspendus sur des tours ou des pylônes.

Elles sont constituées de conducteurs nus en alliage d'aluminium, qui est moins bon conducteur que le cuivre de l'électricité mais qui présente l'avantage d'avoir une masse bien plus faible (contraintes mécaniques).

Les câbles à isolants synthétiques constituent la technologie la plus couramment utilisée aujourd'hui. La variation de leur composition (plomb, aluminium, cuivre) conditionne leur poids et leur capacité à supporter des intensités plus ou moins élevées.



Figure I. 5: Réseau HTA aérienne.

I.7.2 Les réseaux HTA souterrains

Les réseaux souterrains sont limités à des tension au plus de 225 kV, car en 400 kV, la technique souterraine est difficile à mettre en œuvre (emprise au sol, refroidissement du câble), elle est mal adaptée aux contraintes d'exploitation du réseau interconnecté.

Le câble souterrain en lui-même est composé des éléments suivants :

- Une âme en cuivre ou aluminium.
- Une isolation de haute qualité en polyéthylène capable de résister aux contraintes électriques liées à la haute tension.
- Un écran servant à éliminer le champ électrique et les courants en cas de défaut.
- Une gaine extérieure de protection mécanique.



Figure I. 6: Câble HTA souterrain.

I.8 Conclusion

Le but de ce chapitre est de donner une vision globale des concepts classiques, des réseaux électriques, qui restent toujours d'actualité comme La production de L'énergie électrique , la classification des tensions selon les normes de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et Structure des réseaux électriques

Les lignes et les câbles constituent des circuits de transmissions de l'énergie électrique des centres de productions (centrale électrique) jusqu' aux consommateurs. On a mentionné leurs avantages et inconvénients sous forme de comparaison entre les deux moyennes de transport de l'énergie électrique.

II.1 Introduction

Une ligne de transmission électrique a quatre paramètres qui affectent sa capacité à remplir sa fonction dans le cadre d'un système d'alimentation: la résistance, l'inductance, la capacité et la conductance. Le quatrième paramètre, la conductance, existe entre les conducteurs ou entre les conducteurs et le sol.

La conductance tient compte du courant de fuite aux isolants de la ligne aérienne et de l'isolation des câbles.

Ces paramètres conjointement avec le courant de charge et le facteur de puissance déterminent les performances électriques de la ligne. La performance à long terme comprend le calcul de l'envoi de la tension de fin, l'envoi courant de la fin, l'envoi de facteur de puissance de la fin, la perte de puissance dans la ligne, l'efficacité de la transmission, la réglementation et les limites de débit de puissance pendant l'état d'équilibre et de l'état transitoire.

II.2 Les supports

Les lignes de transmission utilisent une variété de structures de support. La figure (II.1) montre une tour en treillis métallique autoportante généralement utilisée pour les lignes de 500 et 765 kV. Les lignes à 345 kV à double circuit ont généralement des tours en acier autoportantes dont les phases sont disposées soit dans une configuration triangulaire pour réduire la hauteur de la tour, soit dans une configuration verticale pour réduire la largeur de la tour (figure II.2). Les configurations du cadre en bois sont couramment utilisées pour des tensions de 345 kV et moins.



Figure II. 1: 745 KV ligne de transmission avec tours en treillis autoportantes.



Figure II. 2: 345 KV ligne de transmission à double circuit avec tours en treillis autoportantes.

II.3 Les conducteurs

L'aluminium a remplacé le cuivre comme métal conducteur le plus courant pour la transmission aérienne. Bien qu'une plus grande section transversale en aluminium soit nécessaire pour obtenir la même perte que dans un conducteur en cuivre, l'aluminium a un coût inférieur et un poids plus léger.

II.3.1 Types de conducteurs

Ils existent trois types de conducteurs : câblés (toronnée), massif et conducteurs creux. [4]

a- Conducteur câblés (toronnée) : Afin de donner aux conducteurs une souplesse suffisante, les câbles sont constitués habituellement de brins d'égales sections circulaires disposés en couches spirales dont le sens est alterné d'une couche à la suivante autour d'un brin central rectiligne

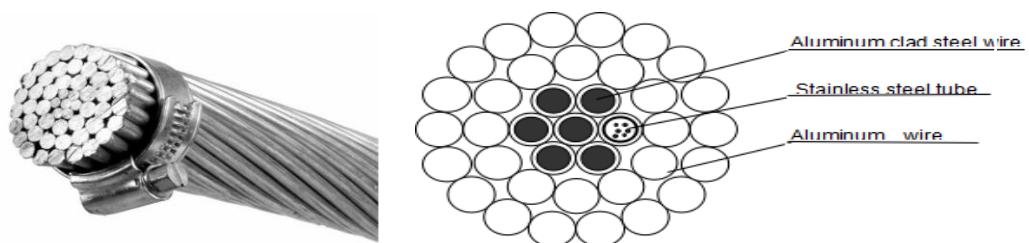


Figure II. 3: Conducteurs câblés en Al et Ac.

b. Conducteurs creux :

Avant 1940, des lignes à tensions égales à 220 kV en Europe et à 287 kV aux EtatsUnis d'Amérique ont été équipées de conducteurs creux. Cependant ces conducteurs creux sont très coûteux et ont été abandonnés dans la construction des lignes depuis 1950.

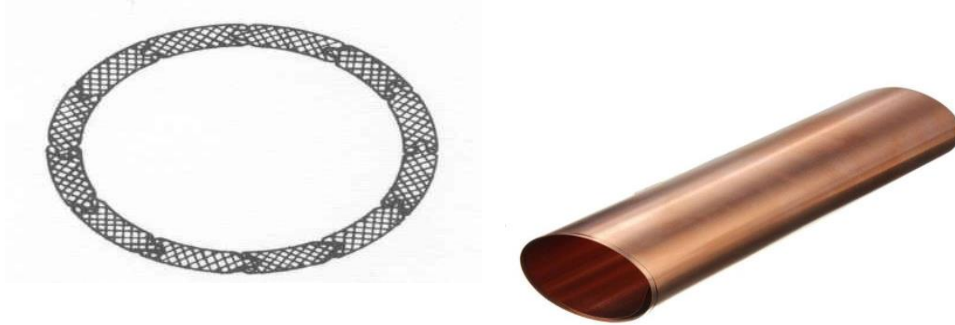


Figure II. 4: Conducteurs creux en Cu.

c. Conducteur massif :

Figure II. 5 : Les conducteurs aluminium massifs ronds ou sectoriels.

II.4 Les isolateurs

Les isolateurs pour lignes de transmission supérieures à 69 kV sont généralement des isolateurs de type suspension, qui sont constitués d'une chaîne de disques en porcelaine, en verre trempé ou en polymère. Le disque standard (figure II.6) a un 10 pouces. (0,254 m) de diamètre, 53 4 pouces (0,146 m) d'espacement entre les centres des disques adjacents et une résistance mécanique de 7500 kg. La ligne 765 kV de la figure II.1 a deux chaînes.



Figure II. 6: Vue en coupe d'un disque isolant en porcelaine standard pour les cordes d'isolateur de suspension.

II.5 Les Pylônes

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées aux voisinages des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs. [5]

II.5.1 Pylône nappe

C'est le pylône le plus utilisé pour les lignes de transport. Il sert aux paliers de tension allant de 110 à 735 kV. Ce pylône convient aux lignes qui traversent des terrains très accidentés, car il peut être assemblé facilement.



Figure II. 7: Pylône nappe .

II.5.2 Pylône classique

Occupant une place réduite au sol, ce pylône est utilisé pour des paliers de tension allant de 110 à 315 kV. Sa hauteur varie entre 25 et 60 mètres.



Figure II. 8: Pylône classique.

II.5.3 Pylône tubulaire

Ce support porte également le nom poétique de pylône « muguet ». Il est moins massif que les autres pylônes et s'intègre plus facilement au milieu. On l'utilise de plus en plus dans les centres urbains.



Figure II. 9 : Pylone tubulaire.

II.6 Câbles de garde

Les câbles de garde sont posés au sommet des pylônes en treillis. Ces câbles de gardes protègent les conducteurs d'électricité de la foudre. Ils relient en outre les pylônes isolés les uns avec les autres et améliorent ainsi la mise à la terre globale de l'ensemble des lignes aériennes.

II.7 Les paramètres de la ligne électrique

Une ligne de transmission électrique a quatre paramètres qui affectent sa capacité à remplir sa fonction dans le cadre d'un système d'alimentation : la résistance R, l'inductance L, la capacité C et la conductance G.

Les paramètres séries longitudinaux (R, L) et paramètres parallèles transversaux (C, G).

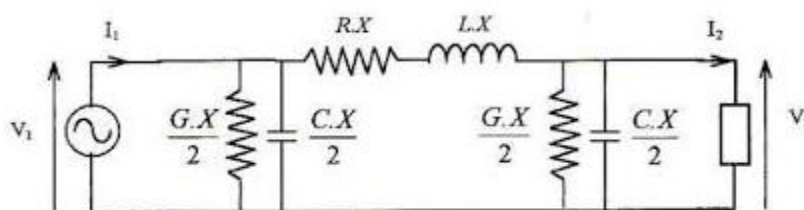


Figure II. 10: Schéma en π d'une ligne électrique.

II.7.1 Les paramètres longitudinaux

II.7.1.1 La résistance de la ligne

La résistance en courant continu d'un conducteur à une température spécifiée T 20°C ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$) est donnée par la formule :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\Omega / \text{km}) \quad (2.1)$$

La résistivité dépend du métal conducteur. Le cuivre recuit est la norme internationale pour mesurer la résistivité r (ou la conductivité s.). [6]

La résistance du conducteur dépend des facteurs suivants :

- a. Effet de spirale du conducteur :

L'effet de spirilage du conducteur fait augmenter la résistance de 1% environ pour les conducteurs à trois brins et de 2% environ pour les conducteurs à nombre de brins supérieur.

b. Effet de température :

La résistivité des métaux conducteurs varie linéairement sur les températures normales de fonctionnement selon :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \quad (2.2)$$

- t_1 et t_2 sont les températures en °C à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.
- R_1 et R_2 sont les résistances du conducteur respectivement aux températures t_1 et t_2 .
- T est une température paramétrique en °C liée à la nature du matériau du conducteur.

Matériau	Conductivité (%)	Température °C
Cuivre: recuit	100%	234.5
Cuivre étiré à chaud	97,3%	241.5
Aluminium étiré	61%	228.1

Tableau II. 1: Les températures de certain conducteur

c. Fréquence (effet de peau) :

Ce phénomène appelle effet pelliculaire ou « effet kelvin », Est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée. En courant alternatif, la densité de courant dans un conducteur n'est pas uniforme à travers la section du conducteur. Le facteur de Kelvin est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$q = \pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot 10^{-5}}{\rho}} \quad (2.3)$$

d : diamètre de conducteur en cm.

f : fréquence du réseau en Hz

ρ : résistivité du métal ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$) d : Amplitude du courant - conducteurs magnétiques

II.7.1.2 Inductance de la ligne

II.7.1.2.1 Définition

L'inductance d'un circuit magnétique à perméabilité constante μ peut être obtenue en déterminant :

- Intensité du champ magnétique H , d'après la loi d'Ampère
- Densité du flux magnétique B ($B = \mu H$)
- Liens de flux λ
- Inductance des liaisons de flux par ampère ($L = \lambda / I$)

$$\oint H_{tan} dl = I \quad (2.4)$$

II.7.1.2.2 Inductance d'un conducteur

a. Inductance d'un conducteur due au flux intérieur

Pour déterminer le champ magnétique à l'intérieur du conducteur, sélectionnez le cercle pointillés de rayon $x < r$ illustré à la figure II.11 comme contour fermé pour la loi d'Ampère. En raison de la symétrie, H_x est constant le long du contour. De plus, il n'y a pas de composante radiale de H_x , donc H_x est tangent au contour. C'est-à-dire que le conducteur a un champ magnétique concentrique. L'intégrale de H_x autour du contour sélectionné est :

$$H_x (2x\pi) = I_x \quad \text{Pour } x < r \quad (2.5)$$

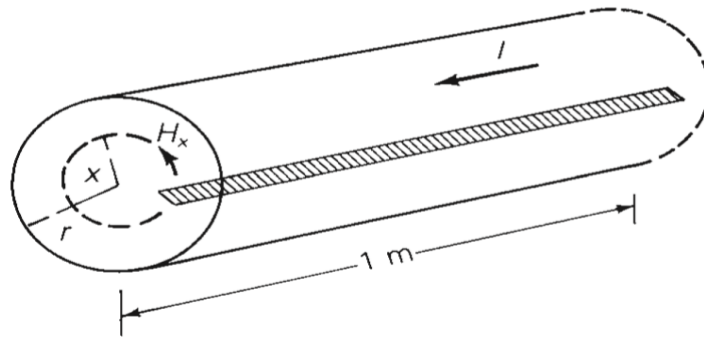


Figure II. 11: Champ magnétique interne d'un conducteur cylindrique solide.

Où I_x est la partie du courant total entourée par le contour :

$$H_x = \frac{I_x}{2x\pi} \quad (\text{A/m}) \quad (2.6)$$

Supposons maintenant une distribution uniforme du courant dans le conducteur, c'est-à-dire

$$I_x = \left(\frac{x}{r}\right)^2 I \quad \text{Pour } x < r \quad (2.7)$$

Utilisation de (2.7) dans (2.6)

$$H_x = \frac{xI}{2\pi r^2} \quad (\text{A/m}) \quad (2.8)$$

Pour un conducteur non magnétique, la densité de flux magnétique B_x est

$$B_x = \mu_0 H = \frac{\mu_0 x I}{2\pi r^2} \quad (\text{Wb/m}^2) \quad (2.9)$$

Le flux travers une section d'épaisseur dx et de longueur de 1 m est :

$$d\phi = B \cdot ds = B \cdot dx \cdot 1 \quad (\text{Wb/m}) \quad (2.10)$$

Le flux intérieur entoure seulement une partie du conducteur, donc comme le courant, il constitue une portion du flux total.

$$d\lambda = \left(\frac{x}{r}\right)^2 d\Phi = \frac{\mu_0 x I}{2\pi r^4} x^3 dx \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.11)$$

L'intégration (2.11) de $x = 0$ à $x = r$ détermine le flux λ à l'intérieur du conducteur

$$\lambda_{int} = \int_0^r d\lambda = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} I \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.12)$$

μ_0 : La permittivité du vide ou de l'air ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

$$L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \quad (\text{H/m}) \quad (2.13)$$

b- Inductance d'un conducteur due au flux extérieur

Pour déterminer le flux extérieur entre deux contours situés respectivement à la distance $D1$ et $D2$ du centre du conducteur, considérant un élément d'épaisseur dx entre $D1$ et $D2$.

$$H_x(2\pi x) = I \quad (2.14)$$

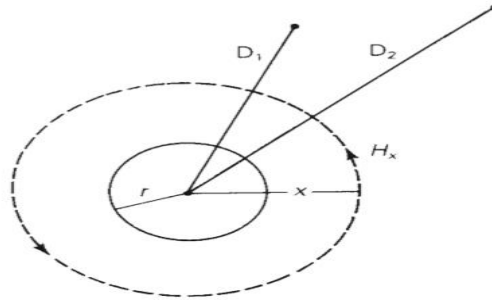


Figure II. 12: Champ magnétique externe d'un conducteur cylindrique solide.

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \quad (\text{A/m}) \quad \text{pour} \quad x > r \quad (2.15)$$

$$B_x = \mu_0 H_x = (4\pi \times 10^{-7}) \frac{I}{2\pi x} = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{x} \quad \text{Wb/m}^2 \quad (2.16)$$

Le flux à travers un cylindre d'épaisseur dx et de longueur de 1m est :

$$d\Phi = B_x dx = 2 \times 10^{-7} I \frac{dx}{x} \quad \text{Wb/m} \quad (2.17)$$

$$d\lambda = d\Phi = 2 \times 10^{-7} I \frac{dx}{x} \quad (2.18)$$

Le flux crée entre deux contours D1 et D2 :

$$\lambda_{12} = \int_{D1}^{D2} d\lambda = d\Phi = 2 \times 10^{-7} I \int_{D1}^{D2} \frac{dx}{x}$$

$$\lambda_{12} = 2 \times 10^{-7} I \ln \left(\frac{D2}{D1} \right) \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.19)$$

L'inductance externe L_{12} par unité de longueur due aux liaisons de flux entre D1 et D2 est alors

$$L_{12} = \frac{\lambda_{12}}{I} = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D2}{D1} \right) \quad (\text{H/m}) \quad (2.20)$$

Le flux total λ_p reliant le conducteur au point externe P à la distance D ($D1 = r$ à $D2 = D$. est :

$$\lambda_p = \lambda_{int} + \lambda_{ext}$$

$$\lambda_p = \frac{1}{2} \times 10^{-7} I + 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{r} \quad (2.21)$$

En Utilise $2 \ln e^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$ dans (2.21)

$$\lambda_p = 2 \times 10^{-7} I \left(\ln e^{\frac{1}{4}} + \ln \frac{D}{r} \right)$$

$$\lambda_p = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{e^{\frac{1}{4}} r}$$

$$\lambda_p = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.22)$$

En posant :

$$r' = e^{\frac{-1}{4}} r = 0.7788r \quad (2.23)$$

De plus, l'inductance totale L_P due aux liaisons de flux internes et externes jusqu'à la distance D est :

$$L_p = \frac{\lambda_p}{I} = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{r'} \right) \quad (\text{H/m}) \quad (2.24)$$

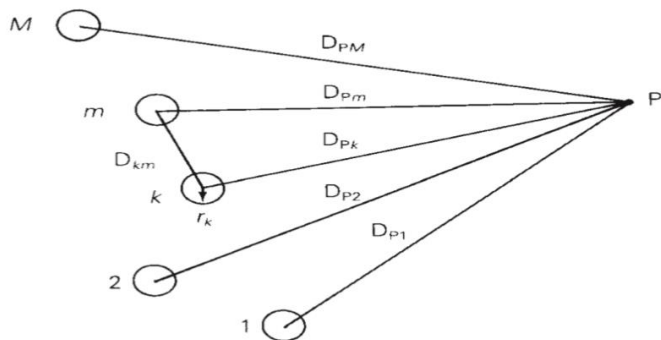


Figure II. 13: Conducteurs cylindriques pleins.

II.7.1.2.3 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant

En considérons le réseau de M conducteurs cylindriques solides illustré à la Figure II.13. Supposons que chaque conducteur m transporte un courant I_m . Supposons également que la somme des courants soit nulle, c'est-à-dire :

$$I_1 + I_2 + \dots + I_m = \sum_{m=1}^M I_m = 0 \quad (2.25)$$

Le flux λ_{kpk} , qui entoure le conducteur k au point P due au courant I_k , est, à partir (2.22)

$$\lambda_{kpk} = 2 \times 10^{-7} I_k \ln \frac{D_{pK}}{r'_k} \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.26)$$

Notez que λ_{kpm} inclut les flux internes et externes dues à I_k . Le flux λ_{kpm} , qui entoure le conducteur k à P en raison de I_m , est, à partir de (2.19),

$$\lambda_{kpm} = 2 \times 10^{-7} I_m \ln \frac{D_{pm}}{D_{km}} \quad (2.27)$$

D'une manière générale, le flux total crée autour d'un conducteur k a un point p disant de D_{pk} du centre du conducteur k est :

$$\begin{aligned} \lambda_{kp} &= \lambda_{kp1} + \lambda_{kp2} + \dots + \lambda_{kpm} \\ &= 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln \frac{D_{pm}}{D_{km}} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$D_{kk} = r'_k = e^{-\frac{1}{4}} r_k$ quand $m = k$ dans la sommation ci-dessus (2.28) est séparé en deux sommations :

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln \frac{1}{D_{km}} + 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln D_{pm} \quad (2.29)$$

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \left[\sum_{m=1}^M I_m \ln \frac{1}{D_{km}} + \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln D_{pm} + I_M \ln D_{PM} \right] \quad (2.30)$$

de (2.25)

$$I_M = - (I_1 + I_2 + \dots + I_{M-1}) = - \sum_{m=1}^{M-1} I_m \quad (2.31)$$

En utilise (2.31) a (2.30)

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \left[\sum_{m=1}^M I_m \ln \frac{1}{D_{km}} + \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln D_{pm} - \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln D_{pM} \right]$$

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \left[\sum_{m=1}^M I_m \ln \frac{1}{D_{km}} + \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln \frac{D_{pm}}{D_{pM}} \right] \quad (2.32)$$

Soit maintenant λ_k égal au flux total reliant le conducteur k à l'infini. Autrement dit,

$\lambda_k = \lim_{p \rightarrow \infty} \lambda_{kp}$. toutes les distances D_{pm} deviennent égales, les rapports $\frac{D_{pm}}{D_{pM}}$ deviennent

unitaires et $\left(\frac{D_{pm}}{D_{pM}} \right) \rightarrow 0$ Par conséquent, la deuxième somme de (2.32) devient nulle lorsque

$p \rightarrow 0$, est :

$$\lambda_k = 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln \frac{1}{D_{km}} \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.33)$$

II.7.1.2.4 Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés

Pour les conducteurs toronnés, les valeurs de RMG peuvent être calculées à partir de la section utile S du conducteur et du nombre de brins.

Type	g_{11} RMG
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 3brins sans âme centrale	$0.4750S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046S^{\frac{1}{2}}$

Tableau II. 2 : Valeurs du RMG selon le nombre de brins. [7]

II.7.1.2.5 Inductance : ligne monophasée à deux fils et ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal

a. ligne monophasée à deux fils

Les résultats de la section précédente sont utilisés ici pour déterminer les inductances de deux lignes de transmission relativement simples : une ligne monophasée à deux fils et une ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal. La figure II.14 (a) montre une ligne monophasée à deux fils composée de deux conducteurs cylindriques solides x et y. Le conducteur x de rayon r_x transporte le courant de phaseur $I_x = I$. Le conducteur y de rayon r_y transporte le courant de retour $I_y = -I$. Puisque la somme des deux courants est nulle, (2.33) est valide, à partir de laquelle le flux total reliant le conducteur x est :

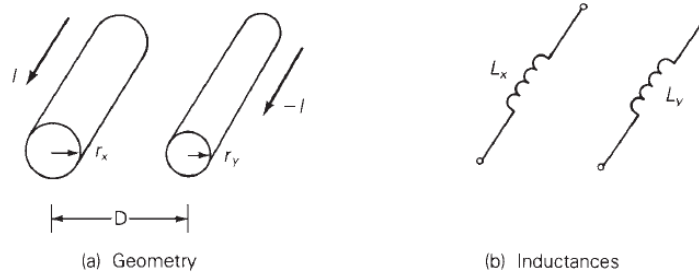


Figure II. 14: Ligne monophasée à deux fils.

$$\begin{aligned}\lambda_x &= 2 \times 10^{-7} \left(I_x \ln \frac{1}{D_{xx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{xy}} \right) \\ &= 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{r'_x} \quad (\text{Wb-t/m})\end{aligned}\quad (2.34)$$

$$\text{Où : } r'_x = e^{-1/4} r = 0.7788 r_x$$

$$L_x = \frac{\lambda_x}{I_x} = \frac{\lambda_x}{I} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{r'_x} \quad (\text{H/m})\quad (2.35)$$

De même, le flux total du conducteur y est :

$$\begin{aligned}\lambda_y &= 2 \times 10^{-7} \left(I_x \ln \frac{1}{D_{yx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{yy}} \right) \\ &= 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{r'_y} \quad (\text{Wb-t/m})\end{aligned}\quad (2.36)$$

$$\text{Et : } L_y = \frac{\lambda_y}{I_y} = \frac{\lambda_y}{-I} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{r'_y} \quad (\text{H/m}) \quad (2.37)$$

L'inductance totale du circuit monophasé, également appelée inductance de boucle, est

$$\begin{aligned} L &= L_x + L_y = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{D}{r'_x} + \ln \frac{D}{r'_y} \right) \\ &= 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r'_y r'_x}} \quad (\text{H/m}) \end{aligned} \quad (2.39)$$

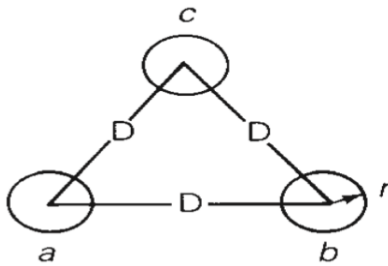
Egalement si $r'_x = r'_y = r'$ l'inductance totale est :

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{H/m}) \quad (2.40)$$

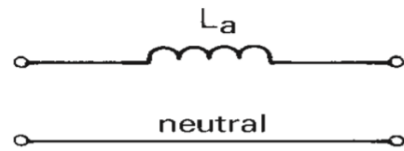
b. Inductance des lignes triphasées :

b.1. Disposition triangle équilatéral (espacements égaux)

Les inductances de la ligne monophasée à deux fils sont illustrées à la figure II.14 (b). La figure II.15 (a) montre une ligne triphasée à trois fils composée de trois conducteurs cylindriques pleins a, b, c, chacun avec un rayon r, et avec un espacement de phase D égal entre deux conducteurs quelconques. Pour déterminer l'inductance, supposons des courants de séquence positive équilibrés I_a, I_b, I_c qui satisfont $I_a + I_b + I_c = 0$. Alors (2.33) est valide et le flux total reliant la phase d'un conducteur est :



(a) géométrie



(b) inductance de phase

Figure II. 15: Ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right) \\ &= 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{r} + (I_b + I_c) \ln \frac{1}{D} \right] \end{aligned} \quad (2.40)$$

Utilise $(I_b + I_c) = -I_a$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r} - I_a \ln \frac{1}{D} \right)$$

$$= 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.41)$$

L'inductance de phase a donc et :

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{H/m}) \quad (2.42)$$

En raison de la symétrie, le même résultat est obtenu pour $L_b = \lambda_b / I_b$ et pour $L_c = \lambda_c / I_c$. Cependant, une seule phase doit être considérée pour un fonctionnement triphasé équilibré de cette ligne, car les liaisons de flux de chaque phase ont des amplitudes égales et un déplacement de 120° . Inductance de phase est illustrée à la figure II.15

b.2. Disposition quelconque :

Si les conducteurs des phases de la ligne ne sont pas régulièrement espacés, les capacités et les inductances des phases sont différentes. Ce problème peut être résolu par la transposition de la ligne.

La transposition de la ligne est la permutation des conducteurs de phase à des intervalles réguliers le long de la ligne telle que chaque conducteur occupera sa position originale.

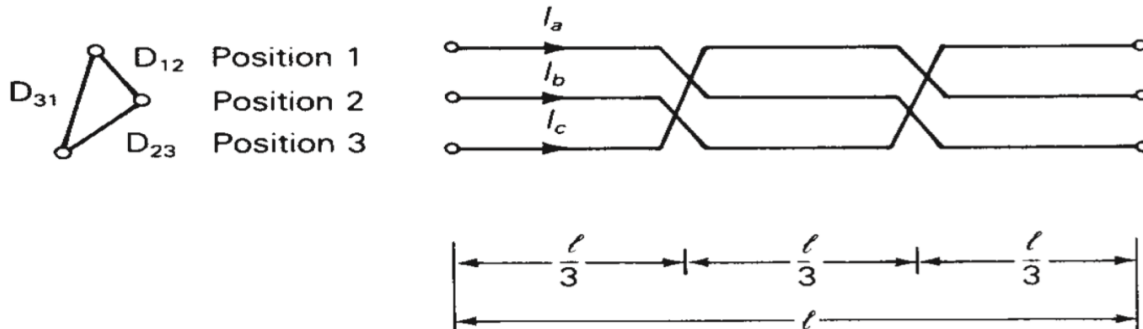


Figure II. 16: Ligne triphasée complètement transposée.

La figure II.16 montre une ligne triphasée complètement transposée. La ligne est transposée à deux endroits de sorte que chaque phase occupe chaque position pour un tiers de la longueur de ligne. Les positions des conducteurs sont notées 1, 2, 3 avec les distances D_{12} , D_{23} , D_{31} entre les positions. Les conducteurs sont identiques, chacun avec RMG noté DS. Pour calculer l'inductance de cette ligne, supposons des courants de séquence positive équilibrés I_a , I_b , I_c

pour lesquels $I_a + I_b + I_c = 0$. Encore une fois, (2.33) est valide, et le flux total reliant la phase d'un conducteur pendant qu'elle est dans la position 1 est :

$$\lambda_{a1} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{31}} \right] \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.43)$$

$$\lambda_{a2} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right] \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.44)$$

$$\lambda_{a3} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{31}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right] \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.45)$$

La moyenne des liaisons de flux ci-dessus est :

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \frac{\lambda_{a1} + \lambda_{a2} + \lambda_{a3}}{3} \\ &= \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left[3I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{12} + D_{23} + D_{31}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12} + D_{23} + D_{31}} \right] \end{aligned} \quad (2.46)$$

Comme : $I_b + I_c = -I_a$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}}{D_S} \quad (\text{Wb-t/m}) \quad (2.47)$$

Et l'inductance moyenne de la phase a est :

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}}{D_S} \quad (\text{H/m}) \quad (2.48)$$

L'inductance linéique d'une phase de la ligne est :

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \quad (2.49)$$

On a donc

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_S} \quad (\text{H/m}) \quad (2.50)$$

II.7.1.2.6. Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux :

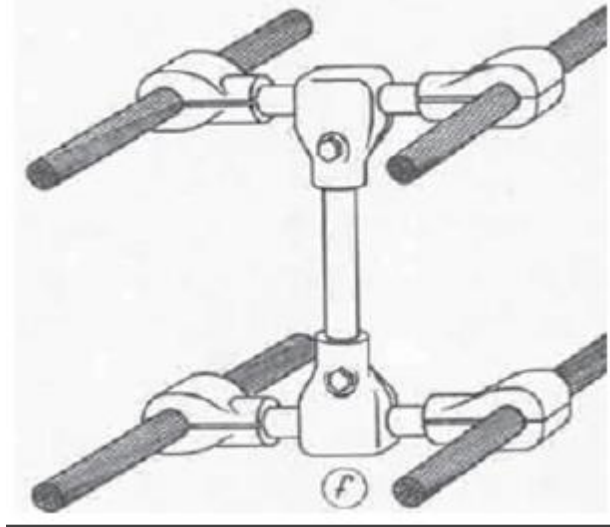


Figure II. 17: Ligne en faisceaux

Si la ligne est formée par des conducteurs de phase en faisceaux, l'inductance linéique est

$$L' = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{ed}}{G_{11}} \quad (2.51)$$

$$G_{11} = \sqrt[n]{n g_{11} r_T^{n-1}} \quad (2.52)$$

G_{11} : Rayon moyen géométrique du faisceau.

g_{11} : Rayon moyen géométrique d'une corde.

n : Nombre de corde dans un faisceau.

r_T : Rayon du cercle passant par les centres des cordes.

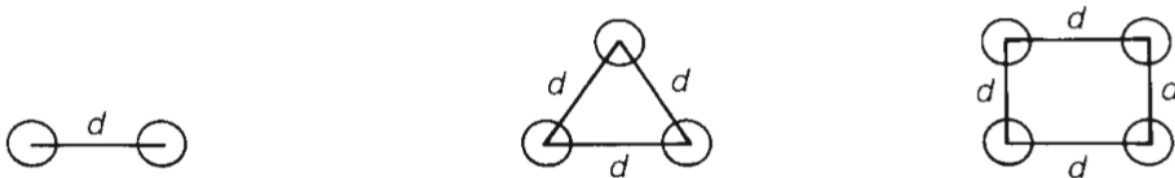


Figure II. 18: Configurations des conducteurs de faisceau.

Deux conducteurs :

$$D_{SL} = \sqrt[4]{(D_S * d)^2} = \sqrt{D_S d} \quad (2.53)$$

Trois conducteurs :

$$D_{SL} = \sqrt[9]{(D_S * d * d)^3} = \sqrt[3]{D_S d^2} \quad (2.53)$$

Quatre conducteurs :

$$D_{SL} = \sqrt[16]{(D_S * d * d * d \sqrt{2})^4} = 1.091 \sqrt[4]{D_S d^3} \quad (2.54)$$

L'inductance est alors :

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_{SL}} \quad (\text{H/m}) \quad (2.55)$$

II.7.2 Les paramètres transversaux

II.7.2.1 Conductance

Le terme G, en effet, dû aux courants superficiels au long des chaînes d'isolateurs et à l'effet couronne des conducteurs est, par temps sec, G est inférieur à 0.005 Cω ; ce n'est que sous très forte pluie, lorsque les courants superficiels et les pertes par effet couronne sont les plus élevés, que G peut atteindre 0.1 Cω. Ces conditions étant particulièrement rares, il est donc généralement admis de négliger la conductance transversale G des lignes.

II.7.2.2 La capacité de la ligne

Les charges superficielles sur le conducteur de la ligne créent un champ électrique perpendiculaire à la surface du conducteur et un courant capacitif. Ce phénomène est représenté par la capacité linéique C' de la ligne .pour son calcul, le fait qu' ; un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre à la périphérie (loi de faraday).

II.7.2.2.1 Capacité d'une ligne monophasée

Nous considérons d'abord la ligne monophasée à deux fils illustrée à Figure II.14. (a)

En utilisant $D_{xy} = D_{yx} = D$, $D_{xx} = r_x$ et $D_{yy} = r_y$

$$V_{xy} = \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}} \quad (\text{V}) \quad (2.56)$$

Pour une longueur de ligne de 1 mètre, la capacité entre les conducteurs est :

$$C_{xy} = \frac{q}{V_{xy}} = \frac{\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}\right)} \quad (\text{F/m}) \quad (2.57)$$

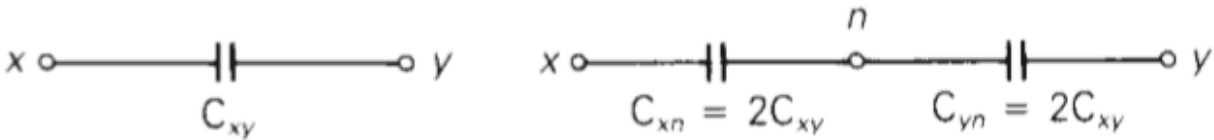
et si $r_x = r_y = r$

$$C_{xy} = \frac{\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (\text{F/m}) \quad (2.58)$$

Si la ligne a deux fils est alimentée par un transformateur avec une prise centrale mise à la terre alors la tension entre chaque conducteur et la terre est :

$$V_{xn} = V_{yn} = \frac{V_{xy}}{2} \quad (2.59)$$

$$C_n = C_{xn} = C_{yn} = \frac{q}{V_{xn}} = 2C_{xy} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (2.60)$$



(a) capacités ligne à ligne

(b) capacités ligne à neutre

Figure II. 19: Circuit des capacités d'une ligne monophasée à deux fils.

▪ Capacité d'une ligne triphasée :

La ligne triphasée avec un espacement de phase égale illustré a Figure (II. 20) nous négligerons ici l'effet de la terre et des conducteurs neutres. Pour déterminer la capacité de séquence positive, supposons des charges des séquence positive q_a, q_b, q_c tel que $q_a + q_b + q_c = 0$:

On a : $D_{aa} = D_{bb} = r$, et $D_{ab} = D_{ba} = D_{ca} = D_{cb} = D$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} \right] \quad (\text{V}) \quad (2.61)$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \quad (\text{V}) \quad (2.62)$$

$$V_{an} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2\pi\epsilon} \right) \left[2q_a \ln \frac{D}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{r}{D} \right] \quad (2.63)$$

$$C_{an} = \frac{q_a}{v_{an}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (\text{F/m}) \quad (2.64)$$

En raison de la symétrie, le même résultat est obtenu pour $C_{bn} = q_b / v_{bn}$ et $C_{cn} = q_c / v_{cn}$. Pour un fonctionnement triphasé équilibré, cependant, une seule phase doit être prise en compte. Une représentation du circuit de la capacité au neutre est illustrée à la Figure II.19.

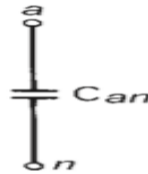


Figure II. 21: Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase égal

II.7.2.2 Capacité des conducteurs en faisceaux

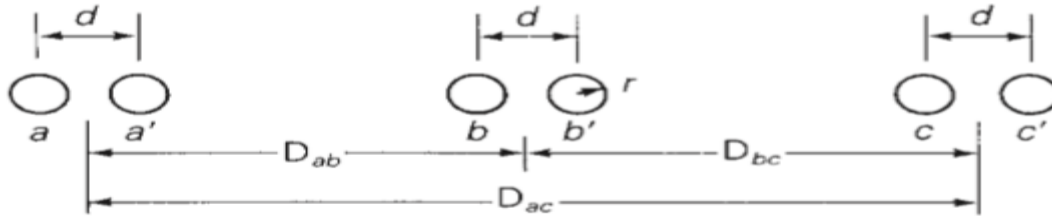


Figure II. 22: Ligne triphasée avec deux conducteurs par faisceau.

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{ab}}{\sqrt{rd}} + q_b \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{ab}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right] \quad (2.65)$$

$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{D_{sc}}\right)} \quad (\text{F/m}) \quad (2.66)$$

Où :

$D_{sc} = \sqrt{rd}$ Pour deux conducteurs en faisceaux.

$D_{sc} = \sqrt[3]{rd^2}$ Pour trois conducteurs en faisceaux.

$D_{sc} = 1,091 * \sqrt[4]{rd^3}$ Pour quatre conducteurs en faisceaux

II.8 Conclusion

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Chacune possède ses propres caractéristiques résistive, inductive et capacitive. Ce chapitre est donné une description de la ligne de transmission. Il fait la distinction entre les caractéristiques longitudinale (résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs).

III.1 Introduction

Cette partie décrit les modèles utiles pour mener à bien les calculs dans un réseau d'énergie.

Il rappelle quelques résultats fondamentaux du cours de modélisation. Les calculs que nous allons faire n'ont d'intérêt que si le réseau est maillé.

On distingue trois types de lignes. Suivant la longueur, les lignes courtes, moyennes et longues ; la modélisation de toutes ces lignes exige une précision dans les calculs, doit tenir compte du fait que leurs paramètres ne sont pas regroupés, mais plutôt repartis uniformément le long de chaque ligne.

Ainsi que les lignes de longueurs courtes et moyennes peuvent être représentées par des paramètres concentrés et celles dites longues sont nécessairement représentées par des paramètres repartis. Leurs limites de longueur qui seront données dans la suite concernent les réseaux dont la fréquence est de 50 Hz.

III.2 Modélisation des lignes aériennes

Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que, résistances et inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal.

Une ligne de transmission par phase peut être considérée comme un réseau à deux ports, dans lequel la tension d'émission V_S et le courant I_S (source) sont liés à la tension de réception V_R et le courant I_R par le biais des constantes A, B, C, D tel que :

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (\text{V}) \quad (3.1)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (\text{A}) \quad (3.2)$$

Ou bien, sous la forme matricielle,

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A, B, C et D sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission R, L, C et G. Les paramètres ABCD sont, en général, des nombres complexes. A et D sont sans

dimensions. B a l'unité en Ohm et C a l'unité en Siemens. Dans ce qui suit, nous allons identifier les paramètres A, B, C et D. Pour éviter la confusion entre l'impédance série totale et l'impédance série par unité de longueur, la notation suivante est employée :

$$z = \gamma + j \omega \cdot L \quad \left(\frac{\Omega}{m} \right), \text{ Impédance série par unité de longueur ;}$$

$$y = G + j \omega \cdot C \quad \left(\frac{S}{m} \right), \text{ admittance shunt par unité de longueur ;}$$

$$Z = z l \quad (\Omega) \quad \text{impédance série totale ;}$$

$$Y = y l \quad (S) \quad \text{admittance shunt totale;}$$

$$l \quad (m) \quad \text{longueur de la ligne.}$$

III.2.1 Ligne de transmission courte

La capacité peut être ignorée sans beaucoup d'erreur si les lignes sont de moins de 80 kilomètres de long ou si le niveau de tension ne dépasse pas 66 kV. Le modèle de ligne courte par phase est illustré par la (figure III.1).

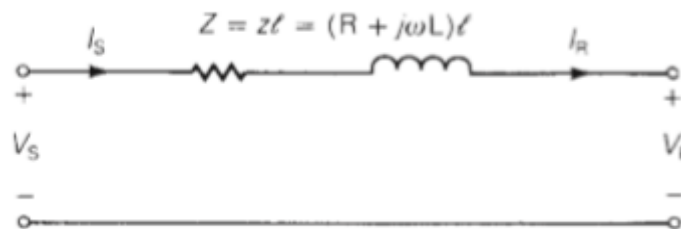


Figure III. 1 : Modèle d'une ligne courte.

C'est un circuit série simple. Le rapport entre les courants et les tensions de chaque extrémité de la ligne (entre la source et la charge) peut être écrit comme :

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

En comparant (3.4) et (3.3), les paramètres ABCD pour une ligne courte sont :

$A = D = 1$ sans unité

$B = Z$ (Ω)

$C = 0$ (S)

III.2.2 Ligne de transmission moyenne

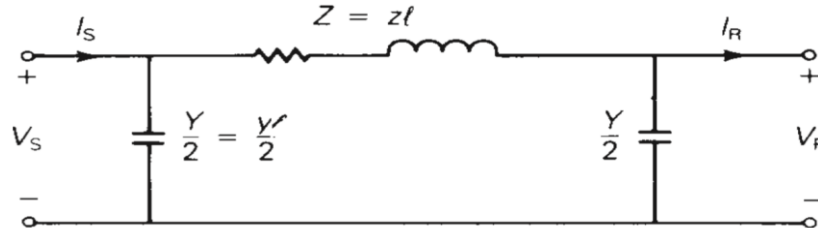


Figure III. 2: Ligne de longueur moyenne, représentation en Π .

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit :

A partir de la (Figure III.2), le courant dans l'impédance série désigné par I_L , est

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (3.5)$$

La tension à la source est exprimée comme :

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (3.6)$$

Des équations (3.5) et (3.6), on trouve,

$$V_S = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) v_R + Z I_R \quad (3.7)$$

Le courant à la source est,

$$I_S = I_R + V_R \frac{Y}{2} + V_S \frac{Y}{2} \quad (3.8)$$

Des équations (III.5), (III.7) et (III.8), on trouve,

$$\begin{aligned} I_S &= I_R + \frac{V_R Y}{2} + \left[\left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_R + Z I_R \right] \frac{Y}{2} \\ &= Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) I_R \end{aligned} \quad (3.9)$$

Les équations (3.7) et (3.8) peuvent être écrites sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{YZ}{2}) & Z \\ Y(1 + \frac{YZ}{4}) & (1 + \frac{YZ}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$A = D = 1 + \frac{YZ}{2} \quad \text{sans unité}$$

$$B = Z \quad (\Omega)$$

$$C = Y(1 + \frac{YZ}{4}) \quad (S)$$

III.2.3 Ligne de transmission longue

Pour les longueurs de lignes courtes et moyennes, les modèles ont été obtenus en supposant que les paramètres de la ligne sont des valeurs exactes. Dans le cas où la longueur de la ligne est supérieure à 250km, pour des solutions plus précises, les paramètres doivent être donnés comme une distribution uniformément répartie le long de la longueur. Dans ce cas, les tensions et les courants varient d'un point à l'autre sur la ligne. La (figure III.3) illustre un schéma unifilaire en π d'une ligne par unité de longueur. [8]

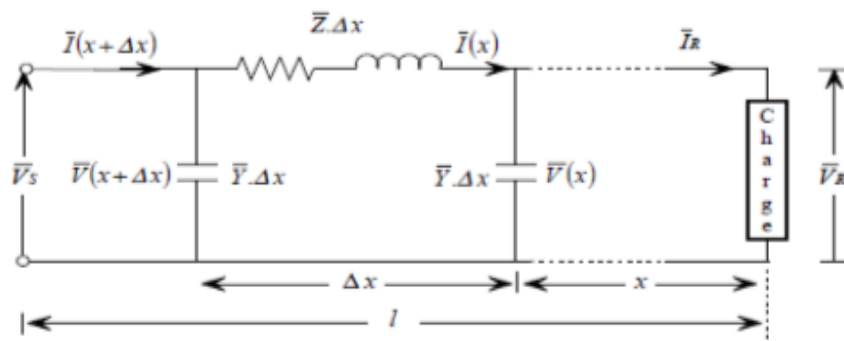


Figure III. 3: Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur.

Les expressions de la tension et le courant en un point x de la ligne sont :

$$\begin{cases} V(x) = \cosh(\gamma x)V_R + Z_c \sinh(\gamma x)I_R \\ I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x)V_R + \cosh(\gamma x)I_R \end{cases} \quad (3.11)$$

Cependant, quand $x = l$, l'expression (3.10) permet de trouver les grandeurs courant et tension à la source, avec $v_s = v(l)$ et $I_s = I(l)$;le résultat est:

$$\begin{cases} V(l) = \cosh(\gamma l)V_R + Z_c \sinh(\gamma l)I_R \\ I(l) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l)V_R + \cosh(\gamma l) I_R \end{cases} \quad (3.12)$$

Cependant, les constantes ABCD sont :

$$A = D = \cosh(\gamma l), B = Z_c \sinh(\gamma l), C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l),$$

C'est possible maintenant de trouver le modèle équivalent en π très précis pour une ligne de transmission longue. D'une manière similaire aux expressions (3.6) et (3.8) obtenues pour modèle équivalent en π , nous avons,

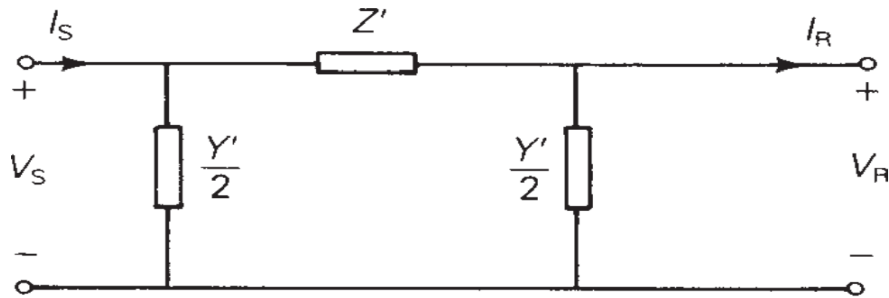


Figure III. 4 : Schéma en π d'une ligne longue

$$A = D = 1 + \frac{Y'Z'}{2} \quad \text{Sans unité}$$

$$B = Z' \quad (\Omega)$$

$$C = Y' \left(1 + \frac{Y'Z'}{4} \right) \quad (S)$$

$$\begin{cases} V_S = \left(1 + \frac{Y'Z'}{2} \right) V_R + Z' I_R \\ I_S = Y' \left(1 + \frac{Y'Z'}{4} \right) V_R + \left(1 + \frac{Y'Z'}{2} \right) I_R \end{cases} \quad (3.13)$$

Maintenant, en comparant (3.15) avec (3.14) et utilisant l'expression :

$$\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{\gamma l}$$

Les paramètres du modèle équivalent en π sont obtenus comme :

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) = ZF_1 = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (3.14)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{Y}{2} F_2 = \frac{Y}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\gamma l}{2}} \quad (3.15)$$

III.3 Conclusion

Le but de ce chapitre est de modéliser les différents types de lignes de transmissions (les lignes courtes, moyennes et longues).

La transmission de la puissance de la ligne dépend de la tension, le courant et le facteur de puissance à la source et à la charge.

IV.1 Introduction

Le but de ce chapitre est la réalisation d'un ensemble de programmes sous MATLAB pour le calcul des paramètres des lignes électriques triphasées et de leurs caractéristiques pour les différents types de lignes (moyenne et courte). L'intérêt de notre travail est de faciliter et réduire le temps de calcul ainsi que la précision.

Notre travail est fait en deux étapes. Dans la première étape on expliquera les algorithmes des programmes et la deuxième étape on fera des exemples d'application en utilisant ces programmes.

IV.2 Calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée

IV.2.1 Les équations de calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée

Dans le but de calculer des paramètres linéiques d'une ligne électrique triphasée par ordinateur sous Matlab ; on a abordé l'algorithme du déroulement du programme suivant :

Le calcul de la résistance de la ligne à courant continu à une température de 20°C

$$r = \rho \frac{l}{s} \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

Calcul de l'effet de spirilage sur les conducteurs

$$R = k * r ;$$

Calcul du coefficient de kelvin :

$$q = \pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot 10^{-5}}{\rho}}$$

$$q < 1 \Rightarrow Ra = R ;$$

Calcul de l'effet de température :

$$R_T = R \frac{T+t_2}{T+t_1}$$

Calcul de l'inductance de la ligne (basé sur le RMG tirés des tableaux donnés par les fabricants).

Calcul de la distance moyen géométrique :

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

Calcul du rayon moyen géométrique :

$$g_{11} = u\sqrt{s}$$

Calcul du Rayon moyen géométrique du faisceau :

$$G_{11} = \sqrt[n]{ng_{11}r_T^{n-1}}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{G_{11}}$$

Calcul de la capacité de la ligne :

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\log \frac{D_{eq}}{G_{11}}}$$

IV.2.2 Application a une ligne contenant un conducteur par phase (n=1)

On va déterminer les résistances linéiques, en courant continue et en courant alternatif en Ω/km des conducteurs de phase respectivement à 20°C et à 50°C. Ensuite les autres paramètres linéiques ; inductance et capacité respectivement en H/km et F/km. Soit une ligne de transport d'énergie électrique, triphasée et symétrique. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées dans tableau (IV.1) ci-dessous :

symbole	Paramètre	valeur
S	section au câble en mm ²	210
L	la longueur du câble en km	1
ρ	La résistivité du matériau en mm ² /m à 20°C	35.9
K	La coefficient du spiralage du conducteur	1.02
f	La fréquence de la ligne en Hz	50
T	coefficient de la température du conducteur de la ligne en °C	241.5
t ₂	La température en °C	50
D ₁₂	La distance entre conducteur 1 et 2 en m	2.75
D ₂₃	La distance entre conducteur 2 et 3 en m	2.75
D ₁₃	La distance entre conducteur 1 et 3 en m	7.75
u	coefficient dépend du nombre de brin du conducteur	0.4982
n	Nombres du conducteur en faisceaux	1

Tableau IV. 1: Les données de la ligne contenant un conducteur par phase.

Les résultats :

Résistance : $R = 0,1744$ (Ω/km)

L'inductance : $L = 1,0282 \cdot 10^{-6}$ (H/m)

La capacité : $C = 8,6742 \cdot 10^{-12}$ (F/m)

IV.2.3 Application a une ligne a conducteur de phase en faisceaux de 3 cordes :

On va déterminer les mêmes paramètres que l'exemple précédent, mais avec une ligne triphasée symétrique disposition nappe horizontale, à conducteurs de phases en faisceaux de 3 cordes placées sur un triangle équilatéral de 40 cm de côté. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées dans tableau (IV.2) ci-dessous.

symbole	Paramètre	valeur
S	section au câble en(mm ²)	366
<i>l</i>	la longueur du câble en (km)	1
ρ	La résistivité du matériau en mm ² /m à 20°C	35.9
K	La coefficient du spiralage du conducteur	1.02
f	La fréquence de la ligne en (Hz)	50
T	Coefficient de la température du conducteur de la ligne en °C	241.5
t_2	La température en °C	50
D12	La distance entre conducteur 1 et 2 (m)	12
D23	La distance entre conducteur 2 et 3 (m)	12
D13	La distance entre conducteur 1 et 3 (m)	24
u	coefficient dépend du nombre de brin du conducteur	0.4982
n	Nombres du conducteur en faisceaux	3
rt	Rayon de centre du conducteur (m)	0,303

Tableau IV. 2: Les données de la ligne en faisceau.

Les résultats :

Résistance alternatif : $R = 0,1 \text{ } (\Omega/\text{km})$

L'inductance : $L = 9.3937 \cdot 10^{-7} \text{ } (\text{H}/\text{m})$

La capacité : $C = 1.1845 \cdot 10^{-11} \text{ } (\text{F}/\text{m})$

IV.3 Calcul des caractéristiques de la ligne électrique triphasée**IV.3.1 Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne**

On va déterminer les caractéristiques à la source d'une ligne moyenne de transport d'énergie électrique, triphasée et symétrique. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées ci-dessous :

$r_0=0.032 \text{ } (\Omega/\text{km})$

$x_0=0.35 \text{ } (\Omega/\text{km})$

$y_0=j4.6 \cdot 10^{-6} \text{ } (\text{S}/\text{km})$

La longueur de la ligne $l = 200 \text{ } (\text{km})$

Tension de la réception $U_R = 189.2 \text{ } (\text{kV})$

Courant de la charge $I = 1.246 \text{ } (\text{kA})$

$\cos\phi = 0.99$ en avance

IV.3.2 Les équations de Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne :

Dans le but de modéliser la ligne électrique de longueur moyenne on a fait l'algorithme du déroulement du programme, est le suivant :

Calcul de l'impédance de la ligne :

$$Z = (r_0 + jx_0)l$$

Et l'admittance de la ligne :

$$\frac{Y}{2} = j \frac{cw}{2}$$

Le courant passant la branche transversale :

$$I_L = I_R \frac{Y}{2} V_R$$

Calcul de la chute de tension dans la ligne :

$$\Delta V = Z I_L$$

Calcul des caractéristiques à la source :

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{YZ}{2}) & Z \\ Y(1 + \frac{YZ}{4}) & (1 + \frac{YZ}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

La puissance apparente :

$$s_1 = \sqrt{3} U_S I_S^*$$

$$U_S = \sqrt{3} V_S$$

La puissance maximale transmise dans la ligne :

$$P_{MAX} = \frac{|V_S||V_R|}{|B|} - \frac{|A||V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha)$$

$$A = |A| \angle \alpha$$

$$B = |B| \angle \beta$$

$$D = |D| \angle \delta$$

Calcul du rendement avec la formule suivant :

$$\eta\% = \frac{P_R}{P_S} \%$$

La régulation de la tension :

$$R\% = \frac{V_S - V_R}{V_R} \cdot 100\% = \frac{U_S - U_R}{U_R} \cdot 100\%$$

Les résultats de calcul sur la ligne moyenne sont présentés sur les tableaux suivants :

Symbole	Unité	Résultat
x_0	(Ω^{-1})	$3,5000e^{-001}$
y_0	(Ω)	$0+1,2000e^{-006i}$
z_0	(Ω)	$3,2000e^{-002} + 3,5000e^{-001i}$
Z	(Ω)	$6.4000e^{+000} + 7.0000e^{+001i}$
Y	(S)	$0+8.4000e^{-004i}$
A	-	$9.7060e^{-001} + 2.6880e^{-003i}$
D	-	$9.7060e^{-001} + 2.6880e^{-003i}$
B	(Ω)	$6.4000e^{000} + 7.0000e^{001i}$
C	(S)	$-1.1290e^{-006} + 8.2765e^{-004i}$
V_s	(kv)	$1.7923e^{+002} + 8.7981e^{+001i}$
I_s	(A)	$1.1966e^{+000} + 3.3052e^{-001i}$
I_{C2}	(A)	$0+7.9464e^{002i}$
I_L	(A)	$1.2335e^{+000} + 2.5524e^{001i}$
ΔU	(kV)	$-9.9723e^{+000} + 8.7981e^{+001i}$
S_1	(MVA)	$7.3062e^{+002} + 1.3812e^{+002i}$
P_S	(MW)	$7.3062e^{+002}$
Q_S	(MVAR)	$1.3812e^{+002i}$
S_2	(MVA)	$7.0016e^{002} - 9.9772e^{+001i}$
P_R	(MW)	$7.0016e^{002}$
Q_R	(MVAR)	$-9.9772e^{+001i}$
$R\%$	-	8.7235
$\eta\%$	-	95.83

Tableau IV. 3: Caractéristiques de la ligne moyenne.

IV.3.3 Calcul des caractéristiques de la ligne courte :

On va déterminer les caractéristiques à la source d'une ligne courte de transport d'énergie électrique, triphasée et symétrique. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées ci-dessous :

$$r_0=0.017 \quad (\Omega/\text{km})$$

$$x_0=0.0984 \quad (\Omega/\text{km})$$

$$\text{La longueur de la ligne } l=80 \quad (\text{km})$$

$$\text{Tension de la réception } U_R =35 \quad (\text{kV})$$

$$\text{Courant de la charge } I = 0,3 \quad (\text{kA})$$

$$\cos\varphi = 0.8 \text{ en retard.}$$

IV.3.3.1 Les équations de Calculs des caractéristiques de la ligne courte :

Dans le but de modéliser la ligne électrique de longueur moyenne on a fait l'algorithme du déroulement du programme, est le suivant :

Calcul de l'impédance de la ligne :

$$Z = (r_0 + jx_0)l$$

Calcul de la chute de tension avec la formule suivant :

$$\Delta V = ZI_L ; I_L = I_R$$

Calcul de la tension et courant à la source :

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

La puissance maximale transmise dans la ligne :

$$P_{MAX} = \frac{|V_S||V_R|}{|Z|} - \frac{|V_R|^2}{|Z|} \cos(\alpha - \beta)$$

Calcul du rendement avec la formule suivant :

$$\eta \% = \frac{P_2}{P_1} \%$$

La régulation de la tension :

$$R\% = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \cdot 100\% = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot 100\%$$

Calcul des pertes de puissance active et réactive :

$$\Delta P = 3 \cdot R I^2$$

$$\Delta Q = 3 \cdot X_l I^2 - Q_c$$

Les résultats de calcul sur la ligne court sont présentés sur le tableau suivant :

Symbole	Unité	Résultat
x_0	(Ω^{-1})	$3,5000e^{-001}$
I_R	(A)	$2.40000e^{-001} - 1.8000e^{001i}$
z_0	(Ω)	$1.7000e^{-002} + 9.4248e^{-002i}$
Z	(Ω)	$1.3600e^{+000} + 7.5398e^{+000i}$
A	-	1
D	-	1
B	(Ω)	$1.3600e^{+000} + 7.5398e^{000i}$
C	(S)	0
V_s	(kv)	$3.6684e^{+001} + 1.5684e^{+000i}$
I_s	(A)	$2.4000e^{-001} - 1.8000e^{-001i}$
I_L	(A)	$2.4000e^{-001} - 1.8000e^{-001i}$
ΔU	(kV)	$1.6836e^{+000} + 1.5648e^{+000i}$
S_1	(MVA)	$2.5567e^{+001} + 2.0936e^{+001i}$
P_S	(MW)	$2.5567e^{+001}$
Q_S	(MVAR)	$2.0936e^{+001i}$
S_2	(MVA)	$2.5200e^{+001} + 1.8900e^{+001i}$
P_R	(MW)	$2.5200e^{+001}$
Q_R	(MVAR)	$1.8900e^{+001i}$
R%	-	4.9055
$\eta\%$	-	98.564

Tableau IV. 4. Caractéristiques de la ligne courte.

IV.4 Conclusion

A travers ce travail on a réalisé un ensemble des programmes sous Matlab pour le calcul des paramètres linéiques et des caractéristiques de la ligne électriques (tension, et courant à la source, chutes de tension, pertes de puissances actives et réactive, la puissance maximale transmise par la ligne le rendement de la ligne et la régulation de la tension)

On a fait des exemples d'application en utilisant ces programmes et on a constaté la rapidité et l'efficacité des calculs.

Conclusion générale

L'objectif de notre présent travail est le calcul des paramètres et les caractéristiques d'une ligne de transport de l'énergie électrique par ordinateur sous logicielle de programmation MATLAB ; ce langage nous a permis de faire des programmes afin de faciliter à l'utilisateur de réduire le temps de calcul et le risque de l'erreur à chaque fois qu'il souhaite faire des calculs sur les lignes aériennes.

Notre travail a été réalisé en deux parties, tel que la première partie est consacrée Pour la réalisation des programmes de calcul des paramètres des lignes électriques dont on a fait deux applications sur la ligne former par un seul conducteur par phase et la ligne dans les conducteurs de phase sont en faisceau.

La deuxième partie est consacrée au calcul des différentes caractéristiques des lignes (moyenne et courte) en utilisant le modèle en π . La procédure de calcul diffère d'une ligne à une autre.

Nous espérons que notre travail sera utile et que d'autres étudiants futurs le développeront davantage pour l'intégrer au logiciel Matlab.

Bibliographie

- [1] **SihemBouri** « Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis » Université Jilali Liabès - Doctorat 2007.
- [2] **Labed.Djamel**, « production décentralisée et couplage au réseau », thèse de doctorats d'états de l'Université de mentouri de Constantine, Anne 2008.
- [3] **Georges VALENTIN, René FONDEUR, Bernard JOYEUX-BOUILLON & JeanClaude TURPAIN** « Postes à moyenne tension » Techniques de l'Ingénieur D 4 600-7.
- [4] **Pierre HAUTEFEUILLE & Yves PROCHERON** « Lignes aériennes » Techniques de l'Ingénieur D640a_6_1973.
- [5] <http://www.hydroquebec.com/comprendre/transport/types-pylones.html>
- [6] **Pierre ESCANÉ&Jean-Marie ESCANÉ** « Réseaux électriques linéaires à constantes réparties » Techniques de l'Ingénieur D 1 100.
- [7] **HADDAD Lyazid HAMI Khodir** « Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées », thèse de Master II d'états de Université Abderrahmane mira – BEJAÏA, Anne 2015.
- [8] **N.Lahaçani AOUZELLAG**, «Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA de Bejaïa, 03 Novembre 2011.