

CHAPITRE II

LIGNES ELECTRIQUES

I - INTRODUCTION

La ligne électrique est l'une des principales formes d'infrastructures énergétiques. Elle permet le transport de l'énergie électrique, des centrales électriques vers les réseaux de distribution qui alimentent les consommateurs selon leurs besoins. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines.

Les lignes aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, de types pylônes ou poteaux. Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, ou parfois en matière plastique renforcée.

Les lignes à haute tension fonctionnent presque toutes en courant alternatif triphasé ; mais dans le cadre particulier de certaines traversées sous-marines ou de lignes enterrées, le transport se fait en courant continu (Courant continu haute tension (HVDC) pour des raisons d'économie, d'encombrement et de fiabilité. À titre d'exemple :

la liaison France-Angleterre IFA 2000 est réalisée par deux paires de conducteurs dont la tension continue par rapport à la terre vaut respectivement +270 kV et -270 kV, soit une différence de potentiel entre les deux conducteurs de chaque paire égale à 540 kV ;

à Grondines, 100 km au sud-ouest de Québec, la traversée du fleuve Saint-Laurent s'effectue au moyen de deux paires de câbles dont la tension continue par rapport à la terre est de plus ou moins 450 kV, soit une différence de potentiel égale à 900 kV ;

le futur réseau DESERTEC (production massive d'énergie solaire dans la zone sahélienne) ne peut fonctionner efficacement qu'avec des lignes HVDC.

À ce jour, les lignes souterraines (à courant continu ou alternatif), plus coûteuses à l'installation, sont utilisées dans quelques cas particuliers : transport sous-marin, franchissement de sites protégés, alimentation de grandes villes, ou autres zones à forte densité de population. Elles sont plus souvent en basse et moyenne tension qu'en haute tension du fait des coûts prohibitifs.

L'isolation s'est d'abord faite par papier imprégné d'huile minérale, puis par de nouvelles technologies qui ont également amélioré les capacités des lignes : l'isolation synthétique, l'isolation gazeuse, ..

Composants des lignes

Pylônes

Pour les lignes aériennes, des pylônes, généralement réalisés en treillis d'acier supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le coût. L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés, tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager).

Conducteurs

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs, généralement sous forme triphasée, avec au moins trois conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de deux à quatre) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes et d'augmenter la puissance pouvant transiter.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés car ce matériau est de plus en plus cher et à conductibilité égale, deux fois plus lourd qu'un conducteur d'aluminium. On utilise en général des conducteurs en alliage d'aluminium, ou en combinaison aluminium-acier pour les câbles plus anciens ; ce sont des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant.

Isolateurs

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs, ils ont un rôle à la fois mécanique et électrique. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'un empilement d'assiettes. Il en existe deux types : les isolateurs rigides (assiettes collées) et les éléments de chaîne (assiettes emboîtées). Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'assiettes est important. Les chaînes peuvent être simples (câbles légers en suspension), doubles droites (horizontales pour les câbles en amarrage et verticales pour les câbles lourds en suspension), doubles en V (câbles en suspension anti-balancement) voire triples (supportant plusieurs câbles).

Câbles de garde

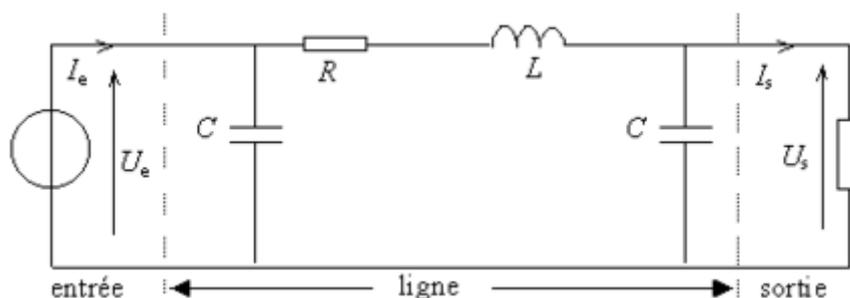
Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant la foudre pour éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs. Ils sont en général réalisés en almelec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

Signalisation

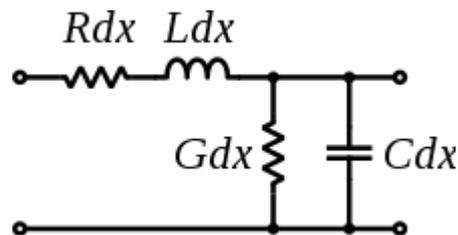
Afin d'éviter les impacts d'aéronefs, les lignes sont signalées par des balises diurnes (boules) ou nocturnes (dispositifs lumineux, Balisor), aux abords des aéroports et aérodromes la partie supérieure du fût du pylône est peinte en rouge et blanc.

II – MODELISATION

La modélisation des lignes électriques permet de représenter le comportement électrique attendu de celles-ci. Elle est basée sur les équations des télégraphistes. Le calcul des paramètres électriques utilisé pour la modélisation repose sur les équations de Maxwell. Le modèle avec une seule section en Pi n'est valable que pour de faibles fréquences et des lignes électriques courtes, dans le cas contraire plusieurs sections en Pi doivent être connectées en série.



Une portion de ligne électrique peut être représentée par le quadripôle ci-après où



- La résistance linéique (par unité de longueur) R du conducteur est représentée par une résistance série (exprimée en ohms par unité de longueur).
- L'inductance linéique L est représentée par une self (Henry par unité de longueur).
- La capacité linéique C entre les 2 conducteurs est représentée par un condensateur C shunt (Farad par unité de longueur).
- La conductance linéique G du milieu diélectrique séparant les 2 conducteurs est représentée par une résistance shunt (Siemens par unité de longueur).

Dans ce modèle, on définit la tension en tout point éloigné d'une distance x du début de la ligne et à tout instant t la tension $U(x,t)$ et le courant $I(x,t)$. Les équations s'écrivent :

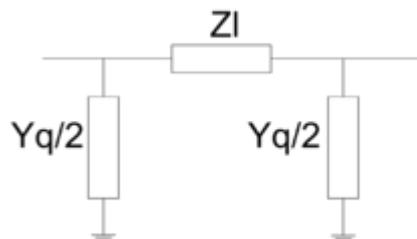
$$\frac{\partial U}{\partial x} = -L \frac{\partial I}{\partial t} - R I$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -C \frac{\partial U}{\partial t} - G U$$

De la formulation ci-dessus, on peut tirer 2 équations (des télégraphistes) aux dérivées partielles ne faisant chacune intervenir qu'une variable.

Modèle en Pi

Le modèle suivant représente la ligne



Avec

$$Z_l = \Gamma \sinh(\gamma \cdot l)$$

Et

$$Y_q / 2 = \Gamma^{-1} \tanh(\gamma \cdot l / 2)$$

Avec $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(Z' \cdot Y')}$ est la constante de propagation, avec Z' l'impédance linéique de la ligne et Y' l'admittance linéique de la ligne. Et $\Gamma = \sqrt{(Z'/Y')}$, l'impédance de la ligne. l est la longueur de la ligne.

Pour une ligne aérienne moyenne ne dépassant pas 200 km environs, $Z = Z' \cdot l$ et $Y_q / 2 = Y' \cdot l / 2$.

Pour une ligne aérienne courte ne dépassant pas 80 km environs, $Z = Z' \cdot l$ et $Y_q / 2 = 0$.

Nombre de Pi en cascade

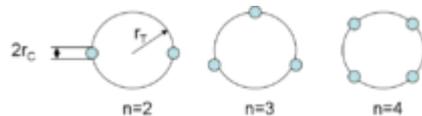
Une section en Pi n'est constituée que d'éléments concentrés. Avec une seule section, le modèle en Pi n'est valable qu'en basse fréquence pour de faibles longueurs de ligne. Quand la longueur ou la

fréquence augmente, le nombre de sections en Pi à connecter en cascade pour avoir une modélisation correcte doit être augmenté.

Calcul des paramètres électriques pour une ligne aérienne

Conducteur équivalent

Les lignes à haute tension, surtout à plus de 220 kV, ne possèdent pas un conducteur unique par phase, mais de faisceaux de conducteurs en contenant de 2 à 4 (voir image ci-dessous). Il est possible de modéliser un faisceau de conducteurs par un conducteur équivalent de rayon:



$$r_{eq} = \sqrt[n]{n r_C r_T^{n-1}}$$

Où r_{eq} est le rayon équivalent du faisceau, r_C le rayon des conducteurs, r_T le rayon du cercle formé par le faisceau, n le nombre de conducteurs par faisceau.

Distance inter-faisceaux

Pour un système triphasé, il est possible de définir une distance équivalente entre les conducteurs, ou faisceaux de conducteurs selon le cas, en calculant la moyenne géométrique. Dans le cas d'un système triphasé simple, elle vaut

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

Résistance longitudinale

La résistance linéique d'un conducteur à la température de référence, en général 20 °C, est:

$$R_{20} = \rho / A$$

Avec A la section et ρ la résistivité du matériau conducteur. Pour un conducteur en cuivre la résistivité est de l'ordre de $1,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ pour de l'aluminium de $3 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

La résistance de la ligne augmente linéairement avec la température. Elle augmente aussi avec la fréquence (effet de peau, effet de proximité).

Dans le cas de faisceaux de conducteurs, ces derniers étant en parallèle la résistance doit être divisée par le nombre de conducteurs.

Les valeurs typiques varient entre $0,12 \Omega/km$ pour 110kV et $0,03 \Omega/km$ pour 380kV.

Inductance longitudinale

Dans un système triphasé, il y a des inductances propres de phases, mais également entre phases. L'objectif est de synthétiser le tout dans une seule inductance "moyenne" L' égale pour les trois:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{D}{r}\right) + \frac{1}{4n} \right)$$

Avec n le nombre de conducteurs par faisceau.

Les valeurs typiques de la réactance inductive à 50Hz varient entre $0,4 \Omega/km$ pour 110kV et $0,25 \Omega/km$ pour 380kV.

Capacité transversale

Dans un système triphasé, il y a des capacités entre les conducteurs et la terre, mais également entre conducteurs. L'objectif est de synthétiser le tout dans une seule capacité "moyenne" C_b égale pour les trois:

$$C_b = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r / \ln(D/r)$$

Dans laquelle ϵ_0 et ϵ_r sont les permittivité diélectrique du vide et du matériau respectivement (dans le cas de l'air pour les lignes aériennes ϵ_r vaut environ 1).

Les valeurs typiques de l'admittance transversale à 50Hz varient entre $3\mu\text{S}/\text{km}$ pour 110kV et $4\mu\text{S}/\text{km}$ pour 380kV.

Conductance transversale

Une résistance doit être représentée en parallèle aux capacités pour être complet. Elle est due à l'effet corona et aux fuites de courant (causées par la pollution sur les isolateurs par exemple). Pour une ligne de 380 kV elle vaut $3\text{nS}/\text{km}$ en temps sec et $30\text{nS}/\text{km}$ en temps humide