

Modélisation, Simulation et Analyse des Régimes de Fonctionnement et des Conditions d'Exploitation des Longues Lignes de Transport d'Energie Electrique à Extra Haute Tension 400 kV et plus

L. Kotni

Faculté de Génie Electrique ; Département d'Electrotechnique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (U.S.T.O), Mohamed Boudiaf
BP 1505 El M'Naouar Oran, Algérie. Tél.Fax : (213) (0)41 56 03 41, Email : kotni_dz@yahoo.fr

Abstract : Dans cet article nous présentons la modélisation, la simulation et l'analyse des régimes permanents stationnaires symétriques de fonctionnement pour l'étude des conditions d'exploitation des longues lignes de transport d'énergie électrique à extra haute tension 400 kV et plus. Le calcul est basé sur les équations du quadripôle décrivant le fonctionnement des lignes longues à constantes réparties où les courants et les tensions sont fonction de la distance le long de la ligne. L'article présente l'étude de fonctionnement et les conditions d'exploitation de la ligne de transport de 320km reliant Hassi Ameur (Oran) à El Affroun (Blida) sous 400 kV en régime de forte charge et de faible charge de la puissance active transportée par rapport à la puissance naturelle de la ligne. Les profils de la tension, du courant, ainsi que la circulation et les directions de la puissance réactive apparaissant aux extrémités terminales de la ligne sont présentés.

Introduction

La ligne de transport d'énergie électrique Extra Haute Tension (UHV)¹ qui relie le poste d'El Affroun à celui de Hassi Ameur sous une tension nominale de 400 kV en courant alternatif construite en faisceaux de deux conducteurs par phase et d'une longueur de 320 km fait l'objet d'un nouveau produit technologique en Algérie. Ce projet de ligne n'est que le premier tronçon du grand projet ambitieux de l'interconnexion de l'Algérie avec les pays du bassin méditerranéen. L'importance stratégique de ces ouvrages 400 kV impose au Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (GRTE) des critères sévères en matières d'études, de management de projet, de capacité de réalisation et de références réelles dans le domaine. La ligne à deux ternes est prévue pour faire transiter une puissance de 600 MW par terne sur les 320 km de distance. Dans ce projet qualifié des plus importants, de nouvelles techniques de conception et de design des longues lignes EHV doivent être adoptées par des ingénieurs pour mener à bien leurs exploitations pour une conduite saine en régime de forte charge et en charge minimale.

Les problèmes techniques liés au transport de l'énergie électrique s'aggravent au fur et à mesure que la tension nominale et la distance de transport augmentent. Parmi ces problèmes, on peut citer l'effet de l'intense puissance réactive qui peut affecter les régimes de fonctionnement des

alternateurs et des compensateurs synchrones en régime de faible charge. Il faut mentionner aussi que la distribution de la tension et du courant le long de la longue ligne à 400 kV présente un creux ou un ventre suivant la valeur de la puissance active à transporter comparée à la puissance naturelle de la ligne.

Le problème posé aux exploitants des réseaux électriques a un double aspect :

a. d'une part, il faut fixer les valeurs de la tension aux sommets de la ligne de transport;

b. d'autre part, il faut aussi gérer les moyens de compensation de l'énergie réactive de façon à obtenir aux sommets des tensions compatibles aux objectifs visés en charge maximale, et garantir l'absorption de l'excès de la puissance réactive en charge minimale par les compensateurs synchrones et les turbogénérateurs dans leurs limites de fonctionnement admissible.

Caractéristiques électriques de la ligne

Pour une ligne de transport d'énergie électrique complètement transposée, sa réactance spécifique est calculée par la relation suivante :

$$x_0 = 0.1445 \log \frac{D_{MG}}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} \quad (\Omega / km) \quad (1)$$

où D_{MG} ² désigne la moyenne géométrique des distances des conducteurs d'un terne à ceux de l'autre et qu'on peut calculer par l'expression :

$$D_{MG} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}} \quad (m) \quad (2)$$

D_{AB} , D_{BC} et D_{AC} étant les distances entre les conducteurs des phases A, B et C. Le paramètre r_{eq} désigne le rayon équivalent du faisceau composé de deux conducteurs identiques de 570 mm² de section chacun. Dans le cas d'un faisceau constitué de deux conducteurs, le rayon équivalent peut être calculé par la relation suivante : $r_{eq} = \sqrt{a \cdot r_c}$ dans laquelle le facteur a désigne le pas du faisceau (c'est la distance qui sépare les deux conducteurs dans le faisceau tel que le champ électrique maximale à la périphérie du faisceau soit le plus faible). En effet, le facteur a détermine les dimensions des entretoises qui fixent les deux conducteurs dans le faisceau à une distance maintenue et régulière pour que le champ électrique maximale qui règne autour du faisceau garde sa valeur la plus faible pour réduire l'effet

¹ Ultra High Voltage

² Géométrical Mean Distance (GMD)

couronne et ainsi diminuer les pertes de puissance active causées par cet effet couronne. Enfin le facteur n désigne le nombre de conducteurs qui constituent le faisceau. Le facteur r_c étant le rayon du conducteur qui compose le faisceau.

La susceptance de la ligne due à l'effet capacitive entre chaque phase et la terre est déterminée par l'expression :

$$b_0 = \frac{7.58}{\log \frac{D_{MG}}{r_{eq}}} \cdot 10^{-6} \quad (s / km) \quad (3)$$

La résistance r_0 et la conductance g_0 spécifiques de la ligne peuvent être négligées étant donnée que $r_0 \ll x_0$ et $g_0 \ll b_0$. L'impédance caractéristique de la ligne sera alors calculée par la relation :

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} \approx \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \quad (\Omega) \quad (4)$$

La puissance naturelle³ de la ligne triphasée est donnée par l'expression :

$$P_{nat} = \frac{U_{nom}^2}{Z_c} \quad (MW) \quad (5)$$

Pour les lignes longues, la notion de puissance caractéristique présente un intérêt exceptionnel. En effet, la ligne transmet la puissance caractéristique lorsqu'en un de ses points :

- La puissance transmise est entièrement active et
- Le rapport de la tension au courant est égal à l'impédance caractéristique.

Dans ce cas, les conditions sont uniformes tout le long de la ligne (les pertes étant supposées nulles). En outre, le courant et la tension sont constants en chaque point et enfin l'écart angulaire entre les tensions et entre les courants aux deux extrémités de la ligne est égal à la longueur électrique en degrés de la ligne. Chaque fois que l'on indique une puissance caractéristique, il convient de préciser la tension à laquelle elle correspond.

Etude de la ligne à double terna Oran-Blida

La ligne de tension nominale 400 kV qui relie les postes de Hassi Ameur (Oran) et d'El Affroun (Blida) est à double terna et est prévue pour faire transiter en régime de forte charge une puissance de 600 MW par terna sur une distance de transport égale à 320 km. Le régime de fonctionnement de la ligne en charge minimale est supposé être de 40 % de la puissance maximale soit 240 MW. Les caractéristiques des pylônes comme le montre la figure 1 utilisées dans le tracé de la ligne sont les suivantes :

- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 1 et 4 est de 41.8 m.
- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 2 et 5 est de 31.8 m.
- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 3 et 6 est de 22.6 m.

• Les écartements horizontaux entre le centre du pylône et les phases considérées sont mentionnées sur la figure 1

• Chaque phase est constituée en faisceau de deux conducteurs de section 500 mm² chacun maintenus par des entretoises de 40 cm.

• Le diamètre de chaque conducteur constituant le faisceau est égal à 31.5 mm.

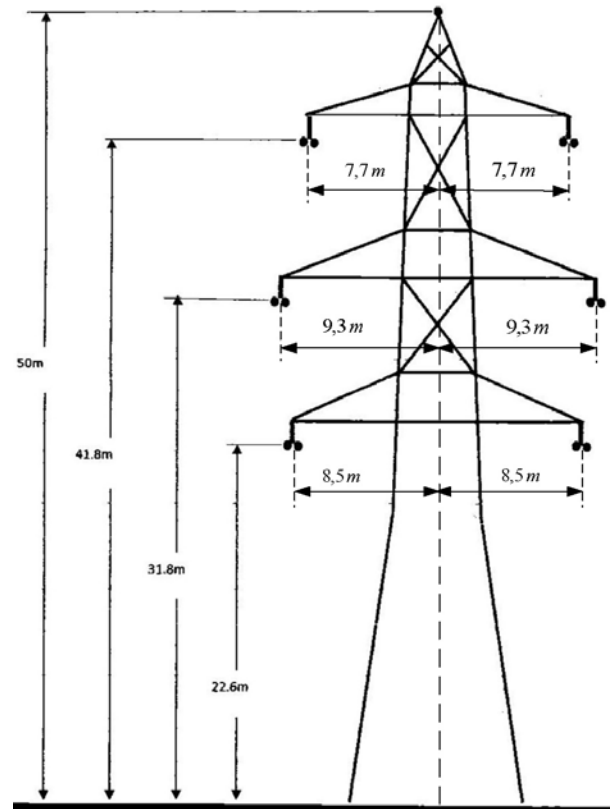


Fig. 1 : Pylône à deux ternes (2x600 MW)
Chaque phase contient deux conducteurs
2x570 mm².

Caractéristiques électriques de la ligne

Dans le but de faire une étude des régimes de fonctionnement et du comportement électrique de la ligne suivant les puissances actives transitées en régime de charge maximale et minimale, les caractéristiques électriques de la ligne Hassi Ameur-El Affroun sont indispensables et sont déterminées à savoir : $D_{MG}=12.14$ m ; $x_0=0.324$ Ω/km ; $P_c=523.6$ MW ; $b_0=3.47 \cdot 10^{-6}$ s/km ; $Z_c=305.6 \Omega$.

Modèles mathématiques et équations générales de la ligne

Lorsque la ligne de transport dépasse les 250 km, il est impératif de recourir aux équations générales des lignes. Les caractéristiques électriques durant le transfert de l'énergie électrique qu'intéressent en premier lieu l'ingénieur exploitant la ligne sont : les distributions de la tension et du courant, la circulation de la puissance réactive et le maintien de la tension

³ Caractéristique

aux extrémités de la ligne. Les distributions de la tension et du courant dans le cas d'une ligne tripasée sont données par les expressions :

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma}_0 l + \sqrt{3} \dot{Z}_c \dot{I}_2 \operatorname{sh} \dot{\gamma}_0 l \quad (6)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma}_0 l + \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} \dot{Z}_c} \operatorname{sh} \dot{\gamma}_0 l \quad (7)$$

$$\text{où } \dot{\gamma}_0 = \sqrt{\dot{Z}_0 \dot{Y}_0} = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)} = \beta_0 + j\alpha_0$$

connue sous le nom de la constante de propagation ; \dot{U}_1 et \dot{U}_2 désignent les tensions composées maintenues en tête de ligne et en bout de ligne respectivement ; \dot{I}_1 et \dot{I}_2 désignent les courants de phase en tête de ligne et en bout de ligne respectivement.

Pour un examen préliminaire, il est bien souvent admissible de négliger la composante active de l'impédance comme c'est le cas des lignes longues en faisceaux. Dans ce cas, les tensions et les courants seront exprimés par les équations trigonométriques suivantes :

$$\dot{U}_1 = U_2 \cos \alpha_0 l + j\sqrt{3} \dot{I}_2 Z_c \sin \alpha_0 l \quad (8)$$

$$\dot{I}_1 = I_2 \cos \alpha_0 l + j \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} \sin \alpha_0 l \quad (9)$$

avec $\alpha_0 l = \lambda = 0.06$ (deg.) la longueur électrique de la ligne à 50 Hz, et l la longueur de la ligne en km.

Prenant pour référence l'extrémité finale de la ligne, c'est à dire aux jeux de barres où est supposée connectée la charge $\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$, sous la tension $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$; la tension et le courant à la distance x comptée à partir de cette référence sont donnés par les équations :

$$\dot{U}_x = U_2 \cos \lambda_x + j\sqrt{3} \dot{I}_2 Z_c \sin \lambda_x \quad (10)$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_2 \cos \lambda_x + j \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} \sin \lambda_x \quad (11)$$

où $\lambda_x = \alpha_0 \cdot x$.

Il est rationnel d'introduire des grandeurs sans dimensions en rapportant les tensions, les courants, les puissances et les impédances aux valeurs caractéristiques. Cela signifie que les courants sont rapportés au courant qui correspond à la puissance caractéristique (courant caractéristique), les impédances à l'impédance caractéristique, les puissances à la puissance naturelle et les tensions à la tension maintenue en bout de ligne.

Substituant l'expression du courant de la charge $\dot{I}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} U_2}$ dans les équations (10) et (11), et tenant

compte de la puissance naturelle de la ligne $P_{nat} = \frac{U_2^2}{Z_c}$

comme la puissance de base, on établit les expressions qui permettent d'étudier et d'analyser le comportement électrique de la ligne à chaque distance suivant le transit de la puissance

active et de la puissance réactive apparaissant en bout de ligne :

$$\dot{U}_x = U_2 \left[(\cos \lambda_x + Q_{*2} \sin \lambda_x) + jP_{*2} \sin \lambda_x \right] \quad (12) \quad (12)$$

$$\dot{I}_x = \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} \left[P_{*2} \cos \lambda_x + j(\sin \lambda_x - Q_{*2} \cos \lambda_x) \right] \quad (13)$$

ou en valeur réduite exprimée par rapport au courant caractéristique $I_{base} = \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c}$ comme grandeur de base la

relation (13) se traduit sans dimensions :

$$\dot{I}_{*x} = \left[P_{*2} \cos \lambda_x + j(\sin \lambda_x - Q_{*2} \cos \lambda_x) \right] \quad (14)$$

Le rapport des tensions maintenues aux extrémités de la ligne en fonction du transit de la puissance active et de la puissance réactive apparaissant en bout de ligne est donné par la relation :

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{(\cos \lambda + Q_{*2} \sin \lambda)^2 + (P_{*2} \sin \lambda)^2} \quad (15)$$

L'analyse de l'expression (15) montre que la réalisation du régime optimal de fonctionnement des longues lignes est directement liée à la puissance réactive Q_{*2} apparaissant en bout de ligne et pouvant être contrôlée par le rapport des tensions maintenues aux extrémités de la ligne. De la relation (15) on trouve la puissance réactive Q_{*2} apparaissant en bout de la ligne au niveau de la charge :

$$Q_{*2} = -\operatorname{ctg} \lambda + \sqrt{\left(\frac{k}{\sin \lambda} \right)^2 - P_{*2}^2} \quad (16)$$

Sachant qu'on a supposé la ligne sans perte, la puissance active au niveau de la charge P_{*2} peut être notée aussi tout simplement par la puissance P_* qui transite la ligne. C'est pourquoi dans la relation (16) on indique P_* au lieu de P_{*2} . Utilisant les équations (8) et (9) pour exprimer la puissance $\dot{S}_1 = \sqrt{3} \dot{U}_1 \dot{I}_1$ à l'entrée de la ligne et avec quelques transformations, on aboutit à la relation remarquable qui lie les puissances réactives apparaissant à chaque extrémité de la ligne en fonction de sa longueur et du rapport des tensions maintenues k :

$$Q_{*1} = (k^2 - 1) \operatorname{ctg} \lambda - Q_{*2} \quad (17)$$

La substitution de l'expression (16) dans l'équation (17) donne la puissance réactive apparaissant en tête de ligne :

$$Q_{*1} = k^2 \operatorname{ctg} \lambda - \sqrt{\left(\frac{k}{\sin \lambda} \right)^2 - P_{*2}^2} \quad (18)$$

L'analyse de la relation (17) montre que dans le cas où le rapport des tensions est égal à l'unité c'est-à-dire quand $U_1 = U_2$, les puissances réactives apparaissant aux extrémités de la ligne sont égales et de directions opposées et cela indépendamment de la puissance active transmise.

Les conditions d'exploitation de la ligne

Il convient de définir à l'avance exactement les conditions d'exploitation de la ligne. Celles-ci portent sur la tension maximale et sur les charges réactives. Nous partons de l'hypothèse selon laquelle, en régime stationnaire, la tension ne saurait être dépassée en aucun point de la ligne. En effet, la tension est un paramètre essentiel de dimensionnement des matériels constituant les réseaux qui sont construits pour fonctionner dans une plage donnée; la limite haute, en particulier, est imposée par la tenue diélectrique des isolants et tout dépassement de cette valeur se traduit par une accélération du vieillissement des appareils et donc un accroissement des risques de détérioration prématurée. Ces limites, sont fixées à 420 kV pour les réseaux de transport de tension nominale 400 kV.

La tension sur le réseau du côté primaire du transformateur doit être compatible, compte tenu de la plage dans laquelle peut varier le rapport de transformation, avec les valeurs admissibles du côté secondaire; cela conduit en particulier à fixer les limites inférieures de la tension sur les réseaux 400 kV au seuil inférieure de 365 kV.

Sur le plan économique, en l'absence de clients raccordés directement, l'objectif est d'obtenir le plan de tension le plus haut possible afin de réduire les pertes Joule et donc de minimiser les coûts d'investissement et d'exploitation. Sur le plan technique, il existe des contraintes qu'il convient de respecter et qui se traduisent par des valeurs maximales ou minimales de la tension admissibles en chaque extrémité.

Dans le système sans dimensions, la tension maximale est égale à l'unité. Il faut distinguer deux possibilités quant à la puissance active transmise :

1. quand celle-ci est plus grande que la puissance caractéristique, autrement dit quand $P_* > 1$;
2. quand celle-ci est plus petite que la puissance caractéristique, autrement dit quand $P_* < 1$.

En ce qui concerne la circulation de la puissance réactive sur la ligne, il est exigé qu'elle reste aussi faible que possible.

Etude du régime en charge maximale

L'étude du régime de fonctionnement de la ligne Hassi Ameur-El Affroun en charge maximale pour une puissance active transitée de 600 MW par terre consiste à déterminer les distributions du courant et de la tension le long de la ligne, mais aussi la circulation de la puissance réactive apparaissant à chaque extrémité de la ligne. Cette étude doit être investie pour deux situations ; à savoir lorsque le rapport des tensions est fixé à l'unité quand $U_{1\max} = U_{2\max} = 1.05 \cdot U_{nom}$ soit 420kV, et pour un rapport de tension lorsque $U_1 = U_{1\max} = 420\text{ kV}$ et $U_2 = U_{2\max} = 400\text{ kV}$ soit pour un rapport $k=1.05$.

A. Cas pour $k = \frac{420}{400} = 1$

Fixant les tensions des deux extrémités de la ligne à une valeur maximale, l'étude de la distribution de la tension le long de la ligne est illustrée par la figure 2, celle du courant

par la figure 3. La puissance transmise dans ce cas est supérieure à la puissance naturelle soit en grandeur sans dimensions: $P_* = 1.0395$. Donc, lorsque la puissance transmise est plus grande que la puissance caractéristique, la distribution de la tension présente un creux au milieu de la ligne; celle du courant présente un ventre.

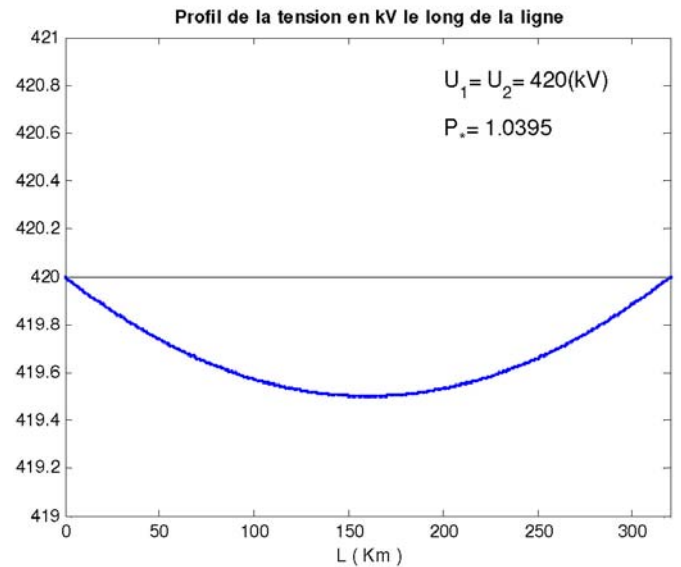


Fig. 2 : Tension en régime de charge maximale pour $k=1$

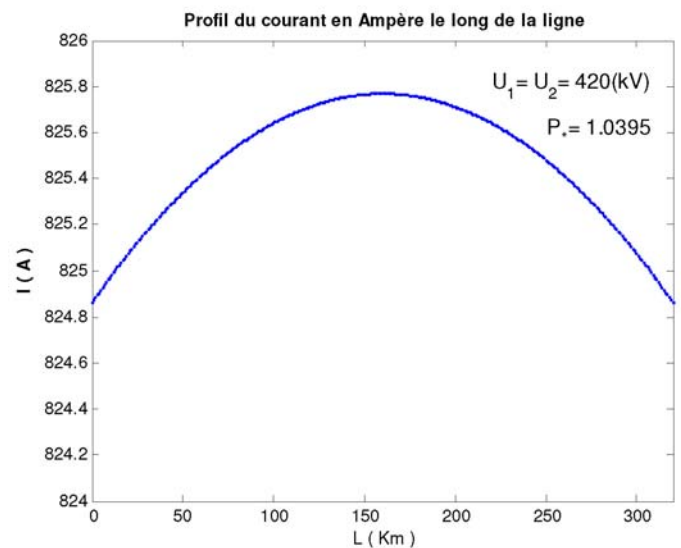


Fig. 3 : Courant en régime de charge maximale pour $k=1$

La circulation de la puissance réactive apparaissant aux extrémités de la ligne est donnée par la figure 4. Il est à remarquer que dans ce cas de figure les puissances réactives apparaissant aux extrémités de la ligne sont égales mais de directions opposées. Il est à noter que ce régime est caractérisé par un manque (déficit) en puissance réactive et un indispensable apport en puissance réactive aux niveaux des deux extrémités est indispensable et ce afin de garantir le présent régime de fonctionnement. On voit qu'il existe dans ce cas un point de la ligne où le courant et la tension sont en phase, ce que nous appellerons par conséquent "point

particulier". Dans ce cas d'étude pour lequel $k=1$, le point particulier se trouve à mi-distance des extrémités.

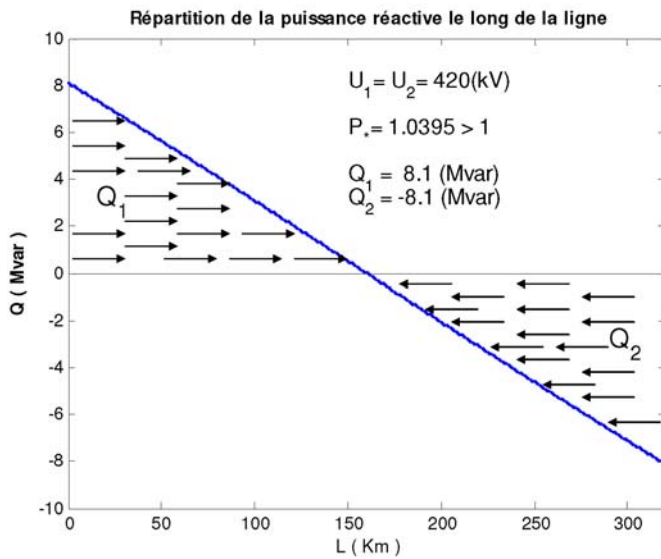


Fig. 4 : Puissance réactive en régime de charge maximale pour $k=1$

B. Cas pour $k = \frac{420}{400} = 1.05$

Une étude similaire au cas précédent est faite mais avec un rapport $k > 1$. La distribution de la tension le long de la ligne est illustrée par la figure 5, celle du courant est donnée par la figure 6.

La circulation de la puissance réactive dans ce cas de fonctionnement de la ligne est caractérisée par un flux unidirectionnel comme la montre la figure 7. Afin de maintenir ce régime de fonctionnement, la figure 7 indique qu'il est nécessaire de produire en tête de ligne une puissance réactive de 97 MVar; en bout de ligne une quantité de 56.8 MVar doit être absorbée, car on se trouve dans un cas d'excès de puissance réactive.

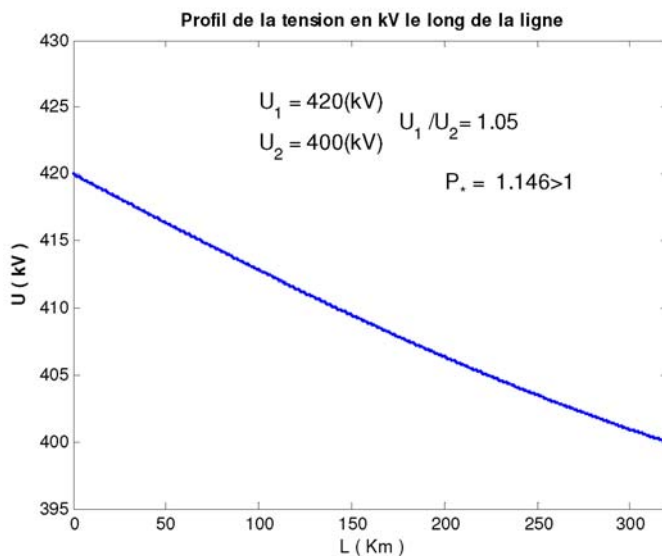


Fig. 5 : Tension en régime de charge maximale pour $k>1$

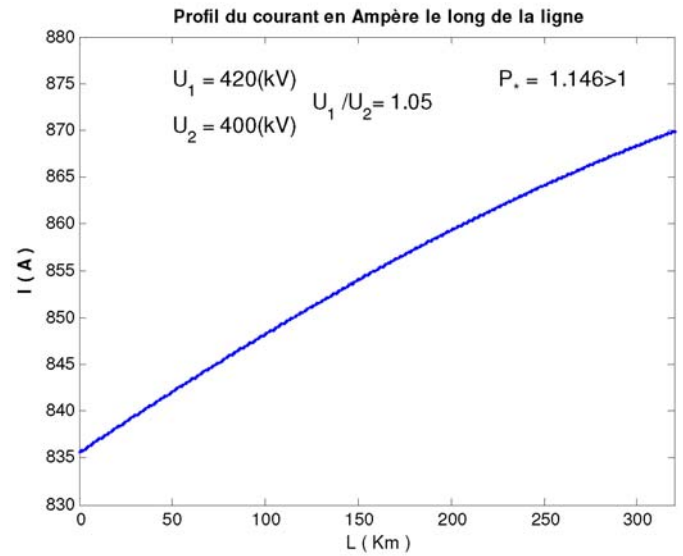


Fig. 6 : Courant en régime de charge maximale pour $k>1$

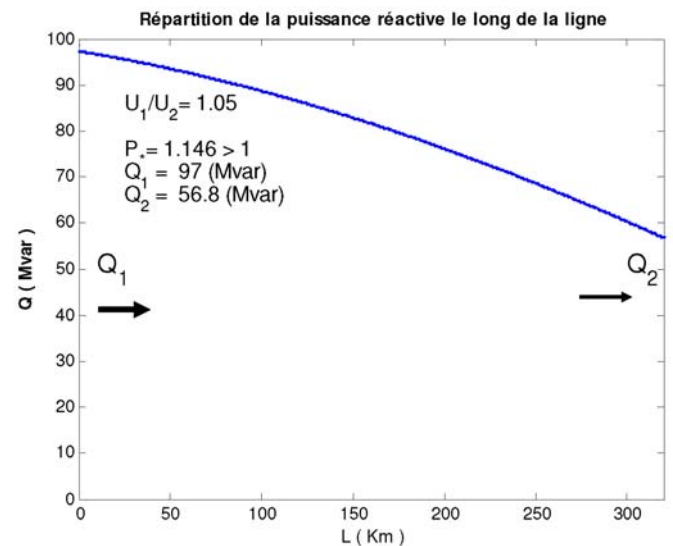


Fig. 7 : Puissance réactive en régime de charge maximale pour $k>1$

Etude du régime en charge minimale

L'étude du régime de fonctionnement en charge minimale consiste à étudier les distributions de la tension, du courant et la circulation de la puissance réactive lorsque dans la ligne transite une puissance réduite, faible par rapport à la puissance naturelle. La puissance transmise dans cette étude est supposée être égale à 40 % de la puissance maximale, soit égale à 240 MW. Le rapport des

tensions aux extrémités est fixé à $k = \frac{400}{420}$ soit $k=1$. Les

distributions de la tension et du courant sont illustrées par les figures 8 et 9; la circulation de la puissance réactive apparaissant aux extrémités de la ligne est montrée par la figure 10.

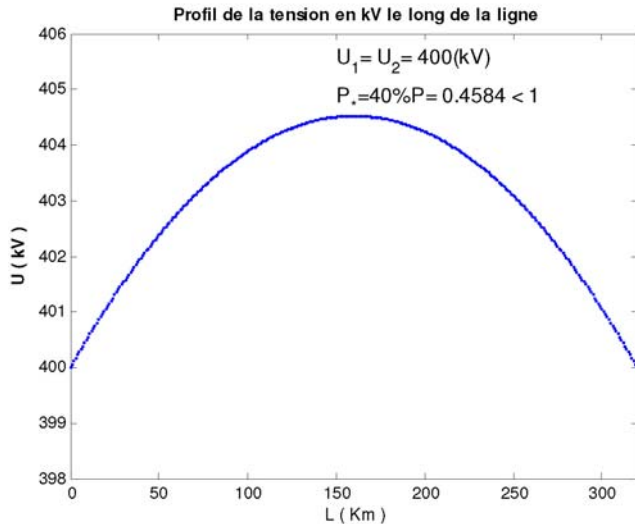


Fig. 8 : Tension en régime de charge minimale pour $k=1$

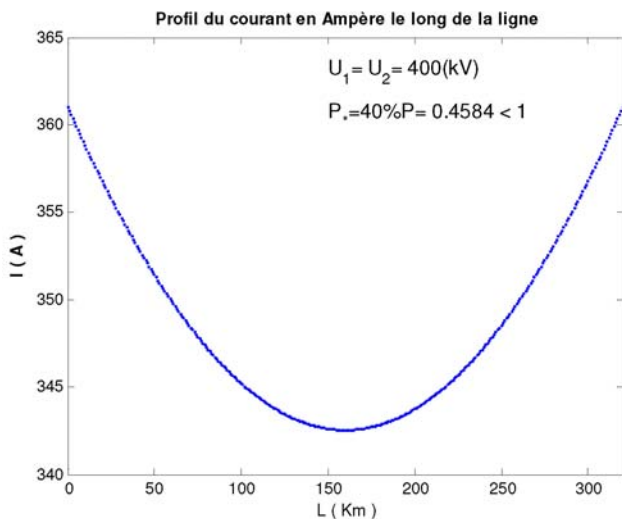


Fig. 9 : Courant en régime de charge minimale pour $k=1$

Lorsque la puissance transmise est plus faible que la puissance naturelle, dans la ligne existe un surplus de puissance réactive ce qui se traduit par un ventre de la tension au point particulier de la ligne comme le montre la figure 8. La figure 10 indique un flux de puissance réactive égale et se dirigeant vers les extrémités de la ligne, ce qui se traduit par son ultime absorption soit par les groupes turbogénérateurs ou self ou compensateurs synchrones et ce afin de maintenir un tel régime de fonctionnement de la ligne.

VII. Conclusions

Dans le présent travail l'étude des régimes de fonctionnement des lignes longues à extra haute tension 400 kV et plus en faisceaux de conducteurs est présenté. L'étude théorique et la formulation mathématique présentées dans cet article sont aussi valables pour les lignes de transport à grande distance sous des tensions nominales supérieures à 400 kV. La modélisation est investie pour un cas concret qui s'applique à la ligne Hassi Ameur-El Affroun. L'étude a montré que pour faire transiter une puissance maximale de 600 MW avec un

rapport des tensions maximales maintenues aux extrémités $k=1$, un apport en puissance réactive de 8.1 Mvar aux extrémités de la ligne est indispensable.

Pour un rapport de tension maintenue égal à 1.05 et un transit de la puissance active maximale, l'étude montre qu'il est indispensable de prévoir l'absorption d'un excès de 57 Mvar de puissance réactive se dirigeant en bout de ligne.

L'étude du régime de faible charge indique une élévation de la tension au milieu de la ligne. L'excès de la puissance réactive de 70 Mvar se dirigeant vers les extrémités de la ligne doit être absolument absorbée par des ouvrages adéquats (centrales, selfs, compensateurs synchrones, etc.).

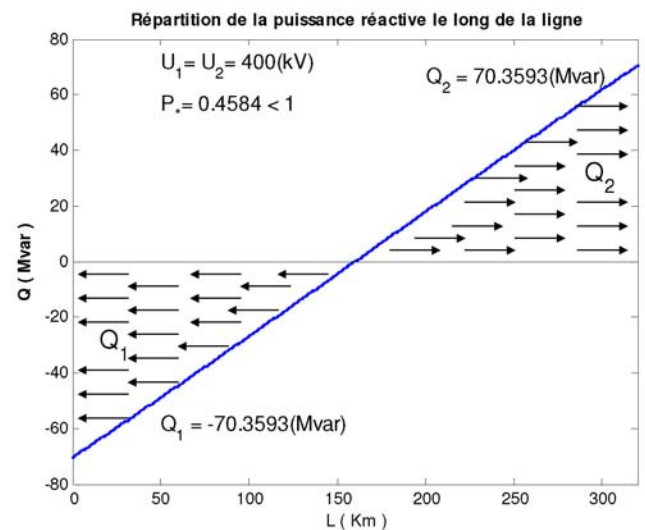


Fig. 10 : Puissance réactive en régime de charge minimale pour $k=1$

Références

- [1] E. Kuffel, and W. S. Zaengel, High Voltage Engineering, Oxford Pergamon Press, 1984.
- [2] Rakosh Das Begamudre, Extra High Voltage A. C. Transmission Engineering, John Wiley 1986.
- [3] R. Giglioli, L. Paris, C. Zini, et al., Reactive balance optimisation to improve the energy transfer through a.c. transmission system over very large distance, CIGRE, 1988, Rep. 38-16.
- [4] M. Barbarito, A. Clerici, R. Giglioli, et al., Compact versus conventional EHV lines: technical and economical comparisons, CIGRE, 1984, Rep. 22-13.
- [5] T. J. E. Miller, Reactive Power Control in Electrical Systems, John Wiley, 1982.
- [6] E. Acha, V.G. Agelidis et al., Power Electronic Control in Electrical Systems, 2002.