Gestion de l’énergie sur le réseau de transport d’électricité

Cette série d’exercices aborde plusieurs aspects des problèmes liés au transport et à la gestion de l’énergie électrique. Ces exercices indépendants sont cependant construits comme une progression. Les prérequis nécessaires sont des notions abordées en première et qu’un élève de terminale doit maitriser :

* Vecteurs de Fresnel
* Calcul des puissances (P, Q, S)
* Théorème de Boucherot
* Impédances
* Géométrie élémentaire.

Ces exercices pourraient servir de révision en début de BTS Electrotechnique.

La difficulté des exercices (à mon avis) est indiquée ci-dessous à l’aide du symboleMP900439244[2].



Exercice 1 : Réduction de l’intensité du courant appelé par une charge inductive.



Exercice 2 : Facteur de puissance d’une installation triphasée.



Exercice 3 : De l’utilité de transporter l’énergie électrique en haute tension.



Exercice 4 : Choix de la section des conducteurs aériens.



Exercice 5 : Chute de tension dans une ligne aérienne.



Exercice 6 : Chute de tension entre la source et l’utilisateur en fonction de la distance.



Exercice 7 : Contrôle de la tension et optimisation des performances de la ligne.



Exercice 8 : Câbles souterrains.

**Exercice 1 :**  Réduction de l’intensité du courant absorbé par une charge inductive

Dans ce premier exercice, nous verrons comment réduire le courant absorbé par une charge inductive.

Ce problème est composé de 2 parties qui se suivent : Partie A : charge RL - Partie B : charge RL + C

**Partie A : Charge inductive (RL série)**

Le réseau alimente une installation sous une tension sinusoïdale de valeur efficace V = 230 V et de fréquence *f* = 50 Hz. L’installation est modélisée par une charge RL série.

iRL( t )

vR ( t ) R = 3 Ω

v ( t )

vL ( t ) L = 30 mH

On a mesuré la valeur efficace du courant absorbé par la charge : IRL = 23.2 A

A.1. Quel appareil a permis de faire cette mesure ? Précisez la mesure qui a été faite : DC, AC ou AC+DC ?

On a mesuré la valeur efficace du courant en plaçant une pince ampère-métrique en position AC.

A.2. Exprimez et calculez la valeur efficace VR de la tension aux bornes de la résistance, puis VL celle aux bornes de la bobine.

On exprime VR = R.IRL = 69.6 V et φvR/iRL = 0° ; VL = Lω.IRL = 218 V et φvL/iRL = + 90°

A.3. Représentez sur le document réponse les vecteurs de Fresnel associés aux grandeurs iRL (t), vR (t) et vL (t). On placera le vecteur RL à l'horizontale. Voir document réponse

A.4. Précisez la relation vectorielle utilisée puis tracez . La loi d’additivité donne

A.5. Retrouvez par la mesure de , la valeur efficace V de la tension du réseau. V = 15.3 cm x 15 V/cm = 230 V

A.6. Déterminez par le calcul le déphasage φ1 de la tension v (t) par rapport au courant iRL (t). φ1 = Atan (VL /VR ) = 72,3 °

**Partie B : Charge inductive associée au condensateur**

Afin de diminuer l’intensité du courant délivré par le réseau, on place un condensateur en parallèle de la charge. Le courant fourni par le réseau est à présent noté i (t).

i ( t ) iC( t ) iRL( t )

R = 3 Ω

v ( t ) C

L = 30 mH

On donne

C = 285 µF

B.1. Exprimez et calculez la valeur efficace IC de l'intensité du courant iC ( t ). IC = Cω.V = 20.6 A et φiC/v = + 90°

B.2. Sur le même document réponse, représentez alors le vecteur de Fresnel associé à iC(t). Voir document réponse

B.3. Précisez la relation utilisée puis tracez . La loi des nœuds donne

B.4. Déterminez graphiquement la valeur efficace I de l'intensité du courant i(t). I = 2.5 cm x 3 A/cm = 7.5 A

B.5. Déterminez graphiquement le déphasage φ2 de la tension v ( t ) par rapport au courant i (t). On mesure φ2 = 12 °

B.6. Déduisez-en la nature de la charge {RL + C}. i(t) est en retard par rapport à v(t). La charge est donc inductive.

DOCUMENT REPONSE

Tracez les vecteurs associés aux **courants en rouge** et ceux associés aux **tensions en vert**.

Tracezles **constructions vectorielles au crayon.**

Échelles :

1 cm <=> 3 A

1 cm <=> 15 V

φ1

φ2

+

**Exercice 2 :** Facteur de puissance d’une installation

Le réseau sinusoïdal triphasé 400 V / 50 Hz alimente le lycée (charge triphasée équilibrée).

La puissance active consommée par le lycée est P = 400 kW.

Le facteur de puissance du lycée est k1 = 0.91

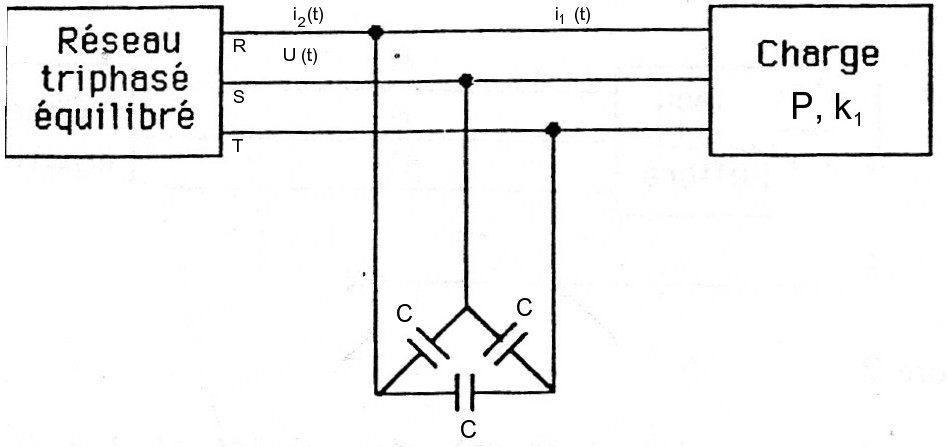
* Calculez alors l’intensité I1 du courant en ligne ainsi que la puissance réactive Q1 consommée.

* Calculez la puissance apparente S1.

Lycée

S2, Q2 et k2

Batterie de compensation



On souhaite obtenir un nouveau facteur de puissance k2 = 0.93.

* Quelle est la puissance P2 consommée ? Les condensateurs ne consomment pas de puissance active: P2 = P
* Calculez les nouvelles valeurs  de la puissance apparente S2 de l’installation, de l’intensité I2 du courant en ligne, et de la puissance réactive Q2.

ou = 158 kvar

* Déduisez-en la valeur de la puissance réactive Qc fournie par la batterie de condensateurs.

Théorème de Boucherot : Q2 = Q1 + QC donc QC = Q2 – Q1 = - 24 kvar

* Déterminez la capacité C des condensateurs couplés en triangle.
* Calculez l’intensité I3 du courant en ligne si le facteur de puissance était k3=1.

**Exercice 3 :** De l’utilité de transporter l’énergie électrique en haute tension

Les conducteurs qui transportent l’énergie électrique présentent naturellement une résistance. C’est la résistance des lignes qui est responsable de pertes par effet Joule et qu’il conviendra de minimiser.

n rappelle l’expression de la résistance d’un conducteur cylindrique :

*l* ***l*** la longueur du conducteur exprimée en m

 S ***S*** la surface en m² appelée section.

***ρ*** est la résistivité du matériau exprimée en Ω.m

Pour les lignes aériennes, le cuivre n’est pas utilisé car il est trop lourd ! On utilise des alliages aluminium – acier, plus légers, dont la résistivité est de l’ordre de 30.10-9 Ω.m.

On assimilera le faisceau de conducteurs (image ci-contre) à un unique conducteur de section S.

Une ligne triphasée 400 V / 50 Hz alimente des habitations et transporte, sur une longueur de 200 m dans trois conducteurs de section 185 mm² (section adaptée à l’intensité), une puissance apparente S = 90 kVA.

* Calculez l’intensité I du courant en ligne.
* Calculez la résistance de chaque fil de ligne.
* Déterminez les pertes joules dans la ligne triphasée.

La ligne, transportant la même puissance apparente soit S = 90 kVA sur une longueur de 200 m, est à présent alimentée en triphasée 20 kV / 50 Hz et les conducteurs ont une section de 54.6 mm² (adaptée à l’intensité).

* Calculez l’intensité I du courant en ligne.
* Calculez la résistance de chaque fil de ligne.
* Déterminez les pertes joules dans la ligne triphasée.

**Exercice 4 :** Choix de la section des conducteurs aériens

On veut faire circuler un courant d’intensité 1200 A dans un conducteur de 1200 mm² de diamètre. En prenant en compte l’effet de peau, on calculera les pertes joules lorsque le courant circule dans un conducteur unique puis lorsqu’il est divisé dans plusieurs conducteurs (on raisonnera à section égale).

On étudiera trois cas :

* Un conducteur de 1200 mm² parcouru par un courant d’intensité 1200 A.
* Deux conducteurs de 600 mm², chacun parcouru par un courant d’intensité 600 A.
* Trois conducteurs de 400 mm², chacun parcouru par un courant d’intensité 400 A.

On considère une ligne HT de 1 km de long. Les conducteurs en alliages aluminium – acier ont pour résistivité ρ = 30.10-9 Ω.m.

Les lignes, étant aériennes, sont dans un milieu de perméabilité µ = 4π.10-7 H/m.

1. Exprimez, en fonction de l’épaisseur de peau δ et du rayon *r* du conducteur, la section utile SU du conducteur : SU = S – SINT.
2. Calculez l’épaisseur de peau δ à la fréquence de 50 Hz.
3. Déduisez-en à 50 Hz, pour chaque type de câble la section utile SU du conducteur.
4. Calculez alors les résistances R1000, R690 et R570 des conducteurs à 50 Hz.
5. Déduisez-en, dans chaque cas (1x1000mm², 2x 690 mm² ou 3x570 mm²), les pertes joules dans l’ensemble des câbles.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Câbles de 1 km | Rayon r (mm) | Section utile (mm²) | R à 50 Hz | Pertes joules par km |
| 1200 A dans 1200 mm² | 19.5 | 1035 (SU ≈ 86 % de S) | 29.0 mΩ | Pj = R.I² = 41.8 kW / km |
| 2x 600 A dans 600 mm² | 13.8 | 593 (SU ≈ 99 % de S) | 50.6 mΩ | Pj = 2.R.I² = 36.5 kW / km |
| 3x 400 A dans 400 mm² | 11.3 (r < δ) | 400 (SU ≈ 100 % de S) | 75.0 mΩ | Pj = 3.R.I² = 36.0 kW / km |

1. Discutez alors le choix de la section des câbles.

On voit que l’effet de peau réduit d’autant plus la section utile que la section de départ est grande. Cela n’empêche pas les plus gros câbles d’avoir la résistance la plus faible. Cependant, le terme I² des pertes joules est le plus significatif et nous oriente vers le choix de 2 ou 3 câbles par phase pour minimiser les pertes joules.

En 400 mm², le rayon étant inférieur à l’épaisseur de peau, le courant pénètrera dans la totalité du conducteur.

**Exercice 5 :** Chute de tension dans une ligne aérienne

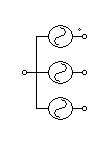
Cet exercice aborde la chute de tension occasionnée par la ligne de transport.

Une ligne triphasée moyenne tension de 50 km alimente un récepteur triphasé équilibré qui consomme une puissance active P1 de 1.50 MW et impose un facteur de puissance k1 de 0.9. La valeur efficace de la tension entre phases à l'arrivée de la ligne est UA = 20 kV, sa fréquence est 50 Hz.

En plus de sa résistance, la ligne a une autre caractéristique qui est son inductance par unité de longueur.

Ainsi c**haque fil de ligne** a une résistance de 220 mΩ / km et une inductance de 1.2 mH / km.

* Le but est de calculer la valeur efficace UD de la tension composée au départ de la ligne.



i(t)

uD (t) R L uA (t) P1 = 1.5 MW

R L k1 = 0.90

R L

1. Exprimez et calculez la valeur efficace de l'intensité I du courant dans un fil de ligne.
2. Exprimez et calculez la puissance réactive Q1 absorbée par la charge.
3. Exprimez et calculez :

* La résistance R et l’inductance L pour chaque fil de ligne de longueur 50 km.

et

* Les puissances active P2 et réactive Q2 consommées par la ligne.

et

4. Pour l'ensemble {ligne + récepteur}, exprimez et calculez :

* Les puissances active PT et réactive QT transportées.

A l’aide du théorème de Boucherot on écrit : PT = P1 + P2 = 1.58 MW et QT = Q1 + Q2 = 857 kvar

* La puissance apparente ST transportée.

5. Déduisez-en la valeur efficace de la tension entre phases UD au départ de la ligne ainsi que la chute de tension relative ΔU/UD.

La chute de tension relative ΔU/UD, admissible sur le réseau moyenne tension (MT) est de 7.5 %.

6. Cette contrainte est-elle respectée ? OUI

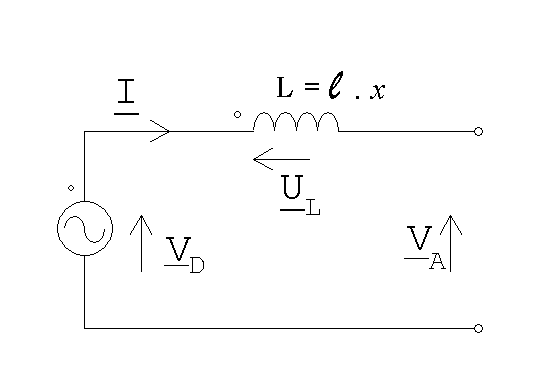
*Dans les exercices 6 et 7, on étudiera une ligne de transport 400 kV. Pour ces lignes, on utilise des câbles de 570 mm² dont les caractéristiques sont 30 m*Ω */ km et 1.1 mH /km. Aussi le caractère inductif de la ligne sera largement prépondérant et par conséquent on négligera la résistance de la ligne.*

**Exercice 6 :** Chute de tension en fonction de la distance

La ligne triphasée étant équilibrée, l’étude de la chute de tension se fera sur les tensions simples.

1. **Etude de la chute de tension en fonction de la distance au site de production**

Le schéma de l’ensemble source, ligne et récepteur est le suivant :



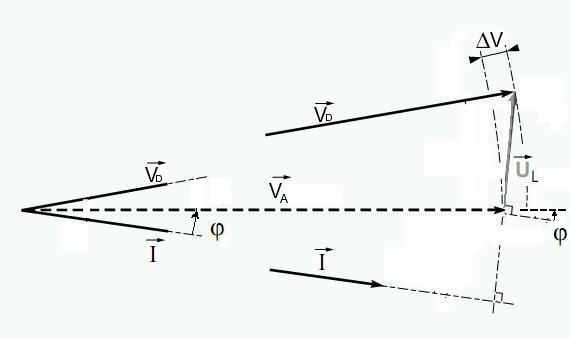
On note *x*, la distance en km entre la centrale et le récepteur.

Récepteur Pour la ligne, on donne l’inductance linéique : l = 1.1 mH/km.

Le récepteur est globalement inductif.

On a cos φ = 0.90, le facteur de puissance du récepteur.

Au départ de la ligne, on donne VD = 400 kV /√3 = 230 kV et la fréquence est *f* = 50 Hz.

A.1. Exprimez UL en fonction de l, *x*, I et ω. UL = j. l *x.* ω. I

A.2. Exprimez VA en fonction de VD, l, *x*, I et ω. VA = VD – UL = VD - j. l *x* ω. I

On donne l’allure de la représentation de Fresnel

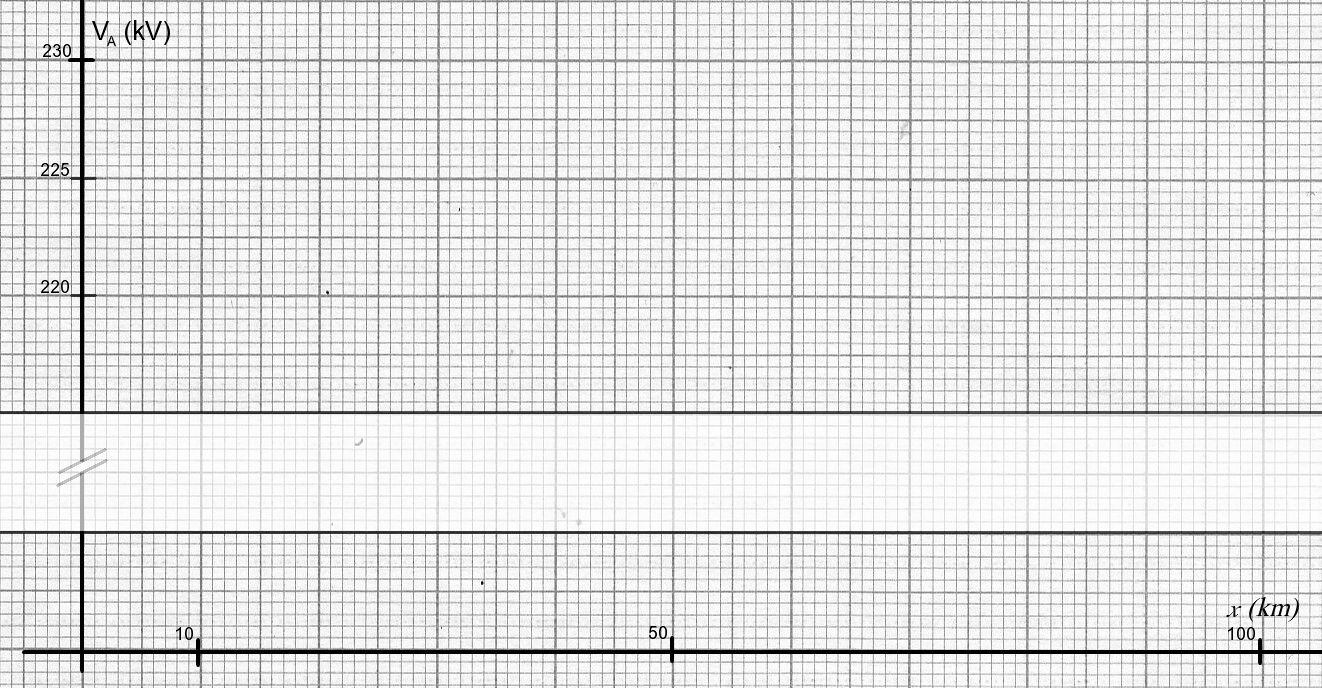
des vecteurs .

A.3. En confondant ΔV avec la projection sur l’axe horizontal de UL, établissez VA = VD - UL.sin(φ).

La projection de UL sur l’axe horizontal est UL cos (π/2- φ) = UL sin (φ)

d’où VA = VD - UL.sin(φ)= VD - l *x.* ω. I.sin (Acos(0.9)) = 230 – 0.125 *x (en kV avec x en km)*

A.4. On donne I = 830 A. Tracez alors VA = *f* (*x*) en calculant un point tous les 20 km.



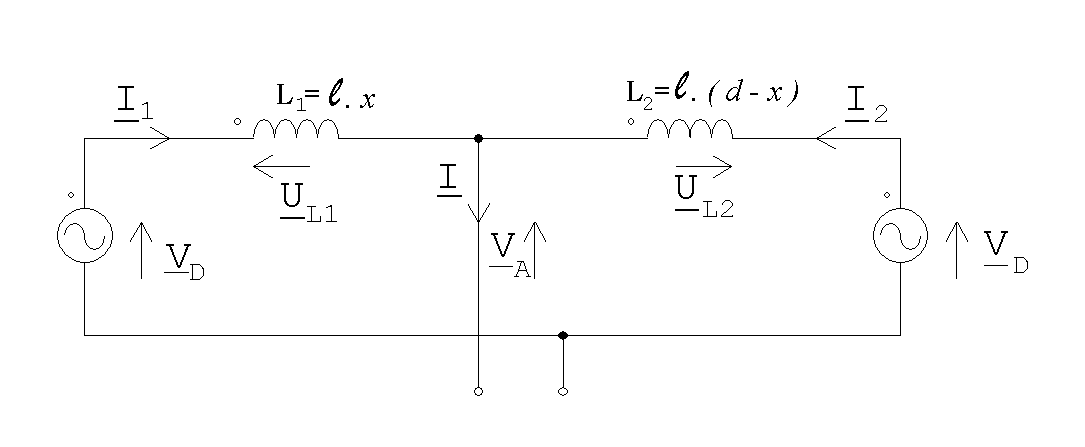
Sur le réseau HT la tension composée ne doit descendre en aucun point en deçà de Umin = 380 kV.

A.5. A partir de quelle distance cette contrainte n’est-elle plus respectée ?

On calcule Vmin = 380 kV /√3 = 220 kV ; VA = 220 kV est atteint lorsque *x* = 80 km

1. **Interconnexion des centrales**

Nous allons voir dans cette partie que la connexion de plusieurs centrales permet également de limiter la chute de tension en ligne. On note *d* la distance entre les deux centrales.

0 x d (km)

Récepteur

B.1. Exprimez VA en fonction de VD, I1, l, *x* et ω. VA = VD – UL1 = VD - j. l *x* ω. I1

B.2. Exprimez VA en fonction de VD, I2, l, *d*, *x* et ω. VA = VD – UL2 = VD - j. l (*d*-*x)* ω. I2

On fait l’hypothèse que les tensions aux deux extrémités de la ligne sont synchrones : même valeur efficace, même fréquence, même phase. Cela nous amène à écrire que la tension aux bornes de l’ensemble de la ligne est nulle.

B.3. Déduisez de l’hypothèse précédente une relation entre I1, I2, *d* et *x*.

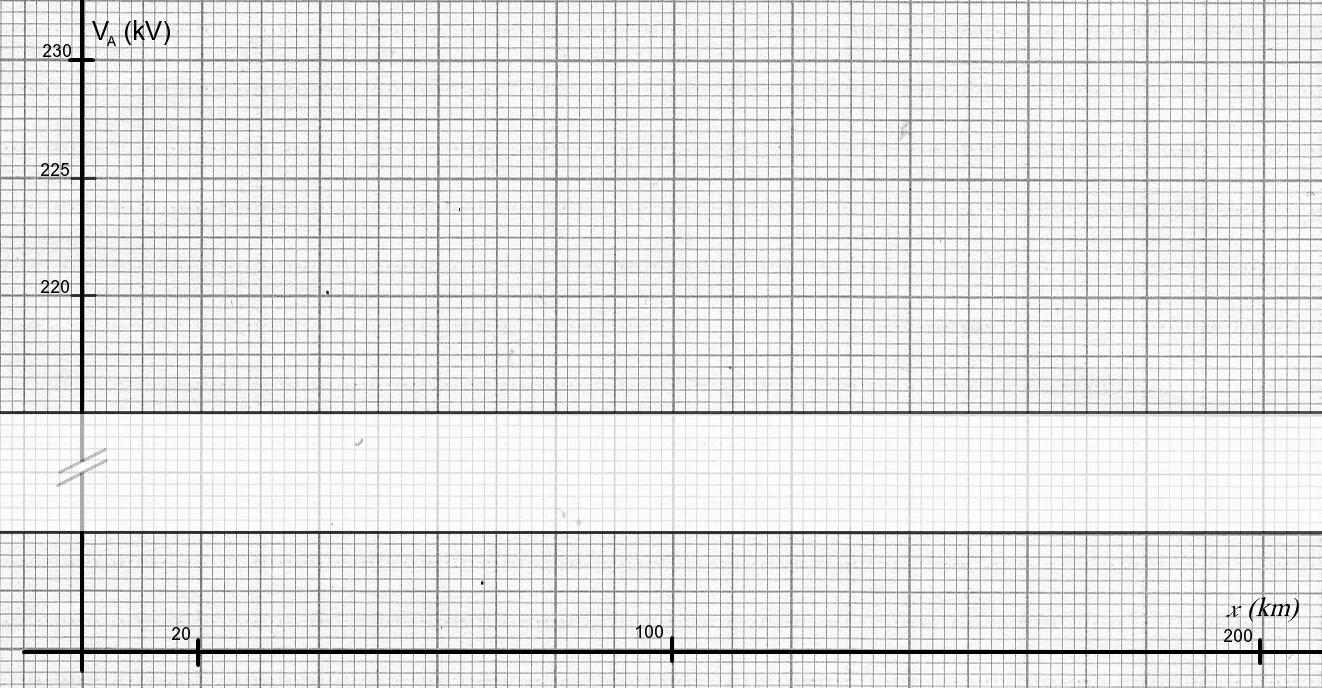
La tension aux bornes de la ligne est nulle. On a donc UL1 = UL2 soit l *x* ω. I1 = l (*d*-*x)* ω. I2 d’où

B.4. A l’aide de la loi des nœuds, exprimez I1 en fonction de I, *d* et *x*.

La loi des nœuds donne : d’où

B.5. Avec la relation VA = VD - UL1.sin(φ), tracez VA = *f* (*x*) avec I = 60 A, cos φ = 0.9 et d = 200 km.

VA = VD - UL1.sin(φ)= VD - l *x* ω.I1.sin (Arccos(0.9)) = 230 – 0.125. *x.(d-x )/d (en kV avec x en km)*



B.6. La tension minimale est-elle respectée en tout point ? VAmin = 380 kV /√3 = 220 kV. Oui, VA > 220 kV en tout point !

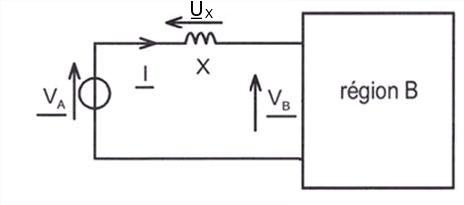
**Exercice 7** : Optimisation des performances d’une ligne

Le réseau triphasé 400 kV / 50 Hz relie deux régions A et B. La ligne étant équilibrée, l’étude se fera en monophasé.

On ne prendra pas en compte le caractère résistif de la ligne.

1. **Puissance transportée par une ligne.**

Dans cette partie on cherche la puissance maximale que peut transporter la ligne.

φA est le déphasage de VA par rapport à I : φA =

φB est le déphasage de VB par rapport à I : φB =

θ est le déphasage de VA par rapport à VB : θ =

X = L ω est la réactance de la ligne

Figure 1

**A.1. Puissances actives et réactives : relations générales**

A.1.1 A partir des conventions choisies précisez la signification des puissances PA, PB, QA et QB en fonction de leur signe.

Région A en convention générateur (PA, QA>0 fournies ou PA, QA<0 reçues)

Région B en convention récepteur (PB, QB>0 reçues ou PB, QB<0 fournies)

A.1.2 Exprimez la puissance active PA fournie par la région A en fonction de VA, I et φA.

A.1.3 Exprimez la puissance active PB reçue par la région B en fonction de VB, I et φB.

A.1.4 Quelle est la puissance active consommée par la ligne ? Quelle est la relation entre PA et PB ? PX = 0 soit PA = PB

A.1.5 Exprimez la puissance réactive QA fournie par la région A en fonction de VA, I et φA puis de PA et φA.

A.1.6 Exprimez la puissance réactive QB reçue par la région B en fonction de VB, I et φB puis de PB et φB.

A.1.7 Exprimez la puissance réactive QX consommée par la ligne de transport triphasée.

A.1.8 Quelle relation y a-t-il entre QA, QB et QX ? Quelle relation y a-t-il entre φA, φB, et θ ?

Théorème de Boucherot QA = QX + QB ;

**A.2. La région B est résistive (φB = 0). Cas général VB < VA**

A.2.1 Quelle est ici la relation entre φA et θ ? Exprimez alors PA en fonction de VA, I et θ.

A.2.2 Ecrivez la relation entre VA, VB, X et I. VA = VB – UX = VB – j.XI

A.2.3 Tracez l’allure du diagramme de Fresnel, prenant à l’horizontal, et dans le cas où est en avance sur . Voir ci-dessous

A.2.4 A l’aide des relations trigonométriques dans le triangle, montrez que l’on a . En projetant sur .

A.2.5 Déduisez-en que Avec les relations du A.2.1 et A.2.4

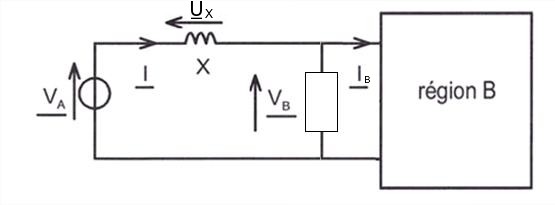
A.2.6 Pour quelle valeur de θ, la puissance active PA transmissible est-elle maximale ? sin (2θ) = 1 pour θ = π /4.

A.2.7 Calculez la puissance active maximale transmissible et VB(VA = 230 kV et X = 130 Ω) Ptr =PA (θ = π /4) = 205 MW

1. **Contrôle de la tension en bout de ligne : VB = VA. Limites**

**B.1. Contrôle de la tension**

Un dispositif placé en bout de ligne assure le contrôle de la tension (VB = VA). Ce dispositif ne consomme pas de puissance active de sorte que l’on a toujours PB = PA.

La région B est résistive :

φ le déphasage de VB par rapport à IB est nul : φ = = 0

Par contre la région B’ {région B + contrôle de la tension} présente un déphasage non nul φB de VB par rapport à I : φB = ≠ 0.

Dispositif de contrôle de la tension Région B'

B.1.1 Tracez l’allure du diagramme de Fresnel à l’aide des indications suivantes :

* Prenez comme origine des phases.
* et ont même origine. Sachant que VB = VA , sur quelle figure géométrique se trouve l’extrémité de  ? Sur un cercle de rayon 230 kV
* est en avance sur (θ > 0). Placez le vecteur (allure) et déduisez-en le vecteur puis la direction de .
* Vous ferez figurer les angles φA, φB et θ. On a ; va donc de l’extrémité de à celle de

B.1.2 Quelle propriété a le triangle formé par les vecteurs ? Le triangle est isocèle car VB = VA

B.1.3 Quelle relation y a-t-il alors entre φA et φB ? Exprimez alors φA et φB en fonction de θ. φA = - φB = θ / 2

B.1.4 En projetant les vecteurs et à la verticale, montrez que l’on a

Sur la figure : CD = VA. sin θ = UX.sin((π- θ)/2) = UX.sin(π/2- θ/2) = UX.cos(θ/2) = XI.cos(φA)

B.1.5 Montrez alors que l’on a

B.1.6 Pour quelle valeur de θ, la puissance active PA transmissible est-elle maximale ? PA est maximale pour θ = π /2

Application numérique**:** VB = VA = 230 kV et X = 130 Ω

B.1.7 Calculez la puissance active maximale transmissible

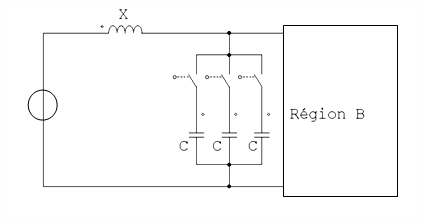
B.1.8 Comparez les valeurs des puissances actives maximales transmissibles et Ptr du A.2.5.

B.1.9 Quel est alors le comportement global (inductif, résistif, capacitif) de la région B’ ? La région B’ est capacitive φB < 0

La région B ayant un facteur de puissance égal à 1, on a QB = 0.

On notera QB’ la puissance réactive reçue par le dispositif de contrôle de la tension (en convention récepteur).

B.1.10 Calculez QA , QB’ et QX , lorsque la puissance active transmise est maximale.

Le dispositif de contrôle de la tension, connecté en tête de la région B, et permettant d’injecter du réactif, est un gradin de 3 condensateurs chacun de capacité C = 8 µF.

I

VA VB

Par la suite on notera QC = - QB’ la puissance réactive fournie par le dispositif de contrôle de la tension.

Initialement la tension VB est de 163 kV (situation du A.2.7). On connecte sur le gradin 1 condensateur.

B.1.11 Calculez la puissance réactive QC fournie au réseau. QC = - QB’ = Cω.VB² = 55 Mvar

Au bout de 125 ms, la tension VB passe alors à 190 kV et l’on connecte le 2ème condensateur.

B.1.12 Calculez la puissance réactive QC fournie au réseau. QC = - QB’ = 2.Cω.VB² = 181 Mvar

Après le régime transitoire, VB atteint 210 kV et l’on connecte le 3ème condensateur.

B.1.12 Calculez la puissance réactive QC fournie au réseau. QC = - QB’ = 3.Cω.VB² = 332 Mvar

Après le régime transitoire, VB finira à 230 kV et on aura alors QC = 410 Mvar.

On voit que l’effet des condensateurs dépend du niveau de tension : la connexion d’un condensateur sur le gradin fourni 55 Mvar sous 163 kV, la connexion d’un condensateur supplémentaire sur le gradin fourni 181 - 55 = 126 Mvar sous 190 kV et 151 Mvar sous 210 kV. Ainsi en cas de chute de tension l’effet des gradins déjà connectés sera diminué.

**B.2. Limites**

B.2.1 En projetant le vecteur sur la direction de , montrez que la valeur efficace de l’intensité du courant en ligne est

Le triangle formé par les vecteurs est isocèle. La hauteur issue de O est la médiatrice de UX.

On a

B.2.2 Calculez alors la valeur efficace I de l’intensité du courant en ligne pour la valeur de θ permettant de transporter la puissance maximale.

I (θ = π/2) = 2510 A

**Limite thermique**

En réalité, afin de limiter l’échauffement des conducteurs, l’intensité du courant en ligne ne peut pas dépasser la valeur efficace nominale In = 1450 A.

B.2.3 Quelle valeur de θn conduit à la limite thermique ?

θn =2. Arcsin (XIn/2VA) = 48 °

B.2.4 Précisez alors la valeur de Pn la puissance active nominale que peut transporter la ligne.

**Limite de stabilité**

En pratique, l’angle θs ne peut pas dépasser la valeur limite de 18° afin de ne pas compromettre la stabilité du réseau.

B.2.5 Calculez la puissance active PS transmissible à la région B lorsque θ = 18°.

B.2.6 Donnez dans ce cas la valeur efficace IS de l’intensité du courant en ligne.

B.2.7 Quelle conséquence la limite de stabilité impose-t-elle ?

Cela réduit fortement la capacité de transport de la ligne.

B.2.8 Comparez les valeurs des puissances actives maximales transmissibles pour la valeur de θ garantissant la stabilité du réseau :

* Sans contrôle de la tension (relation établie au A.2.5)
* Avec contrôle de la tension(relation établie au B.2.5)

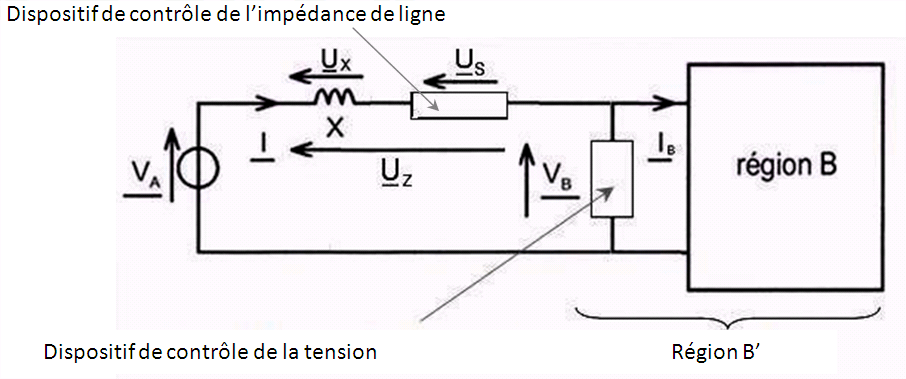
Avec θ faible, la chute de tension reste faible et le contrôle de tension ne permet d’augmenter que de 5 % la puissance transmissible.

1. **Modification de l’impédance de ligne**

Afin d’améliorer les capacités de transport de la ligne sans compromettre la stabilité du réseau ni dépasser la limite thermique, on insère en série avec la ligne un dispositif permettant de modifier son impédance.

Ce dispositif est un condensateur fixe de capacité C. Les relations établies dans la partie A restent valables.

**L’objectif est de pouvoir transporter 300 MW.**

On note :

jX l’impédance propre de la ligne

ZS l’impédance série

Z l’impédance équivalente de la ligne

La région B est résistive et le contrôle de tension assure

VB = VA = 231 kV avec φB = ≠ 0

C.1. Montrez que l’impédance équivalente de la ligne est Z = jX + ZS et que l’on a Z = |X – ZS|

Le dispositif capacitif (impédance : -j.ZS) est en série avec la ligne : Z = jX + ZS = j.X + -j.ZS = j.( X – ZS)

C.2. L’ensemble { ligne + contrôle d’impédance } reste globalement inductif. Quel est le signe de θ ? θ > 0

C.3. Tracez l’allure du diagramme de Fresnel à l’aide des indications suivantes :

* Prenez comme origine des phases.
* et ont même origine. Sachant que VB = VA , sur quelle figure géométrique se trouve l’extrémité de  ? Sur un cercle de rayon 230 kV
* Placez le vecteur (θ = 18°) et déduisez-en le vecteur puis la direction de . Vous ferez figurer les angles φA, φB et θ.

C.4. En procédant comme au B.1.4, montrez que

C.5. Montrez que la puissance active transmise est Voir B.1.4 et B.1.5

C.6. Montrez que l’intensité du courant dans la ligne est alors Même raisonnement qu’en B.2.1

C.7. Que doit valoir l’impédance équivalente Z pour que la puissance maximale transmissible soit de 300 MW avec θ = 18° ?

Pour avoir on doit avoir

C.8. Quelle sera alors la valeur efficace du courant en ligne ? On aura alors I = 1314 A

C.9. Cette valeur est-elle compatible avec la limite thermique ? La limite thermique est à In = 1450 A

C.10. Calculez alors l’impédance ZS du dispositif de contrôle d’impédance. On a toujours X = 130 Ω.

La ligne est inductive. on a alors Z = j.Z = j.( X – ZS). D’où ZS = X- Z = 75 Ω.

C.11. Déduisez-en la valeur de C. ZS = 1/Cω alors C = 1/ ZSω = 42.4 µF

C.12. Déduisez-en la valeur efficace US de la tension aux bornes du dispositif. US = ZS . I = 98.6 *kV*

C.13. Ajoutez alors les vecteurs sur le diagramme de Fresnel.

C.14. Calculez dans ce cas QA et QB’. Calculez QZ, QX et QS.

et

**Exercice 8** : Câbles souterrains

Le transport de l’électricité n’est pas toujours possible par ligne aérienne. C’est par exemple le cas lorsque la liaison se fait entre un continent et une île (Italie – Corse et Sardaigne). Dans ce cas, on utilise des câbles.

On considère un câble de 50 km de long. Nous calculerons d’abord sa résistance, puis son inductance, et pour terminer sa capacité.

L’âme centrale en cuivre (ρcu = 17.10-9 Ω.m) a pour section 900 mm².

1. En continu, quelle est la résistance totale R0 du câble ? (cf. exercice 3)

On calcule le rayon de l’âme : r = 16.9 mm puis sa résistance R0 = ρ l/S = 0.94 Ω

2. En alternatif (50 Hz), quelle est la résistance totale R du câble ? (cf. exercice 4)

A 50 Hz, l’épaisseur de peau est .

La section utile sera = 716 mm² et par conséquent R = ρ l/Su = 1.18 Ω

L’inductance linéique d’un tel câble est l = 0.4 mH / km.

3. Calculez l’inductance totale L du câble puis sa réactance X à 50 Hz. L = 50. l =20 mH et X = Lω = 6.28 Ω

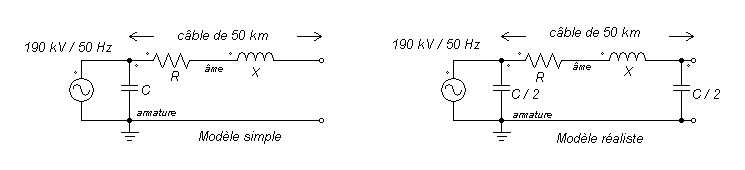
4. Que vaut la réactance en continu ? En continu ω = 2π.*f* = 0 rad/s et donc X = 0 Ω

L’âme et l’armature, séparées par l’isolant, forment les 2 faces d’un condensateur. Avec la permittivité du vide et εr la permittivité relative de l’isolant (εr =4), Rext (Rext = 33.5 mm) et Rint les rayons exterieur et intérieur de l’isolant (dans la même unité), on a l’expression de la capacité linéique du câble:

5. Calculez la capacité C*l* d’un mètre de câble (capacité linéique) puis la capacité totale C du câble.

et C = 50.103.C*l* = 16.3 µF

6. Le câble est alimenté en alternatif 190 kV / 50 Hz. Calculez, à partir du modèle de votre choix, l’intensité

 du courant appelé par le câble à vide (l’autre extrémité n’appelant aucune puissance).

Pour le modèle simple :

Le condensateur d’impédance Zc = 1/Cω = 196 Ω court-circuite la source. On a donc IV = 190 kV / Zc = 971 A

Pour le modèle réaliste :

Le condensateur (C/2) d’impédance Zc/2 = 392 Ω est en série avec X = 6.28 Ω et R = 1.18 Ω. L’impédance équivalente est Zeq ≈ 390 Ω. A vide, l’impédance Zv aux bornes de la source est Zv = Zeq // Zc/2 ≈ 195 Ω.

On aura alors IV = 190 kV / ZV ≈ 975 A

7. Ce courant est-il utile pour le transport d’énergie ? NON

8. Donnez le modèle du câble en continu. Peut-il y avoir un intérêt à transporter l’électricité en continu ?

En continu X = 0, Zc est infinie, R = R0. Le câble est équivalent à R0. On a IV = 0.