

46

Transport de l'énergie électrique

Habituellement, le transport de l'énergie électrique ne suscite pas le même intérêt que sa production et son utilisation, de sorte qu'on a souvent tendance à négliger l'étude de ce sujet important. Pourtant, les investissements humains et matériels affectés au transport dépassent largement les investissements consacrés au secteur de la production.

On sait que le transport de l'énergie électrique se fait sur des conducteurs tels que les lignes aériennes, les câbles souterrains ou le simple fil de raccordement sortant d'un téléviseur. Malgré leur simplicité apparente, ces conducteurs cachent des propriétés importantes qui influent grandement sur le transport de l'énergie électrique. Dans ce chapitre, nous étudierons ces divers facteurs pour tous les types de lignes: haute tension, basse tension, grande puissance, faible puissance, aériennes et souterraines.

46.1 Organisation d'un réseau de transport d'énergie

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

1. Assurer au client la puissance dont il a besoin.
2. Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 10\%$ de la tension nominale.

3. Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 0,1$ Hz.
4. Fournir l'énergie à un prix acceptable.
5. Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
6. Veiller à la protection de l'environnement.

Nous avons tracé à la Fig. 46-1, le schéma élémentaire d'un réseau électrique servant à transporter l'énergie. Il est composé de deux centrales de production G1 et G2, de quelques postes de transformation, d'un poste d'interconnexion et, enfin, de charges commerciales, résidentielles et industrielles. L'énergie est transportée sur des lignes à *très haute tension* (THT), à *haute tension* (HT), à *moyenne tension* (MT) et à *basse tension* (BT) selon une échelle de tensions recommandées par divers organismes de normalisation et dont les valeurs sont données dans le tableau 46-1.

Les compagnies d'électricité divisent leur réseaux en trois grandes catégories: 1) le réseau de transport; 2) le réseau de répartition; et 3) le réseau de distribution.

Le réseau *de transport* (115 kV à 765 kV) comprend les centrales, ainsi que les lignes et les postes de transformation issus de celles-ci.

Le réseau *de répartition* (115 kV à 315 kV) comprend les lignes de transport et les postes de transformation

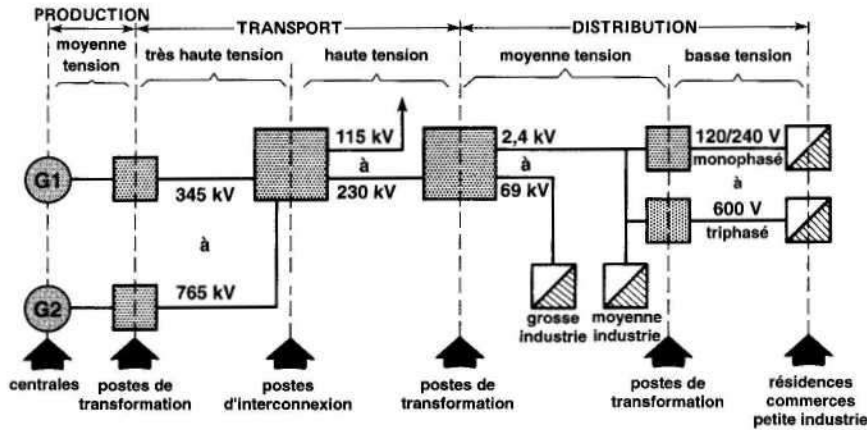


Figure 46-1
Organisation d'un réseau électrique.

intermédiaires entre le réseau de transport et le réseau de distribution.

Le réseau de distribution comprend les lignes et les postes de transformation servant à alimenter les clients. Ce réseau est composé de deux parties: le réseau de distribution à moyenne tension (2,4 kV à 69 kV) et le réseau de distribution à basse tension (120 V à 600 V).

Les postes de transformation servent à augmenter ou à abaisser la tension et à régulariser celle-ci au moyen de compensateurs statiques, de réactances capacitives ou inductives et de transformateurs à prises variables. Ils contiennent aussi les disjoncteurs, fusibles et parafoudres destinés à protéger les appareils et le réseau.

Les postes d'interconnexion servent à relier le réseau avec d'autres réseaux afin d'augmenter la stabilité de l'ensemble et de permettre des échanges d'énergie.

46.2 Types de lignes

Le genre de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants:

1. puissance active à transporter
2. distance de transport
3. coût
4. esthétique, encombrement et facilité d'installation

Nous distinguons quatre types de lignes: 1) lignes de distribution à basse tension (BT); 2) lignes de distribution à moyenne tension (MT); 3) lignes de transport à

haute tension (HT); 4) lignes de transport à très haute tension (THT).

1. Lignes de distribution BT: ce sont les lignes et la filerie installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc. Le tableau électrique d'entrée constitue la source, et les lignes sont habituellement des câbles ou des barres omnibus fonctionnant à des tensions inférieures à 600 V.

Dans certaines régions métropolitaines, on utilise un réseau maillé comprenant une grille de câbles souterrains fonctionnant à 600 V ou moins. Ce réseau maillé assure un service impeccable, car le bris d'un ou même de plusieurs câbles n'interrompt pas la distribution de courant aux clients. Cependant, aujourd'hui, on préfère employer un réseau de distribution radial à moyenne tension dans les grandes villes.

2. Lignes de distribution MT: ce sont des lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité. Leur tension est comprise entre 2,4 kV et 69 kV.

3. Lignes de transport HT: ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération. Elles sont constituées de fils aériens ou de câbles souterrains fonctionnant à des tensions généralement inférieures à 230 kV. Dans cette catégorie, on trouve aussi les lignes servant à échanger de l'énergie entre deux grands réseaux et à augmenter la stabilité de l'ensemble.

4. Lignes de transport THT: ce sont les lignes qui relient les centrales hydrauliques éloignées aux centres d'utilisation. On les place dans une catégorie distincte à cause de leurs propriétés spéciales. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV. Les lignes à courant continu à haute tension sont également incluses dans ce groupe. On donnera dans le chapitre 49 un aperçu du transport à courant continu.

46.3 Tensions normalisées

Afin de réduire le coût de l'appareillage de distribution et pour faciliter sa protection, on a établi certaines normes concernant les tensions des lignes de transport. Ces normes, données dans le tableau 46-1, reflètent la variété des tensions présentement en vigueur en Amérique du Nord. Les tensions identifiées par des chiffres gras sont celles utilisées de préférence. Sauf indication contraire, toutes les tensions sont triphasées.

RÉALISATION PRATIQUE D'UNE LIGNE AÉRIENNE

46.4 Composants d'une ligne

Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs et de supports.

1. Conducteurs. Les conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont toujours nus. On emploie presque exclusivement des câbles en cuivre et des câbles en aluminium avec âme en acier (ACSR «Aluminum cable steel reinforced»); ces derniers sont généralement les plus économiques (Fig. 46-2).

Les joints entre conducteurs doivent posséder une résistance faible. Ces joints sont ordinairement faits par compression d'un manchon de jonction.

Tout comme les plaques d'un condensateur, les conducteurs d'une ligne de transport restent chargés après avoir été mis sous tension. C'est pourquoi, après avoir isolé du réseau une ligne à haute tension, on doit toujours prendre soin de relier solidement chacun de ses conducteurs à la terre afin de les décharger. Sinon, la charge qui reste prisonnière sur les conducteurs maintient des tensions dangereuses pour le personnel d'entretien.

Une autre raison de cette mise à la terre est de court-circuiter les tensions qui peuvent être induites dans une ligne en réparation lorsqu'elle longe une autre ligne qui, elle, est alimentée. Le couplage inductif et capacitif entre les deux lignes peut induire une tension très élevée dans la ligne ouverte.

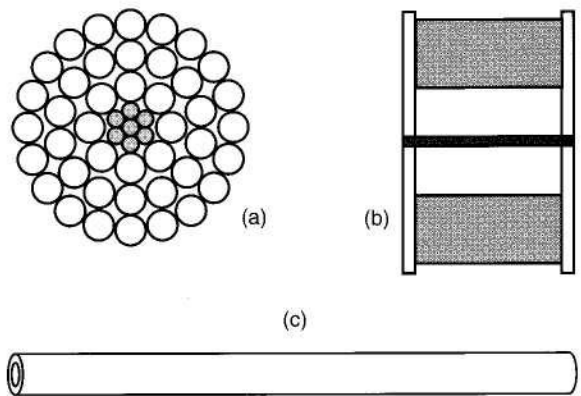


Figure 46-2

a. Grandeur nature d'un conducteur aluminium-acier (ACSR) de calibre 1033,5 kcmil, composé d'un noyau de 7 brins d'acier ayant un diamètre de 2,21 mm. La partie en aluminium est composée de 42 brins de 3,99 mm répartis sur 3 couches pour donner un conducteur dont le diamètre hors-tout est de 30,56 mm.

b. Lors de la fabrication, le conducteur est enroulé sur un tambour ayant un diamètre extérieur de 1730 mm, une largeur de 1130 mm, et un diamètre intérieur de 710 mm. Le tout loge une longueur de câble de 1,86 km, pesant 3,1 tonnes.

c. Le manchon compressible en aluminium servant à relier deux conducteurs ACSR de 1033,5 kcmil a une longueur de 760 mm, un diamètre extérieur de 54 mm et pèse 3,2 kg.

2. Isolateurs. Les isolateurs servent à supporter et à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et de la terre. Ils sont presque toujours en porcelaine.

Au point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement. Afin d'augmenter leur distance de contournement, on leur donne une forme de jupe. Au point de vue mécanique, ils doivent être assez résistants pour supporter les forces énormes dues au poids et à la tension mécanique des conducteurs.

Les isolateurs sont de deux types principaux: rigides et à chaîne (Fig. 46-3a et 46-3b). La partie supérieure des isolateurs rigides sur laquelle est fixé le conducteur est constituée d'une ou de plusieurs jupes en porcelaine. Une tige vissée à l'intérieur des isolateurs permet de les fixer à un support.

Pour des tensions supérieures à 70 kV, on emploie toujours des chaînes d'isolateurs constituées d'un certain nombre d'éléments en porcelaine réunis par des piè-

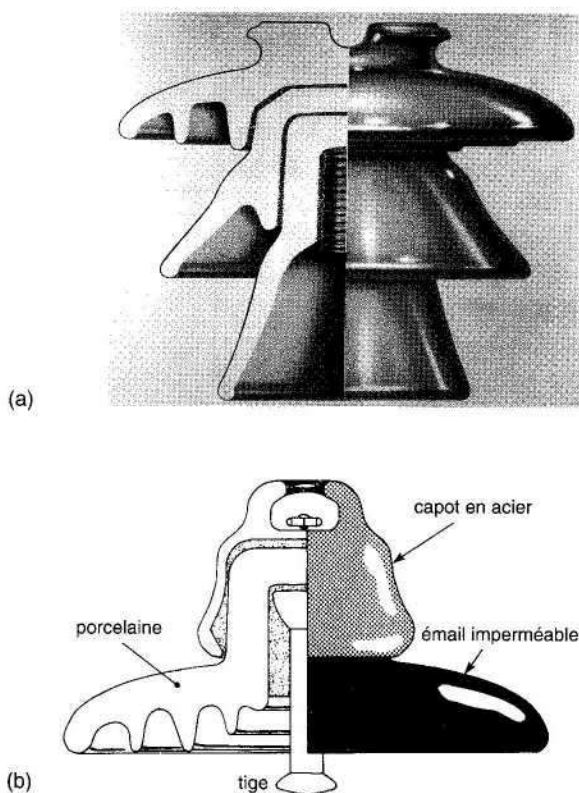


Figure 46-3a,b

a. Vue en coupe d'un isolateur rigide à 69 kV. Tension de tenue aux ondes de choc: 270 kV; tension de rupture à 60 Hz par temps humide: 125 kV (*gracieuseté de Canadian Ohio Brass Company Ltd*).

b. Vue en coupe d'un élément d'isolateur à chaîne. Diamètre: 254 mm; tension de tenue aux ondes de choc: 125 kV; tension de rupture à 60 Hz par temps humide: 50 kV.

ces métalliques. Le nombre d'éléments varie avec la tension: pour une tension de 110 kV, on en admet de 4 à 7, pour une tension de 230 kV, de 13 à 16. La Fig. 46-3c montre les isolateurs composés de quatre chaînes de 35 éléments, utilisés sur une ligne à 735 kV.

3. Supports. Les supports maintiennent les conducteurs à une hauteur convenable au-dessus du sol par l'intermédiaire de traverses ou bras.

Pour les lignes de moins de 70 kV, on peut employer comme supports de simples poteaux en bois; pour des tensions supérieures, le bois n'est utilisé que sous forme de portiques (Fig. 46-4). Le bois est souvent injecté de

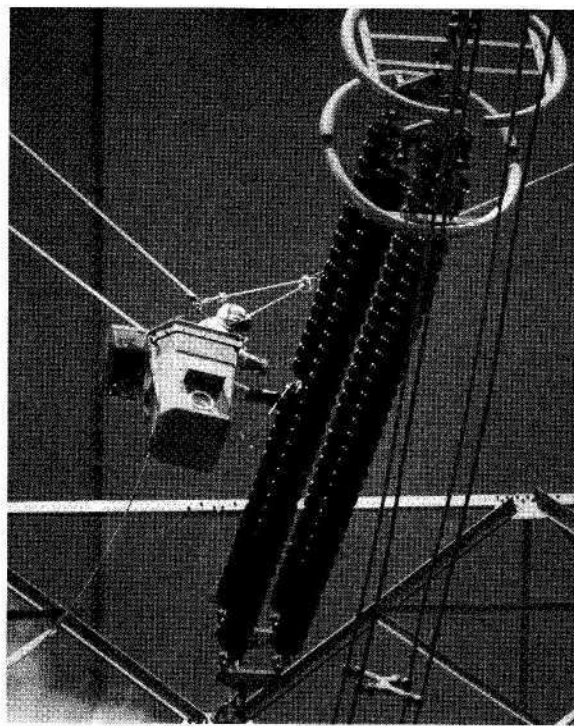


Figure 46-3c

Monteur de ligne travaillant sur une ligne vivante à 735 kV. Il porte une tenue conductrice spéciale afin que son corps ne soit pas soumis à des différences de potentiel trop importantes. Dans cette position, son potentiel par rapport à la terre est de l'ordre de 200 kV (*gracieuseté d'Hydro-Québec*).

créosote ou de certains sels métalliques pour le préserver contre la pourriture. Pour les lignes à très haute tension, on emploie toujours des pylônes métalliques. Ils sont constitués de fers cornière boulonnés (Fig. 46-6).

La distance entre les fils conducteurs doit être suffisante pour empêcher leur contact, même sous l'action d'un vent violent. L'écartement entre les fils doit être d'autant plus grand que la distance entre les pylônes est plus grande et que la tension de la ligne est plus élevée. Par exemple, l'écartement entre les phases est habituellement de 12 m sur les lignes à 735 kV.

TABLEAU 46-1 TENSIONS NORMALISÉES DES RÉSEAUX
(valeurs en gras préférées)

classe	tension nominale du réseau	
	3 fils	4 fils
basse tension	120/240 (monophasé)	
B.T.	480 600	120/208 277/480 347/600
moyenne tension	2400 4160 4800 6900	
M.T.	13 800 23 000 34 500 46 000 69 000	7200/12 470 7620/ 13 200 7970/13 800 14 400/24 940 19 920/34 500
haute tension	115 000 138 000	
H.T.	161 000 230 000	
très haute tension	345 000 500 000	
T.H.T.	735 000 765 000	

Approuvé le 4 septembre 1975 par le Conseil des normes du IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Voir aussi ANSI C84-1a-1973 et C92.2-1974

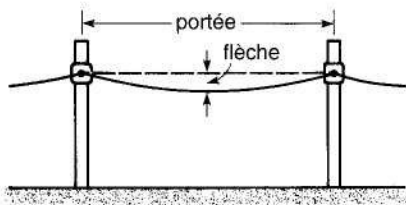


Figure 46-5
Flèche et portée d'une ligne.

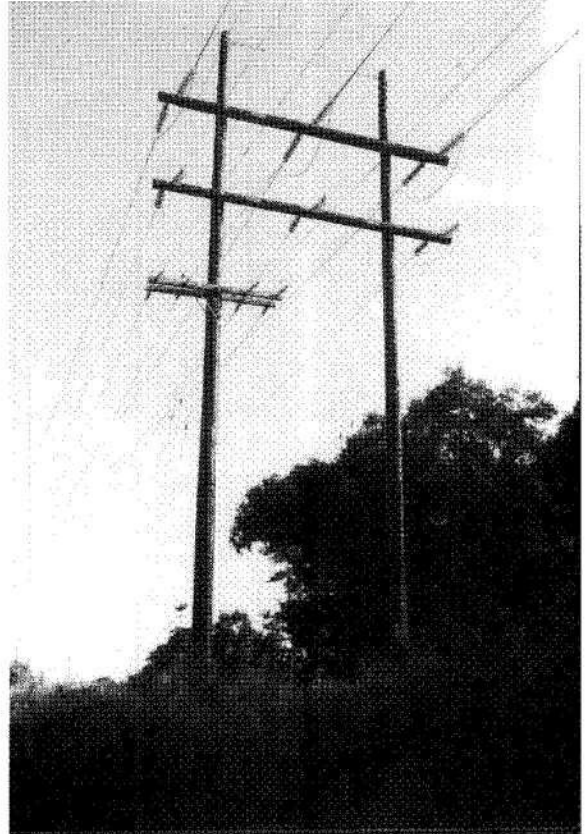


Figure 46-4
Support en portique de deux lignes triphasées de 138 kV. Le poteau de gauche supporte en plus une ligne à moyenne tension.

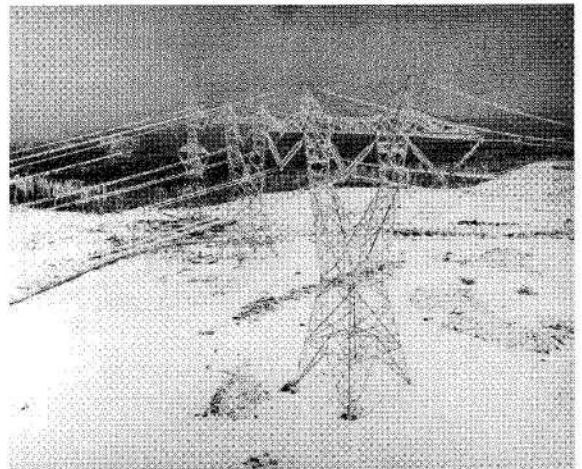


Figure 46-6
Pendant l'hiver, les pylônes doivent supporter le poids des conducteurs et la glace qui s'y accumule (*gracieuseté d'Hydro-Québec*).

46.5 Construction d'une ligne

Une fois que la section des conducteurs, la hauteur des poteaux et la distance entre les poteaux (portée) ont été déterminées, on peut procéder à la pose des conducteurs. Un fil supporté et tendu entre deux poteaux (Fig. 46-5) n'est pas horizontal; il prend plutôt une forme courbée. La distance verticale entre la droite qui joint les deux points de support et le point le plus bas d'un fil porte le nom de *flèche*. Plus le fil est tendu, plus la flèche est courte.

Avant d'entreprendre la construction d'une ligne, il importe d'en faire le calcul mécanique pour déterminer la flèche et la tension mécanique admissibles. Entre autres choses, on doit tenir compte de la température régnant au moment de la pose. D'une part, la flèche ne doit pas être trop longue à ce moment, car autrement, le fil s'allongera durant les chaleurs d'été et la distance entre son point le plus bas et le sol ne sera plus suffisante au point de vue sécuritaire. D'autre part, la tension mécanique ne doit pas être trop grande, car autrement, le fil peut se contracter pendant les froids d'hiver et devenir dangereusement tendu. De plus, le vent et le verglas (Fig. 46-6) peuvent créer des efforts supplémentaires qui risquent d'entraîner sa rupture.

46.6 Lignes galopantes

Lorsqu'une couche de verglas se dépose sur une ligne en présence de vent, la ligne se met à osciller. Si les conditions sont favorables, ces oscillations peuvent devenir très grandes; on dit alors que la ligne se met à «galoper». Ce phénomène peut produire des courts-circuits entre les phases ou la rupture des conducteurs. Pour éviter ces problèmes, on pose parfois sur les conducteurs des amortisseurs qui empêchent les oscillations de se développer.

46.7 Effet couronne – interférences radiophoniques

Les très hautes tensions électriques créent des décharges importantes autour des conducteurs (*effet couronne*). Ces décharges produisent des pertes le long de la ligne et, de plus, elles possèdent un spectre de fréquences radiophoniques qui brouille la réception sur les postes de radio et les téléviseurs situés dans le voisinage de la ligne. Pour réduire l'effet couronne, on diminue le champ électrique créé par les conducteurs en grossissant leur diamètre ou en les arrangeant en faisceaux de deux, trois ou quatre conducteurs par phase (voir Fig. 20-14, chapitre 20). Comme cet arrangement diminue aussi l'inductance de la ligne, on augmente

du même coup la puissance qu'elle peut transporter. Nous en discuterons plus loin à la section 46.21.

46.8 Pollution

La poussière, les acides, le sel et les autres polluants qu'on retrouve dans l'atmosphère se déposent sur les isolateurs et diminuent leurs propriétés isolantes. Cette pollution des isolateurs risque de produire des courts-circuits pendant les orages ou lors de surtensions momentanées. L'interruption du service et la nécessité de nettoyer ou de remplacer les isolateurs sont donc un souci constant créé par la pollution.

46.9 Fils de garde

On remarquera, sur la Fig. 46-6, que deux conducteurs non isolés sont disposés au sommet des pylônes de la ligne. Ces conducteurs, appelés *fils de garde*, servent à intercepter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tension de la ligne. Ils ne portent normalement aucun courant; pour cette raison, ils sont ordinairement en acier. On les relie solidement à la terre à chaque pylône.

L'effet de la foudre sur une ligne est expliqué au chapitre 20, section 20.16.

46.10 Mise à la terre des pylônes

On relie les pylônes des lignes de transport à des prises de terre exécutées avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance. En effet, si la foudre frappe un pylône, il ne faut pas que la chute de tension provoquée par le courant dans la prise de terre dépasse la tension de contournement des isolateurs.

Considérons une ligne triphasée à 69 kV dont les isolateurs ont une tension de tenue à l'onde de choc (BIL) de 350 kV. Elle est représentée schématiquement avec son disjoncteur à la Fig. 46-7. Imaginons que la résistance de chacune des prises de terre des pylônes soit de 20 Ω . En régime normal, la tension entre les conducteurs de la ligne et le sol est de 69 kV / 3 = 40 kV et aucun courant ne circule dans les prises de terre. Si la foudre frappe l'un des pylônes, en libérant un courant soudain, disons, de 20 kA, la chute de tension dans la prise de terre atteindrait:

$$E = 20\,000\text{ A} \times 20\ \Omega = 400\,000\text{ V}$$

La tension entre le pylône et le sol étant alors de 400 kV, la tension *des conducteurs* par rapport au sol atteindrait momentanément

$$40\text{ kV} + 400\text{ kV} = 440\text{ kV}$$

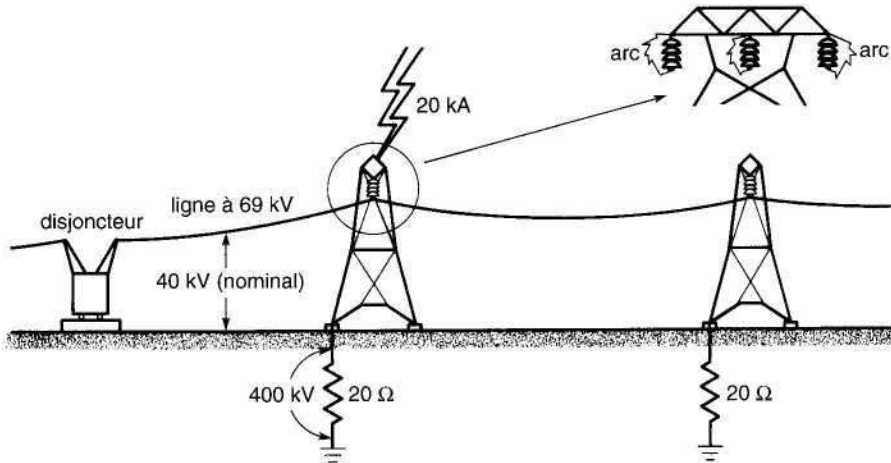


Figure 46-7
Surtension créée par un courant de foudre circulant dans la résistance de terre.

Comme cette tension est supérieure au BIL de 350 kV, elle provoquerait immédiatement un arc de contournement aux bornes des isolateurs. Cela mettrait les trois lignes en court-circuit entre elles et à la terre. Le courant de court-circuit résultant entraînerait l'ouverture du disjoncteur de protection et la mise hors service de la ligne. Vu le grand nombre d'abonnés affectés par les interruptions sur une ligne de transport, on assure une meilleure continuité de service en diminuant la résistance de la prise de terre. Dans l'exemple précédent, si la résistance de la prise de terre des pylônes avait été limitée à 3Ω seulement, l'augmentation de tension aux bornes de l'isolateur n'aurait pas dépassé:

$$E = 20\,000 \text{ A} \times 3 \Omega = 60\,000 \text{ V}$$

et elle n'aurait pas provoqué d'arc à travers les isolateurs.

Remarquer que des courants de foudre d'une intensité de 20 kA sont relativement fréquents, même s'ils ne durent que quelques microsecondes.

PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES LIGNES DE TRANSPORT

Le rôle *fondamental* d'une ligne est de transporter une *puissance active*. Si elle doit également transporter une puissance réactive, celle-ci doit être faible par rapport à la puissance active, à moins que la distance de transport ne soit courte. En plus de ces exigences, une ligne

de transport doit posséder les caractéristiques de base suivantes:

- la tension doit demeurer assez constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro et la charge nominale
- les pertes doivent être faibles afin que la ligne possède un bon rendement
- les pertes Joule ne doivent pas faire surchauffer les conducteurs

Si la ligne ne peut d'elle-même répondre à ces exigences, on doit alors ajouter de l'équipement supplémentaire afin de réaliser toutes ces conditions.

46.11 Circuit équivalent d'une ligne

Malgré leur grande diversité, les lignes possèdent des propriétés électriques communes. En effet, toute ligne possède une résistance, une réactance inductive et une réactance capacitive. Ces impédances sont réparties uniformément sur toute la longueur de la ligne si bien qu'on peut représenter la ligne par une série de sections R, L, C identiques (Fig. 46-8). Chaque section représente un tronçon de ligne d'une longueur donnée (1 km, par exemple) et les éléments r, x_L, x_C représentent les impédances correspondantes pour cette longueur.

On peut simplifier le circuit de la Fig. 46-8 en additionnant les résistances individuelles pour former une résistance totale R . De la même façon, on obtient une réactance inductive totale X_L et une réactance capacitive

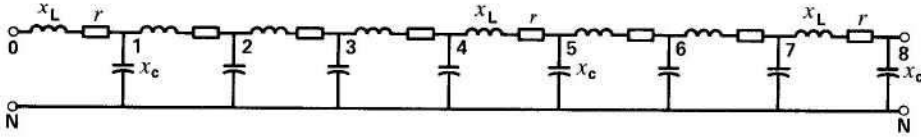


Figure 46-8
L'impédance d'une ligne de transport est composée d'une série de sections identiques.

totale X_C (en dérivation). On partage X_C en deux éléments de valeurs $2 X_C$ localisés aux deux extrémités de la ligne. Le circuit équivalent de la Fig. 46-9 donne une bonne représentation d'une ligne à 60 Hz lorsque la longueur est inférieure à 250 km. Noter que R et X_L augmentent avec la longueur de la ligne, tandis que X_C diminue avec celle-ci.

Dans le cas des lignes triphasées, le circuit équivalent ne représente qu'une seule phase. Le courant I est celui circulant dans un fil de ligne et la tension E est celle existant entre une ligne et le neutre (terre).

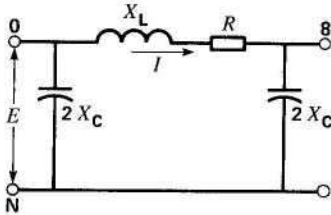


Figure 46-9
Circuit équivalent d'une ligne à 60 Hz dont la longueur ne dépasse pas 250 km.

46.12 Simplification du circuit équivalent

Parfois, on peut simplifier le circuit davantage en éliminant un, deux ou tous les éléments de la Fig. 46-9. La validité de cette simplification dépend de l'importance relative des puissances P_J , Q_L , Q_C associées à chacun des éléments par rapport à la puissance active P fournie à la charge.

En se référant à la Fig. 46-10, ces puissances sont:

- P = puissance active absorbée par la charge
- $P_J = R I^2$, puissance active dissipée dans la ligne par effet Joule
- $Q_L = X_L I^2$, puissance réactive absorbée par la ligne
- $Q_C = E^2/X_C$, puissance réactive générée par la ligne

Si l'une de ces puissances est négligeable par rapport à la puissance active P transportée, on peut négliger l'élément de circuit correspondant. Par exemple, les lignes à 600 V sont toujours courtes de sorte que X_C est très élevée. Par conséquent, E^2/X_C devient négligeable, ce qui permet de représenter ces lignes par le circuit de la Fig. 46-11.

Par contre, une ligne à 735 kV, comme celle qui relie Churchill Falls à Sept-Îles, peut être représentée par le circuit de la Fig. 46-12, car les pertes par effet Joule sont relativement faibles alors que les puissances Q_L et Q_C ne le sont pas.

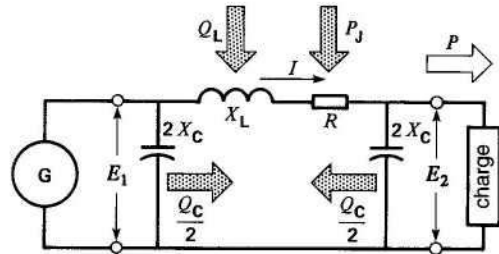


Figure 46-10
Puissances associées à une ligne de transport et sa charge.

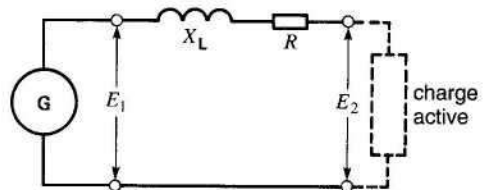


Figure 46-11
La puissance réactive capacitive d'une ligne à 600 V est négligeable par rapport aux autres puissances.

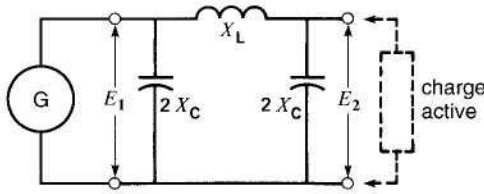


Figure 46-12
Les pertes Joule dans une ligne à 735 kV sont négligeables par rapport aux autres puissances.

46.13 Valeurs des impédances de ligne

Afin de donner l'ordre de grandeur des réactances inductives et capacitives, on présente au tableau 46-2 les valeurs approximatives de x_L et x_C pour les lignes pratiques fonctionnant à 60 Hz. Noter que la réactance capacitive des câbles souterrains est plusieurs fois plus petite que celle des lignes aériennes, et que leur réactance inductive est aussi plus petite.

Chose surprenante, les valeurs x_L et x_C par kilomètre sont à peu près constantes pour toutes les lignes aériennes, indépendamment de leur tension ou de la puissance qu'elles transportent.

Cependant, la *résistance* par kilomètre dépend de la

grosseur du conducteur; c'est pourquoi on ne peut pas en fournir une valeur moyenne. Le tableau 46-3 donne la résistance par kilomètre et la capacité en ampères de quelques conducteurs aériens en cuivre et en aluminium-acier (ACSR), d'après les spécifications du fabricant.

Exemple 46-1

Une ligne triphasée à 230 kV ayant une longueur de 50 km est composée de trois conducteurs nus en aluminium-acier ayant une section de 1000 kcmil. La ligne transporte une puissance de 300 MW (Fig. 46-13). Déterminer:

- a) le circuit équivalent «exact» de la ligne
- b) la valeur des puissances active et réactive
- c) le circuit équivalent approximatif

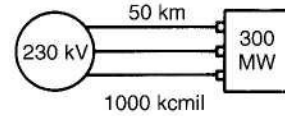


Figure 46-13
Voir exemple 46-1.

TABLEAU 46-2 RÉACTANCES DES LIGNES À MOYENNE TENSION, 60 Hz (ordre de grandeur)

type de ligne	réactance inductive (x_L) Ω/km	réactance capacitive (x_C) Ω/km
ligne aérienne	0,5	300 000
câble monoconducteur seul à gaine métallique	0,06	8000
	à 0,1	à 20 000
câble triphasé composé de 3 câbles monoconducteurs à gaine métallique	0,1	8000
	à 0,35	à 20 000



TABLEAU 46-3 RÉSISTANCE ET AMPACITÉ DE QUELQUES CONDUCTEURS AÉRIEN NUS

grosseur du conducteur		résistance par conducteur à 75 °C		courant admissible à l'air libre*	
AWG ou kcmil	section mm ²	cuivre Ω/km	ACSR Ω/km	cuivre A	ACSR A
4	21,1	0,91	1,7	180	140
1	42,4	0,50	0,90	270	200
3/0	85	0,25	0,47	420	300
300 kcmil	152	0,14	0,22	600	500
600 kcmil	304	0,072	0,11	950	750
1000 kcmil	507	0,045	0,065	1300	1050

* La colonne donnant le courant admissible à l'air libre représente des valeurs maximales que l'on peut utiliser sans risquer d'affaiblir (par échauffement) la résistance mécanique du conducteur. En pratique, et afin d'augmenter le rendement, on utilise parfois des courants de l'ordre de 25 % du courant admissible seulement.

Solution

a) Tension de ligne = 230 kV

Tension de ligne à neutre $E = 230/\sqrt{3} = 133$ kV

Puissance active par phase $P = 300/3 = 100$ MW

Courant de ligne $I = 100 \text{ MW}/133 \text{ kV} = 750$ A

D'après les tableaux 46-2 et 46-3, on trouve les impédances approximatives suivantes:

$$r = 0,065 \text{ } \Omega/\text{km} \quad x_L = 0,5 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X_C = 300 \text{ } 000 \text{ } \Omega \cdot \text{km}$$

d'où on obtient les valeurs suivantes, par phase:

Résistance de la ligne:

$$R = 0,065 \times 50 = 3,25 \text{ } \Omega$$

Réactance inductive de la ligne:

$$X_L = 0,5 \times 50 = 25 \text{ } \Omega$$

Réactance capacitive de la ligne:

$$X_C = \frac{300 \text{ } 000}{50} = 6000 \text{ } \Omega$$

La réactance capacitive à placer à chaque extrémité est donc:

$$2X_C = 12 \text{ } 000 \text{ } \Omega$$

Le circuit équivalent «exact» est donné à la Fig. 46-14a.

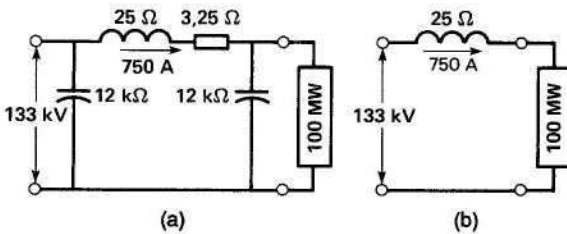


Figure 46-14

a. Circuit équivalent d'une phase de la ligne.

b. Circuit équivalent approximatif.

b) Puissance active transportée par phase:

$$P = 100 \text{ MW}$$

Pertes par effet Joule:

$$P_J = RI^2 = 3,25 \times 750^2 = 1,83 \text{ MW (1,83 \% de } P)$$

Puissance réactive absorbée par la ligne:

$$Q_L = X_L I^2 = 25 \times 750^2 = 14,1 \text{ Mvar (14,1 \% de } P)$$

Puissance réactive générée par une phase de la ligne:

$$Q_C = \frac{E^2}{X_C} = \frac{133 \text{ } 000^2}{6000} = 3 \text{ Mvar (3 \% de } P)$$

c) En tenant compte des valeurs relatives de ces puissances, on peut négliger la résistance et la capacitance de la ligne. Le circuit équivalent approximatif est donc composé d'une simple réactance inductive de 25 Ω (Fig. 46-14b).

46.14 Variation de la tension et puissance maximale transportable

La régulation de la tension et la puissance maximale qu'une ligne peut transporter sont deux de ses plus importantes caractéristiques. En effet, la tension d'une ligne doit demeurer assez constante à mesure que la puissance active consommée par la charge varie. Ordinairement, la variation de la tension de zéro à pleine charge ne doit pas dépasser 5 % de la tension nominale, bien qu'on puisse tolérer parfois une régulation allant jusqu'à 10 %. On s'intéresse également à la puissance maximale qu'une ligne peut transporter afin de connaître ses possibilités lors de surcharges temporaires. Afin de connaître la variation de la tension et d'établir la puissance maximale transportable par une ligne, nous étudierons successivement le comportement de quatre types de lignes:

1. ligne résistive
2. ligne inductive
3. ligne inductive avec compensation
4. ligne inductive reliant deux grands réseaux

Dans cette analyse nous considérons que la ligne triphasée est équilibrée. Par conséquent, nous ne traitons qu'une seule phase.

46.15 Ligne résistive

Une ligne possédant une résistance R , par phase, alimente une charge résistive consommant une puissance variable P_C (Fig. 46-15a). La tension E_S de la source est constante. On suppose une charge résistive, car on s'intéresse seulement à la puissance active transportée par la ligne. À mesure que la charge augmente, la tension E_R à ses bornes diminue progressivement; des calculs très simples permettent d'obtenir la courbe E_R en fonction de P_C (Fig. 46-15b). Cette courbe révèle l'information suivante:

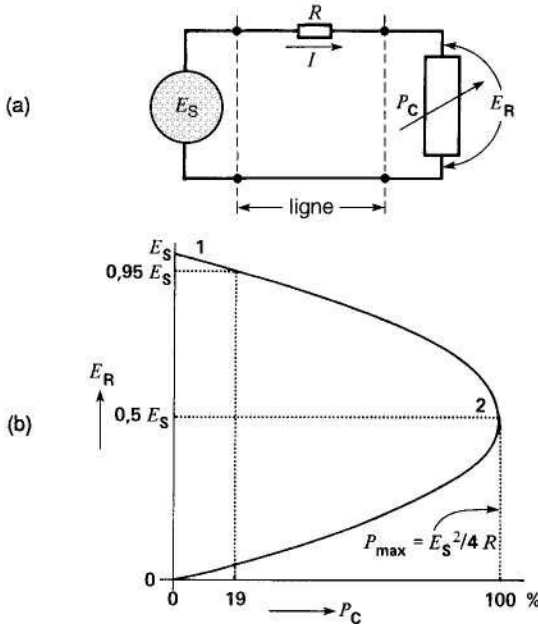


Figure 46-15

- a. Charge résistive alimentée par une ligne résistive.
b. Courbe caractéristique d'une ligne résistive.

- a) Il existe une limite supérieure P_{\max} à la puissance active que la ligne peut transporter. On atteint ce maximum lorsque la résistance de la charge est égale à celle de la ligne. Il s'ensuit que $E_R = 0,5 E_S$. On peut prouver que:

$$P_{\max} = \frac{E_S^2}{4R} \quad (46-1)$$

- b) Si l'on permet une régulation maximale de 5 % ($E_R = 0,95 E_S$), la ligne peut transporter une puissance P_C qui représente seulement 19 % de la puissance maximale. La ligne pourrait transporter une puissance plus grande que P_C , mais la tension correspondante serait alors trop basse (Fig. 46-15).
c) La source doit fournir la puissance P_C absorbée par la charge plus les pertes RI^2 dans la ligne.

Exemple 46-2

Une ligne monophasée ayant une résistance de 10Ω transmet la puissance d'une source dont la tension est de 10 kV. Calculer:

- a) la puissance maximale que la ligne peut transporter à la charge
b) la puissance transmise à la charge lorsque la tension à ses bornes est de 9,5 kV

Solution

- a) La puissance maximale transportable à la charge est:

$$P = \frac{E_S^2}{4R} = \frac{10\,000^2}{4 \times 10} = 2,5 \text{ MW}$$

- b) lorsque $E_R = 9,5 \text{ kV}$, la chute dans la ligne est:

$$E_S - E_R = 10 \text{ kV} - 9,5 \text{ kV} \\ = 0,5 \text{ kV} = 500 \text{ V}$$

Le courant dans la ligne est donc:

$$I = \frac{E_S - E_R}{R} = \frac{500 \text{ V}}{10 \Omega} = 50 \text{ A}$$

La puissance fournie à la charge est alors:

$$P = E_R I = 9,5 \text{ kV} \times 50 \text{ A} \\ = 475 \text{ kW} = 0,475 \text{ MW}$$

Remarquer que cette puissance représente bien 19 % de la puissance maximale prédite par la courbe.

46.16 Ligne inductive

Considérons maintenant une ligne dont la résistance est négligeable, mais qui possède une réactance inductive X_L (Fig. 46-16a). Comme dans le cas d'une ligne résistive, la tension E_R diminue à mesure que la charge augmente, mais la courbe de régulation a une allure différente. Si l'on fait varier la charge résistive, on obtient la courbe E_R en fonction de P_C de la Fig. 46-16b. On remarque les points suivants:

- a) Il existe encore une limite supérieure à la puissance que la ligne peut transmettre à la charge. On atteint ce maximum lorsque la résistance de la charge est égale à la réactance de la ligne. Dans ces circonstances, on a:

$$E_R = 0,707 E_S$$

On peut prouver que:

$$P_{\max} = \frac{E_S^2}{2X_L} \quad (46-2)$$

Pour une même impédance, une ligne réactive peut donc transporter deux fois plus de puissance active qu'une ligne résistive (comparer $P_{\max} = E_S^2/2X_L$ et $P_{\max} = E_S^2/4R$).

- b) Si l'on permet une régulation de 5 %, la ligne peut transporter une puissance P_C valant 60 % de la puissance maximale P_{\max} . Pour une même charge, une li-

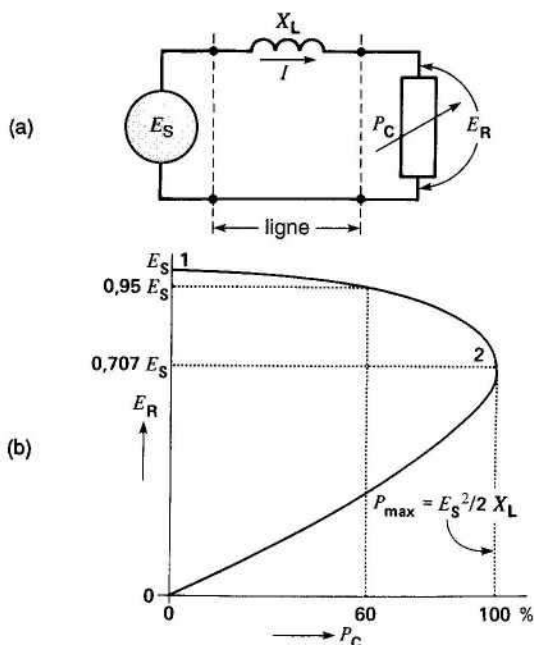


Figure 46-16

- a. Charge résistive alimentée par une ligne inductive.
 b. Courbe caractéristique d'une ligne inductive.

gne inductive donne donc une meilleure régulation qu'une ligne résistive.

- c) La source E_S doit fournir non seulement la puissance active P_C consommée par la charge, mais aussi la puissance réactive $X_L I^2$ absorbée par la ligne.

Exemple 46-3

Une ligne monophasée ayant une réactance inductive de 10Ω relie une charge résistive à une source de 10 kV . Calculer:

- la puissance maximale que l'on peut fournir à la charge
- la puissance à la charge lorsque la tension à ses bornes est de $9,5 \text{ kV}$

Solution

- a) La puissance maximale à la charge est:

$$P = \frac{E_S^2}{2 X_L} = \frac{10\,000^2}{2 \times 10} = 5 \text{ MW}$$

- b) En se référant à la Fig. 46-16a, on peut écrire:

$$\begin{aligned} E_S^2 &= (I X_L)^2 + E_R^2 \\ 10\,000^2 &= (I \times 10)^2 + 9500^2 \end{aligned}$$

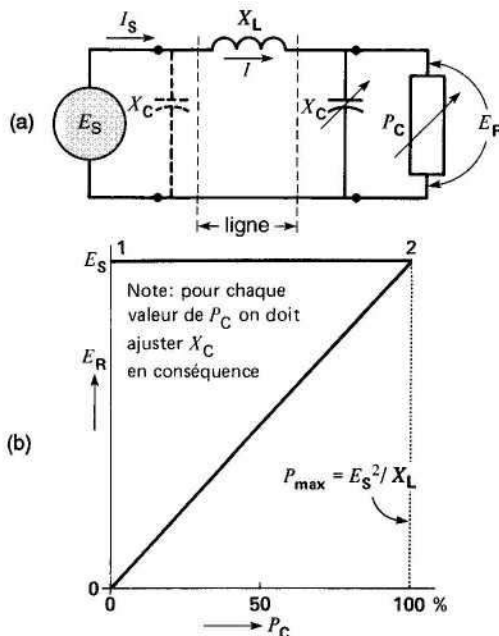


Figure 46-17

- a. Charge résistive alimentée par une ligne inductive compensée.
 b. Courbe caractéristique d'une ligne inductive compensée.

donc $I = 312 \text{ A}$

La puissance à la charge est:

$$\begin{aligned} P_C &= E_R I = 9,5 \text{ kV} \times 312 \text{ A} \\ &= 2964 \text{ kW} = 3 \text{ MW} \end{aligned}$$

Elle représente bien 60% de la puissance maximale prédite par la courbe.

46.17 Ligne inductive avec compensation

Lorsqu'une ligne est inductive, on peut à la fois améliorer la régulation et augmenter la puissance transportable en ajoutant une capacitance X_C appropriée aux bornes de la charge (Fig. 46-17a). Si l'on fait varier X_C à mesure que la puissance active P_C augmente, on peut maintenir une tension E_R constante (et égale à E_S) aux bornes de la charge. Il suffit d'ajuster la valeur de X_C afin que la puissance réactive E_S^2/X_C fournie par les condensateurs soit égale à la moitié de la puissance réactive $X_L I^2$ absorbée par la ligne.

Cependant, on constate qu'il y a encore une limite à la puissance active que la ligne peut transporter à la charge. Une analyse détaillée montre (Fig. 46-17b) que l'on peut garder une tension constante (trait horizontal 1-2) jusqu'à une limite où $P = E_S^2/X_L$, après quoi, la

tension décroît en suivant le trait incliné 2-0*. On remarque les points suivants:

a) La régulation est parfaite ($E_R = E_S$) et la tension demeure constante jusqu'à la limite où

$$P_{\max} = \frac{E_S^2}{X_L} \quad (46-3)$$

On peut donc transporter à la charge une puissance P_C qui est égale à la capacité maximale P_{\max} de la ligne.

b) En comparant cette courbe avec celle de la ligne inductive sans compensation, on constate que la ligne compensée peut transporter *le double* de la puissance, tout en maintenant une tension constante. Les condensateurs sont donc très utiles sur une ligne inductive.

c) La capacitance X_C fournit la moitié de la puissance réactive absorbée par la ligne, l'autre moitié provenant de la source E_S . Au besoin, on peut ajouter une deuxième capacitance X_C , de même valeur, au début de la ligne (Fig. 46-17a). Dans ces circonstances, la source débite seulement une puissance active P_C ; la puissance réactive absorbée par la ligne est fournie par les condensateurs aux deux extrémités.

46.18 Ligne inductive reliant deux réseaux

Les gros centres d'utilisation d'énergie électrique sont toujours interconnectés par une ou plusieurs lignes de transport. Ces interconnexions améliorent la stabilité du réseau et lui permettent de mieux supporter les perturbations causées par les courts-circuits et les autres pannes. De plus, les interconnexions permettent des échanges de puissance entre les compagnies d'électricité d'un même pays ou de pays voisins.

Pour ces lignes, les tensions aux deux extrémités demeurent constantes. Elles sont déterminées par les besoins des deux régions desservies qui agissent chacune comme des réseaux infinis indépendants. La Fig. 46-18 donne le circuit équivalent d'une ligne inductive reliant deux régions S et R dont les tensions E_S et E_R aux deux extrémités sont constantes, et possèdent chacune la même valeur E . En ce qui concerne l'échange de puissance active, on peut distinguer trois possibilités:

a) *Les tensions E_S et E_R sont en phase.* Dans ce cas, le courant dans la ligne est nul et aucune puissance n'est transportée.

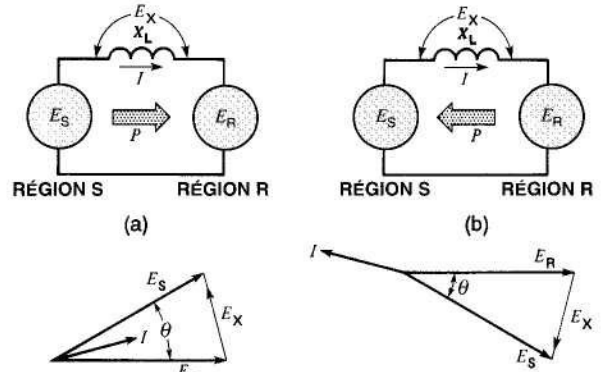


Figure 46-18

Ligne inductive reliant deux grands réseaux.

a. E_S en avance sur E_R ;

b. E_S en retard sur E_R .

b) *La tension E_S est déphasée d'un angle θ en avance sur E_R* (Fig. 46-18a). La région S fournit alors de l'énergie à la région R et on trouve, d'après les relations vectorielles, que la puissance active transportée est donnée par l'équation (voir section 25.11, chapitre 25):

$$P = \frac{E^2}{X_L} \sin \theta \quad (46-4)$$

où

P = puissance active transportée par phase [W]

E = tension de ligne à neutre [V]

X_L = réactance inductive par phase [Ω]

θ = angle de déphasage entre les tensions entre les deux extrémités de la ligne [$^\circ$]

De cette équation on déduit l'équation suivante qui est particulièrement utile lorsqu'on traite les grandes puissances triphasées:

$$P_T = \frac{E_L^2}{X_L} \sin \theta \quad (46-5)$$

où

P_T = puissance active totale transportée par une ligne triphasée, en mégawatts [MW]

E_L = tension ligne à ligne, en kilovolts [kV]

X_L = réactance inductive par phase [Ω]

θ = angle de déphasage entre les tensions entre les deux extrémités de la ligne [$^\circ$]

* La valeur de X_C est constante et égale à X_L dans la partie inclinée de la courbe.

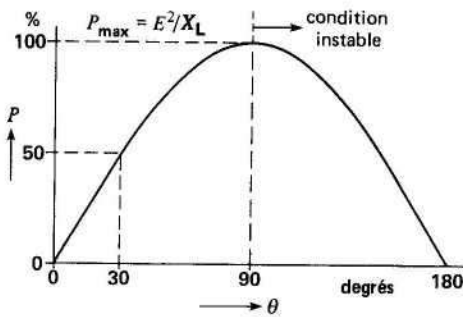


Figure 46-19
Caractéristiques d'une ligne reliant deux grands réseaux.

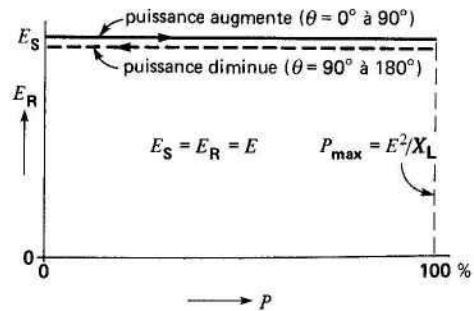
La Fig. 46-19 montre la courbe de la puissance active en fonction de l'angle de déphasage. On constate que la puissance transportée augmente progressivement pour atteindre une valeur maximale E^2/X_L lorsque le déphasage θ entre les deux réseaux est de 90° .

En effet, tout comme pour les autres lignes que nous venons d'étudier, une ligne reliant deux réseaux impose aussi une limite à la puissance maximale que l'on peut transporter. Cette limite est la même que celle d'une ligne inductive compensée. Bien que l'on puisse théoriquement transporter une puissance lorsque l'angle θ est supérieur à 90° , on évite cette condition, car elle correspond à un point d'opération instable. Lorsque l'angle θ est voisin de 90° ou plus, les deux régions sont sur le point de décrocher et les disjoncteurs de ligne s'appêtent à ouvrir le circuit.

Remarquer que la chute de tension E_X dans la ligne peut être considérable, même si les tensions E_S et E_R aux deux extrémités sont égales. En se référant à la Fig. 46-18a, il est évident que la chute de tension E_X est d'autant plus grande que le déphasage entre E_S et E_R est plus grand.

c) La tension E_S est déphasée d'un angle θ en arrière de E_R (Fig. 46-18b). La puissance active est encore donnée par l'équation 46-4, mais, cette fois, elle circule de la région R vers la région S. La courbe de la puissance en fonction de l'angle de déphasage θ est identique à celle de la Fig. 46-19 et, en ce qui concerne la stabilité, les mêmes remarques s'appliquent.

Si l'on compare les Fig. 46-18a et 46-18b, on constate que le sens de circulation de la puissance ne dépend



pas des valeurs relatives des tension E_S et E_R (elles sont égales), mais seulement du déphasage entre elles. On a déjà prévu ce phénomène à la section 25.11, chapitre 25.

46.19 Récapitulation de la puissance transportée

En résumé, il existe toujours une limite à la puissance qu'une ligne peut transporter. Cette puissance maximale est proportionnelle au carré de la tension et inversement proportionnelle à l'impédance de la ligne.

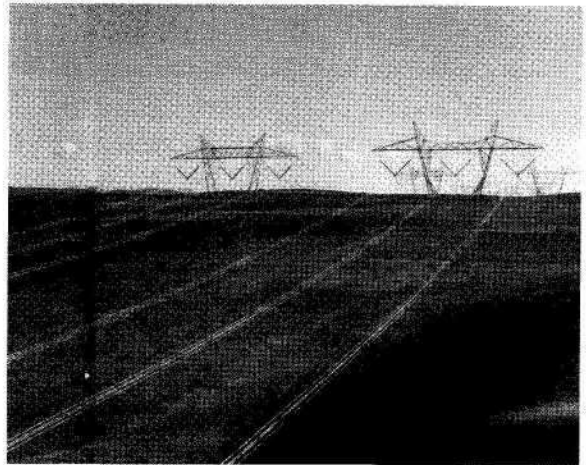


Figure 46-20
Ces deux lignes triphasées à 735 kV en parallèle transportent chacune 2000 MW vers la région de Montréal. Chaque phase est composée de 4 conducteurs en faisceaux dont les dimensions sont données à la Fig. 20-14. La portée moyenne des pylônes est de 480 m (gracieuseté d'Hydro-Québec).

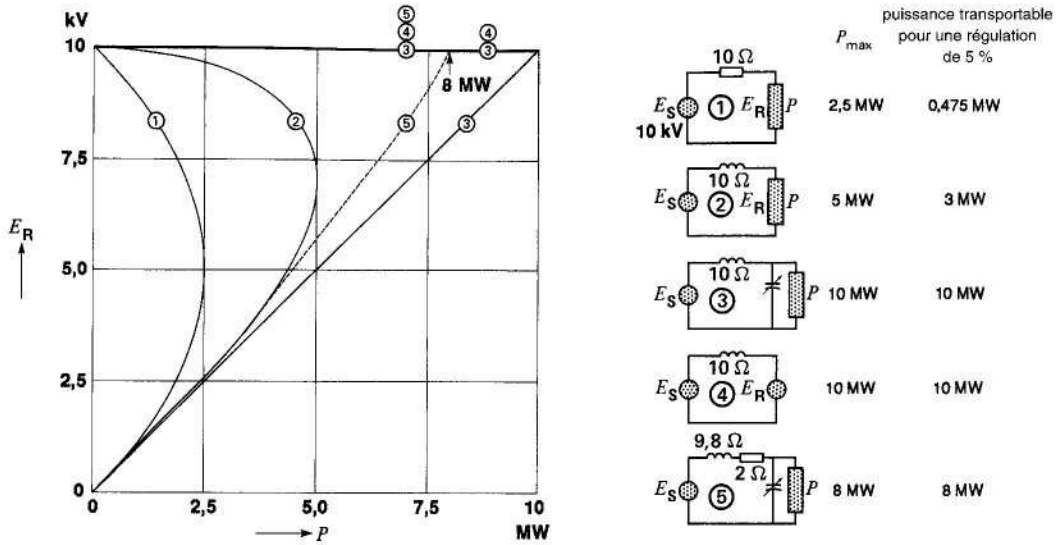


Figure 46-21

Comparaison des courbes de régulation en fonction de la puissance active transportée à la charge.

La Fig. 46-21 permet de comparer les puissances et les tensions pour les quatre types de lignes que l'on vient d'étudier. Chaque ligne possède une impédance de 10Ω et la source fournit une tension E_S de 10 kV. Si l'on tolère une régulation maximale de 5 %, les puissances que l'on peut transporter sont limitées aux valeurs indiquées dans la figure.

De plus, comme les lignes possèdent toujours une certaine résistance, nous avons tracé, à titre d'intérêt, la courbe correspondant à une ligne compensée ayant une réactance de $9,8 \Omega$ et une résistance de 2Ω . La courbe (5), tracée en pointillé, indique alors que la puissance maximale tombe à 8 MW, comparativement à 10 MW pour une ligne ne possédant aucune résistance.

46.20 Choix de la tension de ligne

On a vu que la puissance P qu'une ligne peut transporter pour une régulation donnée est proportionnelle au rapport E_L^2/Z où E_L est la tension de ligne à ligne et Z , son impédance. Puisque cette impédance est proportionnelle à la distance à franchir, on en déduit que la tension d'utilisation E est donnée par une expression de la forme:

$$E_L = k \sqrt{Pl} \quad (46-6)$$

où

- E_L = tension de ligne à ligne [kV]
- P = puissance à transporter sur les 3 phases [MW]
- l = distance de transport [km]
- k = facteur approximatif qui dépend de la régulation permise et du type de ligne

Pour une régulation de 5 %, on a

- $k = 3$ pour une ligne sans compensation
- $k = 2$ pour une ligne avec compensation

La formule 46-6 fournit seulement un ordre de grandeur de la tension E_L , car la valeur finalement choisie dépend de facteurs économiques et d'autres considérations. En général, la tension adoptée est comprise entre $0,5 E_L$ et $1,5 E_L$.

Exemple 46-4

On doit transporter une puissance de 10 MW sur une distance de 20 km. La ligne n'étant pas compensée, déterminer:

- a) la tension de la ligne et une grosseur de fil appropriée, sachant que l'on permet une régulation de 5 %
- b) la régulation de la ligne lorsque le facteur de puissance de la charge est de 1,0
- c) les pertes dans la ligne

Solution

a) D'après la formule (46-6):

$$E_L = 3 \sqrt{PI}$$

$$= 3 \sqrt{10 \times 20}$$

$$= 42,4 \text{ kV}$$

Toute tension comprise entre:

$$0,5 \times 42,4 \text{ kV} (= 21 \text{ kV}) \text{ et}$$

$$1,5 \times 42,4 \text{ kV} (= 64 \text{ kV})$$

serait acceptable. Utilisons une tension normalisée de 34,5 kV ligne à ligne, soit 19,9 kV ligne à neutre.

Le courant dans la ligne est alors:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} E_L} = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 34\,500} = 167 \text{ A}$$

D'après le tableau 46-3, choisissons un conducteur ACSR n° 1 (ampacité 200 A, $r = 0,9 \Omega/\text{km}$).

Résistance de chaque ligne = $20 \times 0,9 = 18 \Omega$

Chute RI dans une ligne = $18 \times 167 = 3006 \text{ V}$

% chute = $3006/19\,900 = 0,15 = 15 \%$

Comme la chute résistive seule (sans tenir compte de la chute réactive) est trois fois plus grande que celle permise, on doit augmenter la grosseur du conducteur d'au moins trois fois. On utilisera une grosseur de 300 kcmil. Bien que du point de vue de l'échauffement ce conducteur soit plusieurs fois plus gros que nécessaire, il donne à la fois l'avantage d'une meilleure régulation et d'un meilleur rendement.

b) Calculons maintenant la régulation pour une charge résistive en tenant compte de la résistance ($0,22 \Omega/\text{km}$) et de la réactance ($0,5 \Omega/\text{km}$) de cette ligne:

Tension aux bornes de la charge = 19 900 V

Résistance de chaque ligne = $20 \times 0,22 = 4,4 \Omega$

Chute RI dans une ligne = $4,4 \times 167 = 735 \text{ V}$

Réactance de chaque ligne = $20 \times 0,5 = 10 \Omega$

Chute XI dans une ligne = $10 \times 167 = 1670 \text{ V}$

En traçant le diagramme vectoriel pour une phase (Fig. 46-22), on trouve que la tension E_S de la source est de 20 700 V, d'où la régulation:

$$\frac{(20\,700 - 19\,900)}{19\,900} = \frac{800}{19\,900} = 0,040 \text{ ou } 4,0 \%$$

On satisfait donc la régulation maximale de 5 %.

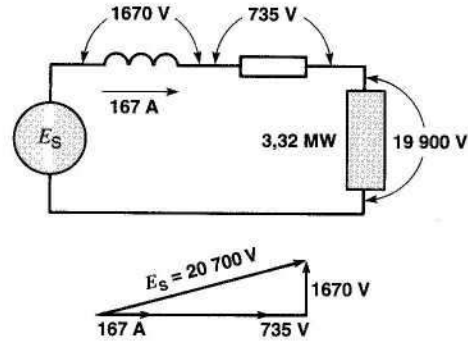


Figure 46-22
Voir exemple 46-5.

c) Les pertes Joule dans la ligne triphasée sont:

$$P_J = 3RI^2 = 3 \times 4,4 \times 167^2 = 368\,135 \text{ W}$$

$$= 368 \text{ kW}$$

Par rapport à la puissance active transportée, le pourcentage des pertes Joule est:

$$\frac{\text{pertes Joule}}{P} = \frac{368 \text{ kW}}{10\,000 \text{ kW}} \times 100 = 3,7 \%$$

46.21 Méthodes pour augmenter la puissance transportable

Les lignes à haute tension sont surtout inductives et elles possèdent une réactance d'environ $0,5 \Omega/\text{km}$. Cela crée des problèmes quand on doit transporter des puissances importantes sur de longues distances.

Supposons, par exemple, que l'on doive transporter une puissance de 4000 MW sur une distance de 300 km. La réactance de la ligne vaut

$$300 \text{ km} \times 0,5 \Omega/\text{km} = 150 \Omega \text{ par phase}$$

Comme la plus haute tension pratique est de l'ordre de 750 kV, la ligne peut transporter une puissance maximale de:

$$P_8 = \frac{E_L^2}{X_L} = \frac{(750 \text{ kV})^2}{150}$$

$$= 3750 \text{ MW}$$

Comme on doit conserver une marge de sécurité, la puissance transportable est en réalité de l'ordre de 2000 MW. Puisque cette puissance est insuffisante, une première solution est d'employer deux lignes en parallèle, l'une à côté de l'autre. Noter qu'il est inutile de doubler la grosseur des conducteurs, car c'est la réac-

tance et non pas la résistance des fils qui détermine la puissance maximale. Pour des puissances élevées, on voit parfois trois et même quatre lignes triphasées qui suivent le même trajet à travers le paysage (Fig. 46-20). En plus d'augmenter les coûts, cette méthode pose de graves problèmes d'expropriation de terrains. C'est pourquoi on a parfois recours à d'autres méthodes pour augmenter la puissance maximale d'une ligne. En effet, lorsqu'on ne peut plus augmenter la tension de ligne, on essaie de diminuer sa réactance X_L .

Conducteurs en faisceaux

Une première méthode consiste à utiliser des *conducteurs en faisceaux* (Fig. 20-14), ce qui réduit la réactance d'environ 40 %, soit de 0,5 Ω/km à 0,3 Ω/km et permet ainsi une augmentation de 67 % de la puissance transportable.

Compensation série

Une deuxième méthode pour réduire la réactance consiste à brancher un condensateur X_{CS} en série avec chacune des trois phases. Avec cet arrangement, la réactance effective de la ligne est égale à $X_L - X_{CS}$ et la puissance maximale transportable devient:

$$P_{\max} = \frac{E_L^2}{(X_L - X_{CS})} \quad (46-7)$$

La *compensation série* est aussi employée pour régulariser la tension sur les lignes à moyenne tension lorsque la charge subit des variations brusques.

Lors d'un court-circuit sur la ligne, la tension aux bornes du condensateur peut dépasser le seuil admissible. Afin de limiter la surtension, on installe un varistor en parallèle avec le condensateur. Par mesure de sécurité supplémentaire, on ajoute un éclateur en parallèle avec l'ensemble. Lorsque l'éclateur est amorcé, il court-circuite le condensateur et le varistor. Ensuite, le courant important est détecté par les relais de protection qui font ouvrir les disjoncteurs à chaque extrémité de la ligne.

Sur le réseau d'Hydro-Québec la plupart des lignes à 735 kV sont dotées d'une compensation série. L'impédance réduite de ces lignes augmente la stabilité du réseau.

Le schéma de la Fig. 46-23 montre le diagramme unifilaire d'une des trois lignes triphasées à 735 kV reliant la centrale à Churchill au poste Montagnais si-

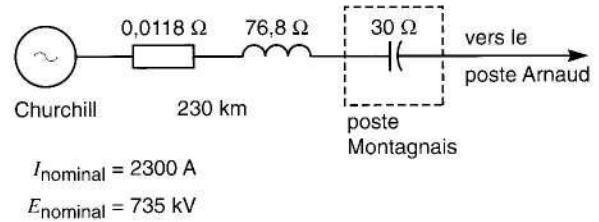


Figure 46-23

Schéma unifilaire d'une des trois lignes triphasées à 735 kV entre les postes Churchill et Montagnais.

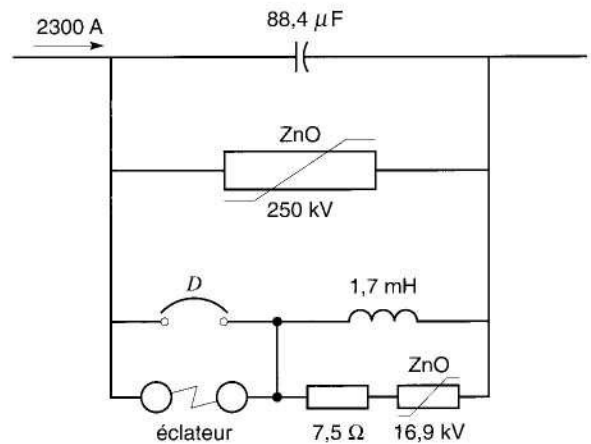


Figure 46-24

Circuit simplifié de la compensation série installée au poste Montagnais. Le varistor à oxyde de zinc (ZnO) limite la tension à 250 kV. Il est composé de 60 colonnes en parallèle.

tué 230 km plus loin. La compensation série de cette ligne est installée au poste Montagnais. La Fig. 46-24 montre que la compensation série est composée d'un banc de condensateurs de 88,4 μF (X_{CS} de 30 Ω), d'un varistor ZnO à 250 kV, d'un éclateur et d'un disjoncteur de contournement D. Une inductance de 1,7 mH limite le taux de croissance du courant provenant du condensateur lorsque le disjoncteur se ferme. Le courant de décharge est amorti par une résistance de 7,5 Ω en série avec un varistor de 16,9 kV.

Le disjoncteur D permet de contourner le tout et de mettre la compensation hors service. L'ouverture de ce disjoncteur permet aussi de remettre la compensation en service lorsque la ligne est en charge.

L'impédance de la ligne Churchill-Montagnais est de $76,8 \Omega$; il en résulte que sa réactance effective est de $76,8 \Omega - 30 \Omega = 46,8 \Omega$.

Le courant nominal par phase à pleine charge est de 2300 A ; par conséquent, la tension efficace aux bornes du condensateur est de $2300 \text{ A} \times 30 \Omega = 69 \text{ kV}$, soit une valeur crête de $69 \sqrt{2} = 98 \text{ kV}$.

Lors d'un court-circuit phase-terre sur la ligne, la tension crête aux bornes du condensateur peut excéder 500 kV , soit 5 fois la tension crête normale. Le varistor ZnO écrête la tension à environ 250 kV . Cependant, lui aussi a des limites. En effet, si le varistor porte un cou-

rant trop élevé ou s'il absorbe trop d'énergie, il risque d'être détruit. Pour cette raison on a recours à une deuxième protection sous la forme de l'éclateur. Celui-ci est amorçé dès que le courant dans le varistor atteint 15 kA , ou lorsqu'il a absorbé une énergie de 21 MJ . Parallèlement, au moment où on amorce l'éclateur, on donne un ordre de fermeture au disjoncteur D qui vient ainsi éteindre l'arc dans l'éclateur.

La Fig. 46-25 montre l'installation physique d'un banc de compensation série. Comme le tout fonctionne à une tension de 424 kV par rapport à la terre, la plate-forme est supportée à 15 m du sol par des isolateurs.

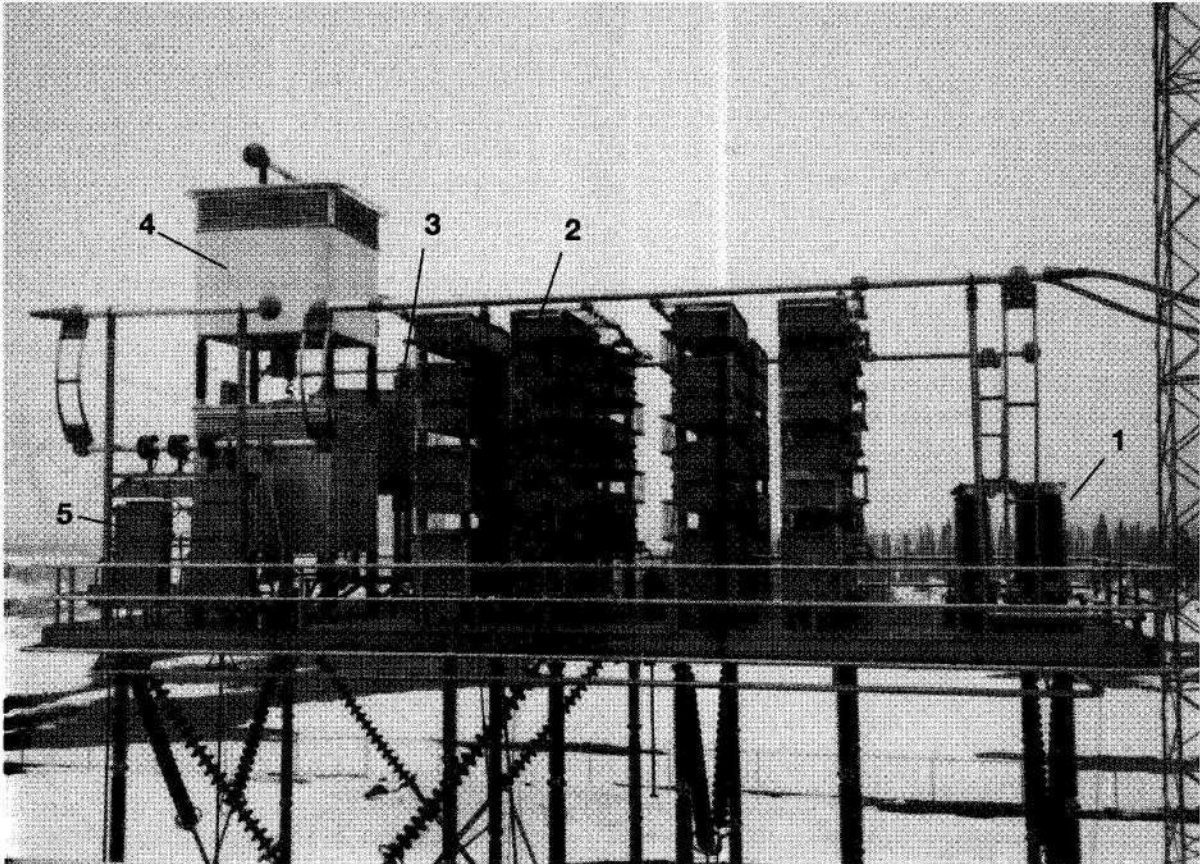


Figure 46-25

Vue de la compensation série montée sur sa plate-forme. On distingue: (1) colonnes de varistors; (2) condensateurs; (3) inductance de $1,7 \text{ mH}$; (4) compartiment entourant

l'éclateur; (5) boîtier contenant les circuits de détection et logiciels de commande. Les autres composants ne sont pas visibles (gracieuseté d'Hydro-Québec).

46.22 Transport de l'énergie à très haute tension

Le transport de l'énergie électrique à très haute tension crée des problèmes particuliers qui nécessitent l'installation d'énormes appareils de compensation pour maintenir une tension constante et pour garantir la stabilité. Parmi ces appareils, citons les compensateurs statiques, les compensateurs synchrones, les réactances inductives shunt, et les réactances capacitatives shunt et série. Leur capacité se mesure toujours en mégavars et elle est généralement variable afin que la puissance réactive absorbée par les inductances, ou débitée par les capacitances, puisse suivre les exigences du réseau.

Afin d'apprécier l'ordre de grandeur des puissances requises et pour mieux comprendre la raison d'être de ces appareils, considérons une ligne triphasée fonctionnant à 735 kV, 60 Hz ayant une longueur de 600 km et dont les réactances inductive et capacitive sont respectivement

$$x_L = 0,32 \Omega/\text{km}, \text{ et } x_C = 200 \text{ k}\Omega \cdot \text{km}$$

On a donc :

Tension E_S de la source par phase (ligne à neutre):

$$E_S = \frac{735}{\sqrt{3}} = 424 \text{ kV}$$

Réactance inductive par phase X_L :

$$X_L = x_L l = 0,32 \Omega/\text{km} \times 600 \text{ km} = 192 \Omega$$

Réactance capacitive par phase:

$$X_C = \frac{x_C}{l} = \frac{200 \text{ k}\Omega \cdot \text{km}}{600 \text{ km}} = 333,3 \Omega$$

La réactance capacitive à placer à chaque extrémité de la ligne est:

$$X_{C1} = X_{C2} = 2 \times 333,3 \Omega = 667 \Omega$$

Le circuit équivalent par phase est donné à la Fig. 46-26.

1. Fonctionnement à vide. Lorsque la charge est nulle, le circuit formé par X_L en série avec X_{C2} produit une résonance partielle et la tension E_R monte à:

$$E_R = \frac{E_S X_{C2}}{X_{C2} - X_L} = \frac{424 \times 667}{667 - 192} = 595 \text{ kV}$$

soit une augmentation de 40 % par rapport à la tension nominale de 424 kV. Une telle surtension est inaccep-

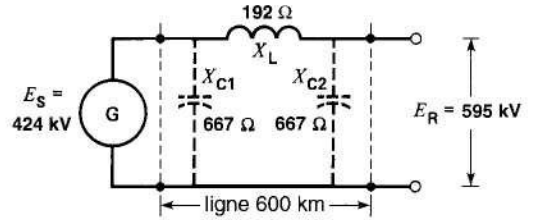


Figure 46-26 Une surtension excessive apparaît à l'extrémité ouverte d'une ligne à THT.

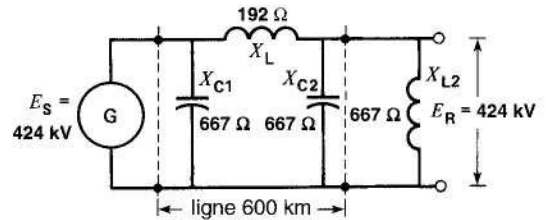


Figure 46-27 La réactance shunt absorbe la puissance réactive générée par X_{C2} , ce qui réduit la tension de 600 kV à 424 kV.

table et on doit la réduire en branchant une réactance inductive shunt X_{L2} ayant une impédance égale à celle de X_{C2} à l'extrémité de la ligne (Fig. 46-27). La résonance parallèle qui résulte de cet arrangement ramène la tension E_R à 424 kV, car la puissance réactive générée par X_{C2} ($424^2/667 = 270$ Mvar) est entièrement absorbée par la réactance X_{L2} . Cette dernière doit donc avoir une capacité de 270 Mvar *par phase*.

Malgré cette énorme compensation inductive, il reste encore une puissance réactive de 270 Mvar générée par X_{C1} qui doit être absorbée par l'alternateur G. Or, on a vu au chapitre 36, section 36.13 qu'une charge capacitive crée une surtension aux bornes d'un alternateur, à moins que l'on réduise le courant d'excitation. Comme cette solution n'est pas recommandée, on doit installer une deuxième réactance inductive de 270 Mvar (par phase) près du poste de génération. Sur les lignes très longues, on installe souvent une série de réactances inductives afin de répartir la compensation tout le long de la ligne (Fig. 46-28 et 46-29).

Ces réactances (fixes ou variables) sont formées d'une grosse bobine placée à l'intérieur d'une cuve et baignant dans l'huile. Le champ magnétique traverse un noyau de fer entrecoupé par une série d'entrefers. Il se

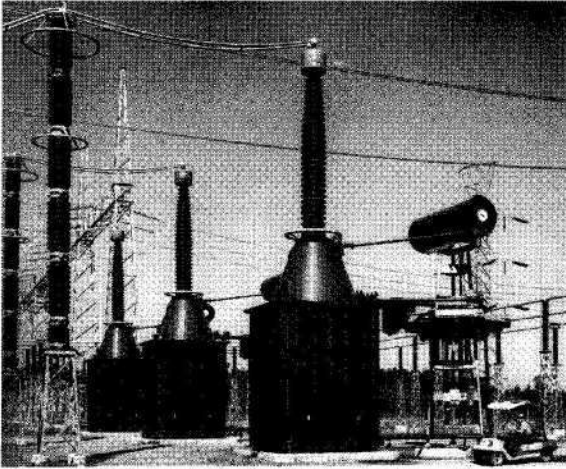


Figure 46-28

Ces trois réactances inductives monophasées de 110 Mvar chacune, installées au poste de Lévis, servent à compenser la capacitance des lignes à 735 kV entre Manicouagan et Montréal (*gracieuseté d'Hydro-Québec*).

développe alors des forces d'attraction très intenses, oscillant entre zéro et quelques dizaines de kilonewtons à une fréquence de 120 Hz sur un réseau à 60 Hz. On doit donc bien serrer les tôles du noyau et les autres parties métalliques pour réduire ces vibrations et limiter le vrombissement qui en découle.

La Fig. 46-29 montre une portion du réseau de transport entre la centrale Churchill Falls au Labrador et le poste Arnaud, près de Sept-Îles. La puissance de 5400 MW est transitée sur *trois* lignes triphasées à 735 kV. Les réactances inductives de 165 Mvar sont branchées et débranchées selon le besoin pour maintenir une tension constante sur les lignes. Les postes Mon-

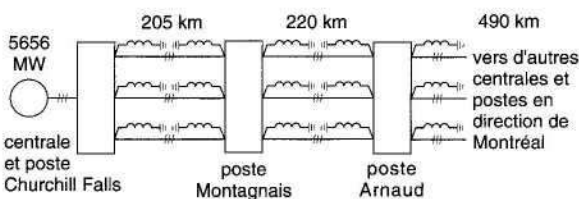


Figure 46-29

Portion du réseau de transport d'Hydro-Québec partant de la centrale à Churchill Falls. Chacune des réactances montrées sur la figure représente un banc de 165 Mvar, composé de trois réactances shunts monophasées de 55 Mvar.

tagnais et Arnaud occupent chacun une superficie de plusieurs hectares. L'équipement installé comprend des disjoncteurs, sectionneurs, parafoudres, mises à la terre, instruments, relais de protection et un système de télécommande sophistiqué. Noter que les trois lignes triphasées sont raccordées en parallèle à chaque poste. Par conséquent, si lors d'une panne une ligne est coupée entre deux postes, les deux autres peuvent continuer à porter la charge entière.

2. Fonctionnement en charge, impédance caractéristique. Revenons à la ligne non compensée de la Fig. 46-26 et chargeons-la progressivement avec une puissance active P (Fig. 46-30). La tension E_R diminue progressivement à partir de sa valeur initiale de 595 kV et, pour une charge ayant une impédance particulière Z_0 , la tension E_R devient égale à la tension E_S de la source. Cette impédance particulière s'appelle *impédance caractéristique* Z_0 de la ligne*. Pour la plupart des lignes de transport aériennes, elle correspond à une résistance d'environ 400 Ω par phase. Cependant, pour les lignes en faisceaux à 735 kV, elle est de 253 Ω par phase. Sa valeur est indépendante de la longueur de la ligne et de la fréquence du réseau. Dans notre cas, la charge caractéristique correspond donc à une puissance de:

$$P = 3 \times \frac{E^2}{Z_0} = 3 \times \frac{(424 \text{ kV})^2}{253} = 2132 \text{ MW}$$

Lorsqu'une ligne transporte une puissance correspondant à sa charge caractéristique, la puissance réactive générée par la capacitance de la ligne est égale à celle absorbée par son inductance. La ligne se compense alors d'elle-même.

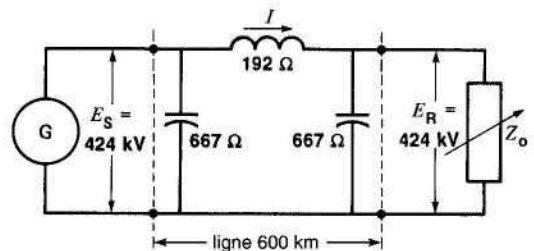


Figure 46-30

Impédance caractéristique d'une ligne.

* Désignée aussi par l'abréviation SIL («surge impedance loading»).

Si l'on charge la ligne davantage, on peut maintenir la tension E_R à 424 kV en ajoutant des capacités à l'extrémité de la ligne. Cependant, pour notre ligne de 600 km, la puissance maximale est toujours limitée à :

$$P = 3 \times \frac{E_s^2}{X_L} = 3 \times \frac{(424 \text{ kV})^2}{192} = 2809 \text{ MW}$$

Inversement, lorsque la charge est inférieure à la charge caractéristique, on doit ajouter une réactance inductive au bout de la ligne afin de maintenir une tension constante.

Comme la charge varie au cours d'une journée, on doit brancher et débrancher des inductances et des capacités selon le besoin. On peut effectuer cette compensation par des inductances et des capacités variables.

Un des appareils adaptés à cette fonction est le compensateur synchrone. Celui-ci agit en effet comme condensateur ou comme inductance selon qu'il est surexcité ou sous-excité (sections 37.9 et 37.10). Cependant, les thyristors et GTO de grande puissance ont permis le développement des compensateurs statiques. Ces compensateurs statiques sont composés essentiellement d'une inductance variable en parallèle avec une capacité. Comme les compensateurs synchrones, les compensateurs statiques produisent ou absorbent de la puissance réactive, mais ils donnent une réponse beaucoup plus rapide. Par conséquent, ils sont mieux adaptés lorsqu'on doit maintenir une tension constante durant une perturbation subite. On fait varier la puissance réactive inductive en changeant l'angle de retard à l'amorçage des thyristors connectés en série avec des inductances. Dans certains types de compensateurs statiques, ces inductances sont constituées par les réactances de fuite d'un transformateur, comme l'indique la Fig. 31-23. La Fig. 46-31 montre un compensateur statique de grande taille.

Les compensateurs statiques utilisant des thyristors ainsi que les compensateurs à GTO (STATCOM) sont décrits dans le chapitre 50.

46.23 Échanges de puissance

Sur les réseaux interconnectés, on installe parfois une ligne de transport additionnelle afin de satisfaire les besoins d'énergie d'une région en croissance. Dans d'autres cas, on a recours à une ligne supplémentaire pour améliorer la stabilité générale du réseau. Dans

ces circonstances, on doit utiliser des méthodes spéciales pour que la ligne ajoutée transporte la charge voulue.

Considérons, par exemple, deux régions A et B de grande puissance qui sont déjà interconnectées par une grille de lignes quelconques (Fig. 46-32). Les tensions respectives E_a et E_b sont égales, soit $E_a = E_b = E_s$ où E_s est la tension efficace du réseau. Cependant, supposons que E_a soit déphasée d'un angle θ en avance sur E_b .

Si l'on décide de relier les deux régions par une ligne supplémentaire de réactance X_L , la puissance active P se dirigera automatiquement de A vers B, car la ten-

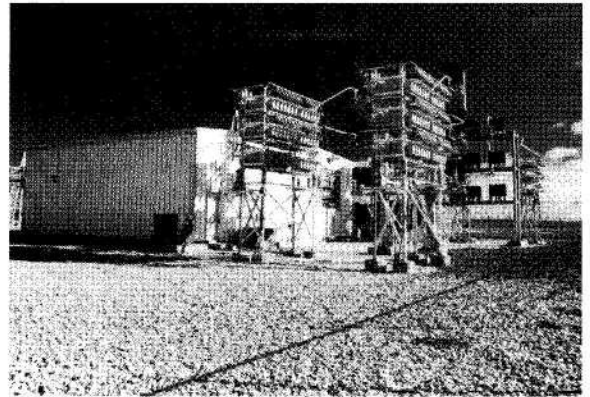


Figure 46-31
Compensateur statique pour une ligne à haute tension (gracieuseté de General Electric).

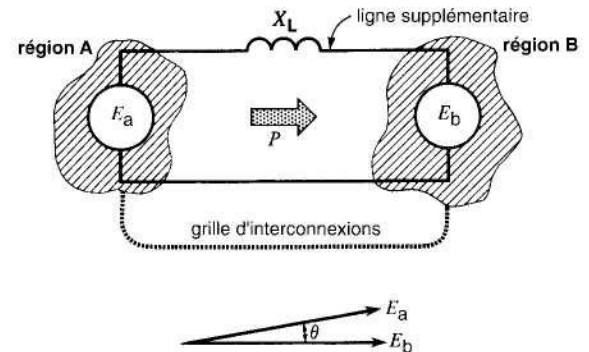


Figure 46-32
Les régions A et B sont reliées par une grille d'interconnexions, et la tension E_a est en avance sur E_b . En ajoutant une ligne supplémentaire, la puissance transportée par celle-ci circulera obligatoirement de A vers B.

sion E_a est en avance sur la tension E_b . De plus, la valeur de la puissance transmise est imposée par l'angle θ et par la réactance X_L , soit:

$$P = \frac{E_s^2}{X_L} \sin \theta$$

Habituellement, le sens et la valeur de cette puissance ne correspondent pas à ce que l'on souhaite. Par exemple, si l'on désire transporter de l'énergie de la région B à la région A, l'installation d'une simple ligne ne convient pas car, comme on vient de le dire, la puissance cherche à circuler dans le sens contraire.

Cependant, on peut *forcer* un échange d'énergie dans un sens ou dans l'autre en modifiant l'angle de déphasage. Il suffit de placer un autotransformateur déphaseur à une extrémité de la ligne; en faisant varier l'angle de déphasage de ce transformateur, on peut commander à volonté l'échange de puissance active entre les deux régions. L'autotransformateur à déphasage variable est décrit au chapitre 32, section 32.11.

Exemple 46-5

La Fig. 46-33 montre les tensions et l'angle de déphasage de deux régions A et B. La tension E_b est en avance sur E_a de 11° , et les deux tensions ont une valeur de 100 kV. La ligne reliant les deux régions a une réactance $X_L = 20 \Omega$.

- a) En l'absence d'un autotransformateur déphaseur, déterminer la puissance transportée par la ligne, ainsi que son sens de circulation.
- b) Calculer le déphasage de l'autotransformateur requis afin que la ligne transporte de A vers B une puissance active de 70 MW.

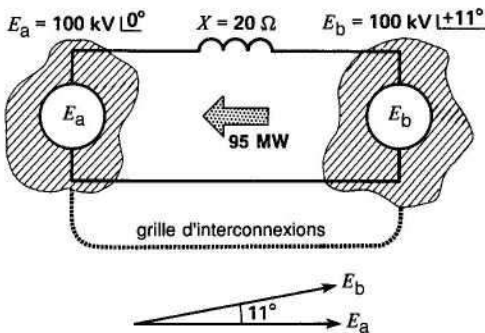


Figure 46-33 La puissance circule naturellement de B vers A (voir exemple 46-5).

Solution

a) La puissance transportée est :

$$P_T = \frac{E_L^2}{X_L} \sin \theta \tag{eq. 46-5}$$

$$P_T = \frac{(100 \text{ kV})^2}{20} \sin 11^\circ = 95 \text{ MW}$$

Comme la tension E_b est en avance sur la tension E_a , cette puissance circule de B vers A.

b) Installons l'autotransformateur déphaseur T près de la région A (Fig. 46-34) de sorte que la tension E_d soit déphasée par rapport à la tension E_a . Calculons le déphasage α entre les extrémités de la ligne (E_d et E_b) pour qu'elle transporte 70 MW. On peut écrire:

$$P_T = \frac{E_L^2}{X_L} \sin \theta \tag{eq. 45-5}$$

$$70 = \frac{100^2}{20} \sin \alpha$$

soit $\sin \alpha = 0,14$ d'où $\alpha = 8^\circ$

Pour que la puissance de 70 MW circule de A vers B, il faut que E_d soit 8° en avance sur E_b (Fig. 46-34). En se référant au diagramme vectoriel, on constate que E_d est alors 19° en avance sur E_a . L'autotransformateur déphaseur T doit donc produire un déphasage de 19° entre le primaire et le secondaire. On peut placer l'autotransformateur à l'une des deux extrémités de la ligne et même, au besoin, l'insérer à n'importe quel endroit entre les deux.

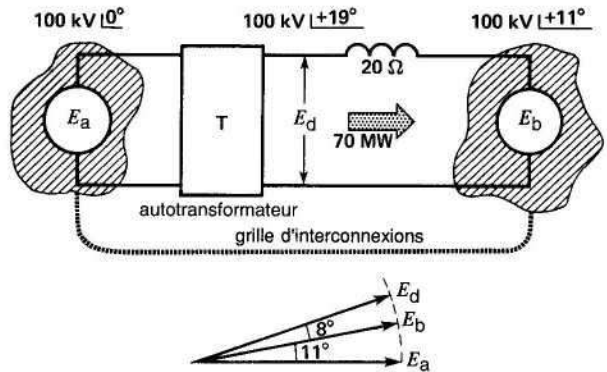


Figure 46-34 Un autotransformateur déphaseur oblige la puissance à circuler de A vers B (voir exemple 46-5).