

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

10/85

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE

2 ex

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET :

**OPTIMISATION DE LA COMPENSATION
D'ENERGIE REACTIVE DANS
LES RESEAUX HAUTE TENSION**

PROPOSE PAR : GOTTFRIED JAN
PROFESSEUR DOCTEUR

REALISE PAR : FOUZARI RAMDANE
ISSA-GHENEIM. JAFAR

PROMOTION JANVIER 1985

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET :

**OPTIMISATION DE LA COMPENSATION
D'ENERGIE REACTIVE DANS
LES RESEAUX HAUTE TENSION**

PROPOSE PAR : GOTTFRIED JAN
PROFESSEUR DOCTEUR

REALISE PAR : FOUZARI RAMDANE
ISSA-GHENEIM. JAFAR

PROMOTION JANVIER 1985

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur, Monsieur J. GOTTFRIED, pour son aide précieuse.

Sont également remerciés tous les Professeurs qui ont contribué à notre formation.

Ainsi que Monsieur SEBIHI Hamoud et tous ceux qui, de près ou de loin, ont aidé à l'élaboration de ce projet.

S O M M A I R E

<u>INTRODUCTION</u> -	1
<u>CHAPITRE I</u> : ENERGIE REACTIVE.	2
<u>CHAPITRE II</u> : OPTIMISATION DE LA COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE DANS LES RESEAUX H.T.	18
<u>CHAPITRE III</u> : REGLAGE DE LA TENSION SUR LES RESEAUX A H.T.	38
<u>CHAPITRE IV</u> : STABILITE DES RESEAUX.	68
<u>CHAPITRE V</u> : ANALYSE D'UN RESEAU BOUCLE.	74
<u>Annexe I</u> : THEORIE DU DIAGRAMME DU CERCLE.	
<u>Annexe II</u> : CALCUL DES CONSTANTES DES LIGNES.	

INTRODUCTION :

Bien que le réactif, cette énergie fantôme, est nécessaire dans les installations électriques industrielles, mais sa transition à travers les diverses impédances du réseau a des conséquences néfastes, parmi lesquelles :

- limite la puissance active maximale transmissible par le réseau ;
- dégrade la qualité de la tension ;
- accroît les pertes actives.

Pour remédier à ces inconvénients, il faut en partie compenser la puissance réactive transitant par le réseau. Cependant, cette solution devra correspondre à un optimum du point de vue de la puissance du dispositif de compensation d'une part, et répartition de la puissance réactive de compensation d'autre part.

Après un exposé sur la nature de l'énergie réactive et ses inconvénients, nous avons étudié les dispositifs de compensation et de régulation de la tension dans les réseaux H.T., du calcul de la puissance optimale de celle-ci ainsi que de l'influence du réactif sur la stabilité du réseau, et enfin, on a terminé par un exemple pratique.

CHAPITRE I

ENERGIE REACTIVE.

1. NATURE DE L'ENERGIE REACTIVE
2. ENERGIE REACTIVE EN REGIME SINUSOIDAL
3. ANALOGIE MECANIQUE
4. RAPPELS DE DEFINITION
5. LES EFFETS NEFASTES DE L'ENERGIE REACTIVE
 - 5.1. CHUTES DE TENSION
 - 5.2. UN FAIBLE FACTEUR DE PUISSANCE
6. ENERGIE REACTIVE EN REGIME PERIODIQUE NON SINUSOIDAL

CONCLUSION.

Le réactif, cette énergie fantôme, passe auprès des électriciens pour une notion mystérieuse. Ayant l'habitude de calculer avec les variables complexes, le terme imaginaire les trouble lorsqu'ils doivent expliquer pourquoi cela entraîne des dépenses réelles de transport et de production.

1. NATURE DE L'ENERGIE REACTIVE -

Lorsqu'on parle de courant électrique, on se réfère tout naturellement à son aspect corpusculaire, celui d'un flot d'électrons. On obtient d'ailleurs une image explicative des phénomènes observés en continu : chute de tension en ligne, répartition de courants dans un réseau, pertes par effet Joule, etc... On doit cependant se rendre compte que ce modèle explicatif est insuffisant.

Un conducteur porté à un potentiel V et traversé par un courant I est entouré par un champ électromagnétique ; celui-ci se compose de deux vecteurs :

- le champ électrique E

- le champ d'induction magnétique B

qui sont liés par les équations de MAXWELL.

$$\begin{array}{lll} \text{Rot } \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 & \text{div } \vec{B} = 0 & \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \text{Rot } \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} & \text{div } \vec{D} = P & \vec{D} = \epsilon \vec{E} \end{array}$$

Il faut souligner que l'existence de ces deux champs est nécessaire pour qu'il y ait transmission d'énergie. De plus, tout processus de transformation fait appel à l'action de l'un ou l'autre de ces champs. L'énergie réactive est liée à l'existence des champs électrique et magnétique, et donc au fond à l'aspect oscillatoire de la transmission d'énergie électrique.

En physique moderne, on dira que les énergies électrique et magnétique sont liées aux déformations élastiques de l'espace, caractéristique des champs électrique et magnétique.

Le produit $\vec{E} \wedge \vec{H}$ est homogène à une puissance par unité de surface.

Pour une surface fermée S , le flux de puissance est :

$$\phi = \iint_{(S)} \vec{E} \wedge \vec{H} \cdot \vec{ds}$$

D'après le théorème d'OSTROGRADSKI, on peut écrire :

$$\iint_{(S)} \vec{E} \wedge \vec{H} \cdot \vec{ds} = \iiint_{(v)} \text{div} (\vec{E} \wedge \vec{H}) \, dv$$

$$\text{avec } \text{div} (\vec{E} \wedge \vec{H}) = \vec{H} \cdot \text{Rot } \vec{E} - \vec{E} \cdot \text{Rot } \vec{H}$$

De ce fait, on aura :

$$\iint_{(S)} (\vec{E} \wedge \vec{H}) \cdot \vec{ds} = - \iiint_{(v)} \left(\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dv - \iiint_{(v)} \vec{E} \cdot \vec{J} \, dv$$

Dans le cas d'un milieu homogène et linéaire, on aura :

$$- \iint_{(S)} (\vec{E} \wedge \vec{H}) \cdot \vec{ds} = \iiint_{(v)} E^2 \sigma \, dv + \frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{2} \epsilon_0 \iiint_{(v)} \epsilon_r E^2 \, dv + \frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{2 \mu_0} \iiint_{(v)} \frac{B^2}{\mu_r} \, dv$$

On voit que le flux de puissance à travers une surface fermée (S) enveloppant un volume (v) de l'espace qui contient un conducteur, est composé :

- de la puissance : $\iiint_{(v)} E^2 \sigma \, dv$ dissipée par effet Joule
- de la puissance : $\frac{\partial}{\partial t} \cdot \frac{1}{2} \cdot \iiint_{(v)} \left(\epsilon_0 \epsilon_r E^2 + \frac{1}{\mu_0 \mu_r} B^2 \right) dv$

En effet, l'énergie $dw = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 \epsilon_r E^2 + \frac{1}{\mu_0 \mu_r} B^2 \right) dv$, est emmagasinée dans tout volume élémentaire dv de l'espace, environnant un conducteur, elle est plus dense à proximité du conducteur que loin de lui. Elle est composée de l'énergie électrique $\left(\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \right)$ et de l'énergie magnétique $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\mu_0 \mu_r} B^2$.

Pour porter un conducteur de capacité C à un potentiel v , il a fallu fournir l'énergie $W_e = \frac{1}{2} Qv = \frac{1}{2} Q^2/C$, Q étant la charge du conducteur, W_e peut s'écrire aussi de la façon suivante :

$$W_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \iiint_{(v)} \epsilon_r E^2 dv.$$

De même, pour injecter un courant I dans un conducteur, il faut fournir au système l'énergie $W_m = \frac{1}{2} LI^2$, qui est elle aussi emmagasinée dans l'espace environnant, de sorte que :

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_{(v)} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} B^2 dv = \frac{1}{2 \mu_0} \iiint_{(v)} \frac{B^2}{\mu_r} dv$$

Dans un réseau à courant continu est porté à une tension sensiblement constante l'énergie W_e est fournie à la mise sous tension et reste ensuite constante, elle est récupérée à la mise hors tension.

L'énergie magnétique W_m varie avec l'énergie appelée puisque le réglage de celle-ci se fait par réglage du courant I ; lors de l'arrêt de la consommation, il y a aussi récupération de cette énergie.

2. ENERGIE REACTIVE EN REGIME SINUSOIDAL -

Si, dans un réseau le potentiel V et le courant I sont continuellement variables, il y a échange continu d'énergie entre les champs E et B d'une part, et la source d'énergie d'autre part, ce qui met en jeu les puissances :

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = CV \frac{dv}{dt}$$

$$P_m = \frac{dW_m}{dt} = LI \frac{dI}{dt}$$

Considérons un appareil d'utilisation quelconque, le réseau lui fournit à chaque instant :

- la puissance active P_a qui subit la transformation énergétique pour laquelle est faite l'appareil ;
- la puissance capacitive P_c échangée avec le champ électrique nécessairement présent dans l'appareil et les dispositifs utilisés à son

alimentation :

- la puissance magnétique P_m échangée avec le champ d'induction magnétique lui aussi nécessairement présent, qu'il soit utile ou parasite.

Le schéma représentatif le plus simple est celui formé par une résistance R , une inductance L et une capacité C en parallèle, soumise à la même tension V imposée par le réseau. On a alors :

- pour l'inductance $V = L \frac{dI_m}{dt}$, donc $P_m = \frac{1}{L} \int V dt$
- pour la résistance $P_a = \frac{V^2}{R}$
- pour la capacité $P_c = CV \frac{dV}{dt}$

Si la tension du réseau est une tension sinusoïdale de module constant V_0 , soit $V = V_0 \sin \omega t$, les expressions précédentes s'écrivent :

$$P_a = \frac{V_0^2}{2R} (1 - \cos 2\omega t), \quad P_c = \frac{V_0^2 c\omega}{2} \sin 2\omega t$$

$$P_m = -\frac{V_0^2}{2L\omega} \sin 2\omega t$$

On représente les courbes de tension, courant et puissance, pour chacun des éléments du circuit, dans les figures ci-dessous.

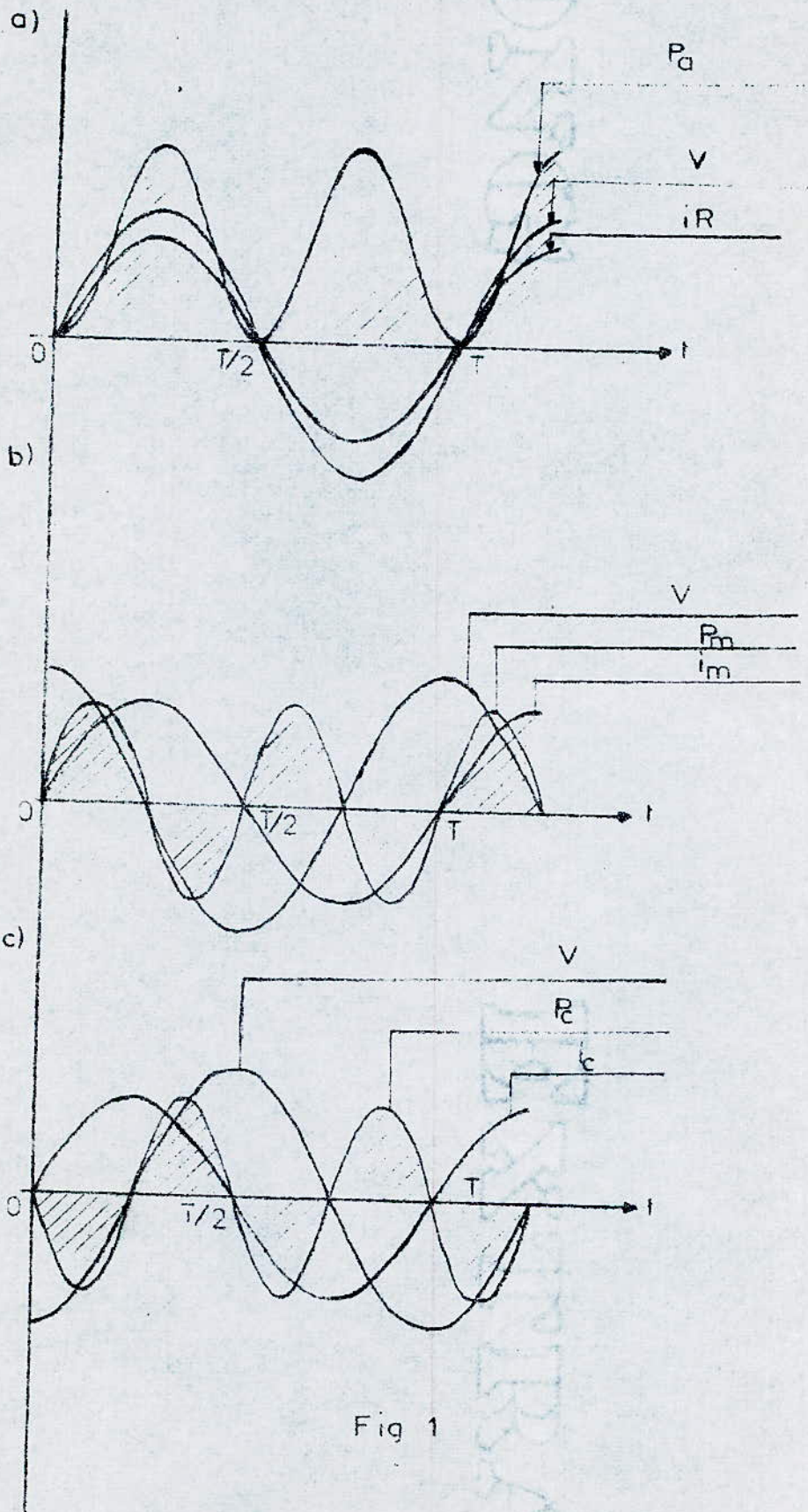


Fig 1

ETUDES DES COURBES :

Pa (t) : La courbe Pa(t) est périodique, mais non sinusoïdale, elle passe par zéro en même temps que la tension V et le courant CR, et se trouve toujours située par rapport à l'axe des temps du côté des ordonnées positives, la puissance instantanée est positive et de même signe à chaque instant. La surface délimitée par la courbe Pa (t) et l'axe des temps représente l'énergie absorbée par le récepteur pendant une période T qui représente la puissance moyenne fournie par la source au récepteur.

Courbe Pm (t) et PC (t) :

Les courbes Pm (t) et PC (t) sont sinusoïdales et de période T/2 ; par rapport à l'axe des temps, elles se trouvent situées alternativement du côté des ordonnées négatives et positives.

Les alternances positives et négatives de chacune des courbes Pm (t) et PC (t) sont égales et de signe contraire, de telle sorte que leur somme soit constamment nulle. L'interprétation du phénomène est alors la suivante : - pour la courbe Pm (t), respectivement PC (t), la source fournit, pendant le premier quart de période, une énergie à la réactance respectivement à la capacité qui l'absorbe pendant le quart de période suivant, la self restitue à la source l'énergie précédemment fournie.

Une différence importante est cependant à signaler entre self et capacité, c'est que l'énergie est positive dans la self lorsqu'elle est négative dans la capacité. En conséquence, lorsque la self absorbe de la puissance Pm, elle l'emprunte à la capacité. Si les puissances Pm, absorbée par la self, et Pc, produite par la capacité, sont égales en module, il y a directement échange d'énergie entre les champs électrique et magnétique, et le réseau n'est pas sollicité à participer à l'échange.

Avec le schéma en parallèle adopté, on a alors $CLW^2 = 1$. Si la tension n'est pas imposée, rien ne limite les échanges de puissance capacitive et inductive, le réseau doit véhiculer alors une puissance supplémentaire : la puissance réactive.

Plus précisément, la source fournit une puissance $Q = - PC + Pm$, et seule cette différence circule dans le réseau reliant la source et l'ensemble self-capacité. Cette remarque explique le rôle joué par les con -

densateurs pour la production d'énergie réactive destinée à compenser celle absorbée par les selfs.

3. ANALOGIE MECANIQUE -

L'énergie emmagasinée dans une self est comparable à celle mise en réserve dans le volant d'une machine, ou plus généralement dans une masse. Le volant d'une machine sert en effet à régulariser les à-coups de marche résultant du va et vient des pistons ; il met en réserve de l'énergie cinétique lorsque la vitesse augmente, et la restitue lorsque la vitesse diminue.

La self joue le même rôle avec l'énergie électromagnétique accumulée pendant la période où la source alternative fournit de l'énergie, et la restitue pendant la période où cette même source en absorbe. L'analogie entre self et inertie résulte d'ailleurs de la loi de l'induction qui précise que dans un circuit inductif le flux induit vient toujours s'opposer à la variation du flux inducteur, les forces électromagnétiques créées par les courants induits tendent à s'opposer au mouvement qui les produit ; c'est une véritable inertie.

- L'énergie emmagasinée dans une capacité est comparable à celle mise en réserve dans un ressort, ou plus généralement dans un système présentant une élasticité.

Un piston placé dans le circuit reliant deux réservoirs séparés par une membrane élastique crée, quand on l'actionne pendant un court instant, une différence de pression entre les deux réservoirs. La membrane accumule du fait de son élasticité une énergie potentielle, en supposant qu'il n'y ait pas de frottements et que si l'on relâche le piston, l'énergie de la membrane fait revenir celui-ci à sa position initiale. Un phénomène analogue se retrouve dans un condensateur ; les deux réservoirs et la membrane sont alors respectivement remplacés par les deux armatures et le diélectrique du condensateur. Lorsque la source fournit de l'énergie, le condensateur se charge, lorsque la source absorbe de l'énergie,

le condensateur se décharge, c'est le diélectrique qui emmagasine l'énergie.

- Les deux formes d'énergie mises en réserve dans une self et dans une capacité sont de signe contraire, si l'on effectue l'analogie mécanique le résultat est immédiat.

En effet, une masse suspendue à l'extrémité d'un ressort peut osciller si on lui communique une variation d'énergie potentielle ; il suffit pour cela de la rapprocher du sol. L'énergie perdue par la masse est emmagasinée par le ressort qui se tend, puis restituée à la masse lorsque le ressort revient à sa position initiale, les énergies potentielles mises en jeu sont de signe contraire puisque l'une augmente pendant que l'autre diminue.

4. RAPPELS DE DEFINITION -

Considérons un circuit inductif alimenté par une tension sinusoïdale $V = V_m \sin \omega t$, parcouru par un courant déphasé en arrière de V d'un angle ϕ , $I = I_m \sin (\omega t - \phi)$ dont la représentation de FRESNEL est indiquée dans la figure I.2.

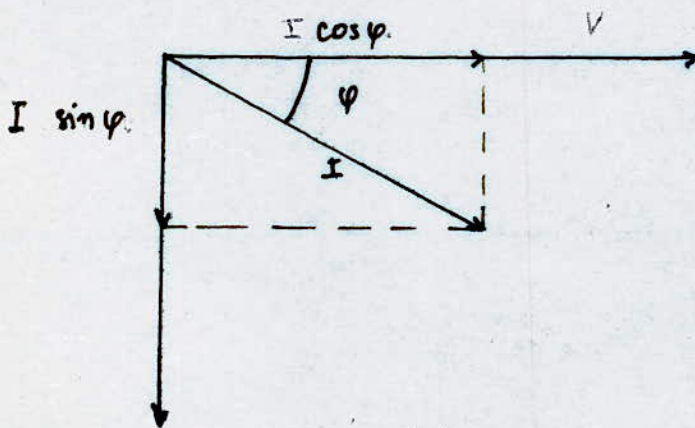


Fig. I.2.

Le courant I peut être décomposé en deux composantes : l'une active en phase avec la tension ($I \cos \varphi$), et l'autre réactive en quadrature arrière de V ($I \sin \varphi$).

Rappelons les définitions suivantes :

- Puissance active : égale au produit de la valeur efficace de la tension par la composante active du courant.
 $P = V I \cos \varphi$
En triphasé : $P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$
- Puissance réactive : égale au produit de la valeur efficace de la tension par le courant réactif.
 $Q = V I \sin \varphi$
- Puissance apparente : produit de la valeur efficace de la tension par la valeur efficace du courant.
 $S = V I$
En triphasé : $S = \sqrt{3} U I$

En notation complexe, on a :

$$S = V \cdot \overset{*}{I} = P + j Q ; \overset{*}{I} \text{ conjuguée de } I$$

On peut aussi envisager une autre définition de S :

$$S = \overset{*}{V} \cdot I = P - j Q ; \overset{*}{V} \text{ conjuguée de } V$$

Normalement, la puissance réactive inductive est positive, mais dans l'autre définition, elle est négative. Nous verrons que la deuxième définition est préférée à la première, du fait qu'elle apporte une simplification précieuse dans la théorie du diagramme du cercle.

5. LES EFFETS NEFASTES DE L'ENERGIE REACTIVE.

5.1. Chutes de tension :

Considérons une liaison AB assimilable à une impédance $Z = R + j X$ qui transporte de A vers B une puissance $S = P + j Q$, représentée par la figure ci-dessous :

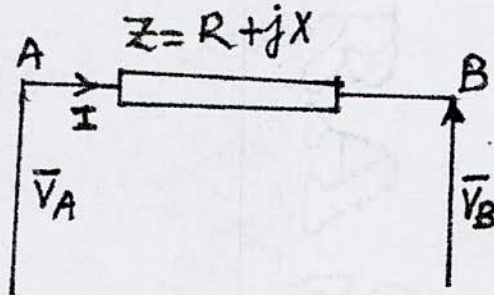
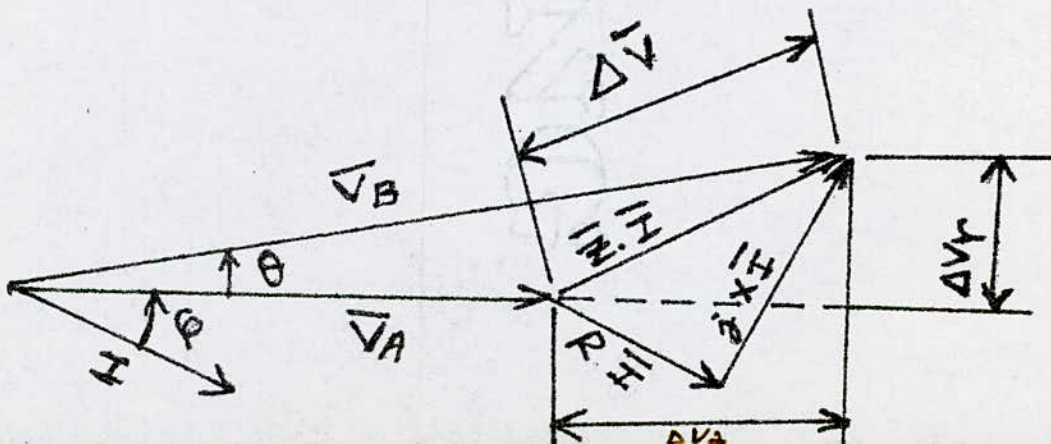


Fig. I.3.

La chute de tension en ligne est $\Delta \bar{V} = \bar{V}_A - \bar{V}_B$; $\Delta \bar{V} = (R + j X) \bar{I}$.
Le diagramme vectoriel de la figure I.3. traduit la représentation de cette équation dans le plan de GAUSS, \bar{V}_A est prise comme référence de phase, et on admet que le courant \bar{I} est déphasé en arrière de \bar{V}_A .



D'après le diagramme précédent, on peut exprimer ΔV de la façon suivante :

$$\Delta \bar{V} = \Delta V_a + j \Delta V_r \quad (1)$$

avec :

$$\Delta V_a = RP + XQ$$

$$\Delta V_r = XP - RQ$$

Habituellement, la résistance de la ligne est nettement plus faible que sa réactance, d'où les formules approchées suivantes :

$$\Delta V_a \approx XQ$$

$$\Delta V_r \approx XP$$

Ces formules sont simples mais très importantes dans l'analyse des réseaux de transmission d'énergie électrique ; nous aurons l'occasion de les utiliser fréquemment.

La chute de tension relative est :

$$\frac{\Delta U_A}{U_A} = \frac{RP + XQ}{U_A} \approx \frac{XQ}{U_A} \quad (2)$$

Une autre formule approximative très pratique est :

$$\frac{\Delta U_A}{U_A} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

avec S_{cc} : puissance de court-circuit.

Les pertes de puissance active occasionnées par cette chute de tension sont telles que :

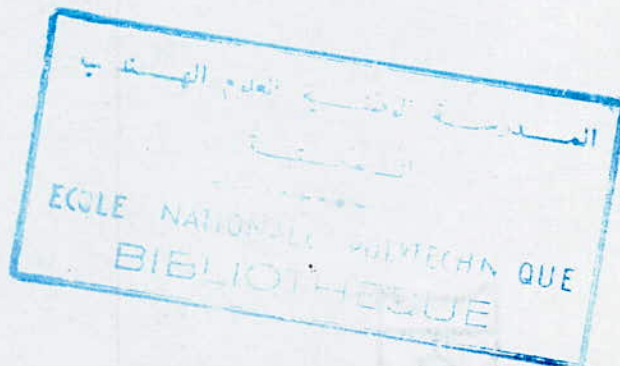
$$P = \frac{R (P^2 + Q^2)}{U^2} \quad (3)$$

5.2. Un faible facteur de puissance :

On sait que le facteur de puissance étant défini comme étant le rapport entre la puissance active à la puissance apparente.

$\cos \varphi = \frac{P}{S}$ en général les charges sont inductives, c'est à dire le courant absorbé est déphasé en arrière de la tension $\bar{I} = I_a - j I_r$, avec $I_a = \frac{P}{\bar{I} \cos \varphi}$; $I_r = \frac{P}{\bar{I} \sin \varphi}$. Donc, toute circulation importante de puissance réactive entraîne la prépondérance de la composante réactive du courant par rapport à la composante active, d'où un faible facteur de puissance. Or, un mauvais facteur de puissance nuit au bon fonctionnement des installations, ceci d'une part pour la société productrice car un $\cos \varphi$ faible entraîne des pertes supplémentaires et un surdimensionnement du matériel (jeux de barres des postes, transformateurs, alternateurs), et d'autre part, l'utilisateur est pénalisé par une grande consommation d'énergie réactive. Son importance économique est capital.

A titre indicatif, le figure I.5. montre les facteurs de puissance moyens des utilisateurs caractéristiques.



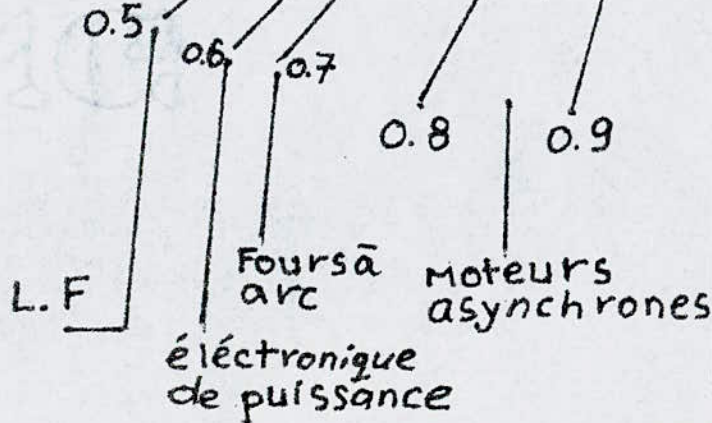
FACTEUR DE PUISSANCE MOYEN DES UTILISATEURS CARACTERISTIQUES

ABSORPTION DE Q ←

→ FOURNITURE DE Q

- SELFS
- TRANSFORMATEURS
- LIGNES HYPOCRITIQUES
- COMPENSATEURS SOUS-EXCITES

- CONDENSATEURS
- LIGNES AERIENNES A CHARGE SOUS-CRITIQUE
- CABLES
- COMPENSATEURS SYNCHRONES SUR-EXCITES



RESISTANCES, LAMPES A INCANDESCENCE

L.F: Lampes fluorescentes

FIG. I.5.

6. ENERGIE REACTIVE EN REGIME PERIODIQUE NON SINUSOIDAL -

Soit un circuit soumis à une tension périodique non sinusoïdale et parcouru par un courant i périodique non sinusoïdale, telle que :

$$u = \sqrt{2} \sum U_n \cos(n\omega t - \alpha_n) ; \quad i = \sqrt{2} \sum I_n \cos(n\omega t - \beta_n)$$

On définit la puissance apparente comme suit :

$$S = U \cdot I$$

$$\text{avec ; } U^2 = \sum U_n^2 ; \quad I = \sum I_n^2$$

d'où :

$$S^2 = \sum U_n^2 \cdot \sum I_n^2 = \sum U_n^2 (\sum I_n^2 (\cos^2 \varphi_n + \sin^2 \varphi_n))$$

avec φ_n déphasage entre U_n et I_n .

En utilisant la relation :

$$\sum x_n^2 \cdot \sum y_n^2 = (\sum x_n \cdot y_n)^2 + \sum (x_m \cdot y_m - x_n \cdot y_n)^2$$

S^2 s'écrit :

$$S^2 = (\sum U_n I_n \cos \varphi_n)^2 + \sum (U_m I_m \cos \varphi_m - U_n I_n \cos \varphi_n)^2 \\ + (\sum U_n I_n \sin \varphi_n)^2 + \sum (U_m I_m \sin \varphi_m - U_n I_n \sin \varphi_n)^2$$

On définit :

$$P = \sum U_n I_n \cos \varphi_n : \text{puissance active ;}$$

$$Q = \sum U_n I_n \sin \varphi_n : \text{puissance réactive ;}$$

$$D = \left[\sum (U_m I_m \cos \varphi_m - U_n I_n \cos \varphi_n)^2 + \sum (U_m I_m \sin \varphi_m - U_n I_n \sin \varphi_n)^2 \right]^{1/2}$$

D : est appelé puissance déformante.

S peut s'écrire alors :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Plusieurs définitions ont été proposées, aucune n'a été retenue par la C.E.I. pour le moment du fait que la signification physique de cette grandeur en régime non sinusoïdale reste inconnue.

CONCLUSION -

Il ressort de ce que nous venons de dire que : toute circulation importante de puissance réactive entraîne des chutes de tension en ligne, par conséquent le réglage de la tension est délicat ; on justifiera cette assertion dans le chapitre suivant.

Le transit de puissance réactive a pour effet également d'accroître les pertes actives et de diminuer le rendement du système de transmission d'énergie. En d'autres termes, le transit de puissance réactive entraîne des surinvestissements.

En bref, l'énergie réactive doit être produite autant que possible dans l'endroit où elle est consommée.

C H A P I T R E I I

OPTIMISATION DE LA COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE.

- II.1. BILAN DES PUISSANCES REACTIVES
 - 1.1. CONSOMMATEURS D'ENERGIE REACTIVE
 - 1.1.1. LES LIGNES ELECTRIQUES
 - 1.1.2. TRANSFORMATEURS
 - 1.2. DISPOSITIFS DE COMPENSATION ET MISE EN OEUVRE PRATIQUE
 - 1.2.1. COMPENSATEURS SYNCHRONES
 - 1.2.2. REACTANCES SATURABLES COMMANDEES PAR COURANT CONTINU
 - 1.2.3. REACTANCES AUTO-SATUREES A COURANT ALTERNATIF
 - 1.2.4. REACTANCES COMMANDEES PAR THYRISTOR
 - 1.2.5. CONDENSATEURS COMMUTES PAR THYRISTORS
- II.2. CALCUL OPTIMAL DU FACTEUR DE PUISSANCE
 - 2.3. CALCUL OPTIMAL DE LA PUISSANCE DE COMPENSATION PAR LE DIAGRAMME DE CERCLE
- II.4. REPARTITION OPTIMALE DE LA PUISSANCE REACTIVE DE COMPENSATION DANS LES RESEAUX
 - 4.1. PRINCIPE
 - 4.2. CAS DES RESEAUX RADIAUX
 - 4.3. CAS DES RESEAUX MAGISTRAUX
 - 4.4. CAS DES RESEAUX COMPLEXES
- II.5. CALCUL DES PERTES.

Le courant admissible dans un élément de réseau étant limité par les échauffements thermiques, on sait (Chap. I) que tout transit de puissance réactive augmente les pertes et les chutes de tension, par conséquent diminue les possibilités de transport de puissance active.

Afin de minimiser ces pertes et d'augmenter la puissance active transmissible par le réseau, sans compromettre à la stabilité, il est indispensable de faire une compensation.

II.1. BILAN DES PUISSANCES REACTIVES -

1.1. Les consommateurs d'énergie réactive :

1.1.1. Les lignes électriques :

Considérons un élément de réseau transmittant la puissance apparente S , modélisé par le schéma suivant :

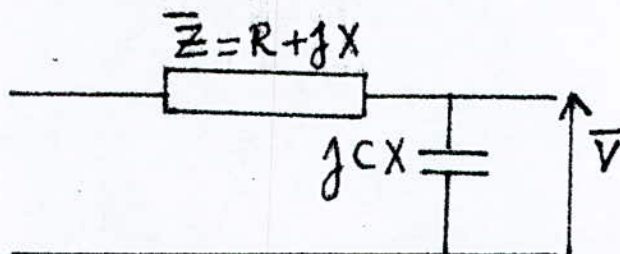


Fig. 1

Pour les réseaux à H.T et T.H.T., on a : $\frac{R}{X} \ll 1$

donc $Z \approx jX$.

Le bilan de puissance réactive de cet élément s'écrit :

$$q = U^2 \omega C - X \frac{S^2}{U^2} \quad (1)$$

On voit donc que d'après cette formule, la ligne ou le câble peuvent fournir ou absorber de la puissance réactive selon que la puissance transmise S est inférieure ou supérieure à S_c telle que : en faisant $Q = 0$ dans la formule (1), on obtient :

$$S_c = U^2 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2), \text{ en posant } Z = \sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ la formule devient}$$
$$S_c = \frac{U^2}{Z}$$

Z est l'impédance caractéristique de la ligne, et S_c est la puissance caractéristique.

Par exemple, pour une ligne à 400 Kv de 200 Km de longueur, ayant les conducteurs en faisceaux de $2 \times 570 \text{ mm}^2$ par phase, on obtient le bilan donné dans le graphique ci-dessous :

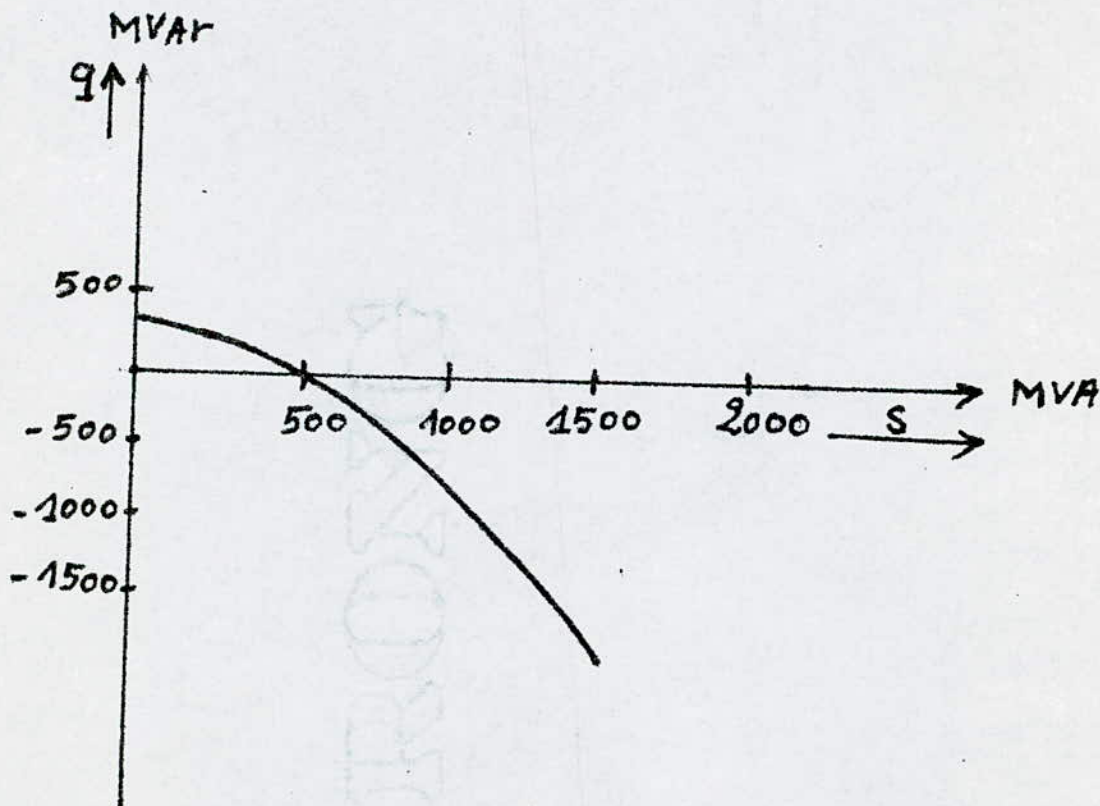


Fig. 2

On trouve ci-après quelques données concernant les lignes et les câbles :

	q_0 KVar/Km	S MVA	q_c	Z_c S L	P_c MW
Ligne 400 Kv	550	1400	- 3450	300	530
Ligne 225 Kv	140	400	- 1300	380	130
Ligne 20 Kv	1	7	- 40	360	1
Câble 400 Kv	12700	550	12500	40	4000
Câble 225 Kv	3300	230	3200	50	10000
Câble 20 Kv	20	3,5	15	50	8

Avec :

- q_0 : puissance réactive fournie à vide
- S : charge de la ligne
- q_c : bilan de puissance réactive pour la charge S
- Z_c : impédance caractéristique
- P_c : puissance caractéristique.

1.1.2. Transformateurs :

La puissance réactive absorbée par un transformateur peut être décomposé en deux termes :

- la puissance réactive magnétisante qui est nécessaire pour maintenir le champ magnétique dans le noyau. Elle est de l'ordre de 1 à 2 % de la puissance nominale pour les gros transformateurs ; en pratique, elle est mesurée par le courant à vide. Ci-après, on donne l'évolution

du courant à vide en fonction de la puissance.

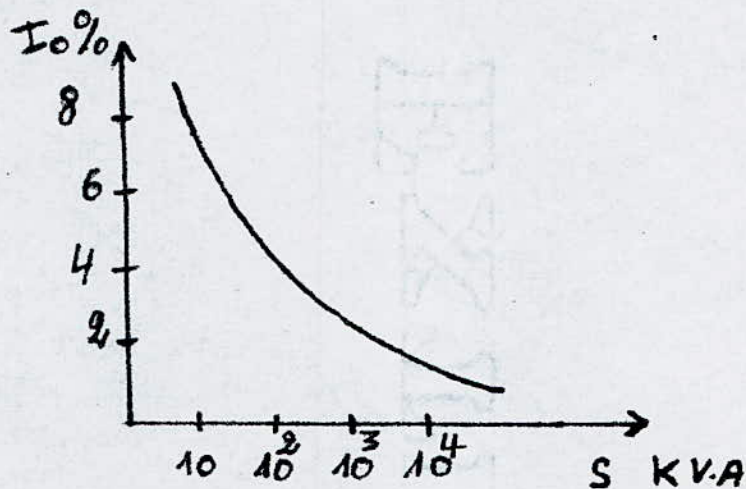


Fig. 3. - Variation de I_0 % en fonction de S

- la puissance réactive engendrant le flux de fuite, elle est de l'ordre de 7 à 13 %, et parfois plus.

La puissance réactive totale absorbée par un transformateur est donnée par la formule suivante :

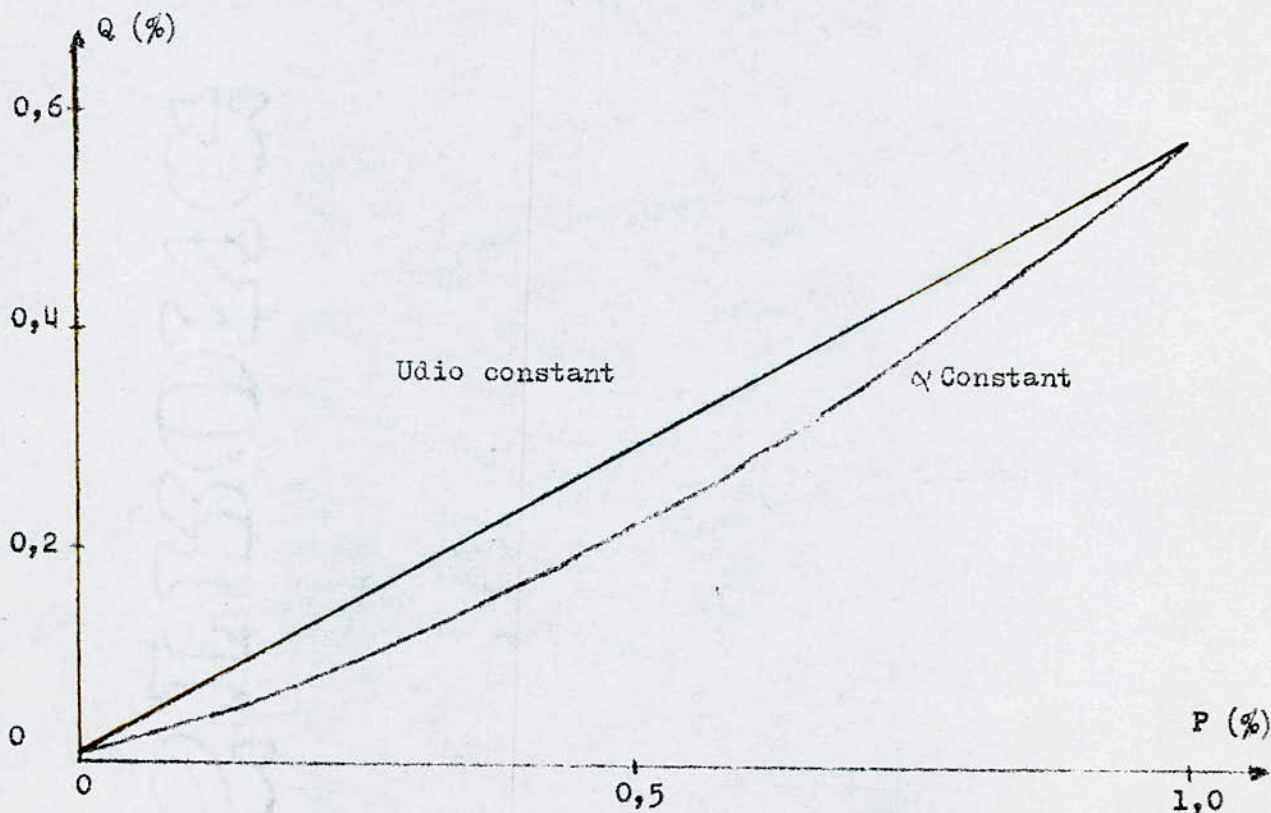
$$Q = \frac{I_0 \%}{100} \cdot S_n (\text{KVA}) + \frac{U_{cc} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2 (\text{KV})}{U_n (\text{KV})} \cdot \frac{S (\text{KVA})}{S_n (\text{KVA})}$$

Q est exprimé en KVA r

1.1.3. Les stations de conversion C.C.H.T :

La consommation de puissance réactive d'un convertisseur dépend de quatre facteurs, la tension alternative fondamentale U_1 , le courant alternatif I_1 , l'angle α de retard et la réactance de commutation X_c , donc : $Q = f(U_1, I_1, \alpha, X_c)$.

Le système de commande traditionnel, commande à courant constant du redresseur et commande à angle d'extinction constant de l'onduleur, aboutit à une consommation de puissance réactive Q qui varie avec la puissance active P comme indiqué sur la fig(4); donc les stations des liaisons CCHT consomment, tant en redresseur qu'en onduleur, une puissance réactive qui est typiquement égale à 60 % de la puissance active transmise à pleine charge .



Variation de la puissance réactive Q avec la puissance active P d'un convertisseur CCHT .

fig(4)

1.2. Dispositifs de compensation et mise en oeuvre pratique :

1.2.1. Compensateurs synchrones :

Les compensateurs synchrones sont utilisés pour fournir de la puissance réactive variable, mais de nos jours, commencent à être abandonnés à cause du développement des dispositifs de compensation statique.

Habituellement, la tension de raccordement n'est pas supérieure à 20 KV, et par conséquent, un compensateur synchrone doit être connecté soit à un enroulement tertiaire d'un transformateur, soit par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur. La capacité nominale d'absorption de puissance réactive d'un compensateur synchrone se situe habituellement dans la plage de 50 à 75 % de la puissance nominale en fourniture de puissance réactive.

1.2.2. Réactances saturables commandées par courant continu (transducteurs) :

Les transducteurs sont des réactances à noyau de fer dans lesquels le courant alternatif primaire est réglé en faisant varier le courant continu injecté dans les enroulements secondaires de réglage à partir d'un redresseur de puissance nominale relativement faible. La vitesse de réponse des transducteurs peut être meilleure que celle d'un compensateur synchrone.

Des transducteurs ont été fabriqués avec des puissances nominales unitaires allant jusqu'à 120 MVar. La production d'harmoniques peut être limitée par l'utilisation d'enroulements interconnectés sur des noyaux à branches multiples.

La plage de production et d'absorption requise pour le réglage de puissance réactive est obtenue à l'aide d'une association appropriée des batteries de condensateurs shuntés en parallèle avec le transducteur. Les transducteurs peuvent être fabriqués pour être directement connectés à des tensions quelque peu supérieures à celles des compensateurs syn-

chrones, mais le redresseur de commande doit être soigneusement protégé contre les surtensions en provenance du côté primaire.

1.2.3. Réactances auto-saturées à courant alternatif :

Les réactances auto-saturées à courant alternatif ont été largement utilisées dans les réseaux de transport et de distribution. Leur construction est pratiquement analogue à celle d'un transformateur. La réactance auto-saturée est un dispositif triphasé comportant une caractéristique V/I non linéaire. Les réactances auto-saturées sont conçues pour des tensions allant jusqu'à 72 KV ; un transformateur élévateur est nécessaire pour leur branchement à T.H.T. tout comme les autres dispositifs de compensation.

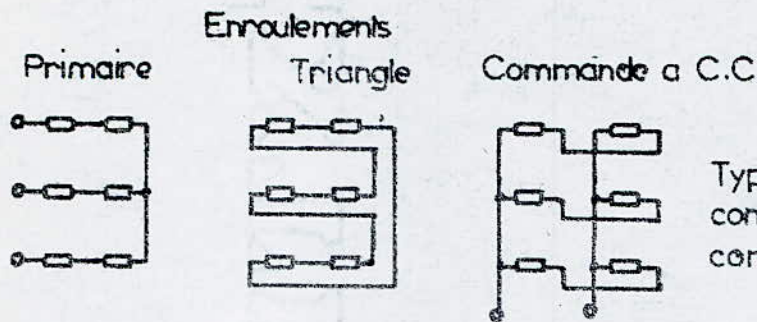
1.2.4. Réactances commandées par thyristors :

Le réglage de la puissance réactive avec ce type de compensateur repose sur la variation du courant alternatif qui circule dans une réactance linéaire et obtenue en réglant la durée de conduction des valves à thyristors connectées en série dans chaque phase. Les valves à thyristors sont constituées d'empilements en série de thyristors montés en tête bêche pour la conduction bi-directionnelle.

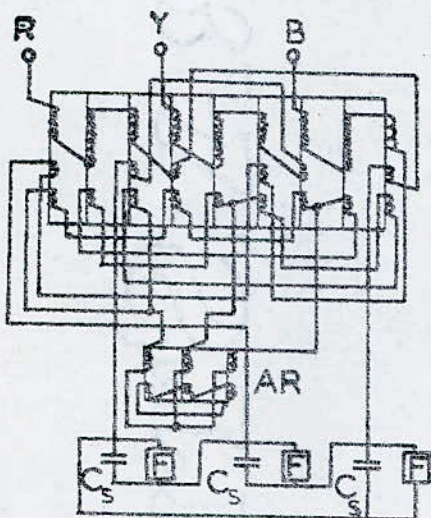
Le principe de commande implique le réglage de l'angle de phase de l'allumage des thyristors depuis 180° (absence de conduction), jusqu'à 90° (pour conduction continue durant le cycle entier).

Les réactances linéaires et les valves sont normalement conçues pour un niveau de tension relativement bas, et un transformateur élévateur est utilisé pour le branchement au réseau à H.T. Les courants harmoniques engendrés par une réactance commandée par thyristors peuvent être importants si un schéma de valves triphasé simple est adapté ; la connection en triangle permet habituellement d'éviter l'injection de courants harmoniques du troisième ordre dans le réseau en régime équilibré.

Avec la batterie de condensateurs shunts, on constitue des filtres

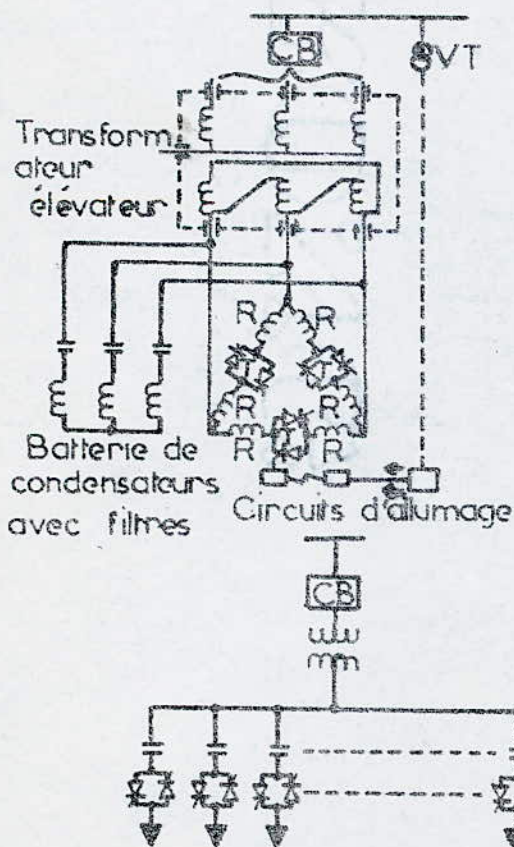


Type de reactance saturable
commandee par courant
continu



C_s, F = filtre d'amortissement

Inductance saturée pour courant
alternatif



- CB Disjoncteur
- TV Transformateur de tension
- R Réactance
- T Modules de thyristor

Type de reactance commandee
par thyristors

Type de condensateur commuté
par thyristor

Fig (5)

d'harmoniques. Elle peut être insérée (C.C.T. ou disjoncteur) ou débranchée pour réaliser la plage spécifiée de variation de la puissance réactive, et elle peut être connectée au niveau de tension secondaire ou tertiaire, ou au jeu de barres à haute tension.

1.2.5. Condensateurs commutés par thyristors (C.C.T.) :

Les C.C.T. sont, dans leur concept, similaires aux R.C.T. mais le compensateur est commandé par échelons discrets. Une commande continue par l'angle d'allumage ne peut être appliquée aux condensateurs, et par conséquent, on utilise une commande par tout ou rien. Les condensateurs et les valves sont conçus pour un niveau de tension relativement faible. Par conséquent, un transformateur élévateur est utilisé pour le branchement au réseau H.T.

II.2. CALCUL OPTIMAL DU FACTEUR DE PUISSANCE -

La puissance réactive appelée par les réseaux est très variable dans le temps dont la production nécessite certaines dépenses, et il y a donc un optimum économique à trouver entre :

- les dépenses des différentes sources d'énergie réactive (dont le coût par KVAR produits sont différents) ;
- le coût de transit de cette énergie dans le réseau ;
- la qualité de la tension de transport.

Pour trouver la grandeur et l'endroit des sources réactives, on doit minimiser une fonction qui tient compte des pertes d'énergie et de frais de compensation.

On note :

- P (KW) : puissance appelée par la charge.
- X (D.A /KVAR et année) : Coût du KVAR installé
- y (D.A/KVA et année) : Coût spécifique du système d'alimentation.
- Z (D.A/KW et année) : Coût des pertes.

- r (%) : pertes en % pour $\cos \varphi = 1$
- K : constantes des pertes
- R (D.A.) : bénéfices occasionnés pour amélioration du $\cos \varphi$, de la valeur du $\cos \varphi_1$ à $\cos \varphi_2$

D'après ce que nous venons de dire, l'expression de R est la suivante :

$$- R = y P (\sec \varphi_1 - \sec \varphi_2) + Z K P^2 (\sec^2 \varphi_1 - \sec^2 \varphi_2) - x P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

$$R \text{ est optimum si on a : } \frac{d R}{d \varphi_2} = 0$$

En dérivant, on trouve :

$$\cos \sec \varphi_2 = \frac{1}{x} (y + Z P K \sec \varphi_2) \quad (4)$$

Posons dans l'équation (4) :

$$K P^2 = \frac{r \cdot P}{100}$$

$$Z = \frac{2 Z r}{100}$$

On obtient :

$$\cos \sec \varphi_2 = \frac{1}{x} (y + Z \sec \varphi_2) \quad (5)$$

De l'équation (5) on tire :

$$\cos \varphi_2 = \frac{a \sin \varphi_2}{b - \sin \varphi_2} \quad (6)$$

Avec :

$$a = \frac{Z}{y}$$

$$b = \frac{x}{y}$$

(6')

Soit la variable auxiliaire $t = \operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2}$, en substituant dans l'équation (6) on obtient :

$$bt^4 + 2t^3 (a-1) + 2t (a+1) - b = f(t)$$

En général le $\cos \varphi$ est voisin de l'unité donc t est très faible, on peut donc négliger les termes en t d'ordre supérieur à 1 d'où la formule approchée :

$$2t = \frac{b}{a+1}$$

Pour plus de précision on utilise la méthode itérative de Newton, on se limitera à la première itération :

$$t = \frac{b}{2(a+1)} - \frac{f(t)}{f'(t)}$$

d'où :

$$\cos \varphi_2 = 1 - \frac{b^2}{2(a+1)^2}$$

En remplaçant a et b par leur valeur (équation 6') on obtient :

$$\cos \varphi_2 = 1 - \frac{x^2}{2(\bar{z} + y)^2} \quad (7)$$

Cette formule est très importante puisqu'elle permet de calculer la puissance nécessaire de compensation d'après les données économiques.

2.3. CALCUL OPTIMAL DE LA PUISSANCE DE COMPENSATION PAR

LE DIAGRAMME DE CERCLE :

Dans les réseaux à HT et THT on doit tenir compte des admittances transversales. Il faut alors considérer le quadripôle passif équivalent en π .

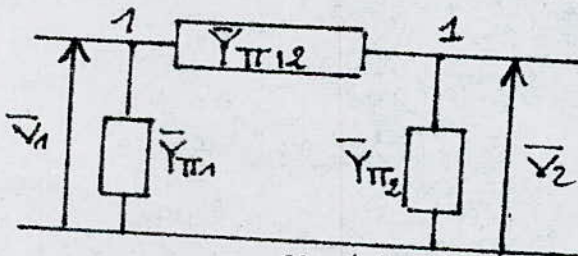
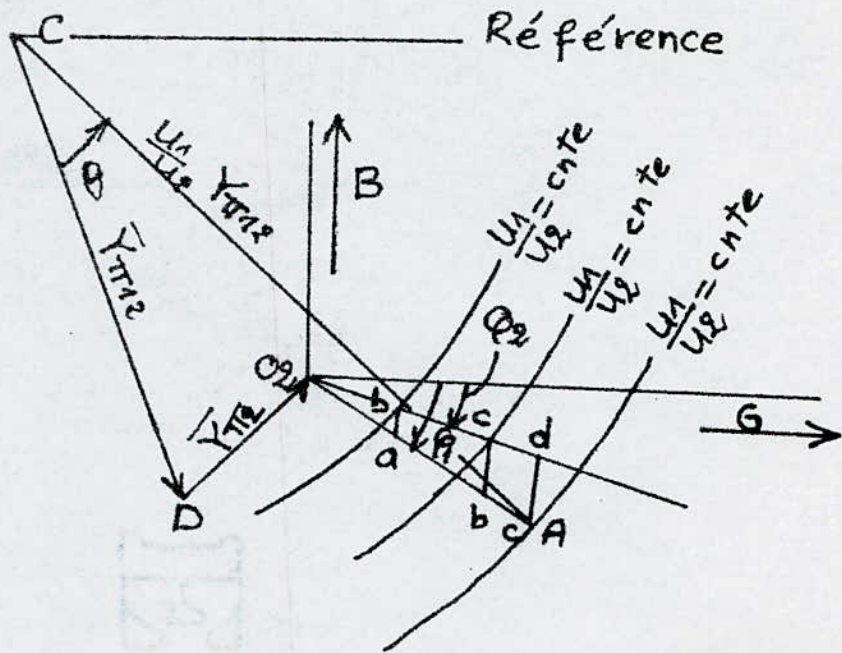


fig (6)

Le diagramme de fonctionnement est représenté dans la fig(7) .



fig(7)

Pour améliorer le $\cos \phi$ il faut injecter à l'extrémité réceptrice une puissance réactive dont la valeur est telle que :

$$Q = B \cdot U^2 .$$

B est mesuré par la valeur des segments ab, bc et cd à l'échelle des admittances .

II. 4 . REPARTITION OPTIMALE DE LA PUISSANCE REACTIVE DE COMPENSATION DANS LES RESEAUX

4.1. Principe :

Soit un réseau où circule une puissance $S = P + jQ$; les pertes actives sont :

$$\Delta P = \frac{(P^2 + Q^2)R}{U^2} = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R$$

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_q$$

ΔP_p : puissance perdue due au transit de P .

ΔP_q : puissance perdue due au transit de Q .

Pour le régime de pointe, le terme ΔP_p est constant. Par contre, ΔP_q est un terme sur lequel on peut agir en compensant en partie la puissance réactive. Le problème de la répartition optimale des condensateurs revient donc à celui de la minimisation des pertes actives dues au transit de la puissance réactive.

4.2. Cas des réseaux radiaux :

Soit un réseau radial de n départs, on note Q_1, Q_2, \dots, Q_n , les puissances réactives appelées sur chaque départs avant la compensation ; Q_{k1}, \dots, Q_{kn} les puissances réactives de compensation (installées à la fin de chaque départ) de résistances R_1, \dots, R_n .

Après la compensation, les pertes actives dues au transit de la puissance réactive sont sur chaque départ :

$$\Delta P_i = \frac{1}{U^2} (Q_i - Q_{ki})^2 R_i = a (Q_i - Q_{ki})^2 R_i$$

où $a = \frac{1}{U^2}$

d'où les pertes totales :

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i$$

C'est à dire :

$$\Delta P = a \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{ki})^2 R_i$$

ΔP est une fonction $(Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn})$

Posons : $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} - Q_k = \psi (Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{ki}, \dots, Q_{kn}) = 0$$

Formons la fonction pertes comme suit :

$$F (Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{ki}, \dots, Q_{kn}, \lambda) = f (Q_{k1}, \dots, Q_{ki}, Q_{kn}) + \lambda \psi (Q_{k1}, \dots, Q_{ki}, \dots, Q_{kn})$$

Où λ représente l'opérateur de Laplace.

La dérivée partielle $i^{\text{ème}}$ de F est :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{ki}} = \frac{\partial f}{\partial Q_{ki}} + \lambda \frac{\partial \psi}{\partial Q_{ki}} = -2 (Q_i - Q_{ki}) a R_i + \lambda = 0$$

Avec $i = (1, 2, \dots, n)$

Faisons la somme :

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial Q_{ki}} = 0, \text{ on obtient :}$$

$$2a (Q - Q_k) = \lambda \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \lambda \frac{1}{R_e}$$

Ce qui donne :

$$\lambda = 2a (Q - Q_k) R_e$$

D'où :

$$Q_{ki} = Q_i - \frac{\lambda}{2a R_i} \text{ en remplaçant } \lambda \text{ par sa valeur, on tire :}$$

$$Q_{ki} = Q_i - (Q - Q_k) \frac{R_e}{R_i}$$

La valeur optimale de la puissance réactive du dispositif de compensation à la fin de la $i^{\text{ème}}$ ligne correspondant à un minimum de pertes est :

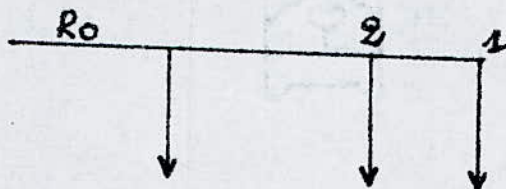
$$Q_{ki \text{ opt}} = Q_i - (Q - Q_k) \frac{R_e}{R_i}$$

4.3. Cas des réseaux magistraux :

Soit un réseau magistral à n départs de résistance $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n$; les tronçons de ligne compris entre les différents départs ont des résistances $R_0, R_{12}, \dots, R_{(n-1)n}$. On note par Q_1, Q_2, \dots, Q_n les puissances appelées par les n départs, celles qui circulent dans les tronçons de ligne séparant les différents départs sont notées par $Q_{01}, Q_{12}, \dots, Q_{(n-1)n}$. Les puissances réactives de compensation sont notées de la même façon avec l'indice K en plus.

Un réseau magistrale peut être considéré comme une succession de réseaux radiaux, composés chacun d'un départ simple et d'un autre départ qui se décompose en deux autres départs radiaux, etc...

Soit le réseau magistral suivant :



Dans le cas d'un réseau radial, les différentes puissances réactives étaient liées par la relation :

$$(Q_i - Q_{ki}) R_i = (Q - Q_k) R_e$$

Appliquant cette relation au noeud 2 :

$$(Q_1 - Q_{k1}) (R_1 + R_{12}) = (Q_2 - Q_{k2}) R_2 = R_{e1} (Q_{23} - Q_{k23})$$

Avec :

$$R_{e1} = \frac{(R_1 + R_{12}) R_2}{R_1 + R_{12} + R_2}$$

Au noeud 3, on trouve :

$$(Q_{23} - Q_{k23}) (R_{e1} + R_{23}) = (Q_3 - Q_{k3}) R_3 = (Q_{34} - Q_{k34}) R_{e2}$$

Avec :

$$R_{e2} = \frac{R_3 (R_{e1} + R_{23})}{R_{e1} + R_{23} + R_3}$$

Au noeud i, on aura :

$$\begin{aligned} (Q_{(i-1)i} - Q_{k(i-1)i}) (R_{e(i-2)} + R_{(i-1)i}) &= (Q_i - Q_{ki}) R_i = \\ (Q_{i(i+1)} - Q_{ki(i+1)}) R_{e(i-1)} \end{aligned}$$

Avec :

$$R_{e(i-1)} = \frac{R_i (R_{e(i-2)} + R_{(i-1)i})}{R_i + R_{e(i-2)} + R_{(i-1)i}}$$

La distribution se fera alors de la façon suivante :

$$Q_{kn} = Q_n - (Q - Q_k) R_e (n-1) / R_n$$

⋮

$$Q_{ki} = Q_i - (Q_i (i+1) - Q_{ki} (i+1)) R_e (i-1) / R_i$$

⋮

$$Q_{k1} = Q_{k23} - Q_{k2}$$

4.4. Cas des réseaux complexes :

Soit un réseau radial avec n départs magistraux composés chacun de n dérivationes.

Les pertes totales engendrées par la circulation de la puissance réactive sont :

$$\Delta P = f (Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn}) = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n$$

Où Q_{k1}, \dots, Q_{kn} , représentent les puissances réactives de compensation sur les départs magistraux 1, 2, ..., n et $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ les pertes correspondantes.

Il est toujours possible d'écrire les pertes $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ sous la forme :

$$\Delta P_1 = a (Q_1 - Q_{k1})^2 [\alpha_{11} + \alpha_{12} + \dots + \alpha_1 (2n-1)]$$

$$\Delta P_2 = a (Q_2 - Q_{k2})^2 [\alpha_{21} + \alpha_{22} + \dots + \alpha_2 (2n-1)]$$

⋮

$$\Delta P_n = a (Q_n - Q_{kn})^2 [\alpha_{n1} + \alpha_{n2} + \dots + \alpha_n (2n-1)]$$

On dispose en plus des relations :

$$\sum_{i=1}^n Q_i = Q ; \quad \Psi (Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn}) = \sum_{i=1}^n Q_{ki} - Q_k = 0$$

Il s'agit alors de déterminer les valeurs de Q_{ki} susceptibles de donner les minimums liés de la fonction :

$$\Delta P = f (Q_{k1}, \dots, Q_{kn})$$

Pour cela, formons la fonction perte :

$$F(Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn}, \lambda) = f(Q_{k1}, \dots, Q_{kn}) + \lambda (Q_{k1}, \dots, Q_{kn})$$

Les dérivées partielles de la fonction pertes F sont :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{k1}} = \frac{\partial f}{\partial Q_{k1}} + \lambda \frac{\partial \psi}{\partial Q_{k1}} = -2a(Q_1 - Q_{k1})(\alpha_{11} + \alpha_{12} + \dots + \alpha_{1(2n-1)}) + \lambda = 0$$

⋮

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{kn}} = \frac{\partial f}{\partial Q_{kn}} + \lambda \frac{\partial \psi}{\partial Q_{kn}} = -2a(Q_n - Q_{kn})(\alpha_{n1} + \alpha_{n2} + \dots + \alpha_{n(2n-1)}) + \lambda = 0$$

En additionnant membre à membre les équations précédentes, on obtient :

$$a(Q - Q_k) = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{1}{\alpha_{11} + \alpha_{12} + \dots + \alpha_{1(2n-1)}} + \dots + \frac{1}{\alpha_{n1} + \alpha_{n2} + \dots + \alpha_{n(2n-1)}} \right]$$

Ou bien :

$$a(Q - Q_k) = \frac{\lambda}{2} \times \frac{1}{A}$$

D'où :

$$\lambda = 2a(Q - Q_k) A$$

Avec :

$$\frac{1}{A} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \dots + \alpha_{i(2n-1)}}$$

Pour le départ $i^{\text{ème}}$, on obtient :

$$Q_{ki} = Q_i - \frac{\lambda}{2a (\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \dots + \alpha_i (2n-1))} = Q_i - (Q - Q_k) \frac{A}{A_i}$$

D'où la puissance optimale de compensation sur le départ n :

$$Q_{kn} = Q_n - (Q - Q_k) \cdot \frac{A}{A_n}$$

REMARQUES :

- Les termes α_{ij} sont homogènes à des résistances ;

- Les termes $A_i = \sum_{j=1}^{2n-1} \alpha_{ij}$ représentent la résistance équivalente de chaque départ magistral du point de vue des pertes, car :

$$a A_i (Q_i - Q_{ki})^2 = a \sum (Q_{ij} - Q_{kij})^2 R_{ij} + a \sum (Q_{(i-1)ii} - Q_{k(i-1)ii})^2 R_{(i-1)ii}$$

i indique le numéro du départ magistral,

j le numéro de la dérivation sur le magistral.

- Lorsque le réseau radial est composé de départs magistraux et de départs simples, le terme A_i se réduit à la résistance R_i du départ simple.

II.5. CALCUL DES PERTES :

Très souvent la puissance de compensation diffère de la puissance de compensation optimale car les dispositifs de compensation sont construits pour des puissances normalisées. Cependant dans le cas où la puissance des éléments normalisés s'écarte peu de la puissance optimale, les pertes supplémentaires restent faibles.

Par contre dès que l'on envisage une autre forme de compensation, par exemple celle qui consiste à répartir la puissance réactive proportionnellement à la puissance appelée (et qui semble être à première vue une répartition convenable), les pertes deviennent :

$$\begin{aligned}\Delta P' &= a \left[\sum (Q_i - Q_{ki}')^2 \cdot R_i - \sum (Q_i - Q_{ki})^2 \cdot R_i \right] \\ &= a [1 - b] \cdot \left[\sum Q_i^2 \cdot R_i - Q^2 \cdot R_e \right]\end{aligned}$$

Elles sont d'autant plus grandes que le rapport :

$$\frac{Q_k}{Q} = b \text{ est élevé.}$$

L'augmentation relative de ces pertes :

$$\frac{\Delta P' - \Delta P}{\Delta P} = \frac{\sum Q_i^2 \cdot R_i}{Q^2 R_e} - 1$$

est indépendante de la puissance de compensation. Elle ne dépend que des charges réactives appelées et des résistances du réseau. Généralement cette augmentation est grande.

CHAPITRE III

=====

REGLAGE DE LA TENSION SUR LES RESEAUX A HAUTE TENSION.

- III.1. EXPOSE DU PROBLEME
- III.2. PARAMETRES AYANT UNE INFLUENCE SUR LES VARIATIONS RELATIVES DE TENSION
- III.3. MOYENS DE REGLAGE DE LA TENSION
 - 3.1. REGLAGE PRIMAIRE DE TENSION
 - 3.2. TRANSFORMATEURS A PRISE
 - 3.3. REGLAGE PAR CONDENSATEUR SERIE
 - 3.4. INJECTION DE PUISSANCE REACTIVE
 - 3.4.1. VARIATION DE LA TENSION EN FONCTION DES COEFFICIENTS
 - 3.4.2. INTERPRETATION PHYSIQUE DU COEFFICIENT
- III.4. EXEMPLE PRATIQUE .

III. REGLAGE DE TENSION SUR LES RESEAUX A HAUTE TENSION.

III.1. EXPOSE DU PROBLEME

Les réseaux sont le siège de variations de tension dues aux modifications de transits à travers les diverses impédances des éléments du réseau provoquées par les variations des charges actives et réactives.

On peut distinguer :

- les variations périodiques lentes, dues aux variations de charge entre les heures de pointe et les heures creuses. Elles sont assez bien prévisibles et on prend des dispositions en conséquence.
- les variations aléatoires lentes, qui proviennent du fait que pratiquement les charges sont toujours légèrement différentes des niveaux prévus et fluctuent de façon aléatoire autour d'une valeur moyenne.
- les variations brusques régulières ou aléatoires, dues au fonctionnement d'appareils importants (four à arc), phénomène appelé Flicker.
- les creux de tension de durées brèves, dus aux incidents pouvant affecter les réseaux (court-circuit, manoeuvre dans le réseau). Dans ce qui suit, on laisse de côté les creux de tension dus aux incidents et qui sont inévitables. Des précautions sont prises pour en limiter la fréquence d'apparition et la durée.

La qualité de la tension nécessaire n'est pas la même en tous les points du réseau :

- L'utilisateur a besoin d'une tension
 - . qui reste voisine de la tension nominale des appareils d'utilisation,
 - . dont les variations lentes ne dépassent pas quelques %,
 - . dont les variations brusques soient de l'ordre du %.

- L'exploitant doit maintenir la tension entre des valeurs assurant un fonctionnement satisfaisant du réseau et de l'appareillage. On voit donc que la politique du réglage de la tension ne sera pas la même suivant les différents réseaux:

- sur les réseaux de distribution, auxquels sont directement raccordés des usagers, il importe de maintenir une tension

aussi constante que possible,

- sur les réseaux de transport, on peut admettre des variations plus importantes car il n'existe pas d'appareils d'utilisation qui leur soient directement raccordés. Toutefois, on est limité vers les tensions hautes par la tenue diélectriques des isolants et la saturation des transformateurs, et vers les tensions basses par l'augmentation des pertes et la stabilité des machines. Par ailleurs, l'amplitude des fluctuations de la tension du réseau de transport ne doit pas dépasser les possibilités de réglage.

III.2. PARAMETRES AYANT UNE INFLUENCE SUR DES VARIATIONS RELATIVES DE TENSION.

Certains paramètres qui ne sont pas des moyens de réglage, ont une influence sur les variations de tension :

- augmentation de la tension de départ ;

L'augmentation du niveau de tension a pour effet de diminuer les variations relatives de tension. En effet, on a vu que le module de la chute de tension s'exprime par la formule
$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{RP + XQ}{V^2}$$

- réduction de l'impédance des liaisons, elle peut être la conséquence de :

- . La mise en parallèle de plusieurs lignes,
- . L'utilisation de conducteurs en faisceaux dans les lignes à T.H.T.

III.3. MOYENS DE REGLAGE DE LA TENSION.

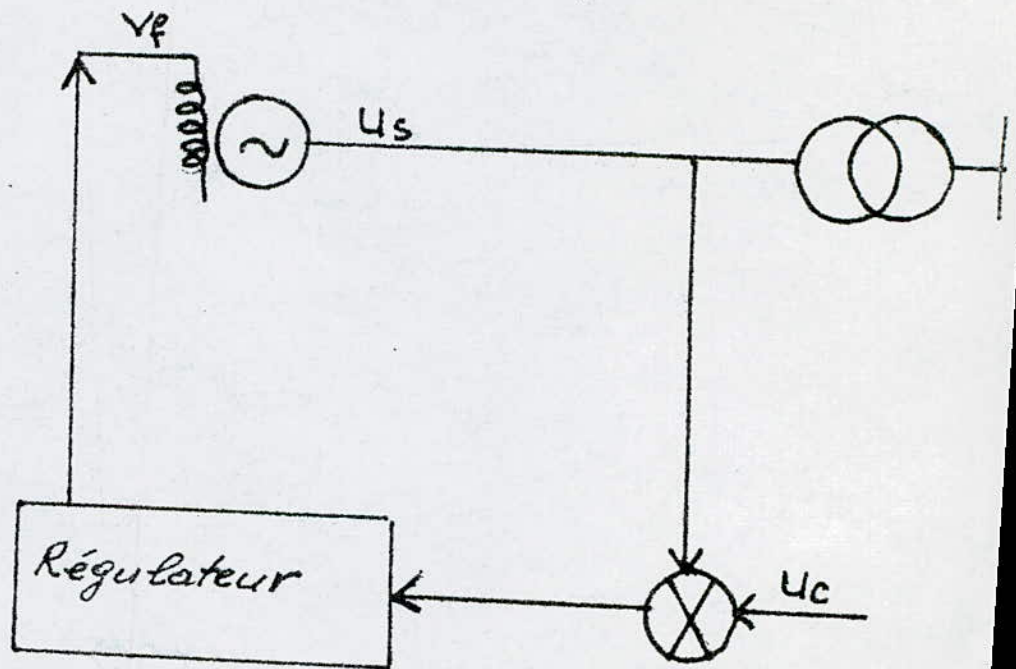
Les moyens de réglage de la tension ont pour but de maintenir le module de la tension en tous points du réseau à une valeur déterminée.

On utilise les procédés de réglage suivants :

- réglage primaire (au niveau des groupes de production),
- transformateurs à prise variable,
- réglage par condensateur série.

3.1. Réglage primaire de tension :

Les seules sources de tension sont constituées par les alternateurs dont le régulateur de tension maintient constante la tension à leurs bornes stator égale à une valeur de consigne, par action sur la tension d'excitation qui commande le courant d'excitation de la machine. Le schéma de principe est donné ci-dessous :



- U_s : tension stator
 V_f : tension de commande du système d'excitation
 U_c : tension de consigne.

Fig.1.

3.2. Transformateurs à prise :

Dans ce type de réglage, les transformateurs sont munis de changeurs de prise manoeuvrables à vide ou en charge, de manière à stabiliser la tension autour de sa valeur moyenne.

En pratique, les régleurs en charge ne sont pas continus mais procèdent par gradins. On peut penser que plus le nombre de gradins est élevés, meilleur est le réglage. En fait, pour des raisons économiques, on adopte en général les gradins 1,5 %.

Le système de commande des régleurs doit être conçu pour éviter tout phénomène d'instabilité. On y parvient en concevant convenablement la balance " voltométrique " donnant les ordres de passage des prises. De plus, il faut prévoir une temporisation pour éviter les fonctionnements sur variations passagères de courte durée de la tension.

3.2.1. Calcul de l'étendue des changeurs de prise en charge :

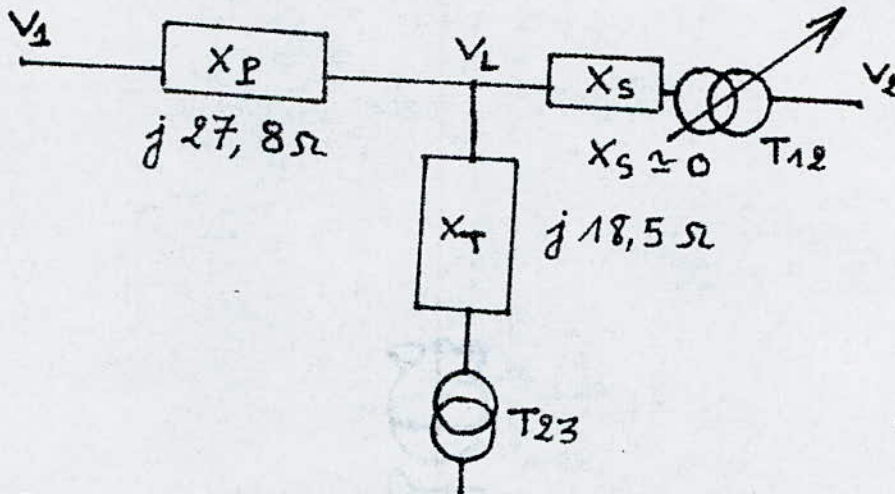
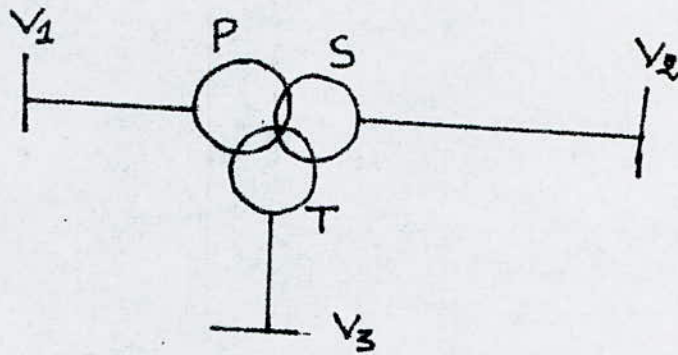
Nous allons faire le calcul dans le cas le plus général d'un transformateur à trois enroulements.

Pour que le réglage soit efficace, il faut considérer les deux régimes les plus défavorables du transformateur, à savoir :

- Régime 1 : puissance primaire vers le secondaire est maximale (fig. 3a).
- Régime 2 : puissance primaire vers le secondaire est minimum (fig. 3b).

Considérons le transformateur à trois enroulements suivant :

Le schéma équivalent en étoile est le suivant :



- T_{12} : transformateur parfait avec rapport de transformation variable en charge.
- T_{23} : transformateur parfait dont le rapport de transformation est constant.

Les résistances des enroulements sont négligeables, les deux régimes extrêmes de fonctionnement sont les suivants.

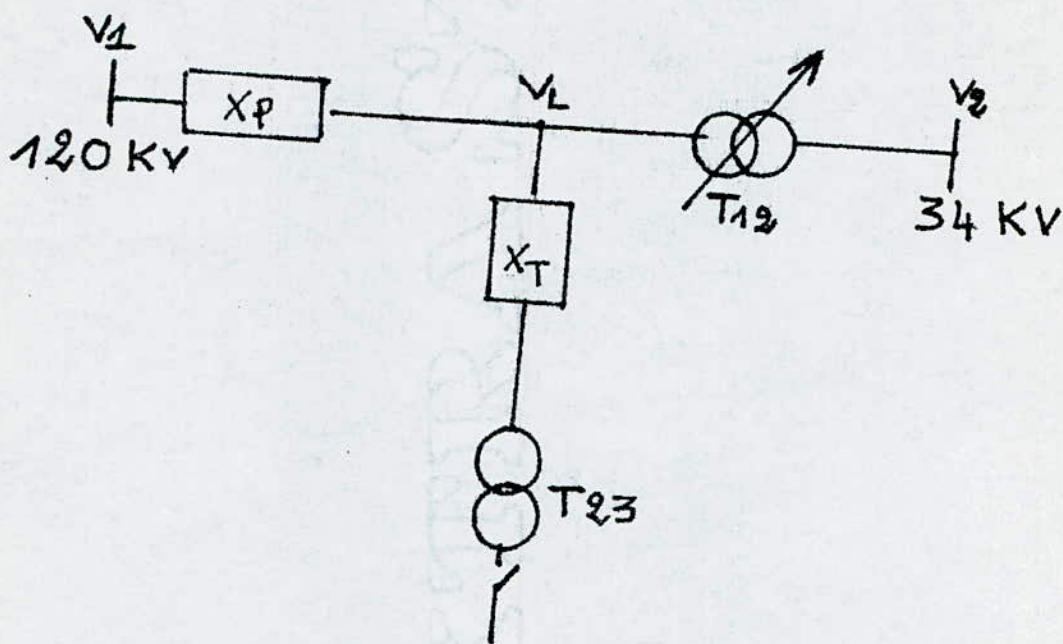


Fig. 3a - Régime de charge maximum.

La puissance qui transit du primaire vers le secondaire est :
 $P = 60 \text{ MW}$
 $Q = 30 \text{ MVAR}$

Dans ces conditions, la tension $V_1 = 120 \text{ KV}$, et la tension $V_2 = 34 \text{ KV}$

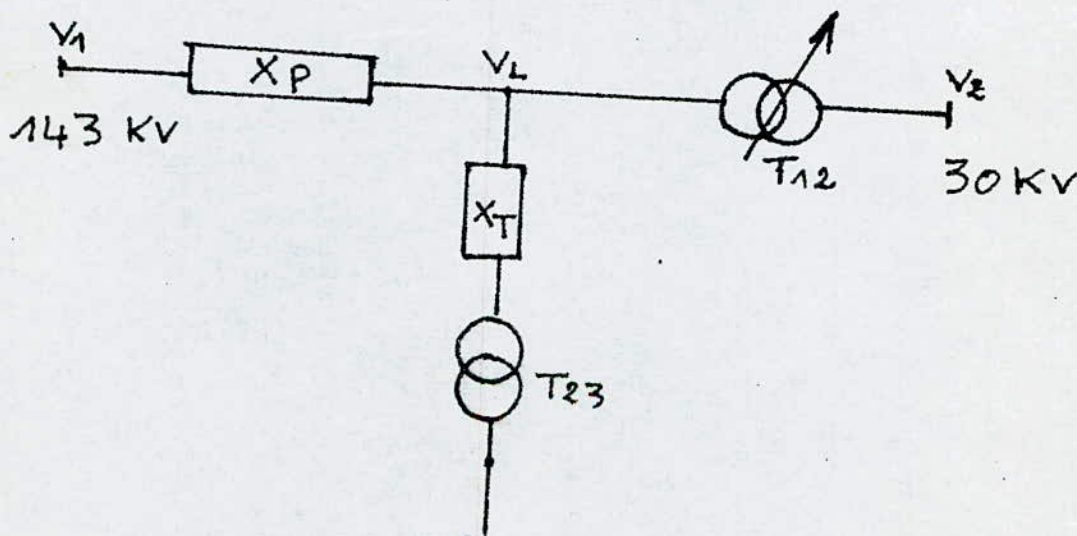


Fig. 3b - Régime de charge minimum.

La puissance qui transite du primaire vers le secondaire est nulle. Tandis que du secondaire vers le tertiaire un transit de 20 MVar. Dans ces conditions, la tension $V_1 = 143$ KV et la tension $V_2 = 30$ KV.

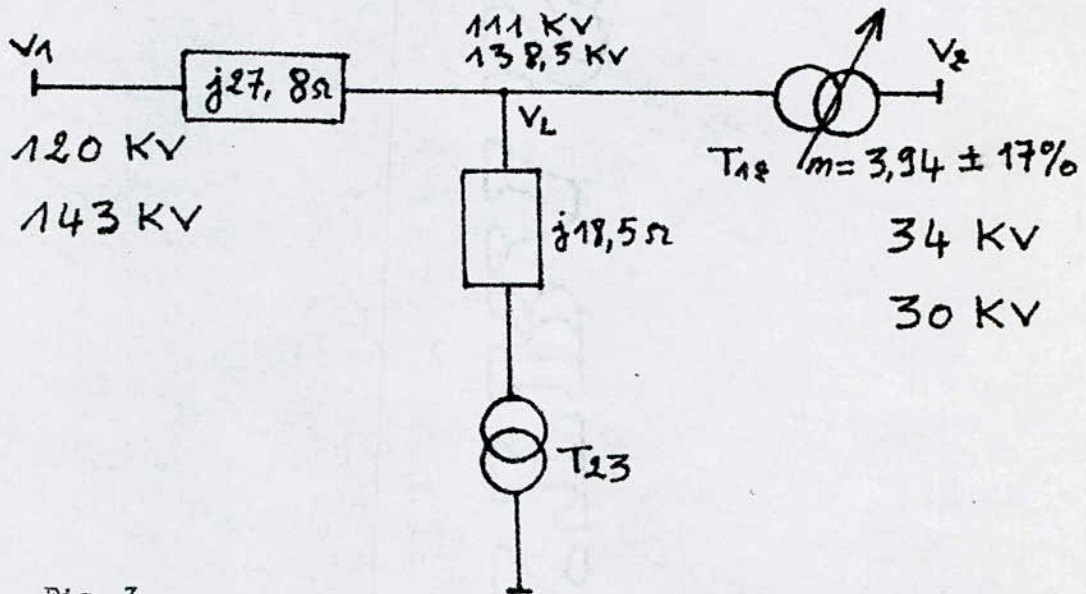


Fig. 3.

Pour pouvoir calculer le rapport de transformation du transformateur T_{12} il faut au préalable calculer la tension du neutre de l'étoile équivalente. On a démontré au Chapitre I que la chute de tension s'exprime par la formule : $\Delta U = \Delta U_a + j \Delta U_r$

avec

$$\Delta U_a = X \cdot Q$$

$$\Delta U_r = X P$$

Appliquons cette formule dans le cas du régime 1, dans ces conditions, on a :

$$(V_1 + \Delta V)^2 + (\Delta V_r)^2 = V_1^2$$

Si on utilise les tensions composées :

$$\left(U_n + X_p \cdot \frac{Q^2}{V_1 \sqrt{3}} \right)^2 + X_p^2 \left(\frac{P^2}{3 V_1^2} \right)^2 = U_1^2$$

Ou bien :

$$(U_n^2 + X_p Q^2)^2 + X_p^2 \cdot P_2^2 = U_n^2 \cdot U_1^2 \quad (1)$$

L'équation (1) est du second degré en U_n^2 , dont les racines sont les suivantes :

$$U_n^2 = \frac{U_1^2 - 2 X_p \cdot Q_2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{U_1^2 (U_1^2 - 4 X_p Q_2) - 4 X_p^2 \cdot P_2^2} \quad (2)$$

En appliquant cette formule aux cas des régimes 1 et 2, on trouve :

- régime 1 :	$U_n^2 = 124,4 \cdot 10^8$	$U_n = 111 \text{ KV}$
- régime 2 :	$U_n^2 = 191,82 \cdot 10^8$	$U_n = 138,5 \text{ KV}$

Le régime de transformation sous la première condition (régime 1) est : $m_1 = 111/34 = 3,27$.

Sous la seconde condition (régime 2) : $m_2 = 138,5/30 = 4,61$

La valeur moyenne de ces deux rapports est : $m = 3,94$ qui varie de ± 67 autour des valeurs m_1 et m_2 , d'où le rapport de transformation de T₁₂ : $m = 3,94 \pm 17 \%$.

Donc, prise de réglage $\pm 17 \%$

3.3. Réglage par condensateur série :

Dans le cas des lignes de transport très longues, les moyens de réglage décrits ci-dessus peuvent se trouver insuffisants, de ce fait, on utilise le procédé de réglage par condensateurs " Série ".

La pratique conduit à admettre que le meilleur compromis entre le coût de la batterie et le gain retiré de la réduction des variations de tension était de compenser à moitié l'impédance de la ligne et d'installer la batterie au milieu de la ligne. La formule qui donne la capacité par phase de la batterie de condensateurs à y installer :

$$\frac{1}{C_W} = \frac{1}{2} \text{ LW} \quad (\text{formule recommandée par C.I.G.R.E. - rapport de l'année 1980.})$$

. Interprétation graphique :

Pour simplifier, négligeons les admittances transversales de la ligne, la tension V_1 au départ est telle que :

$$V_1 = V_2 + (R + jX) I \quad (\text{sans condensateur série})$$

$$V_1 = V_2 + R + j \left(X - \frac{1}{\omega C} \right) I \quad (\text{avec condensateur série}).$$

La représentation graphique des équations est donnée dans la figure.

On remarque donc que l'adjonction du condensateur modifie la valeur de la composante réactive de la chute de tension (ΔU_r).

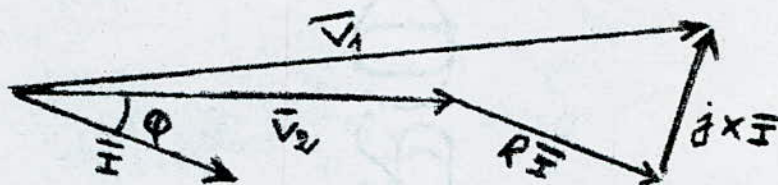


Fig. 4a - Régime de fonctionnement sans condensateur série.

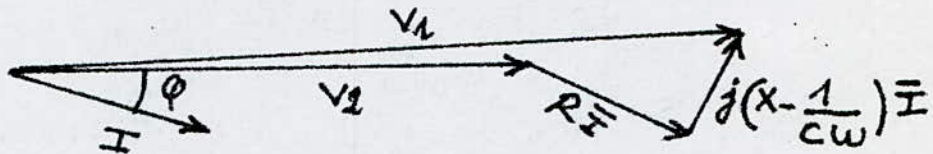


Fig. 4b - Régime de fonctionnement avec condensateur série.

3.4. Injection de puissance réactive :

3.4.1. Variation de la tension en fonction des coefficients :

$$\frac{\partial Q}{\partial U} \text{ et } \frac{\partial P}{\partial U}$$

En un point donné d'un réseau, la tension est fonction de P et Q.
 $u = f(P, Q)$.

La différentielle totale de U est :

$$dU = \frac{\partial U}{\partial P} \cdot dP + \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot dQ$$

Dans le cas d'une fonction implicite à deux variables, on a :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{\partial U}{\partial P} = 1 \text{ et } \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{\partial U}{\partial Q} = 1 \right)$$

$$\text{Soit : } dU = \frac{dP}{\frac{\partial P}{\partial U}} + \frac{dQ}{\frac{\partial Q}{\partial U}}$$

La variation dU en un point, en fonction des variations dP et dQ , dépend des coefficients $\frac{\partial P}{\partial U}$ et $\frac{\partial Q}{\partial U}$ en ce point.

Les coefficients $\frac{\partial P}{\partial U}$ et $\frac{\partial Q}{\partial U}$ caractérisent la sensibilité de U aux variations de P et Q.

Du point de vue réglage, étant donné que le transit de puissance active P est fixé, le second terme est le plus important. Il indique la puissance réactive nécessaire pour provoquer une variation de la tension.

Il est évident que le réglage de la tension en un point par la puissance réactive présente d'autant moins d'intérêt que le coefficient

$\frac{\partial Q}{\partial U}$ est plus élevé en ce point.

3.4.2. Interprétation physique du coefficient $\frac{\partial Q}{\partial U}$:

Remarquons que la quantité $\frac{\partial Q}{\partial U}$ est homogène à un courant.

$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\partial Q}{\partial U}$ évaluée en un point M du réseau est égale à l'intensité du courant de court-circuit triphasé symétrique du réseau, au même point M. Cette proposition s'établit en utilisant le théorème de THEVENIN.

Au point M où nous voulons déterminer le rapport $\frac{\partial Q}{\partial U}$, insérons entre le neutre du réseau et chaque phase une réactance jX , le courant \overline{IX} dans celle-ci est, d'après le théorème de THEVENIN :

$$\overline{IX} = \frac{\overline{V}_n}{Z + jX}$$

Avec :

\overline{V}_n : tension nominale du réseau

Z : impédance du réseau " vue " de M.

Mais le branchement de la réactance jX à baisser la tension de \overline{V}_n à \overline{V} telle que :

$$\overline{IX} = \frac{\overline{V}_n}{Z + jX} = \frac{\overline{V}}{jX} \quad (3)$$

Nous avons :

$$Q = 3 \operatorname{Im} (\overline{V} \cdot \overline{IX}) = 3 X \overline{IX} \cdot \overline{IX}^* = 3 X \overline{IX}^2 = 3 X \frac{\overline{V}_n^2}{Z + jX} \cdot \frac{1}{Z - jX}$$

D'où :

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\partial Q}{\partial U} = \frac{X}{Z + jX} \frac{V_n^2}{V_n - V} \quad (4)$$

D'après (3) :

$$\frac{V_n V}{Z} = \frac{V_n}{Z + jX} \quad \text{d'où} \quad \frac{V_n}{V_n - V} = \frac{Z + jX}{Z}$$

En introduisant la valeur de $\frac{V_n}{V_n - V}$ dans l'équation 4, celle-ci devient :

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\partial Q}{\partial U} = \frac{X}{Z + jX} \frac{Z + jX}{Z} = \frac{V_n}{Z} \frac{j + \frac{Z}{X}}{j + \frac{Z}{X}} \quad (5)$$

Pour faire tendre U vers zéro, il faut évidemment tendre X vers l'infini ; à la limite, on a :

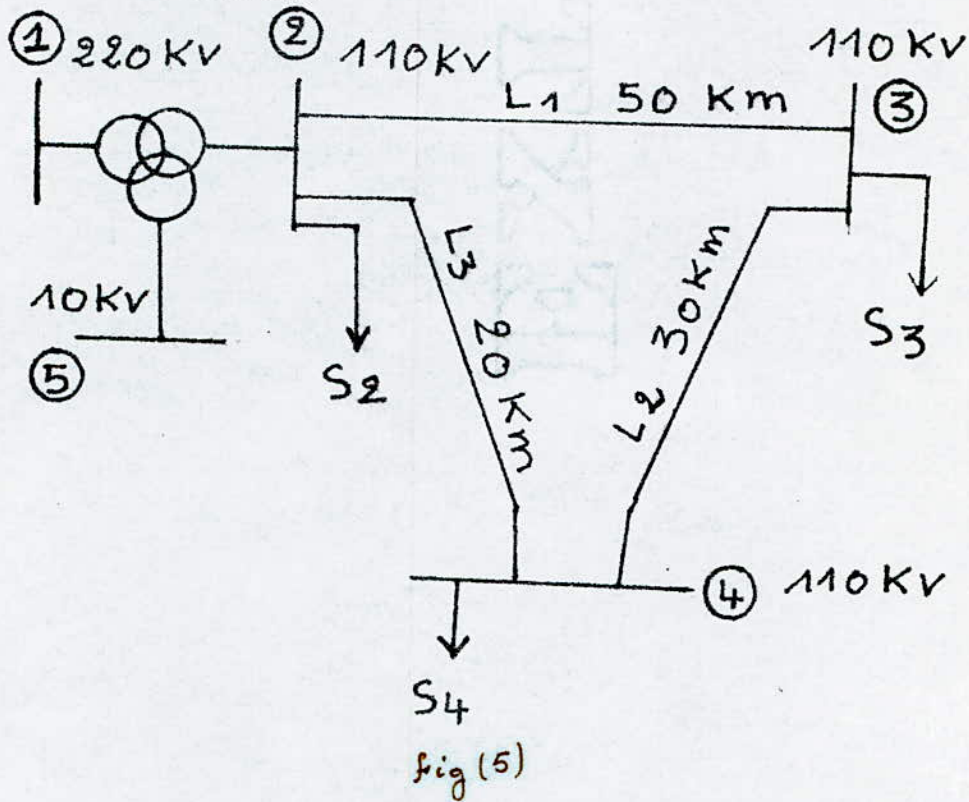
$$\lim_{U \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\partial Q}{\partial U} = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{V_n}{Z} \frac{j + \frac{Z}{X}}{j + \frac{Z}{X}} = \frac{V_n}{Z}$$

$$\text{Or, } \lim_{U \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\partial Q}{\partial U} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\partial Q}{\partial U}$$

$$\text{D'où : } \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\partial Q}{\partial U} = \frac{V_n}{Z} \quad (6)$$

On voit donc que le réglage de la tension par la puissance réactive est optimal aux points du réseau où la puissance de court-circuit est faible.

III.4. Exemple pratique :



DONNEES :

. Transformateur T : Transformateur à trois enroulements.

$$S_n = 160/160/50 \text{ MVA} ; m = 240/120/10,5 \text{ KV}$$

$$\Delta U_z 12 = 12,5 \%$$

$$\Delta U_z 13 = 11,8 \%$$

$$\Delta U_z 23 = 6,7 \%$$

$$\Delta P_{cu} 12 = 405 \text{ KW}$$

$$\Delta P_{cu} 13 = 149,7 \text{ KW}$$

$$\Delta P_{cu} 23 = 136,5 \text{ KW}$$

$$\Delta P_{Fe} = 87,1 \text{ KW}$$

$$I_0 \%$$
 = 0,224

. Lignes

Conducteurs en Almelec de section 150 mm^2

$$R' = 0,193 \Omega / \text{Km} : \text{résistance kilométrique}$$

$$X' = 0,42 \Omega / \text{Km} : \text{réactance kilométrique}$$

$$B' = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ S/Km}$$

On néglige la perdittance de la ligne.

Charges :

$$S_2 = 35 - j 25 \text{ MVA}$$

$$S_3 = 40 - j 30 \text{ MVA}$$

$$S_4 = 15 - j 7,3 \text{ MVA}$$

Le problème est de trouver le lieu d'installation du compensateur et le calcul de la puissance réactive de réglage, pour avoir une plage de variation de $\pm 3\%$ de la tension nominale.

Calcul des paramètres des lignes :

On adopte le quadripôle en π symétrique.

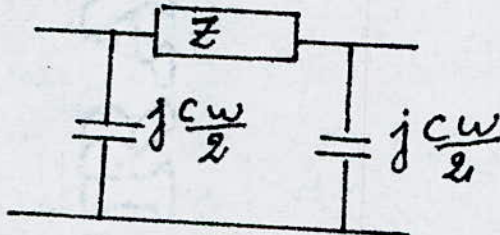


Fig (6)

. Ligne L1 :

$$Z = R' l_1 + j X' l_1 = 0,193.50 + j 0,42.50 = 9,65 + j 21,0$$

$$= B' l_1 = 2,74.10^{-6}.50 = 137.10^{-6} \text{ S}$$

. Ligne L2 :

$$Z = R' l_2 + j X' l_2 = 0,193.30 + j 0,42.30 = 5,79 + j 12,6$$

$$= B' l_2 = 2,74.10^{-6}.30 = 82,2.10^{-6} \text{ S}$$

. Ligne L3 :

$$Z = R' l_3 + j X' l_3 = 0,193.20 + j 0,42.20 = 3,86 + j 8,4$$

$$= B' l_3 = 2,74.10^{-6}.20 = 54,8.10^{-6} \text{ S}$$

Les lignes constituant la boucle sont des lignes courtes, on peut donc négliger

Les admittances transversales, on transfigure le triangle 234 en une étoile équivalente (voir figure ci-dessous).

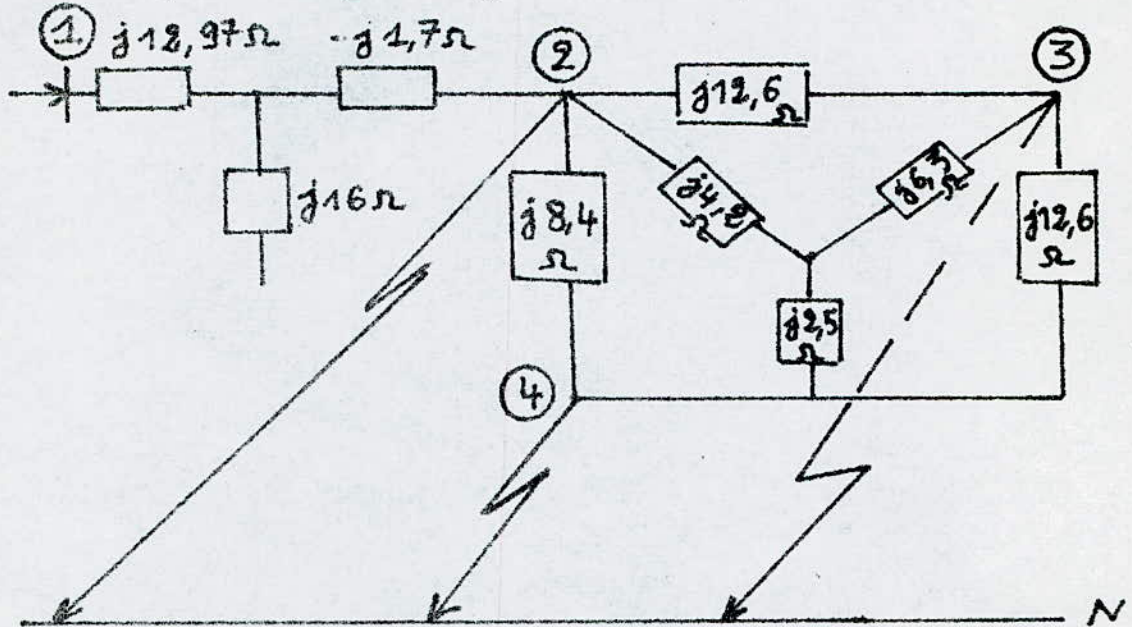


Fig (7)

Pour avoir l'ordre de grandeur du coefficient $\frac{\partial Q}{\partial U}$, on néglige les résistances devant les réactances et on majore la valeur trouvée de 10 % (norme polonaise).

Calculons les impédances "vue" des jeux de barres 2,3 et 4.

Jeu de barre (2) : $Z = 12,97 - 1,7 = 11,27 \Omega$

Jeu de barre (3) : $Z = 12,97 - 1,7 + 4,2 = 15,47 \Omega$

Jeu de barre (4) : $Z = 12,97 - 1,7 + 4,2 + 6,3 = 21,77 \Omega$

La valeur du courant de court-circuit triphasé est donnée par la formule :

$$I_p = 1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z}$$

Au niveau du jeu de barre (2) :

$$I_p = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_n}{Z} = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{110}{11,27} = 6,2 \text{ K A}$$

Au niveau du jeu de barre (3) :

$$I_p = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_n}{Z} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 21,77} = 3,2 \text{ K.A}$$

Au niveau du jeu de barre (4) :

$$I_p = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_n}{Z} = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{110}{15,47} = 4,5 \text{ K.A}$$

On voit donc que la valeur du courant de court-circuit triphasé est plus faible au niveau du jeu de barre 3. Donc, la régulation de tension en ce point est plus efficace qu'au niveau des jeux de barres 3 et 4.

Calcul de la puissance de " régulation " au niveau du jeu de barre 3:

Nous ferons le calcul en utilisant le diagramme du cercle.

On maintient la tension U_1 constante égale à 115 KV et on veut étudier les variations de la puissance réactive injectée en fonction de la tension en ce point. On utilise le même procédé de calcul de puissance réactive que celui exposé dans le chapitre II.

SOLUTION :

On transpose la puissance S_4 dans les noeuds 3 et 2. Dans ces conditions, les puissances au niveau des jeux de barres 3 et 2 deviennent :

$$S'_3 = S_3 + S_{43}$$

$$S'_2 = S_2 + S_{42}$$

Avec :

$$S_{43} = S_4 \frac{L_3}{L_3 + L_2}$$

$$S_{42} = S_4 \frac{L_2}{L_3 + L_2}$$

Après ces transformations, la boucle se réduit à deux lignes en parallèle, de longueur L_1 et $L_2 + L_3$ (fig. 1).

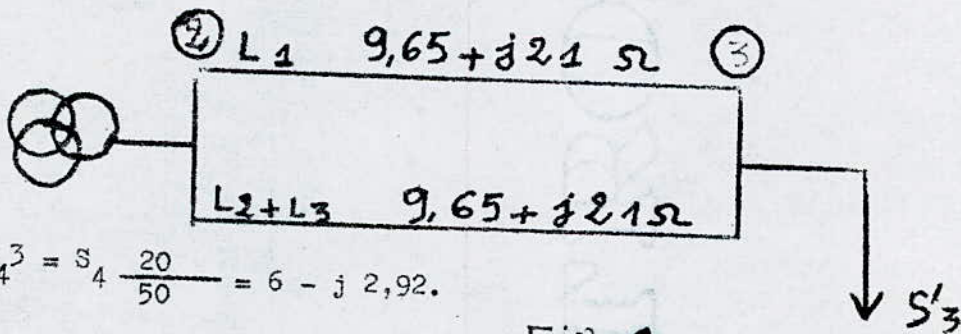


Fig. 1

$$S_{43} = S_4 \frac{20}{50} = 6 - j 2,92.$$

$$S_{42} = S_4 \frac{30}{50} = 9 - j 4,38$$

D'où le schéma suivant équivalent à une alimentation radiale :

$$S'_2 = 44 - j 29,38 \text{ MVA}$$

$$S'_3 = 46 - j 32,92 \text{ MVA}$$

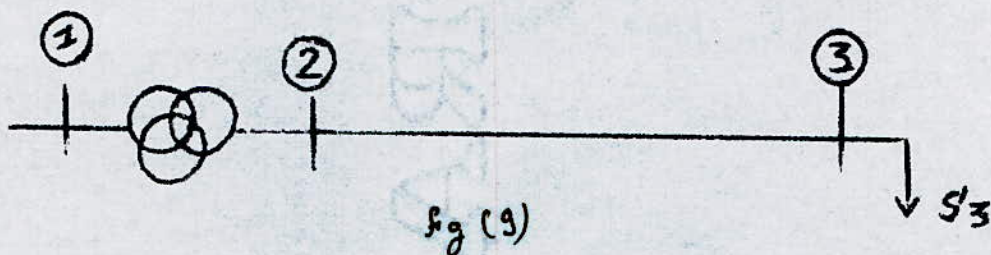
Les admittances transversales peuvent être négligées.

$$Z_{23} = \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} =$$

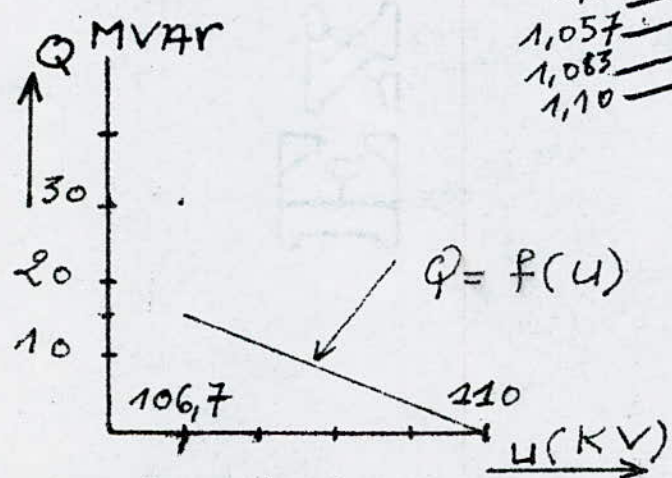
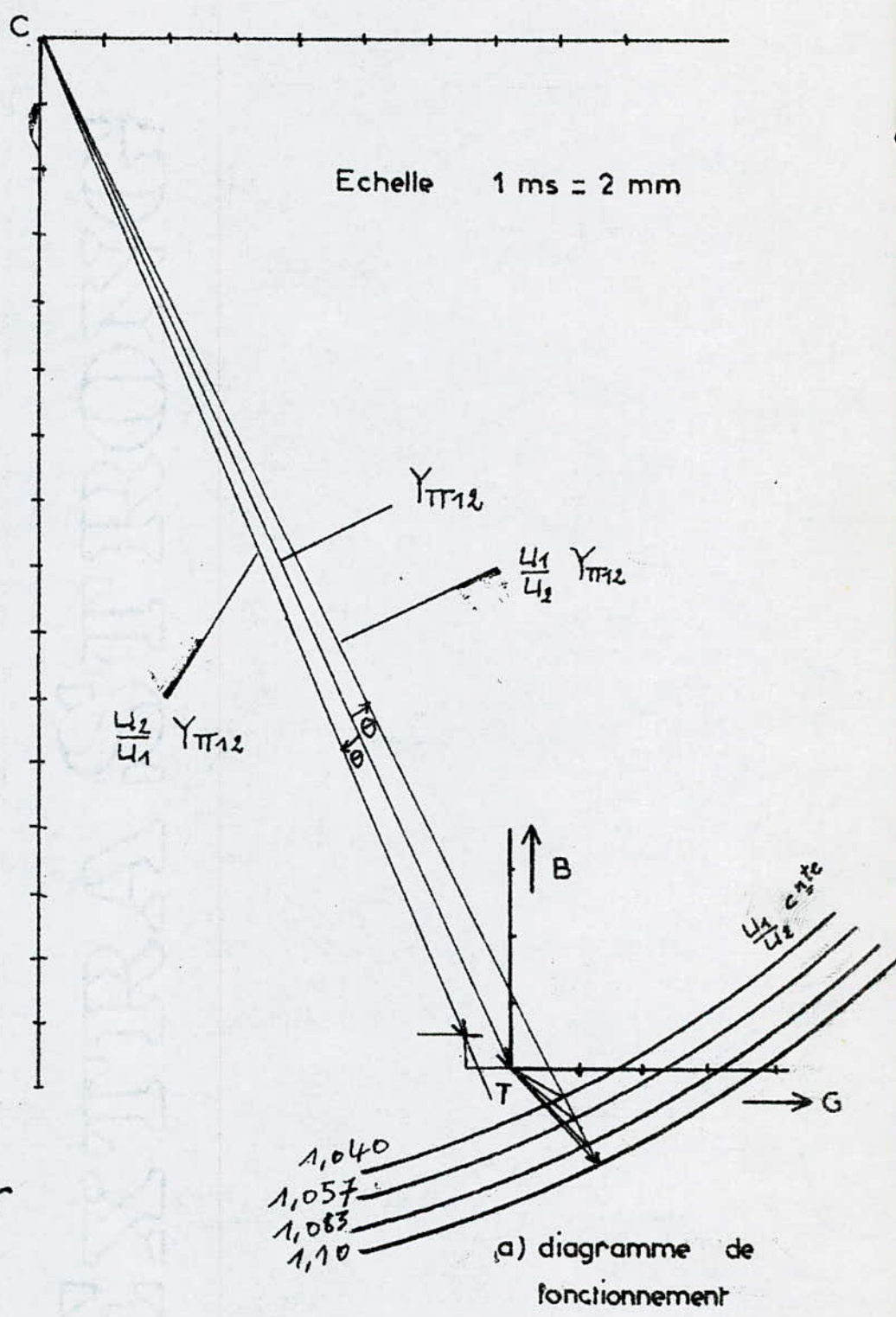
$$\text{Or, } Z_2 + Z_3 = Z_1$$

Donc,

$$Z_{23} = \frac{Z_1}{2} = \frac{9,65 + j 21}{2} = 4,83 + j 21$$



Les résultats obtenus sont portés dans le graphique de la figure (10)



b Variation de la puissance injectée en fonction de la tension
Fig (10)

CHAPITRE IV

STABILITE DES RESEAUX.

- IV.1. EXPOSE DU PROBLEME.
- IV.2. LIMITE DE PUISSANCE TRANSMISSIBLE PAR UN RESEAU
- IV.3. AMELIORATION DE LA STABILITE PAR INJECTION DE
PUISSANCE REACTIVE AU NIVEAU DE LA CHARGE.

IV.1. EXPOSE DU PROBLEME -

Dans notre étude, nous nous limiterons uniquement à l'influence de l'E.R. sur la stabilité.

La stabilité caractérise le comportement dynamique des groupes de production d'énergie électrique. Elle peut se définir comme leur aptitude à conserver un état d'équilibre en régime normal et à retrouver cet état en régime perturbé du réseau.

On peut être tenté de dire que " la stabilité, mais c'est très simple" puisque, dans le cas des machines tournantes, elle peut se résumer par la formule :

$$I \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r$$

Avec :

I : moment d'inertie de la machine

: vitesse de rotation

C_m : couple moteur de la machine

C_r : couple résistant opposé à l'alternateur par le réseau.

En fait, les phénomènes sont complexes et difficiles à formuler d'une manière rigoureuse car :

- le couple moteur C_m dépend des caractéristiques de la turbine, et en particulier de sa régulation de vitesse.
- le couple résistant C_r dépend des caractéristiques du réseau, en particulier de sa régulation de tension.

L'étude de la stabilité présente un intérêt imminement utile du fait que les pertes de stabilité se traduisent par des variations importantes de tension, de courant et de puissance, préjudiciables au bon fonctionnement du réseau, à la tenue du matériel et à la qualité de l'énergie distribuée.

Rappelons que l'on distingue la stabilité statique et la stabilité transitoire.

- Stabilité statique : elle est relative au comportement, en régime établi, des machines soumises seulement aux fluctuations naturelles dont le réseau est le siège, en d'autres termes, par des variations lentes de puissances.

- Stabilité transitoire : elle est relative au comportement des machines en présence d'une perturbation bien définie : court-circuit, report de charge, en d'autres termes par des variations brusques de puissances.

En pratique, les phénomènes ne sont pas purs, les deux types de stabilité étant souvent simultanément en cause. En effet, l'élimination d'un défaut s'accompagne temporairement ou définitivement d'un changement de topologie du réseau, modifiant ainsi les conditions de la stabilité statique

IV.2. LIMITE DE PUISSANCE TRANSMISSIBLE PAR UN RESEAU .

Pour un réseau donné et en dehors des problèmes de limite thermique, il y a, sous l'angle des problèmes de tension, une limite de puissance transmissible qui ne peut être dépassée. Ceci peut être facilement déterminé analytiquement dans le cas d'un dipôle. Les équations sont alors simples à manipuler et leur étude permet de bien comprendre le phénomène.

Considérons un réseau (figure 1) d'impédance interne supposée purement réactive X , de tension à vide U_v , alimentant une charge qui sera assimilée à une impédance Z . Lorsque la charge croît, le courant I circulant dans le dipôle croît ; la tension aux bornes de la charge décroît selon les équations :

$$I = \frac{U_v}{\sqrt{X^2 + Z^2 + 2 XZ \sin \varphi}} \quad (1)$$

$$U = \frac{U_v}{\sqrt{\frac{X^2}{Z^2} + 1 + 2 \frac{X}{Z} \sin \phi}} \quad (2)$$

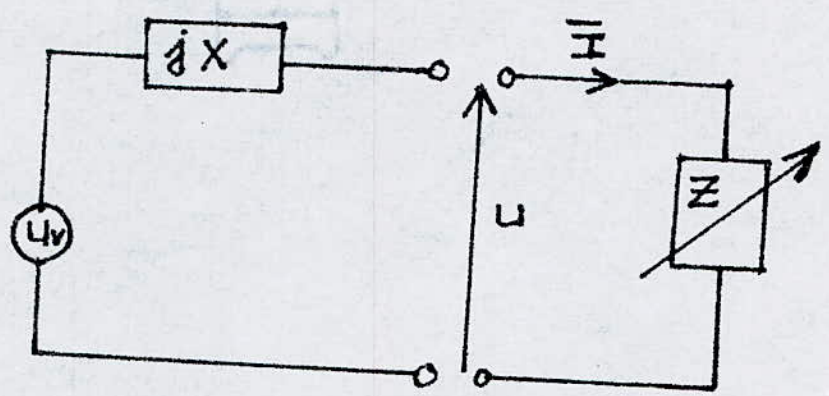


Fig. 1

La puissance fournie à la charge est :

$$P = \frac{U_v^2 \cos \phi}{\frac{X^2}{Z} + Z + 2 X \sin \phi} \quad (3)$$

A partir des équations (1, 2, 3), on trace les variations des courants, tension et puissance active aux bornes de la charge en fonction de l'admittance de la charge $Y = \frac{1}{Z}$, pour une tension U_v et une valeur ϕ de l'argument de la charge, les courbes représentatives sont indiquées dans la Figure 2.

Interprétation des courbes :

Lorsque l'admittance de la charge augmente, la puissance active délivrée augmente d'abord presque comme le courant (la chute de tension est faible), puis augmente moins rapidement, passe par une valeur maximale, et enfin diminue.

On retrouve la propriété bien connue : il y a une puissance active maximale transmissible par un dipôle à partir d'une source de tension constante.

IV.3. AMELIORATION DE LA STABILITE PAR INJECTION DE PUISSANCE REACTIVE AU NIVEAU DE LA CHARGE.

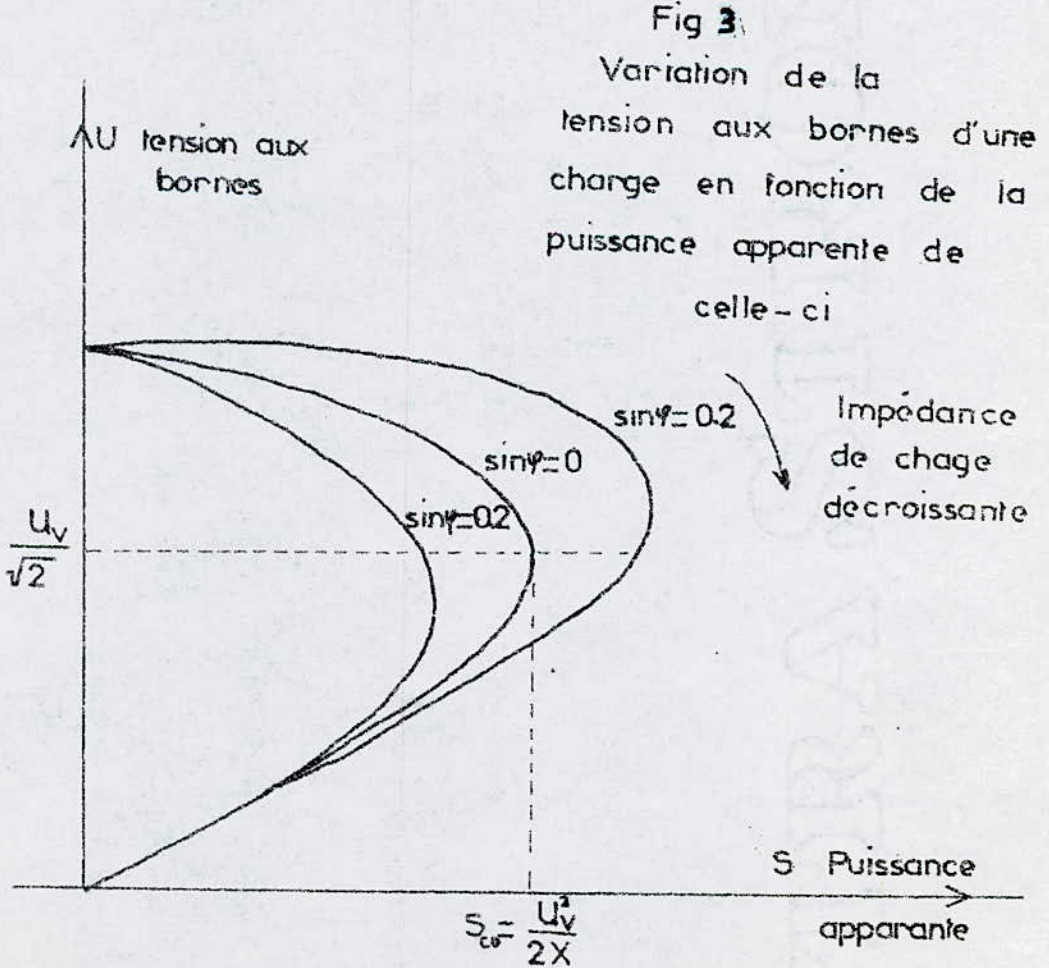
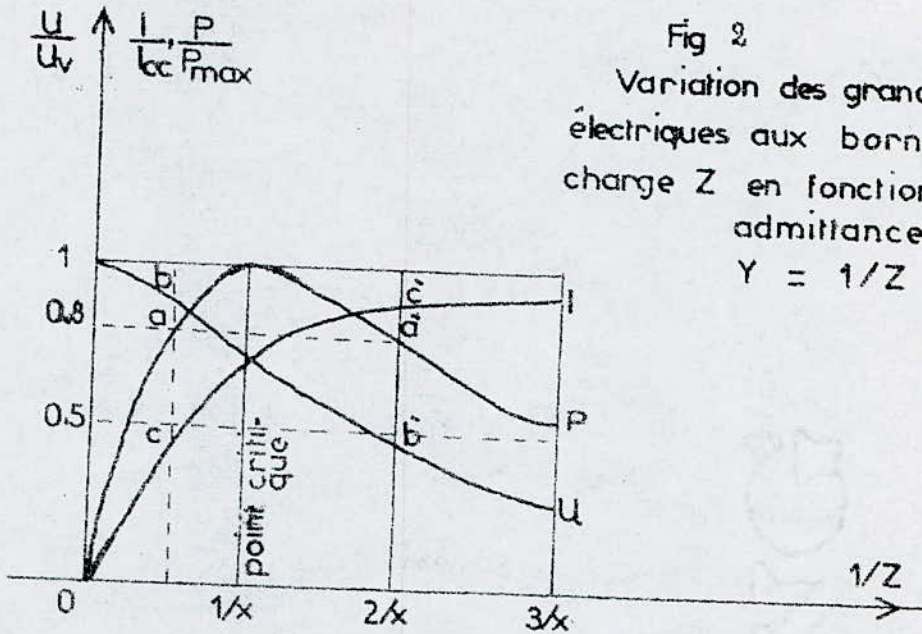
Une autre façon de présenter les phénomènes décrits au paragraphe 2 est de tracer la courbe de la tension aux bornes de la charge, en fonction de la puissance apparente de celle-ci (figure 3).

Interprétation :

On voit que la puissance apparente atteint une valeur maximale qui est fonction du facteur de puissance de la charge : plus celle-ci est compensée (voire sur-compensée), plus la puissance limite est élevée.

Lorsque le courant de charge augmentant la puissance délivrée croît, c'est à dire que la chute de tension est relativement faible, le fonctionnement est dit stable.

Par contre, si pour une augmentation du courant de charge la puissance délivrée baisse, le fonctionnement est dit instable.



CONCLUSION :

De (1), (2), (3), on en déduit les équations liant la tension critique U_c à l'extrémité réceptrice du réseau à la puissance critique S_c et à la tension à vide du réseau U_r .

Au point critique :

$$\frac{X}{Z} = 1$$

$$P_c = \frac{U_y^2 \cdot \cos \varphi}{2 X (1 + \sin \varphi)} = \frac{U_c^2}{X} \cos \varphi$$

$$S_c = \frac{U_c^2}{X}$$

Dans la partie stable des courbes : ($U > U_c$; $S < S_c$), on a

$$\frac{X S}{U^2} < 1$$

Dans la partie instable : ($U < U_c$; $S < S_c$), mais $Z < Z_c$, on a :

$$\frac{X S}{U^2} > 1$$

Par conséquent, pour que le réseau soit stable pour une puissance active débitée P , il faut donc que celle-ci soit délivrée à une tension

$$U : U > \sqrt{X \frac{P}{\cos \varphi}}$$

Ce qui peut être assuré par une valeur U_r assez importante (dans ce cas, on est limité par la saturation des transformateurs et l'isolement du matériel), soit par une injection de puissance réactive au niveau de la charge (augmentation du $\cos \varphi$).

CHAPITRE V

ANALYSE D'UN RESEAU D'OUVERT.

- V.1. EXPOSE DU PROBLEME
- V.2. SCHEMA DU RESEAU
- V.3. ANALYSE DU BILAN DES PUISSANCES DANS LES
DIVERS TRONCONS DU RESEAU .

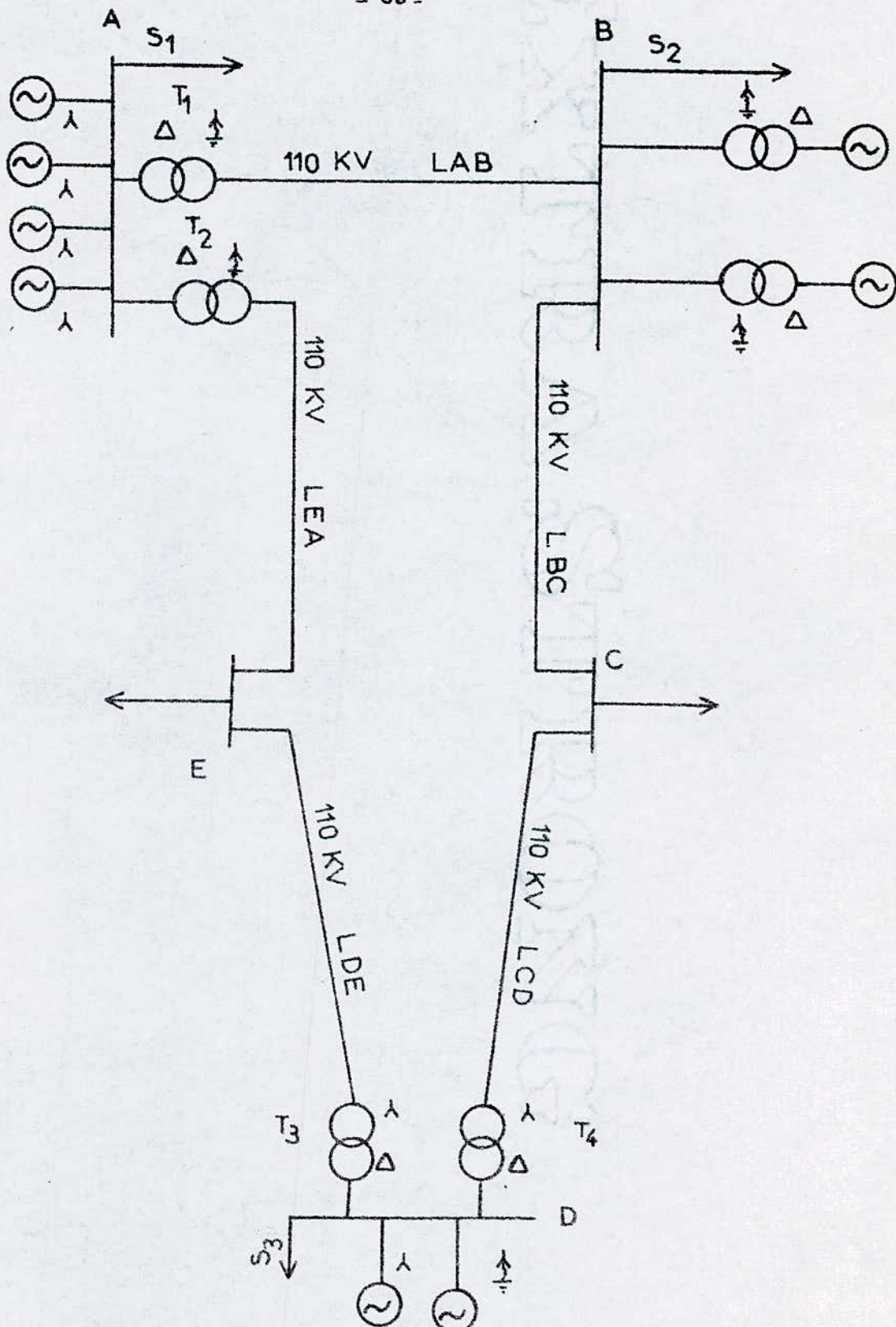


Fig 1 Schéma du système de transmission analysé

DONNEES:

- * CENTRALE A : Centrale hydraulique constituée de quatre alternateurs
Puissance nominale 4×10 MVA
Charge locale $S_1 = 10 - j 6,2$ MVA
Tension nominale 13,8 KV.

- CENTRALE B : Centrale thermique
Deux alternateurs
Puissance nominale : $2 \times 31,25$ MVA
Tension nominale 13,8 KV
Charge locale $S_2 = 50 - j 37,5$ MVA.

- CENTRALE D : Centrale thermique
Deux alternateurs
Puissance nominale : 2×25 MVA
Charge locale $S_3 = 10 - j 7$ MVA.

- . Sous-station C : Absorbe une puissance : $18,3 - j 7$ MVA.
- . Sous-station E: Absorbe une puissance : $10 - j 5$ MVA.

LIGNES :

- A B : Longueur 80 Km en cuivre.
 $R' = 0,3 \Omega / \text{Km}$
 $X' = 0,538 \Omega / \text{Km}$
 $B' = 0,0156 \cdot 10^{-4} \text{ S/Km}$
Régulièrement transposée
Ecartement moyen entre les conducteurs : 4,6 m
Section d'un conducteur : 67 mm^2 .

- DE et EA : Identiques à la ligne AB.

- B C : Longueur 120 Km en cuivre.

$$R' = 0,081 \Omega / \text{Km}$$

$$X' = 0,483 \Omega / \text{Km}$$

$$B' = 0,0173 \cdot 10^{-4} \text{ S / Km}$$

Régulièrement transposée

Ecartement moyen entre les conducteurs : 4,6 m

Section d'un conducteur $S = 252 \text{ mm}^2$

- C D : Identique à B C.

- Transformateurs : T_1 , T_2 , T_3 et T_4 sont identiques.

$$\Delta P_{\text{cu}} = 582,6 \text{ KW}$$

$$\Delta U_c \% = 13,3 \%$$

Puissance nominale : 50 MVA

Courant magnétisant négligeable.

Le résultat de calcul de tous les paramètres sont rassemblés dans le tableau suivant, toutes les grandeurs sont ramenées côté H.T. :

TABIEAU 1 :

Transformateurs $T_1 - T_2 - T_3 - T_4$	Lignes AB, DE, EA	Lignes BC, CD
$Z = 2,82 + j 32,3$	$24,05 + j 43,05$	$9,75 + j 57,9$
$Y(S) = 0$	$j 1,25 \cdot 10^{-4}$	$j 2,08 \cdot 10^{-4}$

NOTE : On a adopté pour les lignes le schéma équivalent en Π symétrique.

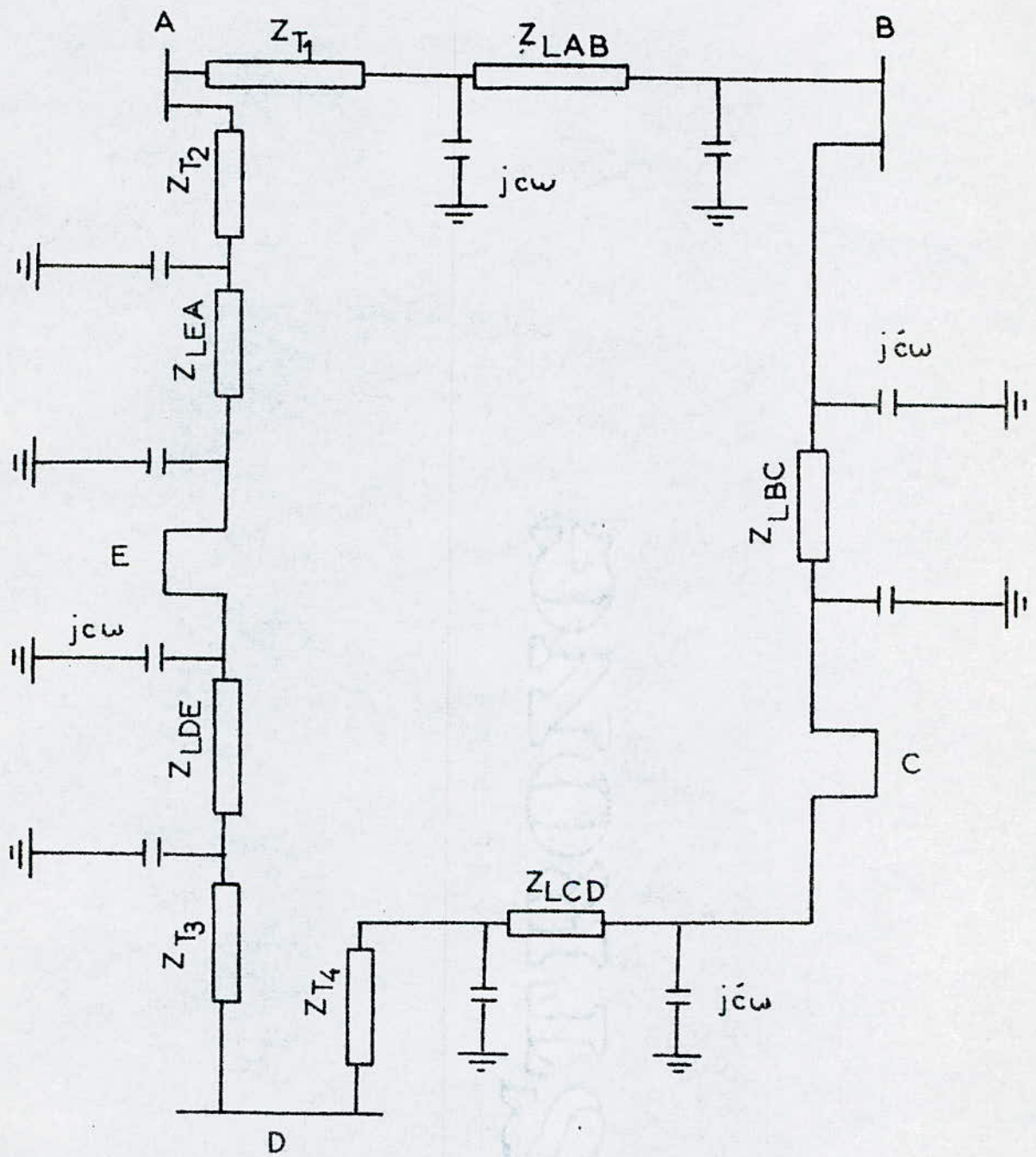


Fig 2 Shéma monophasé équivalent du réseau

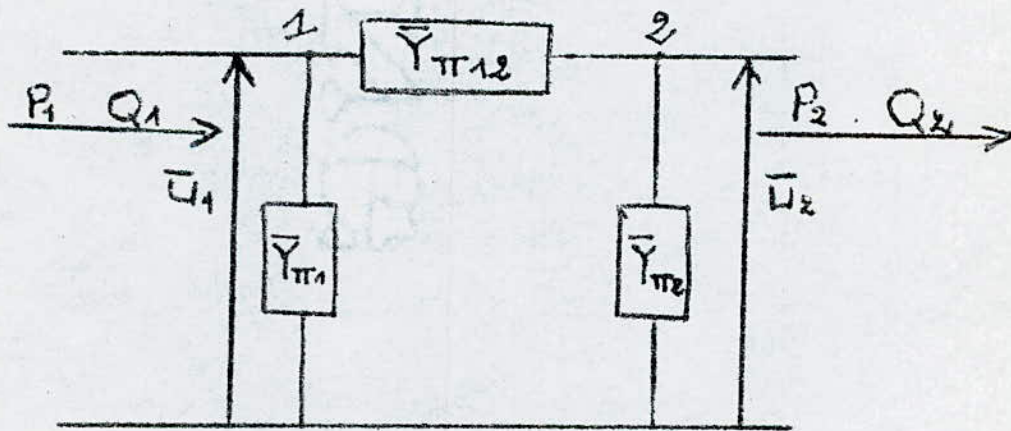


L'analyse du réseau se fait tronçon par tronçon. Les caractéristiques de chaque tronçon sont indiquées dans le tableau 2.

Le schéma équivalent du réseau entier est montré dans la figure 2.

TABLEAU 2 :

Tronçon	A B	B C	CD'	D E	E A
$Y_{\pi 1}$ (mS)	0	$j 0,21$	0	0	0
$Y_{\pi 2}$ (mS)	$j 0,18$	$j 0,21$	$j 0,13$	$j 0,18$	$j 0,18$
$Y_{\pi 12}$ (mS)	$4,2-j11,8$	$2,83-j16,79$	$1,5-j10,9$	$4,2-j11,8$	$4,2-j11,8$



II. ANALYSE DU BILAN DES PUISSANCES ACTIVES ET REACTIVES DANS LE TRONCON A B C D.

Le meilleur choix des appareils de réglage repose sur la connaissance précise des bilans des puissances actives et réactives du réseau analysé.

1. Analyse du tronçon A B (fig.3).

DONNEES :

Tension au niveau du jeu de barre AB : 110 KV.

Charge locale au niveau de la centrale A : $10 - j 6,2$ MVA

Charge locale au niveau de la centrale B : $50 - j 37,5$ MVA.

On suppose que la centrale B ne peut fournir que $30 - j 22,5$ MVA, dans ces conditions, quelle doit être la tension au niveau du jeu de barre A, et la puissance fournie par la centrale A.

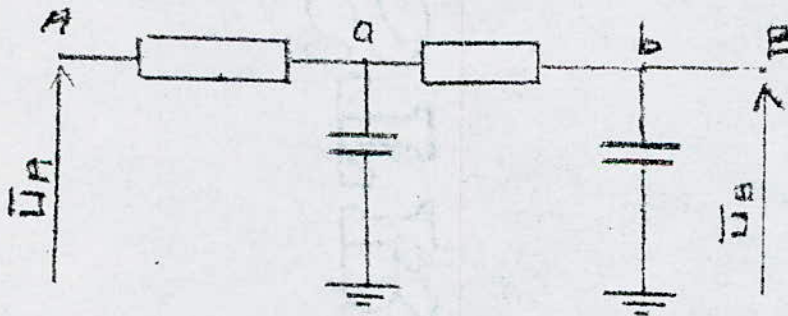
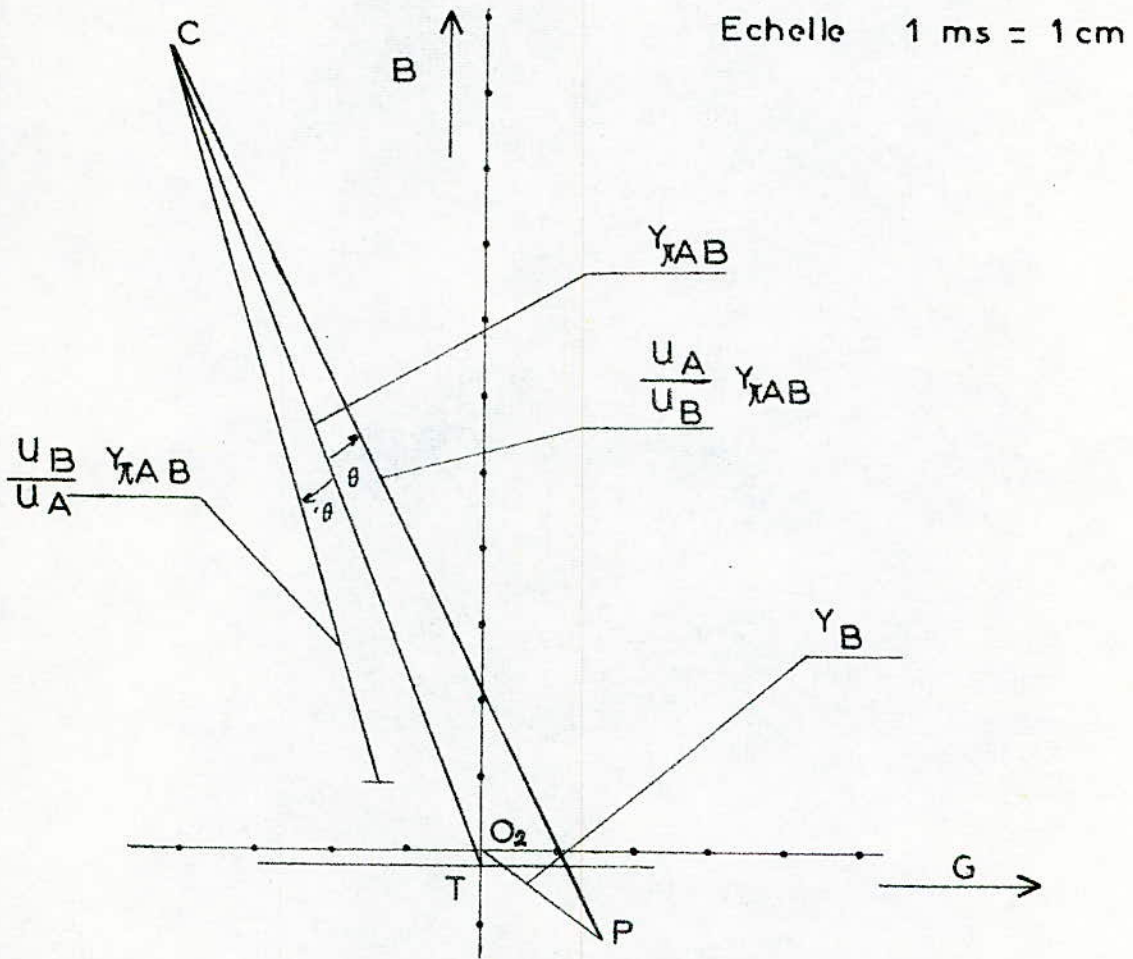
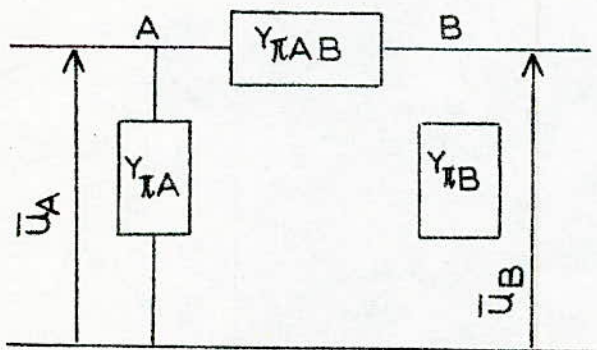


Fig.3 - Schéma équivalent du tronçon A B.

En transfigurant l'étoile Aab en un triangle, on obtient un quadripôle équivalent en Π dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 2, puisque la charge au niveau de B est connue ($20 - j 15$ MVA), et la tension est également connue (110 KV), on peut donc facilement construire le diagramme du cercle du quadripôle en question.



a) Diagramme de fonctionnement



$$\begin{aligned} \bar{Y}_{\pi AB} &= 125 \text{ e}^{j70,4} \text{ ms} \\ \bar{Y}_{\pi A} &\approx 0 \\ \bar{Y}_{\pi B} &\approx 0,17 \text{ e}^{j85,8} \text{ ms} \\ \bar{U}_A &= 125,2 \text{ KV} \\ \bar{U}_B &\approx 110 \text{ KV} \end{aligned}$$

b) Schéma équivalent en π

Fig 3 Troncon AB

Du diagramme de la figure 3 , on tire :

$$\begin{aligned}
 U_A &= 125,2 \text{ KV} \\
 P_A &= 1,4 \cdot (125,2)^2 = 21,9 \text{ MW} \\
 Q_A &= 1 \cdot (125,2)^2 = 15,7 \text{ MVar}
 \end{aligned}$$

D'où :

La puissance fournie par la centrale A est $21,9 + 10 - j (6,2 + 15,7)$ c'est à dire : $31,9 - j 21,9 \text{ MVA}$.

2. Analyse du tronçon B C (fig. 4) :

Les données sont les suivantes :

- la tension au niveau du jeu de barre B est 110 KV, celle du jeu de barre C est 108 KV, la puissance appelée par la sous-station est $18,3 - j 7 \text{ MVA}$. La ligne B C ne peut transporter que 6 MW, dans ces conditions, quelle est la puissance réactive dans le tronçon B C.

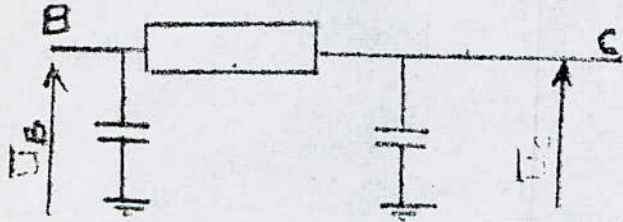


Fig. 4. Schéma équivalent du tronçon BC.

Les caractéristiques du quadripôle équivalent en Π sont indiquées dans le tableau 2.

Puisque la puissance active à la sortie de la ligne B C est connue (6 MW), le rapport des tensions aussi (110/108), le point de fonctionnement est obtenu par l'intersection de la droite ($P = 6 \text{ MW}$) et le cercle correspondant au rapport (110/108).

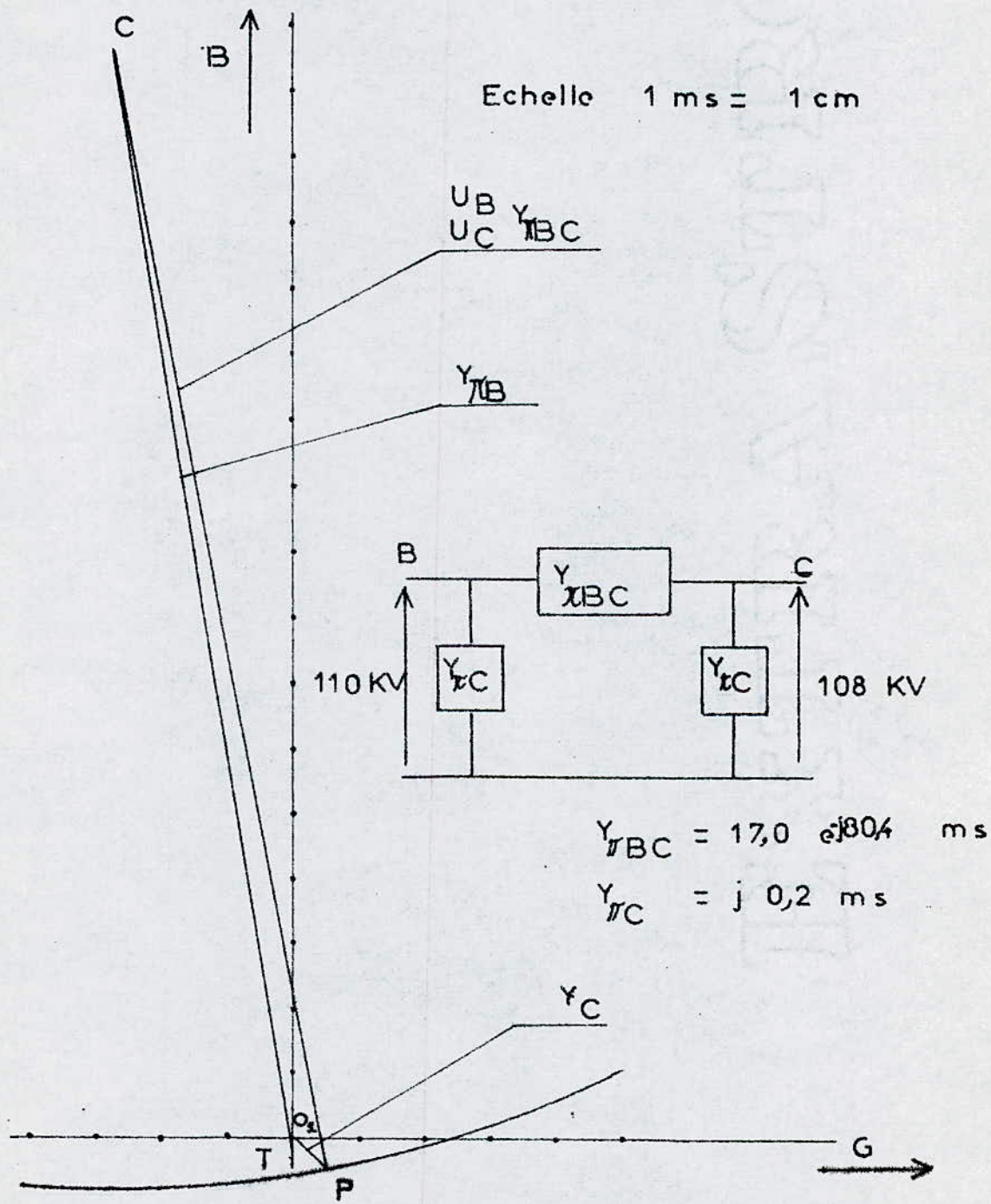


Fig4 Diagramme de fonctionnement du trocon BC

Du diagramme de la figure 4 , on tire :

- la puissance réactive transporté par B C est :

$$Q_{Bc} = 0,4^2 \cdot (110)^2 = 5,08 \text{ MVar.}$$

3. Analyse du tronçon C D' (fig.5) :

Les données sont les mêmes qu'au paragraphe 1 et 2. Quelle est alors la tension au niveau du jeu de barre D et la puissance fournie par la centrale D ?

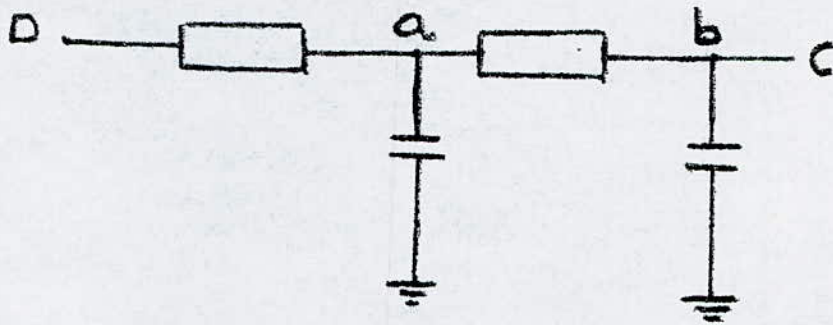


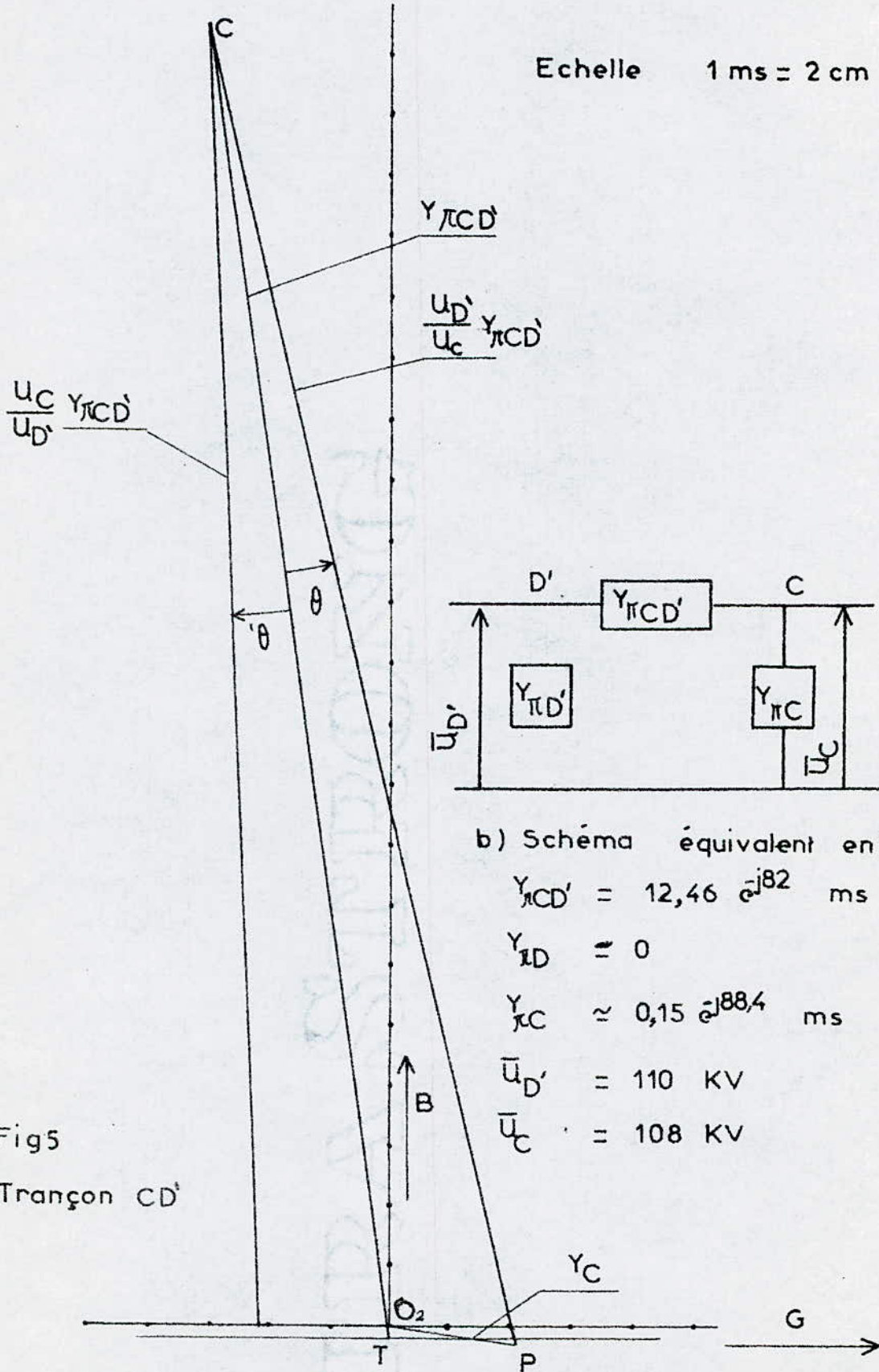
Fig.5. Shéma équivalent du tronçon CD'.

En transfigurant l'étoile Dab en un triangle équivalent, on obtient un quadripôle équivalent en Π dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 2.

En faisant les bilans des puissances du tronçon BD (voir schéma) la puissance en C est : $12,3 - j 2 \text{ MVA}$.

Comme la tension est connue à la sous-station C (108 KV), on peut donc construire le diagramme circulaire relatif au quadripôle équivalent du tronçon D C.

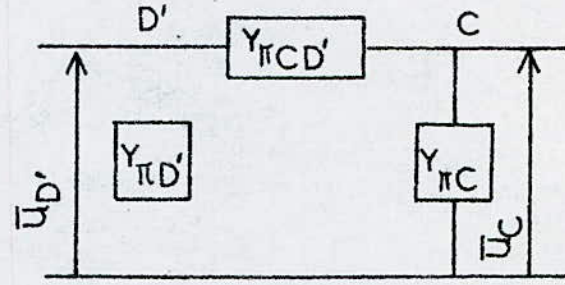
Echelle 1 ms = 2 cm



$$\frac{U_C}{U_{D'}} Y_{\pi CD'}$$

$$Y_{\pi CD'}$$

$$\frac{U_{D'}}{U_C} Y_{\pi CD'}$$



b) Schéma équivalent en π

$$Y_{\pi CD'} = 12,46 e^{-j82} \text{ ms}$$

$$Y_{\pi D} = 0$$

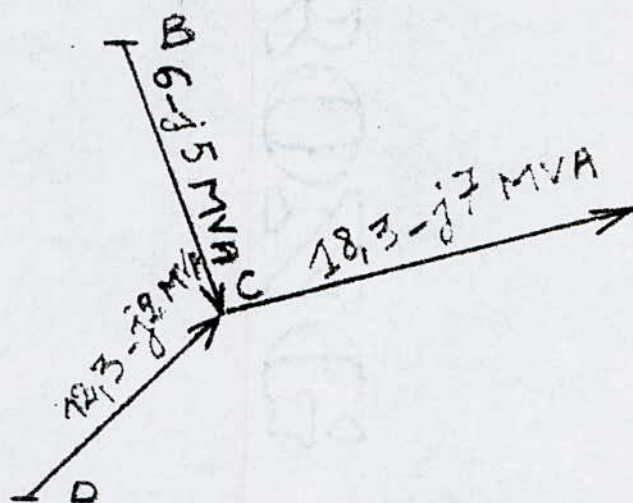
$$Y_{\pi C} \approx 0,15 e^{j88,4} \text{ ms}$$

$$\bar{U}_{D'} = 110 \text{ KV}$$

$$\bar{U}_C = 108 \text{ KV}$$

Fig5
Trançon CD'

a) Diagramme de fonctionnement



Du diagramme de la figure 5 , on tire :

- la puissance au point D est $12,4 + j 1,8$ MVA.

La charge locale à la centrale D est $10,0 - j 7,0$ MVA.

Par conséquent, la puissance totale fournie par la centrale D est : $22, 4 - j 5,2$ MVA

- la tension au niveau du jeu de barre D est : 110 KV.

4. Analyse du tronçon D A :

Pour bien choisir le rapport de transformation du transformateur de régulation (T_2), il faut considérer le régime de fonctionnement le plus défavorable. Pour cela on suppose que la ligne E A ne transporte aucune puissance active.

Les données sont les suivantes :

- la tension au niveau de la sous-station est 111 KV.

- la puissance en E est : $10 - j 5$ MVA.

- la tension au niveau du jeu de barre D est 116 KV.

Dans ces conditions, quelle doit être la tension au niveau du jeu de barre A, ainsi que la puissance transportée par D E ?

Commençons d'abord par établir le diagramme circulaire du tronçon D E.

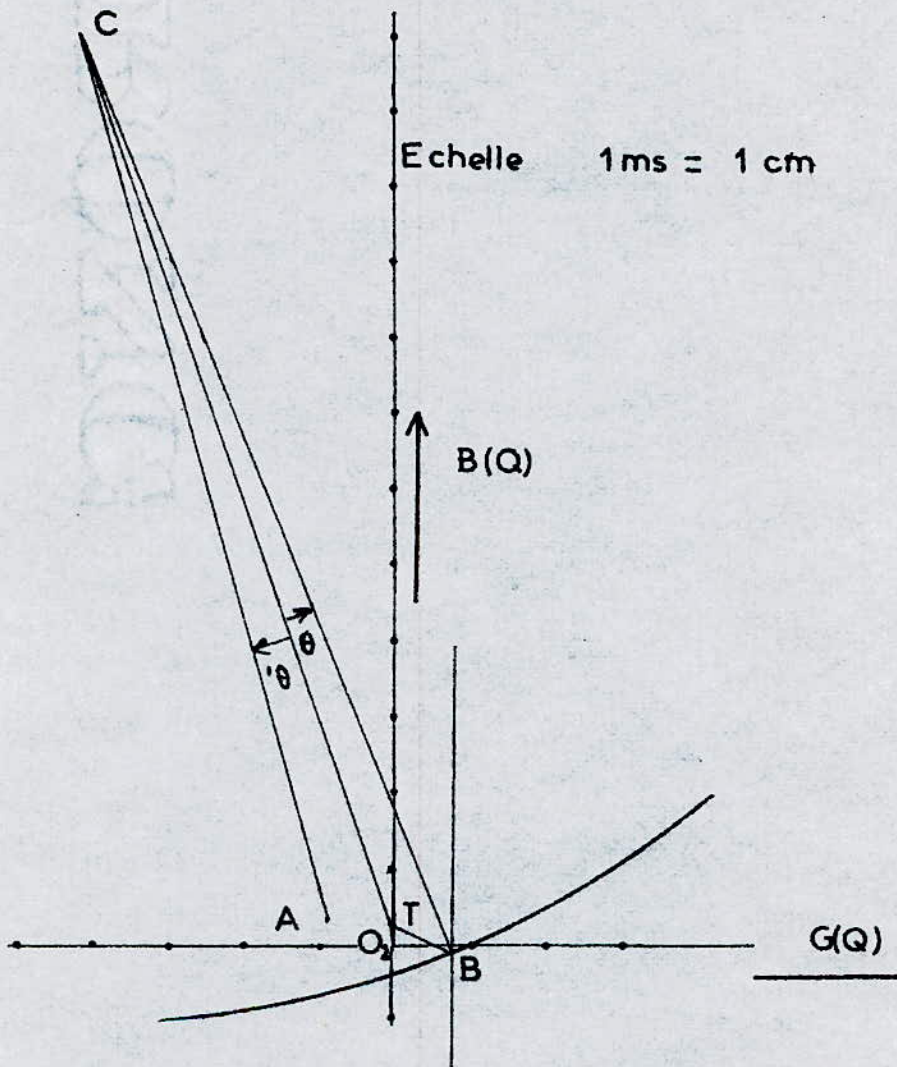


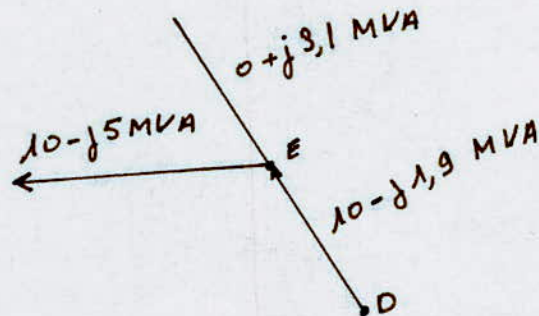
Fig 6 Analyse du tronçon de,
le schema équivalent en π
et le meme que AB.

Puisque les tensions aux points D et E sont données ainsi que la puissance active au point E, à la base de ces données la construction du diagramme est aisée.

Du diagramme de la figure , on tire :

- puissance transportée par D E est : $10 - j 1,9$ MVA.

Donc, la puissance réactive qui passe dans le tronçon E A est : $5 - 1,9 = 3,1$ MVar (voir bilan ci-dessous).



Analyse du tronçon E A :

Le régime de fonctionnement en E est connu. En effet, la ligne E A ne transporte aucune puissance active, mais transporte une puissance réactive de 3,1 MVar, la tension en E est également connue.

A partir de ces données, on peut facilement construire le diagramme de fonctionnement (c'est le point B' - figure).

Du diagramme, on tire :

$$\frac{U_A}{U_E} = 1,028 \quad U_A = 1,028 \cdot 111 = 114,1 \text{ KV.}$$

Par conséquent, le rapport de transformation du transformateur de régulation T_2 est $\frac{110}{114,1} m = 0,964$.

Si m est choisi de cette façon, la tension au niveau du jeu de barre A reste constante, égale à 110 KV quel que soit le régime de fonctionnement.

Pour le régime de fonctionnement intermédiaire, le transformateur doit être muni de prises de réglage. En général, la plage de réglage est $\pm 15\%$.

Analyse du tronçon D A :

Les données sont les suivantes :

- la tension au niveau du jeu de barre E est 111 KV
- la tension en A est 110 KV
- la tension en D est 116 KV
- la puissance dans la sous-station E est : $10 - j 5$ MVA
- l'angle de charge (déphasage entre U_D et U_A) est :
= $5,77^\circ$.

Dans ces conditions, quelle est la puissance transmise par la ligne D E.

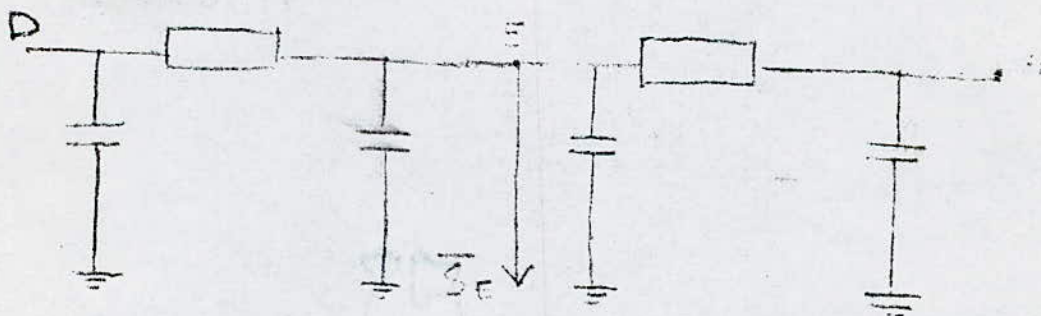


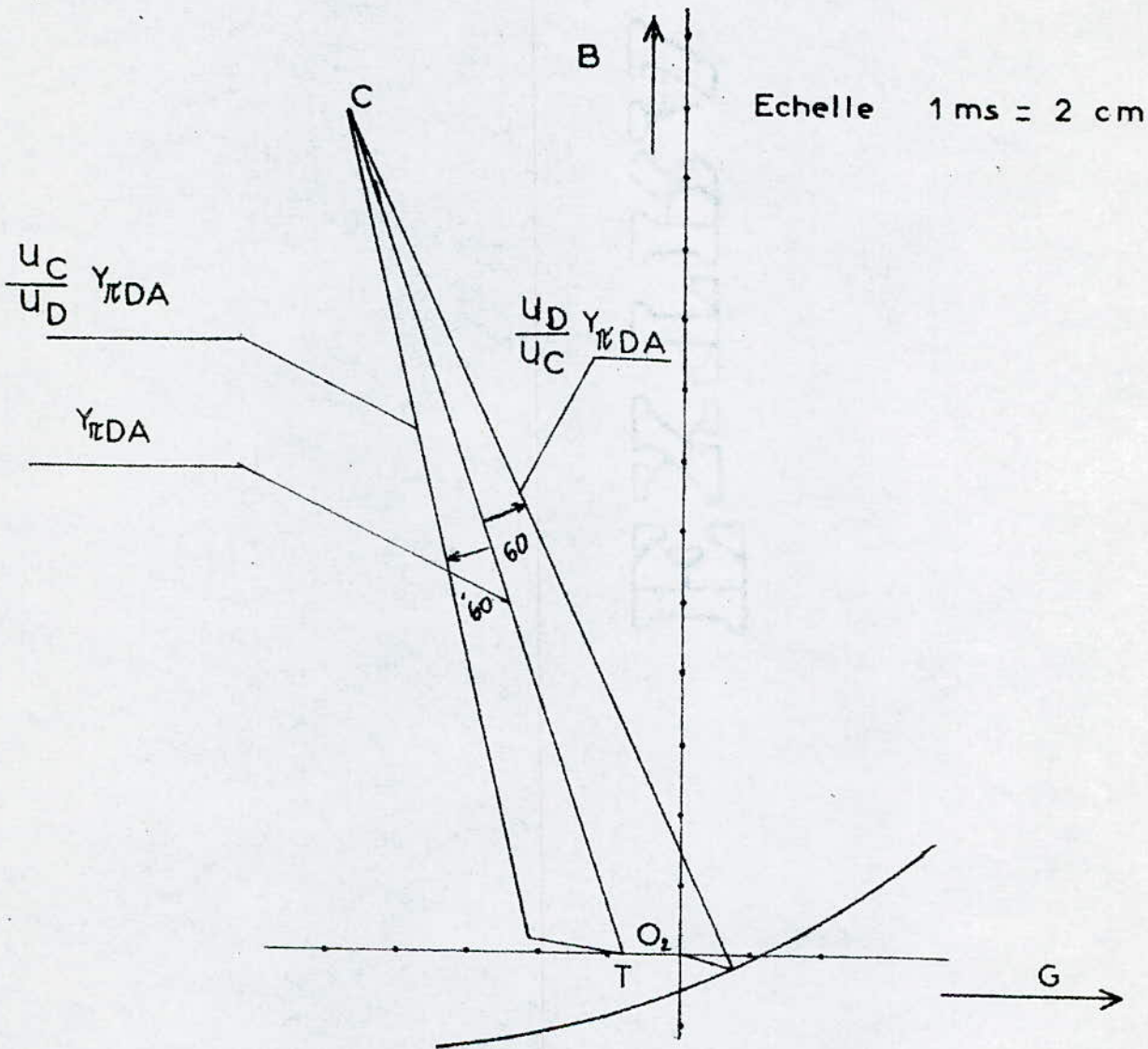
Fig. 7.a

On transforme la puissance \overline{SE} en admittance :

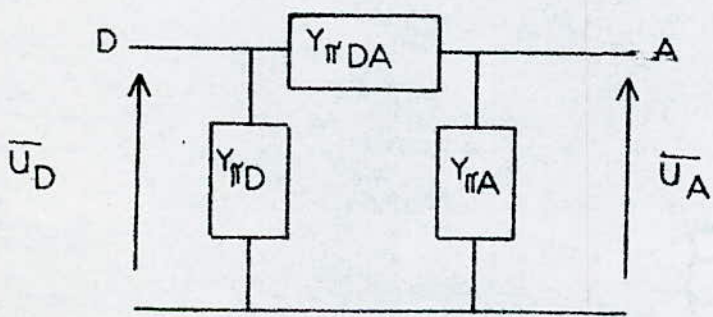
$$Y_E = \frac{SE}{U_E^2} = \frac{10 - j 5}{(111)^2} = 0,81 - j 0,40 \text{ mS}$$

En transformant le schéma de la figure 7.a en un quadripôle équivalent en II (voir fig. 7.b).

$$\begin{aligned} \overline{Y}_{\pi DA} &= 1,91 - j 5,88 \text{ mS} \\ \overline{Y}_{\pi A} &= 0,4 \text{ mS} \\ \overline{Y}_{\pi D} &\simeq 0 \end{aligned}$$



a) Diagramme de fonctionnement



$$\begin{aligned} \bar{Y}_{\pi DA} &= 6.18 \, e^{j72} \\ \bar{Y}_{\pi D} &= 0 \\ \bar{Y}_{\pi A} &= 0.4 \, e^{j383} \\ \bar{U}_A &= 110 \, \text{KV} \\ \bar{U}_D &= 116 \, \text{KV} \end{aligned}$$

b) Schéma équivalent en

Fig 7.6 Tronçon DA

Du diagramme de la figure 1.b, on tire :

$$S_D = 14,13 - j 1,34 \text{ MVA}$$

INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS :

On remarque que la ligne B C transporte presque autant de puissance active et réactive. On propose l'installation d'un compensateur à la sous-station C. Cette initiative a pour conséquence de diminuer les pertes actives dues au transit de la puissance réactive. On peut donc augmenter la capacité de transport de la ligne sans échauffement exagéré.

CONCLUSION

L'étude que nous venons de faire nous a permis d'élargir nos connaissances en matière de réglage de la puissance réactive dans les réseaux H.T. . En particulier nous avons étudié les dispositifs de compensation d'énergie réactive et de réglage de la tension, de l'influence du réactif la stabilité des réseaux à H.T, ainsi que le facteur de puissance économique .

Mis-à part la méthode analytique de calcul de la puissance réactive de compensation, nous avons utilisé la méthode de diagramme du cercle établi par le P. GOTTFRIED , qui permet une étude plus générale que le diagramme établi par EVANS et SELS sous différentes conditions du travail du réseau, en particulier l'application de ce diagramme pour le calcul de la répartition des puissances dans un réseau bouclé qui est imposé par le promoteur .

Nous espérons que la méthode que nous avons exposé peut être utile pour les lecteurs qui abordent le problème de la répartition de puissance dans un réseau complexe . .

THEORIE DU DIAGRAMME DU CERCLE

Considérons un système de transmission d'énergie électrique qu'on assimile à un quadripôle passif en Π de paramètres A, B, C, D, présenté dans la figure A₁.

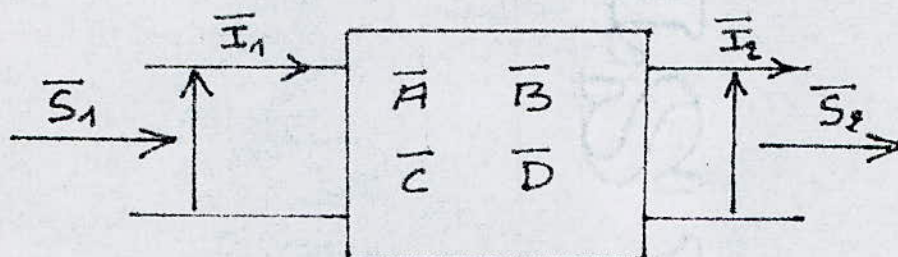


Fig. A₁

Dans le cas d'un quadripôle passif, les relations entre les grandeurs d'entrée et de sortie sont :

$$\bar{V}_1 = \bar{A} \bar{V}_2 + \bar{B} \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \bar{V}_2 + \bar{D} \bar{I}_2$$

On rappelle que A et C sont sans dimensions et que B a la dimension d'une impédance et C la dimension d'une admittance.

En notation matricielle, on a :

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

En inversant la matrice $\begin{pmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{pmatrix}$ on trouve :

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{D} & -\bar{B} \\ -\bar{C} & \bar{A} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

En résolvant les équations (1), (2), par rapport à I_1 et I_2 , on trouve :

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{D}}{B} \bar{V}_1 - \frac{1}{B} \bar{V}_2$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{B} \bar{V}_1 - \frac{\bar{A}}{B} \bar{V}_2$$

Posons $\bar{V}_1 = V_1 e^{j\theta_1}$ et $\bar{V}_2 = V_2 e^{j\theta_2}$

Si on admet la définition $\bar{S} = \bar{V}^* \bar{I}$

(voir introduction)

La puissance S_1 à l'entrée et S_2 à la sortie du quadripôle s'expriment par :

$$\begin{aligned} * \bar{S}_1 &= \bar{V}_1^* \bar{I}_1 = V_1 \cdot e^{-j\theta_1} \left(\frac{\bar{D}}{B} V_1 e^{j\theta_1} - \frac{1}{B} V_2 e^{j\theta_2} \right) \\ \bar{S}_1 &= V_1^2 \frac{\bar{D}}{B} - \frac{V_1 \cdot V_2}{B} e^{j(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} * \bar{S}_2 &= \bar{V}_2^* \bar{I}_2 = V_2 e^{-j\theta_2} \left(\frac{V_1}{B} e^{j\theta_1} - \frac{\bar{A}}{B} V_2 e^{j\theta_2} \right) \\ \bar{S}_2 &= \frac{V_1 V_2}{B} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} - \frac{\bar{A}}{B} V_2^2 \quad (4) \end{aligned}$$

Posons $\theta_2 - \theta_1 = \theta$, et divisant les expressions (3), (4) respectivement par V_1^2 et V_2^2 , on obtient :

$$* \frac{\bar{S}_1}{V_1^2} = \frac{\bar{D}}{B} - \frac{V_2}{V_1} \frac{1}{B} e^{j\theta}$$

$$* \frac{\bar{S}_2}{V_2^2} = \frac{V_1}{V_2} \frac{1}{B} e^{-j\theta} - \frac{\bar{A}}{B}$$

Pour un quadripôle passif en Π , on a les relations suivantes :

$$\bar{Z} = \bar{B} : \text{impédance longitudinale}$$

$$\bar{Y}_{\Pi 1} = \frac{\bar{D} - 1}{\bar{B}} : \text{admittance transversale à l'entrée} \quad (5)$$

$$\bar{Y}_{\Pi 2} = \frac{\bar{A} - 1}{\bar{B}} : \text{admittance transversale à la sortie} \quad (6)$$

On note :

$$\bar{Y}_{\Pi 12} = \frac{1}{\bar{B}} = \frac{1}{\bar{Z}} : \text{admittance longitudinale} \quad (7)$$

$$\bar{Y}_1 = \frac{\bar{S}_1}{\bar{V}_1^2} : \text{admittance d'entrée} \quad (8)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{\bar{S}_2}{\bar{V}_2^2} : \text{admittance de charge} \quad (9)$$

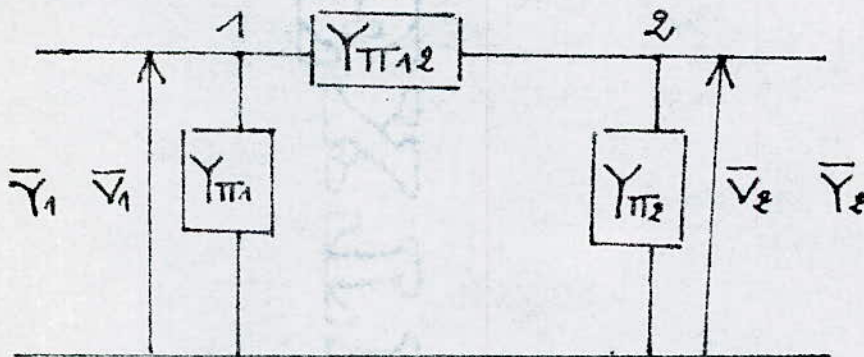


Fig. A₂

Des relations (5), (6), on tire :

$$\frac{\bar{A}}{\bar{B}} = \bar{Y} \pi_2 + \bar{Y} \pi_{12}$$

$$\frac{\bar{D}}{\bar{B}} = \bar{Y} \pi_1 + \bar{Y} \pi_{12}$$

En remplaçant $\frac{\bar{A}}{\bar{B}}$ et $\frac{\bar{D}}{\bar{B}}$ par leur valeur respective d'une part, \bar{Y}_1 et \bar{Y}_2 par leur valeur respective d'autre part, dans les expressions de \bar{S}_1 et \bar{S}_2 , on obtient :

$$* \bar{Y}_1 = (\bar{Y} \pi_1 + \bar{Y} \pi_{12}) - \frac{V_2}{V_1} \cdot \bar{Y} \pi_{12} e^{j\theta} \quad (10)$$

$$* \bar{Y}_2 = -(\bar{Y} \pi_2 + \bar{Y} \pi_{12}) + \frac{V_1}{V_2} \bar{Y} \pi_{12} e^{-j\theta} \quad (11)$$

On sait qu'en coordonnées polaires l'équation d'un cercle s'écrit :

$$\bar{M} = \bar{V} + R e^{j\theta}$$

Avec :

\bar{V} : un vecteur de module et d'arguments constants

R : un rayon du cercle dont le centre est l'extrémité de V

Dans les équations (10) et (11), les vecteurs $(\bar{Y} \pi_1 + \bar{Y} \pi_{12})$ et $(-\bar{Y} \pi_2 - \bar{Y} \pi_{12})$ sont indépendants du régime de fonctionnement, par conséquent de modules et d'arguments constants. On peut donc affirmer que :

- les lieux géométriques des admittances d'entrée (Y_1) et de sortie (Y_2) pour un rapport des tensions ($\frac{V_1}{V_2}$) donné sont des cercles.

Construction du diagramme :

Posons : $\bar{Y} \pi_{12} = Y \pi_{12} e^{-j\alpha}$; $\bar{Y} \pi_2 = Y \pi_2 e^{j\beta}$
 $\bar{Y} \pi_1 = Y \pi_1 e^{j\delta}$

On choisit une origine arbitraire C dans le plan de GAUSS et on porte :

$$\overline{CD} = \overline{Y} \pi_{12}$$

$$\overline{DO_1} = \overline{Y} \pi_1$$

$$\overline{DO_2} = \overline{Y} \pi_2$$

$$\overline{O_2 B} = \overline{Y}_2$$

$$\overline{O_1 A} = \overline{Y}_1$$

⊙ : argument de la charge

θ : déphasage relatif des tensions \overline{V}_1 et \overline{V}_2 . (voir figure A₃).

Ce diagramme a été établi par le Professeur J. GOTTFRIED.

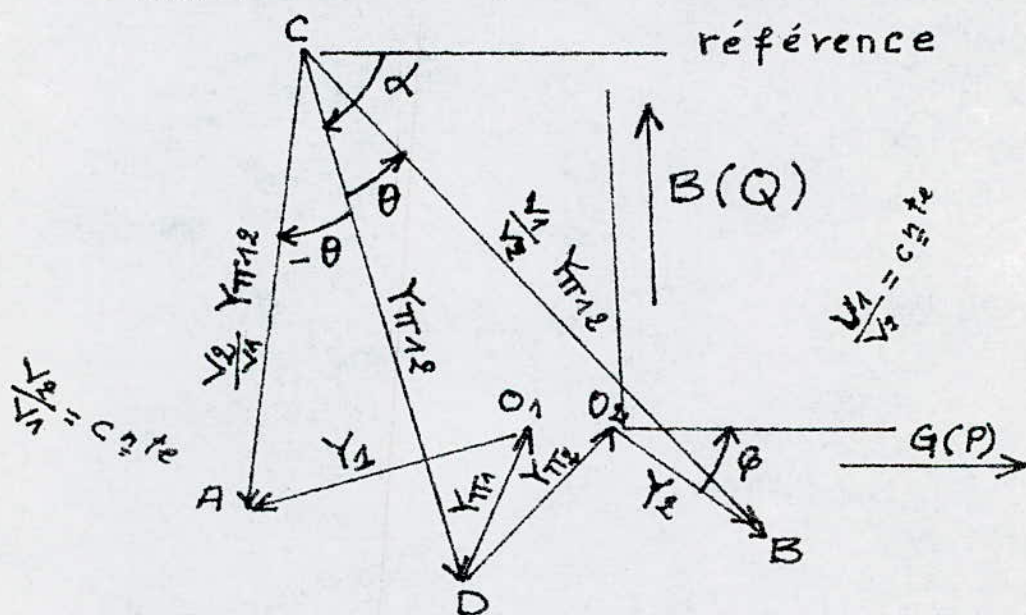


Fig. A₃ - Diagramme universel de J. GOTTFRIED.

B I B L I O G R A P H I E

=====

CHAPITRE I

- Les réseaux d'énergie électrique (tome 1) , par René Pelissier, Dunod éditeur 1971 ; pages : 83 - 93 .
- Problèmes généraux à propos de la puissance réactive , par Favez, Pardigon . R.G.E décembre 1965 .

CHAPITRE II

- La planification des réseaux électrique , par Henri Persoz , Gérard Santucci, Eyrolles éditeur 1984 ; pages : 12
- 6 CIGRE 1983 rapport n°91 .

CHAPITRE III

- Electric power systems , par W.Wedney , édition 1978 ; pages : 86 - 146 .
- Fonctionnement et protection des réseaux de transport d'électricité , par Pierre Henriet , Gauthier , Villars éditeur 1963 . Pages : 37 - 89 .
- Les problèmes de réglage et de commande de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques , par Bertigny et autres. R.G.E mai 1976 .

CHAPITRE IV

- Fonctionnement et protection des réseaux de transport d'électricité , par Pierre Henriot ; pages : 195 - 284 .

CHAPITRE V

- Le nouveau cercle diagramme pour la transmission d'énergie électrique , Revue Polonaise Przegla-d Echelektrot , n)5 1957 PAR J.Gottfried .
- Etude des circuits électriques (tome II) , (Régimes de fonctionnement) , par J.Lagasse - 1970 ; pages : 155 - 185
- Générateurs . Lignes . Récepteurs , par C.E.koorhouse(traduit de l'anglais)-1977- Eyrolles éditeur ; pages : 119 - 135 .

