

UNIVERSITÉ D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

3/74



lea

PROJET DE FIN D'ETUDES

REPARTITION OPTIMALE DES
SOURCES D'ENERGIE REACTIVE
POUR UN GROUPE DE CONSOMMATEURS

PROPOSÉ PAR :
G. CIRTINA

ETUDIÉ PAR :
BENNADA F.

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

REPARTITION OPTIMALE DES SOURCES
D'ENERGIE REACTIVE POUR UN
GROUPE DE CONSOMMATEURS

---0---

Proposé et dirigé par :
M. G. CIRTINA, Dr Ingénieur

Etudié et Réalisé par :
M. BENADDA Fath Allah Khaled

PROMOTION 1974

TABLE DES MATIERES.

INTRODUCTION:	PAGE..7
CHAPITRE I : NATURE de l'Energie Réactive	
I.1 : Généralités.....	9
I.2 : Energie Réactive en Régime Sinusoidal	12
I.3 : Variations de la Puissance Réactive	16
CHAPITRE II : Bilan des Puissances Réactive	
II.1 : Les Consommateurs d'énergie Réactive.	
II.1.1 : Les Transformateurs.....	18
II.1.2 : Les Moteurs Asynchrones.....	19
II.1.3 : Les Lignes Electriques	20
II.1.4 : Autres Appareils	22
II.2 : Moyen de Fourniture de l'énergie Réactive	
II.2.1 : Alt. de Centrales et Moteurs synchrones.....	23
II.2.2 : Compensateurs Synchrones	23
II.2.3 : Batteries de Condensateurs	23
CHAPITRE III : Conséquences d'un cos trop petit	24
CHAPITRE IV : Choix du moyen de Compensation	
IV.1 : Compensation par compensateurs Synchrones	27
IV.2 : Compensation par Condensateurs de Puissance	27
IV.3 : Choix Economique	28
CHAPITRE V : Différents modes et Puissance de Compensation.	
V.1 : Modes de Compensation	30
V.2 : Puissance du Dispositif de Compensation	31
CHAPITRE VI : Répartition Optimale des Condensateurs de Puissance	

	PAGE.
VI.1 : Répartition optimale des Condensateurs dans les Réseaux avec Transformateurs	33
VI.1.1 : Détermination de la Puissance Optimale des Condensateurs B.T.	33
VI.1.2 : Détermination de la Puissance Optimale des Condensateurs H.T.	37
VI.2 : Méthode Générale de Répartition Optimale de la Puissance Réactive de Compensation dans les réseaux	
VI.2.1 : Principe.	37
VI.2.2 : Bases Mathématiques	38
VI.2.3 : Répartition Optimale des Condensateurs dans les réseaux Radiaux	40
VI.2.4 : Répartition Optimale des Condensateurs des les Magistreaux	42
VI.2.5 : Répartition Optimale de la Puissance de Compensation dans les Réseaux Complexes.....	44
VI.3 : Estimation des pertes dans le cas où la Puissance de compensation diffère de la puissance de compensation Optimale. ;:.....	49
VI.3.1 : Estimation des pertes.	
VI.3.2 : Valeurs Normalisées des Condensateurs.	
 CHAPITRE VII : Règlage de l'Injection de Puissance Réactive.	
VII.1 : Méthode Actuelle.....	52
VII.1.1 : Mise en Service d'une Batterie Unique.	
VII.1.2 : Mise hors Service.	
VII.1.3 : Cas de plusieurs Batteries en parallèle ...	
VII.1.4 : Résistance de Décharge.	
VII.2. : Installation.	
VII.1. : Statique Réglable de puissance Réactive.....	55

	Page.
CHAPITRE VII : Partie Pratique.....	57
CONCLUSION :	74
ANNEXE 1. : Répartition Optimale de la Puissance Réactive dans les Réseaux Radicaux	77
ANNEXE 2. : Normes U.T.E. pour Condensateurs type E.D.F.....	79
BIBLIOGRAPHIE	81

III INTRODUCTION

De nos jours, la consommation de l'Energie active et de l'Energie réactive augmente à un rythme très rapide. Dans les pays en voie de développement, les productions de celles-ci doublent, triplent et quadruplent même selon les pays tous les dix ans environ. Cependant si le Transport de l'Energie Active est nécessaire, celui de l'Energie réactive pose de nombreux problèmes du fait des pertes d'Energie, chutes de tension. . . . etc. qu'il occasionne.

La solution de ces problèmes consiste en la production près du lieu où elle est consommée, de la plus grande partie de l'Energie réactive appelée par les consommateurs. Cependant cette solution devra correspondre à un optimum du point de vue 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'Energie réactive, les moyens de la produire et de la consommer, il est proposé dans cette étude plusieurs chapitres sur le choix du moyen de compensation, la puissance et les différents mode de compensation de l'Energie réactive, la répartition optimale des condensateurs de puissance, le réglage de l'injection de la puissance réactive de compensation.

Nous proposons également dans le paragraphe VI-2, une méthode générale de répartition optimale de la puissance réactive de compensation dans les réseaux complexes, basée sur la minimisation des pertes d'Energie active relatives au transit de l'Energie réactive.

En particulierisant les formules données par la méthode on retrouve les résultats donnés par la littérature et démontrés pour des situations particulières.

I - NATURE DE L'ENERGIE REACTIVE

I. 1 - Généralités

Lorsqu'on parle de courant électrique, on se réfère généralement à son aspect corpusculaire, celui d'un flot d'électrons. On obtient d'ailleurs ainsi, une image explicative des phénomènes observés en couraut continu : chute de tension en ligne, répartition des courauts dans un réseau, pertes par effet

On constate cependant que cette explication est insuffisante.

En effet, un conducteur porté au potentiel V et traversé par un couraut électrique I est entouré par un champ électromagnétique, composé de deux vecteurs :

- le champ électrique \vec{E}
- le champ magnétique \vec{B}

qui sont liés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Rot } \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 & \text{div } \vec{B} &= 0 & \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \text{Rot } \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \vec{j} & \text{div } \vec{D} &= p & \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \end{aligned} \quad (1)$$

L'existence de ces deux champs est nécessaire pour qu'il y ait transmission d'Energie.

De plus, tout processus de transformation Energétique fait appel à l'action de l'un ou l'autre de ces champs.

L'Energie réactive est liée à l'existence des champs électrique et magnétique, et donc au fond à l'aspect ondulatoire de l'Energie électrique.

En effet, considérons les équations (1). Le Produit $\vec{E} \wedge \vec{H}$ a la dimension d'une énergie par surface. pour une surface fermée S, le flux d'énergie est

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

le théorème d'ostrogradski nous permet d'écrire

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

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

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

Dans le cas d'un milieu homogène, linéaire, conducteur, isotrope et invariant dans le temps on aura :

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

Ceci veut dire que le flux d'énergie à travers une surface fermée (S) enveloppant un volume (V) de l'espace qui contient un conducteur, est composé

- de l'Énergie $\iiint_{(V)} E^2 \cdot \tau \, dv$ dissipée par effet Joule.
- de l'Énergie $dw = \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 + \frac{1}{\mu_0 \mu} B^2 \right) dv$, emmagasinée,

Dans tout volume élémentaire dv de l'espace environnant un conducteur, cette énergie est cependant plus dense à proximité du conducteur que loin de lui. Cette énergie est une énergie électromagnétique.

Pour porter le conducteur de capacité C au potentiel V , ce qui a amené sur lui la charge $Q = CV$, il a fallu fournir l'énergie

$$W_e = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

On calcule en considérant des tubes de force élémentaires, que cette énergie est répartie dans l'espace environnant et que l'on peut écrire

$$W_e = \frac{\epsilon_0}{2} \iiint_{(V)} \epsilon E^2 \, dv$$

avec

E : champ électrique

dv : volume élémentaire

ϵ_0 : constante diélectrique du vide

ϵ : constante diélectrique relative du milieu ambiant.

De même, pour injecter dans un conducteur, un courant I , il faut fournir au système l'énergie

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2$$

qui est, elle aussi, emmagasinée dans l'espace environnant de sorte que

$$W_m = \frac{1}{2 \mu_0} \iiint_{(V)} \frac{B}{\mu} dv$$

avec

- B : champ magnétique d'Induction
- μ_0 : perméabilité du vide
- μ : perméabilité magnétique relative du milieu ambiant.

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

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

I. 2 - Energie Réactive en Régime Sinusoïdal.

Si dans un réseau, le potentiel V et le courant I sont continuellement variables, il y échange continuels 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

$$Q_c = \frac{dW_e}{dt} = C V \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

$$Q_m = \frac{dW_m}{dt} = LI \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

Remarques - Dans un réseau triphasé on remplacera V par U dans la relation (2).

On multipliera par 3 le deuxième membre de l'Equation (3).

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 fait l'appareil ;

- la Puissance capacitive Q_c échangée avec le champ électrique nécessairement présent dans l'appareil et les dispositifs utilisés à son alimentation ;

- la Puissance magnétique P_m ou Puissance magnétisante échangée avec le champ d'induction magnétique, lui aussi nécessairement présent, qu'il soit utile (champ magnétisant d'un transformateur, champ tournant d'un moteur), ou parasite (champs des différents flux de fuite).

Le schéma représentatif le plus simple est celui formé par une résistance R, une inductance L , et une capacité C en parallèle, soumises à la même tension V, imposée par le Réseau. On a alors pour l'inductance de chacune des 3 phases

$$V = L \frac{dI_m}{dt} \Rightarrow \frac{dI_m}{dt} = \frac{V}{L}$$

d'où

$$I_m = \frac{1}{L} \int V dt \quad \text{et} \quad Q_m = \frac{L I_m^2}{2} = \frac{1}{L} \int V dt$$

de même

$$P_a = \frac{V^2}{R}$$

$$Q_c = CV \frac{dV}{dt}$$

Si on note $V = V_0 \cos \omega t$

les expressions deviennent

$$P_a = \frac{V_0^2}{2R} (1 + \cos 2\omega t)$$

$$Q_c = -\frac{V_0^2 C \omega}{2} \sin 2\omega t$$

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

Si localement les puissances Q_c et Q_m sont égales en module comme elles sont toujours de signes opposés il y a directement échange d'énergie entre les champs électrique et magnétique locaux, et le réseau n'est pas sollicité à participer à l'échange.

Dans le cas général où P_c et P_m ont des modules différents, le réseau doit véhiculer, une puissance supplémentaire ; la puissance réactive désignée par la lettre Q .

Plus précisément le réseau fourni au point considéré :

$$Q = Q_m - Q_c$$

On dit que l'appareil auquel est fournie cette énergie réactive

- consomme de l'énergie réactive si Q est positif
- produit de l'énergie réactive si Q est négatif.

Dans le cas du régime sinusoïdal, d'une manière générale on peut dire si

$$u = U_M \sin \omega t$$

et $i = I_M \sin (\omega t + \varphi)$

que la puissance instantanée $p = u i$ s'écrit

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t + \varphi)$$

avec

$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

La puissance instantanée du courant alternatif prend alors la forme d'une somme de 2 grandeurs : l'une Constante et égale à $U I \cos \varphi$ et l'autre Sinusoïdale ($- U I \cos (2\omega t + \varphi)$) variant avec une fréquence double.

La puissance moyenne est définie par

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = U I \cos \varphi$$

Celle-ci est appelée puissance active à la différence de la puissance apparente et de la puissance réactive.

La puissance apparente est la valeur maximale de la puissance active pour les valeurs efficaces données de la tension et du courant. Elle est liée à la puissance active par la relation

$$P = S \cos \varphi \quad \text{où} \quad S = UI = U \sqrt{I^2 \cos^2 \varphi + I^2 \sin^2 \varphi}$$

On définit la grandeur $Q = \sqrt{S^2 - U^2 I^2 \cos^2 \varphi} = UI \sin \varphi$ comme étant la puissance réactive, elle est liée à la puissance active par la relation

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Elle est positive quand la tension est en avance sur le courant et négative dans le cas contraire.

I. 3 - Variation de la puissance réactive.

La puissance réactive Q consommée a un caractère essentiellement aléatoire. Elle varie à chaque instant, suivant les demandes d'énergie exigées par les consommateurs.

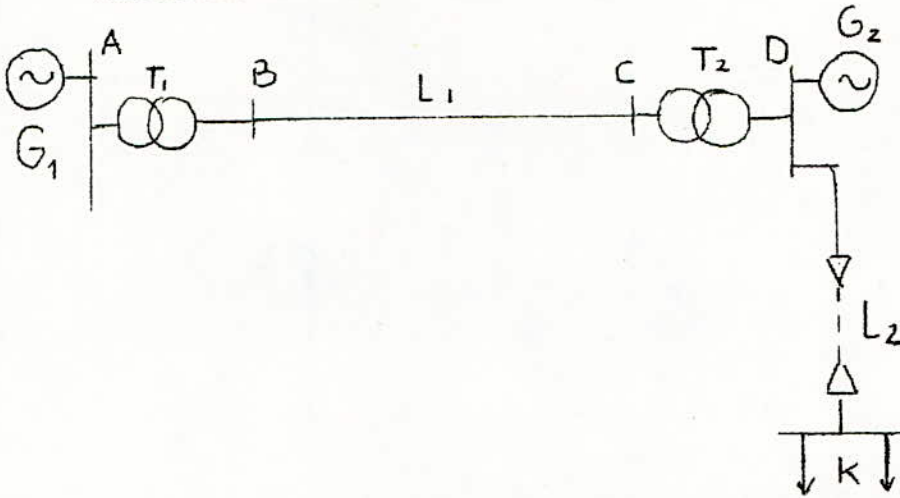
Pour illustrer ces variations, on a recours aux courbes de charge qui représentent dans un repère rectangulaire, les fluctuations de la puissance réactive selon les instants de la journée, les semaines, les mois ou les années.

La courbe de charge journalière est généralement obtenue par des relevés faits toutes les dix, quinze ou trente minutes. Les fluctuations sont généralement faibles sauf à certaines heures bien particulières : creux de midi, montée de charge du matin.

Du fait de la variation de Q dans le temps, on définit une puissance réactive moyenne $Q_{\text{moy}} = \frac{V}{T}$ où V est l'énergie réactive enregistrée par un compteur d'énergie réactive pendant une durée T . De même qu'elle varie dans le temps la puissance réactive varie selon la configuration du réseau.

En effet, dans un réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique, il existe des appareils qui consomment ou qui produisent de l'énergie réactive. De ce fait, celle-ci n'est pas la même en tout point d'un système électroénergétique de transport.

Le schéma ci-dessous illustre à titre d'exemple, les variations de celle-ci.



Le générateur G_1 qui produit une partie de la puissance nécessaire aux consommateurs K , produit aussi de la puissance réactive. Une partie de celle-ci servira aux besoins du transformateur T_1 . De ce fait, la puissance réactive n'a pas la même valeur en A et en B. La ligne L_1 consommera de l'énergie réactive par l'intermédiaire de sa réactance, et en produira en raison de l'existence de capacité de fuite. Le transformateur T_2 en consommera encore et la ligne L_2 qui est un câble en produira car sa capacité est prépondérante devant la réactance.

∴

./.

II - BILAN DES PUISSANCES REACTIVES

II. 1 - Les consommateurs d'énergie réactive

La plupart des appareils d'utilisation fonctionnent grâce au champ magnétique et consomment donc de l'énergie réactive :

les plus importants sont :

II. 1. 1. - Les transformateurs

Ils absorbent de l'énergie réactive de deux façons :

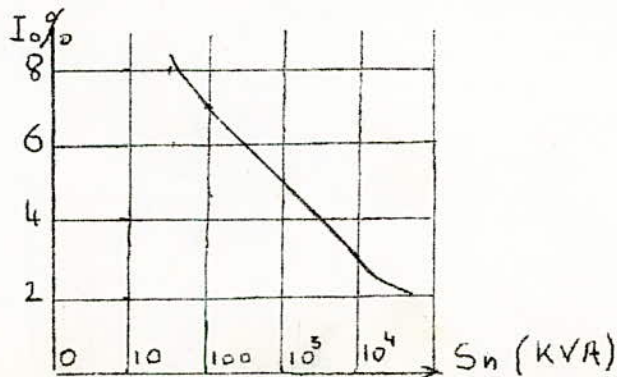
-- Une puissance réactive dite "magnétisante" est nécessaire pour maintenir le champ magnétique dans le Noyau. Elle atteint 2 à 3 pour cent de la puissance nominale pour les transformateurs de distribution, mais seulement 1 à 2 pour cent pour les plus gros transformateurs . Dans la pratique on la mesure par le courant à vide.

$$Q \approx 10I_0 \times S_n \quad [KVar]$$

avec I_0 : courant à vide en pour cent $[\%]$

S_n : Puissance nominale du transformateur $[MVA]$

Le graphe ci-dessous donne un aperçu de la valeur du courant à vide pour des transformateurs de différentes puissances.



-- Le flux de fuite de ces appareils appelle une puissance égale à 4 pour cent de la puissance traversante pour les transformateurs de distribution, et à 7 à 13 pour cent et parfois plus pour les transformateurs du réseau de transport.

Compte-tenu du nombre moyen de transformateurs traversés par la charge appelée par la consommation, et du taux moyen de charge de ces appareils, on peut estimer que les transformateurs consomment en moyenne, une énergie réactive Q transitée par les réseaux ; soit un $\text{tg } \varphi_m = 0,5$ ou $\text{cos } \varphi_m = 0,89$.

La puissance réactive consommée par un transformateur quelconque est :

$$(\text{KVar}) \cdot Q = 10(\text{Sn (MVA)}) \times \text{Lo } (\%) + \frac{U_{cc} (\%) \text{Un}^2(\text{KV})}{\text{Sn (KVA)}} \times \frac{S(\text{KVA})}{U (\text{KV})}$$

II. 1. 2 - Les moteurs asynchrones

Le fait que l'entrefer est beaucoup plus important que dans un transformateur, est la raison pour laquelle le courant magnétisant du moteur asynchrone est beaucoup plus important que celui du transformateur.

A pleine charge, les moteurs asynchrones ont un $\text{cos } \varphi$ compris entre 0,7 et 0,9 ce qui veut dire que le courant réactif a une valeur comprise entre 100 et 50 % du courant actif du moteur ou entre 70 et 40 % du courant nominal.

Le tableau ci-dessous permet de fixer les idées sur les ordres de grandeur de la puissance réactive absorbée par des moteurs asynchrones de différentes puissances.

Moteurs à Rotor bobiné			Moteur à Rotor en Ct. circuit		
U/Volts/	Pn/KW/	Q/KVar/	U/Volts/	Pn/KW/	Q/KVar/
220/380	8,	6	220/380	9, 1	6, 2
"	13, 5	9, 25	"	15, 2	10
"	29	18, 5	"	32	19, 5
"	44	25	"	48	27
"	67	36	"	72	39
"	100	54	"	100	54
6000	260	154	6000	230	142
"	430	232	6000	430	244
"	875	446	"	875	472

II. 1. 3 - Les lignes électriques

Le réseau lui même met en jeu des puissances réactives importantes non seulement du fait des transformateurs, mais aussi en raison des lignes et câbles puisque la transmission d'énergie ne peut se faire sans la présence des champs électriques et magnétiques.

Le champ magnétique qui accompagne le passage du courant absorbe une énergie réactive d'autant plus importante que ce dernier est grand. Celle-ci est exprimée par

$$Q_L = X \frac{P^2 + Q^2}{U^2}$$

X : Réactance de la ligne

P : Puissance active transitée

Q : Puissance réactive transitée

U : Tension entre phase.

La puissance réactive nécessaire à une ligne est d'autant plus élevée que la puissance transitée est supérieure à la puissance caractéristique, car l'énergie produite par la ligne ne compense que partiellement celle qui est consommée.

De même qu'elles consomment de l'énergie réactive, les lignes en produisent grâce au champ électrique.

Cette énergie est exprimée par

$$Q_c = C \omega U^2$$

avec C : Capacité de la ligne

ω : Pulsation de la tension

U : Tension entre phase.

Les ordres de grandeurs de celle-ci sont repérés par les chiffres suivants :

Ligne aérienne 20 KV	1 KVar	fourni par Km	Triphasé
Câble souterrain 20KV	20 KVar	"	"
Câble souterrain 225KV	3MVar	"	"
Ligne aérienne 225 KV	150 KVar	"	"

II. 1.4 - D'autres appareils tels que les fours à Arc, les postes de soudure sont de grands consommateurs d'énergie réactive.

Certains moteurs assez employés dans l'industrie ont des cos de l'ordre de :

$0,7 \angle \cos \varphi \angle 0,8$	Moteur Universel
$0,6 \angle \cos \varphi \angle 0,74$	Moteur Asynchrone Monophasé
$0,6 \angle \cos \varphi \angle 0,7$	Moteur à Collecteur

Les inductances à haute tension, utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie par les lignes à très haute tension. Elles sont branchées soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transformateur. Elles absorbent une partie de l'énergie réactive fournie et réduisent ainsi les sur-tensions.

II. 2 - Moyens de fourniture de l'énergie réactive.

II. 2. 1 - Les alternateurs des centrales et les moteurs synchrones.

Ils sont capables de fournir ou d'absorber de la puissance réactive selon qu'ils sont sur ou sous-excités. Cependant, le dimensionnement du circuit d'excitation limite la possibilité de fourniture à des valeurs maximales de $\cos \varphi = 0, 8$ ou même quelquefois à $\cos \varphi = 0, 9$.

II. 2. 2 - Les compensateurs synchrones

Ce sont des machines synchrones ne fournissant aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'ils sont sous ou sur-excités absorber ou fournir de l'énergie réactive. Pour une machine de construction normale, le rapport entre la puissance réactive fournie Q_f et la puissance réactive absorbée est voisin de 1, 7.

Leurs puissances nominales sont comprises entre 20 et 60 MVA. Cependant les pertes des compensateurs sont élevées, et ils ne deviennent compétitifs que lorsqu'il s'agit de grandes puissances à compenser.

II. 2. 3 - Les batteries de condensateurs

C'est le moyen de fourniture le plus utilisé actuellement.

- Batteries de condensateurs B. T des usagers. Ce sont des petites Unités monophasées de petite puissance (1KVar)
- Batteries de condensateurs dans les réseaux B. T
- Batteries de condensateurs MT. Elles sont constituées d'Unités dont la puissance nominale est de 20 à 50 KVar.

III - CONSEQUENCES D'UN $\cos\varphi$ TROP PETIT [4]

Les inconvénients dûs à une faible valeur du $\cos\varphi$ et donc au transport de Q sont très nombreux tant du point de vue technique que du point de vue économique. Les plus importants sont traduits par :

-- Une faible capacité de transport de puissance active pour une installation déjà existante. En effet une installation prévue pour une certaine puissance apparente transitera, Une puissance active d'autant plus faible que la puissance réactive transportée est importante.

-- Un plus grand dimensionnement d'installations nouvelles. Plus le $\cos\varphi$ est faible, plus il faudra accroître les dimensions des transformateurs, alternateurs, lignes et appareillages électriques divers. La conséquence directe est un investissement beaucoup plus important.

-- Une exploitation plus coûteuse et plus délicate. En effet si la capacité de transport est réduite, cela influe directement sur la capacité de production qui diminue aussi car les turbines sont utilisées au dessous de la charge maximale. De plus, du fait des pertes, le rendement des transformateurs, alternateurs et lignes se trouve diminué considérablement.

-- Une régulation de la tension difficile. En effet les impédances des éléments du réseau, provoquent pour toute variation de la charge une variation de la tension entre leurs extrémités.



Pour le schéma simplifié ci-dessus on a :

$$\begin{aligned}\Delta \bar{U} &= \bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \sqrt{3} (R + j X) (I \cos \varphi - j I \sin \varphi) \\ &= \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U}\end{aligned}$$

généralement on considère $\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$

Si le terme QX est grand (ce qui est le cas pour les transformateurs et les lignes à grosse section des réseaux de transport et de répartition) cette variation devient importante et le réglage difficile.

-- Des pertes d'énergie active. Les éléments constitutifs d'un réseau sont caractérisés par une résistance. Quand celle-ci est parcourue par une charge, elle est le siège de pertes d'énergie.

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

qui sont d'autant plus importantes que le transit de Q est grand.

-- Une consommation plus grande de l'énergie réactive par les éléments du réseau.

-- Une tarification plus grande de l'énergie électrique.

Le prix payé par le client dépend de la valeur du $\cos \varphi$ moyen de son installation. Selon le tarif différentiel appliqué par les centrales, le client paye l'énergie électrique W, indiquée par

les compteurs, à raison de n centimes par KWh et en plus il paye chaque mois pour sa puissance installée mDA/KVA . De plus lorsque le $\cos \varphi$ du client est supérieur ou inférieur au $\cos \varphi$ normal, le client paye un supplément ou reçoit un rabais sur le prix de base d'un KWh. De cette façon l'équation totale du tarif :

$$M = W \times \frac{n}{100} \left[\frac{k}{100} + 1 \right] + P_{inst} \times m \quad [DA]$$

montre qu'un $\cos \varphi$ petit augmente la facturation de l'énergie.

Pour l'URSS

Si $\cos \varphi > 0,94$	$k = - 6 \%$
$0,8 < \cos \varphi < 0,9$	$+ 1,5 \% < k < + 5,5 \%$
$0,72 < \cos \varphi < 0,8$	$+ 7 \% < k < 19 \%$
$0,5 < \cos \varphi < 0,71$	$22 \% < k < 85 \%$

De cette énumération, il résulte que la compensation de l'énergie réactive est une nécessité.

IV - CHOIX DU MOYEN DE COMPENSATION (5)

Actuellement les moyens de compensation les plus utilisés sont :

- les condensateurs de puissance
- les compensateurs synchrones.

IV. 1 - Compensation par compensateurs synchrones

Elle ne se justifie que lorsque les puissances réactives à injecter sont très importantes ; de l'ordre de 15 MVA au minimum pour la plupart des pays. Le compensateur est placé le plus souvent dans une station importante, afin de fournir la puissance réactive nécessaire au réseau de transport, et aux transformateurs d'alimentation des réseaux de répartition.

IV. 2 - Compensation par condensateurs de puissance.

Ils sont surtout utilisés pour améliorer le facteur de puissance des charges. Ils sont branchés soit aux bornes mêmes des appareils d'utilisation (moteurs, tubes luminescents etc...) soit sur les barres des postes de distribution à moyenne tension.

La seconde disposition des condensateurs est souvent préférable à la première car elle permet la concentration en un même point de batteries plus importantes que les batteries individuelles, donc plus économiques et dont on peut éventuellement faire varier le nombre des éléments branchés en parallèle qui les composent, de façon à satisfaire aux besoins du réglage de l'injection de puissance réactive.

Le condensateur est le seul appareil qui permette l'amélioration économique du facteur de puissance des charges petites et moyennes et qui s'adapte bien à la compensation des réseaux de distribution en assurant la fourniture de puissance réactive tout près de l'endroit où elle est consommée.

IV. 3 - Choix économique

Le moyen de compensation que l'on choisira sera celui qui correspondra au minimum du frais spécifique du KVarh.

Pour cela on tiendra du coût spécifique de la compensation, du coût de l'amortissement, et du coût des pertes. On négligera les frais d'entretien et de renouvellement.

Les frais spécifiques pour 1 KVarh se calculent par

$$F = p I + C$$

c'est à dire

$$F = p \cdot \frac{C_s}{T_a} + C \cdot y + \frac{C_s}{T_a} \text{ pa}$$

avec

C : Coût d'un KWh

Cs : Coût spécifique de la compensation.

p : Coefficient d'efficacité d'Investissement

pa : Coefficient d'Amortissement

Ta : Nombre d'heures d'utilisation du dispositif de compensation.

y : pertes d'énergie Active dans les condensateurs
(KW/Kvar)

Le tableau 2 indique certaines valeurs en cours pour l'URSS.

	Unités	Condensateurs				Compensat. Synchrones		
		3-10KV	0,5KV	0,38KV	0,22 KV	750KVA	15.000 KVA	30.000 KVA
y	KW		0,004	0,004	0,004			
	KVar	0,003	0,0045	0,0045	0,0045	0,027	0,023	0,02
Cs	Roubles	5,0	8,0	9,0	14,5	12,5	9,5	8,5
	KVar							
Pa	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06	0,06	0,06

V - DIFFERENTS MODES ET PUISSANCE DE COMPENSATION

V. 1 - Modes de compensation.

Il existe plusieurs modes de compensation, dont :

- la compensation individuelle
- la compensation par groupe de machines
- la compensation globale ou centrale.

V. 1. 1 - La compensation individuelle, qui fournit à chaque appareil l'énergie réactive qui lui est nécessaire, représente en principe le mode idéal de compensation. Mais elle ne tient pas compte du foisonnement dans la marche des appareils qui dans la plupart des ateliers ne sont pas tous en service en même temps, et absorbent en outre le plus souvent une puissance variable. Elle conduit généralement à une dépense élevée de premier établissement à cause de l'appareillage de commutation, protection et mesure. Aussi la réserve-t-on en principe aux gros récepteurs, en la combinant éventuellement avec la compensation par groupe de moteurs. Elle peut s'appliquer également aux transformateurs de puissance pour la consommation propre de l'énergie réactive, en particulier dans le cas de marches à vide prolongées ou fréquentes. Elle est souvent adoptée pour les postes statiques de soudage à l'Arc ou certains appareils électrothermiques tels que appareils de chauffage par induction.

V. 1. 2 - La compensation par groupes de moteurs ou autres récepteurs (groupés par exemple par atelier) est surtout employée dans les grandes usines où

V. 1. 3 - On a recours à la compensation globale ou centrale notamment dans les petites installations ou lorsque les lignes à basse tension ne sont pas trop chargées. Elle peut être réalisées soit sur la basse tension, soit sur la haute tension.

Lors de la détermination du mode de compensation, il est essentiel de se souvenir que l'effet des condensateurs ne se fait sentir qu'en amont. Il faudra tenir compte aussi de tous les frais qui interviennent dans la réalisation d'une station de compensation. Quand on utilisera des condensateurs par exemple il faudra compter non seulement les batteries, mais aussi les appareils de commande, les appareils de protection, les appareils de contrôle éventuels...

V. 2 - Puissance du dispositif de compensation.

Lors de la détermination de la puissance du dispositif de compensation, le cas le plus fréquent qui se pose est celui d'une charge non constante. En général, il suffit alors, sous certaines réserves de bons sens de recouvrir à un facteur de puissance moyen.

Généralement on connaît la consommation d'énergie active W_a , ainsi que celle de l'énergie réactive E_a . Les statistiques donnent pour chaque usine le nombre d'heures de travail par an (celui-ci est de 4000h/an pour 1 seule équipe, 6000h/an pour 2 équipes 8000h/an pour 3 équipes). On en déduit :

- La puissance moyenne annuelle $P_a = \frac{W_a}{T}$
- $\text{tg} \varphi_1 = \frac{E_a}{W_a}$ qui est une valeur moyenne
- la puissance du dispositif de compensation

$$Q_c = P_a (\text{tg} \varphi_1 - \text{tg} \varphi_2)$$

où $\text{tg} \varphi_2$ exprime le déphasage après compensation.

Il existe des règles économiques pour le choix de $\text{tg} \varphi_2$

La puissance installée d'un condensateur doit être telle qu'aux heures de fortes pointes, on ait les valeurs de $\text{tg} \varphi_2$ immédiatement à l'amont des transformateurs HT/MT.

-- 0,2 pour tous les réseaux MT aériens et pour les réseaux MT souterrains alimentés par des réseaux HT aériens.

-- 0,4 pour les réseaux MT souterrains alimentés par des réseaux HT souterrains ou directement par des réseaux T. H. T aériens auxquels sont raccordées des centrales proches (20-30 km au maximum).

-- 0,6 pour les réseaux MT souterrains alimentés directement par des réseaux T. H. T souterrains auxquels sont raccordées des centrales proches.

VI - REPARTITION OPTIMALE DES CONDENSATEURS DE PUISSANCE.

VI. 1 - Répartition optimale des condensateurs dans les réseaux avec transformateurs (5).

VI. 1. 1 - Détermination de la puissance optimale des condensateurs B. T.

La répartition de la puissance des condensateurs entre les différents niveaux de tension est déterminée à partir des calculs technico-économiques.

En plaçant les condensateurs du côté B. T. on diminuera sensiblement les pertes d'énergie dans tout le réseau situé en amont du point de branchement des condensateurs BT. Par contre l'installation de batteries BT revient plus cher que l'installation des batteries MT de même puissance.

Il revient donc à dire qu'en passant du côté MT au côté BT, on perdra en coût d'investissement, mais on gagnera en coût de charges annuelles. Ceci est dû surtout à la diminution des pertes d'énergie.

Le coût d'investissement supplémentaire pour l'installation de la batterie basse tension peut être calculé par la relation :

$$\Delta I = K_d Q_{cBT}$$

où k_d représente la différence de prix entre 1 KVar produit par des condensateurs BT et 1 KVar produit par des condensateurs MT.

Q_{cBT} : Puissance installée des condensateurs en basse tension.

Le coût des pertes d'énergie dues à la puissance réactive qui parcourt le réseau après l'installation des condensateurs BT est donné par la formule.

$$C_p = \frac{(Q - Q_{cBT})^2 (R_t + R_r)}{1000 U^2} C \cdot T_a + 0,001 Q_{cBT} \cdot C \cdot T_a + p_a \cdot k_d \cdot Q_{cBT}$$

avec

Q : charge réactive totale côté BT [KVar]

R_t : Résistance équivalente des transformateurs MT/BT

R_r : Résistance équivalente du réseau BT.

C : Prix d'un KWh d'énergie perdue

0,001 : Différence des pertes spécifiques d'énergie active entre condensateurs BT et condensateurs MT

[KW / KVar]

p_a : Taux d'amortissement.

Remarques : Le coût des pertes d'énergie qui s'identifie ici aux charges annuelles, ne tient pas compte des charges de renouvellement et d'entretien que l'on considère négligeables.

Les frais généralisés dus à l'investissement supplémentaire pour l'installation des batteries BT se calculent par la formule

$$Z = p\Delta I + C_p$$

Ces frais seront optimums quand

$$\frac{dZ}{dQ_{cBT}} = p \cdot \frac{d(\Delta I)}{dQ_{cBT}} + \frac{dC_p}{dQ_{cBT}} = 0$$

La répartition optimale des condensateurs selon le niveau de la tension est obtenue pour les hypothèses émises lorsque

$$- \frac{d(\Delta I)}{dQ_{cBT}} \times \frac{dQ_{cBT}}{dC_p} = \frac{1}{F} = T_{ret}$$

$$\text{c'est à dire } - \frac{d(\Delta I)}{dC_p} = 8$$

Les calculs donnent alors :

$$\frac{d(\Delta I)}{dQ_{cBT}} = K_d$$

$$\frac{dC_p}{dQ_{cBT}} = - \frac{2(Q - Q_{cBT}) (R_t + R_r) C \cdot T_a + U^2 C \cdot T_a + 100U^2 k_d}{1000 U^2}$$

./.

./.

ou encore

$$-\frac{d(\Delta I)}{d C_p} = \frac{-1000 \text{ kd } U^2}{2(Q_{cBT} - Q)(R_t + R_r)C.Ta + U^2 C.Ta + 100U^2 \text{ kd}} = 8$$

c'est à dire

$$(Q_{cBT} - Q)(R_t + R_r) = -U^2 \left(\frac{112,5 \text{ kd}}{C.Ta} + 0,5 \right) = -M$$

La puissance optimale côté BT est alors donnée par

$$Q_{cBT} = Q - \frac{M}{R_t + R_r}$$

Cette relation pourra être approximée par la relation

$$Q_{BT} = Q - \frac{M}{R_t (1 + \lambda)}$$

$$\text{où } \lambda = \frac{R_r}{R_t}$$

des études statistiques ont fourni les valeurs suivantes pour

Instal. intérieures		Installat. extérieures
Cond. ou câbles souples	Cond. Ri-gides	$\lambda = 0,8$
$\lambda = 0,4$	$\lambda = 0,6$	

VI. 1. 2 - Détermination de la puissance optimale côté H. T
Une fois la puissance optimale côté BT déterminée, la
puissance optimale HT est donnée par la formule

$$Q_{HT} = Q_c - Q_{BT}$$

où Q_c représente la puissance totale du dispositif de
compensation.

VI. 2 - Méthode générale de répartition optimale de la puissance
réactive de compensation dans les réseaux.

VI. 2. 1 - Principe

Dans un réseau où circulent les puissances actives et
réactives P et Q, les pertes d'énergie active sont
exprimées par la relation :

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_p + \Delta P_q$$

où ΔP_p exprime l'énergie perdue, due au transit de P
et ΔP_q exprime la perte d'énergie, due au transit de Q.

Pour le régime de pointe, le terme ΔP_p est constant.
Par contre le terme ΔP_q est un terme sur lequel on peut
agir en compensant en partie l'énergie réactive appelée
par les consommateurs.

Le problème de la répartition optimale des condensateurs reviendra donc à celui de la minimisation des pertes d'énergie active dues au transit de l'énergie réactive.

VI-2.2 - Bases mathématiques de la méthode

Soit une fonction $U = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ (6-1)

ou $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ sont reliés par les équations

$$\begin{aligned}\varphi_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ \varphi_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ \varphi_m(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0\end{aligned}\quad (6-2)$$

La dérivée de U par rapport à x , doit s'annuler pour les valeurs de x_1 où la fonction U est susceptible d'admettre un maximum ou un minimum.

calculons $\frac{dU}{dx_1}$ à partir de (1), sachant que x_2, x_3, \dots, x_n sont fonction de x_1 . ; on obtient

$$\frac{dU}{dx_1} = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} + \frac{\partial f}{\partial x_3} \frac{dx_3}{dx_1} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \frac{dx_n}{dx_1} \quad (6-3)$$

aux points extrémums on aura

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} + \frac{\partial f}{\partial x_3} \frac{dx_3}{dx_1} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dx_1} = 0 \quad (6-4)$$

des équations (6-2) on tire

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} + \dots + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dx_1} = 0$$

$$\frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} + \dots + \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dx_1} = 0$$

(6-5)

En multipliant les termes des égalités (6-5) par des coefficients $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ et en les ajoutant aux termes correspondants de (6-4) on trouve

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dx_1} + \lambda_1 \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} + \dots + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dx_1} \right) \\ & + \dots + \lambda_m \left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} + \dots + \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dx_1} \right) = 0 \end{aligned}$$

ou encore

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} + \lambda_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_1} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_2} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_2} \right) \frac{dx_2}{dx_1} + \\ & \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} \right) \frac{dx_n}{dx_1} = 0 \end{aligned}$$

ce qui correspond à

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_2} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_2} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_2} = 0 \quad (6-6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_n} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} = 0$$

Il s'agit donc de déterminer à partir des $m + n$ équations, les valeurs de x_1, x_2, \dots, x_n et les coefficients $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$.

Les conditions (6-6) sont des conditions nécessaires pour l'existence d'un extrémum lié, mais non suffisantes. Il s'agira dans chaque cas de prouver par des considérations particulières qu'à ces valeurs correspond un extrémum :

Dans la suite de cet exposé il suffira pour trouver l'extrémum, de former la fonction $F(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \lambda_1 \varphi_1 + \dots + \lambda_m \varphi_m(x_1, x_2, \dots, x_n)$, de calculer $\frac{\partial F}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_n}$

et de les évaluer à zéro.

VI. 2. 3 - Répartition optimale des condensateurs de compensation dans les réseaux radiaux.

Considérons un réseau radial simple à n départs.

On notera $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ les puissances réactives appelées sur chaque départ avant compensation, et $Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn}$ les puissances réactives de compensation installées à la fin de chaque départ de résistance $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$.

Après compensation les pertes d'énergie active dues au transit de l'énergie réactive sont sur chaque départ :

$$\Delta P_1 = \frac{1}{U^2} (Q_1 - Q_{k1})^2 R_1 = a(Q_1 - Q_{k1})^2 R_1$$

$$\Delta P_2 = a(Q_2 - Q_{k2})^2 R_2$$

$$\Delta P_n = a(Q_n - Q_{kn})^2 R_n$$

Les pertes totales pour le réseau radial $\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i$
 c'est à dire $\Delta P : a \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{ki})^2 R_i$ sont une fonction
 $f(Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn})$

On dispose également de :

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

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

Formons la fonction pertes

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

En calculant les dérivées partielles de F et en annulant on trouve :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{k1}} = \frac{\partial f}{\partial Q_{k1}} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial Q_{k1}} = -2(Q_1 - Q_{k1}) a R_1 + \lambda = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{k2}} = \frac{\partial f}{\partial Q_{k2}} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial Q_{k2}} = -2(Q_2 - Q_{k2}) a R_2 + \lambda = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{kn}} = \frac{\partial f}{\partial Q_{kn}} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial Q_{kn}} = -2(Q_n - Q_{kn}) a R_n + \lambda = 0$$

En additionnant membre à membre les dernière équations on aboutit à

$$2a(Q - Q_k) = \lambda \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) = \lambda \frac{1}{R_e}$$

où R_e représente la résistance équivalente du réseau

d'où $\lambda = 2a (Q - Q_k) R_e$

$$\text{et } Q_{kn} = Q_n - \frac{\lambda}{2a R_n} = Q_n - (Q - Q_k) \frac{R_e}{R_n} \quad (6-7)$$

La valeur optimale de la puissance du dispositif de compensation à la fin de la ligne n correspondant à un minimum de pertes est donc

$$Q_{kn}^{\text{opt}} = Q_n - (Q - Q_k) \frac{R_e}{R_n}$$

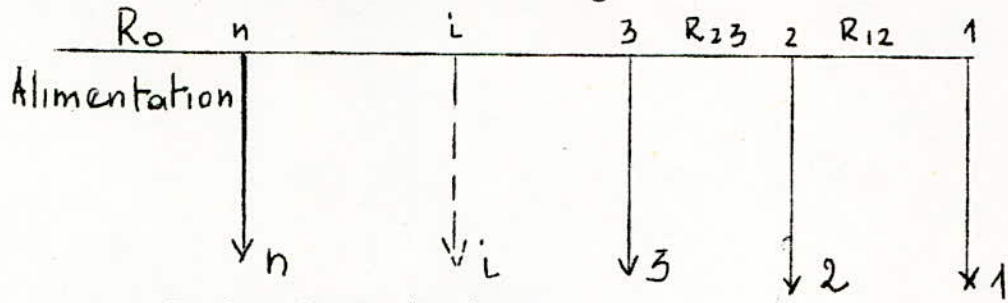
Cette valeur correspond d'ailleurs à celle qui se trouve dans l'annexe et qui est obtenue par une autre démonstration (voir annexe I).

VI. 2. 4 - Répartition optimale des condensateurs de compensation dans les réseaux magistraux.

Considérons un réseau magistral à n départs de résistance R_1, R_2, \dots, R_n . Les tronçons de ligne compris entre les différents départs ont des résistances $R_0, R_{12}, R_{23}, \dots, R_{(n-1)n}$. Les puissances appelées par les consommateurs sont notées Q_1, Q_2, \dots, Q_n ; Celles qui circulent dans les tronçons de ligne séparant les différents départs sont notées $Q_{01}, Q_{12}, \dots, Q_{(n-1)n}$. Les puissances de compensation sont notées de la même façon avec l'indice K en plus.

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

Considérons le réseau magistral ci-dessous



De la relation (6-7) on tire

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

Au point 2 on aura

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

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

Au point 3 on aura

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

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

Au point n on aura

$$(Q_{(n-1)n} - Q_{k(n-1)n}) (R_{e(n-2)} + R_{(n-1)n}) = (Q_n - Q_{kn})R_n \\ = (Q - Q_k) R_{e(n-1)}$$

avec

$$R_{e(n-1)} = \frac{R_n (R_{e(n-2)} + R_{(n-1)n})}{R_n + R_{(n-1)n} + R_{e(n-2)}}$$

La distribution se fera alors de la façon suivante

$$Q_{kn} = Q_n - (Q - Q_k) \frac{R_{e(n-1)}}{R_n}$$

$$Q_{kn-1} = Q_{n-1} - (Q_{(n-1)n} - Q_{k(n-1)n}) \frac{R_{e(n-2)}}{R_{(n-1)}}$$

$$Q_{k2} = Q_2 - (Q_{23} - Q_{k23}) \frac{R_{e1}}{R_2}$$

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

VI. 2. 5 - Répartition optimale de la puissance de compensation dans les réseaux complexes.

Considérons un réseau radial avec n départs magistraux composés chacun de n dérivations.

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 $Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn}$ représentent les puissances de compensation sur les départs magistraux 1, 2, ..., n et $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ les pertes sur les magistraux 1, 2, ..., n.

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

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= a(Q_1 - Q_{k1})^2 [\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13} + \dots + \alpha_{1(2n-1)}] \\ \Delta P_2 &= a(Q_2 - Q_{k2})^2 [\alpha_{21} + \alpha_{22} + \alpha_{23} + \dots + \alpha_{2(2n-1)}] \\ \Delta P_n &= a(Q_n - Q_{kn})^2 [\alpha_{n1} + \alpha_{n2} + \alpha_{n3} + \dots + \alpha_{n(2n-1)}] \end{aligned}$$

On dispose en plus des relations

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q \text{ qui est connu}$$

$$\varphi(Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn}) = Q_{k1} + Q_{k2} + \dots + Q_{kn} - Q_k = 0$$

où Q_k est déterminée par la relation

$$Q_k = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

Il s'agit Alors de déterminer les valeurs de Q_{k1}, Q_{k2}, \dots

\dots, Q_{kn} susceptibles de donner des minimums liés de

la fonction

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

Pour cela formons la fonction perte

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

c'est à dire

$$F = a(Q_1 - Q_{k1})^2 [\alpha_{11} + \dots + \alpha_{1(2n-1)}] + \dots + \\ a(Q_n - Q_{kn})^2 [\alpha_{n1} + \dots + \alpha_{n(2n-1)}] + \lambda(Q_{k1} + \\ Q_{k2} + \dots + Q_{kn} - Q_k) = 0$$

En formant les dérivées partielles de la fonction pertes

F on obtient :

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

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{k2}} = \frac{\partial f}{\partial Q_{k2}} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial Q_{k2}} = -2a(Q_2 - Q_{k2}) [\alpha_{21} + \alpha_{22} + \dots + \alpha_{2(2n-1)}] \\ + \lambda = 0$$

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

./.

en additionnant les n dernières équations on obtient

$$a (Q - Q_k) = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{1}{\alpha_{11} + \dots + \alpha_{1(2n-1)}} + \frac{1}{\alpha_{21} + \dots + \alpha_{2(2n-1)}} + \dots + \frac{1}{\alpha_{n1} + \dots + \alpha_{n(2n-1)}} \right]$$

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

ce qui donne

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

et

$$Q_k^n = Q_n - \frac{\lambda}{2a (\alpha_{n1} + \alpha_{n2} + \dots + \alpha_{n(2n-1)})} = Q_n - (Q - Q_k) \frac{A}{An}$$

La puissance optimale de compensation sur le départ n sera donc

$$Q_k^{opt} = Q_n - (Q - Q_k) \frac{A}{An}$$

Remarques

1° - Les termes α_{ij} ont la dimension d'une résistance.

2° - 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 on peut écrire :

$$a A_i (Q_i - Q_k)^2 = a \sum (Q_{ii} - Q_{kii})^2 R_{ii} + a \sum (Q_{(i-1)i(i)} - Q_{k(i-1)i(i)})^2 \times R_{(i-1)i(i)}$$

avec comme ^{1er} indice le numéro du départ magistral et comme

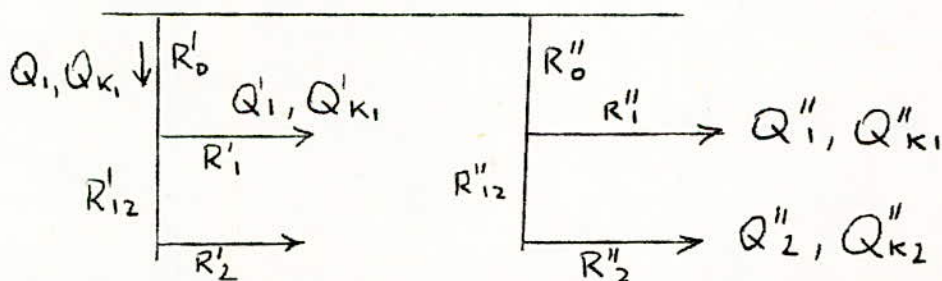
2è indice le numéro de la dérivation sur le magistral.

3° - Lorsque le réseau radial sera composé de départs magistraux et de départs simples le terme A_i se réduira à la résistance R_i du départ simple.

4° - La méthode a l'avantage d'être générale.

Afin d'expliciter les coefficients α'_{ij} , et de vérifier que les valeurs trouvées pour les puissances de compensation, correspondent à un minimum des pertes, nous proposons un exemple de calcul sur un réseau radial composé de 2 départs magistraux de deux dérivation chacun.

Afin d'alléger les notations nous noterons (') tout ce qui concerne le premier départ et (") ce qui concerne le 2ème départ.



D'après la répartition sur les réseaux magistraux on peut écrire

$$(Q'_2 - Q'_{k2}) (R'_2 + R'_{12}) = (Q''_1 - Q'_{k1}) R'_1 = (Q_1 - Q_{k1}) R'_e$$

on aura

$$(Q'_2 - Q'_{k2}) = (Q_1 - Q_{k1}) \frac{R'_e}{R'_2 + R'_{12}}$$

$$(Q''_1 - Q'_{k1}) = (Q_1 - Q_{k1}) \frac{R'_e}{R'_1}$$

on tire

$$\Delta P' = a(\Omega_1 - \Omega_{k1})^2 \left[\frac{R'_{10} + \frac{R'_{1e^2}}{R'_{12} + R'_{12}}}{R'_{12} + R'_{12}} \right] = a(\Omega_1 - \Omega_{k1})^2 A_1$$

De la même façon on peut écrire

$$\Delta P'' = a(\Omega_2 - \Omega_{k2})^2 \left[\frac{R''_{10} + \frac{R''_{1e^2}}{R''_{12} + R''_{12}}}{R''_{12} + R''_{12}} \right] = a(\Omega_2 - \Omega_{k2})^2 A_2$$

Les pertes totales sont

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P'' = a \left[(\Omega_1 - \Omega_{k1})^2 A_1 + (\Omega_2 - \Omega_{k2})^2 A_2 \right]$$

On dispose des relations

$$\Omega_1 + \Omega_2 = \Omega$$

$$\Omega_{k1} + \Omega_{k2} = \Omega_k$$

En remplaçant Ω_{k2} par $\Omega_k - \Omega_{k1}$ on obtient

$$\Delta P = a \left[(\Omega_1 - \Omega_{k1})^2 A_1 + (\Omega_2 - \Omega_k + \Omega_{k1})^2 A_2 \right]$$

Les pertes seront minimum si

$$\frac{d(\Delta P)}{d\Omega_{k1}} = a \left[-2(\Omega_1 - \Omega_{k1})A_1 + 2(\Omega_2 - \Omega_k + \Omega_{k1})A_2 \right] = 0$$

$$\text{ou encore } \frac{\Omega_1 - \Omega_{k1}}{\frac{1}{A_1}} = \frac{\Omega_2 - \Omega_k + \Omega_{k1}}{\frac{1}{A_2}} = \frac{\Omega - \Omega_k}{\frac{1}{A}}$$

d'où on tire

$$\Omega_{k1} = \Omega_1 - (\Omega - \Omega_k) \frac{A}{A_1}$$

$$\Omega_{k2} = \Omega_2 - (\Omega - \Omega_k) \frac{A}{A_2}$$

qui sont des valeurs qui correspondent bien aux valeurs données par la formule générale.

VI. 3 - Estimation des pertes dans le cas où la puissance de compensation diffère de la puissance de compensation optimale.

VI. 3. 1 - Estimation 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 engendrées restent faibles.

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

$$\Delta P' = a \sum (Q_i - Q'_{ki})^2 R_i$$

avec avec $Q'_{ki} = b Q_i$ et $b = \frac{Q_k}{Q}$

Les pertes supplémentaires engendrées par cette distribution sont :

$$\Delta P' - \Delta P = a \left[\sum (Q_i - Q'_{ki})^2 R_i - \sum (Q_i - Q_{ki})^2 R_i \right]$$

$$\Delta P' - \Delta P = a \left[1 - \frac{Q_k}{Q} \right] \left(\sum Q_i^2 R_i - Q^2 R_e \right)$$

Elles sont d'autant plus grandes que le rapport $\frac{Q_k}{Q}$ est élevé

L'augmentation relative de ces pertes

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

./.

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.

VI. 3. 2 - Valeurs normélisées des condensateurs (6)

VI. 3. 2. 1 - Condensateurs B. T.

Batteries triphasées 380 V : 12, 5Kvar/unité

Batteries triphasées 380 V : 20Kvar/Unité

" " 380 V : 30Kvar /Unité

VI. 3. 3. 3 - Condensateurs M. T. ()

Unités de condensateurs normalisées U. T. E.				
Type	A	B	C	D
Un (KV)	2	2, 9	5, 8	8, 9
Q (KVar)	13, 8	20	20	20
C (F)	11	7, 58	1, 9	0, 84
Tension d'isolement	12	12	12	17, 5

Ces unités sont monophasées.

Il existe d'autres batteries triphasées normalisées VDE (7)

Tension max. KV	Unité de puiss. KVar	Types
12	100	cond. au clophène
12	50	cond. à l'huile
10	100	cond. sous pression
10	50	cond. métal - papier
3	300	cond. au styroflex

VII - REGLAGE DE L'INJECTION DE PUISSANCE REACTIVE (8)

VII - 1 - Méthode actuelle

La méthode employée actuellement consiste à introduire ou à enlever selon le besoin des unités placées en parallèle. Cependant la commutation des batteries de condensateurs crée de nombreux phénomènes transitoires qui peuvent avoir des conséquences néfastes dans certains cas, si des dispositions convenables n'ont pas été adoptées.

VII. 1. 1 - Cas de la mise en service d'une batterie unique.

A l'instant où les contacts de l'interrupteur se rapprochent, un arc s'établit et une onde de courant à la fréquence propre du circuit se forme. La valeur maximale du courant I_M est donnée par la formule.

$$I_M = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \sqrt{\frac{C_1}{L_0}}$$

avec E : valeur efficace de la tension entrephases

C_1 : capacité d'une phase de la batterie

L_0 : inductance par phase de la source.

L'inductance de la source, L_0 , a généralement une valeur suffisante pour limiter les surintensités lors de la mise en service. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, il faut ajouter une inductance supplémentaire dans le circuit.

VII. 1. 2 - Mise hors service

Lorsque les contacts de l'interrupteurs se séparent, un arc se forme et doit s'éteindre au premier passage à zéro du courant, c'est à dire par suite du déphasage lorsque la tension atteint sa valeur crête. Si la rigidité diélectrique entre les contacts est insuffisante, l'arc s'amorce de nouveau, une onde de courant se superpose au courant normal et la tension peut doubler. Si ce phénomène se répète à plusieurs reprises, des surtensions très dangereuses se forment et se propagent le long des lignes.

Pour éviter les surtensions de ce type à la mise en ou hors service, on utilise des interrupteurs à régénération diélectrique très rapide dont le contact mobile se déplace à une vitesse élevée.

VII. 1. 3 - Cas de plusieurs batteries en parallèle.

Nous supposons que n batteries identiques sont déjà alimentées et que l'on met en service une batterie supplémentaire. Il se produit alors entre les batteries chargées et la nouvelle batterie non chargée une onde de courant dont la valeur maximale est donnée par

$$I_M = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \frac{n}{n+1} \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}$$

L_1 est l'inductance par phase reliant chaque batterie à la source commune. Si les batteries sont rapprochées, cette inductance est très faible;

en M. T. on peut prendre

$$L_1 = 0,65 \mu\text{H/m} \text{ pour un câble}$$

$$L_1 = 1,3 \mu\text{H/m} \text{ pour un jeu de barres}$$

La surintensité atteindrait alors plusieurs dizaines de KA. Il est indispensable lorsqu'on utilise des batteries fractionnées d'insérer des réactances dans les liaisons. On prend habituellement des valeurs de 50 à 200 μH .

VII; 1.4 - Résistance de décharge

On prévoit lors de la déconnection de la batterie de condensateurs une résistance de décharge afin d'assurer la sécurité du personnel et d'éviter les phénomènes transmis lors d'une mise en service après une courte interruption de fonctionnement.

On admet que lorsqu'il s'est écoulé environ cinq constantes de temps, la batterie est pratiquement déchargée.

Si on désire que celle-ci soit déchargée au bout d'une minute il faudra choisir une constante de temps de 12 secondes. Le dimensionnement se fera alors de la façon suivante :

$$= RC \approx 12'' \text{ ou } R = \frac{12}{C}$$

$$\text{or } Q = C\omega(\sqrt{2} U)^2 \cdot 10^{+3}$$

c'est-à-dire

$$C = \frac{Q \cdot 10^{-3}}{2 \times 314 U^2}$$

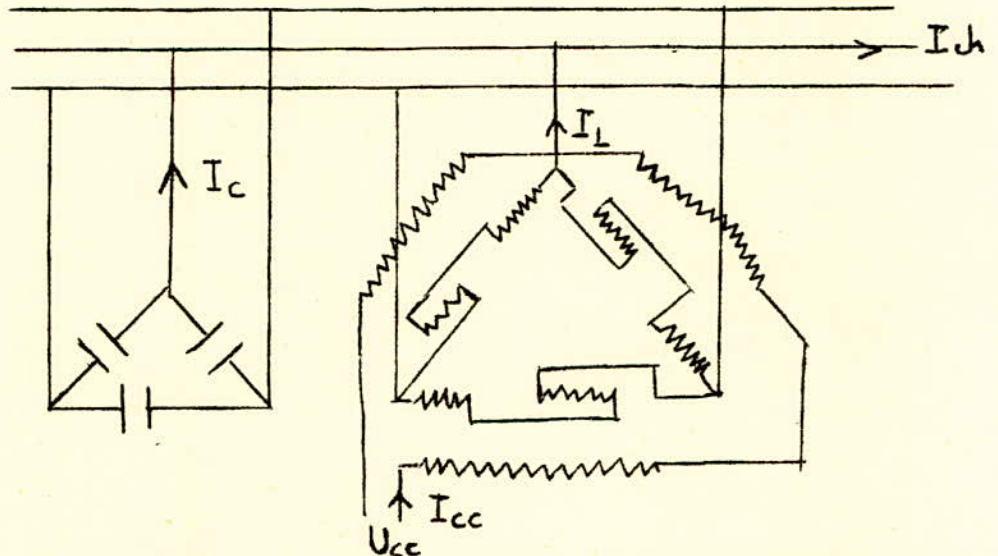
$$\text{d'où } R = \frac{2 \times 314 \cdot 12 \cdot 10^3 U^2}{Q} = \# 10^7 \frac{U^2 \text{ (kV)}}{Q \text{ (kVar)}}$$

./.

VII. 2 - Installation statique réglable de puissance réactive

Nous présentons ci-dessous une source statique réactive avec réglage continu, qui peut être employée pour la régulation de la charge réactive.

Par rapport aux batteries de condensateurs réglables par bonds, la source présentée a l'avantage d'éviter les surintensité transitoire, et de permettre un réglage de manière continue.



La source statique est composée d'une batterie de condensateurs fixe et d'une réactance triphasée réglable.

La puissance de la batterie de condensateurs est choisie de la charge et la consommation à vide en énergie réactive de la réactance.

Lorsque le courant réactif de la charge est maximum, le point de fonctionnement de la réactance se trouve sur la partie linéaire de la caractéristique de magnétisation ($I_{cc} = 0$) et $I_L \simeq 0$.

Au fur et à mesure que le courant de charge diminue, on augmente I_L en augmentant I_{cc} .

A cause du branchement antiparallèle, le contenu des harmoniques est diminué.

Prix du Kwh à Conf = 0,945 = Prix de Base - 5%

Prix de Base du Kwh = 0,1 rouble

Prix du Kvar "0,4Kv" = 9 roubles

Prix du Kvar "6Kv" = 5 roubles

Prix du Kwh d'énergie Perdue = 0,013 rouble.

les Bénéfices Réalisés sont Alors :

$$B = \frac{0,1 \cdot 42 \cdot 925}{100} \cdot 7500 + (9,1 - 1) \cdot 7500 \cdot 0,013$$
$$- (0,12 + 0,1)(120 \cdot 5 + 620 \cdot 9) - (0,003 \cdot 120 \cdot 0,013 \cdot 7500 + 0,004 \cdot 620 \cdot 0,013 \cdot 7500)$$
$$B = 290.000 + 720 - 1350 - 250 = 287.110 \text{ Roubles}$$

Il Apparaît à travers Ce Calcul que la Compensation est Nécessaire, les Bénéfices Réalisés étant très importants.

D'autre part la Compensation Décharge les lignes de Transport et les Transformateurs, et permet ainsi l'installation éventuelle d'autres Utilisateurs.

Chapitre VIII

Application Pratique.

Le but de ce chapitre est de répartir de façon optimale la puissance réactive de compensation pour un groupe de consommateurs.

Les consommateurs proposés sont:

I/ Une usine sidérurgique composée de 4 ateliers de Fusion B.F dont les caractéristiques sont pour:

- 1^{er} Four de Fusion B.F

Matière à fondre : Alliage de Cu à moins de 80% de Cu.
Capacité horaire : 1200 kg/h.
Puiss. de Pointe : 270 kW
Cos ϕ : 0,7
Sp : 400 kVA
Surface de l'Atelier : 1200 m² (40 x 30 m)

- 2^{ème} et 3^{ème} Four de Fusion B.F.

Matière à fondre : Cu et Alliages de Cu (à plus de 80% de Cu)
Capacité horaire : 1000 kg/h et par four.
Puissance de Pointe : 300 kW
Cos ϕ : 0,65
Sp : 460 kVA
Surface de ch. Atelier : 1500 m² (50 x 30 m)

- 4^{ème} Four de Fusion B.F

Matière à fondre : Fonte Grise.
Capacité horaire : 330 kg/h
Puissance de pointe : 185 kW
Cos ϕ : 0,74
Sp : 250 kVA
Surface de l'Atelier : 1200 m² (40 x 30 m)

II/ Une Usine de cyclomoteurs composée de 4 Ateliers dont les caractéristiques sont pour:

- 1° Atelier pour l'usinage des métaux
Densité superficielle : 250 VA/m^2
Surface : 1500 m^2 (50×30)
Sp : 375 KVA
 $\cos \varphi$: $0,65$

- 2° Atelier de soudure électrique divisé en 2 sous ateliers alimentés séparément.

- Sous Atelier A
Densité superficielle : 400 VA/m^2
Surface : 500 m^2 (25×20)
Sp : 200 KVA
 $\cos \varphi$: $0,6$

- Sous Atelier B
Densité superficielle : 400 VA/m^2
Surface : 1000 m^2 (25×40)
Sp : 400 KVA
 $\cos \varphi$: $0,6$

- 3° Atelier de montage.
Densité superficielle : 300 VA/m^2
Surface : 2400 m^2 (40×60)
Sp : 720 KVA
 $\cos \varphi$: $0,7$

III / Une usine textile composée de 5 ateliers identiques dont la puissance installée est 1800 KW

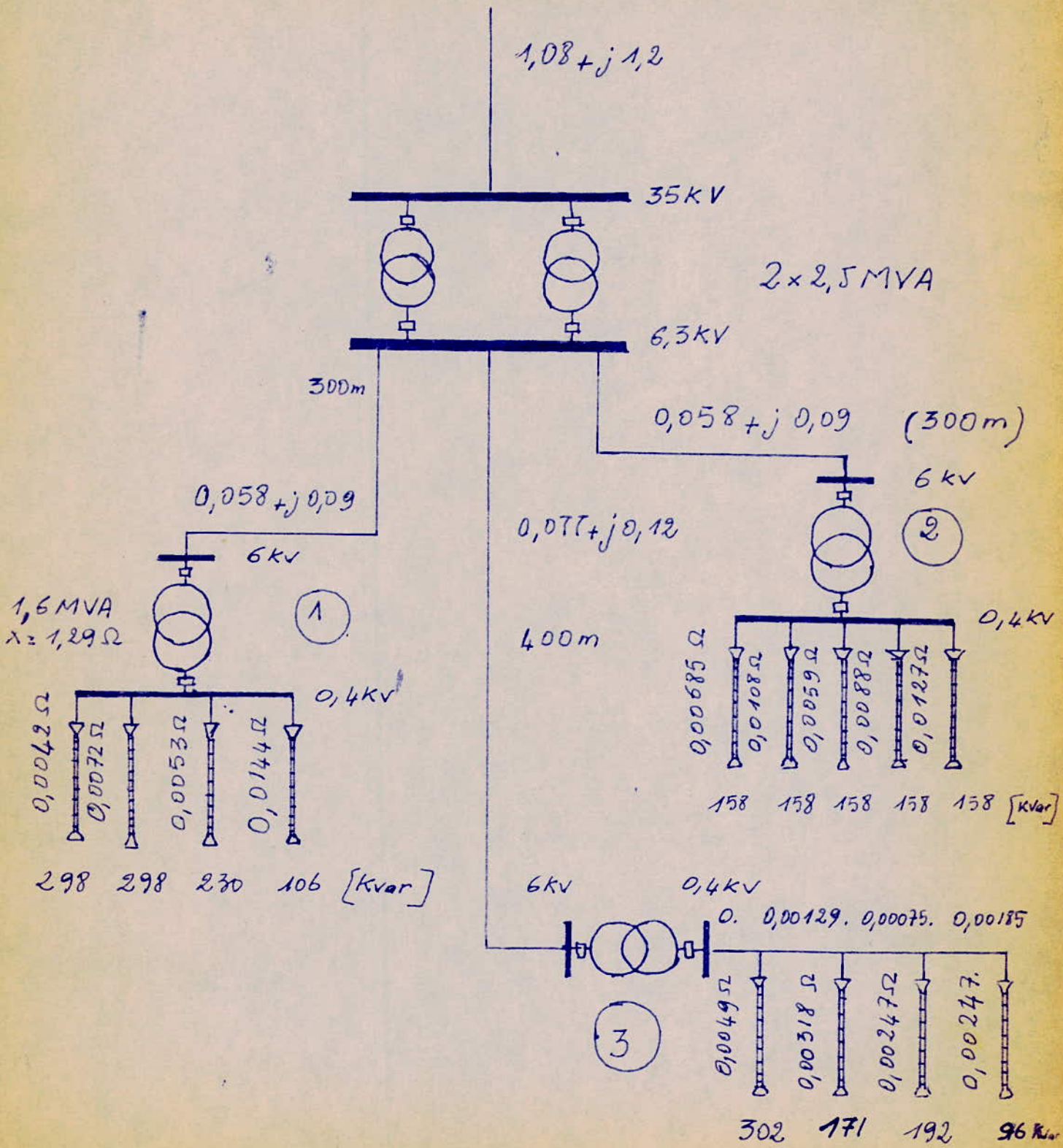
Facteur de Demande $K_D = 0,5$
 $\cos \varphi = 0,65$
Puissance de Pointe ($K_D P_i$) = 900 KW

Les Usines sont situées dans une zone distante de 3 km environ d'une ligne 35 KV .

Un calcul technico économique nous a permis d'aboutir à la solution que nous donnons dans le schéma I.

Dans ce schéma seules figurent les valeurs qui sont utilisées lors de la répartition de la puissance réactive.

SCHEMA I : caractéristiques des Consommateurs



Détermination du $\cos\phi_2$ au Niveau 6KV.

Les normes imposent $\cos\phi_2 = 0,93$ pour les réseaux à 35KV. Au Niveau du jeu de barres 35KV les transformateurs la puissance active transmise est

$$P = 3260 \text{ KW}$$

Il en résulte que la puissance réactive doit être ramené à

$$Q = P \tan\phi_2 = 3260 \times 0,39 = 1270 \text{ Kvar.}$$

Les puissances actives et Réactive consommées par les transf. sont tous calculs faits.

$$\Delta P = 32 \text{ KW}$$

$$\Delta Q = 216 \text{ Kvar}$$

D'où sur le jeu de Barres 6,3KV les puissances seront:

$$P = 3260 - 32 = 3228 \text{ KW}$$

$$Q = 1270 - 216 = 1054 \text{ Kvar}$$

et $\tan\phi_2 = \frac{1054}{3228} = 0,327$ qui correspond à

$$\cos\phi_2 = 0,95.$$

C'est à partir de la valeur du déphasage correspondant à $\cos\phi_2 = 0,95$ que l'on va déterminer la puissance de compensation pour chaque usine, pour ensuite la répartir selon la théorie précédemment établie dans les différents Ateliers.

Puissance et répartition des dispositifs de compensation.

I/ Moins Inductif.

Au niveau du jeu de barres 6 kV des Transformateurs alimentant l'usine les puissances affichées sont:

$$P = 1055 + 30 = 1085 \text{ kW}$$

$$Q = 1100 + 150 = 1250 \text{ kVar}$$

$$\text{Ce qui correspond à } \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{1250}{1085} = 1,152$$

Pour passer les puissances de pointe aux puissances moyennes annuelles, la documentation technique indique qu'il faut multiplier les puissances de pointe par le coefficient: 0,85

La documentation technique indique également:

$$T_a = 7500 \text{ heures}$$

$$c = 0,013 \text{ Rouble / kWh perdu.}$$

les Puissances Moyennes Annuelles sont alors:

$$P_{ma} = 0,85 P = 925 \text{ kW}$$

$$Q_{ma} = 1060 \text{ kVar.}$$

Le fait que la distance séparant les transformateurs principaux et le transformateur (1) est très faible, on peut considérer que le $\cos \varphi_2$ reste le même au niveau 6 kV, soit

$$\cos \varphi_2 = 0,95 \text{ ou } \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,327.$$

La Puissance du dispositif de compensation sera déterminée par la relation

$$Q_c = P_{ma} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

soit

$$Q_c = 925 (1,152 - 0,327) = 760 \text{ kVar}$$

La Résistance équivalente du transformateur (1) côté B.T est déterminée par.

$$R_T = 10^3 \frac{P_{cc} (KW) \cdot U_n^2 (KV)}{S_n^2 (KVA)}$$

$$R_T = 10^3 \frac{16 \cdot 0,4^2}{16^2 \cdot 10^4} = 0,001 \Omega$$

La Résistance équivalente du réseau R_r est une résistance équivalente du point de vue pertes. Dans le cas d'une répartition qui minimise les pertes d'énergie du côté B.T, cette résistance est calculée de la manière suivante.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{1}{U^2} (Q - Q_k)^2 R_r = \frac{1}{U^2} (Q - Q_k)^2 \left(\frac{R_e^2}{R_1} + \frac{R_e^2}{R_2} + \frac{R_e^2}{R_3} + \frac{R_e^2}{R_4} \right) \\ &= \frac{1}{U^2} (Q - Q_k)^2 R_e \end{aligned}$$

D'où

$$R_r = R_e = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{R_i}}$$

Pour l'usine sidérurgique on aura.

$$R_r = \frac{1}{\frac{1}{0,0042} + \frac{1}{0,0072} + \frac{1}{0,0053} + \frac{1}{0,0144}} = 1,55 \times 10^{-3} \Omega$$

calcul de M.

$$M = U^2 \left(\frac{112,5 \cdot K_d}{c \cdot T_a} + 0,5 \right) = 0,4^2 \left(\frac{112,5 \cdot 4}{0,013 \cdot 7500} + 0,5 \right)$$

$$M = 0,815 \Omega \cdot KVar.$$

Puissance de compensation B.T

$$Q_{BT} = Q_{ma} - \frac{M}{R_T + R_r} = 930 - 320 = 610 KVar$$

Puissance de compensation côté H.T

$$Q_{HT} = Q_c - Q_{BT} = 760 - 610 = 150 KVar.$$

on installera une batterie composée de 6 unités monophasées de 20 kVar, montées en étoile : soit 120 kVar.

Les condensateurs utilisés sont normalisés UTE. Leurs caractéristiques sont.

type C
 $U_n = 5,8 \text{ kV}$
 $Q = 20 \text{ kVar}$
 $C = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
 $U_{\text{testim d'isol}} = 12 \text{ kV}$

Répartition de la Puissance de Compensation B.T.

Pour distribuer les condensateurs en fin de ligne, il faut que la condition suivante soit respectée.

$$Q_i R_i > M - (Q - Q_{BT}) R_T$$

Départs	1	2	3	4	Résultats.
$M - (Q - Q_{BT}) R_T$ Ω. kVar	0,495	0,495	0,495	0,495	condition vérifiée
$Q_i R_i$ Ω. kVar	1,25	2,14	1,22	1,53	
$(Q - Q_{BT}) \frac{R_e}{R_i}$ kVar	118	69	94	34,5	
Q_{optimal} kVar	180	229	136	71,5	
$Q_{\text{Comp. Norm.}}$ kVar	6x30 kVar	10x20+1x30	7x20	2x20+1x30	620
$\Delta P_{\text{Minimal}}$ [KW]	0,366	0,214	0,292	0,107	# 0,98
$\Delta P_{\text{résult. Le Norm.}}$ KW	0,366	0,212	0,270	0,117	# 0,97

Les pertes d'énergie pour la compensation optimale obtenue par le calcul et pour la compensation choisie d'après les dispositifs normalisés restent aux erreurs de calcul près globalement identiques. Ceci est dû au fait que les puissances optimales et normalisées sont presque égales.

↗ la fin de chaque départ on installera les batteries de condensateurs qui sont indiquées dans la ligne [Q Comp. Norm] du Tableau ci-dessus.

II. Usine textile.

Au niveau du jeu de barres 6KV du transformateur (2) les puissances de pointe sont

$$P = 900 + 28 = 928 \text{ KW}$$

$$Q = 1050 + 170 = 1220 \text{ Kvar}$$

Pour passer les puissances de pointe aux puissances Moyennes annuelles, la documentation technique indique qu'il faut multiplier les puissances de pointe par le coefficient : 0,75.

La Documentation technique donne aussi

$$T_a = 7000 \text{ heures.}$$

$$c = 0,013 \text{ rouble / kWh perdu.}$$

Les Puissances moyennes Annuelles sont alors:

$$P_{ma} = 0,75 P = 697 \text{ KW.}$$

$$Q_{ma} = 915 \text{ Kvar}$$

$$\text{Ce qui correspond à } \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{915}{697} = 1,312.$$

Du fait que la distance entre le jeu de barres du transformateur principal et celui (à 6KV) du transformateur (2) est très petite, on peut considérer avec une bonne approximation que $\operatorname{tg} \varphi_2$ reste le même à savoir:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,327$$

La puissance du dispositif de compensation sera déterminée par

$$Q_c = P_{ma} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

$$\text{soit } Q_c = 697 (1,312 - 0,327) = 685 \text{ Kvar.}$$

La Résistance Equivalente du transformateur (2) côté B.T est déterminée par

$$R_T = 10^3 \frac{P_{co} (\text{KW}) \cdot U_n^2 (\text{KV})}{S_n^2 (\text{KVA})} = 10^3 \frac{16 \cdot 0,4^2}{16^2 \cdot 10^4}$$
$$R_T = 0,001 \Omega.$$

La résistance équivalente du réseau, utilisée lors de la détermination de la puissance de compensation B.T, est une résistance équivalente du point de vue pertes.

Pour une distribution B.T minimisant les pertes, la résistance du réseau est donnée par

$$R_r = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{R_i}}$$

Pour l'usine textile on aura

$$R_r = \frac{1}{\frac{1}{0,00685} + \frac{1}{0,0108} + \frac{1}{0,0059} + \frac{1}{0,0088} + \frac{1}{0,0127}} = 1,66 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Calcul de M

$$M = U^2 \left(\frac{112,5 \cdot K_d}{c \cdot T_a} + 0,5 \right)$$

$$M = 0,4^2 \left(\frac{112,5 \cdot 4}{0,013 \cdot 7000} + 0,5 \right) = 0,87 \Omega \cdot \text{Kvar}$$

Puissance de Compensation B.T

$$Q_{BT} = Q - \frac{M}{R_T + R_r}$$

$$Q_{BT} = 787,5 - \frac{0,87}{2,66 \cdot 10^{-3}} = 460 \text{ Kvar.}$$

Puissance de Compensation H.T.

$$Q_{H.T} = Q_c - Q_{BT} = 685 - 460 = 225 \text{ Kvar}$$

On installera 3 batteries chacune composée de 6 unités monophasées et montées en étoile. Soit au total $Q = 240 \text{ Kvar.}$

Les condensateurs utilisés ont les caractéristiques suivantes

type C.	$C = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
$U_n = 5,8 \text{ KV}$	
$Q = 20 \text{ kvar}$	Tension d'isol = 12 KV.

Repartition de la puissance de Compensation B.T

Pour distribuer les Condensateurs en fin de ligne, il faut satisfaire à la relation :

$$Q_i \cdot R_i > M \cdot (Q - Q_{BT}) R_T$$

Départs	1	2	3	4	5	Résultats
$M \cdot (Q - Q_{BT}) R_T$ Ω. KVar	0,543	0,543	0,543	0,543	0,543	condition satisfaite
$Q_i \cdot R_i$ Ω. kVar	1,08	1,77	0,93	1,4	2,0	
$(Q - Q_{BT}) \frac{R_e}{R_i}$ KVar	79	50	92	61	42,5	
Q optim. KVar	79	108	66	97	115,5	465,5
Q Comp Norm. KVar	4x20	4x20 + 1x30	5x12,5	5x20	9x12,5	465
ΔP_{Min} [kW]	0,267	0,169	0,312	0,204	0,143	1,095
ΔP [Reult Comp. Norm] [kW]	0,267	0,156	0,336	0,185	0,172	1,116

on constate que les pertes d'Énergie liées à la Normalisation des dispositifs de Compensation diffèrent légèrement des pertes minimales, mais elles restent dans le même ordre de grandeur.

À la fin de chaque départ on installera les batteries de Condensateurs qui sont indiquées dans la ligne [Q Comp Norm] du tableau ci-dessous.

III Usine de cyclomoteurs

La résistance équivalente du réseau qui intervient dans la détermination de la puissance de compensation $P_{s,T}$, est une résistance équivalente du point de vue pertes d'énergie.

Les batteries de condensateurs devant être réparties de manière à minimiser les pertes, la résistance équivalente sera déterminée selon la méthode indiquée dans le chapitre VI-2.

Pour que ΔP soit minimum la répartition se fera telle que :

$$(Q_{23} - Q_{K23}) R_e = (Q_3 - Q_{K3}) R_3 = (Q_4 - Q_{K4}) (R_4 + R_{34})$$

$$(Q_{12} - Q_{K12}) R'_e = (Q_2 - Q_{K2}) R_2 = (Q_{23} - Q_{K23}) (R_e + R_{23})$$

$$(Q - Q_K) R''_e = (Q_1 - Q_{K1}) R_1 = (Q_{12} - Q_{K12}) (R_{12} + R'_e)$$

D'où l'on tire :

$$(Q_1 - Q_{K1}) = (Q - Q_K) \frac{R''_e}{R_1}$$

$$(Q_{12} - Q_{K12}) = (Q - Q_K) \frac{R''_e}{R_{12} + R'_e}$$

$$(Q_2 - Q_{K2}) = (Q_{12} - Q_{K12}) \frac{R'_e}{R_2} = (Q - Q_K) \frac{R''_e}{R_{12} + R'_e} \times \frac{R'_e}{R_2}$$

$$(Q_{23} - Q_{K23}) = (Q_{12} - Q_{K12}) \frac{R'_e}{R_e + R_{23}} = (Q - Q_K) \frac{R''_e}{R_{12} + R'_e} \cdot \frac{R'_e}{R_e + R_{23}}$$

$$(Q_3 - Q_{K3}) = (Q_{23} - Q_{K23}) \frac{R_e}{R_3} = (Q - Q_K) \frac{R''_e \cdot R'_e}{(R_{12} + R'_e)(R_e + R_{23})} \cdot \frac{R_e}{R_3}$$

$$(Q_4 - Q_{K4}) = (Q_{23} - Q_{K23}) \frac{R_e}{R_4 + R_{34}} = (Q - Q_K) \frac{R''_e \cdot R'_e}{(R_{12} + R'_e)(R_e + R_{23})} \cdot \frac{R_e}{R_4 + R_{34}}$$

avec

$$R_e = \frac{R_3(R_4 + R_{34})}{R_3 + R_4 + R_{34}} = \frac{2,47(1,85 + 2,47) \cdot 10^{-6}}{(2,47 + 1,85 + 2,47) \cdot 10^{-3}} = 1,57 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R'_e = \frac{R_2(R_e + R_{23})}{R_2 + R_e + R_{23}} = \frac{3,18(1,57 + 0,75) \cdot 10^{-6}}{(3,18 + 1,57 + 0,75) \cdot 10^{-3}} = 1,34 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R''_e = \frac{R_1(R'_e + R_{12})}{R_1 + R'_e + R_{12}} = \frac{4,9(1,34 + 1,29) \cdot 10^{-6}}{(4,9 + 1,34 + 1,29) \cdot 10^{-3}} = 1,71 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Les pertes d'Énergie dans le Réseau peuvent s'écrire

$$\Delta P = \frac{1}{U^2} (Q - Q_K)^2 R_r$$

$$= \frac{1}{U^2} (Q - Q_K)^2 \left[\frac{R_e''^2}{R_1} + \frac{R_e''^2 \cdot R_{12}}{(R_{12} + R'_e)^2} + \frac{R_e''^2 \cdot R_e'^2}{(R_{12} + R'_e)^2 R_2} + \frac{R_e''^2 \cdot R_e'^2 \cdot R_{23}}{(R_{12} + R'_e)^2 (R_e + R_{23})^2} + \frac{R_e''^2 \cdot R_e'^2 \cdot R_e^2}{(R_{12} + R'_e)^2 (R_e + R_{23})^2 R_3} + \frac{R_e''^2 \cdot R_e'^2 \cdot R_e^2}{(R_{12} + R'_e)^2 (R_e + R_{23})^2 (R_4 + R_{34})} \right]$$

où le terme entre crochets représente R_r .

Le calcul donne :

$$R_r = (0,6 + 0,545 + 0,238 + 0,105 + 0,14 + 0,08) \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_r = 1,708 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Au niveau du jeu de barres 6 kV du Transformateur (3) les puissances sont

$$P = 1143 \text{ kW}$$

$$Q = 1395$$

Pour passer des puissances de pointe aux puissances moyennes la documentation technique indique qu'il faut multiplier les puissances de pointe par le coefficient : 0,6

Elle indique aussi :

$$T_a = 5500 \text{ heures}$$

$$c = 0,013 \text{ rouble/kWh perdu}$$

les puissances moyennes sont alors :

$$P_{ma} = 696 \text{ kW}$$

$$Q_{ma} = 835 \text{ Kvar.}$$

La Résistance équivalente du transformateur (3) est:

$$R_T = 0,0015 \Omega$$

de plus $R_r = 1,708 \cdot 10^{-3} \Omega$.

Puissance du Dispositif de Compensation.

$$Q_c = Q_k = P_{ma} (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

$$Q_c = 596 (1,21 - 0,327) \approx 610 \text{ Kvar}$$

Puissance de Compensation B.T

- calcul de M

$$M = U^2 \left(\frac{112,5 \cdot K_d}{C \cdot T_a} + 0,5 \right)$$

$$M = 0,4^2 \left(\frac{112,5 \cdot 4}{0,013 \cdot 5500} + 0,5 \right) = 1,19 \Omega \cdot \text{Kvar}$$

- Puissance de Compensation B.T.

$$Q_{BT} = Q - \frac{M}{R_T + R_r}$$

$$= 761 - \frac{1,19}{2,708 \cdot 10^{-3}} = 761 - 440 = 321 \text{ Kvar}$$

Puissance de Compensation H.T

$$Q_{HT} = Q_c - Q_{BT} = 610 - 321 = 289 \text{ Kvar.}$$

on installera 1 batterie composée de 6 Unités monophasées montées en étoile.

les caractéristiques des Condensateurs sont: (UTE)

type : C 5
Un : 5,8 KV
C : $4,73 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
f : 50 Hz.

Niveau d'isol : 23 KV

Dielectrique : Papier imprégné de diphénylène Chloré.

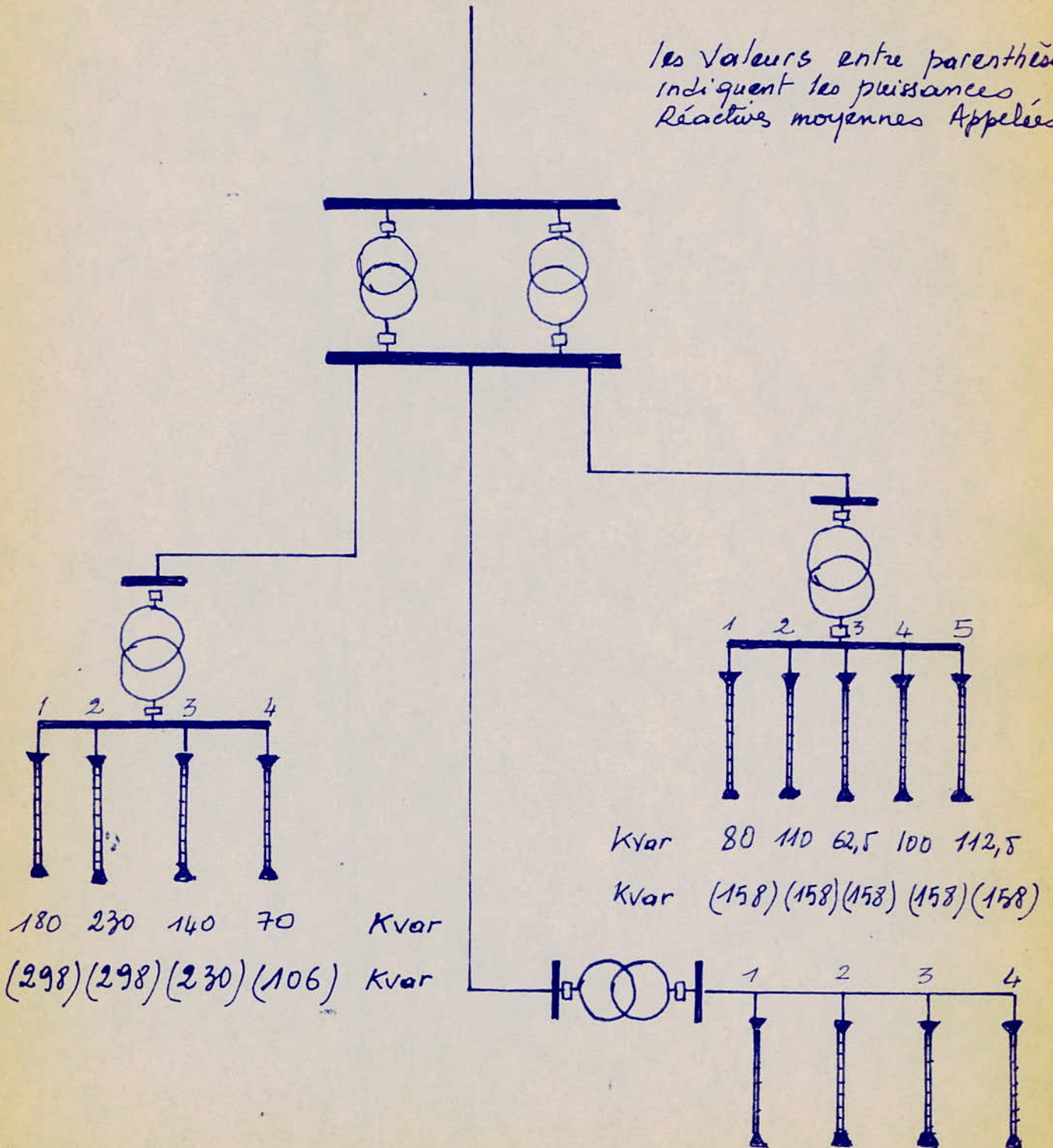
Distribution de Q dans le Réseau B.T.

Departs	1	2	3	4	Resultats
$(Q - Q_{opt}) \frac{R_e}{K_{var} R_i}$	153	121	106	56	
$Q_i \text{ opt.}$ Kvar	149	50	82	40	321.
$Q_i \text{ Comp}$ Norm. Kvar	5x30	4x12,5	4x20	2x20	320.

A la fin de chaque départ on installera les batteries de condensateurs Normalisées, indiquées dans la Dernière ligne du Tableau ci-dessus.

SCHEMA II Resultats obtenus

les valeurs entre parenthèses indiquent les puissances Réactives moyennes Appelées.



180 230 140 70 Kvar
(298)(298)(230)(106) Kvar

Kvar 80 110 62,5 100 112,5
Kvar (158)(158)(158)(158)(158)

les valeurs sans parenthèses indiquent les valeurs Normalisées choisies pour les Dispositifs de Compensation.

(Kvar) 150 50 80 40
(Kvar) (302)(171)(192)(96)

Bénéfices Réalisés

Les bénéfices réalisés en compensant l'énergie réactive sont comptabilisés de la façon suivante:

Gain sur la Tarification de l'Énergie + Gain sur les pertes d'Énergie.

-(Coût des Dispositifs de Compensation + Coût d'Amortissement + pertes d'Énergie dans les Condensateurs).

Nous Allons Indiquer par Un Calcul pour l'Usine Sidérurgique que les Bénéfices Annuels Réalisés ne sont pas négligeables.

Puissance Réactive Moyenne Consommée avant Compensation:

$$Q_{ma} = 1060 \text{ Kvar}$$

Puissance Réactive Compensée.

$$Q_c = 120 + 620 = 740 \text{ Kvar.}$$

Puissance Réactive Résultante.

$$Q = Q_{ma} - Q_c = 320 \text{ Kvar}$$

Puissance Active Moyenne Consommée

$$P_{ma} = 925 \text{ kW}$$

$\text{tg} \varphi$ avant Compensation

$$\text{tg} \varphi_1 = 1,145 \text{ c.a.d. } \cos \varphi_1 = 0,658$$

$\text{tg} \varphi$ Résultante

$$\text{tg} \varphi_2 = \frac{320}{925} = 0,346 \text{ c.a.d. } \cos \varphi = 0,945.$$

Pertes d'Énergie Avant Compensation.

$$\Delta P = \frac{1}{U^2} \sum_i Q_i^2 R_i = 9,1 \text{ kW.}$$

La Documentation technique donne:

$$\text{Prix du kWh à } \cos \varphi = 0,66 = \text{Prix de Base} + 37\%$$

Prix du Kwh à Conf = 0,945 = Prix de Base - 5%

Prix de Base du Kwh = 0,1 rouble

Prix du Kvar "0,4Kv" = 9 roubles

Prix du Kvar "6Kv" = 5 roubles

Prix du Kwh d'énergie Perdue = 0,013 rouble.

les Bénéfices Réalisés sont Alors :

$$B = \frac{0,1 \cdot 42 \cdot 925}{100} \cdot 7500 + (9,1 - 1) \cdot 7500 \cdot 0,013$$
$$- (0,12 + 0,1)(120 \cdot 5 + 620 \cdot 9) - (0,003 \cdot 120 \cdot 0,013 \cdot 7500 + 0,004 \cdot 620 \cdot 0,013 \cdot 7500)$$
$$B = 290.000 + 720 - 1350 - 250 = 287.100 \text{ Roubles}$$

Il Apparaît à travers Ce Calcul que la Compensation est Nécessaire, les Bénéfices Réalisés étant très importants.

D'autre part la Compensation Décharge les lignes de Transport et les Transformateurs, et permet ainsi l'installation éventuelle d'autres Utilisateurs.

CONCLUSION

A mesure que la consommation d'énergie électrique augmente, la puissance réactive pose des problèmes plus compliqués, surtout sous l'aspect de sa production et de sa répartition.

En effet les facteurs de puissance naturels sont variables dans de larges limites, et une grande circulation de puissance réactive a des conséquences néfastes. Elle fait fonctionner les alternateurs à un facteur de puissance inférieur au facteur de puissance nominal, bloque la capacité de transport des lignes, occasionne des grandes pertes d'énergie active, des chutes de tensions plus importantes et rend l'exploitation des réseaux plus délicate et coûteuse.

La conception moderne consiste en la compensation sur une grande échelle de l'énergie réactive au niveau des usagers. Cependant les critères économiques imposent une limite. Une forte décentralisation des sources d'énergie réactive, conduit à une augmentation des frais d'installation ainsi qu'à un coût plus élevé de l'équipement de coupure et des dispositifs annexes.

Le critère qui rend optimale la circulation de la puissance réactive est basé sur la minimisation des pertes d'énergie active.

C'est dans cet esprit que nous avons conçu le présent travail. Cette étude comporte huit chapitres dont le dernier est une application ainsi que deux annexes. Pour l'élaboration de cette étude, nous avons consulté toute la bibliographie que l'on a pu assembler et dont les principales références sont indiquées à la page

Dans la première partie de cette étude (chapitre I-III) il est proposé une étude générale sur l'énergie réactive, et les problèmes occasionnés par la circulation de celle-ci dans les réseaux.

Dans le chapitre IV, il est montré que c'est un calcul technico-économique basé sur les frais généralisés annuels qui est la base du choix du moyen de compensation.

Après avoir indiqué les différents modes de compensation dans le chapitre V, nous avons traité en détail dans le chapitre VI, tous les aspects concernant la répartition optimale des sources d'énergie réactive dans les réseaux.

La méthode de répartition des condensateurs que nous proposons dans le paragraphe VI-2, a l'avantage d'être générale. Elle est basée sur le concept mathématique des extrémums liés. Etant établie sans conditions restrictives, elle reste applicable pour des réseaux de n'importe quelle complexité. D'autre part les formules obtenues nous permettent de retrouver comme cas particuliers, les relations pour la répartition optimale de l'énergie réactive dans les réseaux radiaux et magistraux qui sont données par la référence (5).

Pour éviter les phénomènes transitoires caractéristiques à la commutation des condensateurs, nous présentons une méthode d'injection de puissance réactive en indiquant le principe d'une installation statique réglable.

Le problème de la répartition optimale de la puissance réactive pour le cas pratique présenté dans le schéma I, a été solutionné dans l'esprit de la théorie précédemment étudiée. A cette occasion nous avons trouvé que les pertes d'énergie occasionnées par la normalisation dans les tolérances de l'optimum.

Enfin, nous avons voulu faire de ce travail, un exemple utile (théorie et pratique) pour l'optimisation des puissances réactives dans les réseaux.

ANNEXE I - Répartition Optimale de la puissance réactive de compensation Dans les Réseaux Radiaux.

La Méthode et la Démonstration sont tirées du livre Ghitelsou :

La Répartition est basée sur la mininuisation des pertes actives d'energie qui sont de deux sortes :

- Les pertes d'energie dûes au transit de la puissance active et qui demeurent constantes.

Les pertes d'energie dûes au transit de la puissance réactive qui peuvent être diminuées par une compensation d'energie réactive. Ces pertes sont exprimées par

$$\Delta P = \frac{1}{U^2} Q^2 R = a Q^2 R$$

Si on considère un réseau radial à 2 départs de résistances R_1 et R_2 , de puissances réactives appellées Q_1 et Q_2

Ou pourra écrire si Q_{k1} et Q_{k2} sont les puissances réactives de compensation injectées en fin de ligne

$$\Delta P = a \left[(Q_1 - Q_{k1})^2 R_1 + (Q_2 - Q_{k2})^2 R_2 \right]$$

Avec $Q = Q_1 + Q_2$
 $Q_k = Q_{k1} + Q_{k2}$.

C'est-à-dire

$$\Delta P = a \left[(Q_1 - Q_{k1})^2 R_1 + (Q_2 - Q_k + Q_{k1})^2 R_2 \right]$$

Ces pertes seront minimums si

$$\frac{d(\Delta P)}{dQ_{k1}} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d^2(\Delta P)}{dQ_{k1}^2} > 0$$

C'est-à-dire

$$(Q_1 - Q_{k1}) R_1 = (Q_2 - Q_{k2}) R_2 = (Q - Q_k) R_e$$

Avec

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Le départ R_2 pourra être considéré lui même comme étant constitué de eux autres départs etc... En appliquant la même démonstration on retrouve pour un réseau à n départs.

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

d'où

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

où Q_{ki} qui représente la puissance optimale du dispositif de compensation à installer à la fin du départ i .

ANNEXE 2

Caractéristiques des Condensateurs de Puissance
type E . D . F .

I) Condensateur de puissance basse tension type E . D . F .

Il est prévu 4 types de condensateurs B. T possédant tous le même encombrement et se différenciant par la puissance, la tension, et le couplage. Ces unités normalisées sont :

- Une unité Monophasée 380 V de 12,5 kvar (type 1)
- Une unité Monophasée 220 V de 7,5 kvar (type 2)
- Une unité triphasée 380 V de 12,5 kvar (type 3)
- _____ 220 V de 7,5 kvar (type 4)

Les Caractéristiques générales demandées à ces condensateurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Type de Condensation	TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3	TYPE 4
Tension Nominale (V),	380	220	380	220
Puiss. Nominale(kvar):	12,5	7,50	12,5	7,50
Couplage interne	Monophasé		Triphasé Triangle	
Nombre de bornes	3 Y Compris la borne de masse		4 Y Compris la borne de masse	
Nombre de résistances de décharge.	1		2 (Montées en V)	
Type	Intérieur			
Imprégnant	Diélectrique chloré de préférence			
Fusibles Internes	Néant			

II- Condensateurs de puissance à moyenne tension type E.D.F.

II.1 Désignation de types de condensateurs.

Les différents types de condensateurs sont désignés par une lettre suivie d'un chiffre

La lettre indique la tension nominale suivant le code :

C pour 5800 V

D pour 8700 V

E pour 11600 V

Le chiffre indique, en dizaine de kvar, la puissance nominale.

II.2 Caractéristiques générales.

Pour chaque niveau de tension ; la puissance préférentielle est 50 kvar. Toutefois, cette spécification est applicable aux condensateurs de puissances unitaire différente (20, 30 kvar, etc...)

Les caractéristiques générales des condensateurs 50 kvar sont indiquées dans le tableau ci-après.

Type	C 5	D 5	E 5
Tension nominale (kv)	5,8	8,7	11,6
Puissance nominale (kvar)	50	50	50
Capacité nominale	4,73	2,10	1,18
(H3) Fréquence nominale	50		
Niveau d'Isol. (kv)	23		
Nombre de bornes	deux		
Type de Matériel	Extérieur		
Diélectrique	Papier imprégné de dyphé nyle chloré		
Catégorie de température.	- 25° C à 40° C		

BIBLIOGRAPHIE.

- (1) Les Réseaux d'énergie électrique (tomel) R. Pelissier.
- (2) Cours d'Electrotechnique. Edition Mir 1967 par A. KASSATKINE et M. PEREKALINE.
- (3) Fonctionnement et Protection des réseaux de transport d'Electricité. Ganthiers. Villars Editeur 1963 par PIERRE HENRIET.
- (4) Amélioration du facteur de puissance dans les installations industrielles. SODEL éditeur 1965. par R. GAUTHERET.
- (5) Solutions économiques dans les projets de réseaux électriques. Energhia. Moscou. 1971 par Ghitelson.
- (6) R G E Juin 1968.
- (7) Manuel de l'Ingénieur tome 4. Librairie Polytech. Béranger 1962. par Hütte
- (8) Technique de l'Ingénieur. Electricité tome 3.
- (9) Energética 1971/3. POCATA AL. CIRTINA GH. Alexandrescu. V.