

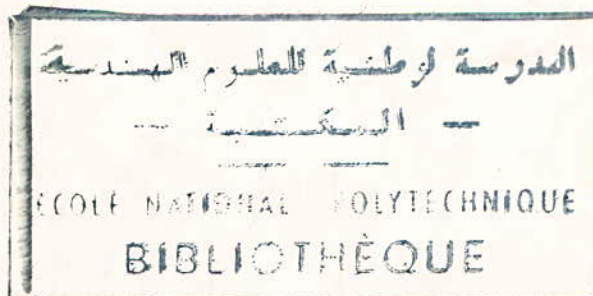
UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE



PROJET DE FIN D'ETUDES

Compensation de l'Energie
Reactive dans les Installations
Electriques Industrielles



Proposé par :

Mr Muharem DOBARDZIC
Docteur Ingénieur

Etudié par :

Mrs A. MIMOUNI
A: SERRAR

Promotion Janvier 1979

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**Compensation de l'Energie
Reactive dans les Installations
Electriques Industrielles**

Proposé par :

Mr Muharem DOBARDZIC
Docteur Ingénieur

Etudié par :

Mrs A. MIMOUNI
A: SERRAR

Promotion Janvier 1979

REMERCIEMENTS

A M. DOBARDZIC qui a mis à notre disposition son savoir et son expérience pour la réalisation de cette étude, nous adressons un cordial remerciement.

Nous remercions tous les professeurs qui ont contribué à notre formation ainsi que les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce projet.

Sommaire

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I

Energie réactive

1-1. Généralités	3
1-2. Définitions des grandeurs et notions fondamentales	4
1-3. Récepteurs à caractère inductif	10
1-4. Récepteurs à caractère capacitif	16
1-5. Valeurs du facteur de puissance des récepteurs représentatifs	17

Chapitre II

Conséquences des faibles valeurs du facteur de puissance.

2-1 Généralités	20
2-2 Surdimensionnement des sources d'énergie et des transformateurs	21
2-3 Surdimensionnement de lignes HT	22
2-4 Surdimensionnement des jeux de barres et d'appareils de coupure	23
2-5 Augmentation de la consommation d'énergie	24
2-6 Tarification d'énergie électrique active et réactive	25

Chapitre III

Compensation d'énergie réactive

3-1 Généralités	32
3-2 Méthodes de calcul de puissance réactive	33
3-3 compensation par machines synchrones..	34
3-4 compensation par condensateurs	35
3-5 Modes de compensation	36
3-6 Exemples de compensation	39

Chapitre IV

Dispositifs de compensation d'énergie réactive

4-1 Généralités	43
4-2 Condensateurs et leurs caractéristiques.	44
4-3 Régulation de la puissance réactive	53
4-4 Branchement et protection des condensateurs	55

Conclusion	59
------------------	----

Bibliographie	61
---------------------	----

INTRODUCTION

La consommation de la puissance réactive par les utilisateurs et les réseaux est considérable. Si aucun moyen de production de cette énergie ^{autre} que les alternateurs n'était installé, les centrales auraient à fournir, et les différents éléments auraient à transporter à peu près autant de puissance réactive que de puissance active. Le transport d'énergie est coûteux et il est économiquement justifiable, tant du point de vue investissement qu'exploitation de donner les moyens pour la compensation de celle-ci.

Notre étude consiste sur la base de recherches bibliographiques, à rappeler les consommateurs d'énergie réactive, à mettre en évidence les inconvénients de celle-ci et à donner les moyens de sa compensation.

Cette étude sera répartie sur quatre chapitres où seront traitées les causes et les

conséquences du mauvais facteur de puissance, la compensation de l'énergie réactive suivant différents modes et les dispositifs de sa régulation. Cette régulation est effectuée suivant le matériel utilisé par la SONELEC. Une visite à celle-ci a permis de voir qu'elle utilise les relais varmetriques (dits BELUK) contrôlant les unités de batteries de condensateurs suivant le besoin en énergie réactive.

Le temps limité ne nous a pas permis d'aborder la compensation d'énergie électrique des lignes et de ressortir les méthodes de calculs d'optimisation des sources d'énergie dans celles-ci.

On est arrivé à conclure que la compensation d'énergie réactive est une mesure rationnelle surtout pour les installations industrielles car au bout d'un temps très court de leur exploitation on arrive à récupérer par l'économie de consommation tous les frais d'investissement.

CHAPITRE I ENERGIE REACTIVE

1.1. Généralités

Dans les installations industrielles de courant alternatif, tous les récepteurs électriques sont destinés à transformer l'énergie électrique en une autre forme d'énergie. Du point de vue de la présente étude, il convient de distinguer deux composantes d'énergie fournie par une source alternative : Une destinée pour la création de la chaleur et du travail mécanique, l'autre pour la création du champ électrique et magnétique.

La première est appelée active, car vue du côté source, elle correspond à l'énergie qui est communiquée à la génératrice par l'axe de la turbine et du côté récepteur à celle qui est disponible à l'axe du moteur.

La seconde énergie (énergie de champ) est appelée réactive car elle correspond à l'énergie communiquée par la source d'excitation de la génératrice et du côté récepteur, elle est utilisée pour le maintien des champs (magnétique, dans

le cas des moteurs et des transformateurs, et électrique dans le cas des condensateurs).

Nous essayerons de résumer dans ce chapitre, les notions de bases concernant la production et la consommation d'énergie réactive, et qui sont axées sur les renseignements obtenus des sources bibliographiques mentionnées à la fin du projet.

D'abord seront citées les définitions des différentes grandeurs et notions, telles qu'elles sont données par la Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I) ou par la littérature consultée. Par la suite seront étudiés les récepteurs à caractère inductif et capacitif.

1-2. Définitions des grandeurs et notions fondamentales.

1-2-1. Définitions des grandeurs

Dans les normes françaises [1] on trouve les définitions des grandeurs électriques qui nous intéressent. Dans le cadre de cette étude, nous citons seulement quelques unes.

courant actif I_a : Composante du courant alternatif en phase avec la force électromotrice ou la tension

courant réactif I_r : Composante d'un courant en quadrature avec la force électromotrice ou la tension.

courant magnétisant I_m : courant nécessaire pour produire le flux d'induction dans une machine ou un appareil.

Puissance active P : Synonyme de puissance moyenne dans un circuit parcouru par un courant alternatif. En régime sinusoïdal, elle est égale au produit de la tension ou de la force électromotrice par le courant actif.

Puissance réactive Q : Produit des valeurs efficaces de la tension ou de la force électromotrice et de la composante du courant en quadrature avec elle.

La puissance réactive absorbée par un système est positive lorsque celui-ci est inductif.

Puissance apparente S : Produit du courant efficace par la force électromotrice ou la tension efficace.

Facteur de puissance $\cos \varphi$: Rapport de la puissance active et de la puissance apparente.

Pertes diélectriques P_d : Énergie transformée en chaleur dans un diélectrique soumis à un champ électrique variable.

Condensateur : Système de deux conducteurs (armatures) séparés sur toute l'étendue de leur

surface par un milieu isolant de faible épaisseur.

Permittivité ou constante diélectrique ϵ :
Constante exprimant l'influence d'un milieu isotrope sur les surfaces d'attraction ou de répulsion entre corps électrisés.

Facteur de permittivité (pouvoir inducteur spécifique) ϵ_r : Rapport de la permittivité d'un diélectrique à celle du vide.

Perméabilité absolue (d'une substance ou d'un milieu isotrope) μ : Quotient de l'induction par le champ magnétique qui la produit.

Perméabilité relative μ_r : Rapport de la perméabilité absolue d'une substance ou d'un milieu à celle du vide.

1-2-2. Notions de base [2], [3]

Un conducteur traversé par un courant I est entouré par un champ électromagnétique, qu'on imagine composé de deux vecteurs : le champ électrique \vec{E} et le champ d'induction magnétique \vec{B} .

L'existence de ces deux champs est nécessaire pour qu'il y ait transmission d'énergie. De plus, tout processus de transformation énergétique fait appel à l'action de l'un ou l'autre de ces deux champs.

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

Quantitativement on peut exprimer l'énergie électrique unitaire W_e en fonction de la permittivité ϵ du milieu isolant et de l'intensité du champ E selon la formule suivante

$$W_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

et en fonction de la capacité C et du potentiel V .

$$W_e = \frac{1}{2} C V^2$$

de la même façon on peut exprimer l'énergie du champ magnétique W_m unitaire en fonction de la perméabilité μ et de l'induction magnétique B .

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$

ou bien en fonction de l'inductance L et du courant I .

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

L'énergie emmagasinée totale due aux champs électrique et magnétique est la somme des deux énergies.

$$W = W_e + W_m$$

Les puissances électrique et magnétique sont les dérivées des énergies correspondantes :

$$P_e = \frac{dW_e}{dt} = C V \frac{dV}{dt}$$

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

Dans un appareil quelconque, le réseau électrique fournit à chaque instant une puissance pouvant se décomposer en trois composantes :

La puissance active P (qui subit la transformation énergétique pour laquelle est fait 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" (champ magnétisant d'un transformateur, champ tournant d'un moteur) ou parasite (champ des différents "flux de fuites").

Si localement la puissance P_c est égale à la puissance P_m , (comme elle sont toujours de signes opposés) il y a directement échange d'énergie entre les champs électrique et d'induction locaux, et le réseau n'est pas sollicité à participer à l'échange.

Dans le cas général où les puissances P_c et P_m ne sont pas de même valeur le réseau doit véhiculer une puissance supplémentaire Q .

$$Q = P_m - P_c$$

On dit que l'appareil auquel est fournie cette puissance consomme de l'énergie réactive si Q est

positif, ou produit de l'énergie réactive si Q est négatif.

Ayant eu une notion sur l'origine de l'énergie réactive nous allons voir les différentes grandeurs qui lui sont liées dans le cas d'une variation de champ selon les lois sinusoïdales.

a) Puissance

- Instantanée : $p = u i$ où $u = U_m \sin \omega t$ et $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ est en retard de phase par rapport à u d'un angle φ . La fig. 1-1 montre les variations de p , u et i en fonction du temps t

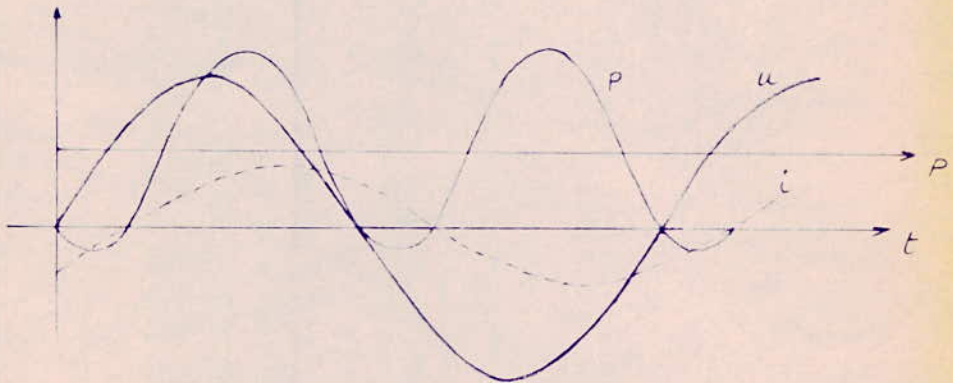


Fig. 1-1. Représentation des variations de la puissance, tension et courant en fonction du temps t .

- Moyenne active : $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi$ [W]
 où : $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ [V] et $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ [A] sont les valeurs efficaces de la tension et du courant.

- Apparente : $S = UI$ [VA]

- Réactive : $Q = \sqrt{S^2 - P^2} = UI \sin \varphi$ [VAR].

- Facteur de puissance : $\cos \varphi = \frac{P}{S}$

1.3. Récepteurs à caractère inductif.

Pour des raisons de clarté on les classe en deux catégories : ceux dont le fonctionnement est basé sur l'induction magnétique et ceux dont il est basé sur l'arc électrique.

1.3.1. Récepteurs à induction

a) Transformateurs

Les transformateurs absorbent de la puissance réactive à travers les flux se fermant dans le noyau (puissance magnétique) et dans l'air autour des enroulements (puissance de fuite).

Pour maintenir le champ magnétique dans le noyau la puissance nécessaire atteint jusqu'à 3% de la puissance nominale et est proportionnelle au courant à vide I_0 . La fig 1-2 représente le diagramme de la tension U et de courant I_0 d'un transformateur à vide. On voit dans ce diagramme un déphasage entre U et I_0 qu'on représente généralement par φ_0 . L'angle α est appelé l'angle d'avance dû aux pertes dans le fer.

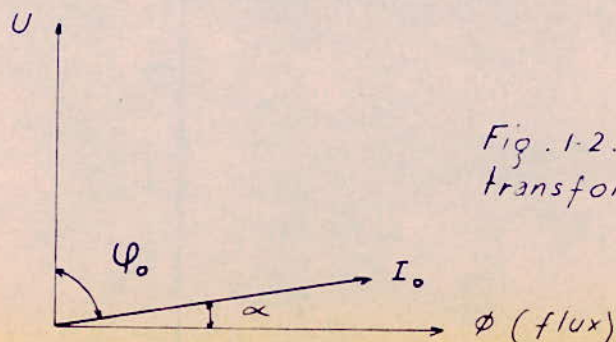


Fig. 1-2. Diagramme du transformateur à vide

Selon la formule du paragraphe précédent la valeur de la puissance réactive absorbée par le transformateur à vide est approximativement,

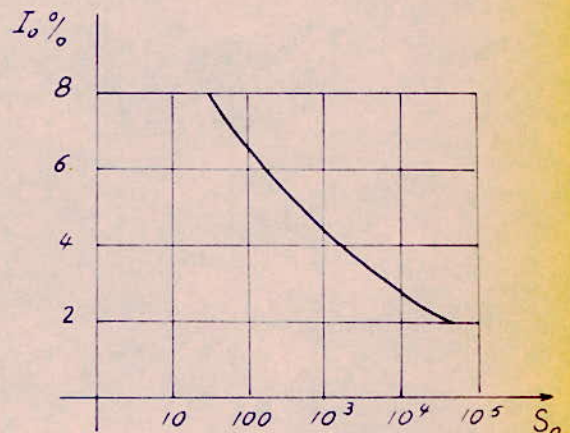
$$Q \approx I_0 \cdot \frac{S_n}{100} \text{ [kVAR]}$$

où I_0 : courant à vide en %

S_n : Puissance nominale du transformateur en kVA

Le diagramme de la fig 1-3 représente la variation du courant à vide en fonction de la puissance nominale des transformateurs [4].

Fig. 1-3. Caractéristique courant-puissance des transformateurs.



Ce diagramme est assez expressif, il montre la diminution en valeur relative de la puissance réactive du transformateur par rapport à l'augmentation de sa puissance nominale S_n .

La puissance de fuite peut atteindre les valeurs diverses en fonction du type de transformateur allant de 4 à 23% [5].

b) Moteurs asynchrones.

L'existence de l'entrefer est la raison pour laquelle

le courant magnétisant du moteur asynchrone est beaucoup plus important que celui du transformateur. C'est aussi la raison pour laquelle un moteur absorbe une puissance réactive beaucoup plus importante que celle d'un transformateur de même puissance.

La fig 1-4 représente la variation du $\cos \varphi$ en fonction du rapport de la puissance absorbée P_2 à la puissance nominale $P_n = 5 \text{ kW}$ d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit tournant à la vitesse de 1400 tr/mn et dont la tension d'alimentation est de 220/380V [6].

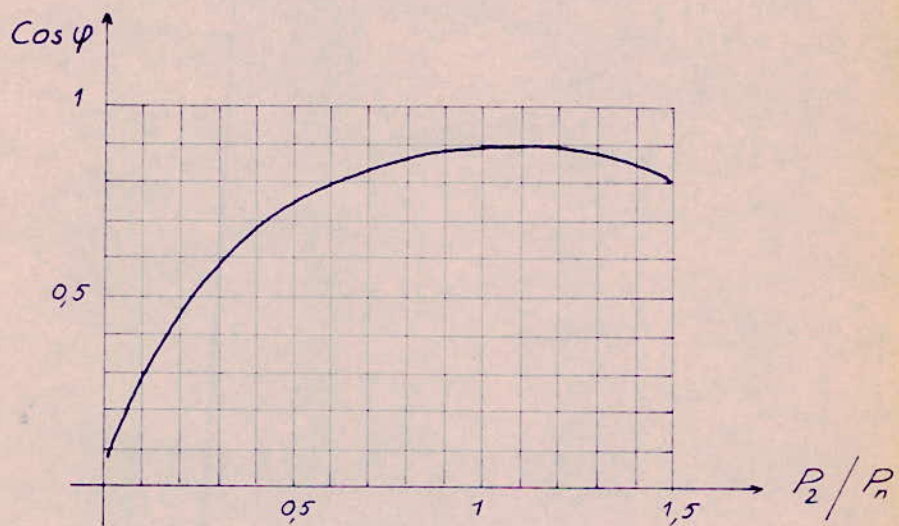


Fig. 1-4. $\cos \varphi = f(P_2/P_n)$ d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit.

Le $\cos \varphi$ des moteurs comme on vient de le voir est faible on utilise le mode de commutation des enroulements statoriques triangle étoile pour améliorer le $\cos \varphi$ sous des charges ne dépassant pas 30 à 40% de la valeur nominale voir fig 1-5 [6].

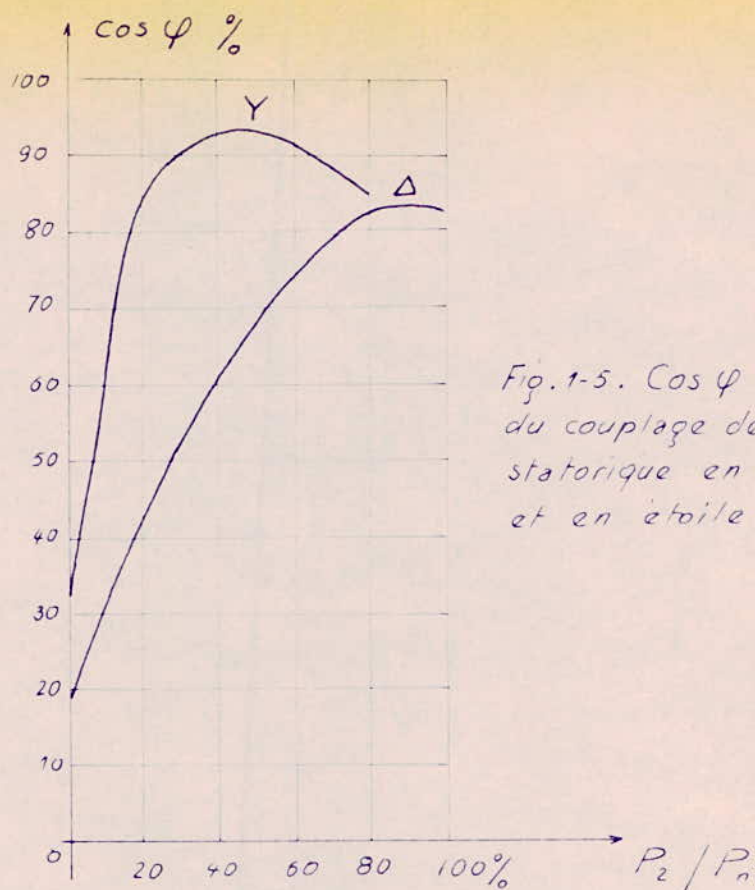


Fig. 1-5. $\cos \varphi$ du moteur lors du couplage de l'enroulement statorique en triangle (Δ) et en étoile (Y).

c) Four à induction

Le four à induction est un excessif consommateur d'énergie réactive. Il consiste en un transformateur comportant un circuit magnétique muni d'un enroulement primaire, un bain de métal constituant son secondaire à spire unique ce qui permet d'obtenir des courants intenses. Le réglage de ces fours s'effectue généralement en fournissant l'énergie aux bornes primaires à l'aide d'un transformateur à prise multiple, éventuellement avec réglage en charge, lorsqu'il s'agit de puissance importante.

On trouve dans la page 598 [7] les valeurs

de $\cos \varphi$ pour les fours à induction de cuivre, Zinc et Aluminium situées entre 0,7 et 0,8. Pour le fer ces valeurs doivent être sensiblement plus basses.

d) Lignes électriques

Les lignes aériennes HT et THT et surtout les câbles ont des capacités relativement grandes, mais elles ont aussi une réactance inductive pour laquelle est consacrée une énergie ΔQ se calculant suivant la formule.

$$\Delta Q = X \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \text{ [VAR]}$$

où : P - puissance active transmise en W

Q - puissance réactive transmise en VAR

U - tension composée en V

Les lignes électriques de HT sont caractérisées par leur impédance caractéristique et la puissance caractéristique correspondante. Lorsque la puissance transmise est égale à la puissance caractéristique les énergies réactives capacitatives et inductives se compensent.

Les valeurs des capacités, des inductances et des réactances inductives des lignes en fonction de leur géométrie sont données dans les tableaux 1-1 et 1-2 [8].

Tableau. 1-1. Valeurs de l'inductance et de la capacité des conducteurs usuels, pour diverses valeurs de distance D entre conducteur

Section (mm ²)	D = 1 m		D = 2 m		D = 4 m	
	L (mH/km)	C (nF/km)	L (mH/km)	C (nF/km)	L (mH/km)	C (nF/km)
50	1,15	5,02	1,29	4,46	1,43	4,01
90	1,09	5,35	1,23	4,72	1,37	4,22

Tableau. 1-2. Valeurs de réactance et de capacité des câbles tripolaires à gaine de plomb

Section (mm ²)	type 700V		6 kV		12 kV		30 kV	
	Lw (Ω /km)	C (μ F/km)	Lw (Ω /km)	C (μ F/km)	Lw (Ω /km)	C (μ F/km)	Lw (Ω /km)	C (μ F/km)
50	0,086	0,77	0,105	0,39	0,120	0,24	0,165	0,20
95	0,0845	0,95	0,098	0,51	0,111	0,33	0,14	0,28
150	0,084	1,10	0,094	0,61	0,102	0,45	0,13	0,34

1.3.2 Récepteurs à arc électrique.

La résistance active est très faible dans le cas des récepteurs à arc électrique, l'ensemble du circuit alimentant ceux-ci est généralement à caractère inductif ce qui donne lieu à une consommation importante de puissance réactive. Donc le $\cos \varphi$ de ces récepteurs est faible, les ordres de grandeurs seront donnés ci-dessous, [9].

Le $\cos \varphi$ des fours à arc est compris entre 0,7 et 0,8.

Le $\cos \varphi$ des postes de soudure alimentés

par des postes statiques est environ égal à 0,5

Le $\cos\varphi$ des appareils d'alimentation des lampes fluorescentes est environ égal à 0,5

1.4 Récepteurs à caractère capacitif.

a) Machines synchrones

En fonction du degré de l'excitation ces machines peuvent être un producteur ou un consommateur d'énergie électrique.

La possibilité de fourniture d'énergie réactive par les alternateurs et par les moteurs est limitée par le dimensionnement du circuit d'excitation à la valeur minimale de $\cos\varphi = 0,8$

Les compensateurs synchrones sont des machines ne fournissent aucune puissance active, ils sont destinés à fournir ou à absorber de la puissance réactive, suivant les besoins. Généralement pour les machines synchrones utilisées pour l'amélioration du $\cos\varphi$ dans le domaine industriel, le rapport entre la puissance réactive fournie et la puissance réactive absorbée est environ 1,7. [10]

b) Lignes électriques.

Comme on l'a déjà cité les lignes à vide fournissent une puissance réactive due à la réactance capacitive de la ligne entre conducteurs et terre et conducteurs entre eux. Ceci se manifeste surtout dans les lignes THT de grande

distance, dans tous les câbles HT et dans les câbles MT à faible section.

Ordre de grandeur de la puissance produite dans, [11].

Les lignes aériennes à vide

sous 225 kV $\rightarrow Q_0 \# 150 \text{ kVAR/km}$

sous 63 kV $\rightarrow Q_0 \# 12 \text{ kVAR/km}$

sous 15 kV $\rightarrow Q_0 \# 0,7 \text{ kVAR/km}$

Les câbles souterrains à vide.

sous 63 kV $\rightarrow Q_0 \# 250 \text{ à } 700 \text{ kVAR/km}$

sous 15 kV $\rightarrow Q_0 \# 15 \text{ à } 20 \text{ kVAR/km}$

Donc on voit que pour la même tension (15 kV) l'énergie capacitive conservée dans les câbles est d'environ 20 fois plus grande que dans le cas des lignes aériennes correspondantes.

c) Condensateurs

Ils sont les principaux producteurs d'énergie réactive. Vu leur importance dans l'application pour l'amélioration du $\cos \varphi$, une étude détaillée les concernant sera faite plus loin, aux chapitres III et IV

1.5. Valeurs du facteur de puissance des récepteurs représentatifs

a) Moteurs

Le $\cos \varphi$ varie suivant les types de moteurs

- Moteurs asynchrones triphasés: comme ils sont les plus fréquemment utilisés nous donnerons dans les tableaux 1-3 et 1-4 leur $\cos \varphi$ en fonction de leur

puissance nominale et leur vitesse nominale pour un fonctionnement en charge, [12].

Tableau 1-3. $\cos \varphi$ des moteurs asynchrones triphasés à rotor en court-circuit.

Puissance nominale en (kw)	Vitesse nominale en tr/mn	
	3000	750
15	0,85	0,7
90	0,90	0,78
300	0,90	-

Tableau 1-4. $\cos \varphi$ des moteurs asynchrones triphasés à rotor bobiné à bagues.

Puissance nominale en kw	Vitesse nominale en tr/mn	
	3000	750
15	0,85	0,7
90	0,90	0,78
300	0,90	-

- Moteurs asynchrones monophasés $\cos \varphi = (0,6 \div 0,74)$
- Moteurs universels $\cos \varphi = (0,7 \div 0,8)$
- Moteurs à collecteur $\cos \varphi = (0,6 \div 0,7)$

Au moment du démarrage, il ya un appel très important de puissance réactive qui donne lieu à un faible $\cos \varphi$ de l'ordre de 0,19, [13].

b) transformateurs.

Les transformateurs consomment une puissance réactive de 5 à 23% de leur puissance nominale.

c) Fours à induction.

Ils ont un $\cos \varphi$ moyen = 0,2, [14] sauf pour les fours à induction de Cuivre, Zinc et Aluminium qui ont un $\cos \varphi$ situé entre 0,7 et 0,8.

d) Fours à arc

$$\cos \varphi \text{ moyen} = 0,7$$

e) Postes de soudure à l'arc

$$\cos \varphi \text{ moyen} = 0,5$$

f) Appareils d'éclairage fluorescent

$$\cos \varphi \text{ moyen} = 0,5$$

CHAPITRE II

CONSEQUENCES DES FAIBLES VALEURS DU FACTEUR DE PUISSANCE

1.1. Généralités

Les sources d'énergie sont généralement éloignées des consommateurs, ce qui nécessite de longues lignes HT, des postes de transformation importants et des appareils de coupure

Tout ceci implique qu'une énergie réactive excessive, fournie par les sources et transitée jusqu'au lieu de consommation entraîne automatiquement un surdimensionnement des génératrices et de toutes les autres parties intermédiaires citées, d'une part, et d'autre part entraîne l'augmentation des pertes d'énergie et les frais d'investissement. En plus dans le cas du consommateur un tarif est appliqué.

Aussi, ce chapitre fera l'objet de l'étude de l'influence de l'énergie réactive sur le surdimen-

sionnement : des sources d'énergie, des lignes, des jeux de barres et appareils de coupures. Par la suite seront étudiées la consommation et la tarification d'énergie réactive.

2.2. Surdimensionnement des sources d'énergie et des transformateurs.

a) Alternateurs

Le dimensionnement du circuit d'excitation limite la production de l'énergie réactive de l'alternateur à la valeur minimale de $\cos \varphi = 0,8$.

Dans le cas d'un important transfert d'énergie réactive la puissance apparente demandée par le réseau est plus importante (courant élevé), ce qui entraîne une augmentation d'échauffement. De plus le $\cos \varphi$ doit diminuer et comme il est limité on doit surdimensionner l'alternateur.

b) Transformateurs.

Quand le $\cos \varphi$ diminue, pour avoir une puissance active donnée, d'après la formule $P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$ le courant doit augmenter (la tension restant pratiquement constante) ce qui entraîne une augmentation de la puissance apparente S . Or S est le principal facteur de dimensionnement du transformateur. En effet le diamètre de la colonne est lié à la puissance par phase S_c par la relation suivante $D = k \sqrt[4]{S_c}$ [15] où k est une constante. De même pour les épaisseurs a_1 et a_2 respectivement des

des enroulements HT et BT qui sont liées à S_c par la relation $a_1 + a_2 = k' \sqrt[4]{S_c}$ [16] k' étant une autre constante.

Donc, pour une puissance active constante, une augmentation de φ entraîne une augmentation de D et de a_1 et a_2 . En définitif on doit dimensionner le transformateur pour une puissance supérieure.

2.3. Surdimensionnement de lignes HT

Une augmentation de puissance réactive, d'après $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ correspond à une augmentation de puissance apparente et celle-ci influera surtout sur la section des conducteurs.

Etant donné que la section d'une ligne est le facteur principal de son dimensionnement, nous allons voir les différents paramètres qui déterminent celle-ci et qui augmentent en fonction de l'énergie réactive.

Une augmentation de courant entraîne une augmentation des pertes joules (l'échauffement qui en résulte devient inadmissible) et de la chute de tension dans les circuits électriques en tout point d'utilisation.

On sait que les pertes joules et les chutes de tensions dépendent de la variation du $\cos \varphi$, comme les représente la fig 2-1 [17].

L'augmentation de courant conduit à une augmentation de la température, entraînant ainsi une diminution de résistance mécanique qui est

un inconvénient, surtout pour les lignes aériennes dont les conducteurs sont autoportants.

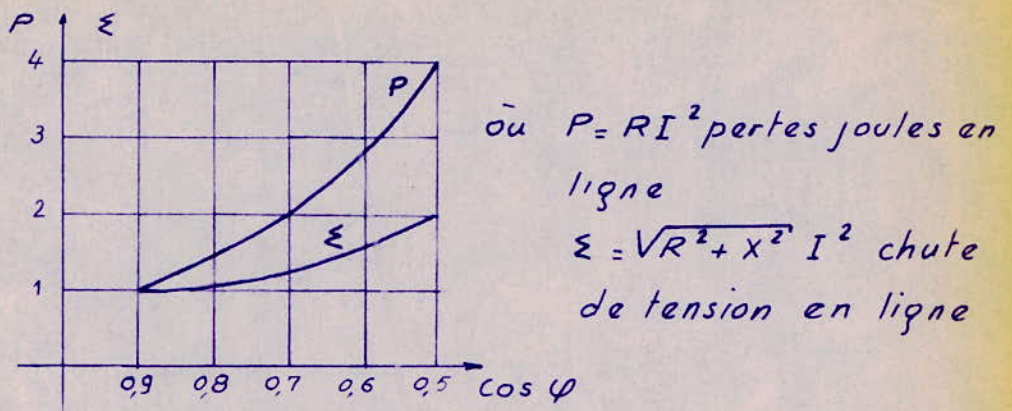


Fig. 2-1. Influence du facteur de puissance sur les pertes joules et sur la chute de tension

La majoration de section que l'on devra consentir dans ces cas pourra être d'autant plus grande que la puissance réactive traversant la ligne sera importante.

2.4. Surdimensionnement des jeux de barres et d'appareils de coupures.

a) jeux de barres.

Le dimensionnement des jeux de barres doit être fait avec le plus grand soin, surtout lorsqu'il s'agit de forts courants. En effet, une augmentation de courant due à une puissance réactive importante, provoque l'augmentation des courants de Foucault induits dans les pièces voisines et de l'échauffement qui entraîne la dilatation des barres. Ces phénomènes donnent lieu à une augmentation de la résistance effective un surdimensionnement est nécessaire afin d'y remédier.

b) Appareils de coupures.

L'intensité nominale est l'une des caractéristiques du dimensionnement de l'appareil de coupure, c'est elle qui détermine les conditions d'échauffement de celui-ci.

Pour une élévation de puissance réactive (augmentation de courant) les parties actives de l'appareil sont soumises à un échauffement exagéré d'où nécessité d'un surdimensionnement.

2.5. Augmentation de la consommation d'énergie

Le transport d'énergie n'est économiquement intéressant que s'il peut s'effectuer avec un rendement satisfaisant et ceci quelle que soit l'importance de l'énergie. Ce qui veut dire que le taux admissible du pourcentage de l'énergie perdue est limité.

Les formules donnant les pertes actives ΔP et réactives ΔQ sont:

$$\Delta P = R \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \quad \text{ou} \quad \Delta P = R \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}$$

$$\Delta Q = X \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \quad \text{ou} \quad \Delta Q = X \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}$$

Le rendement est $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ avec:

R et X - résistance et réactance de la ligne

P_1 et Q_1 - puissance active et réactive fournies

par la source.

P_2 et Q_2 – puissance active et réactive que reçoit l'utilisateur.

Ces deux formules montrent clairement que si toute l'énergie réactive est produite par la source, les pertes actives et réactives seraient importantes, donc il y aurait consommation d'énergie exagérée par la ligne d'où baisse de rendement. La fig 2.2 met en évidence ce fait.

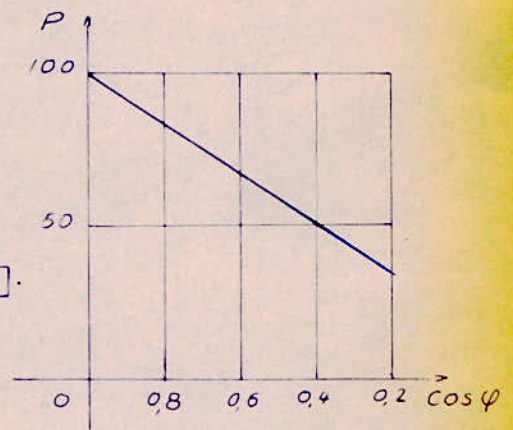


Fig 2-2. Influence du $\cos \varphi$ sur les pertes de transport d'après [18].

Cette ligne peut transporter une puissance de 100 kW à $\cos \varphi = 1$ alors qu'elle ne peut transporter que 50 kW à $\cos \varphi = 0,4$.

2.6. Tarification de l'énergie électrique active et réactive selon (SONELGAZ) [19]

Lorsque les besoins en énergie dépassent les possibilités offertes par les réseaux BT de distribution publique, on a recours au poste HT/BT.

La fourniture d'énergie en HT a donné lieu à la mise en application d'un tarif WS (Sonelgaz). Avant d'aborder la tarification nous donnerons quelques principes et définitions.

2.6.1. Principes et définitions

Les tarifs haute tension comportent une prime fixe et des prix des énergies. Ils sont différenciés suivant : la nature de la fourniture, les régions, la tension d'alimentation et le moment de la fourniture.

a) Différenciation suivant la nature de la fourniture.

Les éléments de la facturation varient selon que la fourniture est faite à l'un des trois tarifs suivants : Général, Appoint (convenant pour longues utilisations), et Secours (convenant pour courtes utilisations).

b) Différenciation suivant les régions.

Les prix de l'énergie varient légèrement suivant les régions.

c) Différenciation suivant la tension d'alimentation.

Les prix de l'énergie varient suivant les tensions d'alimentation (60, 30, 10, 5,5 kV).

d) Différenciation suivant le moment de la fourniture.

On distingue trois postes horaires et deux saisons définissant cinq postes tarifaires.

1) Postes horaires

- Pointes (P) : trois heures trentes minutes le matin et deux heures le soir, les jours ouvrables des mois de novembre, décembre et janvier.

- Heures pleines (HP) : tous les jours de l'année de 6 heures à 12 heures et de 14 heures à 22 heures, sauf les heures de pointes.

- Heures creuses (HC) : tous le jours de l'année de 22 heures à 6 heures et de 12 heures à 14 heures.

2) Saisons

- Hiver : du 1^{er} octobre au 31 mars,

- Eté : du 1^{er} avril au 30 septembre.

3) Postes tarifaires

La combinaison des postes horaires et des saisons donne 5 postes tarifaires : Pointe (P) - Heures Pleines d'hiver (HPh) - Heures Pleines d'été (HPe) - Heures Creuses d'hiver (HPh) - Heures Creuses d'été (HCe).

2-6-2. Prime fixe.

La prime fixe est annuelle. Elle est payable par mensualités égales. Son montant est fonction de la puissance souscrite par l'abonné, laquelle est modulée suivant les postes tarifaires. La prime fixe se calcule à partir de la puissance réduite obtenue à l'aide du tableau 2-1 et de la formule suivante.

Tableau. 2-1. Poste tarifaire et classement.

Poste tarifaire	P	HP _h	HP _e	HCh	HC _e
Rang de classement	1	2	3	4	5
coefficient réducteur	1	0,4	0,2	0,1	0,05

$$\text{Puissance réduite: } P_r = P_1 + 0,4(P_2 - P_1) + 0,2(P_3 - P_2) + 0,01(P_4 - P_3) + 0,05(P_5 - P_4)$$

avec P_1 - puissance souscrite en pointe,
 P_2 - puissance souscrite en heures pleines
d'hiver ect... suivant correspondance poste tarifaire / classement.

Le produit $T \cdot P_r$ dans lequel T est le taux de base annuel de la prime fixe, P_r la puissance réduite donne le montant annuel de la prime fixe, pour une puissance réduite inférieure à 100 kW.

Pour des puissances supérieures à 100 kW la prime fixe est dégressive: la puissance réduite souscrite est décomposée en tranches successives pour lesquelles la prime fixe bénéficie des rabais progressifs suivants (voir tableau 2-2).

Tableau. 2-2. Rabais suivant les tranches

Tranche (kW)	0 à 100	100 à 300	300 à 1000	1000 à 3000	3000 à 10000	Plus de 10000
Rabais pour chaque tranche	0%	4%	8%	12%	16%	20%

2.6.3. Prix de l'énergie.

Les prix d'énergie sont représentés dans les tableaux 2-3 et 2-4 suivant la nature de la fourniture (Général et Appoint).

Tableau 2-3. Tarif Général

- Prime fixe : taux de base = 45 DA/kW, an
et Prix d'énergie : DA/kWh

Zones	Tension (kV)	Hiver			Eté	
		P	HP	HC	HP	HC
I	60	0,1253	0,0749	0,0235	0,0461	0,0173
	5,5	0,1690	0,0294	0,0296	0,0593	0,0227
V	60	0,1302	0,0823	0,0441	0,0505	0,0321
	5,5	0,1757	0,1115	0,0490	0,0655	0,0353

Tableau 2-4. Tarif Appoint.

- Prime fixe annuelle DA/kW, an
et Prix d'énergie DA/kWh.

Zones	Tension kV	Prime fixe taux de base	Hiver			Ete	
			P	HP	HC	HP	HC
I	60	73,60	0,0990	0,0637	0,0211	0,0414	0,0155
	5,5	82,90	0,1335	0,0875	0,0266	0,0533	0,0204
V	60	76,90	0,1029	0,0700	0,0396	0,0454	0,0288
	5,5	86,90	0,1388	0,0948	0,0441	0,0589	0,0317

2.6.4. Facturation de l'énergie réactive

Les prix de l'énergie s'entendent pour une fourniture

comportant, chaque mois, en dehors des heures creuses, une proportion d'énergie réactive comprise entre 30% et 60% de la quantité d'énergie active consommée en dehors des heures creuses, au cours du mois.

Lorsque la production de 60% est dépassée au cours d'un mois, c'est à dire $\cos\phi$ moyen mensuel est supérieur à 0,857, l'excédent d'énergie réactive consommé en dehors des heures creuses est facturé au quart du prix d'heures pleines du tarif Général (tableau 2-5).

L'énergie réactive consommée en deça de la proportion de 30% donne lieu à une bonification par kVARh égale au dixième du prix d'heures pleines du tarif Général (tableau 2-5)

Tableau. 2-5. Pénalisation et bonification de l'énergie réactive (Général, Appoint) DA/kVARh.

Zones	tension (kV)	Hiver		Eté	
		Pénalisation	Bonification	Pénalisation	Bonification
I	60	0,0188	0,0075	0,0115	0,0046
	5,5	0,0257	0,0103	0,0120	0,0059
V	60	0,0206	0,0082	0,0126	0,0051
	5,5	0,0279	0,0112	0,0164	0,0060

A partir des tableaux 2-1, 2-2 et 2-3 on tire les conclusions suivantes.

Pour même tension (60kV) et même zone (V)

Le prix du kVARh en hiver est environ 1,6 fois celui de l'été. En effet en hiver la consommation d'énergie est plus importante qu'en été. C'est pour cela qu'on essaie d'éviter le transport d'énergie réactive afin de délester le réseau et lui permettre ainsi de transporter une grande quantité d'énergie active, ce qui justifie la majoration des pénalités sur l'énergie réactive consommée en hiver.

l'expression du prix du kVARh en fonction du prix du kWh est :

- En tarif Appoint.

$$\text{prix d'un kVARh} = \frac{0,0206}{0,1029} \cdot \text{prix d'un kWh (P)}$$

$$\text{prix d'un kVARh} = 0,02 \cdot \text{prix d'un kWh (P)}$$

- En tarif Général.

$$\text{prix d'un kVARh} = \frac{0,0206}{0,1302} \cdot \text{prix d'un kWh (P)}$$

$$\text{prix d'un kVARh} = 0,015 \cdot \text{prix d'un kWh (P)}$$

CHAPITRE III COMPENSATION D'ÉNERGIE REACTIVE .

3_1. Généralités

Dans le but d'éviter le transport d'énergie réactive et ses conséquences, la production de cette énergie se fait, de préférence, par des sources indépendantes, correspondantes. Ces sources sont généralement, soit des condensateurs, soit des compensateurs synchrones. On choisit leur emplacement en fonction de paramètres électriques caractéristiques et des investissements les plus optimaux.

Du point de vue électrique, dont la plupart des cas, on se contente d'améliorer le $\cos \varphi$ moyen mensuel, sans tenir compte des heures pleines ou creuses. Mais il est néanmoins nécessaire de connaître le régime journalier de marche de l'installation pour déterminer l'efficacité du compensateur.

Du point de vue économique on cherche tou-

jours les solutions les moins coûteuses tant sur le plan d'investissement que sur le plan des frais de consommation. Aussi dans ce chapitre seront étudiées les méthodes de calcul de l'énergie réactive nécessaire pour la compensation par machines synchrones et par condensateurs. Également seront présentés les différents modes de compensation: individuelle, par groupe et globale. Les ouvrages consultés sont les suivants, [20], [21], [22].

3.2. Méthodes de calcul de la puissance réactive.

Soit une installation de puissance apparente S_1 , de puissance active P_1 et réactive Q_1 dont le diagramme est donné par la fig 3-1. On veut réduire l'énergie réactive de Q_1 à Q_2 à P_1 constante.

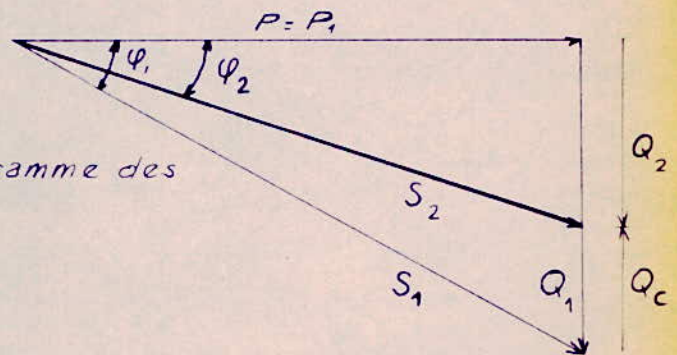


Fig. 3-1. Diagramme des puissances

- φ_1 - angle de déphasage avant compensation
- φ_2 - angle de déphasage après compensation
- Q_2 - puissance réactive après compensation
- Q_c - puissance réactive nécessaire
- S_2 - puissance apparente après compensation

En pratique C'est la valeur de Q_c qu'en cherche à déterminer. D'après le diagramme 3-1 on peut écrire.

$$Q_1 = P \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$$

$$Q_2 = P \cdot \operatorname{tg} \varphi_2$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

où bien $Q_c = P \cdot f$ avec $f = \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2$

La valeur de f est donnée dans le tableaux 3-1.

Si la puissance réactive Q_1 est connue, connaissant P et φ_2 le déphasage désiré, on peut calculer $Q_2 = P \operatorname{tg} \varphi_2$ on obtient ainsi la puissance réactive nécessaire.

$$Q_c = Q_1 - P \operatorname{tg} \varphi_2$$

Une formule qui peut être très utile en pratique pour déterminer la puissance de compensation est celle où on prend en considération uniquement les relevés des compteurs d'énergie

$$Q_c = \frac{A_B - A_w \operatorname{tg} \varphi_2}{t}$$

ou A_B - énergie réactive en [kVARh]

A_w - énergie active en [kWh]

t - temps d'observation en [h]

3.3. Compensation par machines synchrones.

Ce procédé n'est applicable que pour les

Tableau 2-1. Puissance de la batterie à installer pour obtenir un $\cos \varphi$ déterminé.

Avant Compensation		Puissance du condensateur (en kVAR par kW de charge) pour relever le facteur de puissance à :							
$t \varphi$	$\cos \varphi$	$t \varphi$	0,53	0,54	0,58	0,62	0,66	0,70	0,74
		$\cos \varphi$	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
2,29	0,40		1,688	1,750	1,805	1,861	1,924	1,998	2,085
2,10	0,43		1,507	1,569	1,624	1,680	1,742	1,816	1,903
1,93	0,46		1,329	1,391	1,446	1,502	1,567	1,636	1,725
1,78	0,49		1,180	1,242	1,297	1,355	1,420	1,489	1,578
1,64	0,52		1,044	1,106	1,160	1,215	1,281	1,353	1,441
1,52	0,55		0,913	0,981	1,035	1,090	1,156	1,228	1,316
1,40	0,58		0,805	0,867	0,921	0,976	1,042	1,114	1,202
1,29	0,61		0,693	0,761	0,815	0,870	0,936	1,008	1,096
1,20	0,64		0,600	0,662	0,716	0,771	0,837	0,903	0,997
1,10	0,67		0,508	0,570	0,624	0,679	0,745	0,817	0,905
1,02	0,70		0,420	0,482	0,536	0,591	0,657	0,729	0,811
0,94	0,73		0,336	0,398	0,452	0,507	0,573	0,645	0,727
0,85	0,76		0,255	0,317	0,371	0,426	0,492	0,564	0,652
0,78	0,79		0,176	0,238	0,292	0,347	0,413	0,485	0,567
0,72	0,82		0,098	0,160	0,214	0,269	0,335	0,407	0,489
0,59	0,86			0,062	0,109	0,167	0,230	0,301	0,390
0,51	0,89				0,028	0,086	0,149	0,230	0,309

Soit une installation de puissance moyenne $P = 500 \text{ kW}$ à compenser. Le tableau 2-1 donne si $\cos \varphi_1 = 0,46$ (avant compensation) et $\cos \varphi_2 = 0,94$ (désiré) $f = 1,567$. La puissance du condensateur à installer est $Q_c = 500 \cdot 1,567 = 783,5 \text{ kVAR}$.

installations importantes, où leur application est rentable. Ces machines peuvent fonctionner, soit comme récepteur d'énergie réactive, soit comme générateur de celle-ci.

Pour améliorer le facteur de puissance le compensateur synchrone fonctionne en régime surexcité et fournit au réseau de l'énergie réactive. En général cela se fait pendant le jour, quand les usines sont en fonction.

Il peut aussi fonctionner en régime sous excité pour améliorer le facteur de puissance et dans ce cas il absorbe le surplus d'énergie réactive venant du réseau. C'est le cas qui se présente généralement pendant les nuits, quand les longs câbles sont délestés de moteurs et récepteurs à caractère inductif.

La fourniture de l'énergie réactive du compensateur synchrone n'est limitée que par l'intensité nominale correspondante à sa puissance nominale.

La puissance nominale des compensateurs est importante, elle est dans les limites de 5 à 75 MVA. Leurs pertes sont élevées et ils ne deviennent compétitifs que lorsqu'il s'agit de grands réseaux c'est à dire de grandes puissances à compenser. Mais ils ont un avantage très important, les possibilités de réglage continu et fin de la puissance réactive dans les lignes.

3.4. Compensation par condensateurs.

Le domaine d'application des compensateurs synchrones étant limité, c'est surtout les condensateurs qui sont utilisés dans la plupart des cas pour la compensation d'énergie réactive de basse et moyenne tension. Bien que la régulation de la puissance réactive par condensateurs ne soit pas fine, ils ont des avantages qui ne sont pas négligeables; simplicité d'emploi, souplesse suffisante et économie.

La solution la plus logique pour la compensation d'énergie réactive serait celle utilisant des batteries de condensateurs localisées à côté de chaque appareil consommateur. Mais une telle solution n'est évidemment pas souvent la plus économique.

On considère en pratique une solution optimale, celle qui conduit aux dépenses globales minimales. Ces dépenses étant la somme du coût d'achat et d'exploitation des condensateurs et leurs appareillages

3.5. Modes de compensation

La compensation d'énergie réactive peut se faire à différents niveaux d'un réseau ou d'une installation: pour chaque récepteur, pour un groupe de récepteurs ou au niveau de la fourniture de l'énergie.

a) Compensation individuelle (fig 3-1)

Comme nous l'avons citée au paravant, cette

compensation est techniquement idéale puisqu'elle produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité rigoureusement ajustée avec la demande. Par contre c'est une solution chère qui ignore totalement les possibilités de foisonnement. Elle est réservée en principe aux consommateurs individuels de petites puissances (moteurs, appareils d'éclairage) dont la puissance réactive est relativement importante, ou bien aux gros consommateurs de puissance réactive importante influençant les dimensions de l'installation dans son ensemble (câblage, transformateurs, appareils, jeux de barres).

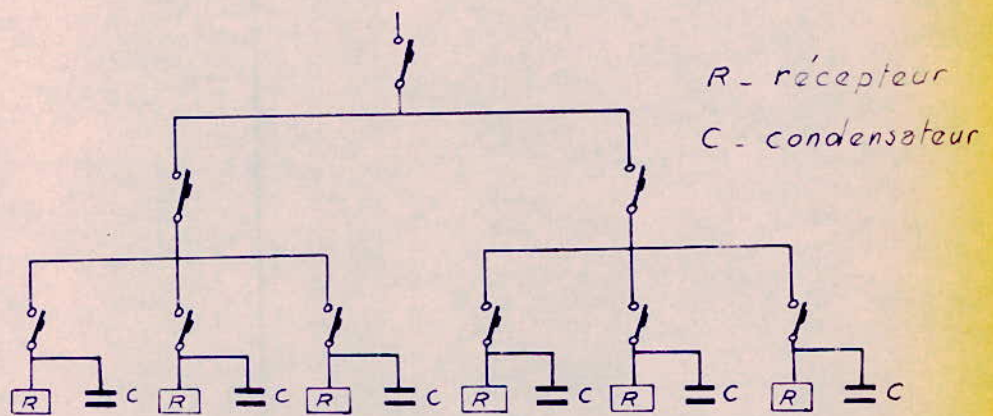
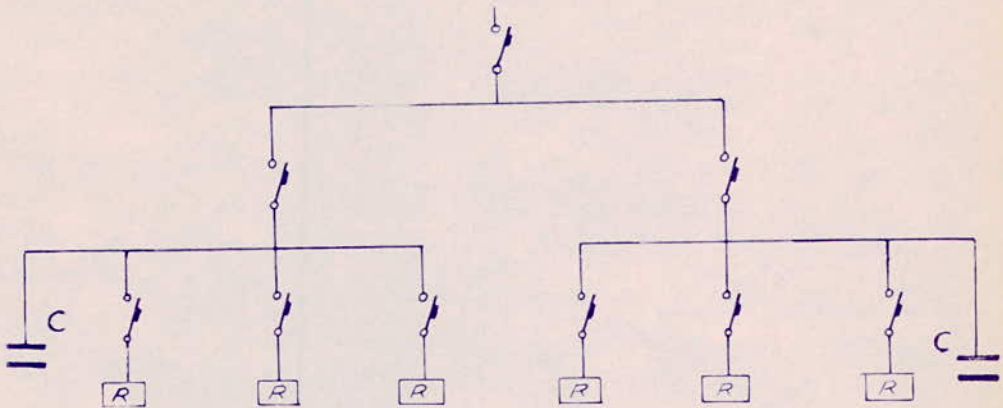


Fig. 3-1. Compensation individuelle

b) Compensation par secteur (fig 3-2)

Cette compensation localise les condensateurs à proximité de consommateurs d'énergie réactive groupés par secteurs. Elle soulage une grande partie des installations et en particulier les feeders d'alimentation, elle intègre le coefficient de foisonnement

des charges de chaque secteur, ce qui conduit à une optimisation encore correcte de la puissance. Cette compensation est réservée à des consommateurs de puissance élevée ou à des ateliers fonctionnant à des régimes différents.

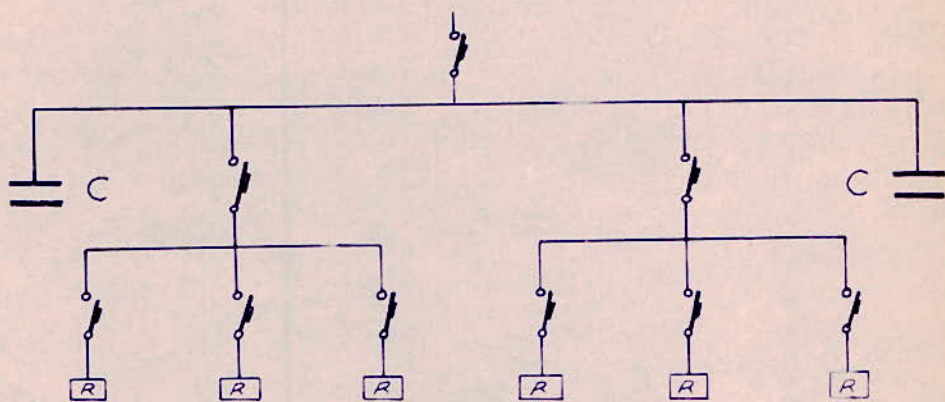


C) Compensation centrale (fig 3-4)

Ce mode de compensation est économique par le fait que toute la puissance de compensation est concentrée en un point. Le choix de la puissance fait intervenir le foisonnement des charges et conduit à des batteries optimisées, donc moins puissantes. Les inconvénients de cette compensation ; C'est que les installations aval ne sont pas soulagées d'une part ; d'autre part l'augmentation de tension du réseau, lorsque celui-ci passe du fonctionnement en charge au fonctionnement à vide, est aggravée par la surtension engendrée par la batterie de condensateur. Il y a aussi risque de surcompensa-

tion par suite de variation de charges importantes au niveau de l'installation compensée.

On arrive à pallier cet inconvénient ainsi que le précédent par la compensation automatique décomposée en gradins (voir plus loin chap IV).



3.6 Quelques exemples de compensation.

a) Compensation du moteur asynchrone,

Une recommandation d'Union Allemande des usines électriques définit les puissances actives et réactives des moteurs asynchrones d'une puissance allant jusqu'à 30 kW en donnant pour chaque puissance active de moteur une puissance de condensateur correspondante (tableau 3-2).

Dans le cas des moteurs de puissance plus grande on recommande de dimensionner les condensateurs en fonction des puissances de la marche à vide. Dans ce cas la puissance des condensateurs ne

doit pas dépasser la puissance réactive absorbée par le moteur, afin d'éviter l'auto-excitation de celui-ci c'est pour cette raison qu'on propose de compenser à 90% de la puissance réactive à vide. La capacité du condensateur à placer est selon la formule ci-dessous.

$$Q_c = 0,9 I_0 U \sqrt{3} \text{ [VAR]},$$

où : Q_c - puissance du condensateur en VAR
 I_0 - courant à vide du moteur en A
 U - tension entre phase en V

Tableau 3-2. Puissance des condensateurs à installer en fonction de la puissance nominale des moteurs asynchrones de $P \leq 30 \text{ kW}$

Puissance nominale des moteurs en (kW)	Puissance des condensateurs à installer en (kVAR)
4	2
5,5	2
7,5	3
11	3
15	4
18,5	7,5
22	7,5
30	10

b) Compensation de transformateur de puissance
 La compensation des pertes magnétiques du transformateur est obtenue en raccordant direc-

tement et en permanence aux bornes du secondaire une batterie de condensateur sans appareil de coupure, dans ce cas la décharge du condensateur se fait à travers l'enroulement du transformateur. Le tableau 3.3 donne la puissance recommandée pour le condensateur en fonction de la puissance nominale du transformateur pour des différentes tensions d'alimentation.

Tableau 3-3. Puissance du condensateur recommandée en fonction du type de transformateur.

Puissance du transformateur (kVA)	Puissance du condensateur en kVAR pour une tension (cote HT)		
	< 10 kV	10 à 20 kV	> 20 kV
25	2	2,5	-
50	3,5	5	-
75	5	6	-
100	6	8	10
160	10	12,5	15
250	15	18	22
315	18	20	24
400	20	22	26
630	28	32	40
1000	45	50	55

c) Compensation d'appareillage d'alimentation des lampes fluorescentes.

En fonction des constructeurs, les condensateurs qu'on utilise pour la compensation d'énergie

réactive due à l'appareillage d'alimentation, prennent des valeurs différentes pour arriver à compenser à un $\cos\phi = 0,9$ ou jusqu'à $0,95$, le tableau 3-4 donne les valeurs de la batterie de condensateur à installer.

Tableau 3-4. Puissance du condensateur à installer pour un $\cos\phi$ désiré

Puissance en (W) (Lampe seule)	Puissance du condensateur en VAR pour un $\cos\phi$ désiré		
	0,90	0,92	0,95
2 x 20	44	49	52
40	56	61	64
65	92	100	104
85	180	190	197
100	260	270	278

Dans ce cas là on utilise soit la compensation individuelle de chaque lampe soit au niveau d'un groupe de lampes d'un circuit, soit une compensation centrale au niveau d'un tableau divisionnaire.

CHAPITRE IV DISPOSITIFS DE COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE

1.1. Généralités

L'utilisation des condensateurs de puissance pour la compensation de l'énergie réactive est actuellement très répandue. Leur branchement nécessite une protection contre les surtensions et les surintensités qui peuvent se produire dans le réseau, soit accidentellement, soit par certaines manœuvres.

La compensation Centrale est la plus utilisée dans le cas d'une installation importante, mais elle est mal adaptée aux variations d'énergie réactive consommée. Par la régulation on arrive à compenser celle-ci suivant le besoin.

Dans ce chapitre nous représenterons les principaux éléments d'un dispositif de compensation, les moyens de régulation de l'énergie réactive et nous donnerons par la suite des exemples de compensation

d'installation BT et MT.

4.2. Condensateurs et leurs caractéristiques

a) Capacité

Pour un condensateur plan idéal fig 4-1 la capacité se calcule suivant la formule :

$$C = \epsilon \frac{A}{d}, [F].$$

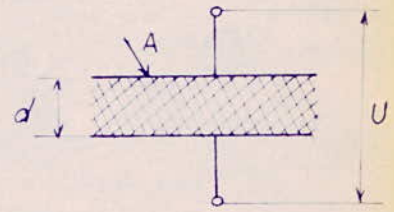


Fig. 4-1 Condensateur plan

où: A - surface d'une armature, $[m^2]$

d - distance entre armature, $[m]$

ϵ - constante diélectrique, $[\frac{As}{Vm}]$

b) Pertes d'énergie dans un condensateur.

Elle comprennent principalement les pertes diélectriques auxquelles vient s'ajouter l'effet joule dans les armatures.

Du schéma équivalent du condensateur réel présenté dans la fig 4-2, on peut déduire le diagramme de celui-ci (fig 4.3) et les expressions suivantes.

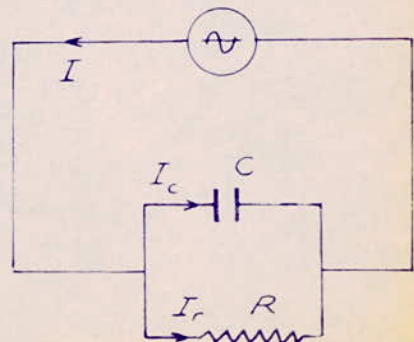


Fig. 4-2. Schéma équivalent du condensateur réel.

$$P_{\delta} = UI \cos \varphi = UI = UI \tan \delta$$

$$P_{\delta} = U \cdot UC \omega \tan \delta = U^2 C \omega \tan \delta$$

$$P_{\delta} = Q \cdot \tan \delta$$

où : δ - angle de perte

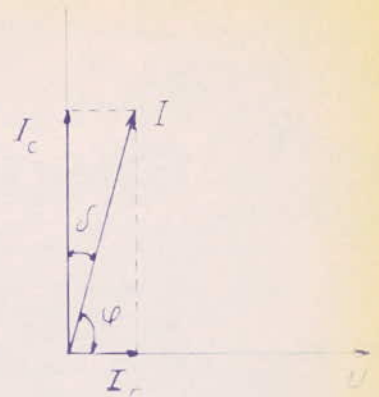


Fig. 4-3. Diagramme vectoriel du condensateur réel.

Cet angle qui permet de chiffrer les pertes diélectriques est une constante caractéristique du diélectrique et varie en fonction de la température.

En général les pertes diélectriques sont très petites, elles ne dépassent pas 3W/kVAR à 20°C.

4.2.1. Formules

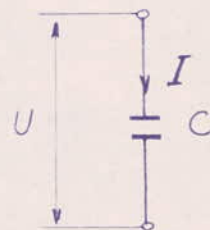
a) Puissance réactive

Un condensateur de capacité C , soumis à une tension U fournit l'énergie :

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

$$Q_c = UI$$

$$Q_c = \frac{I^2}{C \omega}$$



b) Temps de décharge d'un condensateur.

Si un condensateur chargé est lié à une résistance

R il se décharge suivant une fonction exponentielle. Après le temps t la tension entre les bornes du condensateur est :

$$U_{c2} = U_{c1} \cdot e^{-t/T}$$

où : T - constante de temps $T = RC$ [A]

U_{c2} - tension restante entre les bornes du condensateur chargé

U_{c1} - tension initiale aux bornes du condensateur chargé.

C'est au bout du temps t égal à l'infini que le condensateur se décharge complètement. Mais pratiquement on peut admettre que le condensateur est déchargé au bout du temps t égale à $5T$.

Exemple, [23] le temps de décharge d'un condensateur monophasé dont la puissance est de 1,67 kVAR et la capacité nominale $C = 110 \mu\text{F}$, la résistance de décharge $R = 250 \text{ k}\Omega$ est égale à $t = 5T = 5RC$

$$\text{d'où } t = 5 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 110 \cdot 10^{-6} = 137,6 \text{ A}$$

c) Résistance de décharge

Pour le calcul des résistances de décharge dans un condensateur basse tension monophasé les normes VDE 0560 proposent la formule suivante :

$$R = \frac{1}{C} \frac{60}{\ln 1,15 U_n - \ln \frac{50}{\sqrt{2}}}$$

• Cette formule suppose que le condensateur basse

tension se décharge au bout d'une minute à une tension de 50V (tension considérée non dangereuse pour la sécurité du personnel). Puis elle suppose que la tension de service était de 15% plus élevée que la tension nominale.

4.2.2. Protection des condensateurs

a) Appareils de manœuvre

La coupure de courant capacitif est malaisée surtout dans le cas où celle-ci se produit à l'instant où la tension du réseau est maximale (courant dans la batterie nul) et que le condensateur reste chargé sous cette tension. De ce fait les bornes de l'appareil de coupure sont soumises à une tension double. Si la distance de séparation des contacts (appareil en cours de manœuvre d'ouverture) et si la rigidité diélectrique du milieu sont insuffisantes pour tenir cette tension il y a réamorçage d'arc, ce qui donne naissance à des surtensions et surintensités d'amplitudes de plus en plus élevées au fur à mesure que le nombre de réamorçages augmente. Ce même phénomène peut se produire à la fermeture si les contacts rebondissent et amorcent un arc.

Pour éviter ces inconvénients on utilise pour les condensateurs comme appareils de manœuvre les types à grande vitesse de séparation et de fermeture de contacts où à

résistance d'arc élevée.

b) Protection contre les défauts internes.
On utilise des fusibles ou des disjoncteurs.
Dans le cas de condensateurs BT, des fusibles propres à chaque élément sont incorporés dans l'appareil, leur fonctionnement ne donne lieu à aucune manifestation extérieure.

Dans le cas des batteries de condensateurs HT les fusibles peuvent être généraux ou individuels.

Une autre méthode de protection contre les défauts internes est constituée par les montages différentiels. On divise la batterie en deux étoiles équilibrées. Un relais de déséquilibre mesure la tension entre deux points homologues des deux circuits.

c) Réglage des protections - valeurs habituelles

- Fusibles $2 \text{ à } 3 I_n$

- Disjoncteur $\left\{ \begin{array}{l} \text{thermique } 1,3 I_n \\ \text{magnétique } 3 \text{ à } 6 I_n \end{array} \right.$

- Relais de déséquilibre de tension de déclenchement pour $\Delta U = 10\%$.

d) Surintensité à l'enclenchement [24]

Lorsqu'une batterie de condensateur est branchée brusquement sur un réseau (fig 4-3) il se produit un courant transitoire I et de très courte durée dont la valeur de crête est.

$$I = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \sqrt{\frac{C}{L}}$$

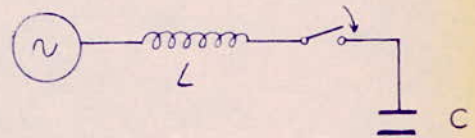


Fig. 4-3. Cas d'une batterie de condensateur

où : U - tension entre phase

C - capacité d'une phase de la batterie

L - inductance du réseau en amont de la batterie par phase.

Dans le cas où n batteries de condensateurs identiques sont déjà branchées et que l'on met en service une batterie supplémentaire (fig 4-5) l'intensité de crête I traversant la dernière batterie est :

$$I = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \frac{n}{n+1} \sqrt{\frac{C}{L_1}}$$

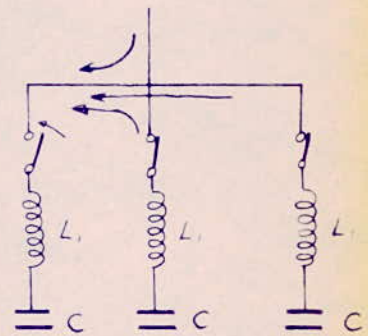


Fig. 4-5. Cas de plusieurs batteries de condensateurs

où L_1 - inductance par phase reliant chaque batterie à la source commune, en MT on peut

prendre $L_1 = 0,65 \mu\text{H}/\text{m}$ pour un câble et $1,3 \mu\text{H}/\text{m}$ pour un jeu de barres.

Ceci est dûe à la décharge des n batteries déjà en service dans la batterie que l'on enclenchera.

Lorsque les surintensités dues à l'enclenchement sont jugées incompatibles avec le bon comportement des condensateurs ou de l'appareillage, le moyen pour réduire l'intensité du courant transitoire du circuit est l'adjonction d'une bobine d'inductance dite de "choc".

d) Inductance de décharge.

Les unités de condensateurs ont leurs propres résistances de décharge mais l'action de ces dernières est relativement lente.

Lorsque les mises hors et en service des condensateurs peuvent se succéder à des intervalles de temps très courts des dispositions doivent être prises pour que lors de la remise sous tension, la tension résiduelle aux bornes des condensateurs ne dépasse pas 10% [25] de la tension nominale. Des décharges plus rapides peuvent être obtenues par l'emploi de réactances de décharges.

e) Influence des courants à fréquences harmoniques.

La tension d'un réseau, n'est en pratique

jamais purement sinusoïdale. A la fondamentale se superposent des tensions à fréquences harmoniques dont les plus importantes sont celles du rang 5 et 7. Le courant I_i correspondant à chaque harmonique est proportionnel à sa tension et à son rang, le courant circulant prend donc la forme $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots}$ qui traduit la présence d'une surintensité. Il en découle deux conséquences possibles.

L'impédance $\frac{1}{C\omega}$ des condensateurs est d'autant plus faible que le rang de l'harmonique est plus élevé le risque de surintensité est accru à leur niveau. C'est la raison pour laquelle la Norme (NF C54.100) prévoit que les condensateurs doivent pouvoir supporter 30% de surcharge permanente.

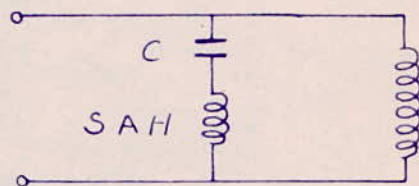
La batterie peut constituer avec les inductances du réseau un circuit résonant à une fréquence voisine de certains harmoniques, il peut y avoir une amplification notable de tension harmonique. Par exemple si l'impédance du réseau est négligeable vis à vis de celle du transformateur aux bornes duquel est branchée la batterie, la fréquence pour laquelle peut se produire la résonance est h fois la fréquence fondamentale, h étant défini par la relation suivante, [26]:

$$\frac{P}{Q} = h^2 \frac{x}{100}$$

où : P - puissance du transformateur
 Q - puissance de la batterie
 x - réactance du transformateur évaluée en %

Pour éviter cet inconvénient, on peut placer une inductance dite "Self antiharmonique" (S.A.H) (fig 4-5). En pratique, on utilise très fréquemment les S.A.H sur les batteries HT et pratiquement jamais sur les batteries BT.

Fig. 4-6. branchement d'une self antiharmonique



4.2.3. Différents types de condensateurs

a) Condensateurs BT.

D'après le constructeur ALSTHOM SAVOISIENNE, [27], les condensateurs basse tension sont de deux types suivants:

- Condensateurs en élément pour les puissances de 0,835 (mono) et 2,5 (trip) à 15 kVAR en 220V.
- Condensateurs en boîtiers pour les puissances de 10 à 25 kVAR en 380V et 30 à 50 kVAR en 500V.

b) Condensateur MT

Le tableau 4-1 donne les caractéristiques de condensateur MT normalisées par E.D.F.

Tableau 4-1 caractéristiques des unités de condensateur MT, [28].

type	A	B	C	D
tension en kV	2	2,9	5,8	8,7
Puissance en kVAR	13,8	20	20	20
Capacité en μF	11	7,58	1,9	0,84

4.3. Régulation de la puissance réactive

La régulation consiste à ajuster la fourniture de puissance réactive suivant le besoin en fonction de $\cos \varphi$. Pour cela on subdivise les batteries de condensateurs en gradins de faibles puissance dont le nombre mis sous ou hors tension dépendra de l'énergie réactive demandée. La régulation pourra s'effectuer grâce à une adaptation à la consommation par échelons, plus le nombre d'échelons est grand plus le réglage est fin. On utilise de nos jours presque exclusivement une division en échelons égaux. Cette régulation se fait, soit manuellement, soit automatiquement.

a) Régulation à commande manuelle.

La mesure du $\cos \varphi$ se fait à l'aide d'un phasemètre sur le cadran duquel un opérateur peut voir les variations du facteur de puissance. Suivant la valeur lue, il enclenchera ou déclenchera le nombre de gradins nécessaire à la compensation.

b) Régulation automatique

On mesure à chaque instant la puissance réactive absorbée par l'ensemble de l'installation à l'aide d'un relais varométrique. Ce résultat est obtenu en faisant la somme des énergies réactives fournies par le réseau et par la batterie. Pour cela, le relais doit mesurer la somme des courants, de l'installation à compenser, et des condensateurs. Suivant la valeur de sa mesure, ce relais commande automatiquement l'enclenchement des gradins en fonction de la charge et du $\cos \varphi$ désiré. Le schéma de principe de la régulation est présenté dans la fig 4-7.

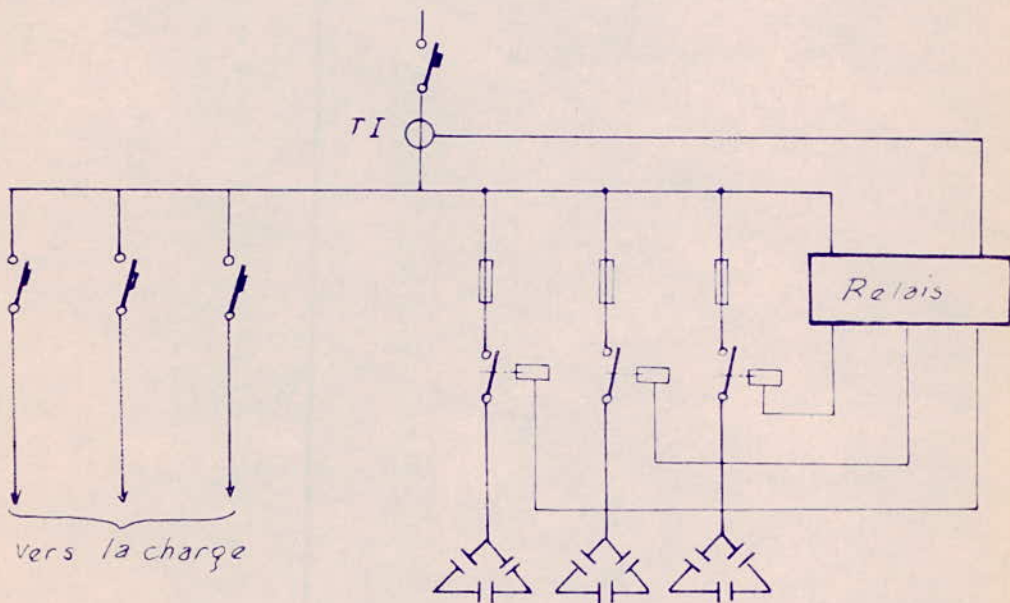


Fig. 4-7. Schéma de principe d'une installation automatique

La compensation automatique évite le renvoi de l'énergie réactive sur le réseau du fournisseur et

les surtensions dangereuses pour le circuit d'éclairage lors des marches à faible charge de l'installation.

4.4. Branchements et protections des condensateurs : [29], [30], [31].

N'ayant pas de règles fixes pour le branchement des condensateurs, on applique à chaque cas un mode de branchement adéquat. Il sera bon, dans tous les cas, d'en référer au secteur qui applique très souvent une réglementation particulière pour ce genre de branchement.

4.4.1. Branchement de condensateurs en BT.

Le coût des batteries augmentent sensiblement lorsque la tension entre bornes décroît au dessous de 500V. Ceci conduit à adopter systématiquement en BT un montage en triangle (figs. 4-8 et 4-9)

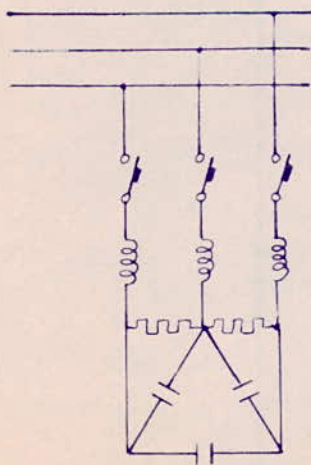


Fig. 4-8. Branchement avec disjoncteur et inductance de choc

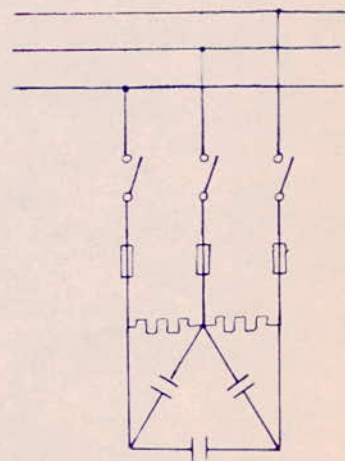


Fig. 4-9. Branchement direct interrupteur et fusible

a) Application pour moteur à démarrage étoile-triangle.

Les condensateurs de compensation peuvent être branchés aux bornes (UVW) du moteur reliées au réseau (fig. 4-10). Ils peuvent aussi être reliés aux bornes (XYZ) formant le point neutre pendant le démarrage en étoile. (fig. 4-11).

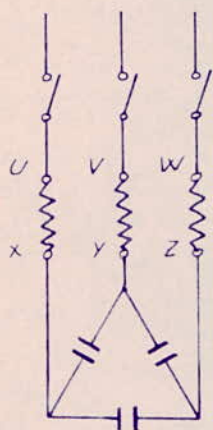


Fig. 4-10. Branchement aux bornes (XYZ).

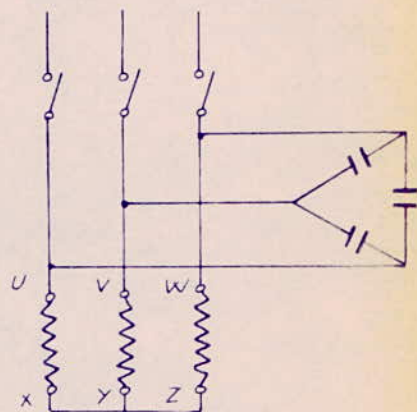


Fig. 4-11. Branchement aux bornes (UVW).

Dans le premier cas on risque de provoquer des phénomènes d'auto-excitation pendant le déclenchement, c'est à dire lorsque le moteur est en étoile tout en le séparant du réseau.

Dans le deuxième cas il peut arriver qu'au moment de l'ouverture du point neutre, le condensateur soit en série avec les enroulements du moteur et entre en résonance avec lui.

En vue d'éviter ces inconvénients on peut brancher cette batterie (à phase séparées) directement aux bornes du moteur, de telle sorte

qu'elle soit commutée d'étoile en triangle en même temps que le moteur (fig 4-12).

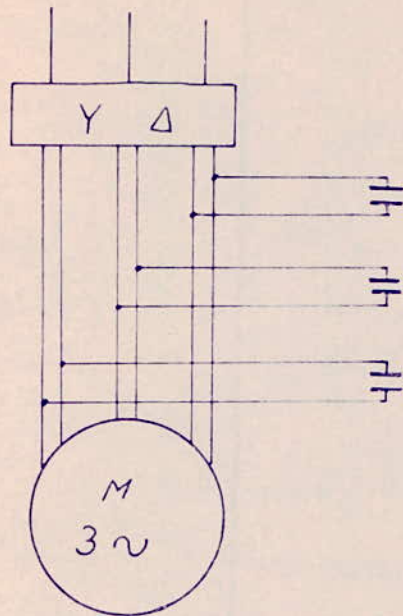


Fig. 4-12. Compensation d'un moteur à démarrage étoile triangle.

4.4.2. Branchement de condensateurs en MT.

Le branchement des batteries de condensateurs dans les postes HT/MT s'effectue :

- Soit en batteries non fractionnées lorsque la puissance réactive installée est inférieure ou égale à 3000 kVAR en 20kV et 2400 kVAR en 15kV (fig 4-13).

- Soit en batteries fractionnées : lorsque la puissance réactive installée dans le poste excède 3000 kVAR en 20kV et 2400 kVAR en 15kV (fig.4-14).

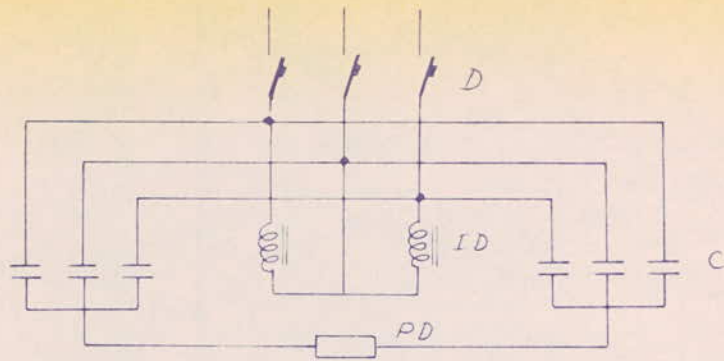


Fig 4-13. Batterie non fractionnée

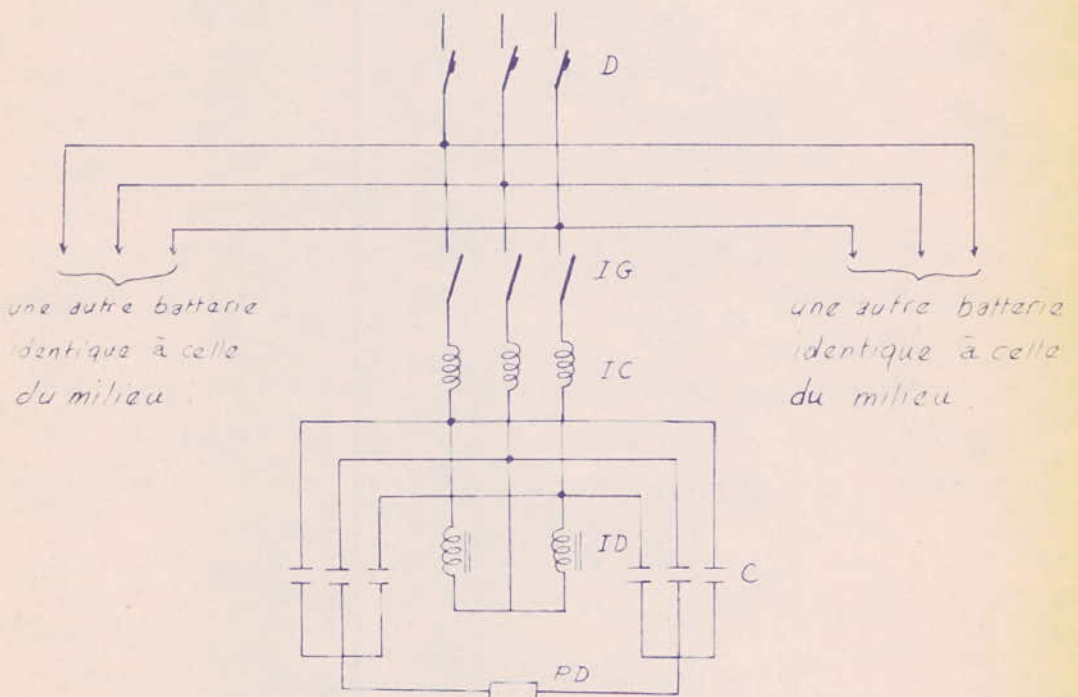


Fig 4-14. Batterie fractionnée

- D - Disjoncteur "départ batterie de condensateurs"
 IG - Interrupteur de gradin
 C - Condensateur
 ID - Inductance de décharge
 IC - Inductance de choc
 PD - Protection différentielle (relais voltométrique
 ou TC pour protection différentielle ampèremétrique.

CONCLUSION

L'étude que nous venons de faire met en évidence les problèmes qu'engendre la consommation d'énergie réactive et les répercussions de celle-ci sur les différentes parties des réseaux. Elle montre en contre partie la nécessité de la compensation et les problèmes qu'elle permet d'éliminer.

Cette étude nous a permis de ressortir les conclusions suivantes:

- 1) Le mauvais facteur de puissance entraîne des frais d'investissement sur l'équipement électrique divers tels que (lignes, transformateurs, appareillages de coupure et de protection) car un courant important entraîne un surdimensionnement de ces derniers. En même temps pendant l'exploitation, La consommation d'énergie devient importante. Lorsque le facteur de puissance est plus bas que 0,857 il y a pénalisation pour l'abonné.

2) Les plus courants récepteurs ayant faible facteur de puissance sont ceux ayant un caractère inductif en particulier; les moteurs asynchrones, les transformateurs, appareils de soudure, appareils d'éclairage fluorescent.

3) L'amélioration du facteur de puissance se fait en pratique par des condensateurs statiques de capacité appropriée. Quelque fois elle s'effectue par des machines synchrones qui ne sont rentables que pour les récepteurs de très grande puissance.

4) Pour éviter le renvoi de l'énergie réactive sur le réseau la régulation du facteur de puissance se fait au moyen d'un dispositif de régulation automatique dont le rôle est de choisir la capacité (le nombre de condensateur) correspondant en fonction de la valeur du $\cos\varphi$ qu'il mesure.

Bibliographie

- [1] : NORME FRANCAISE : NFC 01-005 octobre 1957, Vocabulaire électrotechnique, groupe 05, définitions fondamentales, publié par le comité électrotechnique français - édition 1965.
- [2],[5],[13],[24] : PELISSIER. R : Les réseaux de l'énergie électrique, tome I - les aspects techniques du service - édition Dunod, Paris 1971.
- [3] : KUPFMULLER. K : Electricité théorique et application (traduction d'Allemand) - édition Dunod, Paris 1959.
- [6],[10] : M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI : Machines électriques tome II, édition de Moscou
- [7] : SIEMENS : "Formel und Tabellen Buch für Starkstrom Ingenieuren" 3^e édition.
- [8] : E. GILLON : Cours d'électrotechnique 3^e partie, Centrales, réseaux - Application divers - édition Dunod Paris 1959
- [4],[9],[17],[18] : GILBERT. LECAL et PIERRE. MEYMAUD : Compensation de l'énergie réactive des installations industrielles, Technique de l'ingénieur D 730.
- [11],[28] : Electricité de France : Direction des études et recherches - classement OT-ERE : I - Diffusion général 7 janvier 1959.
- [12] : LEROY. SOMER : Moteurs asynchrones triphasés B 10 - 1/1 juillet 1970.
- [14] : A. BLUM : Cahiers techniques, production et distribution d'énergie réactive N°26 classe B - édition novembre 1973

- [19] : TARIF W5 (Général et Appoint) SONELGAZ . Direc-
tion technico - commerciale (AIDE - MEMOIRE) .
- [20],[23] : SIEMENS : Kondensatoren, Katalog K . Janvier 1974 .
- [21],[29] : Condensateur FRIBOUR : Basse tension , bases
techniques - Amélioration du facteur de puissance .
- [25],[26] : NORME FRANCAISE : Condensateur de puissance .
(NF C54-100) Janvier 1970 .
- [27],[30] : Fiches techniques : ALSTHON SAVOISIENNE .
FC 505 Janvier 1970 et FC 515 Avril 1976 .
- [31] : Guide Technique de la distribution (E.D.F.-B54-1),
condensateurs MT et appareillage annexe