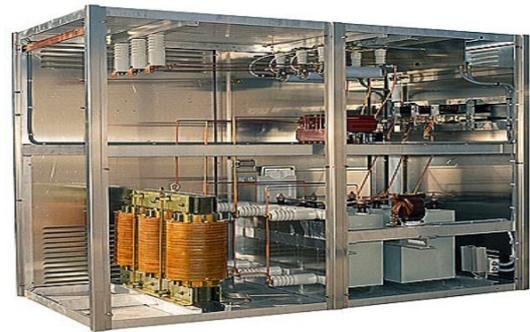


Cours : Compensation de l'énergie réactive



Réalisé par : Mme AITOUARET Née CHEKKAL
Samira

Table des matières



| | |
|---|-----------|
| Objectifs | 3 |
| I - Chapitre III : Etudes et Analyse des différents moyens de compensation | 4 |
| 1. Introduction | 4 |
| 2. Compensation et contrôle de la tension | 4 |
| 3. Rapports entre la puissance active, la puissance réactive, les niveaux de tension et l'angle de charge | 6 |
| 4. Compensation de l'énergie réactive | 8 |
| 4.1. Capacité série | 8 |
| 4.2. Capacité shunt | 9 |
| 4.3. Réactance Shunt | 10 |
| 4.4. Compensateurs synchrones | 10 |
| 5. Intérêts de la compensation d'énergie réactive | 11 |
| 5.1. Suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive | 11 |
| 5.2. Réduction de la puissance souscrite (en kVA) | 11 |
| 5.3. Diminution des pertes dans les conducteurs à "puissance active constante" | 11 |
| 5.4. Diminution des pertes dans les conducteurs à "puissance active constante" | 12 |
| 5.5. Augmentation de la puissance active transportée à "courant apparent constant" | 13 |
| 5.6. Diminution de la chute de tension | 13 |
| 6. Choix du mode de compensation | 14 |
| 7. Installation des condensateurs | 14 |
| 7.1. Installation des condensateurs dans les postes THT/HT | 14 |
| 7.2. Installation des condensateurs MT | 16 |
| II - Exercice | 18 |
| III - Activité d'auto-évaluation | 19 |
| Solution des exercices | 21 |
| Bibliographie | 22 |

Objectifs



A l'issue de ce cours l'apprenant sera capable de :

- La maîtrise et la compréhension du contrôle de la puissance réactive et réglage de tension dans les réseaux électriques ;
- Prendre les mesures nécessaires afin d'éviter les dysfonctionnements intempestifs du réseau pouvant aboutir à la rupture totale de fourniture de l'énergie électrique en mettant en œuvre les techniques et moyens modernes de compensation de l'énergie réactive.

Chapitre III : Etudes et Analyse des différents moyens de compensation



| | |
|--|----|
| Introduction | 4 |
| Compensation et contrôle de la tension | 4 |
| Rapports entre la puissance active, la puissance réactive, les niveaux de tension et l'angle de charge | 6 |
| Compensation de l'énergie réactive | 8 |
| Intérêts de la compensation d'énergie réactive | 11 |
| Choix du mode de compensation | 14 |
| Installation des condensateurs | 14 |

1. Introduction

Le terme compensation est utilisé pour décrire l'insertion intentionnelle des dispositifs de la puissance réactive, capacitive ou inductive, à un réseau électrique pour obtenir un effet désiré. Cela peut inclure l'amélioration du profil de la tension, l'amélioration du facteur de puissance, l'augmentation des performances de la stabilité, et l'amélioration de la capacité de transmission. Les dispositifs réactifs sont connectés soit en série ou en parallèle (shunt).

2. Compensation et contrôle de la tension

La figure 1.a montre un diagramme unifilaire d'un système à courant alternatif qui pourrait représenter en même temps un système monophasé ou une phase d'un système triphasé. La figure 1.b montre le diagramme de phase pour une charge inductive.

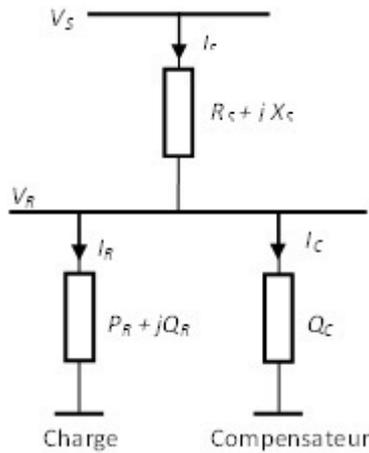


Fig III.1.a Modèle d'une ligne radiale avec compensateur

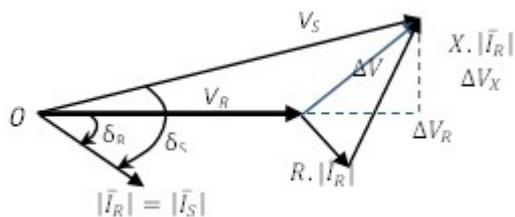


Fig III.1.b Diagramme de phase sans compensation

La charge peut être mesurée par son courant I_R , mais dans les systèmes de puissance, c'est la puissance réactive Q de la charge qui est responsable de la chute de tension. À partir des figures 1.a et 1.b,

$$\Delta V = V_s - V_R = Z_s I$$

math

Où I est le courant de charge donné par l'expression

$$I = \frac{P_R - jQ_R}{V_R} \quad (2)$$

math_02

Dans le cas où

$$V_R = V_R + j0$$

math_03

supposée comme l'origine des phases, on peut écrire

$$\Delta V = (R_s + jX_s) \left(\frac{P_R - jQ_R}{V_R} \right) = \frac{R_s P_R + X_s Q_R}{V_R} + j \frac{X_s P_R - R_s Q_R}{V_R} = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (3)$$

math_04

La chute de tension ΔV a une composante ΔV_R en phase avec V_R et une composante ΔV_X en quadrature avec V_R . Ainsi, ΔV dépend de la puissance active et réactive de la charge.

En ajoutant une impédance de compensation ou un 'compensateur ' en parallèle à la charge, il est possible de maintenir $|V^-_R|=|V^-_S|$

Sur la Figure 7, ceci est accompli avec un compensateur purement réactif. La puissance réactive de la charge est remplacée par la somme $Q_s=Q_R+Q_C$, (Q_C la puissance réactive du compensateur) est ajustée de façon à pivoter la phase de ΔV^- jusqu' à $|V^-_R|=|V^-_S|$.

Des équations (1) et (3),

$$|V_S|^2 = \left[V_R + \frac{R_S P + X_S Q_S}{V_R} \right]^2 + \left[\frac{X_S P - R_S Q_S}{V_R} \right]^2 \quad (4)$$

math_07

Un compensateur purement réactif peut éliminer des variations de tension provoquées par des changements des puissances active et réactive de la charge.

Pourvu que la puissance réactive du compensateur Q_C puisse être commandée sans difficulté sur une plage suffisamment grande (à la fois en retard et en avance) et à un taux adéquat, le compensateur peut jouer le rôle d'un régulateur idéal de tension.

Un compensateur peut être utilisé pour la correction du facteur de puissance. Par exemple, si ce dernier est corrigé à l'unité, $Q_s=0$ et $Q_C=Q$, la chute de tension peut être exprimée comme suit :

$$\Delta V = (R_S + jX_S) \frac{P_R}{V_R} \quad (5)$$

math_08

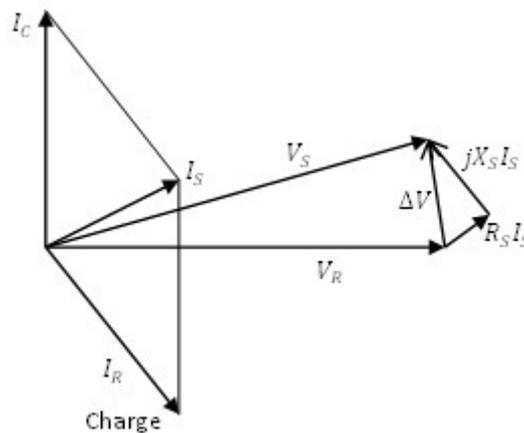


Fig.III.2 Diagramme de phases d'une ligne compensée pour tension constante

3. Rapports entre la puissance active, la puissance réactive, les niveaux de tension et l'angle de charge

supposant que la charge a un facteur de puissance en retard φ . La ligne ou le câble est représenté par son impédance $R_S + jX_S$ et R_S est négligée (étant habituellement beaucoup plus petite que X_S). La chute de tension à travers la ligne de transmission est $jX_S I_S$ et avec un déphasage de 90° en avance de I . Le diagramme de phases pour une ligne inductive est montré sur la figure 3.

L'angle entre V_S et V_R est l'angle de charge δ et

$$\left\{ \begin{array}{l} V_S \cos \delta = V_R + X_S I \sin \varphi \\ V_S \sin \delta = X_S I \cos \varphi \end{array} \right. \quad (6)$$

Aussi

$$P + jQ = V_R \vec{I} = V_R I \cos(\varphi) + jV_R I \sin(\varphi) \quad (7)$$

L'équation de la puissance

$$P = \frac{V_S V_R}{X_S} \sin(\delta) \quad (8)$$

math_15

et l'équation de la puissance réactive au récepteur est

$$Q_R = V_R \frac{V_S \cos(\delta) - V_R}{X_S} \quad (9)$$

math_16

Évidemment, $P = P_s = P_r$, tant que les pertes de transmission sont négligeables. A l'extrémité de départ,

$$P_s + jQ_s = V_S I \cos(\varphi + \delta) + jV_S I \sin(\varphi + \delta) \quad (10)$$

math_17

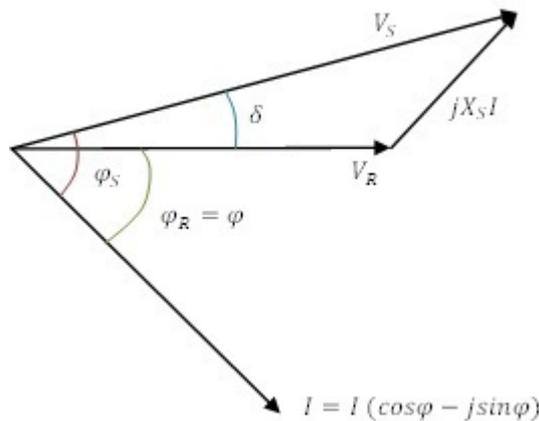


Fig.III.3 Diagramme des phases pour une ligne inductive

Alors

$$Q_s = V_S I (\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi) \quad (11)$$

math_18

De l'équation (6), l'équation (11) peut s'écrire sous la forme

$$Q_s = V_S \sin \delta \frac{V_S \sin \delta}{X_S} + V_S \cos \delta \frac{V_S \cos \delta - V_R}{X_S} \quad (12)$$

math_19

Enfin

$$Q_s = V_s \frac{V_s - V_R \cos \delta}{X_s} \quad (13)$$

math_20

4. Compensation de l'énergie réactive

Les dispositifs réactifs sont connectés soit en série ou en parallèle (shunt).

4.1. Capacité série

La capacité série est utilisée pour neutraliser une partie de la réactance inductive d'un réseau électrique. Cela est illustré dans la figure 4. À partir du diagramme vectoriel de la figure 5, on peut voir que la tension à la charge est plus élevée quand la capacité est insérée dans le circuit.

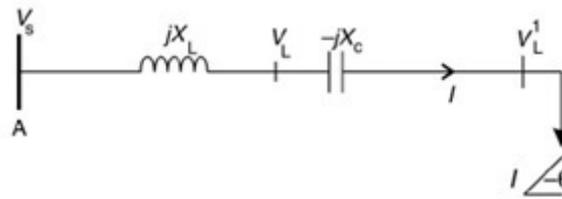


Fig.III.4 Compensation avec capacité série

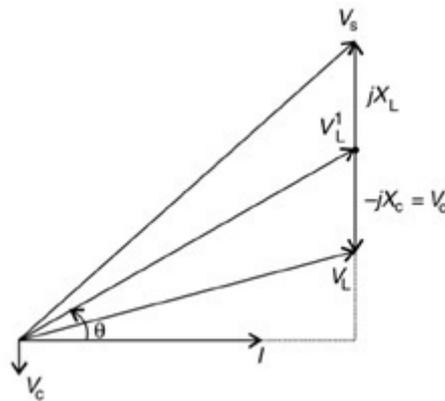


Fig III.5 Diagramme vectoriel

L'introduction de la capacité série dans un réseau réduit la réactance X , augmente la tension à la charge ainsi que la capacité de transmission de la ligne. La capacité série offre les avantages suivants dans le réseau :

- La tension améliorée ;
- La stabilité augmentée ;
- La puissance réactive contrôlée.

4.2. Capacité shunt

Les capacités shunts fournissent de la puissance réactive capacitive au système au point où elles sont connectées, principalement pour exploiter les longues lignes au-dessus de leur puissance naturelles (requis par une charge inductive). La figure 6 illustre un circuit avec compensation par condensateur shunt appliqué sur le côté charge.

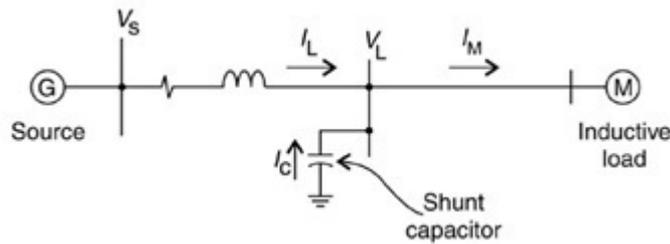


Fig III.6 Compensation avec capacité shunt

Se référant au diagramme de phase de la figure 7, le courant de ligne I_L est la somme du courant de la charge du moteur I_M et le courant du condensateur I_C .

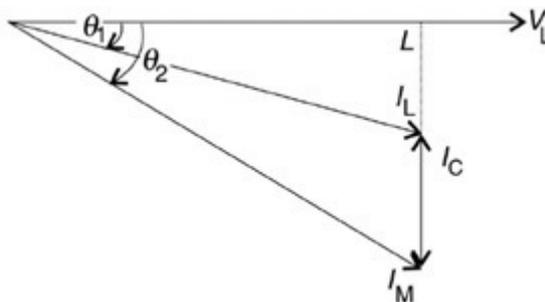


Fig III.7 Diagramme vectoriel

Il peut être vu que le courant de ligne est diminué par l'ajout du condensateur shunt. L'angle entre la tension de charge et le courant est passé de θ_2 à θ_1 . La figure 8 montre la phase de la tension correspondante.

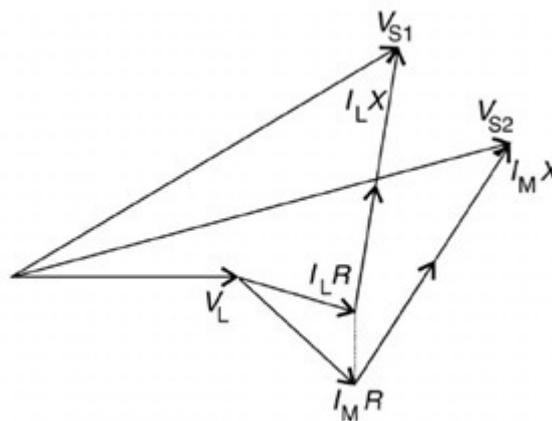


Fig III.8 Diagramme vectoriel

Il peut être vu de ce qui précède que l'insertion de condensateurs shunts dans un réseau présente les avantages suivants:

- Augmenter le niveau de tension à la charge ;
- Diminution de la puissance fournie par les générateurs de source pour soulager un état de surcharge.
- Réduire les pertes de puissance active RI^2 et les pertes de puissance réactive XI^2 due à la réduction du courant ;
- Augmenter le facteur de puissance ;

4.3. Réactance Shunt

La compensation par réactance shunt est généralement nécessaire sous des conditions qui sont à l'opposé de celles exigées par la compensation par condensateur shunt. Ceci est illustré dans la figure 9. L'inductance shunt peut être installée dans les conditions suivantes:

- Pour compenser les surtensions survenant aux sous-stations desservies par des longues lignes pendant les périodes de faible charge, en raison de la capacité de la ligne (effet Ferranti) ;
- Pour compenser le facteur de puissance en avance dans les usines de production, résultant d'une baisse transitoire ;
- Pour réduire la consommation de puissances des lignes en circuit ouvert dans les systèmes à très haute tension (THT).

L'effet de la réactance shunt sur le diagramme des courants est illustré dans la figure 10.

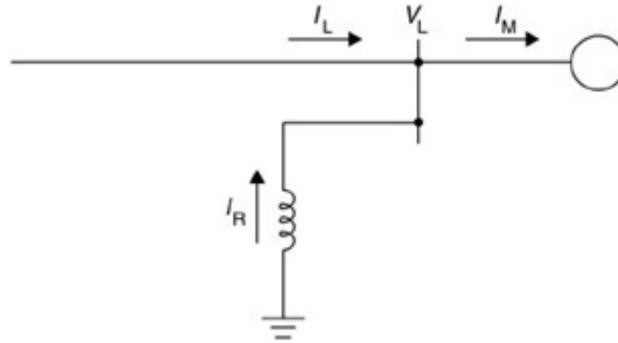


Fig III.9 Réactance shunt de compensation

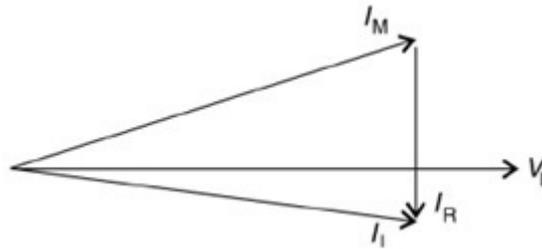


Fig III.10 Effet de la réactance shunt

4.4. Compensateurs synchrones

Ce sont les alternateurs et les moteurs synchrones. En agissant sur le courant d'excitation, on fait varier la puissance réactive de la machine. Pour un fort courant d'excitation, la machine fournit de la puissance réactive ($Q > 0$) et pour un faible courant d'excitation, elle absorbe de la puissance réactive ($Q < 0$). Les machines synchrones peuvent donc fournir une partie de la puissance réactive demandée

5. Intérêts de la compensation d'énergie réactive

5.1. Suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive

Pour les gros consommateurs, l'énergie réactive est facturée au-delà d'un seuil pendant certaines périodes. La quantité d'énergie réactive facturée W_f est égale à :

$$W_f = W_r - W_{gr} = W_a (\tan \varphi - 0,4)$$

math_21

W_r (kVAh): énergie réactive consommée mensuellement pendant la période soumise à limitation

W_a (kWh): énergie active consommée mensuellement pendant la période soumise à limitation

$W_{gr} = 0,4 W_a$: quantité d'énergie réactive livrée gratuitement

La compensation d'énergie réactive permet d'obtenir $\tan \varphi = 0,4$, et ainsi de supprimer les coûts de l'énergie réactive.

5.2. Réduction de la puissance souscrite (en kVA)

Pour les petits consommateurs, le distributeur facture "une prime fixe" qui dépend de la puissance apparente souscrite. Au delà de cette puissance le consommateur paye des pénalités. La compensation d'énergie réactive permet de réduire la prime fixe en diminuant la puissance apparente souscrite.

5.3. Diminution des pertes dans les conducteurs à "puissance active constante"

Les pertes dans les conducteurs sont proportionnelles au carré du courant transporté (perte = $R I^2$) et diminuent au fur et à mesure que le $\cos \varphi$ augmente.

En effet, supposons qu'un conducteur transporte une puissance apparente S , avec :

$$S = VI ; \quad P = S \cos \varphi ; \quad Q = S \sin \varphi$$

math_22

Si on compense, à puissance active constante, de façon à obtenir une puissance apparente S' , avec :

$$S' = VI' ; \quad P' = P = S' \cos \varphi' ; \quad Q' = S' \sin \varphi'$$

math_23

On a alors:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = P'^2 + Q'^2 = S'^2 \cos^2 \varphi' + S'^2 \sin^2 \varphi'$$

math_24

5.4. Diminution des pertes dans les conducteurs à “puissance active constante”

Les pertes dans les conducteurs sont proportionnelles au carré du courant transporté (perte = $R I^2$) et diminuent au fur et à mesure que le $\cos\varphi$ augmente.

En effet, supposons qu'un conducteur transporte une puissance apparente S , avec :

$$S = VI; \quad P = S \cos \varphi; \quad Q = S \sin \varphi$$

math_22

Si on compense, à puissance active constante, de façon à obtenir une puissance apparente S' , avec :

$$S' = VI'; \quad P' = P = S' \cos \varphi'; \quad Q' = S' \sin \varphi'$$

math_23

On a alors:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = P'^2 + Q'^2 = S'^2 \cos^2 \varphi' + S'^2 \sin^2 \varphi'$$

math_24

d'où
$$\frac{S'^2}{S^2} = \frac{1 - \sin^2 \varphi}{\cos^2 \varphi'} = \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi'}$$

or
$$\frac{S'^2}{S^2} = \frac{I'^2}{I^2}$$

d'où

$$\frac{R I'^2}{R I^2} = \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi'}$$

math_27

Les pertes sont donc inversement proportionnelles à $\cos^2 \varphi$.

5.5. Augmentation de la puissance active transportée à “courant apparent constant”

La mise en place de batteries de condensateurs en aval d'un câble (ou au secondaire d'un transformateur) dont la charge a un faible $\cos\varphi$, permet de transporter une puissance active supérieure pour un même courant apparent dans les conducteurs (ou le transformateur).

En effet, supposons qu'un câble (ou un transformateur) transporte une puissance active P, avec :

$$P = \sqrt{3} U_n I \cos\varphi$$

math_28

Si on compense de façon à obtenir $\cos\varphi'$, à courant apparent constant (I constant), on pourra transporter une puissance active :

$$P' = \sqrt{3} U_n I \cos\varphi'$$

d'où
$$\frac{P'}{P} = \frac{\cos\varphi'}{\cos\varphi}$$

Pour un même courant apparent, la puissance active qui peut être transportée est donc proportionnelle à $\cos\varphi$.

5.6. Diminution de la chute de tension

La chute de tension relative dans un câble ou un transformateur triphasé s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{\Delta V}{V_n} = \frac{RP + XQ}{3V_n^2}$$

math_31

R : résistance des conducteurs ou du transformateur

X : réactance du câble ou du transformateur

P : puissance active de la charge

Q : puissance réactive de la charge

V_n : tension simple nominale

La compensation aux bornes de la charge diminue la valeur de Q et donc la chute de tension.

6. Choix du mode de compensation

La figure 11 illustre les différentes possibilités de modes de compensation pratiquement réalisables. On distingue :

- la compensation individuelle: chaque appareil est muni d'un condensateur individuel de puissance appropriée; la détermination de cette puissance nécessite évidemment une mesure préalable de la puissance réactive absorbée par chaque appareil; cette solution est idéale sur le plan technique, mais peut être difficile à réaliser; de plus, elle est parfois onéreuse;
- la compensation par groupe d'appareils: cette solution peut être intéressante pour certains ateliers de grandes usines;
- la compensation globale au niveau basse tension ou moyenne tension: cette solution convient pour les petites installations et parfois pour les grosses installations, notamment dans le cas où l'on a fractionné la batterie en deux ou trois parties (ou gradins) et où la mise en service et hors service de celles-ci est effectuée automatiquement en fonction de la puissance réactive absorbée, mesurée à l'aide d'un relais var métrique.

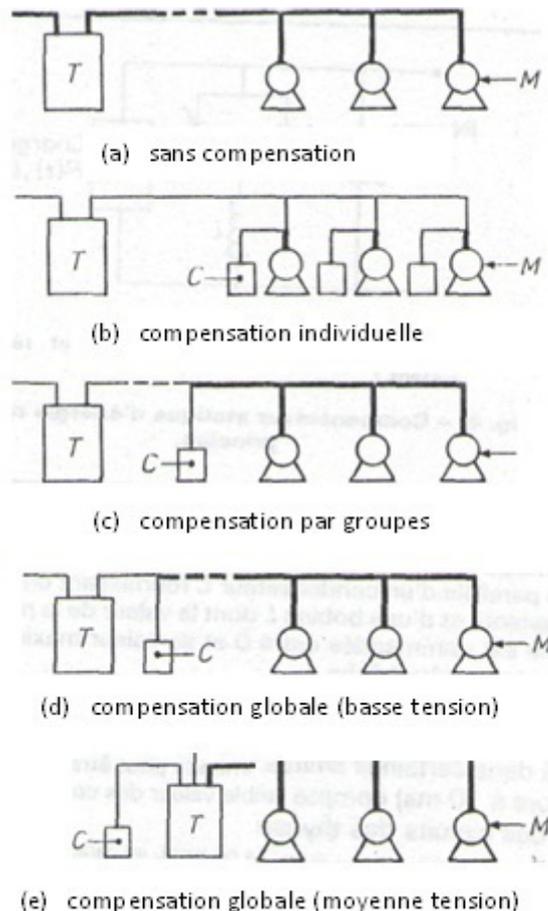


Fig III.11 Représentation schématique des différents modes de compensation

7. Installation des condensateurs

7.1. Installation des condensateurs dans les postes THT/HT

Les batteries de condensateurs HT sont installées, habituellement, sur les jeux de barres HT des postes THT/HT (figure 17).

Une batterie de condensateurs est constituée des matériels suivants :

- un sectionneur d'aiguillage, à commande électrique, par jeu de barres.

- un disjoncteur dont les performances sont adaptées à l'établissement et à la coupure de courants capacitifs.
- trois TC de phase, placés en « aval » du disjoncteur par rapport au jeu de barres et le plus près possible de celui-ci.
- un sectionneur d'isolement avec mise à la terre, placé entre les TC des phases et la batterie.
- trois inductances de choc sont insérées dans les phases de chacune des batteries.
- les deux demi-batteries sont connectées sans coupure côté phase et côté neutre.
- dans la connexion reliant les neutres est inséré un TC spécial alimentant une protection contre les défauts internes qui surveille le courant circulant dans ce TC.
- une protection à maximum de courant de phase et de neutre temporisée pour les défauts d'isolement et les composantes harmoniques excessives.
- une protection à maximum de tension qui contrôle la tension barres aiguillée.

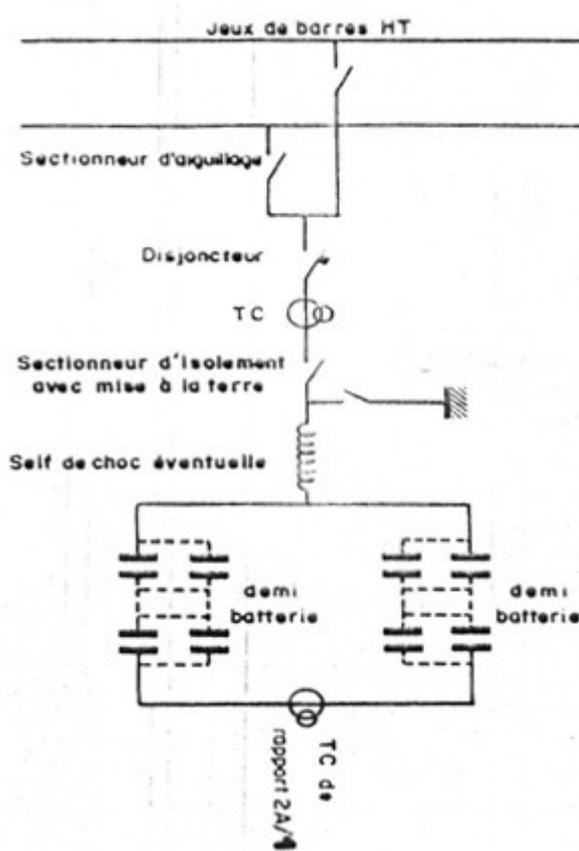
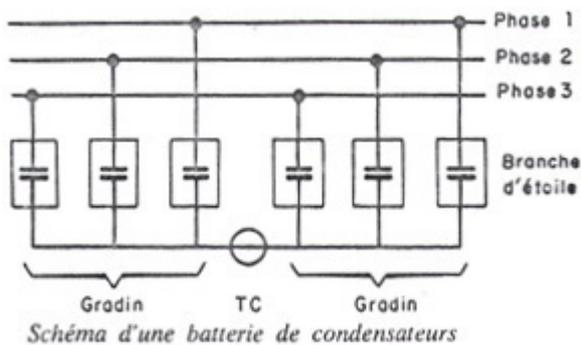


Fig. III.12 Schéma d'installation d'une batterie de condensateurs dans un poste THT/HT



Schema d'une batterie de condensateurs

7.2. Installation des condensateurs MT

Les condensateurs MT, installés dans les postes sources (HT/MT ou THT/MT) de distribution publique, sont regroupés en batteries ; on en installe, en général, une par rame MT (figure 18).

Les puissances installées varient d'un poste à l'autre, en fonction des caractéristiques du réseau amont, du réseau aval et des charges desservies. Les batteries sont raccordées au jeu de barres MT au travers d'un disjoncteur MT débrochable chargé de protéger la batterie contre les défauts électriques (protection ampèremétrique).

Chaque batterie est constituée d'un ou plusieurs gradins (figure 19) sous enveloppe métallique, ces gradins comprennent outre les condensateurs :

- des interrupteurs MT destinés à la manœuvre des gradins (IG),
- des inductances de choc (IC) sont destinées à limiter, sur chaque phase du gradin, la surintensité créée à l'enclenchement par les autres gradins de la batterie. un TC de déséquilibre est installé entre les deux points neutres des deux demi-gradins.

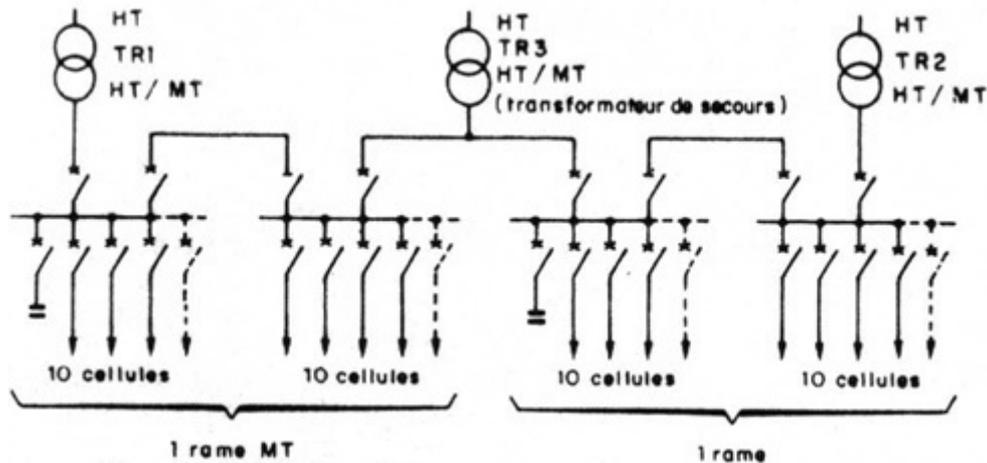


Fig III.13 Installation de condensateurs dans un poste source

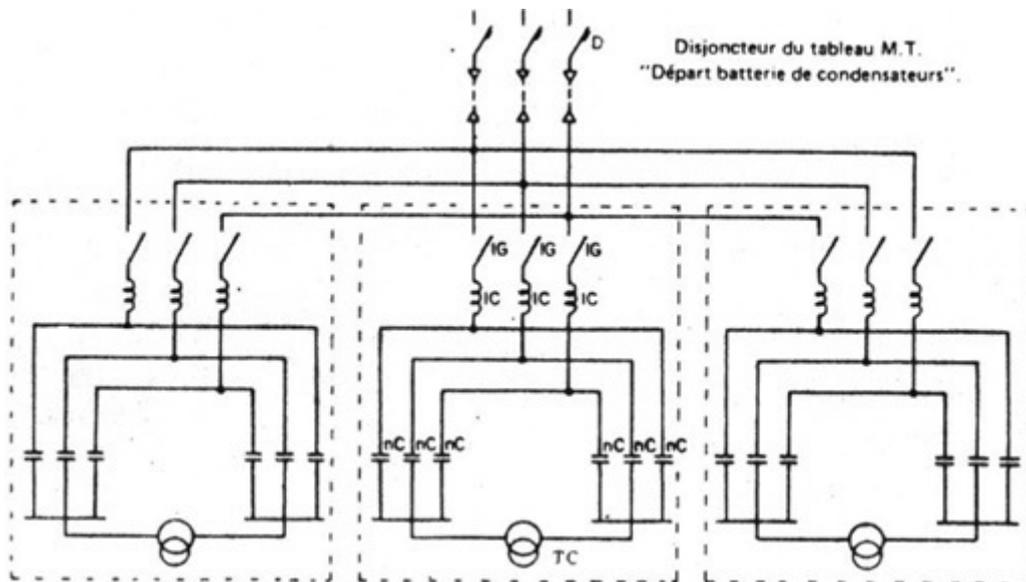


Fig III. 14 Batterie de condensateurs MT en gradins

Produire la puissance réactive à proximité du consommateur présente un intérêt économique évident qui a motivé, depuis très longtemps, l'installation de condensateurs.

Au-delà d'une compensation des charges à $\text{tg}\varphi=0$, on peut installer des condensateurs sur le réseau de transport pour compenser les pertes réactives et leurs variations suivant les aléas. Les condensateurs sont donc appelés à jouer un rôle de plus en plus important dans la maîtrise du plan de tension du réseau à THT et dans la prévention contre tous risques d'écroulement de ce plan de tension.

Cette évolution transparaît dans les méthodes adoptées pour planifier le parc de condensateurs. L'objectif visé est d'obtenir un volume et une localisation des condensateurs permettant de faire face aux incidents simples, à partir d'un plan de tension optimisé en régime permanent, et ce malgré le caractère aléatoire des indisponibilités des ouvrages.

Exercice



Série TD

Exo n° 1;

La réactance série par phase d'une ligne de transport d'énergie est égale à 30Ω . Pour augmenter la capacité de transport de cette ligne, on se propose de diminuer sa réactance inductive par phase de 40%, en introduisant des condensateurs en série dans chaque phase. Le réseau fonctionne à fréquence industrielle et le courant dans la ligne est de 1kA. déterminer la capacité en μF qu'il faut installer par phase. si les condensateurs existants sur le marché sont d'intensité nominale 50A et de tension nominale 2kV, déterminer le nombre de condensateurs à brancher en série et en parallèle pour obtenir la compensation désirée. déterminer la puissance fournie par ces condensateurs et la chute de tension compensée.

Exo n° 2:

Un industriel souscrit un contrat d'une puissance S égale à 84 kVA. La valeur moyenne de $\text{tg}\varphi$ relevée est égale à 0,75. A la pointe de consommation, la puissance atteinte est voisine de la puissance souscrite. Calculer les puissances active P et réactive Q consommées par cette installation à la pointe. La valeur de $\text{tg}\varphi$ est relativement élevée; il est souhaitable de l'améliorer en réduisant $\text{tg}\varphi$ à 0,4 pour diminuer la puissance S à souscrire. Calculer le gain sur la puissance souscrite ; Calculer la puissance de condensateurs à installer dans ce cas ; Peut-on installer une batterie fixe sans risque de surcompensation ;

Exo n° 3:

Une ligne triphasée transporte une puissance à une charge de 1000 kW à un facteur de puissance de 0.6Ar. La tension au niveau de la source est de 13.8 kV à 60Hz. L'impédance de la ligne est de $(0.03+j7.2)\Omega/\text{phase}$. Une capacité série de réactance $6\Omega/\text{phase}$ est insérée à la fin de la ligne pour améliorer le profil de la tension. Calculer l'amélioration dans le profil de la tension (régulation de la tension avant et après insertion de la capacité) . Quelle est la puissance réactive fournie par la capacité série.

- La tension améliorée
- La stabilité augmentée
- La puissance active contrôlée

Solution des exercices



> Solution n° 1

- Vrai
- Faux

> Solution n° 2

- Vrai
- Faux

> Solution n° 3

- Vrai
- Faux

> Solution n° 4

- Vrai
- Faux

> Solution n° 5

- La tension améliorée
- La stabilité augmentée
- La puissance active contrôlée

Bibliographie



- [1] Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations Part 2 : Voltage Dips and Short Interruptions Working Group UIE Power Quality 1996
- [2] A. Kusko, M-T. Thompson, Power Quality in Electrical Systems, Mc Graw Hill, 2007
- [3] F. Ewald Fuchs, M.A.S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Elsevier Academic Press, 2008
- [4] R.C. Dugan, Mark F. Granaghan, Electrical Power System Quality, McGraw Hill, 2001.
- [5] Cahiers techniques Scheider N° CT199, CT152, CT159, CT160 et CT1.
- [6] Qualité de l'énergie, Cours de Delphine RIU, INP Grenoble.
- [7] Marceau, R.J., Sirandi, M., Soumaré, S., Do, X.-D., Galiana, F., Mailhot, R., , A review of signal energy analysis for the rapid determination of dynamic security limits (Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering - IEEE Canada - October 1996, Volume 21, Number 4)
- [8] Kundur, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, ERPI Power System Engineering Series, ISBN 007035958X, 1994.

