الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي – تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معـــــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم أإللكتروميكانيك
Département Electromécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Compensation de l'énergie réactive dans les installations industrielles

Cas unité tube-gaz - Tebessa

Par

HOUFAN Tayeb et GUETOUT Djassem

Devant le jury :

SOUDANI M^{ed} Salah	**MCA**	**Président**	**Université Larbi TebessiTébessa**
ZAAMOUCHE Fares	**MCA**	**Encadreur**	**Université Larbi TebessiTébessa**
MOGHRANI Redhouane	**MCA**	**Examinateur**	**Université Larbi TebessiTébessa**
MELKIA Chaouki	**MCA**	**Examinateur**	**Université Larbi TebessiTébessa**

Promotion 2021-2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu tout puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

J'exprime toutes nos profondes reconnaissances à mon encadreur

Dr. ZAAMOUCHE Fares pour le temps consacré à nous écouter, nous orienter et nous corriger tout au long de notre projet.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du jury d'accepter de juger ce modeste travail et je souhaite exprimer nos profondes gratitudes à tous les enseignants qui nous ont formé dès la 1ere année jusqu'à la 5éme année à l'Université Larbi Tébessa,

Je ne saurais terminer mes remerciements sans mentionner les membres de notre famille pour leurs encouragements tout au long de nos études.

Enfin, nous remercie toute personne de près ou de loin participant pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère sœur pour leur encouragement permanent,leur soutien moral

A mon chere frère pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Djassem

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur ,tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études

,A mon cher frère pour leur appui et leur encouragement

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon ,parcours universitaire

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et ,le fuit de votre soutien infaillible

Merci d'être toujours là pour moi.

Tayeb

ملخص

تم تخصيص هذا العمل لتصميم نظام لتعويض الطاقة التفاعلية لمنشأة صناعية .HTA / BTB وفي الوقت نفسه، يتم إجراء دراسة أولية حول النقاط المختلفة لاستهلاك الطاقة التفاعلية، من أجل التمكن من قياس بطاريات التعويض واختيار الاستراتيجية المثلى لتعويض الطاقة التفاعلية .في النهاية، سيقلل نظام التعويض هذا أولا من خسائر الطاقة في الشبكة، وتحسين جودة الطاقة، وتجنب زيادة حجم المعدات والكابلات الكهربائية، وعلى وجه الخصوص تقليل فاتورة استهلاك الطاقة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: التوافقيات ، عامل القدرة، القدرة التفاعلية، تعويض البطارية.

Résumé

Ce travail est consacré à la conception d'un système de compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle HTA/ BTB. Cependant, une étude préalable est effectuée sur les différents points de consommation de l'énergie réactive, afin de pouvoir dimensionner les batteries de compensation et choisir une stratégie optimale de compensation de l'énergie réactive. En fin, ce système de compensation permettra en premier lieu de réduire les pertes d'énergie dans le réseau, améliorer la qualité d'énergie, éviter le surdimensionnement des appareillages électriques ainsi que les câbles, et diminuer notamment la facture de consommation d'énergie électrique.

Mots Clés : Les harmoniques, Facteur de puissance, Puissance réactive, Batterie de compensation.

Abstract

This work is devoted to the design of a system of compensation of the reactive energy of an industrial installation HTA / BTB. However, a preliminary study is carried out on the different points of consumption of reactive energy, in order to be able to size the compensation batteries and choose an optimal strategy for reactive energy compensation. In the end, this compensation system will firstly reduce energy losses in the network, improve energy quality, avoid oversizing electrical equipment and cables, and in particular reduce the electric energy consumption bill.

Keywords: Harmonics, Power factor, Reactive power, Battery of compensation**.**

Liste des figures

Page

Chapitre II

Figure I.1: Composition vectorielle des puissances……. 12

Chapitre III

Figure III.1 : Compensateur synchrone ABB……..…… 17
Figure III.2 : Batterie de compensation……... 18
Figure III.3 : Schéma unifilaire typique……... 20
Figure III.4 : Schéma d'un SVC…….. 20
Figure III.5 : Principe de compensation……... 21
Figure III.6 : Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne…….. 22
Figure III.7 : Principe de la compensation d'énergie réactive……. 22
Figure III.8 : Traduisant l'échange d'énergie dans le circuit Diagramme d'alimentation d'un récepteur et montrant l'intérêt de la compensation…… 23
Figure III.9 : Principe de la compensation automatique d'une installation……. 24
Figure III.10 : Compensation globale……... 25
Figure III.11 : Compensation par secteur…… 26
Figure III.12 : Compensation individuelle……... 27
Figure III.13 : Installation des batteries de condensateur…… 29
Figure III.14 : Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série……. 30
Figure III.15 : Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre…… 31
Figure III.16 : Diagramme vectoriel du schéma de la figure……... 33
Figure III.17 : Schéma de branchement d'un condensateur série…… 34
Figure III.18 : Schéma de couplage de condensateur shunt…… 35
Figure III.19 : Montage des condensateurs aux bornes du moteur…….. 36
Figure III.20 : Montage des condensateurs avec commande séparée…….. 38

Chapitre IV

Figure IV.1: Montage des condensateurs aux bornes du moteur……. 42
Figure IV.2 : Les différents types de condensateurs…… 43
Figure IV.3 : poste 90KV Schéma unifilaire…… 44
Figure IV.4 : Schéma unifilaire poste 10KV jeux de barres…… 45
Figure IV.5 : diagramme de cos φ……..…… 47
Figure IV.6 : Filtre actif parallèle……. 58

Figure IV.7 : Structure d'un Filtre actif série……...…… 59

Figure IV.8 : combinaison parallèle série actifs (UPQC) ……... 60

Figure IV.9 : Filtre actif série est filtre passif parallèle…… 61

Figure IV.10 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle……. 61

Figure IV.11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle……... 62

Liste des tableaux

page

Chapitre II

Tableaux II.I : Valeurs estimées des puissances installées……... 14

Chapitre III

Tableaux II.I : Différents couplages de condensateurs shunt (3~)…… 34

Tableau III-2 : Compensation réactive maximale (kVAR) aux bornes des moteurs asynchrones BT……..…… 37

Tableau III-3 : Compensation réactive maximale (kVAR) aux bornes des moteurs asynchrones MT……..……...… 38

Chapitre IV

Tableaux IV.1 : Consommateurs de sous station C1……... 48

Tableaux IV.2 : Consommation de puissance réactive des transformateurs 20 kV/400 V à isolement liquide……...…….… 45

Tableaux IV.3 : Compensation d'énergie réactive maximale (kvar) aux bornes des moteurs asynchrones BT……...……. 55

Tableaux IV.4 : Compensation d'énergie réactive maximale (kvar) aux bornes des moteurs asynchrones MT……...…… 55

Liste des symboles et des abréviations

SNS	Société Nationale de Sidérurgie
$U(t)$	grandeur instantanée de la tension
i**(t)**	grandeurs instantanées de le courant
U	valeur efficace de la tension
I	valeur efficace du courant
φ	le déphasage entre le courant et la tension
ω	la pulsation
p	la puissance instantanée
P	La puissance active
Q	La puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformante
cosφ	Facteur de puissance
Etot	les énergies active consommées pendant le temps t
Wtot	les énergies réactive consommées pendant le temps t
Pi**ns**	Puissance installée
ηj	rendement du récepteur
m	nombre de récepteurs
HT	Haute Tension
THT	Très haute tension
MT	Moyenne Tension
BT	Base Tension
SVC	Static VAR Compensator (compensateur statique d'énergie réactive)
Z	l'impédance
X	charge inductive
R	Resistance
C	Condensateur
$Q\nabla$	la puissance produite par des condensateurs en triangle
Q**Y**	la puissance produite par des condensateurs en étoile
TT	transformateur de tension
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
APF	filtre actif de puissance
FAS	Filtre actif série

FAP	Filtre actif parallèle
UPQC	Combinaison parallèle série actif

Table des matières

	Page
- Introduction générale	2
Chapitre I Présentation de l'entreprise	
I. L'entreprise	5
I.1. Présentation du projet	5
I.2.1. Contexte et historique	5
I.3. Consistance de l'investissement	6
I.3.1. Localisation du projet	6
I.3.2. Utilités	6
I.4. Structure de l'alimentation en énergie	6
I.4.1. Installation de distribution d'énergie	7
I.4.1.1. Commentaires relatifs à l'alimentation réseau	7
I.4.1.2. Alimentation en énergie	7
I.5. Conclusion	8
Chapitre II Généralités sur les puicances et les énergies électriques	
II.I. Introduction	10
II.2. Puissance instantanée	10
II.3. La puissance active	10
II.4. La puissance réactive	11
II.5. Puissance apparente	11
II.6. Puissance déformante	11
II.7. Facteur de puissance	11
II.8. Composantes active et réactive de la puissance	12
II.9. Évaluation de l'énergie électrique	12
II.9.1. Énergies active, réactive et apparente	12
II.10. Méthode de calcul de la puissance consommée	14
II.11. Conclusion	15
Chapitre III Compensation de l'énergie réactive	
III.1. Introduction	17
III.2. Moyens de compensation de puissance réactive	17
III.2.1. Les compensateurs synchrones	17
III.2.2. Condensateur ou batterie de compensation	18

III.3. Compensateurs statiques de puissance réactive 19
III.4. Théorie de compensation d'énergie réactive 20
III.4.1. Puissance transmise par une ligne électrique 22
III.4.2. Principe de la compensation d'énergie réactive 22
III.5. Les différents types de compensation 23
III.5.1. Batteries fixes 24
III.5.2. Batterie de condensateurs en gradins avec régulation automatique 24
III.5.3. Principe et intérêt de la compensation automatique 24
III.6. Les différents modes de compensation (emplacement des condensateurs) 25
III.6.1. Compensation globale 25
III.6.2. Compensation par secteur 26
III.6.3. Compensation individuelle 27
III.6.4. Lieu d'installation des condensateurs 29
III.7. Compensation par condensateurs sur le réseau public 30
III.7.1. Installation série 30
III.7.2. Installation shunt 31
III.7.3. Raccordement des condensateurs au réseau 34
III.7.4. Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs 35
III.8. Compensation par batterie de condensateurs dans une charge (les moteurs asynchrones) 36
III.8.1. Cas du montage des condensateurs aux bornes du moteur 36
III.8.2. Cas du montage des condensateurs en parallèle avec commande séparée 38
III.9. Conclusion 39

Chapitre IV La compensation aux bornes des machines électriques

IV.1. Introduction 41
IV.2. Définition des transformateurs 41
IV.3. Compensation de transformateurs 41
IV.4. Compensation de moteurs alternatifs 41
IV .5. Alimentation de l'entreprise en énergie électrique 42
IV .6. Poste 90 kv ANABIB 42
IV.7. Méthode de calcul de la compensation de l'énergie réactive 45
IV.8. Compensation aux bornes d'un transformateur 51
IV.8.1. La capacité des batteries de condensation 53
IV.9. Compensation des moteurs asynchrones 54
IV.10. Solutions Modernes de Dépollution 55

IV.10.1. Solution de dépollution adoptée 56
IV.10.1.1 Filtres Actifs 56
IV.10.1.2 Les Convertisseurs à Prélèvement Sinusoïdal 57
IV.10.1.2.1 Le Filtre Actif Parallèle (F.A.P) 57
IV.10.1.2.2. Le Filtre Actif Série (F.A.S) 59
IV.10.1.2.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) 60
IV.10.1.2.4 Combinaison hybride active et passive 60
IV.10.1.2.4.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles 61
IV.10.2.4.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles 61
IV.10.2.4.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle 61
IV.11. Conclusion 62
- Conclusion générale 64
- Références bibliographiques 65

Introduction générale

- **Introduction générale**

Dans les entreprises industrielles, Tous système électrique utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive. Seule l'énergie active est transformée au sein de l'outil de production en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc... L'autre, autrement dit, son coût est transmis à fur et à mesure au produit fini. L'énergie réactive sert notamment à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques (moteurs, autotransformateurs, etc...). Par ailleurs, certains constituants des réseaux électriques de transport et de distribution (transformateurs, lignes, etc...) consomment également dans certains cas d'exploitation de l'énergie réactive. [1],[2]

Donc elle est inévitable avec tout appareil siège du phénomène d'électromagnétisme. Le but de ce travail est de connaître la consommation réelle de l'énergie réactive, car cela nous aide à trouver les solutions adéquates.

Si après le calcul on trouve le rapport puissance réactive /puissance active inférieur à 50% on dit que l'installation sans compensation.

Si le contraire on dit que l'installation nécessite la compensation, et pour la compensée, la solution la plus rationnelle est l'installation des batteries de condensateur. La compensation de l'énergie réactive peut avoir des avantages techniques, et économiques. [1],[2]

En plus de la compensation, Il faut suivre une politique de gestion de l'énergie électrique. Cette dernière est basée sur l'optimisation tarifaire qui a pour but de diminuer les montants de la facture d'énergie ; notamment par la souscription d'un tarif adapté à l'établissement. Cette démarche ne demande ni travaux, ni investissements, mais nécessite un suivi rigoureux et une analyse des factures du fournisseur d'énergie SONELGAZ. [1],[2]

Problème posé

Dans l'unité de tubes à gaz (ELMA LABIODE) le coût du produit fini reste très élevé ; cela est dû par conséquence de plusieurs facteurs ; L'un des facteurs les plus influents est l'excès et l'irrationalité de la consommation de l'énergie électrique en générale, l'énergie réactive en particulier, ceci se traduit par une facture de l'énergie électrique très élevée autrement dit un lourd fardeau des dépenses superflues.

Une simple lecture de la facture de l'unité pour l'année 2012, montre qu'il y a un surplus de consommation de l'énergie réactive, Cette puissance ne délivre aucun travail utile. De plus, un rapport

Puissance « réactive/puissance active » devient trop important, et génère de multiples inconvénients. Comme l'unité ne fonctionne pas en pleine charge, « elle suit la politique des commandes », l'existence du système de compensation statique dans chaque secteur est insuffisante, on remarque une consommation gigantesque de l'énergie réactive a cause de la marche a vidé des différents équipements électriques.

En plus du problème économique, Cet excès engendre aussi des problèmes techniques, tels que les chutes de tension, l'échauffement des conducteurs, la diminution de la durée de vie des équipements etc. Tous ces problèmes influx directement sur le gain total de l'entreprise.

But du travail

Notre but est l'étude de différents types de l'énergie réactive et les méthodes de compensation de cette énergie aux bornes des machines électriques.

Chapitre I
Présentation de l’entreprise

I. Introduction

Le présent document vise à retracer l'histoire du projet « Tubes Gaz » Elma Labiod de Tébessa, dans l'ensemble de sa réalisation et reconstituer particulièrement les éléments essentiels sur les plans technique, financier et commercial, d'une manière synthétique, on peut dire que :
Le contrat procès a été honoré dans son ensemble à l'exception des opérations liées à la levée de réserves et celles portant sur l'optimisation du fonctionnement de certaines installations**.** Il y a lieu de noter par ailleurs, que l'unité a été en chômage technique pour manque de charge commerciale à partir de janvier 1997 sur une durée de dix-huit mois. Cet arrêt prolongé a eu des répercussions sur le fonctionnement des installations et s'est traduit notamment par une série de problèmes techniques, que l'unité s'attèle à régler. L'activité de l'unité connaît une reprise graduelle à partir de septembre 1998.[1]

I.2 présentation du projet

I.2.1 contexte et historique

- Cadre de l'opération

L'opération a été inscrite dans le plan quinquennal de développement. Le projet « Tubes Gaz » a fait l'objet de maturation entre 1977 et 1980. L'inscription de l'opération à la nomenclature des investissements planifiés a été réalisée dans le cadre du premier plan quadriennal et à l'indicatif de la Société Nationale de Sidérurgie (ex SNS) en 1983. Le projet ainsi individualisé était défini comme suit :
Dans le cadre du développement des zones frontalières Algériennes-Tunisiennes, le projet a été transféré à EL MA LABIOD Wilaya de Tébessa.

Les décisions associées ont l'acte de délocalisation eu été formalisées en 1986 sous les références suivantes :

- **Indicatif** de l'ENTTPP/ANABIB ***OP. N° 8.142.3.230.177.03.***
- **Référence :** M/P/AN – 86/260/IH/25 du 05 MARS 1986.
- **Montant de l'investissement** : 871 millions DA.
- **Capacité de production** : 60.000 tonnes/an.
- **Localisation** : Elma - labiod / TEBESSA.
- **Décision de financement** : N° 699/DCCA/SD/EPE du 12.12.86.

Le contrat signé le 14 juillet 1988, qui porte sur la fourniture le montage et la mise en service des installations, a été mis en vigueur le 6 mars 1989. L'unité est conçue pour produire le tube soudé longitudinalement à haute fréquence. Son activité couvre la fabrication de :

- Tube rond pour canalisation de transport fluide et vapeurs (eaux. Gaz).

- ☞ Tube carré et rectangle de construction pour diverses industries.
- ☞ Accessoires divers de raccordement (manchons, coudes et tés). [1]

I.3 consistance de l'investissement

I.3.1 Localisation du projet

L'Usine Tubes gaz est érigée sur un terrain d'assiette de 31 hectares (dont 38500 m2 Couverts), située à environ 5 Km à l'est d'ELMA-LABIOD et à 35 Km de chef-lieu TEBESSA.
Le site est longé sur sa façade principale par la voie ferrée ainsi que par la route nationale sur l'axe TEBESSA – BIR EL ATER. L'usine est raccordée au réseau ferroviaire SNTF et dispose d'un ensemble de voies ferrées intérieures d'une longueur de 5000 mètres desservant la totalité des ateliers principaux. Ce réseau permet donc un approvisionnement aisé de l'ensemble des matières premières et des consommables et assure également l'expédition des produits finis.

I.3.2 Utilités

- **Électricité :** l'unité est alimentée en énergie électrique à partir d'une ligne haute tension Sonelgaz de **90 KV.**
- **Eau :** L'alimentation en eau de l'usine est assurée par une conduite ramenée de trois forages situés à environs dix kilomètres de l'usine. En outre une station de pompage équipée de deux réservoirs semi- enterrés, en béton, permet un stockage de 2400 m3 d'eaux potables, industrielles et d'incendies.
- **Gaz :** L'alimentation en gaz est assurée par une station de détente, réalisée pour le projet et qui est reliée au réseau extérieur SONELGAZ. [1]

I.4. Structure de l'alimentation en énergie

L'alimentation de l'installation se fait par l'intermédiaire de deux ligne 90 kV au-dessus du sol la délimitation de livraison de l'acheteur est située à l'encrage à l'entrée de la station, les chaines d'encrage et les déchargeurs étant cependant à la charge de l'acheteur.

Dans une station extérieure, composée de champ d'alimentation, champs de départ et transformateurs, la tension d'entrée de 90kv est transformée en 10kv et amenée par câbles à l'installation de commutation moyenne tension 10kv.

L'installation de moyenne tension 10KV est installée dans une station principale B et une sous-station C4. L'installation 10kv de la station b est divisée en deux secteurs qui peuvent être reliés par commutateurs de couplage, la station c4 est directement alimentée par le second secteur (10kv).

Tous les consommateurs d'un puissance inferieure a 250 k w sont alimentes par les stations de distribution 380 V reparties sur l'installation a des stations importantes. La surveillance et la commande de l'installation en énergie se font à partir d'un poste de contrôle dans lequel sont également implantes le système d'avertisseurs d'incendie et les messages défaut de l'installation.

En cas de perturbations, les consommateurs critiques, pour lesquels une coupure de courant risquerait de provoquer des endommagements, sont automatiquement alimentée par un groupe de secours diesel. [2]

I.4.1 Installation de distribution d'énergie

I.4.1.1 Commentaires relatifs à l'alimentation réseau

La spécification technique QE18001 concernant l'équipement électrique pour le procès, le Schéma de principe QE 38004 et QE 38005 forment la base de cette considération, répartis-en :

- ✓ Alimentation en énergie
- ✓ Consommateurs raccordés
- ✓ Compensation réseau
- ✓ Harmonique

I.4.1.2 Alimentation en énergie

Il existe une alimentation en énergie de 90KV +/- 8%, 50Hz +/- 1%, avec une puissance théorique de court-circuit de 2500 MVA. Sont raccordés au réseau 90 KV deux transformateur de régulation 90/10 KV, 16/20 MVA. Les deux transformateurs alimentent des sections réseau séparées. Les sections réseau peuvent être reliées par un interrupteur de couplage.

Dans contexte des installations de four à induction, la section réseau SS-C.4 est significative pour cette considération. Four l'alimentation réseau de convertisseur courant, il y a lieu de tenir compte des problèmes principaux suivants :

- ✓ Facteur de puissance variable
- ✓ Harmoniques
- ✓ Chutes de tension périodiques à cause d'opération de commutation

Le dossier technique QE 18001 contient des indications relatives aux harmoniques et au facteur de puissance, il n'existe pas de limite pour les chutes de tension périodiques. Selon VDE0160, des choutes de tentions périodiques de 20% sont admissibles. L'examen de cette section réseau a donné des valeurs inadmissibles pour convertisseurs à 6 et 12 phases.

Une comparaison de technique a donné comme résultat que l'augmentation de la puissance de court-circuit dans le réseau 10 KV par un transformateur réseau de 16/20 MVA est nécessaire.

Tous les consommateurs d'un puissance inferieure a 250 k w sont alimentes par les stations de distribution 380 V reparties sur l'installation a des stations importantes. La surveillance et la commande de l'installation en énergie se font à partir d'un poste de contrôle dans lequel sont également implantes le système d'avertisseurs d'incendie et les messages défaut de l'installation.

En cas de perturbations, les consommateurs critiques, pour lesquels une coupure de courant risquerait de provoquer des endommagements, sont automatiquement alimentée par un groupe de secours diesel. [2]

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une aperçue sur la présentation de l'entreprise tubes GAZ ELMA LABIOD-Tébessa la partie suivante sera consacré sur la présentation des généralités sur les différents types de puissance et énergie électrique.

Chapitre II
Généralités sur la puissance et l'énergie électrique

II.1. Introduction

En électricité, on désigne par énergie active l'énergie qui est transformée en travail mécanique (s'il s'agit d'un moteur), chaleur (s'il s'agit d'une résistance chauffante ou d'un tube infrarouge) ou lumière. Quant à l'énergie réactive, elle ne produit pas de travail ou de chaleur mais elle est nécessaire pour permettre aux équipements électriques de fonctionner (pour par exemple produire un champ électromagnétique à l'intérieur d'un moteur).

II.2. Puissance instantanée

Soit un dipôle linéaire soumis à une tension sinusoïdale :

$$U(t) = U\sqrt{2}\,\sin(\omega t) \qquad \textbf{(II.1)}$$

Le courant qui le parcourt est sinusoïdal et peut s'écrire sous la forme :

$$i(t) = \mathrm{I}\sqrt{2}\,\sin(\omega t - \varphi) \qquad \textbf{(II.2)}$$

$u(t)$ et i(t)représentent les grandeurs instantanées de la tension et du courant respectivementet φ est le déphasage entre le courant et la tension prise comme origine des phases. U et I sont les valeurs efficaces de la tension et du courant et ω représente la pulsation. Dans un intervalle de temps infiniment court dt, l'énergie reçue par le dipôle est la même quesi la tension u et le courant i étaient constants, elle s'écrit comme suit :

$$\mathrm{dw} = \mathrm{u(t)i(t)dt} \qquad \textbf{(II .3)}$$

Par définition, la puissance instantanée est donnée par le rapport : [3]

$$\mathrm{p} = \frac{dw}{dt} = \mathrm{u(t)i(t)} \qquad \textbf{(II.4)}$$

II.3. La puissance active

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée. Elle est reçue par un dipôle et est transformée en énergie mécanique, thermique ou calorifique, donc directement utilisable. La puissance active représente la grandeur principale qui détermine l'état énergétique des installations à courant alternatif. [3]

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u\,(\mathrm{t})\mathrm{i(t)dt} = \frac{1}{T}\int_0^T [U\sqrt{2}\sin(\omega t)][I\sqrt{2}\sin(\omega t) - \varphi]dt \qquad \textbf{(II.5)}$$

L'équation (II.5) devient :

$$\mathrm{P} = \mathrm{UI}\cos\varphi \qquad \textbf{(II.6)}$$

II.4. La puissance réactive

La puissance réactive Q mesurée en Vars sert à l'aimantation des circuits magnétiques des appareils récepteurs. Cette puissance n'est pas directement utilisable mais elle circule de lasource aux récepteurs et inversement. L'expression de la puissance réactive est : [3]

$$Q = UI\sin\varphi \quad \textbf{(II.7)}$$

II.5. Puissance apparente

Cette puissance n'a aucune signification physique, elle sert uniquement à dimensionner les machines, telles que les transformateurs et les moteurs à courant alternatif. La puissance apparente s'exprime en volt- ampère [VA].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \textbf{(II.8)}$$

II.6. Puissance déformante

On considère un dipôle dont les tensions et intensité sont notées u(t) et i(t). La puissance déformante D pour ce dipôle est liée aux puissances apparente, active et réactive par la relation :

$$S = \sqrt{p^2 + Q^2 + D^2} \quad \textbf{(II.9)}$$

Soit

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - D^2} \quad \textbf{(II.10)}$$

La puissance déformante est due aux « interactions » entre les harmoniques de rangs différents de la tension et de l'intensité du courant. Il est à noter que lorsque la tension et le courant sont parfaitement sinusoïdaux, la puissance déformante est nulle et la puissance apparente S reprend sa forme classique : [3]

$$S = \sqrt{p^2 + Q^2} \quad \textbf{(II.11)}$$

II.7. Facteur de puissance

En particulier, si le courant et la tension sont des fonctions sinusoïdales du temps, le facteur de puissance d'une installation électrique de l'installation est égal au rapport de la puissance active P sur la puissance apparente S.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad \textbf{(II.12)}$$

Le facteur de puissance permet d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive. Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive. Par contre un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0.

La valeur du facteur de puissance qui intervient dans le contrat de facturation de l'énergie

électrique représente le facteur de puissance moyen car pour une installation déterminée, les appareils ne fonctionnent pas dans les mêmes conditions. Il est calculé à partir des énergies active et réactive et est donné par :

$$\cos\varphi_{moy} = \frac{E_{tot}}{\sqrt{E^2_{tot} + W^2_{tot}}} \quad \textbf{(II.13)}$$

Où E_{tot} et W_{tot} désignent respectivement les énergies active et réactive consommées pendant le temps t. [3]

II.8. Composantes active et réactive de la puissance

On définit La figure II.1 :

- La puissance apparente : S = UI (kVA)
- La puissance active : P = UI.cos φ (kW)
- La puissance réactive : Q = UI. sin φ (kVAR)

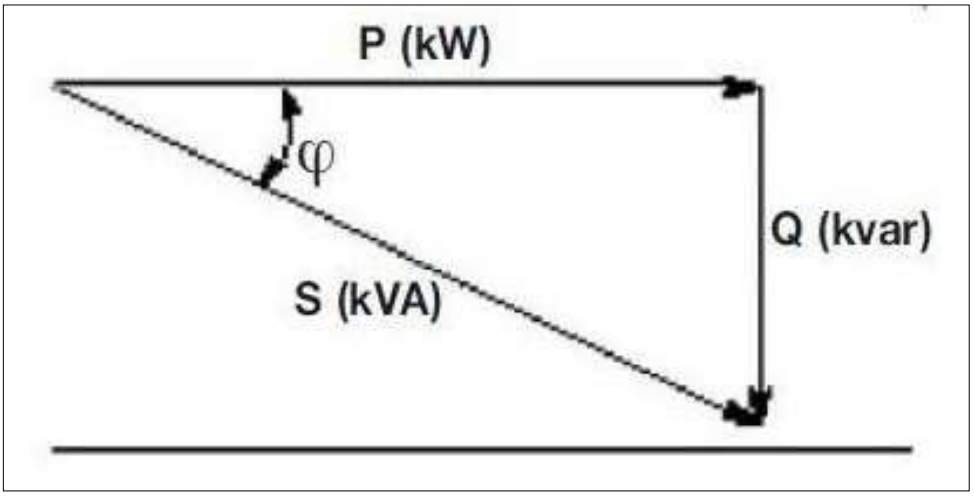


Figure II.I : *Composition vectorielle des puissances.* [3]

$$It = \sqrt{Ia^2 + Ir^2} \quad \textbf{(II.14)}$$

$$1a = I.\cos\varphi \quad \textbf{(II.15)}$$

$$Ir = I.\sin\varphi \quad \textbf{(II.16)}$$

II.9. Évaluation de l'énergie électrique

II.9.1. Énergies active, réactive et apparente

Toute machine électrique utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive. L'énergie active consommée résulte de la puissance active absorbée par les récepteurs, elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes).

L'énergie réactive consommée sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive des récepteurs. L'énergie apparente est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente S des récepteurs, somme vectorielle de la puissance activeet de la puissance réactive.

- Bilan des puissances

Le bilan des puissances est utilisé pour déterminer les caractéristiques du transformateur capable d'alimenter une entreprise, en tenant compte d'une éventuelle augmentation de la demande d'énergie. [4]

- Puissance installée

Elle est déterminée à partir de la somme de toutes les puissances lues sur les plaques signalétiques des récepteurs (moteurs) après avoir divisé chacune par le rendement de ces récepteurs. Il faut tenir compte de l'éclairage, la climatisation, les chauffages …etc. Cette puissance représente la puissance la plus élevée car elle suppose que tous les récepteurs fonctionnent simultanément et en régime nominal. [4]

$$P_{ins} = \sum_j^m P_j / \eta_j \qquad \textbf{(II.17)}$$

Avec :

η_j : rendement du récepteur d'indice j.

P_{ins} : puissance installée totale.

P : puissance installée du récepteur d'indice j.

m : nombre de récepteurs.

Il est à noter que les informations sur les puissances réellement installées sont exhaustives.

- Puissance consommée

C'est la puissance maximale réellement consommée par les récepteurs. Elle est égale àla somme des puissances installées multipliée par le coefficient d'utilisation Ku et le coefficient de simultanéité Ks.

- Coefficient de simultanéité (k_s)

Le coefficient de simultanéité K_S est le rapport de la somme des puissances effectivement absorbées par les appareils susceptibles de fonctionner simultanément à la somme des puissances nominales. La détermination du facteur de simultanéité demande la connaissance détaillée de l'installation et des conditions d'exploitation. On ne peut donc pas choisir des valeurs précises applicables à tous les cas. Pour le calcul de ce facteur, on utilise les normes N.F.C14-100, U.T.E63-410 et N.F.C 16-100, qui donnent quelques précisions sur ce facteur.

Si l'installation est connue en détail, le coefficient de simultanéité se calcule comme suit :

Soit un niveau n d'une armoire de distribution de puissance, à un nombre N de récepteurs. Lecoefficient de simultanéité de ce niveau est :

K_{Sn}= N_{RFS} (de cette armoire) / N_{TR} (de cette armoire) **(II.18)**

Avec : N_{RFS} : nombre de récepteurs fonctionnent simultanément de cette armoire
N_{TR} : nombre total de récepteurs de cette armoire.

Le coefficient de simultanéité peut être également utilisé pour le calcul du courant entrant dans le choix des sections des conducteurs et des câbles ainsi que le choix de l'appareillage de protection. [4]

- **Facteur d'utilisation (k_u)**

C'est le rapport de la puissance consommée par les récepteurs à sa puissance nominale. Il tient compte du fait que certains récepteurs ne fonctionnent pas à leur régime nominal. Les valeurs du coefficient d'utilisation KU recommandées par la norme N.F.C 15- 100, sont données sur le tableau :

Tableau II.1 : *Valeurs du coefficient d'utilisation pour différents récepteurs [2]*

Type d'utilisation	K_U
Éclairage	1.00
Prises de courant	0.15
Chauffage	1.00
Moteurs de grande puissance	1.00
Moteurs de moyenne puissance	0.75
Moteurs de petite puissance	0.60
Machines-outils	0.80

Les gammes des puissances sont données ci-après :

- Petite puissance: P < 5 kW
- Moyennes puissance : 5 kW≤ P ≤ 75 kW
- Grandes puissance: P > 75 kW

II.10. Méthode de calcul de la puissance consommée

Soit un récepteur d'indice (i) de puissance utile P_U, de facteur de puissance cosφ et de rendement (η_i). La puissance absorbée par le récepteur (i) est :

$$P_i = P_u / \eta_i \quad \textbf{(II.19)}$$

La puissance réactive correspondante est :

$$Qi = Pi \, tg \, \varphi \quad \textbf{(II.20)}$$

Si K_{Ui} est le coefficient d'utilisation du récepteur (i) alors la puissance d'utilisation s'écrit comme suit :

$$P_{Ui} = K_{Ui} . P_i \quad \textbf{(II.21)}$$

$$Q_{Ui} = K_{Ui} . Q_i \quad \textbf{(II.22)}$$

- **Puissance consommée dans chaque coffret**

$$P_{Sj} = (\sum_{i=1}^{n} P_{Ui}). K_{Sj1} \quad \textbf{(II.23)}$$

$$Q_{Sj} = (\sum_{i=1}^{n} Q_{Ui}). K_{Sj1} \quad \textbf{(II .24)}$$

I : indice de premier niveau

n : nombre de récepteurs

Nous pouvons avoir deux ou plusieurs facteurs de simultanéité dans un même coffret, la puissance s'écrit alors :

$$P_{Sj} = (\sum_{i=1}^{n} P_{Ua} K_{Sja}) + (\sum_{i=1}^{n} P_{uib}) + K_{Sjb} \ [5] \quad \textbf{(II.25)}$$

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les différentes énergies et puissance électrique tels que la puissance, active, réactive et apparente, le chapitre suivant sera consacré à la présentation d'une étude pour la compensation de l'énergie réactive.

Chapitre III
Compensation de l'énergie réactive

III.1. Introduction

La compensation de l'énergie réactive permet :

- La suppression des facturations et des consommations excessives des énergies réactives.
- La réduction des pertes dans les conducteurs à puissance active constante.
- L'augmentation de la puissance active transportée à courant apparent constant.
- La diminution de la chute de tension

III.2. Moyens de compensation de puissance réactive

III.2.1 Les compensateurs synchrones

Dans les systèmes énergétiques, les générateurs synchrones sont les principaux producteurs de puissances actives et réactives. Pour la puissance active. Ils sont l'unique source, par contre pour la puissance réactive, la quantité produite par ces sources est limitée par les conditions de fonctionnement normales des machines des centrales. La quantité produite n'est pas constante.

Les compensateurs synchrones sont très utilisés dans les systèmes électriques pour résoudre des problèmes de compensation de la puissance réactive et de réglage de la tension [6]



Figure III.1 : *Compensateur synchrone ABB [6]*

Avantage

Ce moyen de compensation est avantageux :

- ✓ Excellent rendement (un facteur de puissance voisin de 1).
- ✓ Peut être placé près des consommateurs.
- ✓ Facile à régler comme producteur ou consommateur de puissance réactive.
- ✓ Effet auto régulateur.

Inconvénients :

- ☞ Il a été délaissé de son application comme compensateur malgré leurs mérites pour lesinconvénients :
- ☞ Coût initial élevé.
- ☞ Machine tournante qui demande des entretiens.

- Pertes actives relativement importantes.
- La force motrice, n'est pas toujours compatible avec la demande instantanée de puissance réactive.
- Il peut décrocher dans le cas d'une surcharge brusque ou d'une chute de tension importante du réseau. Ceci nécessite une surveillance particulière avec l'utilisation de dispositifs de sécurité, encombrants.
- Il a besoin d'un générateur à courant continu pour assurer son excitation. Cet organe supplémentaire augmente le prix du moteur.
- Il ne peut démarrer qu'à très faible charge en exigeant soit un moteur auxiliaire de lancement, soit le démarrage en asynchrone avec un réducteur de tension au démarrage.

III.2.2. Condensateur ou batterie de compensation

Le condensateur est un récepteur constitué de deux parties conductrices (électrodes) séparées par un isolant. Ce récepteur à la propriété lorsqu'il est soumis à une tension sinusoïdale de déphaser son intensité, donc sa puissance (réactive capacitive), de 90° en avant sur la tension.
À l'inverse, tous les autres récepteurs (moteur, transformateur...) déphasent leur composante réactive (intensité ou puissance réactive inductive) de 90° en arrière sur la tension.

La composition vectorielle de ces intensités ou puissances réactives (inductive et capacitive) conduit à une intensité ou puissance résultante réactive inférieure à celle existant avant l'installation de condensateurs. Pour simplifier, on dit que les récepteurs inductifs (moteur, transformateur...) consomment de l'énergie réactive alors que, les condensateurs (récepteurs capacitifs), produisent de l'énergie réactive [7].

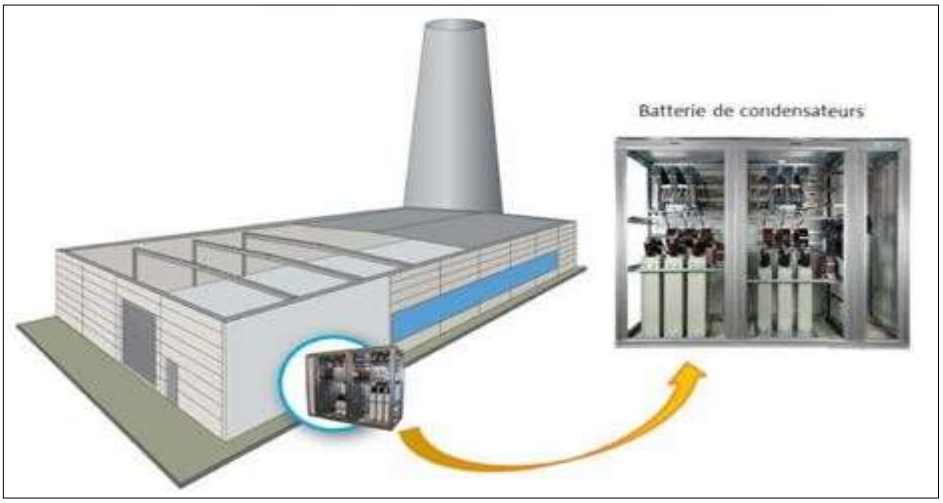


Figure III.2 : *Batterie de compensation [7]*

On distingue deux types :

1) **Des batteries de condensateurs HT :** Raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
2) **Des batteries de condensateurs MT :** Raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension [8].

Le condensateur est le plus utilisé compte-tenu :

- De sa non-consommation en énergie active.
- De son coût d'achat.
- De sa facilité de mise en œuvre.
- De sa durée de vie (10 ans environ).
- De son faible entretien (appareil statique).

Le coût des batteries de condensateurs dépend de plusieurs paramètres dont :

- La puissance installée.
- Le niveau de tension.
- Le fractionnement en gradins.
- Le mode de commande.
- Le niveau de qualité de la protection.

III.3. Compensateurs statiques de puissance réactive

Grâce au développement de l'électronique de puissance, la compensation d'énergie réactive par des moyens statiques est devenue possible par des compensateurs statiques de puissance réactive (SVC). Ces dispositifs constitués d'éléments électriques (batteries de condensateur, bobine…est) et d'éléments d'électronique pour commutation (thyristors) permettant des variations rapides et continue de puissance réactive pour éliminer les fluctuations de la puissance réactive absorbée par certains appareils fluctuations de tension qui peuvent être gênantes pour tous les usagers [6].

Un compensateur statique d'énergie réactive (en anglais SVC : Static VAR Compensator, en français parfois dispositif de l'électronique de puissance destiné à compenser la circulation de puissance réactive sur les réseaux électriques. du groupe des FACTS. Il est composé :

D'un banc de condensateurs, fixe ou commutable de façon discrète, qui fournit du réactif. Ce banc prend d'un filtre anti-harmonique.

D'un gradateur triphasé à thyristors faisant varier de façon continue inductances, qui consomme l'excès de réactif.

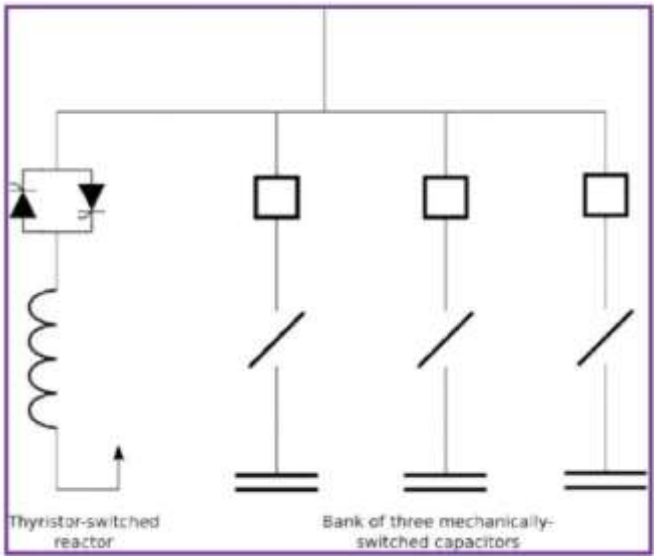


Figure III.3 : *Schéma unifilaire typique [9]*

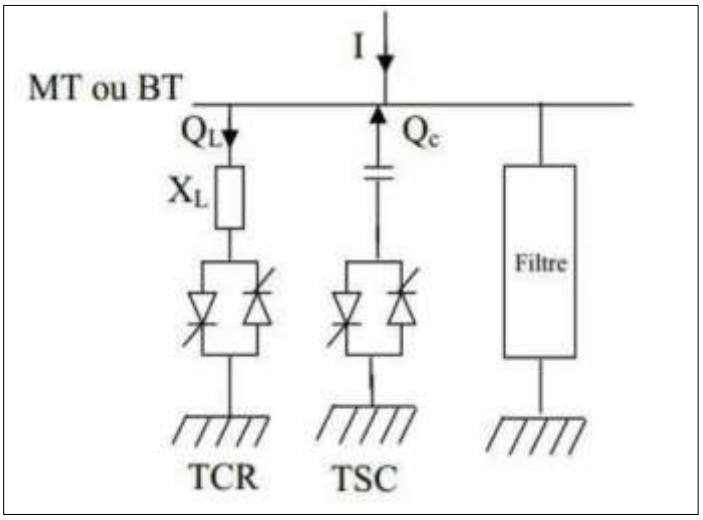


Figure III.4 : *Schéma d'un SVC*

En ajustant la puissance réactive Q délivrée au réseau électrique, un CSPR permet d'ajuster la tension U du réseau suivant la formule $U = \frac{Q}{S_{cc}}$ où U représente la variation relative de tension, et Scc la puissance de court-circuit du réseau [9].

III.4. Théorie de compensation d'énergie réactive

Considérons l'impédance $Z = r.e^{j\tau\phi} = R + JX$ représentant une charge inductive (X > 0), ci-dessous. La puissance réactive correspondante est $Q = X.I^2$.

L'ajout d'un condensateur C en tête du circuit ne modifie pas la charge et ne rajoute aucune puissance active. En revanche, C produit la puissance réactive et va donc donner un nouveau facteur de puissance cos ϕ′.

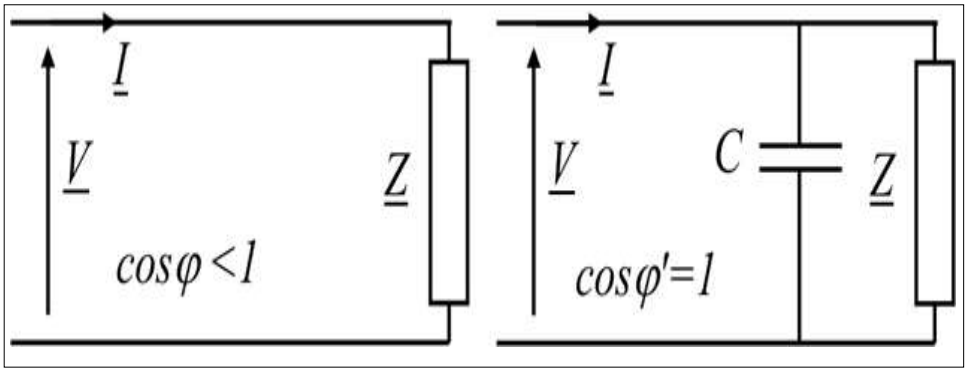


Figure III.5 : *Principe de compensation*

On sait que le théorème de Boucherot apporte :

$Q_C = C\omega V^2$ **(III.1)**

$Q_{totale} = Q \quad Qc$ **(III.2)**

La compensation de puissance réactive consiste à assurer $Q_{tot} = 0$, c-a-d à $Q_C = Q$ et cos $\phi' = 1$

Le Condensateur à choisir a alors la valeur :

$$\boldsymbol{C = \frac{X.I^2}{\omega V^2}} \quad \textbf{(III.3)}$$

Du coup il est intéressant de connaître la formule générale qui donne la valeur de la capacité en fonction du cos ϕ et du cos ϕ'

Si cette compensation était parfaite (Q = 0), on aurait une chute de tension relative de l'ordre de $\frac{R.P}{U^2}$ et des pertes de l'ordre de $\frac{R.P^2}{U^2}$

Les pertes croissantes lorsque Q < P (soit Q2 << P2), il peut être souhaitable, pour améliorer la sûreté de l'exploitation, de surcompenser le réseau, c'est-à-dire de fournir une puissance réactive plus élevée que celle qui est consommée, de façon, par exemple, à annuler la chute de tension ($Q = \frac{R.P}{X}$). Dans ce cas, on peut montrer que les pertes augmentent, c'est-à-dire que le gain sur les pertes dû à l'augmentation de la tension est inférieur à leur accroissement dû à l'augmentation de Q.

Le minimum théorique pour les pertes est donc la compensation totale. Par ailleurs, d'un point de vue économique, la compensation cesse d'être intéressante lorsque le coût des moyens de compensation, compte tenu de leur taux d'utilisation, devient supérieur au gain réalisé sur les pertes.

Il appartient donc au planificateur de réseau de rechercher le meilleur compromis et de doser et localiser la compensation à installer en prenant en compte son coût et ses avantages. Dans les réseaux chargés, Ce sont alors les alternateurs qui assurent l'équilibre d'ensemble, avec des performances dynamiques qui rendent leur utilisation indispensable pour compléter l'action des condensateurs utilisés en base [6].

III.4.1. Puissance transmise par une ligne électrique

La sûreté du système, le bon fonctionnement des installations raccordées et la réduction des pertes en lignes rendent nécessaire de garder la tension à chaque nœud du réseau dans une plage contractuelle de tension.

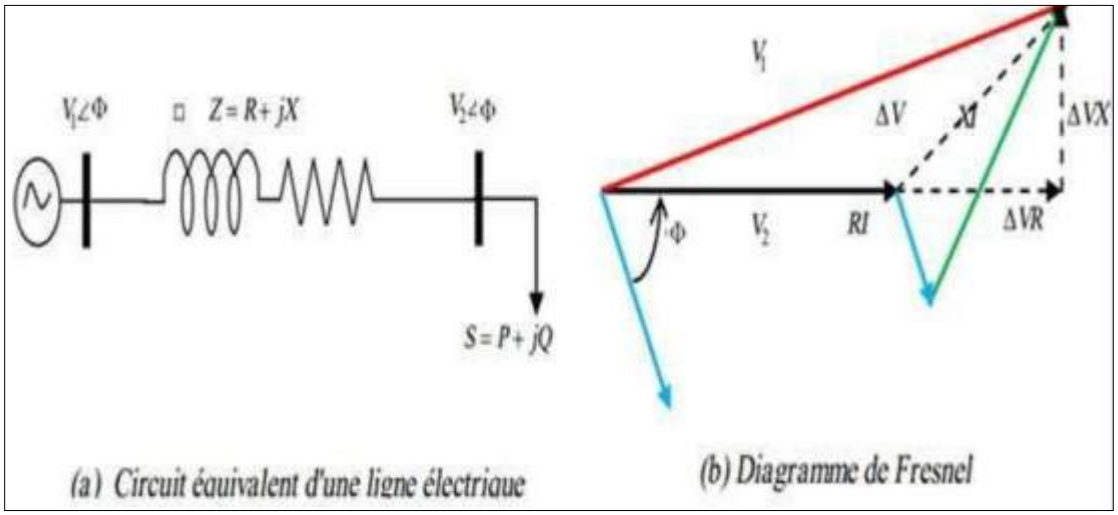


Figure III.6 : *Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne [10]*

Pour simplifier, considérons le schéma de la figure III.6, qui représente une ligne électrique Z = R + jX alimentant une charge (P + jQ). Ce modèle est simple, mais il permet d'expliquer qualitativement le lien entre les modules et phases des tensions à chaque extrémité de la ligne d'une part, et les transits de puissance active et de puissance réactive d'autre part S = P + jQ [10].

III.4.2. Principe de la compensation d'énergie réactive

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active P, la figure III.7 montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente S, et donc de courant, que la puissance réactive Q est importante.

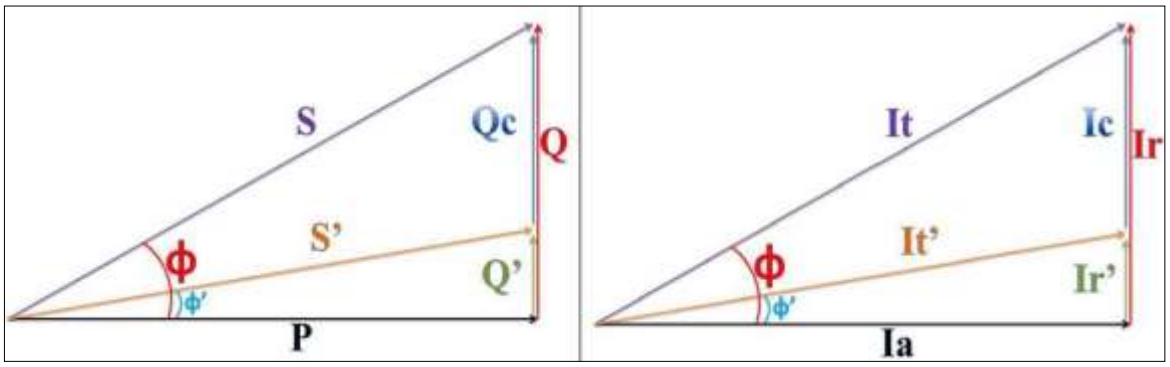


Figure III.7 : *Principe de la compensation d'énergie réactive*

Il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "compensation de l'énergie réactive".

Pour inciter à cela et éviter de sur-calibrer son réseau, le distributeur d'énergie pénalise financièrement les consommateurs d'énergie réactive au-delà d'un certain seuil. On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs. Pour réduire la puissance apparente absorbée au réseau de la valeur S à la valeur S', on doit connecter une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive Qc (figure III.7), telle que :

$$Q_C = P.(\tan \phi \quad \tan \phi') \qquad \textbf{(III.4)}$$

L'intérêt économique de la compensation est mesuré en comparant le coût d'installation des batteries de condensateurs aux économies qu'elle procure [11]. Le courant total fourni par le réseau Il est réduit (figure III.8), le rendement de l'installation se trouve donc amélioré puisque les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant [12].

La figure III.8 illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le condensateur.

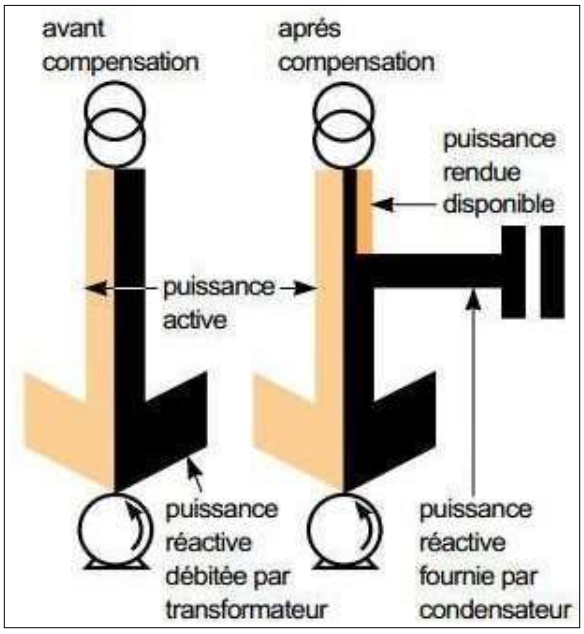


Figure III.8 : *Diagramme traduisant l'échange d'énergie dans le circuit d'alimentation d'un récepteur et montrant l'intérêt de la compensation [12]*

III.5. Les différents types de compensation

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits :

Les condensateurs de valeurs fixes ou batteries fixes.

Les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batterie automatique) qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation. [13]

III.5.1. Batteries fixes

La batterie de condensateurs à une puissance constante. Ces batteries sont utilisées de préférence:

Aux bornes des récepteurs.

Sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible. [13]

III.5.2. Batterie de condensateurs en gradins avec régulation automatique

Ce type d'équipement permet d'ajuster la puissance réactive fournie aux variations de consommation, et ainsi de maintenir le cosφ à la valeur désirée. Il s'utilise dans les cas où la puissance réactive consommée est forts vis-à-vis de la puissance du transformateur et varie dans les proportions importantes, c'est-à-dire essentiellement :

Aux bornes des tableaux généraux BT.

Sur les départs de puissance importante.

III.5.3. Principe et intérêt de la compensation automatique [13]

Les batteries de condensateurs sont divisées en gradins (voir Figure III.9). La valeur de cosφ est détectée par un relais varmétrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du cosφ désiré. Le transformateur de courant doit être placé en amont des récepteurs et des batteries de condensateurs. La surcompensation est néfaste car elle augmente anormalement la tension de service. La compensation automatique permet donc d'éviter les surtensions permanentes résultant d'une surcompensation lorsque le réseau est peu chargé.

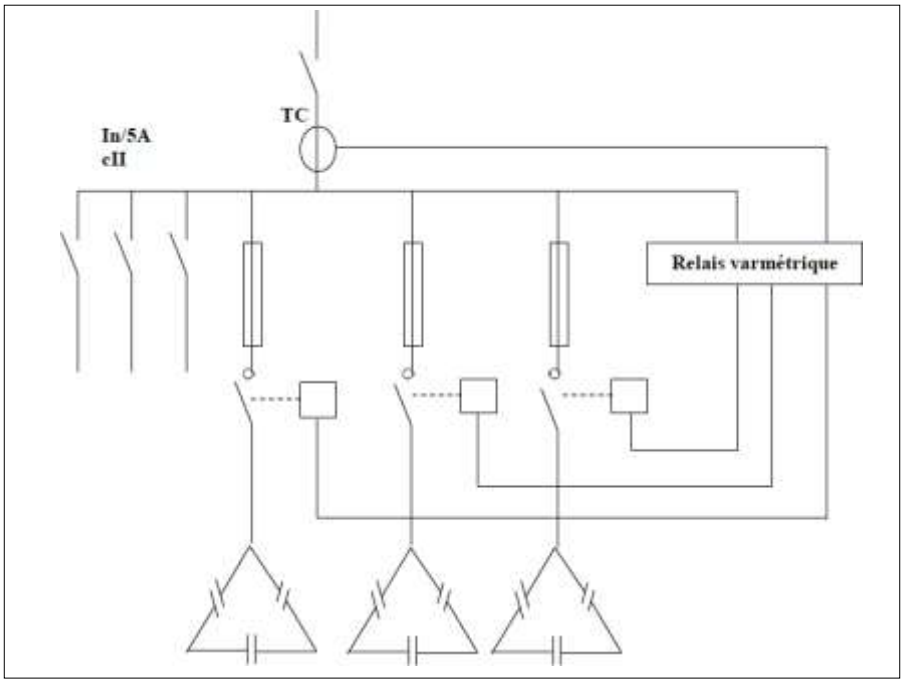


Figure III.9 : *Principe de la compensation automatique d'une installation [13]*

On maintient ainsi une tension de service régulière tout en évitant de payer de l'énergie réactive au distributeur en période de forte consommation.

Règle usuelle en basse tension

Si la puissance des condensateurs (kVAR) est inférieure à 15% de la puissance du transformateur, on choisit une batterie en gradins avec régulation automatique.

III.6. Les différents modes de compensation (emplacement des condensateurs)

La compensation peut être globale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est celle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc dans la pratique, un optimum technico-économique [13].

III.6.1. Compensation globale

Principe

La batterie est raccordée en tête d'installation (voir figure III.10), et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la période de facturation de l'énergie réactive pour un fonctionnement normal de site.

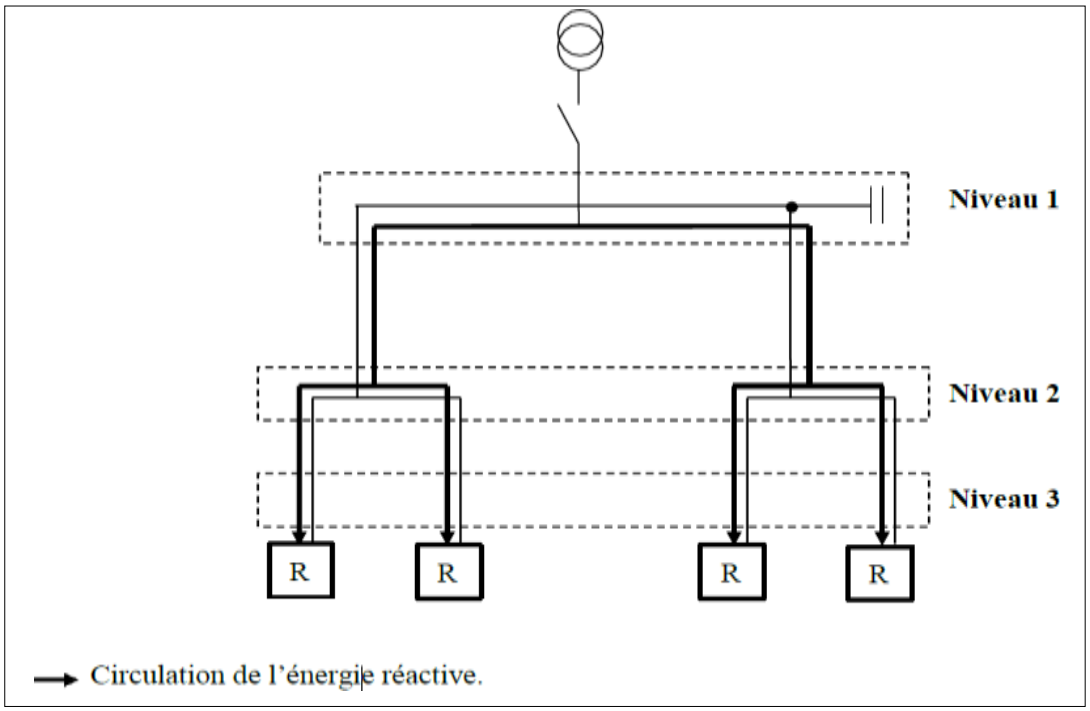


Figure III.10 : *Compensation globale [13]*

Intérêt

Le foisonnement naturel des charges permet un dimensionnement faible de la batterie. Elle est en service en permanence, elle est donc amortie encore plus rapidement.

Ce type de compensation peut, suivant le cas :

Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.

Diminuer la puissance apparente en l'ajustant au besoin en puissance active de l'installation.

Augmenter la puissance active disponible du transformateur de livraison.

Remarque

Le courant réactif circule dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.

Les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations situées en aval de la batterie ne sont pas diminuées.

Utilisation

Lorsque la charge est régulière, une compensation globale convient.

III.6.2. Compensation par secteur

Principe

La batterie est raccordée au tableau de distribution (Voir figure III.11) et fournit l'énergie demandée au secteur de l'installation. Une grande partie de l'installation est soulagée, en particulier les canalisations alimentant chaque secteur.

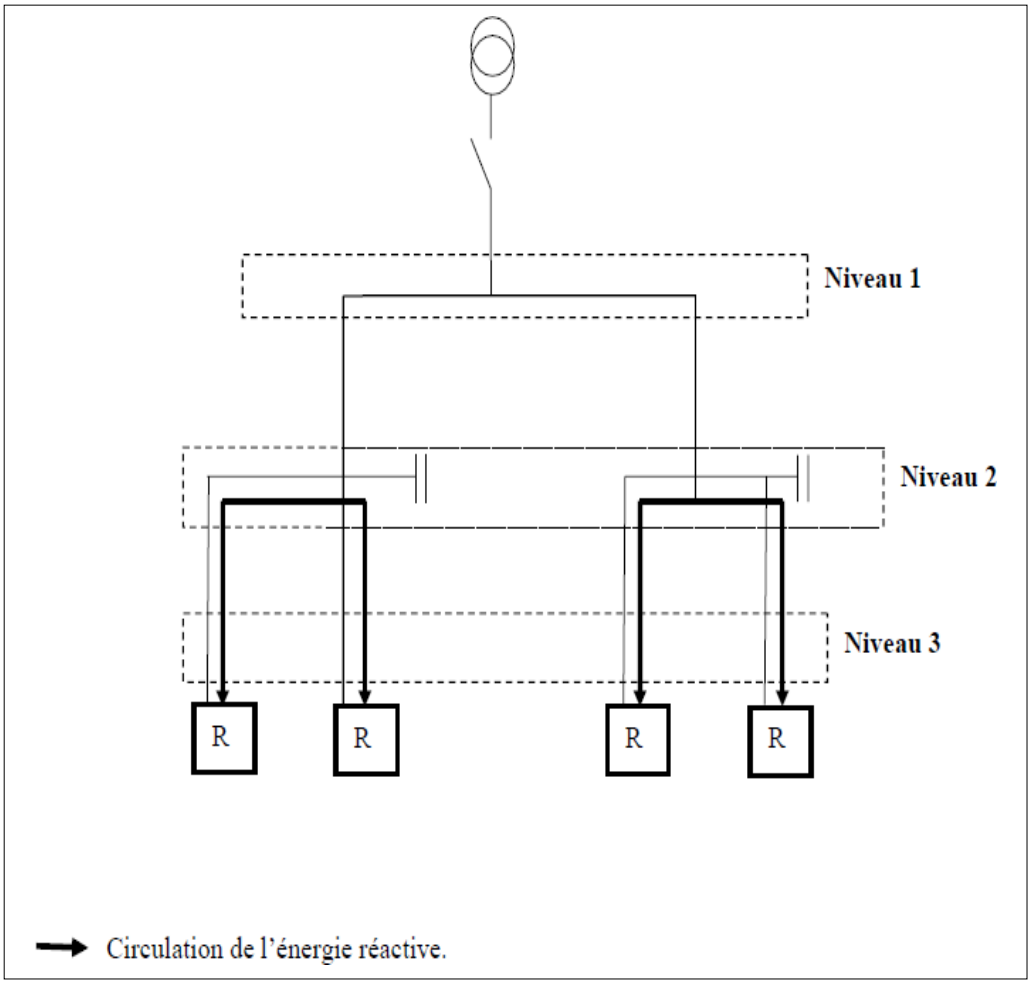


Figure III.11 : *Compensation par secteur [13]*

Intérêt

Ce type de compensation permet de :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Optimiser une partie du réseau, le courant réactif n'étant pas véhiculé entre le niveau 1et 2.
- Augmenter la puissance active disponible du transformateur et la puissance active qui peut être véhiculée dans les canalisations situées en amont du secteur compensé [13].

Remarque

- ✓ Le courant réactif circule dans l'installation du niveau 2 jusqu'aux récepteurs.
- ✓ Les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations reliant le niveau 2 au niveau 1 sont diminuées.
- ✓ Il y a un risque de surcompensation en cas de variations importantes de la charge (ce risque peut être éliminé par l'installation de batteries en gradins).

Utilisation

Une compensation par secteur est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des secteurs à forte consommation d'énergie réactive.

III.6.3. Compensation individuelle

Principe

La batterie est raccordée directement aux bornes du récepteur (Voir figure III.12).

La compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur.

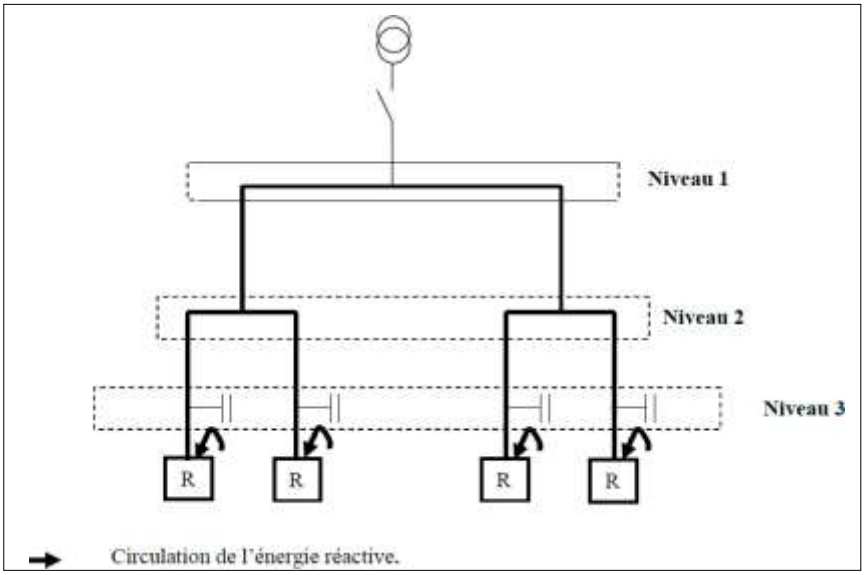


Figure III.12 : *Compensation individuelle [13]*

Lorsqu'elle est possible, cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins. Un complément en tête de l'installation peut être nécessaire.

Intérêt

Ce type de compensation permet de :

Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : Tarif vert en France).

Augmenter la puissance active disponible du transformateur et la puissance active qui peut être véhiculée dans les canalisations situées en amont du récepteur.

Réduit les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations entre le niveau 3 et le niveau 1.

Remarque

Le courant réactif n'est plus véhiculé dans les canalisations de l'installation.

Utilisation

Une compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance du transformateur. C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantage mais qui est le plus coûteux.

III.6.4. Lieu d'installation des condensateurs

Réseau HT de distribution

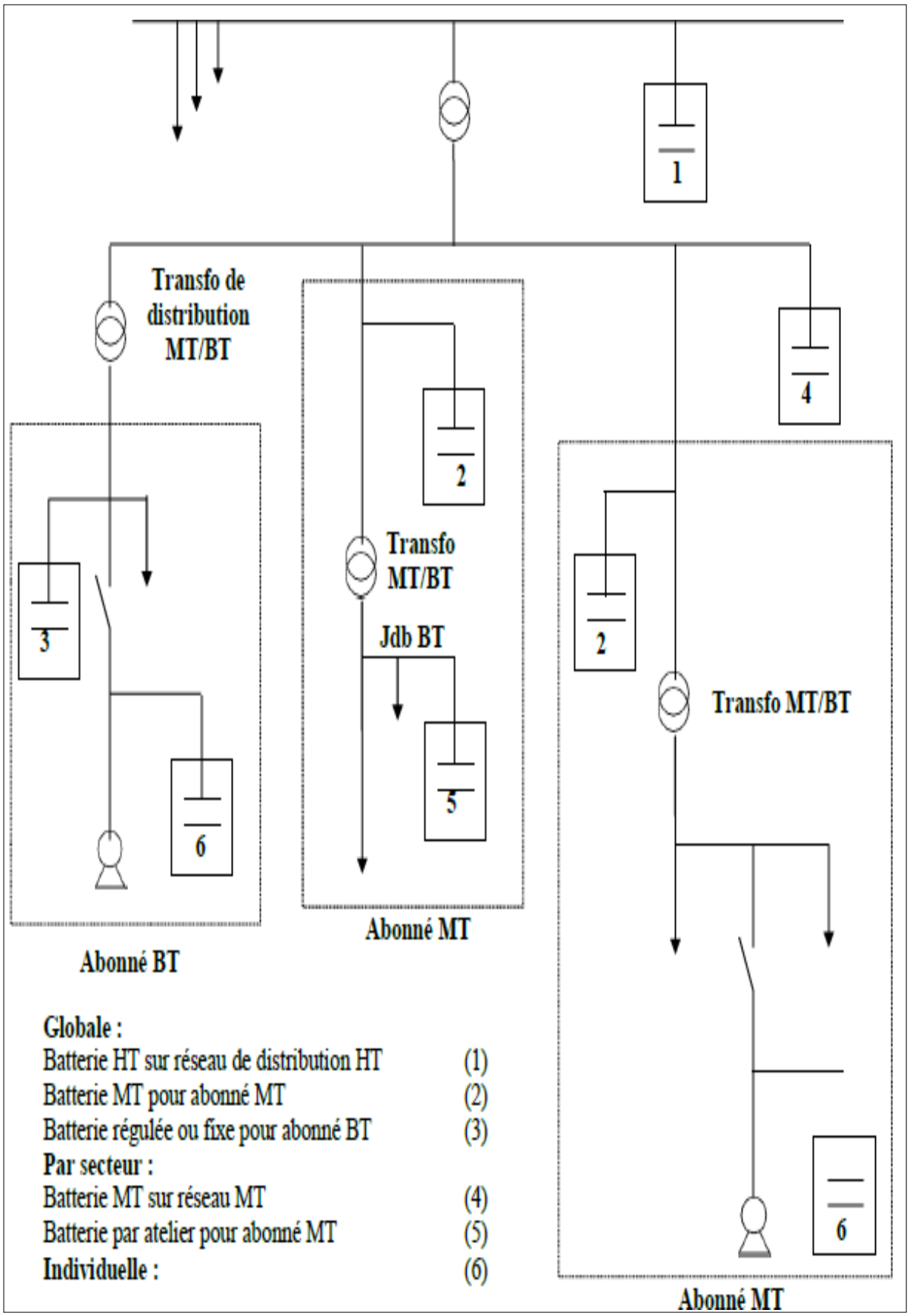


Figure III.13 : *Installation des batteries de condensateur [14].*

III.7. Compensation par condensateurs sur le réseau public

Un réseau électrique est caractérisé par des résistances (R), des inductances (L) et des condensateurs (C).

- La résistance « R » a pour seule action la transformation directe et irréversible d'énergie électrique en chaleur.
- L'inductance « L » permet la transformation d'énergie électrique en une autre forme, par l'intermédiaire du champ magnétique associé au courant.
- Le condensateur « C » a souvent un rôle production d'énergie réactive.

Le contrôle de la tension aux sommets THT et HT passe par un contrôle des transits de puissances réactives qui s'obtient par une localisation et une utilisation appropriée de moyens de compensation de l'énergie réactive. Ainsi, en règle générale, on s'efforcera de minimiser les transits de l'énergie réactive sur les réseaux de transport en compensant une grande partie de la consommation réactive des charges grâce à des condensateurs installés dans les postes HT/MT et MT/BT.

Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt.

Dans ce qui suit, nous allons donner ces deux types d'installation.

III.7.1. Installation série

L'installation des batteries de condensateurs en série permet de compenser les chutes de tension sur les lignes de transport d'énergie réactive (THT et HT). En diminuant la réactance effective de la ligne, la capacité de transit de la puissance active peut être augmentée en diminuant les chutes de tension.

Considérons le calcul de la puissance de la batterie de condensateur à installer afin de compenser la chute de tension sur un réseau. La figure III.14, montre un modèle de réseau dans lequel un condensateur série est installé.

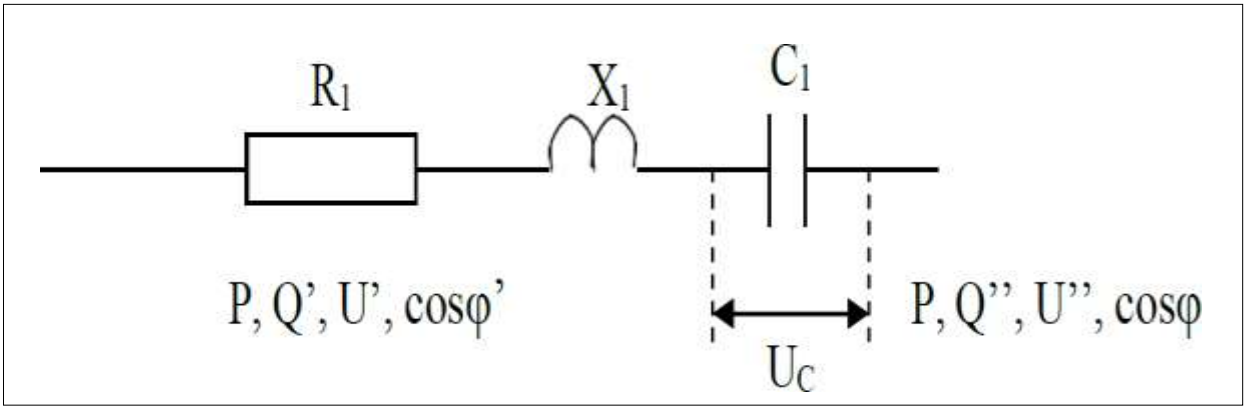


Figure III.14 : *Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série [15]*

La puissance active P est considérée constante avant et après le condensateur, par contre les paramètres Q', U' et cosφ' sont considérés à l'amont, Q'', U'' et cosφ à l'aval du condensateur.

$P = \sqrt{3}.U'.cos\emptyset'.I$ de la mont **(III.2)**

$P = \sqrt{3}.U''.cos\emptyset.I$ de l'aval **(III.3)**

$$\frac{P}{P} = \frac{U'.cos\emptyset'}{U''.cos\emptyset} \Longrightarrow cos\emptyset' = \frac{U''.cos\emptyset}{U'}$$

On a : $tga = \frac{\sqrt{1-cos^2 a}}{cosa}$ $a, angle\ quelconque$

Donc

on va voir

$$tg\emptyset' = \frac{\sqrt{1-cos^2\emptyset'}}{cos\emptyset'} = \frac{\sqrt{U'^2 - U''^2 cos^2\emptyset}}{U''.cos\emptyset}$$

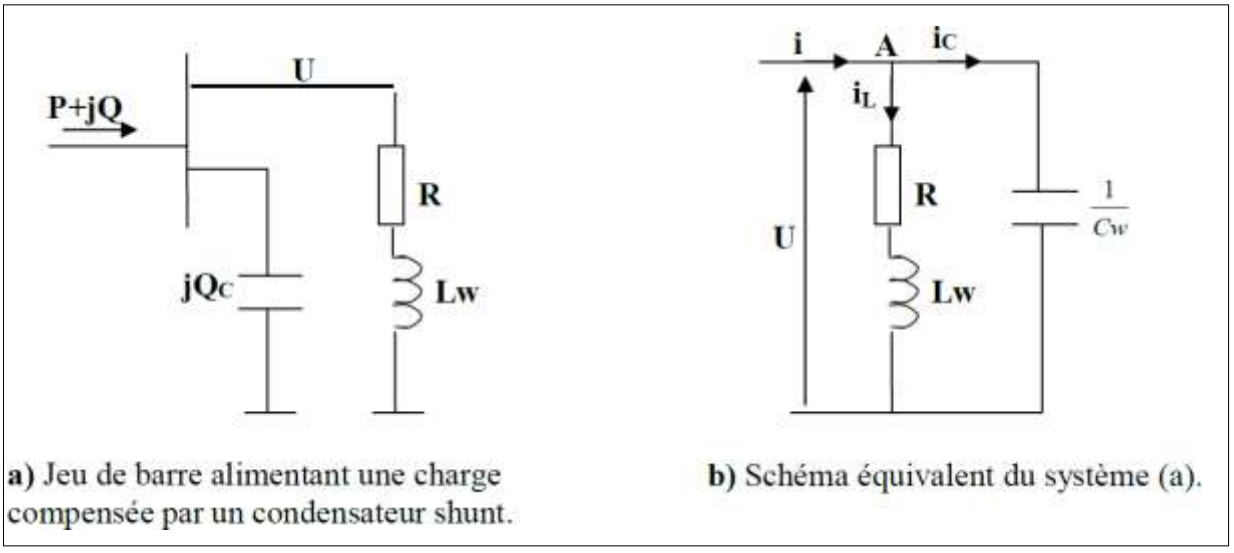
La puissance co,posée est de :

$$Q_c = Q' - Q'' = P(tg\varphi - tg\varphi') \quad \textbf{(II.4)}$$

$$Q_c = P\left(\frac{sin\emptyset}{cos\emptyset} - \frac{\sqrt{U'^2 - U''^2 cos^2\emptyset}}{U''.cos\emptyset}\right) \ (Puissance\ composée)$$

III.7.2. Installation shunt

Considérons maintenant le schéma de la Figure III.15, qui représente un jeu de barres de puissance (P+jQ) alimentant une charge à travers une ligne, les deux sont représentées par une seule impédance (R+jLw). La charge est composée d'un récepteur à un mauvais facteur de puissance, d'où l'installation d'une batterie de condensateur shunt de puissance (jQ_C).



a) Jeu de barre alimentant une charge compensée par un condensateur shunt.

b) Schéma équivalent du système (a).

Figure III.15 : *Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre.*

L'objectif voulu par l'installation du condensateur est d'améliorer le facteur de puissance de la charge. Pour le vérifier, calculons le facteur de puissance d'avant et d'après compensation.

Avant compensation

Nous avons au noeud A de la figure III.15 :

$i = i_L + i_C$ **(III–5)**

Avant compensation, le condensateur n'est pas encore entré en action, donc :

$i_C = 0$

Et :

$i = i_L = I_m \angle \varphi_1$

$i = I_m . \cos \varphi_1 = j . I_m \sin \varphi_1$ **(III-6)**

D'où :

$\emptyset_1 = artg\ (\frac{\sin \varphi 1}{\cos \varphi_1})$ **(III.7)**

Le facteur de puissance d'avant compensation vaut alors :

$$cos\ \emptyset_1 = \cos\ [artg\ (\frac{sin\ \emptyset 1}{cos\ \emptyset_1})]$$ **(III.8)**

Après compensation

$i = i_L = i_c$

Avec : $i = I_m \angle \varphi_2$: $i = I_{mL} \angle \varphi_1\ et\ i_C = I_{mC} \angle + \frac{TT}{2}$

Donc : $I_m \angle \varphi_2 = I_{mL} \angle \varphi_1 + I_{mC} \angle + \frac{TT}{2}$

$I_m . cos\ \emptyset_2 + j . I_m . cos\ \emptyset_1 + j . I_m . \sin \varphi_1 + j . I_{mC}$

$I_m . cos\ \emptyset_2 + j . I_m . sin\ \emptyset_2 = I_m . \cos \varphi_1 + j(I_{mC} + I_m . \sin \varphi_1)$

$$\emptyset_2 = -artg\ (\frac{sin\ \emptyset 2}{cos\ \emptyset_2}) = artg\ (\frac{ImC + ImL.\sin \varphi 1}{I_{mL}.\cos\ \varphi_1})$$ **(III-9)**

$$\emptyset_2 = artg\ (\frac{I_{mC} + sin\ \emptyset_1}{I_{mL} . \cos \varphi_1})$$

$$\emptyset_2 = artg\ (\frac{I_{mC} + \frac{sin\ \emptyset_1}{ImL}}{\cos \varphi_1})$$

$$\emptyset_2 = artg\ (\frac{sin\ \emptyset_1 + \frac{ImC}{ImL}}{\cos \varphi_1})$$

Le facteur de puissance après compensation vaut alors

$$\cos \varphi_2 = \cos\ \{(\frac{sin\ \emptyset_1 + \frac{I_{mC}}{ImL}}{\cos\ \varphi_1})\}$$ **(III-10)**

On voit bien que :

φ_2 (après comp) < φ_1 (avant comp) $\Longrightarrow$ cosφ_2 (après comp) > cosφ_1 (avant comp)

Donc, le facteur de puissance est amélioré par l'installation du condensateur shunt. Pour déterminer la puissance du condensateur, référons-nous à la figure III.16 représentant les diagrammes vectoriels des différents courants.

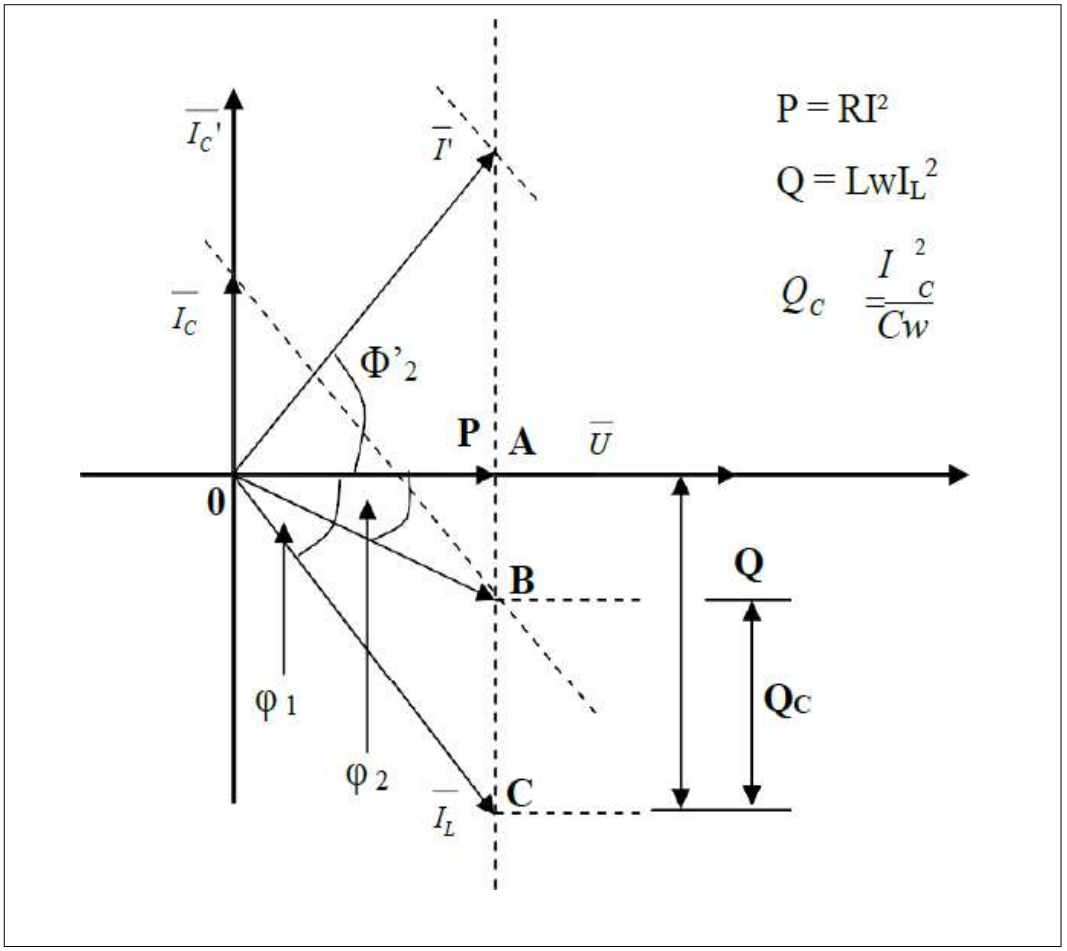


Figure III.16 : *Diagramme vectoriel du schéma de la figure III.10 [15]*

Nous avons :

$$tg\emptyset_1 = \frac{Q}{P} \quad \textbf{(III.11)}$$

Du triangle (OAC) :

$$tg\emptyset_1 = \frac{AC}{OA} \quad \textbf{(III.12)}$$

Du triangle (OAB), on déduit :

$$tg\emptyset_2 = \frac{AC-BC}{OA} = \frac{Q-Q_2}{P} = \frac{Q}{P} - \frac{Q_2}{P} \quad \textbf{(III.13)}$$

Donc : $tg\emptyset_2 = tg\emptyset_1 - \frac{QC}{P}$ **(III.14)**

Finalement, la puissance du condensateur est :

$$Q_2 = P\left(tg\emptyset_1 - tg\emptyset_2\right) \quad \textbf{(III.15)}$$

Connaissant la puissance active du réseau aux points de connexion, ainsi que la valeur du facteur de puissance que nous voulons atteindre et en calculant le facteur de puissance à corriger, nous pouvons déterminer la puissance du condensateur à installer.

III.7.3. Raccordement des condensateurs au réseau

La Figure III.17, représente le schéma de branchement d'un condensateur série à travers des disjoncteurs. P étant un parafoudre pour assurer la protection et le transformateur TT permet la mise à la terre des charges partielles après le débranchement du condensateur.

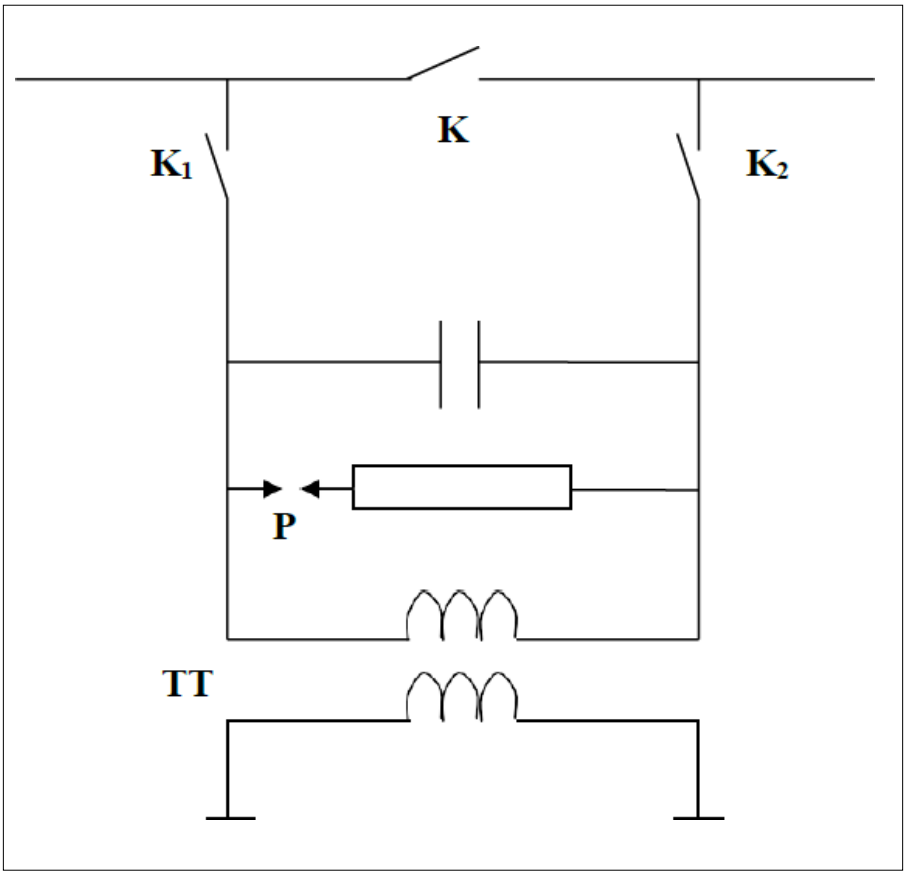


Figure III.17 : *Schéma de branchement d'un condensateur série [15]*

Les condensateurs shunt sont habituellement couplés en triangle avant d'être raccordés au réseau. Le choix du système triangle est fait pour des raisons économiques, la puissance produite par des condensateurs en triangle (Q_∇) est trois fois plus importante que la puissance produite par les mêmes condensateurs couplés en étoile ($\frac{Q\nabla}{3} = Q_Y$). Le tableau III-1 donne les différents couplages des condensateurs shunt.

Tableau III.1: *Différents couplages de condensateurs shunt (3~)*

Couplage	Etoile (Y)	Triangle (Δ)	Comparaison
Impedance 3~ (XC) des condenseurs)	$X_{CY} = \frac{V}{I}$	$X_{C\Delta} = \frac{3V}{I}$	$X_{C\Delta} = 3X_{CY}$
Puissance (Q) des condensateurs	$Q_Y = 3VI\sin\varphi$	$Q_\Delta = \sqrt{3}.UI.\sin\varphi$	$Q_Y = 3Q_\Delta$

La figure III.18, représente un gradin de condensateurs couplés en triangle sur une ligne triphasée.

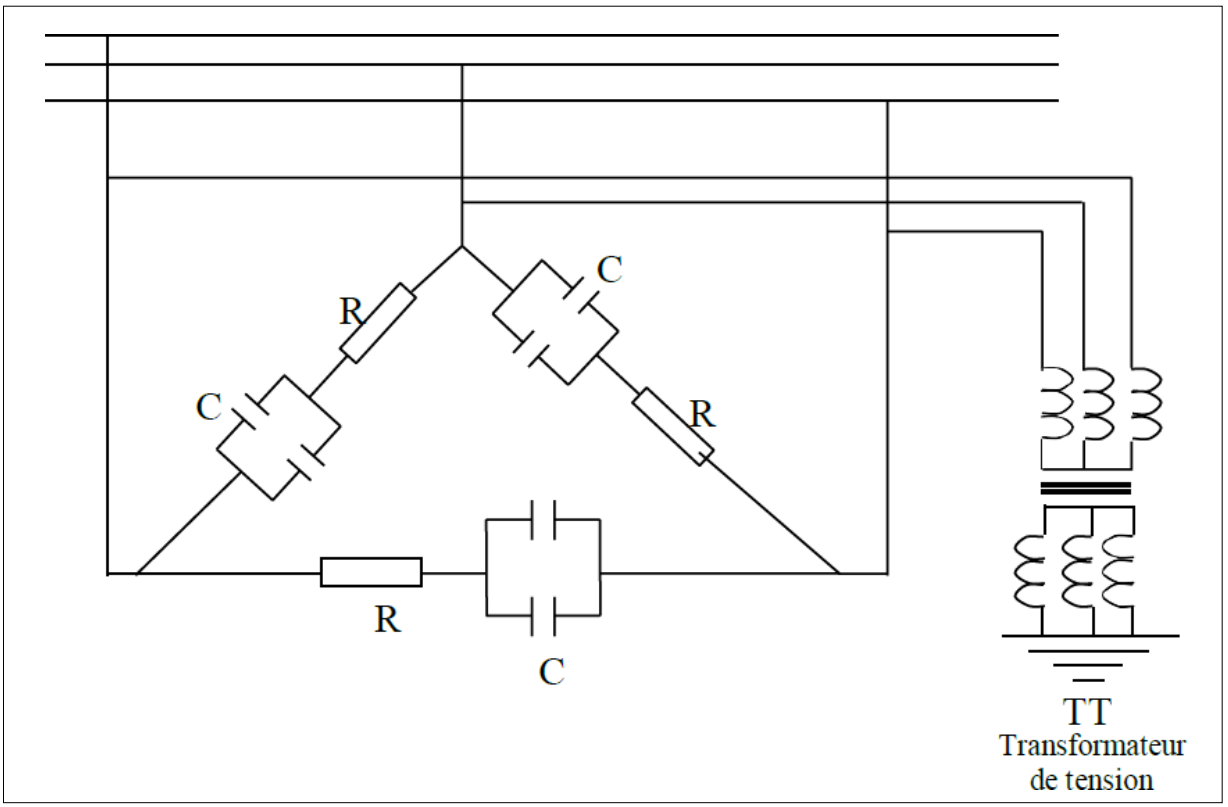


Figure III.18 : *Schéma de couplage de condensateur shunt [15]*

En cas de claquage d'un condensateur sur la figure III.18, la résistance R connectée en série, permet d'éviter le court-circuit des autres condensateurs. Le transformateur de tension, TT, permet l'élimination des charges résiduelles après la mise hors service des condensateurs. Les batteries de condensateurs peuvent être raccordées en étoile, mais dans ce cas, le problème de surtension survient en cas d'avarie d'une phase.

III-7-4-Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs

Les batteries de condensateurs présentent les avantages de tous les éléments statiques :

- Absence d'usures mécaniques.
- Entretien réduit.
- Pertes faibles, elles occupent un faible volume.
- Installation facile.

Les inconvénients que présentent les batteries de condensateurs peuvent être résumés comme suit:

- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, ce qui peut résulter d'un vieillissement prématuré et parfois de claquage.
- Les condensateurs n'ont pas la rapidité de réponse nécessaire pour répondre aux phénomènes transitoires.

III.8. Compensation par batterie de condensateurs dans une charge (les moteurs asynchrones)

Lorsqu'un moteur entraîne une charge de grande inertie, il peut, après coupure de la tension d'alimentation, continuer à tourner en utilisant son énergie et être auto-excité par une batterie de condensateurs montée à ses bornes. Ceux-ci lui fournissent l'énergie réactive nécessaire à son fonctionnement en génératrice asynchrone. Cette auto-excitation provoque un maintien de la tension et parfois des surtensions élevées.

III-8-1- Cas du montage des condensateurs aux bornes du moteur

Pour éviter des surtensions dangereuses dues au phénomène d'auto-excitation, il faut s'assurer que la puissance de la batterie vérifie la relation suivante :

$Q_C \leq 0{,}9\sqrt{3}.U_n.\mathrm{I}_0$ [13] **(III.16)**

I_0 Courant à vide du moteur.

I_0 peut être estimé par l'expression suivante :

$I_0 = 2I_n(1 - cos\,\emptyset_n)$ [13] **(III.17)**

I_n : Valeur du courant nominal du moteur.

$cos\,\emptyset_n$: $cos\,\emptyset$: du moteur à la puissance nominale

U_n: Tension composée nominale.

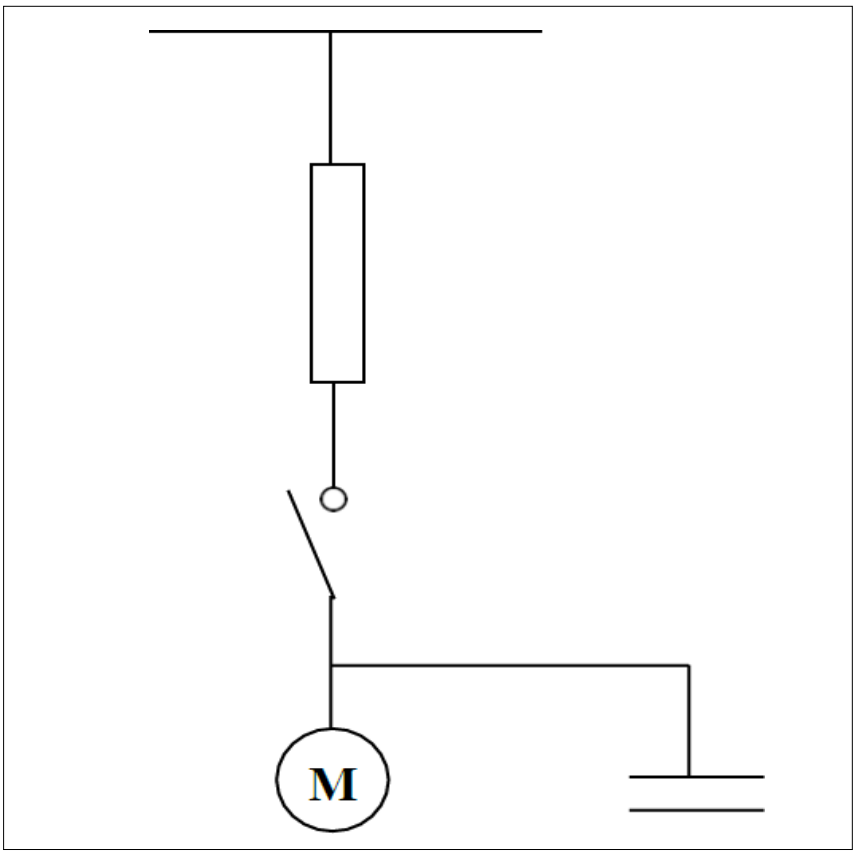


Figure III.19 : *Montage des condensateurs aux bornes du moteur [13]*

Les tableaux III-2 et III-3 donnent les valeurs maximales de compensation aux bornes des moteurs BT et MT usuels qui évitent les surtensions dangereuses par auto-excitassions. La valeur de la compensation maximale correspond à la compensation du moteur à vide, ce qui ne représente que 50% des besoins de puissance réactive en charge.

La compensation complémentaire peut être effectuée en amont (compensation globale ou par secteur) avec celle des autres charges.

L'appareillage de commande des batteries de condensateurs doit être conçu de façon à ce qu'en cas de déconnexion de la source d'alimentation, aucune liaison électrique ne subsiste entre une batterie et le moteur, cela évite une auto-excitation par une autre batterie de condensateurs.

Tableau III-2 : *Compensation réactive maximale (kVAR) aux bornes des moteurs asynchrones BT [13]*

Compensation d'énergie réactive maximale (kVAR)				
Puissance maximale du moteur BT (kW)	**Nombre de paires de pôles**			
	1	**2**	**3**	**4**
22	6	8	9	10
30	7,5	10	11	12,5
37	9	11	12,5	16
45	11	13	14	17
55	13	17	18	21
75	17	22	25	28
90	20	25	27	30
110	24	29	33	37
132	31	36	38	43
160	35	41	44	52
200	43	47	53	61
250	52	57	63	71
280	57	63	70	79
355	67	76	86	98
400	78	82	97	106
450	87	93	107	117

Le réglage de la protection du moteur contre les surcharges (relais thermique, ….etc.) doit tenir compte de l'abaissement de la valeur du courant dû à la compensation. Ce montage a l'avantage de ne nécessiter qu'un seul appareil de manœuvre.

Attention

Dans le cas où l'on aurait plusieurs batteries de ce type dans le même réseau, il convient de prévoir des inductances de chocs car on se trouve dans le même cas d'un système dit « en gradin ».

Tableau III-3 : *Compensation réactive maximale (kVAR) aux bornes des moteurs asynchrones MT [13]*

Compensation d'énergie réactive maximale (kVAR)				
Puissance maximale du moteur MT (kW)	**Nombre de paires de pôles**			
	1	**2**	**3**	**4**
140	25	30	40	50
160	30	40	50	60
180	40	45	55	65
280	60	70	90	100
355	70	90	100	125
400	80	100	120	140
500	100	125	150	175
1000	200	250	300	350
1400	280	350	420	490
1600	320	400	480	560
2000	400	500	600	700
2240	450	560	680	780
3150	630	800	950	1100
4000	800	1000	1200	1400
5000	1000	1250	1500	1750

III-8-2-Cas du montage des condensateurs en parallèle avec commande séparée, (Voir la figure III.20)

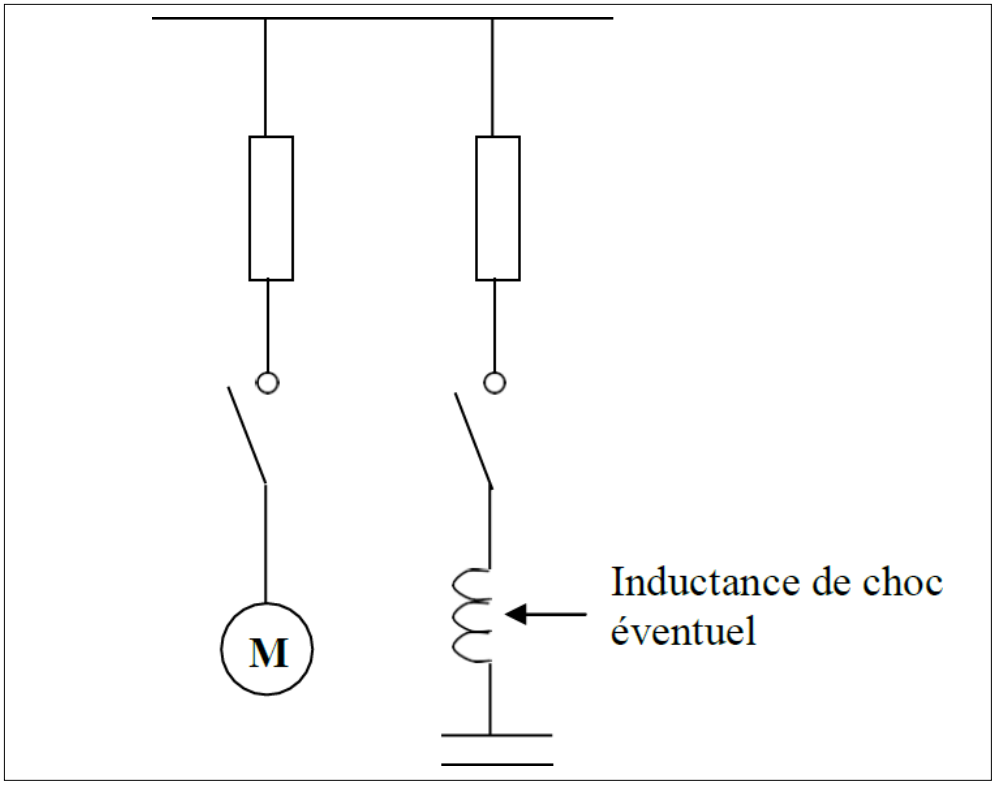


Figure III.20 : *Montage des condensateurs avec commande séparée [13]*

Pour éviter tout risque de surtension dangereuse par auto-excitassions ou bien dans le cas où le moteur démarre à l'aide d'un appareillage spécial (résistances, inductances, autotransformateur, etc.), les condensateurs ne seront enclenchés qu'après le démarrage. De même, les condensateurs doivent être déconnectés avant la mise hors tension du moteur. On peut, dans ce cas, compenser totalement la puissance réactive du moteur à pleine charge.

Attention

Dans le cas où l'on aurait plusieurs batteries de ce type dans le même réseau, il convient de prévoir des inductances de chocs car on se trouve dans le même cas qu'un système dit en « gradin ».

III.9. Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté une étude complète sur la compensation de l'énergie réactive et les différentes méthodes de compensation, la partie suivante sera consacré à une étude basée sur un calcul au niveau des machines électriques.

Chapitre IV

La compensation aux bornes des machines électriques

IV.1. Introduction

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant alternatif par des réseaux en haute, moyenne et basse tension. L'énergie consommée est composée d'une partie "active", transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie "réactive" transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques.

IV.2. Définition des transformateurs

Transformateurs sont utilisés dans les réseaux électriques pour élever ou baisser la tension. Ils sont considérés comme le cœur des réseaux. On les retrouve dès la sortie des centrales électrique comme élévateur. Dans les postées de transformations, ils sont généralement abaisseurs pour adapter la tension à la valeur convenable à chaque départ. Pour les différencier des transformateurs de tension et de courant qui servent aux mesures et à la protection, ils sont appelés transformateurs de puissance. [1],[2]

IV.3. Compensation de transformateurs

Un transformateur consomme une puissance réactive qui peut être déterminée approximativement.

La puissance réactive totale consommée par le transformateur est :

$$Q_T = Q_0 + Q \qquad \textbf{(IV.1)}$$

Si cette compensation est individuelle, elle peut se réaliser aux bornes mêmes du transformateur.

Si cette compensation est effectuée avec celle des récepteurs d'un manière globale sur le jeu de barres du tableau principal, elle peut être de type fixe à condition que la puissance totale ne dépasse pas 15 % de la puissance nominale du transformateur (sinon utiliser des batteries à régulation automatiques). [1],[2]

IV.4. Compensation de moteurs alternatifs

Le cos φ des moteurs est en général très mauvais à vide ainsi qu'à faible charge et faible en marche normale. Il peut donc être utile d'installer des condensateurs pour ce type de récepteurs

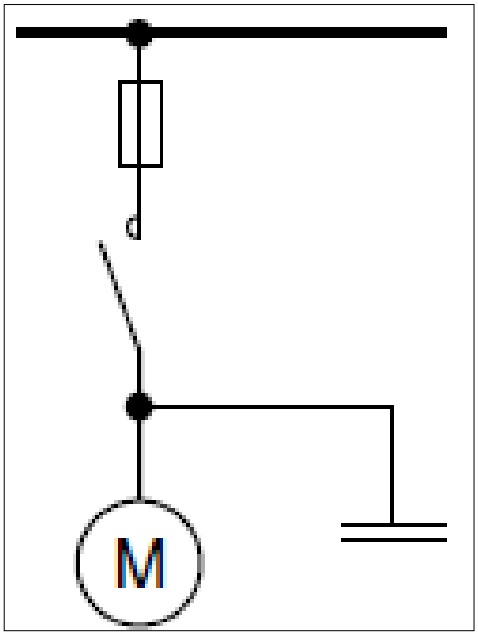


Figure IV.1 : *Montage des condensateurs aux bornes du moteur.* [1]

IV .5. Alimentation de l'entreprise en énergie électrique

L'unité tube gaz Tébessa est alimentée en énergie électrique à partir de HAMMAMAT. Cette alimentation (de l'énergie électrique) se fait par deux lignes de 90 KV en boucle. [2]

Les caractéristiques principales du réseau sont les suivantes :

- Tension nominale : 90 KV ± 8 %
- Fréquence : 50 HZ ± 1%
- Puissance de court -circuit : 2500 MVA.
- La transformation de tension se fait deux niveaux :

Transformation HT/MT (90kv/10kv)

Cette transformation est réalisée par deux transformateurs

Transformation MT/BT (10kv/0.4kv)

Celle-ci est obtenue par différents transformateurs de l'électrique est distribuée poste principal, l'énergie aux différents postes de transformation des ateliers correspondants, voir schéma de distribution de l'énergie électrique de l'entreprise.

IV .6. Poste 90 kv ANABIB

- L'énergie électrique du poste 90 kV fournie en haut tension pour usage industriel.
- Le client ANABIB tube GAZ (Elma-Labiod) est propriétaire des transformateurs HT –MT hourder pos La Sonelgaz ou réseaux de distribution selon la puissance (souscrite) ou projet.
- Le prix de l'énergie active dépend de la puissance attendre PMA.

- L'énergie réactive facturée selon la toux <50% il a une bonification ce La toux >50% il a une pénalisation.
- La facturation de puissance moyenne cos 𝜑 d'un ensemble de récepteurs à une grande importance industrielle.
- Pour le productive d'énergie pour l'a quel une mauvaise utilisation de ses installations de production.
- Pour l'utilisa tuer dons les récepteurs sur mal employés et pour qui le prix de l'énergie électrique est plus élevé.
- On corrige un mauvais facteur de puissance en installant des batteries de condensateur ceux-ci éteint générateurs d'énergie réactive ils peuvent compenser la dépense exagérée des autres appareils quand il n'est pas possible de l'éviter. [2]

- Le condensateur

Puissance réactive fournie par la capacité en effet la bobine inductive qui dépense une puissance réactive produit un déphasage arrière de l'intensité sur la tension comme le condensateur produit un déphasage avant de I sur "4,5A" puissance réactive est de sans entraîne à celle de la bobine inductive, donc donnée au circuit.

À ce moment le condensateur est un générateur de puissance réactive Nous verrons que cette propriété du condensateur a pour conséquence son utilisation dans les installations industrielles pour relever le cos 𝜑, Notre but de cette étude et d'améliorer facturation de l'électricité en fonction des consommations. Les consommations ne sont réduites qu'il été avec une consommation étudiée Suppression de l'énergie réactive et la diminution de l'énergie active. La facturation de l'électricité des droits variable en fonction de consommation.

- **Exemple de matériel**

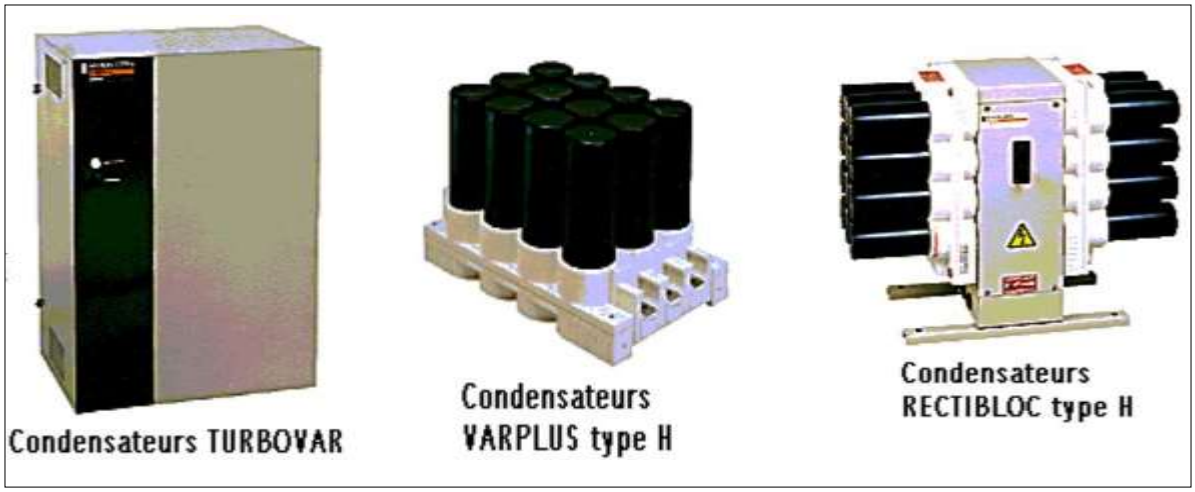


Figure IV.2 : *Les différents types de condensateurs*. [1]

- **POSTE 90 KV ANABIB**

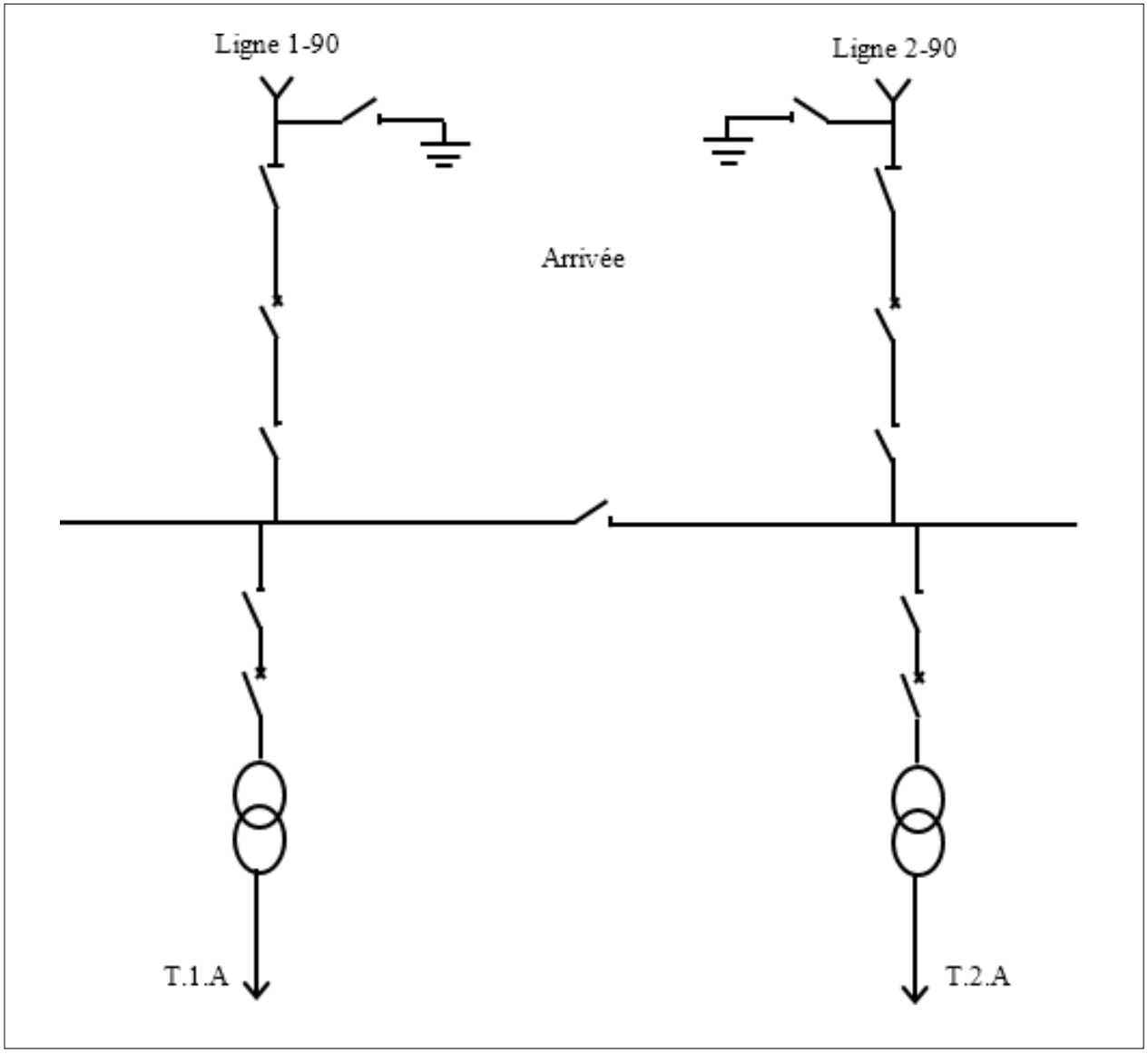


Figure IV.3: *Schéma unifilaire poste 90KV.* [1]

✓ Poste 90 kV : alimentée les sous-stations suivantes :

1- C1

2- C2

3- C3

4- C4

5- C5

6- S

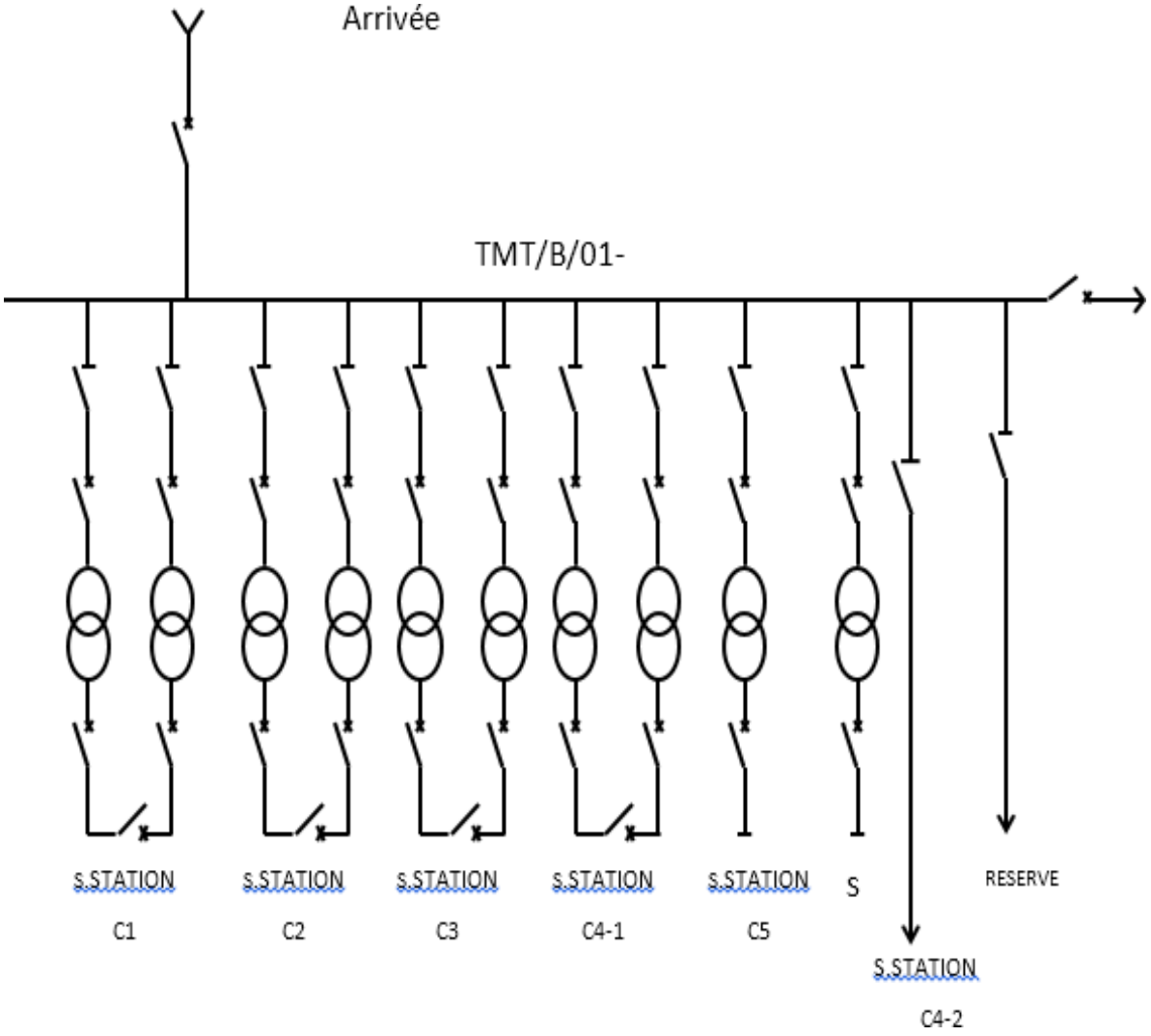
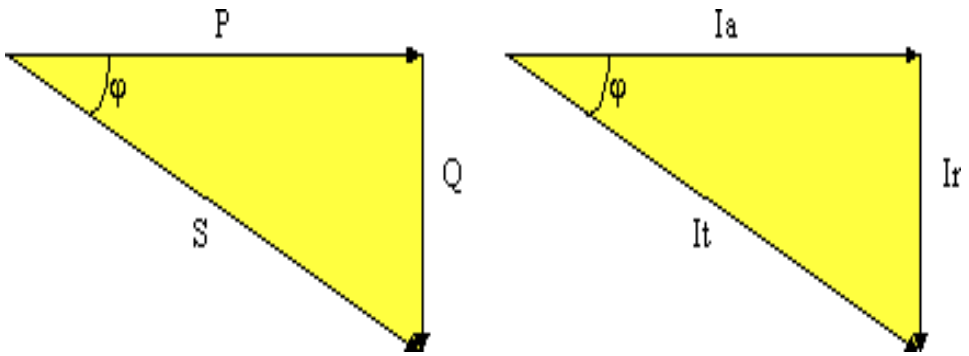


Figure IV.4 : *Schéma unifilaire poste 10KV jeux de barres.* [1]

IV.7. Méthode de calcul de la compensation de l'énergie réactive

- **Au bornes d'un:**
  - **Transformateur**
  - **Moteur a courant alternatif**



- Puissance apparente :

$$s = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (kvar)} \quad \textbf{(IV.2)}$$

- puissance active :

$$p = u * I * \cos\varphi \text{ (kw)} \quad \textbf{(IV.3)}$$

- puissance réactive:

$$Q = U * I * \sin\varphi \text{ (Kvar)} \quad \textbf{(IV.4)}$$

- Facteur de puissance:

$$\cos\varphi = \frac{p}{S} \quad \textbf{(IV.5)}$$

- La tangente :

$$\text{tg}\varphi = \frac{W_r}{W_a} = \frac{\text{enrgie réactive (k var h)}}{\text{enrgie active(k w h)}} \quad \textbf{(IV.6)}$$

✓ Et l'on a la relation :

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\text{Tg}\,\varphi^2}} \quad \textbf{(IV.7)}$$

- Courant apparent :

$$I_t = \sqrt{Ia^2 + Ir^2} \quad \textbf{(IV.8)}$$

Courant active :

$$I_a = I_t \cos\varphi \quad \textbf{(IV.9)}$$

- Courant reactive :

$$I_r = I_t \sin\varphi \quad \textbf{(IV.10)}$$

-

- **Diagramme d'amélioration de cos φ :**

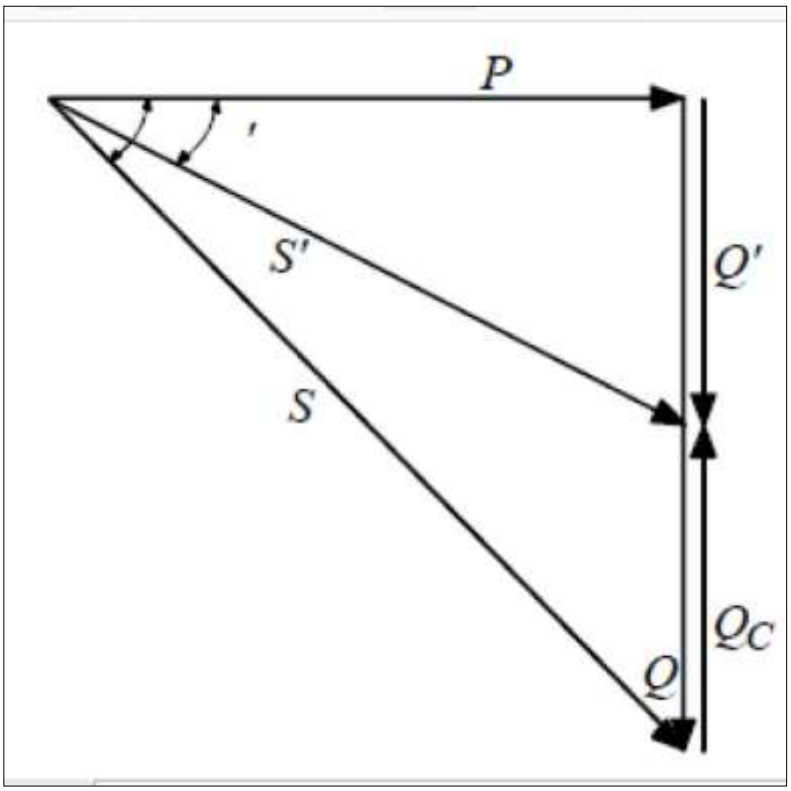


Figure IV.5 : *diagramme de cos φ*. [16]

- Puissance réactive fournie par les batteries de condensateur

$$Q_C = Q - Q' = \text{p}tg\varphi - \text{ptg}\varphi' \quad \textbf{(IV.11)}$$

$$Q_C = P(tg\varphi - \text{tg}\varphi') \quad \textbf{(IV.12)}$$

- La capacité le condensateur

$$\boldsymbol{c = \frac{Q_C}{2\pi f * u_n{}^2}} \quad \textbf{(IV.13)}$$

- Les données

$$\cos \text{Q}' = 0{,}92$$

$$\text{f} = 50 \text{ Hz}$$

$$\text{U}_\text{n} = 0{,}4\text{kv}$$

$$\sum \text{P} = 941{,}15 \text{ kw}$$

$$\sum \text{Q} = 766{,}272 \text{ KVAR}$$

$$\sum \text{S} = 1219{,}64 \text{ KVAR}$$

Tableau IV.1 : *Consommateurs de sous station C4.* [1]

Type de récepteur	Nnbre	Cosφ	Tgφ	Pinst (KW)	Fd	Charge électrique	
						Pcal (KW)	Qcal (KVAR)
Transfo d'éclairage	1	0.86	0.6	215	0.35	75.25	44.4
Transport (1,2)	2	0.85	0.6	220	0.35	77	46.97
Cercleuse (1,2)	2	0.75	0.9	3	0.35	1.05	0.924
Botteleuse (1,2)	2	0.75	0.9	230	0.35	80.5	70.84
N.d.t (1,2)	2	0.8	0.8	30	0.35	10.5	7.875
Chanfrelneuse (1,2)	2	0.75	0.9	75	0.35	26.25	23.1
Chargeur batterie CB/c1/01	1	0.8	0.8	10	0.35	3.5	2.625
Évacuation copeaux (1,2)	2	0.75	0.9	20	0.35	7	6.16
Réserve	2	0.75	0.9	10	0.35	3.5	2.625
Réserve	1	0.8	0.8	30	0.35	10.5	7.875
Labo 1	1	0.8	0.8	41	0.35	14.35	10.762
Labo 2	1	0.8	0.8	42	0.35	14.7	11.025
Atelier central TDFM/j/1,2	2	0.75	0.9	75	0.35	26.25	23.1
Atelier central TDFM/j/3,4	2	0.75	0.9	83	0.35	29.05	25.564
Atelier central TDFM/j/5	1	0.75	0.9	60	0.35	21	18.48
Atelier centraltdfm/j/5	1	0.75	0.9	65	0.35	22.75	20.2
Atelier central TS/j//1,2	2	0.75	0.9	10	0.35	3.5	3.08
Pont roulant TS/d2/1	1	0.75	0.9	120	0.35	42	36.96
Parachèvement ap1 TDBT/d2/2	1	0.9	0.5	112	0.35	39.2	18.816
Mancheneuse	1	0.75	0.9	30	0.35	10.5	9.24
Filetage	1	0.75	0.9	55	0.35	19.25	16.94
Banc d'épreuve	1	0.75	0.9	70	0.35	24.5	21.56
Transport ap1	1	0.8	0.8	45	0.35	15.75	11.812
Protection extérieure tubes	1	0.75	0.9	152	0.35	53.2	46.816
Transport tubes	1	0.75	0.9	40	0.35	14	12.32
Parachèvement ap1tdbt/d2/1	1	0.7	1	105	0.35	36.75	37.485
Atelier central TDFM/j/7	1	0.75	0.9	60	0.35	21	18.48
Total						**941.15**	**766.272**
S = 1219.64							

$$\cos\varphi = \frac{941,15}{1219,64} = 0,77 < 0,92 = \cos\varphi'$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{\sum Q}{\sum P} = \frac{766,272}{941,15} = 0,81$$

$$\cos\varphi' = 0,92$$

$$\varphi' = 23,07°$$

$$\text{tg}(23,07) = 0,42$$

- La puissance réactive fournie par les batteries de condensateur

$$Q_{C=p\ (tg\varphi\ -tg\varphi')} \qquad \textbf{(IV.14)}$$

$$= 941,15(0,81 - 0,42) = 367,05 \text{ KVAR}$$

- La puissance apparente avec compensation

$$s_c = \sqrt{p^2 + (Q - Q_C)^2} \qquad \textbf{(IV.15)}$$

$$S_C = \sqrt{(941,15)^2 + (766,27 - 367,05)^2}$$

$$= 1022,31 \text{ KVAR}$$

- La capacité des batteries de condensation

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f\ (U_n)^2} \qquad \textbf{(IV.16)}$$

$$C = \frac{367,05}{2\pi 50\ (0,4)^2}$$

$$c = 7,31 \text{ Farad}$$

- Moteur alternatif

Les données :

$\Delta/\gamma = 380/440$ V

$U_n = 0,4$ KV

$I = 4,8\ A$

$P = 15,5\ KW$

$Q = 11,4\ KVAR$

$n = 1480\ tr/min$

$cos\varphi' = 0{,}98$

$hf = 50Hz$

- Calcul la puissance apparente

$$s = \sqrt{p^2 + Q^2} \quad \textbf{(IV.17)}$$

$$= \sqrt{(15{,}5)^2 + (11{,}4)^2}$$

$$S = 19{,}24\ KVAR$$

- Facture de puissance

$$cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{15{,}5}{19{,}24} = 0{,}80 \quad \textbf{(IV.18)}$$

- Tgφ

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{11{,}4}{15{,}5} = 0{,}73 \quad \textbf{(IV.19)}$$

$cos\varphi' = 0{,}98$

$\varphi' = 11{,}47°$

$tg\varphi' = 0{,}20$

- La puissance réactive fournie par les batteries de condensateur

$$Q_{C=p\ (tg\varphi\ -tg\varphi')} \quad \textbf{(IV.20)}$$

$Q_C = 15{,}5(0{,}73 - 0{,}20)$

$Q_{C=}8{,}215KVAR$

- La puissance apparente avec compensation

$$s_c = \sqrt{p^2 + (Q - Q_C)^2} \quad \textbf{(IV.21)}$$

$$S_C = \sqrt{(15{,}5)^2 + (11{,}4 - 8{,}215)^2} = 15{,}82\ \text{KVAR}$$

- La capacité des batteries de condensation

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f\ (U_n)^2} \quad \textbf{(IV.22)}$$

$$C = \frac{8{,}215}{2\pi * 50 * 0{,}4^2}$$

$$C = 0{,}16 \text{ Farad}$$

IV.8. Compensation aux bornes d'un transformateur

Au secondaire d'un transformateur la puissance active disponible est d'autant plus élevée que le facteur de puissance de sa charge est grand.

Il est par conséquent intéressant, en prévision d'extensions futures, ou au moment même d'une extension, de relever le facteur de puissance pour éviter l'achat d'un nouveau transformateur.

- **Exemple**

Un transformateur de puissance S = 630 *kVA* alimente une charge de puissance active

$P1$ = 450 *kW* avec un cosφ moyen égal à 0,8. [1]

On détermine :

La puissance apparente au niveau de la charge N°01

$$S_{1\,ch} = \frac{P1ch}{cos\varphi_{1ch}} = \frac{450}{0{,}8} = 563 \text{ KVA} \quad \textbf{(IV.23)}$$

La puissance réactive au niveau de la charge N°01

$$Q_{1ch} = \sqrt{S^2_{1ch} - P^2_{1ch}} = \sqrt{563^2 - 450^2} \quad \textbf{(IV.24)}$$

$$Q_{1ch} = 338 \text{ KVAR}$$

- L'extension envisagée nécessite une puissance active supplémentaire $P2$ = 100 *kW* avec cos φ = 0,7 on en déduit les caractéristiques de cette puissance supplémentaire :

- La Puissance apparente au niveau de la charge N°02

$$S_{2\,ch} = \frac{P2ch}{cos\varphi_{2ch}} = \frac{100}{0{,}7} = 143 \text{ KVA} \quad \textbf{(IV.25)}$$

- La puissance réactive au niveau de la charge N°02

$$Q_{2ch} = \sqrt{S^2_{2ch} - P^2_{2ch}} = \sqrt{143^2 - 100^2} \quad \textbf{(IV.26)}$$

$$Q_{2ch} = 102 \text{ KVAR}$$

- **Avant compensation**

$$S'_{Tch} = S_{1ch} + S_{2ch} = 563 + 143 \quad \textbf{(IV.27)}$$

$$S'_{Tch} = 704\ KVA$$

- La puissance active totale à fournir est :

$P_t = P_1 + P_2 = 450 + 100 = 550\ KW$

- Pour $P = 550\ kW$, la puissance réactive maximale que peut fournir le transformateur de 630 kVA est :

$$Q_{t\,max} = \sqrt{S_n^2 - P_t^2} = \sqrt{630^2 - 550^2} \quad \textbf{(IV.28)}$$

$Q_{t\,max} = 307\ KVAR$

- La puissance réactive totale à fournir à la charge avant compensation est :

$$Q_{t\,ch} = Q_{1ch} + Q_{2ch} = 338 + 102 \quad \textbf{(IV.29)}$$

$Q_{t\,ch} = 440\ KVAR$

- **Après compensation**

- La puissance minimale de la batterie à installer est donc :

$$Q_{\text{minc}} = Q_{tch} - Q_{t\,max} = 440 + 307 \quad \textbf{(IV.30)}$$

$Q_{\text{minc}} = 133\ KVAR$

on obtient alors : $\cos \varphi_{ch} = \frac{Pt}{S_n} = \frac{550}{630} = 0{,}873$

Ce qui permettrait d'avoir une réserve de puissance de :

630 - 550 = 80 kW

$\cos \varphi_{ch} = 1 = \frac{550+80}{630}$

$P' = 80\ KW$

- **Calcul $tg\varphi_{ch}$ de la charge**

$cos\varphi_{ch} = 0{,}873$

$\varphi_{ch} = 29{,}190°$

$$tg\varphi_{ch} = 0{,}5586$$

Avec P=550 KW : $$tg\ \varphi' = \frac{Q'}{P} = \frac{133}{550}$$

$$tg\varphi' = 0{,}2418$$

- La puissance réactive fournie par les batteries de condensateur

$$Q_c = P(tg\varphi - tg\varphi') = 550\ .\ (0{,}5586 - 0{,}2418) \quad \textbf{(IV.31)}$$

$Q'_C = 175$ KVAR

Pour obtenir un cos φ proche de 1, on a : $cos\varphi \simeq 1 = \frac{Pth}{S_n} = \frac{630}{630}$

$S_n = \sqrt{630^2 - 0^2} = 630\ KVA$

Donc, pour faire une compensation il faut installer des batteries de condensateurs dont la puissance réactive est de : $Q_{c,max} = 440\ KVAR$ Maximale

Et : $Q_{c,min} = 133\ KVAR$ Minimale

Pour : U_n= 400 V

IV.8.1. La capacité des batteries de condensation

couplage en étoile

$$c = \frac{Q_c}{2\pi f\ U_n^2} = \frac{133}{2.\pi.50.(0{,}4)^2} = 2647\ \mu F \quad \textbf{(IV.32)}$$

Couplage en triangle

$$c = \frac{Q_c}{2\pi f\ U_n^2 3} = \frac{133}{2.\pi.50.(0{,}4)^2.3} = 882.3\ \mu F \quad \textbf{(IV.33)}$$

Le tableau suivant montre la consommation de la puissance réactive des transformateurs pour deux fonctionnements : à vide et en charge. [1]

Tableau IV.2 : *Consommation de puissance réactive des transformateurs 20 kV/400 V à isolement liquide*. [1]

Puissance du transformateur (kVA)	**Consomation de puissance réacive**	
	À vide (kVA)	**Àpleine charge (kVA)**
100	2.5	6.1
160	3.7	9.6
250	5.3	14.7
315	6.3	18.4
400	7.6	22.9
500	9.5	28.7
630	11.3	35.7
800	20	54.5
1000	23.9	72.4
1250	27.4	94.5
1600	31.9	126.2
2000	37.8	176

IV.9. Compensation des moteurs asynchrones

En cas de coupure de la tension d'alimentation, le moteur peut continuer à tourner en remplaçant la tension d'alimentation par son énergie cinétique et être auto-excité par une batterie de condensateurs montée à ses bornes.

La batterie de condensation fournit l'énergie réactive nécessaire à son fonctionnement en génératrice asynchrone.

L'auto-excitation provoque un maintien de la tension et parfois des surtensions élevées.

- Le tableau suivant montre la compensation d'énergie réactive maximale (kvar) aux bornes des moteurs asynchrones en basse tension :

Tableau IV.3 : *Compensation d'énergie réactive maximale (kvar) aux bornes des moteurs asynchrones BT.* [1]

Compensation d'énergie réactive maximale (Kvar)				
Puissance nominale du moteur BT (kW)	**Nombre de paires de pôles**			
	1	**2**	**3**	**4**
22	6	8	9	10
30	7.5	10	11	12.5
37	9	11	12.5	16
45	11	13	14	17
55	13	17	18	21
75	17	22	25	28
90	20	25	27	30
110	24	29	33	37
132	31	36	38	43
160	35	41	44	52
200	43	47	53	61
250	52	57	63	71
280	57	63	70	79
355	67	76	86	98
400	78	82	97	106
450	87	93	107	117

Tableau IV.4 : *compensation d'énergie réactive maximale (kvar) aux bornes des moteurs asynchrones MT.* [1]

Compensation d'énergie réactive maximale (Kvar)				
Puissance nominale du moteur MT (kW)	**Nombre de paires de pôles**			
	1	**2**	**3**	**4**
140	30	35	40	50
160	30	40	50	60
180	40	45	55	65
280	60	70	90	100
355	70	90	100	125
400	80	100	120	140
500	100	125	150	175
1000	200	250	300	350
1400	280	350	420	490
1600	320	400	480	560
2000	400	500	600	700
2240	450	560	680	780
3150	630	800	950	1100
4000	800	1000	1200	1400
5000	1000	1250	1500	1750

IV.10. Solutions Modernes de Dépollution

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

L'exploitation de la bonne qualité d'énergie électrique avec un faible coût a fait l'objet d'une demande croissante de la part des industriels. Le but principal des chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance est de satisfaire les industriels par l'utilisation des solutions plus efficaces et économiques.

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les *IGBT, IGCT, GTO* et *MOSFET*, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques [17],[18]. Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer :

- Les alimentations sans interruption ou de secours **(ou *ASI*, ou en anglais *UPS*, Uninterruptible Power Supply)**
- Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles "*Flexible Alternating Current Transmission Systems* (*FACTS*)" ;

Les filtres actifs de puissance "*Active Power Filters (APF)*" ;

Les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

IV.10.1. Solution de dépollution adoptée

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

IV.10.1.1. Filtres Actifs

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs de puissance (Active Power Filtres) sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [17],[19]. En fonction de leur mode de connexion au réseau, on distingue :

IV.10.1.2. Les Convertisseurs à Prélèvement Sinusoïdal

Le prélèvement d'un courant sinusoïdal engendre une nouvelle structure de conversion AC/DC, différente de la version classique, où le courant peut être contrôlé. Les techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Dans ce contexte, plusieurs structures ont été développées et présentées dans la littérature, ayant pour objectif d'assurer un facteur de puissance unitaire. Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux)
- Le filtre actif hybride (série, parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs. Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques [20],[21]. Différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées.

IV.10.1.2.1. Le Filtre Actif Parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (IV-6), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

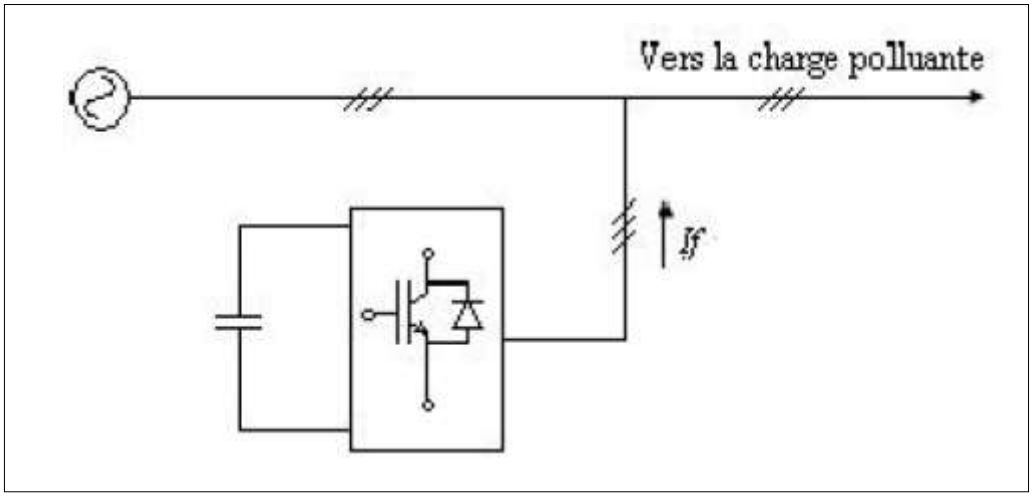


Figure IV.6 : *Filtre actif parallèle*

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de FAP a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles.

En effet, dans ces années-là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de FAP à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique [20],[22].

Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des FAP.

Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Ces premiers prototypes ne compensaient alors que les perturbations harmoniques de courant. Suite à ces premiers

développements, d'autres types de FAP ont pu être réalisés pour compenser à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courant.

Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance.

De même, des filtres actifs parallèles installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique.

IV.10.1.2.2. Le Filtre Actif Série (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Figure (IV-7) : comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

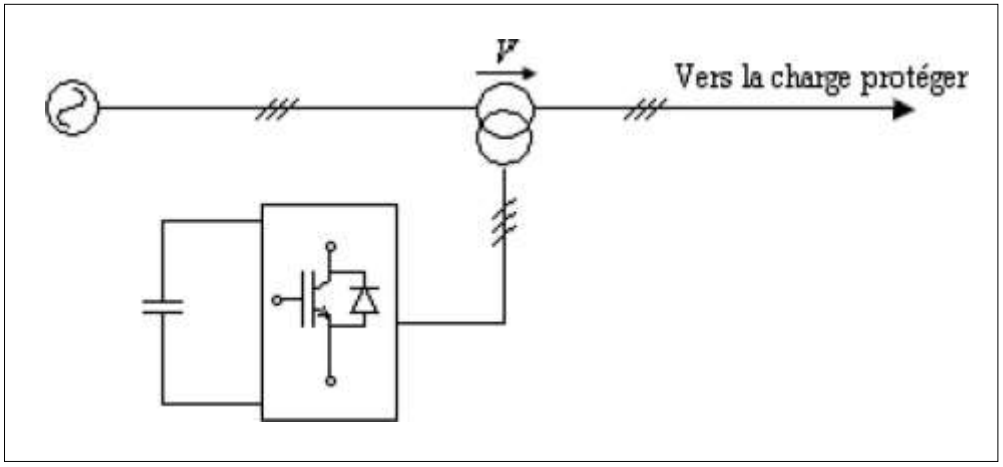


Figure IV.7 : *Structure d'un Filtre actif série*

Le (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes. En 1976, une famille de FAS avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution.

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série [20],[22].

IV.10.1.2.3. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La combinaison parallèle-série actifs aussi appelée (Unified Power Quality Conditionner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure (IV-8) : Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

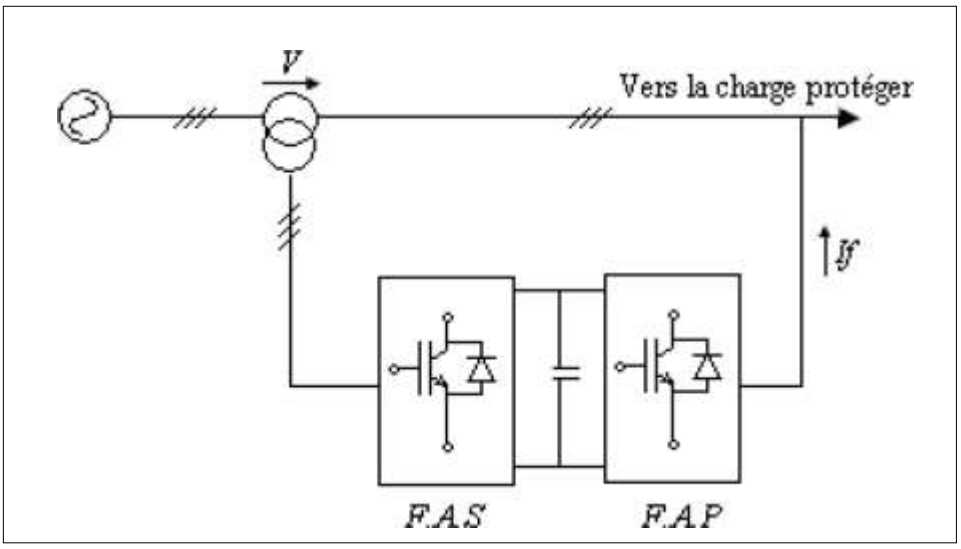


Figure IV.8 : *combinaison parallèle série actifs (UPQC)*

IV.10.1.2.4 Combinaison hybride active et passive

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution.
Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.

Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

IV.10.1.2.4.1. Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du *FAS* dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Figure (IV-9).

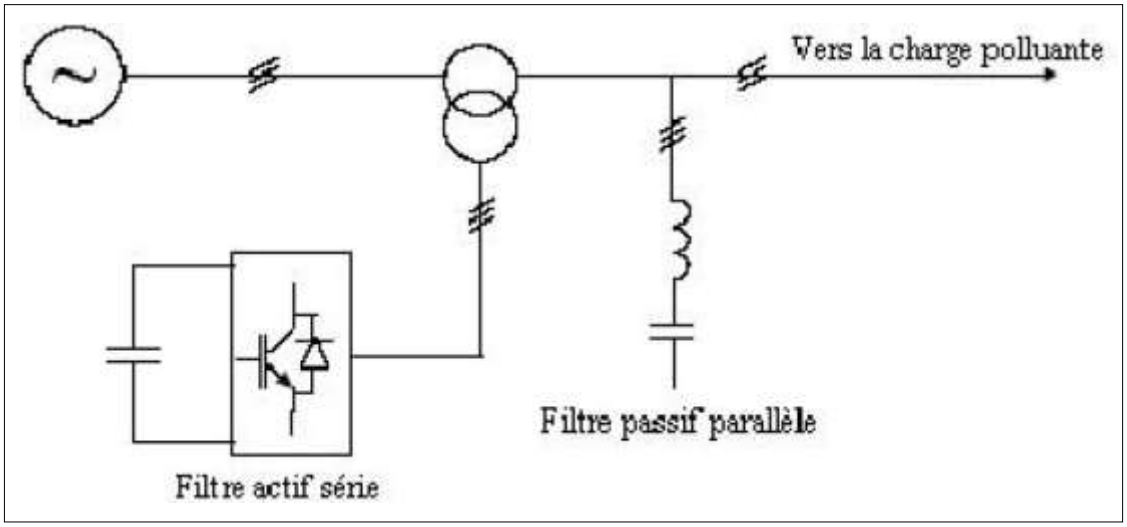


Figure IV.9 : *Filtre actif série est filtre passif parallèle*

IV.10.2.4.2. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Figure (IV.10) est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

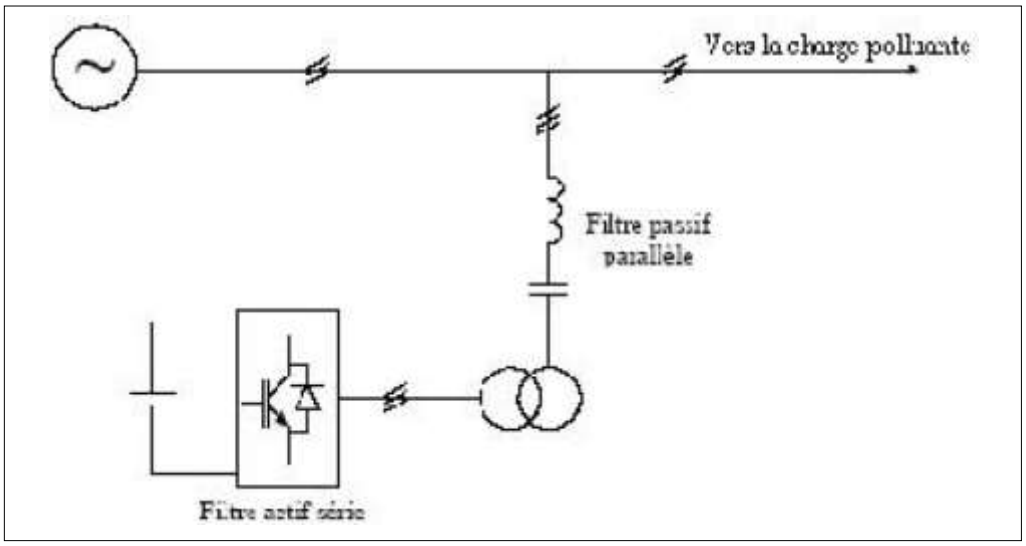


Figure IV.10 : *Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle*

IV.10.2.4.3. Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en Figure (IV-11), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre

passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le (F A P). Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance [20],[23].

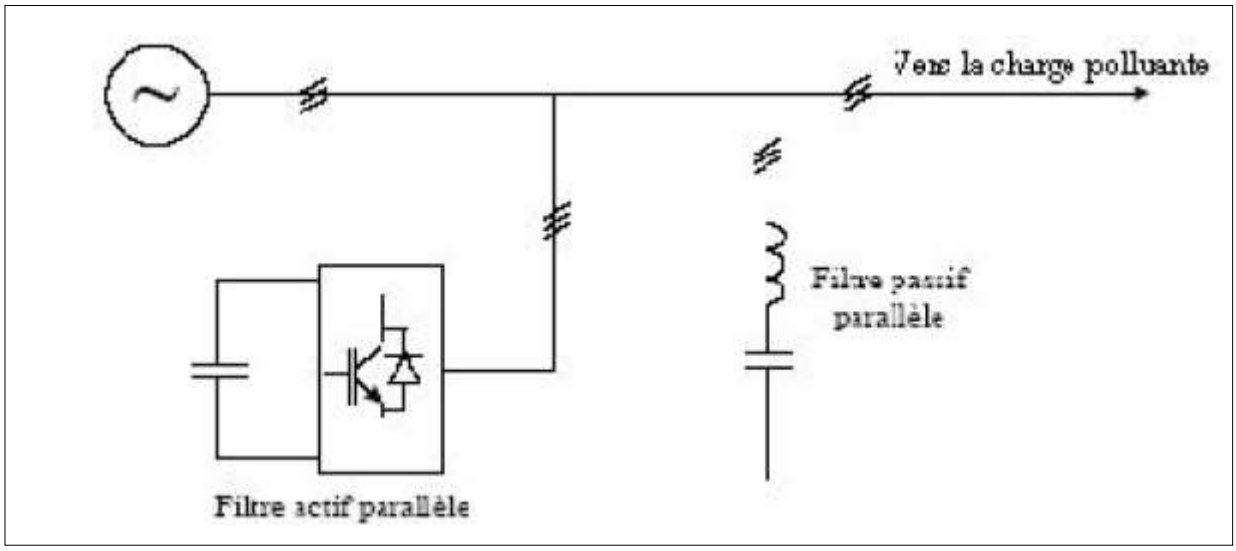


Figure IV.11 : *Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle*

IV.11. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté une étude basée sur un calcul bien déterminer pour dimensionner la capacité de la batterie de condensateur pour différents charges électriques (moteur asynchrones et transformateurs).

En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté les deux topologies utilisées, le filtre actif et le filtre hybride.

Conclusion générale

Conclusion générale

La gestion de l'énergie électrique, nous mène à la surveillance en permanence dans la consommation électrique, Ceci permet de limiter la puissance appelée par les installations ; Ceci permet aussi de déduire la puissance souscrite. Donc c'est une optimisation réelle du facteur de puissance qui normalement devrait être à la limite de 0.9. Cette valeur permet de réduire la facture de l'énergie. Indirectement ; c'est une surveillance par contrôle de la consommation de l'énergie réactive.

En outre il est important de suivre une politique énergétique adéquate avec la production, avec une possibilité de mise en charge progressive. Cette politique est basée sur deux aspects l'un technique et l'autre gestionnaire.

- **Références bibliographiques**

[1] Document N°= 01,L'archive de L'entreprise tube a gaz, ELMA Labiod, Tébessa.

[2] Document N°= 02,L'archive de L'entreprise tube a gaz, ELMA Labiod, Tébessa.

[3] Luc Lasne, énergie électrique ; électrotechnique _ magnétisme _ machines _ réseaux, 3éme édition, DUNOD, 2018.

[4] Luc Lasne, Electrotechnique et énergie électrique ; Notions Fondamentales, machines _ Réseaux , 2éme édition, DUNOD,2013.

[5] Christophe Schroeder, Electrotechnique des centrales électriques,2018.

[6] HADDAD Salim, « Compensation d'énergie réactive par convertisseur statique», Mémoire de magister département d'électromécanique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2006.

[7] Legrand Catalogue, « Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques», P0910ALPESFR- EX210027 - MARS 2010.

[8] Melle BOUTABA Samia, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC», Mémoire de magister, Option : Réseaux électriques, Université de Chlef, 09/06/2009.

[9] Schneider Electric, « La conception des réseaux industriels en haute tension», ct 169, 10/1993.

[10] Rabah BENABID, « Optimisation multi objectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques», Mémoire de Magister Option : Analyse, Conduite et commande des réseaux électriques, Université Amar Telidji, Laghouat, 04/09/2007.

[11] MOSTEFAOUI Abdelkader, « Étude de la répartition optimale des puissances dans un réseau électrique par la Programmation non linéaire», Mémoire de Magister Option : Réseaux électriques, Université Hassiba Benbouali Chlef, Algérie, 14/10/2008.

[12] Schneider Electric, « Compensation de l'énergie réactive et filtrage des harmoniques», Guidede l'installation électrique 2010, GIE_chap_L-2010.indb 26, 22/01/2010.

[13] PREVE CHRISTOPHE « Réseau électrique 2 » LAVOISIER, 3éme éditions

[14] MERLIN GERIN « Guide de la compensation d'énergie réactive et filtraged'harmonique » GROUPE SCHNEIDER, Année 2007.

[15] IMMADOUCHENE, G « Compensation de la puissance réactive sur les réseaux d'énergie électrique -Application SVC » Mémoire Ingénieur Année 2007, UMMTO.

[16] Schneider électrique / GUIDE TECHNIQUE ,INTERRECTIONS NOVEMBRE 2006

[17] blhouchet nouri« Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l'Energie »

[18] M. Shafiee Khoor, "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Nantes, 2006.

[19] T. Gouraud, "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique", Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Nantes, Janvier 1997.

[20] GHADBANE Ismail « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs » Mémoire Magister en Electrotechnique le : 24 /02/2011

[21] Mohamed Muftah Abdusalam, ≪Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales ≫,Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy- I, Mai 2008.

[22] Ab. Hamadi, , S. Rahmani and K. AI-Haddad, Fellow, ≪ A Hybrid Passive Filter Configuration for VAR Control and Harmonic Compensation ≫ International Symposium on Industrial Electronics,TIE-0235-2009.R3 .

[23] M. Fatiha, ≪Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension ≫, Mémoire de Magister, Univ. Oran, Octobre 2001.