

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

**Etude de la correction du facteur de
puissance d'une installation électrique**

Réalisé par :

BEN NADJI Djamel
BENHARZALLAH Kouider

Dirigé par:

BEKAKRA Youcef

Année Universitaire : 2013/2014

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu –ALLAH- Tout-Puissant, qui, nous aider à compléter ce travail.

Et d'étendre nos sincères remerciements au professeur superviseur " Youcef Bekakra " qui ne nous a pas épargné sous sa direction et des conseils pour la durée de la réalisation de cette recherche.

Pour chacun de nous a donné un coup de main de près ou de loin.

Nous adressons également nos remerciements à l'avance pour la discussion de la commission Pour accepter la supervision de discuter cette note.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont fourni, de près ou de loin, leur aide afin que je puisse mener ce travail à terme.

Merci à tout le monde...

Dédicace

Je dédie ce travail:

A ma chère mère

A mon Père

Pour ma tante et ma grand-mère

A mes amies et mes collègues

*Pour chaque enseignant et professeur et Dr brûle pour éclairer le chemin
des autres*

Pour M. Youcef- Bekakra

Djamel ben nadj

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

Ma Mère,

A mon Père,

A mes frères

Et à tous mes Amis

ben harzallah kouider

ملخص:

درسنا في هذه المذكرة كيفية تحسين معامل الاستطاعة في التركيبات الكهربائية باستخدام المعوضات (المكثفات)

الكلمات المفتاحية : معامل الاستطاعة , الاستطاعة الفعالة , الاستطاعة الغير فعالة , الاستطاعة الظاهرية , المعوضات

Résumé:

Dans cette mémoire on a étudié la méthode de correction du facteur de puissance dans l'installation électrique en utilisant la compensation (la condensateur) .

mots clés : facteur de puissance , puissance active , puissance réactive , La puissance apparente , La compensation

TABLE DES MATIERES

Liste des figures et tableaux

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

I.1 Introduction.....	3
I.2 De la centrale aux abonnés	3
I.3 Les niveaux de tensions des réseaux	4
I.4 Topologie des réseaux	4
I.5 Description des réseaux électriques.....	5
I.5.1 Le réseau de transport THT.....	5
I.5.2 Le réseau de répartition HT	6
I.5.3 Le réseau de distribution MT	7
I.5.4 Régimes de Neutre MT.....	8
I.5.5 Le réseau de livraison BT.....	10
I.6 Constitution des réseaux électriques.....	11
I.6.1 Les centrales électriques.....	11
I.6.2 Les postes électriques.....	12
I.6.3 Les lignes électriques.....	13
I.6.4 Les pylônes.....	14
I.6.5 câbles conducteurs	14
I.7 Catégories des charges.....	16
I.8 Conclusion	17

Chapitre II : COMPENSATION DE L'ÉNERGIE RÉACTIVE ET MOYENS DE COMPENSATION

II.1	Introduction	19
II.2	Puissance active	19
II.3	La puissance réactive	20
II.4	Origine de l'énergie réactive dans une installation	21
II.5	La puissance apparente	23
II.6	Le facteur de puissance	23
II.7	Avantages dus à l'amélioration du facteur de puissance	24
II.7.1	Diminution de la facture d'électricité	24
II.7.2	Optimisation des choix technico-économiques	24
II.8	Les inconvénients d'un mauvais facteur de puissance	25
II.8.1	La charge du réseau	25
II.8.2	Coût de l'énergie active	26
II.9	Techniques de compensation	27
II.9.1	Modes de compensation	27
II.9.2	Puissance réactive produite par un condensateur	28
II.9.3	Groupement des condensateurs	28
II.9.4	Justification du choix du groupement en triangle	28
II.10	Techniques de détermination de la puissance réactive nécessaire à la compensation	29
II.10.1	Méthode graphique	29
II.10.2	Par calculs	29
II.11	La compensation du facteur de puissance	29
II.12	Conclusion	30

Chapitre III : APPLICATIONS ET INTERPRETATION DES RÉSULTATS

III.1	Introduction	6
III.2	Types de compensation	33

III.2.1	Compensation individuelle des transformateurs.....	33
III.2.2	Compensation individuelle pour les moteurs asynchrones.....	35
III.2.3	Compensation par groupe	37
III.2.4	Compensation par Partielle (secteur)	37
III.2.5	Compensation centralisée	38
III.3	Dimensionnement de batteries de condensateurs automatiques.....	39
III.3.1	Au stade de projet.....	39
III.3.2	Société déjà en activité.....	40
III.4	Compensation dans des réseaux comportant des harmoniques.....	41
III.5	La Simulation de correction du facteur de puissance.....	41
III.6	Conclusion.....	44
	Conclusion Générale.....	45

Références Bibliographiques

LISTE DES FIGURES ET TABLEAU

CHAPITRE I

Fig. I.1 Schéma d'un réseau électrique.....	3
Fig. I.2 Hiérarchisation d'un réseau.....	4
Fig. I.3 Topologie des réseaux.....	5
Fig. I.4 Exemple d'une partie d'un réseau de transport.....	6
Fig. I.5 Différents modes de distribution.....	8
Fig. I.6 Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.....	10
Tableau I.1 Différents régimes de neutre MT utilisés dans le monde.....	15

CHAPITRE II

Fig. II.1 : Tension, courant et puissance en cas de circuit résistif. ($\phi = 0$) ($\cos \phi = 1$).....	19
Fig. II.2: Tension, courant et puissance en cas de circuit résistif et inductif.....	20
Fig. II.3 : Un moteur prélève sur le réseau de l'énergie active P et de l'énergie réactive Q.....	22
Fig. II.4: Graphique des puissances.....	23
Fig. II.5: Equilibre des puissances.....	26
Fig. II.6: Evolution du courant en fonction du $\cos \phi$ à puissance active constante.....	26
Fig. II.7 : Evolution du prix du kWh en fonction du $\cos \phi$	27
Tableau II.1: Les modes de compensation.....	28
Fig. II.8 Triangle des puissances avec compensation.....	29

CHAPITRE III

Fig. III.1: Compensation individuelle du transformateur.....	33
Tableau III.1: Indication pour puissance de compensation pour les pertes à vide des transformateurs récents.....	34
Fig. III.2: Compensation individuelle de moteurs.....	35
Fig. III.3: Compensation par groupe.....	37
Fig. III.4: Compensation par Partielle.....	38
Fig. III.5: Centrale compensative.....	38
Fig. III.6: La Simulation avant surcharge.....	42
Fig. III.7: La Simulation pendant surcharge.....	43
Fig. III.8: La Simulation après la correction du facteur de puissance.....	43

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Durant les dernières années, l'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les systèmes actuels, la Cogénération de l'énergie, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité et le respect de l'environnement.

Dans ce contexte, il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de disposer des moyens permettant de contrôler les puissances réactives, les tensions et les transits de puissance dans les lignes afin que le réseau de transport existant puisse être exploité de la manière la plus efficace et la plus sûre possible.

La recherche rapportée dans ce mémoire est motivée par le souci de perfectionner le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen compenser la puissance réactive, série ou shunt selon les cas, est utilisée pour limiter ce transport de puissance réactive. Différents appareils électriques peuvent servir à réaliser cette compensation : machines synchrones, batteries de condensateurs, inductance ou FACTS.

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active" ; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous décrivons une généralité sur les réseaux électriques.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude de la compensation de l'énergie réactive et moyens de compensation.

Le troisième chapitre a été consacré aux applications et à la simulation de correction du facteur de puissance.

Enfin, le présent mémoire sera clôturé par une conclusion générale résumant le travail.

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

I.1 Introduction

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois le courant produit, il doit être amené jusque chez le consommateur. Dans un pays, le Transport et la Distribution Publique assurent le transit de l'énergie électrique entre les points de production et les points de consommation.

I.2 De la Centrale aux Abonnés

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées (fig. I.1).

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines...). L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final.[1]

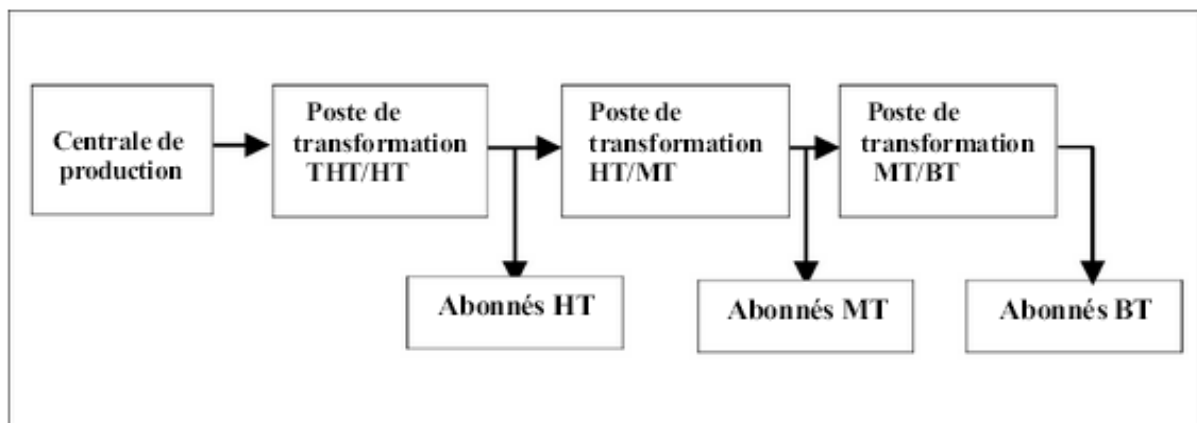


Fig. I.1: Schéma d'un réseau électrique

I.3 Les Niveaux de Tensions des Réseaux

Les réseaux électriques sont hiérarchisés : (fig. I.2).

D'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :

- Un réseau de transport THT : 220 800 kV,
- Un réseau de répartition HT : 60170 kV,
- Un réseau de distribution MT : 5 36 kV (selon CEI),
- Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V.

Cette hiérarchie c'est-à-dire, les niveaux de tensions utilisés varient considérablement d'un pays à l'autre en fonction des paramètres liés à l'histoire électrotechnique du pays, ses ressources énergétiques, sa surface et finalement des critères technico-économiques. [1]

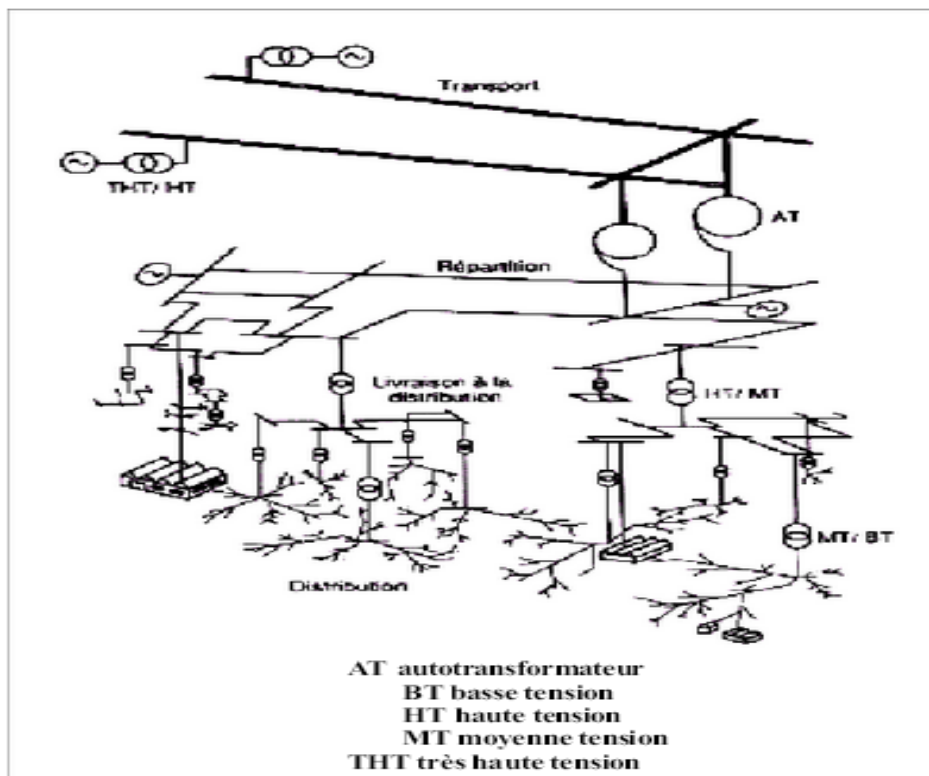


Fig. I.2 : Hiérarchisation d'un réseau

I.4 Topologie des Réseaux

Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont, par nature, constitués d'ouvrages capables de forts transits et maillés. Les liaisons forment des boucles, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet (fig. I.3a).

Les réseaux de répartition qu'ils alimentent ont fréquemment une structure bouclée (fig. I.3b) et peuvent alors être exploités soit en boucle fermée, le réseau est dit bouclé, soit en boucle ouverte, le réseau est alors dit débouclé. Certaines alimentations se font aussi en antenne (poste G, fig. I.3b) ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes (poste H, fig. I.3b).

Ces réseaux de répartition à caractère régional fournissent l'énergie aux réseaux de distribution qui sont des réseaux à moyenne tension assurant l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs soit directement, soit après transformation en basse tension. Leur configuration et leur mode d'exploitation sont variables. On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux à structure radiale (fig. I.3d) ou des réseaux à structure arborescente (fig. I.3c).

D'une façon générale, ce sont les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs et l'expérience d'exploitation qui, ajoutés à des considérations économiques, conduisent à choisir la structure topologique des réseaux. [1]

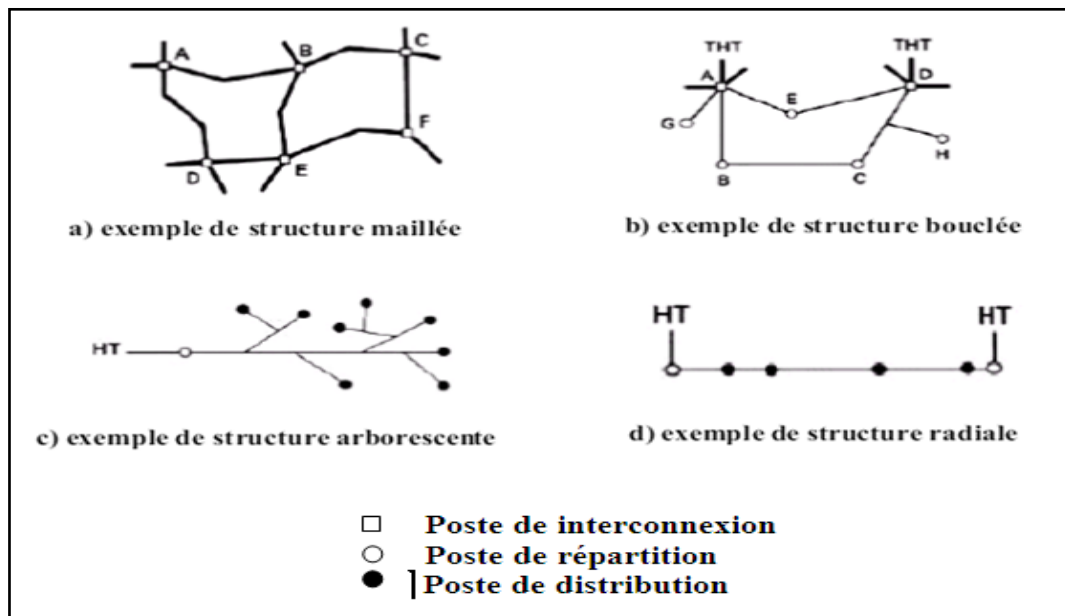


Fig. I.3 : Topologie des réseaux

I.5 Description des Réseaux Electriques

I.5.1 Le Réseau de Transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchés les centrales de grandes puissances (> 300 MW).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud A, B et C (Fig. I.4) constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils.

Ces réseaux sont pour la plupart aériens et souterrains dans les villes ou à leurs approches. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant en général à la limite thermique de la ligne. Une attention particulière doit être portée à l'effet couronne qui peut donner lieu en THT, à des pertes très significatives suivant le climat et l'altitude. Les pylônes de lignes sont équipés en général de deux ternes (2 fois 3 phases) voir quatre et même six ternes.

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir du quel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence.

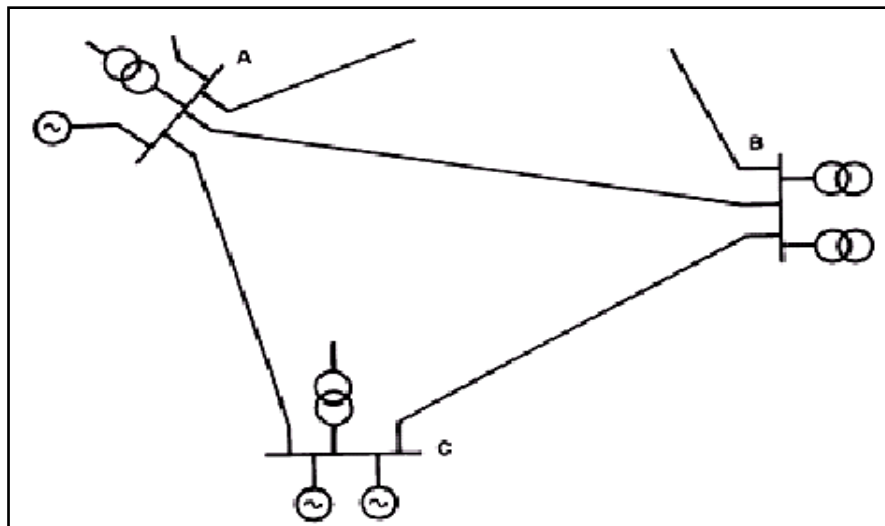


Fig. I.4 : Exemple d'une partie d'un réseau de transport

I.5.2 Le Réseau de Répartition HT

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire,

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux.

I.5.3 Le réseau de distribution MT

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport. Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau redistribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements.

On distingue, à travers le monde, différents systèmes de distribution MT. Citons principalement :

- Le système nord-américain (fig. I.5a)

à neutre distribué directement mis à la terre; l'ossature triphasée est composée de quatre fils, et les dérivations, à distribution monophasée entre phase et neutre, comportent un ou plusieurs fils de phase, suivant la puissance à desservir, plus le neutre.

- Le système utilisé par exemple en Grande-Bretagne ou en Irlande (fig. I.5b), qui à partir d'ossatures triphasées à trois fils sans neutre distribué alimente des dérivations qui peuvent être à deux fils de phase ;

- Le système australien (fig. I.5c), particulièrement économique, est constitué d'ossatures à trois fils sans neutre distribué, avec, entre autres, des dérivations monophasées à un seul fil avec retour par la terre (cette solution nécessite une faible résistivité du sol) ;

- Le système français (fig. I.5d), entièrement triphasé en ossatures et dérivations, à neutre non distribué.

On distingue par ailleurs

- Les réseaux ruraux généralement de types aériens, arborescents et boucla blés,
- Les réseaux urbains essentiellement enterrés et boucla blés. Les protections sont moins sophistiquées que dans le cas des réseaux précédents.

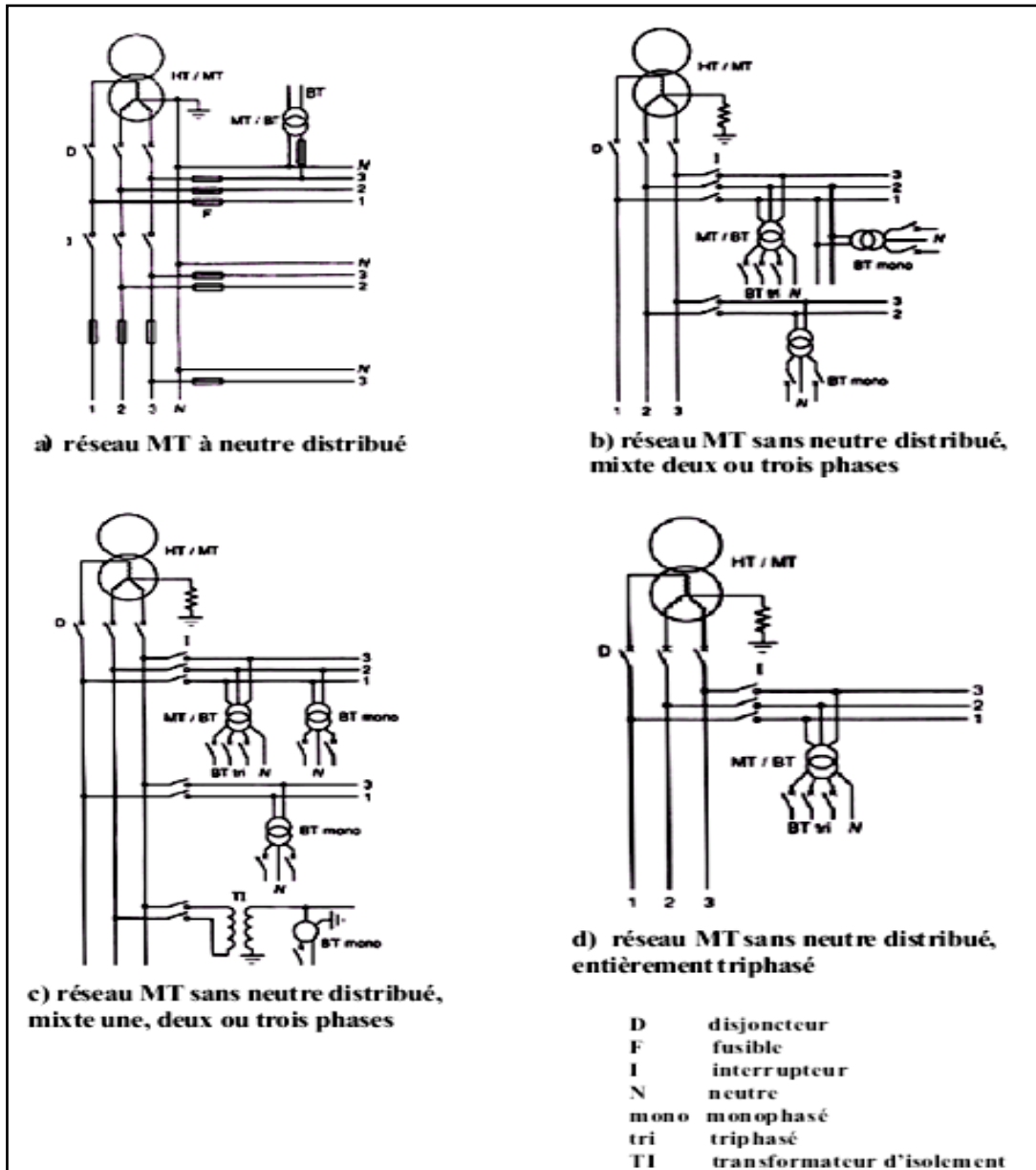


Fig. I.5 : Différents modes de distribution

I.5.4 Régimes de Neutre MT

Le choix du régime du neutre d'un réseau MT engage l'avenir, car chaque système entraîne l'installation de matériels spécifiques pour le niveau d'isolement, les conditions d'exploitation et d'entretien, les systèmes de protection contre les défauts. Le système de neutre adopté doit être cohérent avec la structure du réseau MT (niveau de tension, longueur des départs, réseau souterrain ou aérien, densité de charge) et a une incidence sur les niveaux de la sécurité et de qualité de service.

On rencontre ainsi à travers le monde des systèmes variés (tableau I.1).

•Neutre isolé

L'intérêt de ce système est de favoriser une bonne qualité de service. En cas de défauts entre phase et terre, il permet d'éviter des déclenchements, les courants de défauts étant limités à des valeurs très faibles (sauf lorsque les départs, surtout s'ils sont constitués de câbles souterrains, sont longs et la tension de desserte élevée, auquel cas le courant capacitif devient non négligeable). De plus, le système à neutre isolé a l'inconvénient de générer des surtensions importantes en régime transitoire (lors des manœuvres).

•Mise à la terre du neutre par bobine d'extinction (dite de Petersen)

Le principe consiste à insérer dans le neutre une réactance $L\omega$ égale à la capacitance du réseau $\frac{1}{C_w}$ présente un réel intérêt en dépit de son coût. Le réseau se comporte vu du défaut comme étant hautement impédance (circuit LC parallèle) et le courant de défaut est faible et auto extincteur. Il présente néanmoins les mêmes inconvénients, les surtensions transitoires augmentent des manœuvres étant toutefois un peu moins élevées.

•Neutre relié directement à la terre

Cette technique engendre des courants de défauts entre phase et terre très importants. C'est pourquoi, pour des raisons de sécurité, afin de limiter le retour du courant par le sol, on installe un conducteur de neutre relié à la terre de proche en proche et par lequel circule une part notable du courant de défaut. Ce système présente l'avantage de minimiser les surtensions éventuelles. Il conduit à des déclenchements fréquents, mais permet une élimination sélective des défauts, en utilisant par exemple des fusibles adaptés en différents emplacements des départs. Les courants de court-circuit élevés entraînent des contraintes importantes sur les matériels. Ce système nécessite une surveillance de la continuité du conducteur de neutre. Une rupture de celui-ci serait dangereuse, entraînant de forts gradients de potentiel autour des connexions de terre, liés aux courants élevés d'écoulement à la terre. La présence du conducteur de neutre permet la réalisation de dérivations monophasées.

•Neutre relié à la terre par impédance

L'intérêt de cette impédance est de limiter les valeurs des courants de court-circuit sur défauts entre phase et terre, tout en ayant des surtensions modérées. Les valeurs relativement peu élevées des courants de défauts ne nécessitent pas l'ajout d'un conducteur de neutre.

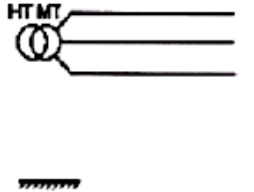
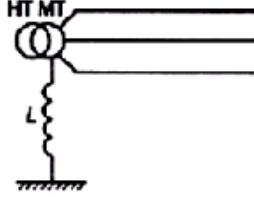
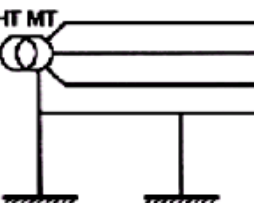
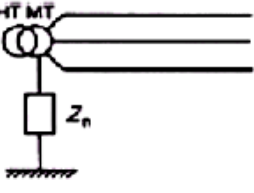
Régime de neutre MT		Pays
	Neutre isolé	Allemagne Belgique Italie Japon Norvège
	Bobine d'extinction dite de Petersen L : compensation de la capacité du réseau	Allemagne Finlande Norvège
	Neutre directement à la terre	Canada Etats-Unis
	Neutre impédant Z_n : quelques dizaines d'ohms	Belgique France Grande-Bretagne Irlande Japon Suède

Tableau I.1 : Différents régimes de neutre MT utilisés dans le monde

I.5.5 Le réseau de livraison BT

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230V (380/220 en Algérie). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique.

Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement. Le réseau BT permet de distribuer au consommateur; le 230 V (1 phase + neutre) - 2 fils, ou le 400 V (3 phases + neutre) - 4 fils.

Le réseau BT se caractérise essentiellement par la façon dont sont gérés le neutre et la mise à la terre des masses (appareillage domestique). On appelle conducteur de protection électrique PE, le conducteur qui interconnecte les masses et les met à la terre. Il peut être ou non confondu avec le neutre. Ces subtilités

sont définies par la norme CEI 364 qui traite de la protection des personnes et des biens dans les immeubles ($U < 1000 \text{ V}$). On distingue trois systèmes :

- **IT** le neutre BT est isolé ce qui permet une continuité de fonctionnement au premier défaut. On utilise ce principe dans les hôpitaux ou certains processus manufacturiers.
- **TT** ce système suppose une claire distinction des terres neutre et des terres des masses, distinction qui peut être difficile à réaliser.
- **TN** c'est le système le plus répandu. On distingue les régimes :

TN-C où neutre et PE sont confondus (PEN) et TN-S où neutre et PE sont séparés (PE + N). [1]

I.6 Constitution des Réseaux Electriques

I.6.1 Les Centrales Electriques

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- Les centrales hydroélectriques,
- Les centrales solaires ou photovoltaïques,
- Les centrales éoliennes

a) Les centrales thermiques

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière.

b) Les centrales nucléaires

Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission.

c) Les centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans le lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

d) Les centrales solaires ou photovoltaïques

Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux.

e) Les centrales éoliennes

L'énergie éolienne est produite sous forme d'électricité par une éolienne. Des éoliennes formées d'un mat surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées.

I.6.2 Les postes électriques

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, plusieurs types de postes :

- Les postes à fonction d'interconnexion, qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés ;
- Les postes de transformation, dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs ;
- Les postes mixtes, les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

Les actions élémentaires inhérentes aux fonctions à remplir sont réalisées par l'appareillage à haute et très haute tension installé dans le poste et qui permet :

- D'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs ;
- D'assurer la continuité ou l'isolement d'un circuit grâce aux sectionneurs ;
- De modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

Un ensemble de protections et d'automates contrôle les grandeurs électriques réduites, élaborées par des réducteurs de mesure (tension et courant principalement) et agit sur l'appareillage à haute tension afin d'assurer les conditions d'exploitation pour lesquelles le réseau a été conçu.

Nous retiendrons donc que, par définition, les appareils de coupure, ainsi que l'appareillage de mesure et de protection propre à un départ, sont regroupés dans une cellule.

Un poste comporte donc autant de cellules que de départs qui sont raccordés à ses jeux de barres. En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques.

I.6.3 Les lignes électriques

Le genre de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants :

- Puissance active à transporter.
 - Distance de transport.
 - Coût.
 - Esthétique, encombrement et facilité d'installation. Nous distinguons quatre types de lignes :
- Ligne de distribution à basse tension ;
 - Ligne de distribution à moyenne tension ;
 - Ligne de transport à haute tension ;
 - Ligne de transport à très haute tension.

a) Lignes de distribution BT

Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.

b) Lignes de distribution MT

Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.

c) Lignes de transport HT

Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération.

d) Lignes de transport THT

Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV.

Composants des lignes aériennes.

Une ligne aérienne est composée de pylônes (supports), de câbles conducteurs et des isolateurs.

I.6.4 Les pylônes

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs.

-Pour les lignes à très haute tension, on a recours à des pylônes composés d'un treillis en acier. Plus la tension est élevée, plus l'envergure est grande et plus les poteaux sont élevés.

-Pour les lignes à haute tension, on utilise des pylônes en acier ou en béton

-Pour les lignes à moyenne tension, il s'agit de poteaux en bois ou de mâts en béton.

-Pour les lignes aériennes basse tension, on utilise de simples poteaux en bois.

I.6.5 Les câbles conducteurs

Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs qui sont portés par les pylônes. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois câbles (ou faisceaux de câbles) conducteurs par circuit. Les lignes sont soit simples (un circuit), soit doubles (deux circuits par file de pylônes). Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux.

Les câbles conducteurs sont « nus » c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium.

• Câbles de garde

Les câbles de garde ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant.

• Les isolateurs

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs (chaînes d'isolateurs). Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette.

On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important.

• Les Parafoudres

Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter les surtensions imposées aux transformateurs, instruments et machines électriques par la foudre et par les manœuvres de commutation. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des fils de la ligne à protéger et la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre de faible résistance, généralement de moins d'un ohm.

• Eclateurs à cornes

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre. A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur (Fig. I.6).

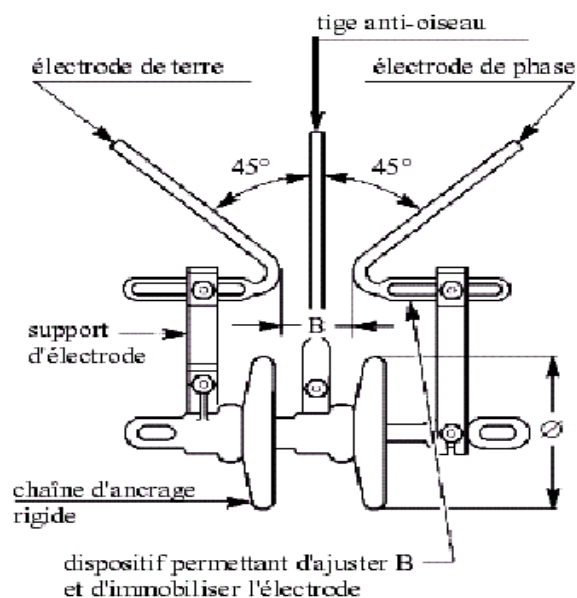


Fig. I.6 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux

• Disjoncteurs

Un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants, sous sa tension assignée (tension maximale du réseau), dans les conditions normales de service et dans les conditions anormales spécifiées (court-circuit). C'est l'appareil de protection par excellence, capable d'une totale capacité d'intervention sans provoquer de surtension excessive sur le réseau.

• Les fusibles

Il est utilisé soit directement comme un dispositif de coupure soit indirectement, connecté au circuit secondaire d'un transformateur de courant, avec un contact de fusion donnant un ordre de déclenchement au disjoncteur. L'inconvénient majeur de ces dispositifs réside dans le fait qu'ils sont endommagés par les défauts et qu'ils ont une faible sensibilité. L'exploitant doit disposer d'un grand nombre de fusibles de rechange pour les différents calibres. La grande variété de réseaux électriques impose des modèles de fusibles de différentes natures selon l'application.

Les lignes souterraines

La structure des réseaux souterrains est un seul type de ligne: les dorsales. Ces réseaux de faible longueur et forte section des conducteurs sont le siège de chute de tension réduites. De ce fait, et tenant compte de l'importance des incidents, il sera prévu une réalimentation soit par les réseaux voisins soit par un câble de secours. [1]

I.7 Catégories des charges

Selon la nature des récepteurs on peut classifier les charges en trois grandes catégories :

• La première catégorie :

Dans cette classe les récepteurs ne permettent que moins de deux secondes d'arrêt d'alimentation comme les hôpitaux et les zones militaires.

• La deuxième catégorie

Pour cette classe, les récepteurs acceptent un arrêt de moins de deux heures, comme les usines.

• La troisième catégorie

Dans cette dernière catégorie, l'arrêt peut être de plus de 24 heures. Comme l'éclairage public et les domiciles. [1]

I.8 Conclusion

On a fait dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec l'étude de ses différents composants nécessaire à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie électrique.

Le premier but d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité :

Production = Consommation + pertes

Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien de consommation adapté à leurs besoins, caractérisé par :

- Une puissance disponible, fonction des besoins quantitatifs du client ;
- Une tension fixée, fonction de cette puissance et du type de clientèle ;
- Une qualité traduisant la capacité à respecter les valeurs et la forme prévues de ces deux paramètres et à les maintenir dans le temps.

Chapitre II

**COMPENSATION DE L'ÉNERGIE
RÉACTIVE ET MOYENS DE
COMPENSATION**

II.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.

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active" ; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite.

Les économies d'énergie réalisées se chiffrent par dizaines de pour cent de la consommation globale, situant les procédés de compensation d'énergie réactive en première ligne du combat pour la réduction de l'impact des activités humaines sur l'écosystème de notre planète. [3]

II.2 Puissance active

Lorsqu'un réseau est uniquement chargé par un circuit résistif, le courant (I) dans ce consommateur est en phase avec la tension (U).

En d'autres mots le courant et la tension s'annulent au même instant. Du produit des valeurs instantanées I et U, nous obtenons la puissance utile (P). D'après la Fig. II.1 nous constatons que cette puissance est toujours positive et que sa fréquence est le double de celle du réseau.

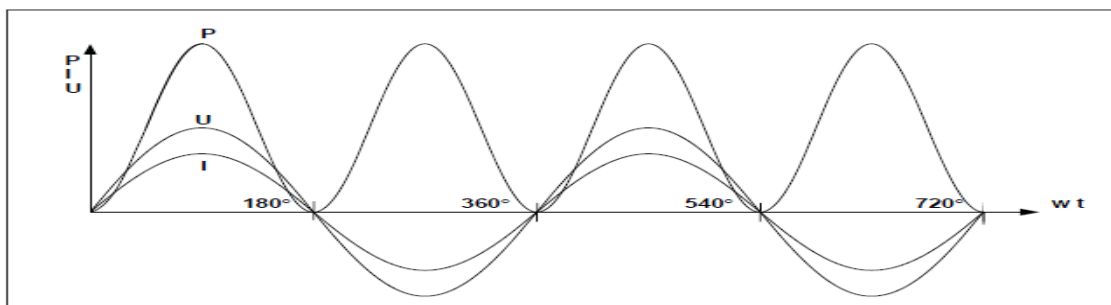


Fig. II.1 : Tension, courant et puissance en cas de circuit résistif. ($\phi = 0$) ($\cos \phi = 1$)

Un four électrique, un radiateur, une lampe à incandescence, ... constituent des résistances. Ces récepteurs électriques fournissent de l'énergie disponible sous diverses formes (ex : thermique, mécanique, lumineuse). Une résistance absorbe une puissance active (Watt {W}) déterminée par le produit de la tension et du courant.

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \quad (\text{II.1})$$

(W) (V) (A)

($\sqrt{3}$ car on travaille en triphasé) [2]

II.3 La puissance réactive

Un tel circuit résistif se rencontre peu en pratique. Les moteurs, transformateurs et autres appareils fonctionnent sur l'effet des champs électromagnétiques, prélèvent en plus de l'énergie nécessaire à leur travail effectif ou utile, une énergie pour l'établissement des champs magnétiques. Cette énergie dite réactive correspond à une puissance en quadrature avec la puissance active. Cette fois-ci, la puissance ($U \cdot I$) est négative à certains moments (Fig. II.2).

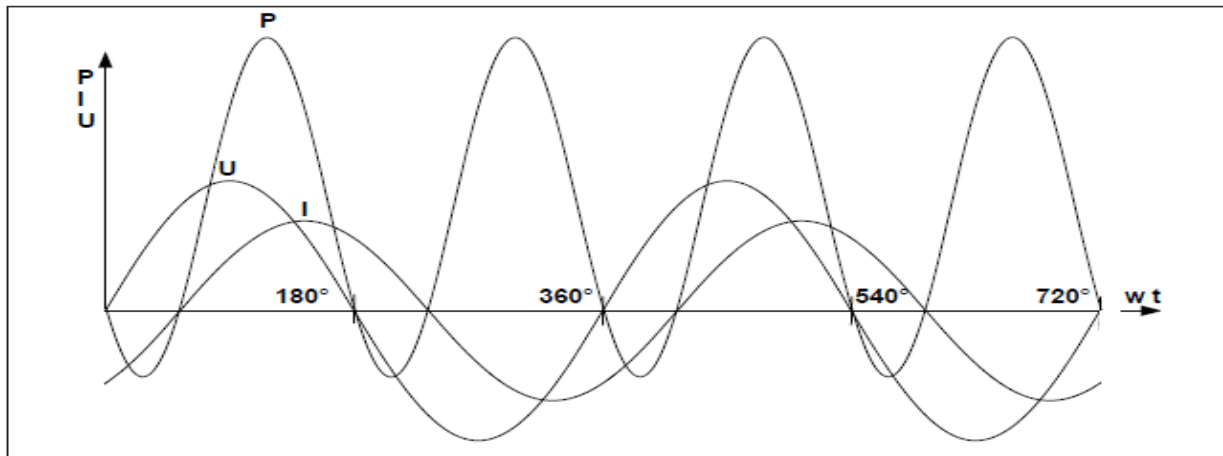


Fig. II.2: Tension, courant et puissance en cas de circuit résistif et inductif

La puissance active s'exprime de la façon suivante :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$$

$$(W) \quad (V) (A)$$

Puissance active = Puissance réelle,

La puissance réactive s'exprime de la façon suivante :

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \phi \quad (II.2)$$

$$(VAR) (V) (A)$$

Puissance apparente = Puissance oscillant entre le générateur et la charge pour la création du champ magnétique.

Lorsque les courbes de tension et de courant sont déphasées de 90° , la courbe de puissance est pour la moitié positive et pour l'autre négative. La puissance active est donc nulle, car les deux parties s'équilibrent. La puissance réactive est maximale.

On distingue les puissances réactives inductive et capacitive :

*** Puissance réactive-inductive**

- Le courant est en retard par rapport à la tension.
- Une puissance réactive est prélevée.
- Application :
 - Moteurs asynchrones,
 - Transformateurs,
 - Ligne électrique aérienne,
 - Machines synchrones sous-dimensionnées,

*** Puissance réactive-capacitive**

- Le courant est en avance par rapport à la tension.
- Une puissance réactive est fournie.
- Application :
 - Condensateurs,
 - Câbles,
 - Ligne haute-tension non chargée,
 - Machines synchrones sur- dimensionnées, [2]

II.4 Origine de l'énergie réactive dans une installation

Tous les appareils et machines à induction (c'est à dire à champs électromagnétiques) convertissent l'énergie fournie par le réseau d'alimentation en énergie mécanique (travail) et chaleurs (pertes). Cette énergie est mesurée par des wattmètres en kWh, et est appelée énergie « active ». Afin de réaliser cette conversion, des champs magnétiques doivent être créés dans la machine, et ces champs sont associés à une autre forme d'énergie à fournir par le réseau d'alimentation appelée énergie « réactive ».

En effet, 2 fois par cycle du réseau d'alimentation, les circuits magnétiques absorbent de l'énergie du réseau (à l'établissement des champs magnétiques) et restituent cette énergie au réseau (à l'extinction des champs magnétiques).

Un phénomène similaire se produit avec des éléments capacitifs en parallèle sur le réseau, telles que capacités des câbles ou batteries de condensateurs, etc. Dans ce cas, l'énergie est stockée électro statiquement. Les cycles de charge et de décharge des circuits capacitifs se font d'une manière identique à celle des circuits inductifs présentés ci-dessus mais le courant d'un circuit capacitif circule vers la source en complète opposition de phase avec celui d'un circuit inductif. Cette caractéristique est la base sur laquelle est établie la correction du facteur de puissance.

Il faut noter que ces courants réactifs (pour être plus précis, la composante réactive du courant de charge) ne consomment pas de puissance du réseau, mais causent des pertes dans le réseau de transport et de distribution de l'énergie et l'échauffement des conducteurs.

En pratique les composantes réactives des courants des charges dans un réseau sont toujours inductives et, de plus, les impédances des réseaux de transport et de distribution sont à prédominance réactive de type inductif. La somme de tous ces courants inductifs circulant dans une réactance inductive produit la pire des conditions possibles pour la chute de tension (c'est à dire en opposition de phase complète avec le système de tensions).

Pour ces raisons (pertes et chute de tension dans le réseau de transport), les distributeurs d'énergie réduisent la valeur du courant réactif le plus possible.

Les courants réactifs capacitifs produisent l'effet inverse sur les tensions : ils produisent des élévations de tension dans les réseaux de distribution.

La puissance (kW) associée à l'énergie active est représentée habituellement par la lettre P.

La puissance réactive (kvar) est représentée par la lettre Q. La puissance réactive de type inductif est conventionnellement comptée positivement (+Q), la puissance réactive de type capacitif est conventionnellement comptée négativement (-Q).

La puissance apparente S (en kVA) est la somme vectorielle de P et Q (cf. **Fig. II.3**). [3]

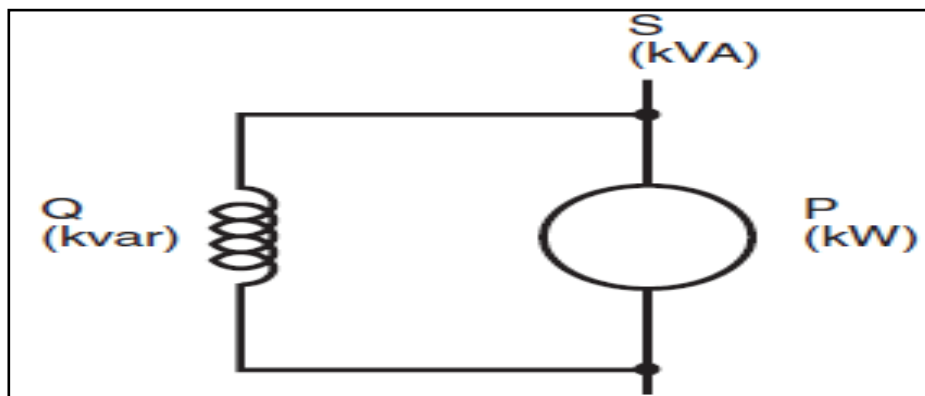


Fig. II.3 : Un moteur prélève sur le réseau de l'énergie active P et de l'énergie réactive Q

❖ Inconvénients de présence de la puissance réactive

L'accroissement de l'intensité consécutive à la présence de puissance réactive a pour conséquences :

- Accroissement de la chute de tension dans les câbles
- Augmentation des pertes Joule dans les câbles
- Facture EDF supérieure
- Surdimensionnement des installations
- Usure prématurée de l'appareillage [2]

II.5 La puissance apparente

La puissance apparente détermine la charge du réseau ainsi que celle des câbles d'alimentation. Les transformateurs, générateurs, appareils de manœuvre, fusibles et câbles doivent être dimensionnés pour la puissance apparente.

$$S = \sqrt{3} \times U \times I \quad (\text{II. 3})$$

(VA) (V) (A)

Puissance apparente = Multiplication de la tension au courant efficace sans tenir compte du déphasage.

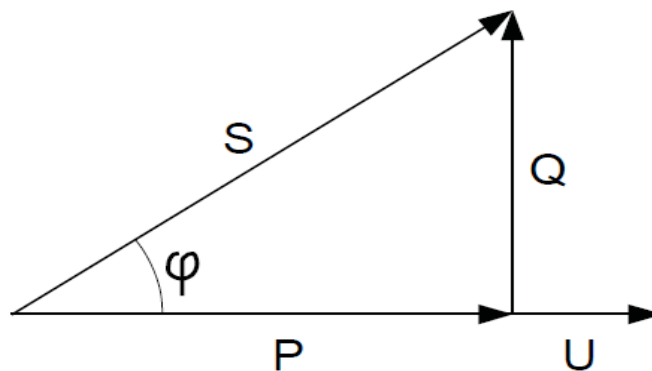


Fig. II.4: Graphique des puissances.

On peut également exprimer la puissance apparente en fonction des puissances actives et réactives (figure II.3): [2]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{II. 4})$$

(VA) (W) (VAr)

II.6 Le facteur de puissance

On désigne l'angle entre la puissance active et apparente par la lettre **phi** (ϕ). Le $\cos \phi$ est donc le rapport entre la puissance active et apparente.

Facteur de puissance

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\text{puissance active (kW)}}{\text{puissance apparente (kVA)}} \quad (\text{II. 5})$$

(= $\cos \phi$) (en l'absence de charges non linéaires).

En cas de présence d'harmoniques ou de charges non-linéaires, il y a une différence entre le $\cos \phi$ et le facteur de puissance.

Le $\cos \phi$ est en relation avec le déphasage entre tension et courant à 50 Hz, alors que le facteur de puissance est en rapport avec la puissance active et réactive, toutes fréquences considérées. Lors de la détermination de la puissance d'une batterie de condensateurs, on travaille la plupart du temps sur base du $\cos \phi$. Dans la pratique, on fait peu de différence car l'écart est faible. On peut également travailler avec le concept $\tan \phi$. A partir du graphique des puissances, on obtient : [2]

$$\tan \phi = \frac{Q}{P} = \frac{\text{puissance réactive (kvar)}}{\text{puissance active (kW)}} \quad (\text{II. 6})$$

(VAr) / (W)

II.7 Avantages dus à l'amélioration du facteur de puissance

II.7.1 Diminution de la facture d'électricité

Le distributeur d'énergie électrique, EDF, propose des tarifs de facturation différents suivant la consommation de l'abonné :

- tarif jaune pour des puissances souscrites entre 36 et 250 kVA avec livraison en BT,
- tarif vert pour des abonnés livrés en HT avec des puissances souscrites supérieures à 250 kVA.

Dans les deux tarifs la diminution de la consommation d'énergie réactive, avec l'amélioration du facteur de puissance, est très sensible au niveau de la facturation : EDF pénalisant les abonnés pour un $\cos \phi < 0,93$ ($\tan \phi = 0,4$), dans le tarif vert, comptage en HT.

II.7.2 Optimisation des choix technico-économiques

- Diminution de la section des câbles

La puissance active transportée par un câble diminue lorsque le facteur de puissance s'éloigne de 1.

Pour une même puissance active à fournir la diminution du facteur de puissance impose le choix de câbles de plus grande section.

- Diminution des pertes en ligne

Un bon facteur de puissance permet une diminution des pertes en ligne à puissance active constante. Les pertes wattées (dues à la résistance des conducteurs) sont intégrées dans la

consommation enregistrée par les compteurs d'énergie active (kWh) et sont proportionnelles au carré du courant transporté.

- **Réduction de la chute de tension**

L'amélioration du facteur de puissance diminue l'énergie réactive transportée et de ce fait diminue les chutes de tension en ligne.

- **Augmentation de la puissance disponible**

La puissance active disponible au secondaire d'un transformateur est d'autant plus grande que le facteur puissance de l'installation est élevé.[5]

II.8 Les inconvénients d'un mauvais facteur de puissance

II.8.1 La charge du réseau

Plus l'installation consomme de l'énergie réactive, plus le $\cos \phi$ est faible, autrement dit plus il est mauvais. Pour une même puissance consommée, plus le $\cos \phi$ sera faible, plus la puissance apparente sera élevée, donc plus le courant absorbé sera grand. Avec un $\cos \phi$ de 0,5 le courant appelé est le double du courant utile.

Pour une même puissance, il faut donc transporter dans tous les circuits électriques une intensité d'autant plus grande que le $\cos \phi$ est mauvais. Cela entraîne une surcharge des câbles, des générateurs, des appareillages de commutation et des transformateurs de distribution ainsi qu'une augmentation des pertes (fonction du carré du courant) dans ceux-ci.

Et cela aussi bien dans l'installation intérieure qu'entre la centrale et l'arrivée au poste de comptage.

Après compensation (par le placement de condensateurs) la puissance réactive prélevée sur le réseau est plus faible. Une partie de la puissance réactive fait la navette entre les condensateurs et la charge et ne constitue donc plus une charge pour le réseau. Le transformateur, les câbles et les dispositifs de commutation entre les batteries de condensateurs et les points d'alimentation sont pour une part délestés.

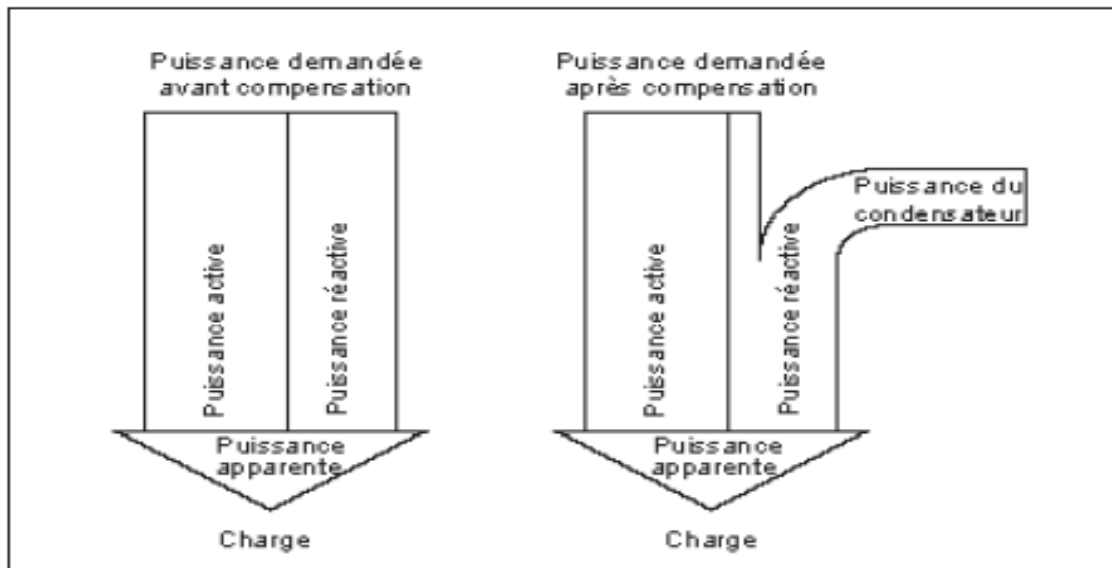


Fig. II.5: Equilibre des puissances.

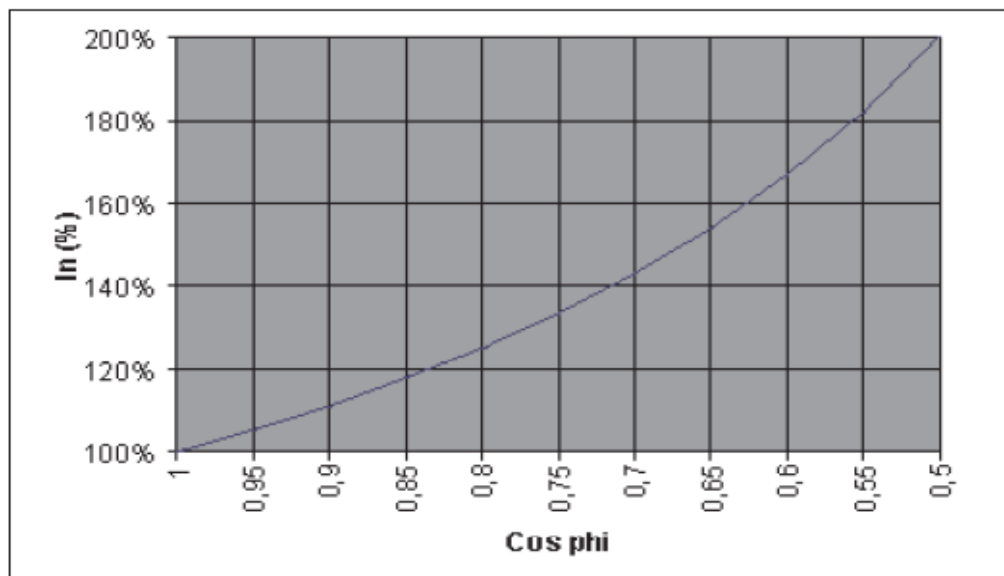


Fig. II.6: Evolution du courant en fonction du cos phi à puissance active constante

II.8.2 Coût de l'énergie active

Les fournisseurs d'énergie doivent non seulement générer dans la machine de production l'énergie réactive, mais en plus dans les lignes et transformateurs haute tension. Ceci conduit à sur dimension des machines de production ou à l'installation des batteries de condensateurs haute tension. C'est pourquoi les sociétés de distribution font payer les consommations d'autant plus chères que le cos phi est mauvais.

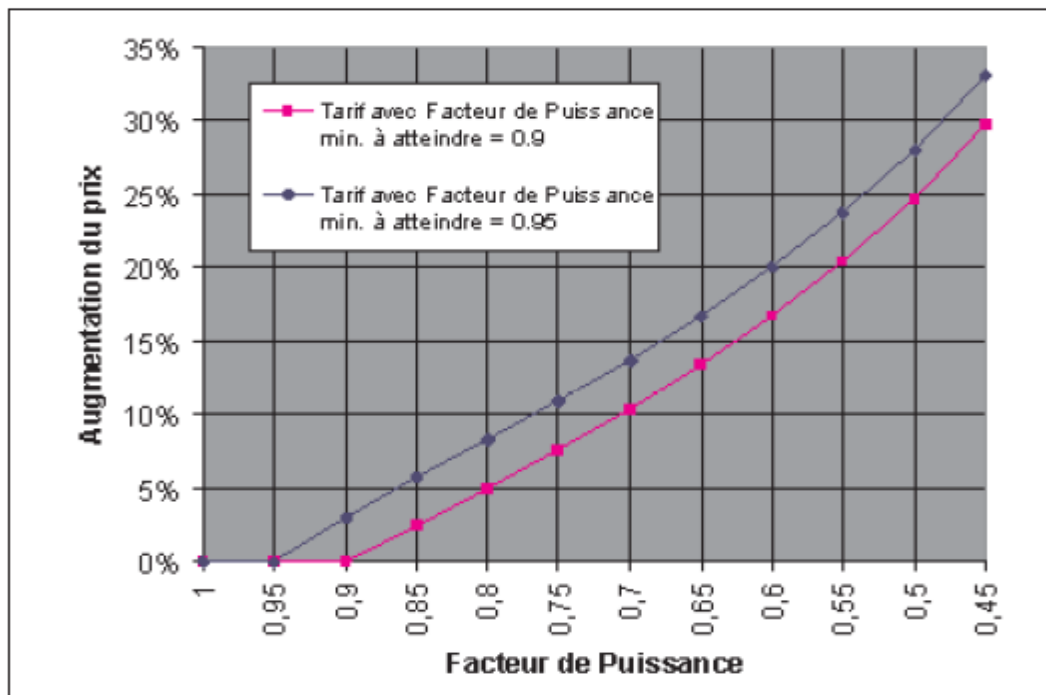


Fig. II.7 : Evolution du prix du kWh en fonction du cos phi.

Pour ces différentes raisons, il y a donc lieu de réduire le plus possible la consommation d'énergie réactive, c'est à dire d'avoir le facteur de puissance le plus élevé possible. Suivant la tarification appliquée par le fournisseur d'électricité, le facteur de puissance mensuel moyen minimum doit être de 0,9 ou 0,95 pour éviter la facturation de la majoration pour consommation réactive. Si le réseau est rendu capacitif par excès de compensation (cos phi supérieur à 1,00), une majoration est de nouveau facturée.

Dans la pratique lorsque la consommation en énergie réactive (inductive + capacitive) est inférieure ou égale à 48,4% de la consommation en énergie active (cos phi 0,9), la consommation réactive n'est pas comptée. Si la consommation réactive est supérieure à 48,4% de la consommation active, la surconsommation est comptabilisée et reprise dans les frais de distributions sur la facture mensuelle.[2]

II.9 Techniques de compensation

La compensation de l'énergie réactive concerne presque exclusivement les installations triphasées. Actuellement, la production d'énergie réactive est confiée à des batteries de condensateurs.

II.9.1 Modes de compensation

La compensation peut être :

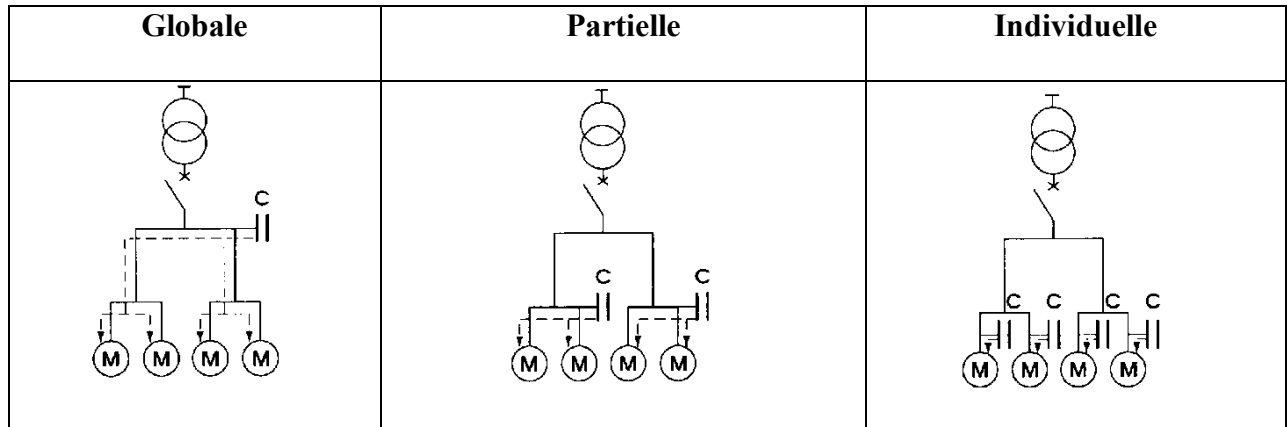


Tableau II.1: Les modes de compensation

- **Globale** : La batterie de condensateurs est raccordée en tête de l'installation et reste en service de façon permanente. Ce mode de compensation convient lorsque la charge est stable et continue.

- **Partielle** : la batterie de condensateurs est raccordée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive par atelier ou par groupe de récepteur. Ce mode de compensation convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

- **Individuelle** : La batterie de condensateurs est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur du type inductif, notamment les moteurs. Elle convient lorsque la puissance de certains récepteurs est très importante par rapport à la puissance totale, elle offre le plus d'avantages. [4]

II.9.2 Puissance réactive produite par un condensateur

Un condensateur de capacité C , présentant à ses bornes une tension U de pulsation ω fournit une puissance réactive de :

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

II.9.3 Groupement des condensateurs

Comme on travaille en triphasé, le groupement des condensateurs peut se faire en triangle ou en étoile, le choix évident est le groupement en triangle.

II.9.4 Justification du choix du groupement en triangle

Considérons deux batteries de condensateurs devant fournir, chacune, une puissance totale de Q_t . Elles sont constituées de trois condensateurs identiques groupés, pour la première en étoile et pour la seconde en triangle. Elles sont branchées toutes deux sur un réseau triphasé dont la tension entre phases (tension composée) est U . La pulsation du réseau est ω .

Question : comparez la capacité d'un condensateur du groupement en étoile à la capacité d'un condensateur du groupement en triangle. Pour cela commencez par dessiner un schéma des deux batteries. Faire apparaître la tension aux bornes de chaque condensateur. [5]

II.10 Techniques de détermination de la puissance réactive nécessaire à la compensation

On connaît :

- la puissance active de l'installation
- son facteur de puissance actuel $\cos(\varphi)$
- le facteur de puissance souhaité $\cos(\varphi')$

II.10.1 Méthode graphique

On trace le triangle des puissances à l'échelle. On détermine ainsi la puissance réactive actuelle. On trace le nouvel angle φ ce qui permet de connaître la nouvelle puissance réactive de l'installation. La puissance réactive de compensation est obtenue par différence.

La méthode se poursuit par le calcul de la capacité de chacun des trois condensateurs.

II.10.2 Par calculs

La puissance réactive de compensation est donnée par

$$Q_c = P (tg\varphi - tg\varphi') \quad (II.7)$$

II.11 La compensation du facteur de puissance

Considérons un cas de charge inductive, avec P la puissance active, Q_1 la puissance réactive inductive et S_1 la puissance apparente.

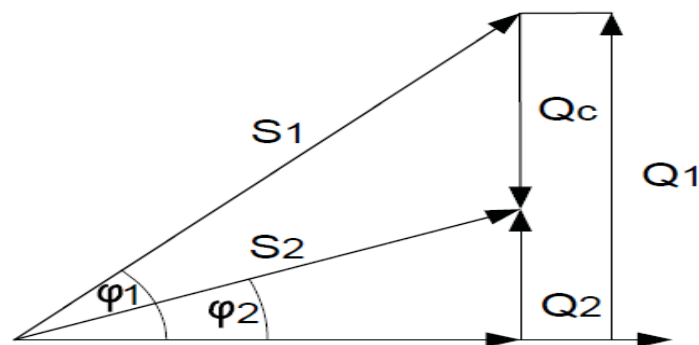


Fig. II.8 Triangle des puissances avec compensation

Par l'installation d'une batterie de condensateurs (représentant une puissance réactive Q_c , qui s'oppose à Q_1) on ne prélève plus que Q_2 sur le réseau. La puissance apparente devient S_2 avec $S_2 < S_1$. Puisque la puissance est proportionnelle au courant, celui-ci baisse également.

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2)$$

$$(\text{VAr}) (\text{W})$$

Exemple:

Sur site, on mesure aux bornes d'un transformateur d'alimentation un courant de 1200 A sous une tension de 394 V. Il n'y a pas de condensateurs de compensation du $\cos \phi$ et on mesure $\cos \phi = 0,78$. Que deviennent les puissances et le courant débité si on ramène le $\cos \phi$ à 0,92 par l'installation de condensateurs ?

• Puissance active:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 \cdot 0,780 = 638 \text{ kW}$$

• Puissance réactive:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 \cdot 0,625 = 511 \text{ kVAr}$$

• Puissance apparente:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 = 818 \text{ kVA}$$

Puissance du condensateur nécessaire pour ramener le $\cos \phi$ de 0,78 à 0,92 sous une charge de 638 kW.

• Puissance du condensateur :

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2) = 638 \cdot (0,802 - 0,426) = 240 \text{ kVAr}$$

La puissance active est propre à l'installation et reste identique après compensation. Cependant le courant pour générer cette puissance sera plus faible grâce au meilleur $\cos \phi$.

• Le nouveau courant devient:

$$P = 638 \text{ kW} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$$

$$\Rightarrow I = P / \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi$$

$$I = 638.000 / 1,73 \cdot 394 \cdot 0,92 = 1017 \text{ A}$$

• La nouvelle puissance réactive:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1017 \cdot 0,391 = 271 \text{ kVAr}$$

$$\text{ou } Q = Q_1 - Q_c = 511 - 240 = 271 \text{ kVAr} .$$

• La nouvelle puissance apparente :

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 1,73 \cdot 394 \cdot 1017 = 693 \text{ kVA. [2]}$$

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les moyens de compensation, tels que les condensateurs et les machines synchrones sous ou sur dimensionnées, de même que les formules mathématiques des puissances active, réactive et apparente ont été présentés.

la façon la plus économique de produire la puissance réactive nécessaire à la plupart des appareils électriques est par l'utilisation de condensateurs.

Les condensateurs réduisent les pertes du réseau et les chutes de tension et la transmission de puissance réactive est évitée.

Ceci signifie des économies annuelles substantielles. En installant en série des batteries de condensateur la tension peut être élevée au niveau souhaité.

Des batteries de condensateur en parallèle peuvent être utilisées pour une compensation individuelle de groupe ou centrale.

L'influence potentielle des composantes harmoniques doit être prise en considération lors de la conception du système.

Chapitre III

**APPLICATIONS ET
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on a fait des exercices pour bien comprendre l'opération de correction du facteur de puissance.

Ensuite, on cite quelques avantages de l'installation de condensateurs en ses différentes positions.

On outre, on interprète les résultats.

Dans la deuxième partie du chapitre, on a fait la simulation de l'opération de compensation d'énergie réactive (correction du facteur de puissance) par l'utilisation du logiciel "MATLAB".

III.2 Types de compensation

III.2.1 Compensation individuelle des transformateurs

Dans beaucoup de cas, il faut prévoir une batterie de condensateurs fixe au secondaire du transformateur d'alimentation. Ce condensateur a comme but de compenser les pertes à vide réactives du transformateur. La puissance du condensateur ne peut donc pas être trop élevée.

Si la compagnie d'électricité compte une amende pour réseau capacitif, il faut veiller à ce que le condensateur fixe ne rende pas celui-ci capacitif lors des périodes d'activités réduites. La puissance réactive du condensateur ne peut être supérieure à celle de transfo.[2]

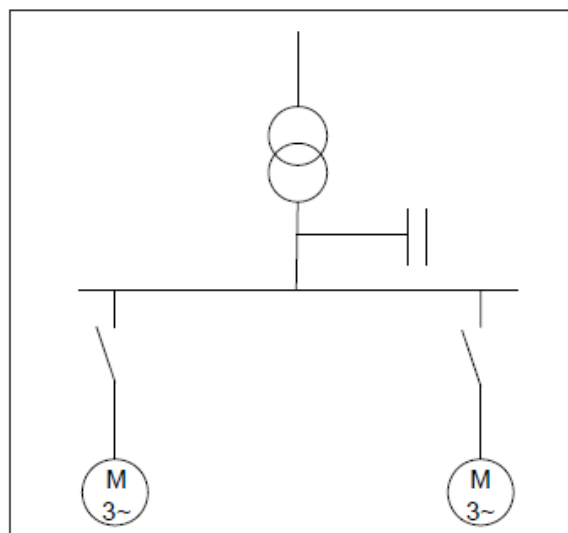


Fig. III.1: Compensation individuelle du transformateur

Calcul de la puissance maximale du condensateur fixe:

Exemple

Transfo: 630 kVA / 400 V / 50 Hz

$U_{prim.} = 15 \text{ kV} / I_o = 1,5 \% / U_k = 4 \%$

Pertes cuivre = 1480 Watt / rendement (η) = 98,92 %

$I_{prim} = P_{trafo} / \sqrt{3} \times U \times \eta = 630000 / \sqrt{3} \cdot 15000 \times 0,989 = 24,51 \text{ A}$

$I_{vide} = 1,5\% \times I_{prim} = 0,3676 \text{ A}$

$S_{vide} = \sqrt{3} \times U_{prim} \times I_{vide} = \sqrt{3} \times 15000 \times 0,3676 = 9539 \text{ VA}$

$P_{vide} = \text{pertes cuivre} = 1480 \text{ Watt}$

$\cos \phi = P_{vide} / S_{vide} = 1480 / 9539 = 0,1551$

$\phi = \text{Arccos}(\cos \phi) = \text{arccos}(0,1551) = 81^\circ$

$Tg \phi = 6,369$

$Tg \phi = Q_{cond} / P_{vide}$

$\Rightarrow Q_{cond} = Tg \phi \times P_{vide} = 6,369 \times 1480 = 9,42 \text{ kVAr}$

Le tableau 1 donne une indication pour les condensateurs à prévoir (transfo à pertes réduites).

Puissance transfo (kVA)	Puissance de compensation (kVAr)
100	2,5
160	2,5
200	2,5
250	5
315	5
400	5
500	6
630	10
800	10
1000	12,5
1250	15
1600	20
2000	25
2500	30

Tableau III.1: Indication pour puissance de compensation pour les pertes à vide des transformateurs récent.

III.2.2 Compensation individuelle pour les moteurs asynchrones

Sur chaque moteur, il y a un condensateur connecté en parallèle. La compensation de puissance réactive au moteur même allège la charge appliquée aux câbles d'alimentation du moteur.

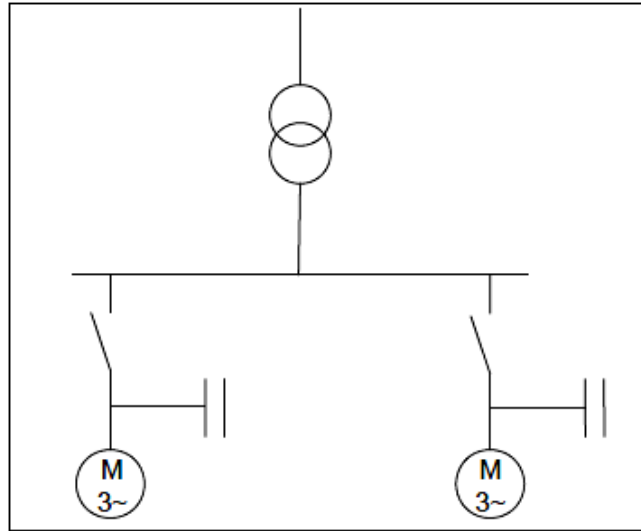


Fig. III.2: Compensation individuelle de moteurs

Utilisation

Pour moteurs de grosses puissances et de longues périodes d'utilisation. Pour câbles à la limite des dimensionnements et dont il faut compenser le courant réactif. [2]

Avantage

- Supprime la facturation d'énergie réactive.
- Constitue, sur le plan technique, la solution idéale puisque l'énergie réactive est produite à l'endroit où elle est consommée ; les pertes joules ($R \times I^2$) sont donc diminuées dans toutes les lignes.
- Soulage le transformateur.
- Le KVAR à prix économique
- Ne nécessite généralement pas d'unité de commutation
- Câbles de connections dépourvus de courant réactif \Rightarrow Pertes réduites dans les câbles. [3]

Remarque

- Solution la plus coûteuse compte-tenu :

- de la multiplicité des installations,
- de la non-intégration du coefficient de foisonnement.

Inconvénients

- Coup d'installation élevé
- Pas toujours réalisable par manque d'espace au moteur
- Puissance à installer accrue à cause du facteur d'utilisation
- La décentralisation complique les travaux d'entretien

Calcul de la puissance de compensation

Lors de la compensation individuelle de moteurs asynchrones, la puissance des condensateurs ne peut pas dépasser la puissance réactive à vide du moteur. La surcompensation risque de provoquer une auto excitation du moteur quand celui-ci n'est plus alimenté et s'arrête. Par sécurité la puissance de compensation est limitée à 90% de la puissance réactive du moteur à vide.

$$Q_c = 0,9 \times I_o \times U \times \sqrt{3}$$

Avec: Q_c : Puissance de compensation (kVAr)

I_o : Courant à vide du moteur (A)

U : Tension nominale (V)

Exemple

Moteur 110 kW / 3000 tpm / 380 V

$\cos \phi$ à pleine charge = 0,85 / $I_{nom} = 197$ A

Courant à vide (I_o) :

- mesuré quand le moteur tourne à vide
- d'après la plaque signalétique du moteur
- estimé à 1/3 du courant nominal $\Rightarrow I_o = \pm 65,5$ A

Puissance de compensation (Q_c):

$$Q_c = 0,9 \cdot I_o \times U \cdot \sqrt{3} = 0,9 \times 65,5 \times 380 \cdot \sqrt{3} = 39 \text{ kVAr} / 380 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$$

Quel sera le $\cos \phi$?

$$\text{Avec: } Q_c = P_a \times (T_g \phi_1 - T_g \phi_2) \Rightarrow T_g \phi_2 = T_g \phi_1 - (Q_c / P_a)$$

$$= 0,619 - 39 / 110 = 0,264$$

$$\Rightarrow \cos \phi_2 = 0,966$$

Dans certaines conditions de travail défavorables ou de charge partielle, le facteur de puissance ($\cos \phi$) peut rester inférieur à 0,9.

Dans ce cas, une compensation par une batterie centralisée est requise.[2]

III.2.3 Compensation par groupe

Si la plupart des utilisateurs sont simultanément en service, on peut les considérer comme un groupe avec un condensateur commun pour la compensation. [2]

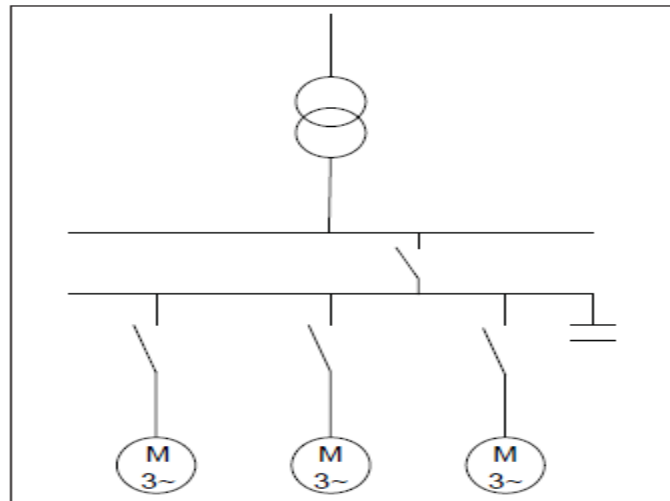


Fig. III.3: Compensation par groupe

Utilisation

Pour service simultané de plusieurs consommateurs inductifs.

Avantages

- La charge du câble vers le groupe d'utilisateurs est allégée
- Coût au kVAr réduit
- Supprime la facturation d'énergie réactive.
- Représente la solution la plus économique car toute la puissance est concentrée en un point et le coefficient de foisonnement permet des batteries bien optimisées.
- Soulage le transformateur.

Inconvénients

- Seulement applicable pour utilisateurs groupés

Remarque :

- Les pertes dans les câbles ($R \times I^2$) ne sont pas diminuées.[3]

III.2.4 Compensation par Partielle (secteur)

La batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être réalisée (Fig. III.4). Une économie

significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment au niveau du dimensionnement des câbles d'arrivée du ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée.

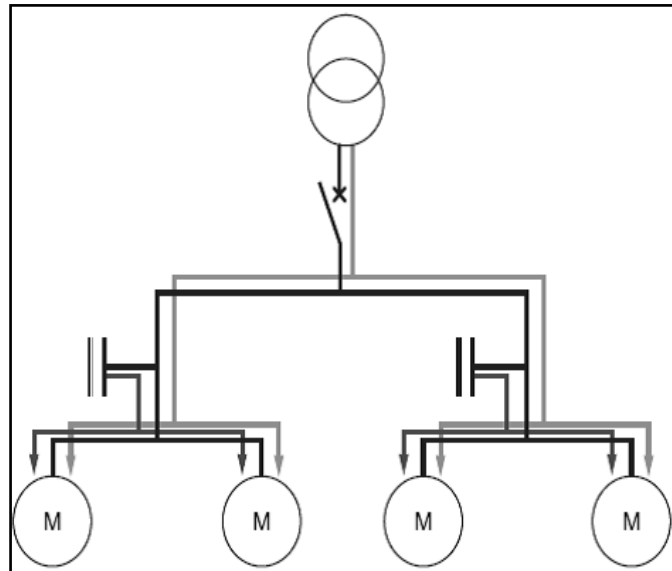


Fig. III.4: Compensation par Partielle

Avantages :

- Supprime la facturation d'énergie réactive.
- Soulage une grande partie des FEEDERS d'alimentation et diminue dans ces FEEDERS les pertes joules ($R \times I^2$).
- Intègre le foisonnement de chaque secteur.
- Soulage le transformateur.
- Reste économique.

Remarque :

- Solution généralement utilisée pour un réseau usine très étendu.[4]

III.2.5 Compensation centralisée

Les utilisateurs avec charge réactive fluctuante ne permettent pas de compensation fixe. Il n'est pas toujours économique ou il peut être dangereux de surcompenser. Ainsi il est nécessaire d'accorder la puissance du condensateur à celle de la charge réactive. Pour cela il faut raccorder une compensation générale au point central de l'installation (p.e. à l'interrupteur principal). La puissance du condensateur est divisée en gradins pilotés par un régulateur var métrique en

fonction de la demande de puissance réactive. La puissance réactive est donc compensée de façon optimale à tout moment.

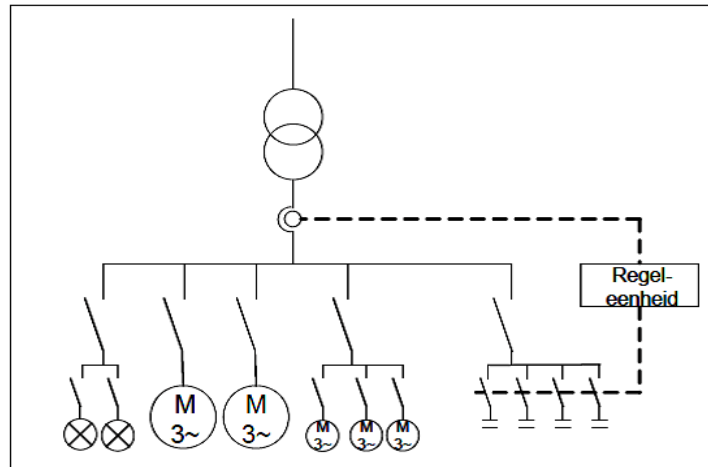


Fig. III.5: Centrale compensative

Utilisation

Applicable à toute installation.

Avantages

- Un seul ensemble centralisé (facilite l'entretien).
- Coût d'installation réduit.
- Puissance à installer réduite grâce au temps de travail non synchronisé des machines.
- Plus économique si des selfs-anti harmoniques sont requises.
- Extensions faciles avec modules supplémentaires.
- Optimisation du cos phi automatique.

Inconvénients

- Coût élevé au kVAr.
- Le réseau aval n'est pas déchargé de courant réactif.[2]

III.3 Dimensionnement de batteries de condensateurs automatiques

En général on utilise des batteries de condensateurs pilotées automatiquement.

Pour la définition de la batterie il faut connaître la puissance consommée réactive et active.

Plusieurs cas peuvent se présenter:

III.3.1 Au stade de projet

Dans ce cas, il n'y a encore aucune donnée de mesure disponible. En première approche, on peut estimer que les machines asynchrones ont un $\cos \phi$ moyen de 0,75. Pour ramener ce $\cos \phi$ à 0,9, une batterie de condensateurs d'une puissance de 40% de la puissance active est souhaitable. Compte tenu du facteur de travail des différentes machines, on peut calculer la puissance de compensation comme suit:

$$Q_c = P \cdot g \times 0,4$$

Avec Q_c : Puissance de compensation

P : Puissance active

g : Coefficient d'utilisation

Exemple

$$P = 600 \text{ kW} / g = 0,7 \Rightarrow Q_c = 600 \times 0,7 \times 0,4 = 168 \text{ kVAr}$$

III.3.2 Société déjà en activité

- Enregistrement des puissances actives et réactives

Cette méthode de calcul, est dans la pratique peu employée, car on ne dispose que rarement de mesures adéquates. Il faut veiller à ce que les mesures aient été effectuées sur une période assez longue afin d'éliminer les pointes de puissances. Il est conseillé d'étaler les mesures sur une semaine entière. On doit également tenir compte des fluctuations de charges sur l'année. Sur base des données de mesures ainsi obtenues une valeur représentative pour la puissance active et réactive peut être établie.

On trouve la puissance du condensateur à prévoir comme suit :

$$Q_c = P \times (T_g \phi_1 - T_g \phi_2) = Q - (P \times T_g \phi_2)$$

Avec: Q_c : Puissance du condensateur

P : Puissance active mesuré

Q : Puissance réactive mesuré

$T_g \phi_2$: Déduite du $\cos \phi_2$ souhaité

- A l'aide des factures mensuelles de la compagnie d'électricité

Si on possède les factures mensuelles d'électricité on peut facilement calculer la puissance de la batterie de condensateurs. Ces factures mentionnent la puissance consommée active et réactive, la pointe de puissance active (kW) quart horaire et le $\cos \phi$ ($\cos \phi_1$) dont on déduit la puissance de la batterie comme suit :

$$Q_c = (V_r - (V_a \times T_g \phi_2)) / t \quad \text{ou} \quad Q_c = (P_a \times (T_g \phi_1 - T_g \phi_2))$$

Avec V_r : Consommation réactive (kVArh)

V_a : Consommation active (kWh)

t : Temps d'utilisation (h)

$T_g \phi_1$: Déduit du $\cos \phi_1$ actuel

$T_g \phi_2$: Déduit du $\cos \phi_2$ souhaité

La puissance du condensateur calculée de cette façon représente une valeur moyenne pour un mois. Afin d'obtenir un calcul exact, couvrant les fluctuations sur une année il est recommandé d'effectuer ce calcul à l'aide de plusieurs factures mensuelles.[2]

III.4 Compensation dans des réseaux comportant des harmoniques

*** Charges linéaires**

Avec une charge linéaire, une tension sinusoïdale va s'installer et un courant de forme sinusoïdale va circuler, avec ou sans déphasage.

*** Charges non linéaires**

En revanche, les charges non-linéaires induisent malgré l'installation d'une tension sinusoïdale, un courant non-sinusoïdal. Comme charge non linéaire, nous avons:

- Variateurs de fréquence
- Régulateur à courant continu
- Ordinateurs, téléviseurs
- Fours à induction
- Alimentation de secours
- Eclairage économique et lampes à décharges
- Variateurs de lumière [2]

III.5 La Simulation de correction du facteur de puissance

*** Objectifs :**

- Modélisation et simulation des réseaux électriques en utilisant Simulink/Simpowersys
- étude de l'amélioration du facteur de puissance.

- **Avant surcharge :**

- la puissance active (P) =75 MW
- la puissance réactive (QL) = 15 MVAR
- la puissance réactive (Qc) = 0
- Déphasage =11.31°
- facture de puissance (cos ϕ) = **0.9806**

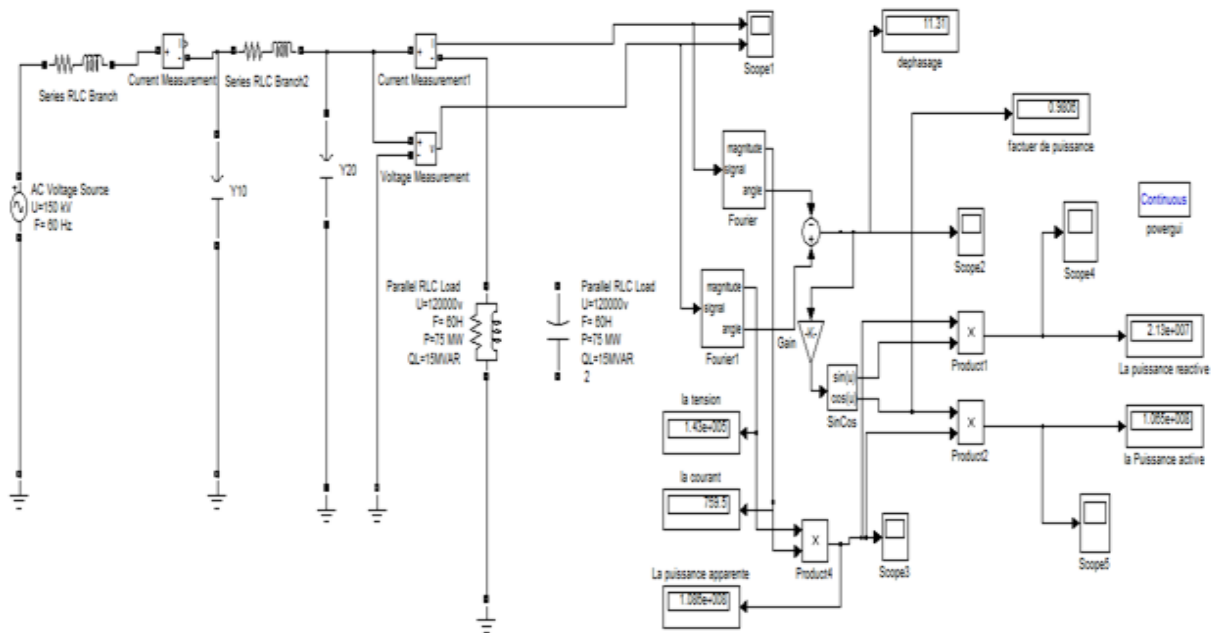


Fig. III.6: La Simulation avant surcharge

- **Pendant surcharge :**

- la puissance active (P) =75 MW
- augmenter la consommation de la puissance réactive (QL) =70 MVAR
- la puissance réactive (Qc) = 0 VAR
- augmenter la déphasage = 43.03°
- Réduction la facture de puissance (cos ϕ) = **0.73**
- chute de tension
- Le courant augmenté

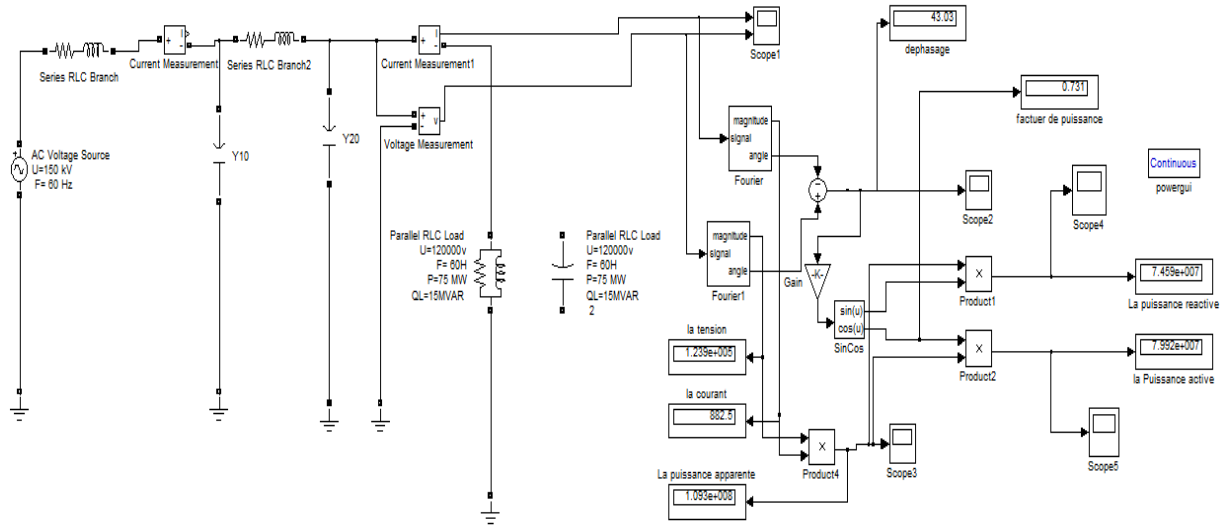


Fig. III.7: La Simulation pendant surcharge

• La solution du problème :

Raccordement d'un condensateur pré et en parallèle avec la charge

Calcul de la valeur du condensateur de compensation convenable

$$Q_c = P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

$$Q_c = 75 \times (\tan 43.03 - \tan 11.31)$$

$$Q_c = 55.011 \text{ MVAR}$$

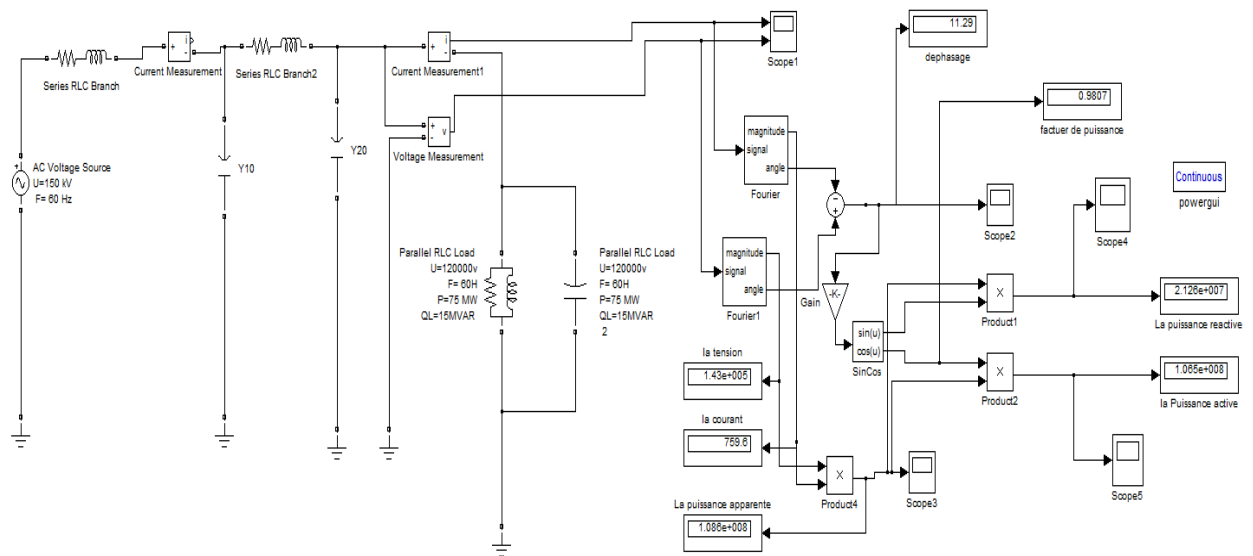


Fig. III.8: La Simulation après la correction du facteur de puissance

Nous notons que retour système au cas normal

-la puissance active (P) =75 MW

-la puissance réactive (QL) =70 MVAR

- la puissance réactive (Qc) = 55.011 MVAR

- Déphasage =11.29 °

-facture de puissance (cos φ) = **0.9807**

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques exemples et Simulation par logiciel MATLAB sur l'amélioration du facteur de puissance où nous avons trouvé que les pertes sont diminuées d'après la compensation d'énergie réactive, de plus le courant de lignes est diminué par conséquent les sections de conducteurs de lignes diminuées.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de recherche dans l'opération de correction du facteur de puissance dans les réseaux électriques, Quelques résultats ont été extraits par cette étude.

Les charges électriques tirent des puissances réactives en même temps qu'ils tirent des puissances actives, quand la puissance réactive est tirée d'une source d'alimentation, elle cause l'augmentation de la tension, la perte en alimentation, la perte de transformateur et aussi la perte de tension dans les lignes de transport et de distribution.

La solution de ce problème est d'utiliser des appareils qui améliorent le facteur de puissance pour corriger la puissance réactive directement sur l'emplacement de la charge.

La stabilité de tension du réseau s'améliore et on diminue la perte des lignes.

Aussi, cette solution permet de diminuer la charge appliquée sur les outils posés dans les systèmes de production, de transport et de distribution.

Avec ces solutions, le système électrique peut produire une puissance active supérieure.

Il est connu que les charges triphasées, par exemple les moteurs, consomment le courant alternatif de source d'alimentation, pour cela le moteur nécessite la puissance réactive pour produire le champ magnétique.

En ce principe, le courant est en retard par rapport à la tension de source d'angle (φ) .

Le résultat est que ces charges consomment une puissance apparente (S) supérieure que la puissance active demandée pour l'alimentation.

On connaît que la relation entre la puissance active et la puissance apparente est égale à $\cos \varphi = P/S$, également la relation entre la puissance active et la puissance réactive est équivalente à $Q = P \times \tan \varphi$.

Ces informations démontrent que l'amélioration de puissance réactive est faite dans les réseaux électriques par l'utilisation des condensateurs.

On a montré l'installation des condensateurs, ses types et ses avantages dans le deuxième chapitre.

A la fin , on conclut par l'application (des exemples) de correction du facteur de puissance au niveau de charge formée de puissance et bobine à induction en faisant la simulation par l'utilisation par le logiciel "MATLAB" .

Références Bibliographiques

- [1] **PUBLIE PAR MISTER** www.fr.scribd.com/doc/4597291/Generalites-sur-les-reseaux-electriques.
- [2] **M-TEC ENERGY BVBA** Cours technique sur la correction du facteur de puissance
- [3] **Gérard Gay SCHNEIDER ELECTRIC** – (Guide de l'installation électrique) 2010
22/01/2010 11:08.
- [4] **LEGRAND** compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques MARS 2010.
- [5] **LYCEE G. BRASSENS – TGE** FONCTION ALIMENTER EN BASSE TENSION
Compensation de l'énergie réactive.