

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme :

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Spécialité :

ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Thème

**Etude et dimensionnement des batteries de compensation de puissance
réactive dans l'unité de COJEK CEVITAL
LAKSEUR**

Réalisé par :

Mr NAAS ABDERRAOUF
Mr MEZOUAR AMINE

Encadré par :

Mr N.MEBARKI

Devant le jury composé de :

Mr S.ATROUNE
Mm C.GHABECHE

Promotion 2023

Remerciement

Merci à Dieu le tout-puissant qui a éclairé mon chemin et m'a donné la volonté, la force et le courage pour terminer mes études et mené vers la concrétisation de ce modeste travail.

Mes sincères remerciements vont à mon promoteur Mr. N.MEBARKI docteur à l'université Abderrahmane Mira de Bejaia de m'avoir fait l'honneur d'assurer l'encadrement de mon mémoire, nous remercions également mon Co-promoteur Mr S.MAOUCHI ingénieur en maintenance industriel qui m'a permis de découvrir le monde industriel. Nous le remercions également pour sa disponibilité.

Nous tenons à remercier vivement, Messieurs les Membres du jury d'avoir Consacrée leur temps à la lecture de ce manuscrit, et qui me feront honneur de juger et d'évaluer mon travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants qui nous ont suivis tout au long de mon cursus et ont contribué à la réussite de mes études.

Par le biais de ce travail, nous remercions infiniment mes très chers parents d'avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. De m'avoir toujours guidé, Encouragé et soutenu dans toutes les circonstances, pour m'avoir comblé de bravoure et de ténacité, pour tout ce qu'ils m'ont donné en m'accompagnant durant mon parcours
: de la patience, du sacrifice, de la tendresse, de l'amour, des encouragements et de l'aide.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Avant tout à mes chers parents, qui m'ont soutenu durant toutes ces années de formation.

À mes chers frères Aissam, Hicham et Amine.

Et à toute ma famille

À tous mes amis (e) qui m'ont aidé de près ou de loin

Atouts enseignants et enseignantes du département électrotechnique

À toute la promotion d'électrotechnique.

Raouf

Dédicace

Je dédie ce fruit de mes longues années d'études tout d'abord :

Ames très chers parents, qui sont la lumière de ma vie, qui ont tant souffert et sacrifiés pour que je sois heureuse, Pour leurs conseils, leur affection et leurs encouragements.

Je vous remercie pour tous vos efforts fournis pour moi, que Dieu vous garde, vous protège, et vous bénisse la vie.

Et je le dédie :

A tous les membres de ma famille, mes sœurs

« Inès » et « Imane », mon frère « Hicham »

A tous mes amis et mes collègues avec qui

J'ai partagé de très bons moments tout le long de ces années.

A tous les enseignants et les collègues de

A La promotion de la deuxième année Master 2022/2023.

Amine

Sommaire

Introduction générale

Introduction générale.....	1
Chapitre I : la compensation d'énergie réactive et les types de compensation	
I.Introduction.....	3
I.2 L'énergie active, réactive et apparente.....	3
I.2.1 L'énergie active.....	3
I.2.2 L'énergie réactive.....	3
I.2.3 L'énergie apparente.....	3
I.3 Composante active et réactive du courant.....	4
I.3.1 Courant actif.....	4
I.3.2 Courant réactif.....	4
I.3.3 Courant apparent.....	4
I.4 Composante active et réactive de la puissance.....	4
I.4.1 La puissance active.....	5
I.4.2 La puissance réactive.....	5
I.4.3 La puissance apparente.....	5
I.5 Facteur de puissance.....	5
I.5.1 La valeur de $\tan \phi$	6
I.5.2 Amélioration du facteur de puissance.....	6
I.5.3 Avantages d'un bon facteur de puissance.....	6
I.5.4 Inconvénient d'un mauvais facteur de puissance.....	7
I.5.5 Importance du facteur de puissance.....	7
I.6 Les principales sources d'énergie réactive.....	8
I.6.1 L'Alternateur.....	8
I.7 Energie réactive et les composants des réseaux.....	8
I.7.1 Machines synchrones ; ;.....	8
I.7.2 Machines asynchrones.....	8
I.7.3 Lignes et câbles.....	8
I.7.4 Transformateurs.....	9
I.7.5 Inductances.....	9
I.7.6 Condensateurs.....	9
I.8 Compensation de la puissance réactive.....	9
I.8.1 Principe de l'énergie réactive.....	10
I.8.2 Avantages de la compensation d'énergie réactive.....	10
I.8.3 I.8.3 Avantages économiques.....	10
I.8.4 Avantages techniques.....	11
I.8.5 Les moyennes de compensation d'énergie.....	11
I.8.5.1 Compensateur synchrone.....	11
I.8.5.2 Les avantages de compensation synchrone.....	12
I.8.5.3 Les inconvénients de compensation synchrone.....	12

I.8.5.4	Compensateur statique.....	13
I.8.5.5	Compensateurs séries.....	14
I.8.5.6	Compensateurs shunts... ..	14
I.8.5.7	Compensateurs combinés série-shunt.....	14
I.8.6	Compensation à l'aide de batterie condensateur.....	14
I.9	Conclusion.....	15

Chapitre II : Compensation d'énergie réactive avec les batteries condensateurs

II.1	Introduction.....	16
II.2	Compensation de puissance réactive avec les batteries condensateurs.....	16
II.3	Définition d'un condensateur.....	16
II.4	Rôle du condensateur de puissance.....	17
II.5	Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs.....	18
II.6	Constitution de la batterie de condensateurs.....	19
II.7	Les types de la compensation.....	19
II.7.1	Compensation fixe.....	19
II.7.2	Compensation de type automatique (ou en gradins)	20
II.8	Compensation d'énergie réactive en présence d'harmoniques.....	20
II.9	Choix des batteries de condensateurs dans un réseau perturbé par les harmoniques.....	21
II.9.1	Protection des batteries de condensateurs.....	22
II.9.1.1	Condensateur sans fusible de protection interne.....	22
II.9.1.2	Condensateurs avec fusible de protection interne.....	22
II.10	Précautions particulières.....	22
II.10.1	Enclenchement de condensateurs.....	22
II.10.2	Condensateurs branchés sur une installation à vide.....	23
II.10.3	Condensateur aux bornes d'un moteur.....	23
II.11	Principe et intérêt de la compensation automatique.....	23
II.12	Choix de la localisation de la compensation.....	24
II.12.1	Compensation globale.....	24
II.12.2	Compensation partielle ou par secteur.....	25
II.12.3	Compensation individuelle.....	25
II.12.13	Choix du couplage d'un condensateur.....	26
II.13.1	Montage triangle.....	26
II.13.2	Montage étoile.....	26
II.14	Verset Boîtiers métalliques IP65.....	27
II.14.1	Description.....	27
II.14.2	Principaux avantages.....	28
II.14.3	Les composantes de l'armoire.....	29
II.15	Type de protection.....	30
II.15.1	Protection externe.....	30
II.16	Condensateurs Varplus Can.....	30
II.17	Filtres harmoniques triphasés.....	31

II.18	Régulateur varométrique Varlogic N.....	32
II.19	Contacteurs électromagnétiques LC1-D	33
II.20	Disjoncteurs Compact NSX EasyPact CVS	34
II.21	Conclusion.....	35

Chapitre III : calculer le bilan de puissance

III.1	Introduction.....	36
III.2	Détermination des puissances.....	36
III.2.1	Puissance installée	36
III.2.2	Puissance utilisée.....	37
III.2.3	Facteur de simultanéité K_s	37
III.2.4	Facteur d'utilisation K_u	38
III.2.5	Facteur d'extension K_e	38
III.3	Méthode de calcul de la puissance d'utilisation des récepteurs... ..	38
III.4	Bilan de puissance de TGBT N01... ..	38
III.4.1	Méthode de calcul de bilan de puissance des tableaux secondaires.....	38
III.4.2	Méthode de calcul de bilan de puissance de la TGBT.....	40
III.5	Dimensionnement de batterie de condensateur à installer... ..	41
III.5.1	Choix de la localisation de la compensation... ..	41
III.5.2	Calcul de la puissance réactive des condensateurs à installer Q_c	41
III.8	Détermination du type de montage des batteries des condensateurs... ..	42
III.6.1	Montage triangle... ..	42
III.6.2	Montage étoile... ..	42
III.7	Identification du type de compensation.....	45
III.8	Conclusion.....	48

Chapitre VI : Simulation des résultats de bilan de puissance

VI.1	Introduction	49
VI.2	La simulation de la compensation de la puissance réactive	49
VI.3	Simulation de la TGBT.....	50
VI.3.1	Paramètre de système	50
VI.3.2	Description	50
VI.3.3	Simulation avec une charge fixe	50
VI.3.3.1	Facteur de puissance.....	51
VI.3.3.2	Puissance active.....	51
VI.3.3.3	Puissance réactive	52
VI.3.3.4	Courant.....	54
VI.3.3.5	Tension.....	55
VI.3.4	Simulation avec une charge variable.....	56
VI.3.4.1	Facteur de puissance.....	56
VI.3.4.2	Puissance active.....	57

VI.3.4.3 Puissance réactive	57
VI.3.4.4 Courant	58
VI.3.4.5 Tension	59
VI.7 Conclusion... ..	60

Conclusion générale

Conclusion générale.....	62
--------------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Capture Google Earth de l'unité	2
Figure 2 - Structure interne de l'unité de CEVITAL EL-KSEUR.	3
Figure I.1 - Diagramme vectoriel des courants	4
Figure I.2 - Schéma reflétant l'échange d'énergie dans l'alimentation du récepteur [13]	10
Figure I.3 - Compensateur synchrone	12
Figure I.4 : Compensateurs statiques de l'énergie réactive	13
Figure II.1 - Influence de la puissance réactive [13].....	17
Figure II.2 - principe de la compensation d'énergie réactive [13]	18
Figure II.3 - Compensation fixe [21]	19
Figure II.4 - Compensation automatique [22].....	20
Figure II.5 - Les harmoniques sur une phase de réseaux	21
Figure II.6 - Principe de la compensation automatique d'une installation [28].....	23
Figure II.7 - Compensation globale.....	25
Figure II.8 - Compensation partiel	25
Figure II.9 - Compensation individuelle	26
Figure II.10 - Schéma d'une batterie triangle [32].....	26
Figure II.11 - Schéma d'une batterie en étoile [34]	27
Figure II.12 - Verset Boîtiers métalliques IP65	27
Figure II.13 - Schéma électrique d'une batterie de compensation	28
Figure II.14 - Composants d'une batterie de compensation.....	29
Figure II.15 - Exemple d'un condensateur à protection interne [22]	30
Figure II.16 - Condensateurs Varplus Can.....	31
Figure II.17 - Filtres harmoniques triphasés.	32
Figure II.18 - Régulateur varométrique Varlogic N.....	33
Figure II.19 - Contacteurs électromagnétiques LC1-D.....	34
Figure II.20 - Disjoncteurs Compact NSX EasyPact CVS.	35
Figure III.1 - Plaque signalétique.....	37
Figure IV.1 - Schéma de simulation d'une installation de charge fixe	50
Figure IV.2 - Facteur de puissance avant et après la compensation.....	51
Figure IV.3 - Puissance active avant et après la compensation.....	52
Figure IV.4 - Puissance réactive avant et après la compensation.....	53
Figure IV.5 - Courant avant et après la compensation	54
Figure IV.6 - Tension avant et après la compensation	55
Figure IV.7 - Schéma de simulation d'une charge variable	56
Figure IV.8 - Facteur de puissance avant et après la compensation d'une charge variable	56
Figure IV.9 - Puissance active avant et après la compensation à une charge variable.....	57
Figure IV.10 - Puissance réactive avant et après la compensation a une charge variable.....	58
Figure IV.11 - Courant avant et après la compensation à une charge variable.	59
Figure IV.12 - Tension avant et après la compensation à une charge variable.	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Compensation de deux installations consommant la même puissance active [6].7	
Tableau III.1 : Facteur de simultané selon le nombre de récepteurs	38
Tableau III.2 : Facteur de simultanéité selon l'utilisation... ..	38
Tableau III.3 : Facteur d'utilisation par récepteur NF EN 12193 [36].....	38
Tableau III.4 : Calcul de puissance d'utilisation des récepteurs TGBT.....	40
Tableau III.5 : Recueil de données et calculs de puissance installée de TGBT2.....	41
Tableau III.6 : Recueil de données et calculs de puissance installée de TGBT3.....	44
Tableau III.7 : Caractéristique de l'installation.....	44
Tableau III.8 : Calcul de bilan de puissance des tableaux secondaires... ..	45
Tableau III.9 : Les puissances réactives fournies par les batteries de compensation.....	47
Tableau III.10 : Type de compensation.....	48

Symboles et Abréviations

FACTS	Flexible alternatif curant transmission Systems
STATCOM	Static Synchronous Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Voltage Source Converter
IPFC	Interline Power Flow Controller
IPC	Interphase Power Controller
HT	Haute tension
MT	Moyenne tension
BT	Base tension
U	la tension
I	Le courant
P	Puissance active
Q	puissance réactive
S	Puissance apparente
Pu	Puissance Utilisée
Pa	Puissance Absorbée
$\cos \varphi$	Facteur de puissance
η	rendement
Qc	Puissance réactive fournie par des condensateurs
Ia	courant actif consommé
Ir	courant réactif
It	courant total
Ku	facteur d'utilisation
Ks	facteur de simultanéité
Ke	facteur d'extension

Introduction générale

La demande en énergie électrique, dans notre pays ne cesse de croître et la construction de nouvelles centrales de production, de nouvelles lignes de transport s'impose. Mais, ceci nécessite un gros investissement et une politique à long terme qui demande beaucoup de moyens pour y faire face. Actuellement, c'est l'un des principaux soucis qui se pose aux gestionnaires de la production et du transport de l'énergie électrique. Une des solutions de ce problème est la compensation d'énergie réactive [1].

Depuis quelques années, la qualité de l'électricité est devenue une préoccupation majeure pour tous les acteurs du système électrique, car est un aspect important pour assurer un fonctionnement optimal des équipements électroniques et électriques. La compensation d'énergie est une technique utilisée pour améliorer la qualité de l'énergie électrique. Elle consiste à injecter des courants dans le réseau pour compenser les pertes de puissance réactive, corriger le facteur de puissance et maintenir une tension stable. La compensation peut être réalisée à l'aide de différents équipements tels que les condensateurs, les filtres actifs et les dispositifs statiques de compensation de l'énergie réactive. Puis elle présente de nombreux avantages, tels que l'amélioration de la qualité d'alimentation électrique, la réduction des pertes d'énergie, la prolongation de la durée de vie des équipements électriques, et l'optimisation de l'utilisation de la capacité de transmission. En somme, la compensation d'énergie est un outil essentiel pour assurer une meilleure qualité de l'énergie électrique fournie par le réseau de distribution, et ainsi améliorer le fonctionnement des équipements électriques tout en réduisant la consommation d'énergie et en préservant l'environnement.

Le **premier Chapitre** présente une vue d'ensemble de l'énergie électrique et du facteur de puissance, ainsi que plusieurs définitions relatives à la puissance réactive. Traite des méthodes traditionnelles et contemporaines de compensation de l'énergie réactive. Compris l'utilisation de la compensation par les batteries de condensateurs, et la compensation statique de l'énergie.

Dans le **deuxième Chapitre**, nous aborderons la compensation d'énergie réactive à l'aide de dispositifs appelés condensateurs. Ces condensateurs sont installés pour produire de l'énergie réactive en opposition de phase avec la charge inductive, ce qui permet de compenser la consommation d'énergie réactive. En conséquence, la facture d'électricité peut être réduite. Ainsi les types de la compensation et le choix de localisation puis les avantages et les inconvénients de cette technique.

Le **troisième Chapitre** est consacré au développement de bilan de puissance, qui nous permet connaître le niveau de consommation électrique. Nous avons déterminé la puissance utile ainsi que la puissance totale des différents récepteurs pour en déduire le facteur de puissance. A cet effet, deux méthodes de coefficients sont établies : les coefficients d'utilisation et les coefficients de simultanéité.

Le **quatrième Chapitre**, est dédié à La simulation de la compensation de l'énergie réactive est d'une grande importance pour les spécialistes en l'ingénierie électrique dans le but de renforcer l'efficacité et la stabilité des systèmes énergétiques. Grâce à cette étude, on peut comprendre l'importance de l'énergie réactive dans les réseaux électriques. Pour mener à bien cette recherche, des simulations ont été faites en utilisant le logiciel Matlab/Simulink, qui a permis de modéliser précisément le comportement des systèmes électriques en temps réel. Les résultats obtenus démontrent que la compensation de l'énergie réactive est un élément crucial pour maintenir la stabilité de la tension et éviter les perturbations dans le réseau électrique.

I. Introduction

La compensation de l'énergie réactive est un élément important pour améliorer la qualité du réseau électrique. La demande de puissance active étant incompressible, la réduction des pertes de puissance ne peut être réalisée qu'en agissant sur la composante réactive du courant transitant dans les lignes de distribution. Les économies d'énergie réalisées sont d'une grande importance vue les efforts humains et matériels qui sont investis quotidiennement pour garantir la continuité et la qualité de service [1].

L'amélioration du facteur de puissance constitue sans doute un paramètre très important dans l'amélioration de la qualité de l'énergie du point de vue technique et économique, parmi les méthodes d'amélioration du facteur de puissance est la compensation de l'énergie réactive.

Une partie importante de ce chapitre sera consacrée à la compensation de cette énergie, ainsi que les différents types de la compensation.

I.2 L'énergie active, réactive et apparente

Les machines électriques utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) mise en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive [2].

I.2.1 L'énergie active

L'utilisation de puissance active P (kw) essentiellement par les récepteurs. Elle se transforme intégralement en énergie mécanique (travail) ou lumineuse ou calorifique (pertes).

Elle s'exprime en kilo watt heure (kWh).

I.2.2 L'énergie réactive

Consommée sert essentiellement à l'amélioration des circuits magnétiques des machines électriques. Elle s'exprime en kilo var heure (kvarh). Elle correspond à la puissance réactive Q (kvar) des récepteurs.

I.2.3 L'énergie apparente

Est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente des récepteurs. Elle permet de déterminer la valeur du courant absorbé par un récepteur.

I.3 Composante active et réactive du courant

A chacune des énergies active et réactive, correspond un courant.

I.3.1 Courant actif

Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau. il engendre la puissance active.

I.3.2 Courant réactif

Le courant réactif (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, soit en retard (récepteur inductif), soit en avance (récepteur capacitif). Il est nécessaire pour l'excitation magnétique des récepteurs.

I.3.3 Courant apparent

Le courant apparent (I_t) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel voir la figure I.1.

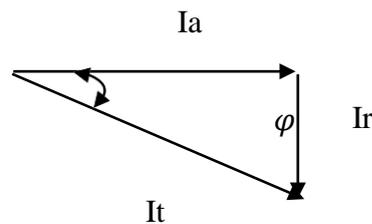


Figure I.1- Diagramme vectorielle des courants

Les courants actifs, réactifs et apparents sont liés par les relations suivantes :

$$I_t = \sqrt{(I_a)^2 + (I_r)^2} \quad (\text{I.1})$$

$$I_a = I_t \cos \varphi \quad (\text{I.2})$$

$$I_r = I_t \sin \varphi \quad (\text{I.3})$$

φ : Angle de déphasage entre les composantes active et les composantes apparentes

I.4 Composante active et réactive de la puissance

Le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances, il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau [3]. On définit aussi :

I.4.1 La puissance active

On appelle puissance active la puissance qui se transforme intégralement en énergie mécanique, thermique et lumineuse, etc. La puissance active est le produit de la tension par la composante du courant en phase avec elle :

- En monophasé : $P = VI \cos \varphi$ **(I.4)**

- En triphasé : $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$ **(I.5)**

Elle se mesure en W (watts) ou en KW à l'échelle industrielle.

I.4.2 La puissance réactive

On appelle puissance réactive la quantité Q fournie pour l'excitation magnétique des récepteurs. Elle est consommée par les circuits inductifs et fournie par les circuits capacitifs. La puissance réactive est le produit de la tension par la composante du courant réactif, en quadrature avec elle

- En monophasé : $Q = VI \sin \varphi$ **(I.6)**

- En triphasé : $Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$ **(I.7)**

Elle se mesure en VAR (Voltampères réactifs), ou en kvar à l'échelle industrielle.

I.4.3 La puissance apparente

On appelle puissance apparente la quantité S fournie par le réseau au récepteur, qui est la résultante des deux puissances précédentes :

- En monophasé : $S = VI$ **(I.8)**

- En triphasé : $S = \sqrt{3}UI$ **(I.9)**

I.5 Facteur de puissance

Le facteur de puissance est égal par définition à :

$$\mathbf{FP} = \frac{\mathbf{P}(\text{puissance active})}{\mathbf{S}(\text{puissance apparente})} \quad \mathbf{(I.10)}$$

Le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente ; c'est un nombre abstrait compris entre 0 et 1. En l'absence d'harmoniques, le facteur de puissance est égal à $\cos\varphi$. Par contre, en présence d'harmoniques ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$\mathbf{FP} = \mathbf{Fd} * \mathbf{\cos \varphi} \quad \mathbf{(I.11)}$$

Fd : facteur de déformation

I.5.1 La valeur de $\tan \varphi$

Elle indique le rapport entre la puissance active et la puissance réactive circulant sur le réseau, c'est en compensant l'énergie réactive que la **$\tan \varphi$** pourra être baissée et amenée le plus proche de 0 [3].

On utilise souvent **$\tan \varphi$** au lieu de **$\cos\varphi$** . En l'absence d'harmoniques, l'expression de **$\tan \varphi$** est la suivante :

$$\mathbf{\tan \varphi} = \frac{\mathbf{Q}(\text{puissance réactive})}{\mathbf{P}(\text{puissance apparente})} \quad \mathbf{(I.12)}$$

I.5.2 Amélioration du facteur de puissance

L'installation de condensateur permet de compenser l'énergie réactive de la composante fondamentale et d'obtenir un **$\cos \varphi$** à peu près égal à 1. Cependant, il faut noter que le distributeur d'énergie ne fait payer au client que l'énergie réactive due à la composante fondamentale. Il faudra donc calculer **$\cos \varphi$** 1 (et non Fp) pour déterminer la puissance réactive des condensateurs qu'il faut installer pour réduire ou supprimer la facture d'énergie réactive [4].

I.5.3 Avantages d'un bon facteur de puissance

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation de l'énergie réactive
- La diminution de la puissance souscrite en kva.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte-tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne. [5].

Un bon facteur de puissance c'est un **cos φ** élevé proche de 1, Ou **tan φ** faible, proche de 0.

I.5.4 Inconvénient d'un mauvais facteur de puissance

Un mauvais facteur de puissance dans une installation entraîne de nombreux inconvénients tel que :

- Intensité de courant en ligne trop élevée ce qui engendre l'augmentation des pertes d'énergie active dans les câbles.
- La facturation de l'énergie réactive.
- Augmentation de la puissance souscrite en kva.
- Saturation des transformateurs.
- Dégradation de la qualité de l'installation électrique [3].

I.5.5 Importance du facteur de puissance

Puisque seule la puissance active est transformable en puissance mécanique ou calorifique, le consommateur comme le producteur cherche, pour une installation donnée, à obtenir le maximum de puissance active.

Si le facteur de puissance (diminue, l'intensité appelée augmente, les pertes par effet joule augmentent en raison du carré de cette intensité (RI²), les chutes de tension sont importantes et le rendement de l'installation diminue ce qui conduit au surdimensionnement des transformateurs, câbles et également les appareils de commande.

Pour avoir une idée concrète de l'importance du facteur de puissance, on propose l'exemple suivant de la comparaison de deux installations consommant la même puissance active voir le tableau ci-dessus [6] :

	Installation A	Installation B
La Puissance active consommée	70 kW	70 kW
Cos φ	0,7	0,9
Tan φ	1,02	0,48
Q=P tg	71,4 kvar	33,9 kvar
Facturation de l'énergie réactive	29,4 kvar	0
Bonification (énergie réactive remboursée)	0	11,9 k VAR
Puissance apparente S consommée	100 kva	78 kva

Tableau I.1 : comparaison de deux installations consommant la même puissance active [6]

Dans ce tableau, on a considéré deux installations A et B alimentées chacune par un transformateur de 100 k VA sous 380 V. Ces deux installations consomment 70 kW chacune, mais l'une sous un $\text{Cos } \varphi = 0,7$ et l'autre sous un $\text{Cos } \varphi = 0,9$, on constate que :

L'installation à $\text{cos } \varphi = 0,7$ à payera des pénalités au distributeur d'énergie électrique. Puis il est saturé alors que l'installation à $\text{cos } \varphi = 0,9$ dispose de 22 kva. Dans la première installation le transit inutilement 33 A de plus que dans la deuxième. Les pertes en ligne (kWh) proportionnelles au carré du courant sont supérieures à 66% donc augmentent d'autant la facture L'utilisateur de l'installation de $\text{cos } \varphi = 0,9$ peut se contenter d'un abonnement de 80 kva [7].

I.6 La source principale de puissance réactive

I.6.1 L'Alternateur

L'alternateur fournit en même temps les puissances actives et réactive qui sont ajustées en agissant respectivement sur la puissance mécanique de la turbine, et le courant d'excitation du rotor. En effet la puissance réactive est commandée.

I.7 Puissance réactive et les composants des réseaux

I.7.1 Machines synchrones

Ces machines ont une fonction de générateurs (d'énergie active) lorsqu'ils transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Ce sont des moteurs dans le cas inverse. En agissant sur leur excitation, ces machines peuvent fournir ou absorber de l'énergie réactive. Dans certains cas, la machine ne fournit aucune puissance active. Il est ensuite utilisé comme condensateur synchrone. Les moteurs synchrones sont rarement utilisés comme modulateurs [8].

I.7.2 Machines asynchrones

Elles se différencient des précédentes, en particulier, par leur propriété d'être toujours consommatrices d'énergie réactive. Cette énergie est très importante : de 25 à 35 % de l'énergie active à pleine charge, beaucoup plus à charge partielle. Le moteur asynchrone est universellement répandu. C'est le principal consommateur d'énergie réactive des réseaux industriels.

I.7.3 Lignes et câbles

Les caractéristiques inductives et capacitatives des lignes aériennes et des câbles sont telles qu'ils sont consommateurs de l'énergie réactive.

I.7.4 Transformateurs

Les transformateurs absorbent de l'énergie réactive correspondant à environ 5 à 10 % de l'énergie apparente qu'ils transitent.

I.7.5 Inductances

Les inductances sont essentiellement consommatrices d'énergie réactive. Les pertes d'énergie active ne représentent qu'un faible pourcentage de l'énergie réactive (Q_r) consommée [8].

I.7.6 Condensateurs

Les condensateurs génèrent de l'énergie réactive avec de très faibles pertes, d'où leur emploi dans l'application de compensation d'énergie réactive (Q_c).

❖ Problématique de l'énergie réactive au milieu industriel

Dans l'environnement industriel actuel, la présence excessive de la puissance réactive dans le réseau électrique peut engendrer plusieurs inconvénients tels que :

- Les surcharges au niveau des transformateurs.
- L'échauffement des câbles d'alimentation et les dispositifs présentent un champ électromagnétique.
- Les pertes supplémentaires dans les lignes, les transformateurs
- Les chutes de tension importantes.
- Dégradation de la durée de vie des équipements et la diminution de leurs performances.
- La dégradation du facteur de puissance [9,10].

I.8 Compensation de la puissance réactive

Une installation d'une source d'énergie réactive afin de produire une quantité d'énergie réactive au plus près des charges pour améliorer la stabilité de réseau électrique et augmente le $\cos \varphi$.

La compensation de l'énergie réactive utilisé pour limiter le transport de cette énergie qui causer une chute de tension et des pertes au long de la ligne. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance, la plus simple consiste à placer des batteries de condensateur en parallèle avec le réseau ou avec la charge (comme des moteurs asynchrone).

Les réseaux de transport et d'interconnexion en très hautes tension (THT) et haute tension

(HT) permettent d'acheminer l'énergie électrique des centres de productions jusqu'au consommateur à tout instant.

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes sur les réseaux de distribution. Elle entraîne aussi des effets néfastes au milieu industriel (les surcharge, l'échauffement des câbles, les pertes ...) Pour ces raisons, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau,

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 [11].

I.8.1 Principe de puissance réactive

La circulation de l'énergie réactive a un impact technique et économique important sur les réseaux de distribution. Il peut également avoir des effets néfastes en milieu industriel (Surcharge, échauffement des câbles, pertes...). Pour ces raisons, il est nécessaire de générer de l'énergie réactive au plus près de la charge pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. L'intérêt économique de la compensation est mesuré en comparant le coût d'installation des batteries de condensateurs aux économies qu'elle procure [12].

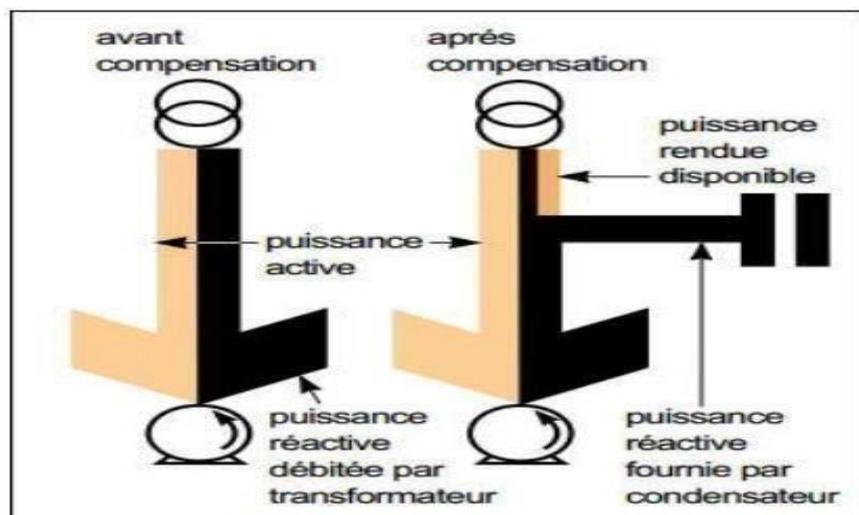


Figure I.2 - Schéma reflétant l'échange d'énergie dans l'alimentation du récepteur [13].

I.8.2 Avantages de la compensation de puissance réactive

I.8.3.1 Avantages économiques

Ces avantages sont liés à l'impact de la compensation sur l'installation et permettent d'évaluer le temps de retour sur investissement. La compensation permet d'éviter les frais

Supplémentaires liés à la surconsommation de puissance réactive et entraîne une réduction de la puissance souscrite en kva. Cela conduit également à une diminution de la consommation de puissance active en kWh.

I.8.3.2 Avantages techniques

Il est donc nécessaire de produire l'énergie réactive auprès de la demande pour répondre à la demande en électricité, il est important de générer de l'énergie réactive. Cela permet de transporter plus de puissance, sans surdimensionné les réseaux, de réduire les pertes en ligne, d'abaisser la chute de tension et d'augmenter la puissance disponible. Ainsi, la section des câbles peut être diminuée.

I.8.3 Les moyennes de compensation

Les dispositifs de compensation sont constitués soit par des machines tournantes, soit par des condensateurs. Ces condensateurs élémentaires sont regroupés en série -parallèle pour constituer des batteries de condensateurs. L'association de condensateurs et de bobines d'inductances commandés par thyristors permet de réaliser des systèmes entièrement statiques, capables de produire ou d'absorbée de la puissance réactive de manière continue entre deux limites.

I.8.3.1 Compensateur synchrone

Le compensateur synchrone C_s est un moteur synchrone fonctionnant à vide c'est-à-dire il n'entraîne aucune charge, donc il n'absorbe aucune puissance. Le C_s génère de la puissance réactive en régime surexcité ou sous-excité lui permettent respectivement de fournir ou d'absorber l'énergie réactive lors du régime de surexcitation (il se comporte comme une capacité) et absorbe de l'énergie réactive quand il est sous-excité (il se comporte comme une bobine). Cette méthode permet de contribuer au contrôle et à la stabilité de la tension. Les machines synchrones peuvent donc fournir une partie de la puissance réactive demandée.

Le C_s fonctionne dans l'un ou l'autre des régimes en fonction du régime de charge et de la ligne [7,12], voir la figure suivant.



Figure I.3- Compensateur synchrone

En régime surexcité : $E_c > U_r$ Q_c (+) capacitive.

En régime sou-excité : $E_c < U_r$ Q_c (-) inductive

Si on augmente le courant d'excitation (I_{ex}), la tension (v) augmente. Un courant (i) s'établit dans le circuit déphasé de 90° en arrière de la tension de réseau (v_r).de sorte que le compensateur voit le réseau comme une inductance. Lorsque l'ont diminué le courant d'excitation (I_{ex}), d'une façon que (v) devient plus petite que (v_r), un courant s'établit dans le circuit déphasé de 90° mais cette fois ci en avant de la tension du réseau (v_r).de sort que le compensateur voit le réseau comme une capacitance.

I.8.3.2 Les avantages de compensation synchrone

Parmi ces avantages :

- Le placement près des consommateurs.
- La facilité de réglage comme producteur ou consommateur de l'énergie réactive.
- Un facteur de puissance voisin de 1 rendement excellent.
- Effet autorégulateur.

I.8.3.3 Les inconvénients de compensation synchrone

Les inconvénients de cette compensation :

- Machine tournant qui demande d'entretien.
- Les pertes actives relativement importantes.

- Cout élevé.
- La force motrice n'est pas toujours compatible avec la demande instantanée de l'énergie réactive.

I.8.3.4 Compensateur statique

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System), système flexible de transmission à courant alternatif. C'est un projet lancé en 1988 par EPRI (Electric Power Research institute), qui est un consortium dédié à la recherche dans le domaine de l'exploitation de l'énergie et regroupe un certain nombre de compagnies. Ce projet vise surtout à trouver des moyens capables d'améliorer les capacités des réseaux de transport en augmentant leur flexibilité. La technologie FACTS utilise l'électronique de puissance et particulièrement les thyristors à ouverture par gâchette, GTO, qui permettent d'atteindre des temps de réponses nettement inférieurs à ceux obtenus pour les systèmes mécaniques, et leur état statique réduit largement leur maintenance. Les transits de la puissance réactive ont des effets directs sur le niveau de tension dans le réseau. Un transit de puissance non contrôlé, peut causer une instabilité en tension en raison des chutes de tension et des pertes joule occasionnées. Les dispositifs FACTS ont pour objectifs de contrôler la tension et le transit de la puissance dans les réseaux afin d'augmenter leur capacité de charge jusqu'à leurs limites thermiques maximales. La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs implantés dans les réseaux. Ces dispositifs permettent le contrôle de la tension et du transit de puissance réactive en agissant sur les commandes de ces convertisseurs. En général les FACTS sont devisé, selon leur mode de couplage, en trois catégories [13] voir la figure ci-dessus.



Figure I.4-Compensateurs statiques de la puissance réactive

I.8.3.5 Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau, ils jouent le rôle d'une impédance variable (inductive ou capacitive). Leur utilisation consiste à compenser la puissance réactive demandée par la réactance d'une ligne longue, et, par leur influence sur l'impédance, ils interviennent dans le contrôle et l'amélioration de la stabilité de tension.

I.8.3.6 Compensateurs shunts

Ils consistent en une impédance shunt variable. Ils sont principalement utilisés pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent ils contrôlent les tensions des nœuds [14].

I.8.3.7 Compensateurs combinés série-shunt

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'améliorer le contrôle de tensions et de puissance réactive [13, 14].

Plusieurs types de FACTS, avec des architectures différentes, ont été développés. Parmi eux les plus connus sont :

- Le SVC (Static Var Compensator).
- Le STATCOM (Static Synchronous Compensator).
- Le TSSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).
- L'UPFC (Unified Power Flow Controller), Chacun d'eux possède ses propres caractéristiques.

I.8.6 Compensation à l'aide de batterie condensateur

Une batterie de condensateurs est un générateur de puissance réactive. Ce composant passif du réseau est sollicité particulièrement pendant les périodes de forte consommation (période de pointe et de surcharge). Sa disponibilité sur le réseau pendant ces périodes est très souhaitable pour réduire les chutes de tensions et les pertes en réseau et donc pour optimiser le coût du kilowattheure

Une batterie de condensateur est un groupe de condensateurs unitaires connectés électriquement les uns aux autres peuvent être montées en étoile ou en triangle. (Mise en série ou en parallèle).

Les condensateurs sont généralement reliés aux réseaux par l'appareillage (fusible, contacteurs, interrupteurs...) est appelé gradin. Chaque gradin constitue donc l'ensemble autonome. Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le

Plus simple de production d'énergie réactive dans ces installations industrielles aussi bien que dans le réseau public. Les batteries de condensateurs fournissent une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau. [15].

Il sera l'objet de notre étude dans le deuxième chapitre.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la compensation de l'énergie réactive dans les installations industrielles ainsi que les différents compensateurs de l'énergie réactive ainsi explique le principe de la compensation et comment choisir l'emplacement et le type de compensation et nous avons présenté la compensation synchrone et la compensation avec les batteries de condensateurs. La compensation de l'énergie réactive est une des principales missions de l'ingénieur et de l'installateur électricien car c'est le premier point d'économie d'énergie à dimensionner et à prévoir.

II.1 Introduction

Les dispositifs de compensation sont constitués soit par des machines tournantes, soit par des condensateurs. Ces condensateurs élémentaires sont regroupés en série ou en parallèle pour constituer des batteries de condensateur.

Les condensateurs génèrent de l'énergie réactive avec un très bon rendement. Les critères de base pour choisir un condensateur sont la tension et la température. Les condensateurs sont divisés en catégories selon la température de fonctionnement. La valeur minimale est la température de l'air ambiant à laquelle le condensateur peut être alimenté. La valeur maximale est la valeur qui peut être utilisée.

II.2 Compensation de puissance réactive avec les batteries condensateurs

Dans le réseau de distribution BT, la compensation de puissance réactive se fait en utilisant les batteries de condensateurs. Les batteries de condensateurs sont actuellement la méthode la plus économique et la plus simple pour générer de l'énergie réactive dans les installations industrielles et les réseaux publics. La compensation d'énergie réactive peut être effectuée en tout point de l'installation. Des stratégies de compensation de puissance réactive dans les systèmes de distribution d'énergie sont nécessaires pour réduire les pertes de puissance résistive, maintenir les niveaux de tension du système et améliorer le facteur de puissance.

II.3 Définition d'un condensateur

C'est un récepteur constitué de deux parties conductrices (électrodes) séparées par un isolant. Il génère de l'énergie réactive avec un très bon rendement. 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. On constate que les récepteurs inductifs (moteur, transformateur...) consomment de l'énergie réactive alors que les condensateurs (récepteurs capacitifs) produisent de l'énergie réactive [16].

Les condensateurs sont classés en catégories de températures. Les surtensions et l'échauffement abrègent la vie des condensateurs. Les caractéristiques nominales sur la plaque signalétique :

- La puissance nominale Q_n en (kvar)
- La tension nominale U_n en (Volt ou kV).
- La fréquence f en (Hz).
- La catégorie de la température.

II.4 Rôle du condensateur de puissance

Le rôle de base des condensateurs de puissance est la compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques et le filtrage des harmoniques, et d'augmenter la puissance en énergie électrique. Ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile ou triangle.

La batterie agit comme un compensateur de l'énergie réactive dont le rôle est d'alimenter les circuits magnétiques des machines électriques. Grâce à cette action, elle évite aux utilisateurs de payer des pénalités sur la consommation en énergie électrique. Le nombre de condensateurs connectés dépend de la puissance réactive totale nécessaire et de la puissance unitaire. La puissance réactive des condensateurs à mettre en œuvre, doit être déterminée en fonction de la puissance de l'installation, du $\cos \varphi$ d'origine et du $\cos \varphi$ requis à l'arrivée [17].

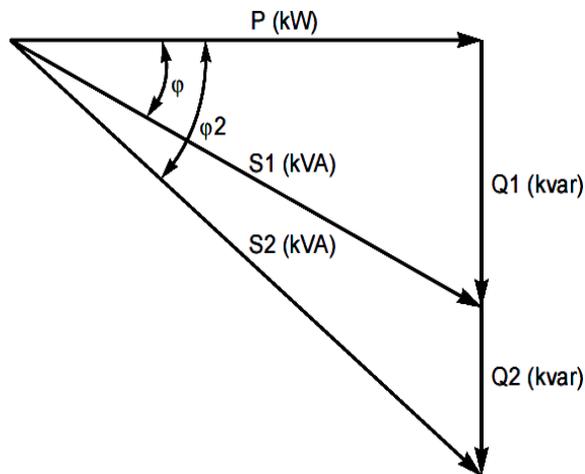
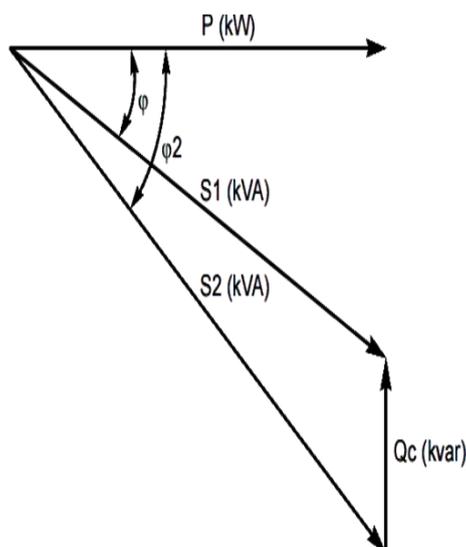


Figure II.1-Influence de la puissance réactive [13].

Q1 : énergie réactive pour un angle de déphasage φ

Q2 ; énergie réactive pour un angle de déphasage φ_2

On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs. Pour réduire la puissance apparente absorbée au réseau de la valeur S2 à la valeur S1, on doit connecter une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive Qc [13].

**Figure II.2 - Principe de la compensation d'énergie réactive [13]**

P : Puissance active

S1 et S2 : Puissances apparentes (avant et après compensation)

Qc : Puissance réactive du condensateur

ϕ_2 : Angle de déphasage après la compensation

ϕ : Angle déphasage avant la compensation

II.5 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 :

- La quantité de la puissance réactive produite par les batteries ne peut être contrôlée qu'en pas discrets,
- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, Ce qui peut provoquer leur vieillissement prématuré et parfois en claquage de l'isolant.

Si les batteries des condensateurs sont branchées au réseau via un disjoncteur, ce disjoncteur Introduit son propre bruit dans le réseau,

- Les batteries des condensateurs n'ont pas la possibilité de la réponse rapide aux phénomènes transitoires dans le réseau [13].

II.6 Constitution de la batterie de condensateurs

Chaque élément est formé de feuilles d'aluminium entre lesquelles est inséré un ensemble de trois ou quatre feuilles d'un papier spécial imprégné d'huile minérale, le tout est plié en accordéon ou en roulé. Dans le premier cas, l'élément est parallélépipédique, dans le second il est cylindrique.

Ces éléments sont disposés en série puis en parallèle et sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile susceptible d'assurer le refroidissement. Cela constitue une unité, ces unités peuvent aussi être associées en série, en parallèle, en triangle ou en étoile [18].

II.7 Les types de la compensation

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits :

- Les condensateurs de valeurs fixes ou batterie fixe.
- Les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques) qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation.

II.7.1 Compensation fixe

Les batteries de condensateurs fournissent une puissance réactive constante quelque Soient les variations des charges des récepteurs. On met en service l'ensemble de la batterie dans un fonctionnement "tout ou rien", La mise en service de ces batteries peut être manuelle (Par disjoncteur ou interrupteur), semi-automatique (par contacteur) commandé à distance. Ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactivé est faible (<15% de la Puissance du transformateur) et la charge relativement stable. Elles sont utilisées de préférence :

- Aux bornes des récepteurs
- Sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible

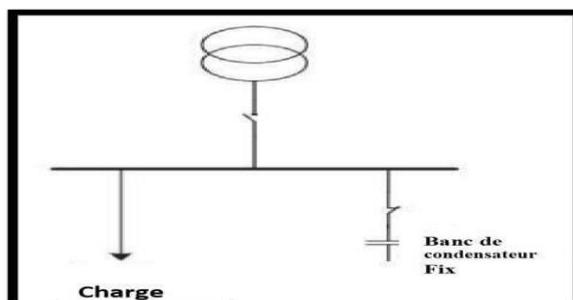


Figure II.3 - Compensation fixe [19]

II.7.2 Compensation de type automatique (ou en gradins)

La puissance réactive fournie par la batterie est modulable en fonction des variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation. [20]

Ces batteries sont composées d'une association en parallèle de gradins condensateurs (Gradin = condensateur + contacteur). Ils ont également été utilisés dans le cas :

- De compensation de tableaux généraux (TGBT) ou gros départ.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est supérieure à 15% de la puissance du transformateur [20]

Ce type de batterie est installé en tête de la distribution BT ou d'un secteur important.

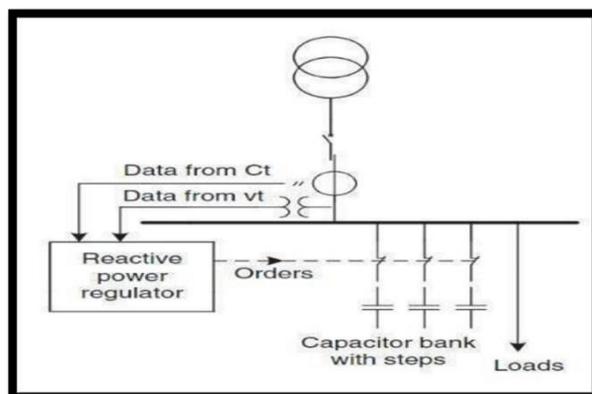


Figure II.4- Compensation automatique [20]

II.8 Compensation d'énergie réactive en présence d'harmoniques

La présence d'harmoniques dans les systèmes électriques signifie que le courant et la tension sont déformés et s'écartent des formes d'ondes sinusoïdales. Les courants harmoniques sont des courants circulant dans les réseaux et dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence d'alimentation. Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires connectées au réseau de distribution. Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle consomme n'a pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation. Le flux de courants harmoniques à travers les impédances du système crée à son tour des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation. Les charges non linéaires les plus courantes qui génèrent des courants harmoniques sont celles qui utilisent l'électronique de puissance, comme les variateurs de vitesse, les redresseurs, les onduleurs, etc. Les condensateurs sont particulièrement sensibles aux courants harmoniques car leur impédance diminue proportionnellement à l'ordre des harmoniques présentes. Il peut en résulter

Une surcharge du condensateur, ce qui raccourcit considérablement sa durée de vie. Dans certaines situations extrêmes, une résonance peut se produire, entraînant une amplification des courants harmoniques et une très forte distorsion de la tension. L'amplification des courants harmoniques est très élevée lorsque la fréquence de résonance naturelle du condensateur et du réseau combiné est proche de l'une des fréquences harmoniques présentes. Cette situation peut entraîner de graves surtensions et surcharges qui conduiront à une défaillance prématurée des condensateurs. Pour garantir le bon fonctionnement de l'installation électrique, le niveau d'harmoniques doit être pris en compte dans la sélection de l'équipement de correction du facteur de puissance. Un paramètre important est la puissance cumulée des charges non linéaires générant des courants harmoniques [21].

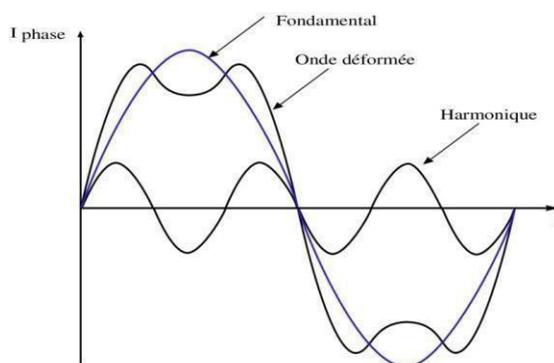


Figure II.5 - Les harmoniques sur une phase de réseaux

II.9 Choix des batteries de condensateurs dans un réseau perturbé par les harmoniques

La présence des récepteurs non linéaires (variateurs de vitesse, onduleur...) crée des courants et des tensions harmoniques, l'équipement de compensation est choisi en fonction de l'importance de la valeur de ces harmoniques. Le rapport GH/Sn permet de déterminer le type d'équipement approprié [22].

Sn : puissance apparente du transformateur.

GH : puissance apparente des récepteurs produisant des harmoniques (Moteur à vitesse variable, convertisseur statique).

- Si $\text{GH}/\text{Sn} \leq 15\% \Rightarrow$ **type standard** ;
- Si $15 < \text{GH}/\text{Sn} \leq 25\% \Rightarrow$ **type H** ;
- Si $25\% < \text{GH}/\text{Sn} \leq 60\% \Rightarrow$ **type S.A.H** ;
- Si $\text{GH}/\text{Sn} > 60\% \Rightarrow$ **l'installation de filtres est nécessaire.**

Standard : il est spécifique aux générateurs dont la puissance harmonique est inférieure à 15% de la puissance du transformateur.

Type H : pour les générateurs d'harmoniques dont la puissance comprise entre 15% et 25% de la puissance du transformateur.

Type S.A.H : lorsque la puissance des générateurs est comprise entre 25% et 50% de la puissance du transformateur.

Remarque : pour ce type H il y a exigence de renforcer l'isolation dès que la tension 470V

II.9.1 Protection des batteries de condensateurs

Les condensateurs sont constitués à partir d'éléments mis en série pour tenir la tension, et mis en parallèle pour obtenir la capacité voulue. Il existe deux types de condensateurs selon qu'ils possèdent ou non des fusibles de protection internes [23].

II.9.1.1 Condensateur sans fusible de protection interne

La défaillance du condensateur est due au claquage d'un élément interne. Le défaut d'un élément provoque la mise en court-circuit d'un groupe d'éléments en parallèle, par conséquent les autres groupes d'éléments en parallèle seront soumis à une tension élevée.

Il n'y a pas de dispositif de protection à l'intérieur du condensateur, le défaut ne sera donc éliminé que par la mise hors tension de la batterie défectueuse [23]. Ce type de condensateur est utilisé :

- En batterie triangle protégée par des fusibles ou des protections à maximum de courant.
- En batterie en double étoile avec une protection contre les déséquilibres entre les neutres.

II.9.1.2 Condensateurs avec fusible de protection interne

Chaque élément est protégé par un fusible. En cas de défaut d'un élément. Celui-ci est isolé. Il s'ensuit une faible variation de la capacité, et le courant augmente légèrement. Ce type de condensateur n'est utilisé qu'en montage étoile. Le relais de déséquilibre est réglé afin que la défaillance d'éléments condensateurs provoque le déclenchement de la batterie lorsque la tension sur les autres éléments devient très importante. La protection par fusibles internes augmente la fiabilité des batteries de condensateurs car la défaillance d'un élément ne conduit pas systématiquement au déclenchement de la batterie [23].

II.10 Précautions particulières

II.10.1 Enclenchement de condensateurs

La mise sous tension d'un condensateur doit s'effectuer par un appareil de fermeture brusque, d'un pouvoir de fermeture suffisant. Ce phénomène est aggravé lors de l'enclenchement successif de condensateurs montés en batteries [24].

II.10.2 Condensateurs branchés sur une installation à vide

Il est recommandé de ne pas laisser en service sur un transformateur pratiquement à vide une batterie de condensateur d'une puissance supérieure à celle nécessaire pour compenser l'énergie réactive absorbée par le transformateur seul.

II.10.3 Condensateur aux bornes d'un moteur

Il faut s'assurer que le courant de condensateur sera toujours inférieur à 90% du courant magnétisant du moteur. [24]

II.11 Principe et intérêt de la compensation automatique

Les batteries de condensateurs sont divisées en gradins chaque gradin est commandé par un contacteur. La valeur de $\cos \varphi$ est détectée par un relais varométrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du $\cos \varphi$ 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 d'éviter les surtensions permanentes résultant d'une surcompensation lorsque le réseau est peut charger [25].

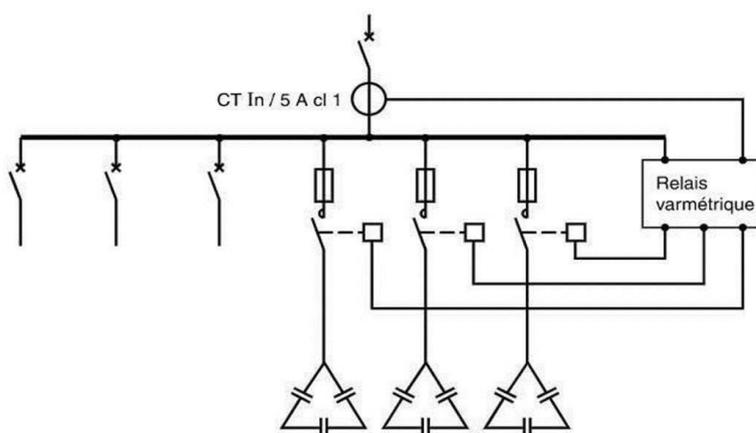


Figure II.6 - Principe de la compensation automatique d'une installation [26]

Les avantages de la compensation automatique par contacteur statique

- Réponse immédiate à toute variation du facteur de puissance (le temps de réponse est de 2 ms à 40 ms selon l'option de régulation).
- Nombre illimité d'opérations.
- Élimination des phénomènes transitoires liés à la fermeture/ouverture des contacteurs sur les condensateurs.
- Fonctionnement totalement silencieux [27].

En gérant la compensation au plus près des besoins de la charge, les risques de produire des surtensions durant les périodes de faible charge sont évités ainsi que, en empêchant l'établissement de surtension, les dégradations probables des appareils et des équipements

II.12 Choix de la localisation de la compensation

La compensation de l'énergie réactive peut être réalisée sur tout point d'une installation. Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc, dans la pratique, un optimum technico-économique [23]. Le principal problème rencontré lors de la phase de l'étude d'installation d'un compensateur de puissance réactive est le choix de son lieu d'emplacement optimal. Il convient donc d'utiliser, parmi les outils de résolution de ce problème, les méthodes statistiques, qui consistent à faire des simulations servant à la détermination des nœuds présentant les points les plus faibles du réseau. Donc on distingue trois modes de compensation :

- Compensation globale.
- Compensation partielle ou par secteur.
- Compensation individuelle.

II.12.1 Compensation globale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle est utilisée dans le cas où une installation comporte de gros appareils électrique et un nombre limité de petits récepteurs. La batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation [27]. Ce type de compensation représente l'avantage de :

- Supprimer la facture d'énergie réactive.
- Représenter la solution la plus économique car toute la puissance est concentrée en un point et le coefficient de foisonnement permet des batteries bien optimisées [28].

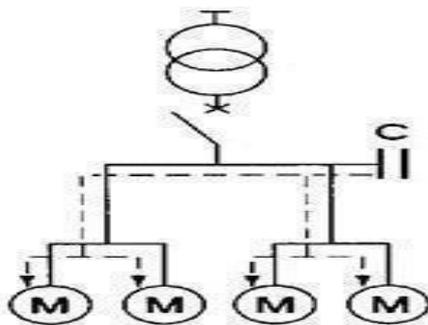


Figure II.7 - Compensation globale

II.12.2 Compensation partielle ou par secteur

Les condensateurs sont installés en tête du secteur d’installation à compenser. Cette méthode convient lorsque l’installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents. Dans le cas de la compensation partielle ou par secteur plusieurs récepteurs de régime décharge différents sont reliés à une batterie de condensateurs commune qui est manœuvrée par son propre appareillage 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 [29].

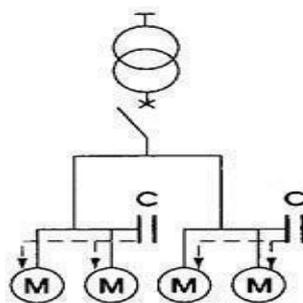


Figure II.8 - compensation partiel

II.12.3 Compensation individuelle

La compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur. La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement un moteur). Le dimensionnement en kvar de la batterie de condensateurs est de l’ordre de nominale (kW) du 25% de la puissance du moteur. Une compensation complémentaire en tête de l’installation (transformateur) peut être aussi économiquement intéressante. Cette compensation produit l’énergie réactive à l’endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins. Ce mode de compensation est généralement réservé aux ateliers comprenant plusieurs moteurs dont le fonctionnement est intermittent [29].

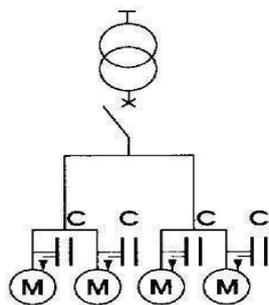


Figure II.9 - compensation individuelle

II.13 Choix du couplage d'un condensateur

Pour constituer des batteries de puissance importante, il existe plusieurs possibilités de câblage ou connexion par association de condensateurs unitaires [3]. Pour le branchement des batteries de condensateurs, on a le choix entre les montages triangle et étoile pour un même courant de ligne I.

II.13.1 Montage triangle

Dans ce cas, les tensions composées sont égales aux tensions simples ($U = V$). La puissance réactive fournie par les batteries de condensateur voici la figure (II.13):

$$Q_c = 3 \cdot C \cdot \omega \cdot U^2 \tag{II.1}$$

Avec $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (II.2)

La valeur de la capacité de chaque condensateur est :

$$C_{\Delta} = \frac{P(\tan\phi - \tan\phi')}{3 \cdot U^2 \cdot \omega} \tag{II.3}$$

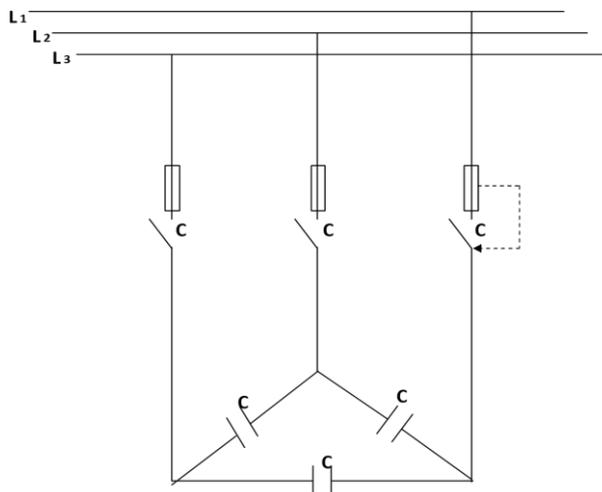


Figure II.10 - Schéma d'une batterie triangle [30]

II.13.2 Montage étoile

Dans le couplage en étoile e, les tensions composées sont 3 fois plus grandes que les tensions simples ($U = 3 V$). La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par la relation suivante voici la figure (II.14) :

$Q_c = C \cdot \omega \cdot U^2$ La valeur de la capacité de chaque condensateur est :

$$C_y = \frac{p(\tan\phi - \tan\phi')}{U^2 \cdot \omega} \tag{II.4}$$

On remarque que : $C_Y = 3 \cdot C \Delta \quad C_Y = 3 \cdot C \Delta$

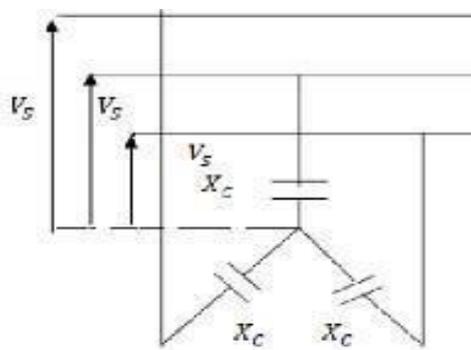


Figure II.11- Schéma d’une batterie en étoile [34]

Le choix du mode de couplage dépend :

Des caractéristiques, tension de réseau et puissance de la batterie,
 Du type de compensation, fixe ou automatique (en gradin), Du type de protection :

- Condensateur avec ou sans fusible interne,
- Différentielle (de déséquilibre) ou avec fusibles MT,
- Des impératifs économiques

II.14 Verset (Boîtiers métalliques IP65)

II.14.1 Description

Les coffrets métalliques GT sont polyvalents et adaptés pour diverses applications dans les bâtiments industriels et civils. Leur conception assure une protection IP élevée, une résistance mécanique et une fonctionnalité optimale. Ces coffrets sont particulièrement utiles dans les zones où

les équipements électriques sont exposés à des éléments nuisibles tels que l'eau, la poussière et les chocs mécaniques.



Figure II.12 - Verset Boîtiers métalliques IP65

II.14.2 Principaux avantages

- Boîtiers en tôle d'acier de haute qualité d'une épaisseur de 1,2 mm à 2 mm, résistants aux facteurs mécaniques externes - IK10.
- Les bords du boîtier spécialement profilés assurent la rigidité et une excellente protection contre l'eau.
- Joint en polyuréthane coulé sur la porte assurant une protection IP65.
- Ouverture de la porte dans le contour de l'enveloppe extérieure, ce qui permet de relier directement plusieurs boîtiers en série.
- une structure spéciale de charnières.

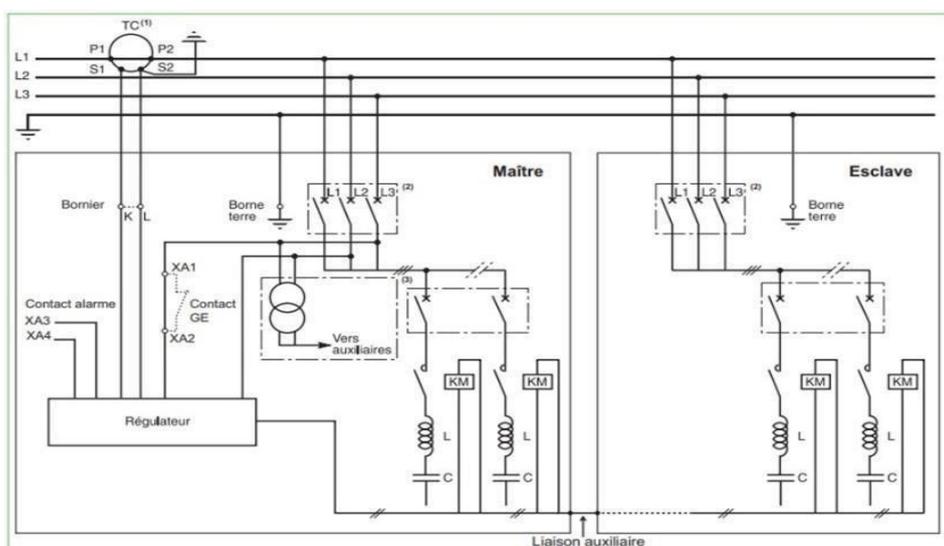


Figure II.13 - Schéma électrique d'une batterie de compensation

II.14.3 Les composantes de l'armoire

Une enveloppe métallique.

- ❖ Un disjoncteur d'arrivée (selon la puissance).
- ❖ Des gradins.
- ❖ Des disjoncteurs de gradin à partir de 125 kvar (sauf pour les batteries non polluées qui ne disposent que d'un seul disjoncteur de protection général).
- ❖ Des condensateurs.
- ❖ Un contacteur électromagnétique (pour la compensation automatique).
- ❖ Un régulateur varométrique (pour la compensation automatique).
- ❖ Des selfs (pour les réseaux pollués).
- ❖ Un transformateur auxiliaire.
- ❖ Un système de ventilation naturel ou forcée selon le calibre.

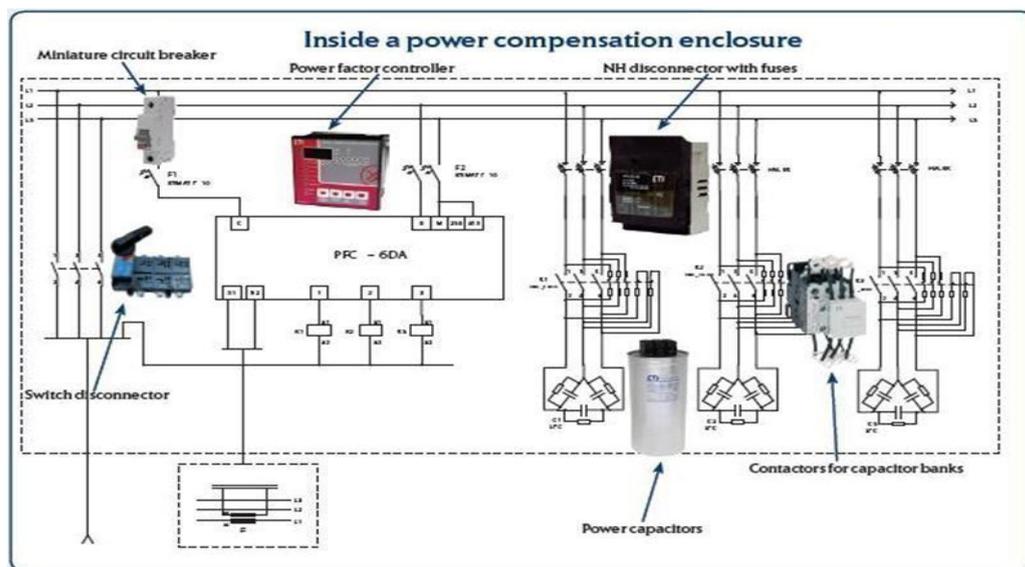


Figure II.14 - Composants d'une batterie de compensation

II.15 Type de protection**II.15.1 Protection externe**

Il est indispensable de prévoir une protection externe au condensateur. Cette protection sera réalisée par :

- ❖ Un disjoncteur qu'il a deux types par Relais thermique, réglage entre 1,3 et 1,5 In, ou par un Relais magnétique réglage entre 5 et 10 In.
- ❖ Fusibles HPC type GI calibre 1,4 à 2 In.

In : intensité nominale du condensateur.

II.15.2 Protection interne

En plus de la protection interne contenue dans le condensateur :

- Film métallique auto-cicatrisant.
- Fusible interne.
- Interrupteur de déconnexion de surpression.

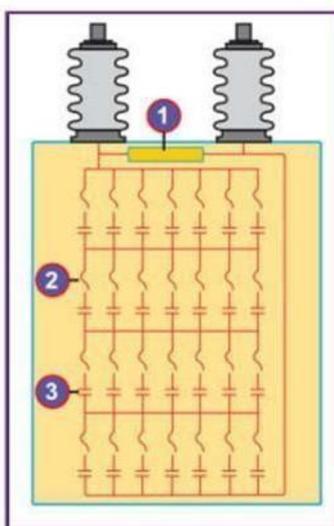


Figure II.15 - Exemple d'un condensateur à protection interne [22]

II.16 Condensateurs Varplus Can

II.16.1 Description

Les condensateurs LPC sont conçus pour avoir une durée de vie longue, une capacité élevée à résister aux harmoniques et un niveau de sécurité optimal, même dans les conditions les plus exigeantes. Ils utilisent une technologie basée sur un film de polypropylène métallisé auto-cicatrisant qui libère du gaz sous pression en cas de dysfonctionnement ou de vieillissement interne. Cette pression force le couvercle à se déformer mécaniquement et casse les conducteurs de connexion, ce qui déconnecte les trois phases du condensateur [39].

Les condensateurs secs sont remplis de résine polyuréthane non toxique et écologique, qui offre d'excellentes propriétés de dissipation de la chaleur. Les boîtiers en aluminium des condensateurs

Comprennent un système de déconnexion en cas de surpression, avec des connecteurs de type fiston pour les valeurs nominales jusqu'à 5kvar et des bornes à vis pour les valeurs supérieures à 5kvar.

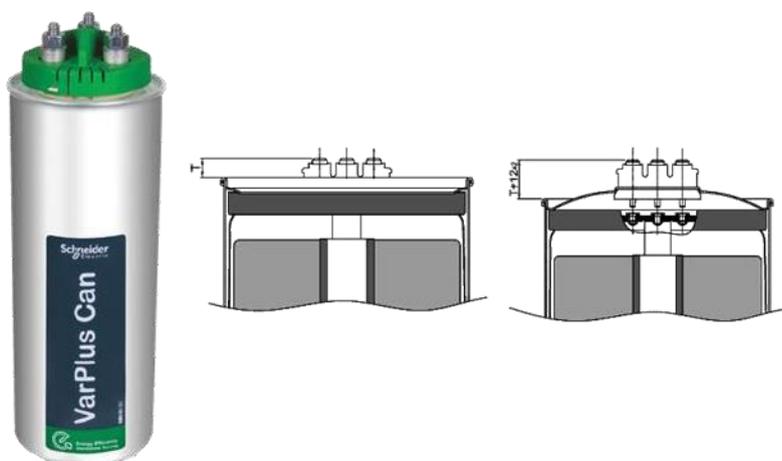


Figure II.16 - Condensateurs Varplus Can

II.16.2 Avantages

- ✓ Auto-guérison
- ✓ Système de déconnexion en cas de surpression
- ✓ Résistance de décharge

II.17 Filtres harmoniques triphasés

Les selfs anti-harmoniques sont utilisées pour protéger les condensateurs contre la pollution harmonique, surtout dans les réseaux électriques pollués. Il est possible de choisir parmi trois rangs d'accord (2,7, 3,8 et 4,2) pour les selfs anti-harmoniques. Elles ont également des sondes thermiques qui permettent de déconnecter les gradins en cas de surchauffe.

II.17.1 Caractéristiques constructives

Les filtres harmoniques triphasés sont composés de matériaux magnétiques à faible perte, de conducteurs en cuivre de classe F (1550°C) et de relais de protection thermique pour améliorer la dissipation thermique. Pour augmenter la ventilation, les enroulements sont séparés, augmentant ainsi le facteur de dissipation disponible à 7% et 14% avec des fréquences de résonance de 189 Hz et 134 Hz pour les réseaux de 50 Hz. Ces valeurs standard éliminent l'harmonique 5 (250 Hz) ainsi que les phénomènes de résonance plus élevés, évitant ainsi la résonance entre l'impédance inductive et les condensateurs triphasés de correction du facteur de puissance. En conséquence, la surcharge des condensateurs du réseau et des batteries de condensateurs est évitée [39].



Figure II.17 - Filtres harmoniques triphasés

II.18 Régulateur varmétrique Varlogic N

II.18.1 Description

Le dispositif clé pour corriger le facteur de puissance dans les systèmes à charge variable est le régulateur de facteur de puissance, utilisé dans les centrales et les groupes. Pour réduire les coûts liés à l'énergie réactive, il est primordial d'avoir le bon contrôleur de facteur de puissance et une conception appropriée du système PFC. Les contrôleurs de qualité tels que ceux de la marque ETI apportent une efficacité accrue en matière de réduction de l'énergie réactive, ainsi qu'une longue durée de vie. En outre, le régulateur Varlogic N sert à la mise en service, la surveillance et l'entretien des équipements de correction d'énergie réactive, ainsi qu'à l'analyse et à l'information sur les caractéristiques du réseau. Il permet également de piloter la puissance réactive nécessaire pour atteindre le facteur de puissance $\cos \varphi$ souhaité et de surveiller l'état de l'équipement de correction. Le modèle Varlogic NRC12 offre également une option de communication ModBus et est un contrôleur de facteur de puissance. [39]



Figure II.18 - Régulateur varmétrique Varlogic N

II.18.2 Caractéristiques

- ❖ Surveillance de U, I, P, Q, S, $\cos \varphi$, THDU, THDI, des harmoniques impairs jusqu'au 19e ordre, de la température. ❖ trois méthodes de régulation (APFR par défaut).
- ❖ Faible encombrement 97 x 97 mm pour montage sur panneau, PFC 6 RS et PFC8 RS.
- ❖ Configuration automatique ou manuelle de la connexion du circuit de mesure.
- ❖ Détection automatique ou manuelle des pas de condensateurs connectés.
- ❖ Entrée transformateur de courant universel.../1A et.../5A
- ❖ Capteur de température interne pour le contrôle du ventilateur et la déconnexion des étapes
- ❖ Prêt pour des applications avec des étapes de réacteur de décompensation.
- ❖ Mémoire pour les valeurs min et max.
- ❖ Réglage du temps de décharge et du temps de fonctionnement minimum pour chaque étape sortie du dernier échelon programmable à des fins d'alarme.
- ❖ Activation du deuxième tarif par entrée externe, PFC 12 RS.
- ❖ Alarmes programmables et sortie d'alarme indépendante sur PFC 12 RS.

II.19 Contacteurs électromagnétiques LC1-D

II.19.1 Description

Les contacteurs CEM_CN ont été spécifiquement conçus pour permettre le fonctionnement des condensateurs de correction du facteur de puissance (ils sont classés dans la catégorie d'utilisation

AC-6B). Ils sont équipés de résistances qui pré-chargent le contacteur, ce qui réduit le courant de pointe lorsque les contacteurs sont activés. Après cette pré-charge, les contacteurs principaux se ferment pour permettre le passage du courant nominal. Il convient de noter que la commande du condensateur peut entraîner une surintensité importante due à la charge des condensateurs, générant une surtension équivalente à un court-circuit de faible durée. Les contacteurs CEM_CN sont conçus pour être utilisés avec des condensateurs équipés d'un bloc de contacts de passage à fermeture et des résistances d'amortissement qui limitent le courant de déclenchement. Pour garantir la sécurité des personnes, il est impossible d'actionner manuellement ces contacteurs et ils sont dotés de capots de protection pour éviter tout contact direct.



Figure II.19 - Contacteurs électromagnétiques LC1-D

II.19.2 Principe de fonctionnement

Lorsque la batterie de condensateurs est activée, ces derniers se déchargent, ce qui entraîne une brève période où le système les considère comme un court-circuit. Cela crée un appel de courant qui ne dure en général que quelques millisecondes, mais peut atteindre jusqu'à 100 fois le courant nominal. Ce phénomène est l'une des principales causes de la courte durée de vie des condensateurs. Pour limiter l'appel de courant élevé lors de la mise sous tension des condensateurs, le contacteur CEM CN est équipé de résistances d'amortissement. De plus, les condensateurs sont équipés d'un bloc de contacts à établissement anticipé qui est activé avant les contacts principaux. Cela limite l'appel de courant. Toutefois, les résistances d'amortissement ne modifient pas la charge finale, car elles sont désactivées après 5 millisecondes.

II.19.3 Avantages

- Montage sur rail DIN et sur plaque de montage.
- Spécifications techniques conformes à la norme IEC 60947-4.
- Résistances de pré charge intégrées. Et une Grande fiabilité.

- Dimensions réduites.

II.20 Disjoncteurs Compact NSX EasyPact CVS

Les gammes Varet peuvent, être protégées à l'aide d'un disjoncteur d'arrivée.

Une commande rotative simplifie l'ouverture du disjoncteur avant d'ouvrir la porte.



Figure II.20 - Disjoncteurs Compact NSX EasyPact CVS

Remarque : Gamme Varet fonction dans une Puissance de 6 kvar à 1150 kvar.

II.21 Conclusion

Le choix de la méthode de compensation doit non seulement répondre aux exigences fixées dès le départ, mais également atteindre l'objectif de compensation, de régulation ou de maintien de la tension proche des conditions de fonctionnement idéales. Dans ce chapitre, nous avons décrit le principe de la compensation de puissance réactive par batteries de condensateurs dans les installations industrielles basse tension. Nous avons mis en évidence les différents modes de compensation tout en cite les avantages et les inconvénients de chacun. Nous avons parcouru les différentes options nécessaires pour connaître la position de la compensation de puissance réactive : globale, partielle, individuelle et combinée.

La compensation de puissance réactive est l'une des tâches principales des ingénieurs et des installateurs électriques, car c'est le premier point d'économie d'énergie à être dimensionné et planifié.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons un outil très important pour dimensionnement de l'installation en fonction de la définition du récepteur. Il s'agit d'une première étape essentielle dans une étude de conception d'un réseau électrique. Il doit identifier et localiser les valeurs de puissance active et réactive. Pouvoir sélectionner et dimensionner le transformateur principal. Nous déterminerons le facteur de puissance afin de pouvoir l'améliorer en compensant l'énergie réactive avec une batterie de condensateurs.

Par ailleurs, la première étape essentielle d'une étude de conception d'un réseau électrique est l'élaboration du schéma unifilaire.

III.2 Détermination des puissances

La puissance d'une installation n'est pas la somme arithmétique de celle des récepteurs. Sa détermination nécessite de connaître la puissance et la localisation des récepteurs pour accéder à la puissance d'utilisation et à la détermination de la puissance apparente. [3]

III.2.1 Puissance installée

C'est la somme des puissances de tous les récepteurs, c'est-à-dire la puissance nominale indiquée sur la plaque signalétique, plus l'éclairage. Elle est bien supérieure à la consommation réelle car on suppose que tous les récepteurs fonctionnent à leur puissance nominale en même temps. En pratique, la puissance nominale n'est pas toujours la puissance réellement consommée par le récepteur. [34]

$$P_{abs} = \frac{P_{récepteur}}{\eta} \quad (\text{III.1})$$

$$Q_{abs} = P_{abs} * Tg\varphi \quad (\text{III.2})$$

η : Rendement

La puissance installée (kW) est un chiffre important lors de la sélection et du dimensionnement d'un groupe électrogène ou d'une batterie et de la prise en compte des exigences de fonctionnement horaires. [35]



Figure III.1 – plaque signalétique

A travers ces plaques, nous avons noté les données suivantes :

- Couplage du moteur (triangle ou étoile)
- Courant absorbé (dépend de couplage du moteur)
- Facteur de puissance

III.2.2 Puissance utilisée

Elle correspond à la puissance réellement demandée au point source par les récepteurs d'une installation électrique. Elle est généralement plus faible que la puissance installée vu que les récepteurs n'absorbent pas tous simultanément leurs puissances nominales. Son estimation Permet d'évaluer la puissance réellement utilisée. Néanmoins sa détermination nécessite la connaissance des trois facteurs suivants : d'utilisation (K_u), de simultanéité (K_s) et d'extension(K_e). [35]

III.2.3 Facteur de simultanéité K_s :

Les récepteurs installés ne fonctionneront pas simultanément. C'est ce qui permet d'appliquer le facteur de simultanéité à différents récepteurs (ou circuits). La détermination des facteurs de simultanéité nécessite des connaissances détaillées de l'installation considérée et l'expérience avec des conditions d'exploitation, en particulier les moteurs et les prises de courant. Il n'est pas possible de donner des valeurs exactes pour tous les cas. Les normes NFC 14-100, NFC 63-410 et les directives UTEC 15-105 donnent Toutefois, ce facteur est pris en compte en fonction du nombre de récepteurs (tableau III.1) et de l'utilisation (tableau III.2). [5]

Nombre de récepteurs	Facteurs de simultanéité Ks
1	1
2 à 3	0.9
4 à 5	0.8
5 à 9	0.7
10 et plus	0.6

Tableau III.1 : Facteur de simultanéité selon le nombre de récepteurs

Utilisation	Facteurs d'utilisation
Eclairage, conditionnement d'air	1
Chauffage électrique, chauffe d'eau	1
Prise de courant (n : nombre de prise de courant alimenté par le même circuit)	$0,1 + (0,9/n)$Si n ≤ 6 0,6..... Si n > 6
Moteur électrique : plus puissants	1
Moyens puissant	0.75
Pour les autres	0.6
Appareil de cuisson	0.7

Tableau III.2 : Facteur de simultanéité selon l'utilisation

III.2.4 Facteur d'utilisation Ku

La puissance utilisée est inférieure à la puissance nominale installée, (plaque signalétique) d'où la notion du facteur d'utilisation affectée à chaque récepteur.

Le facteur d'utilisation s'applique individuellement à chaque récepteur. Ceci se vérifie pour des équipements comportant des moteurs susceptibles de fonctionner en dessous de leur pleine charge.

Dans une installation industrielle, ce facteur peut être estimé en moyenne à 0,75 pour les moteurs. Pour l'éclairage et le chauffage, il sera toujours égal à 1. [34]

Type du récepteur	Ku
Chauffage ou éclairage	1
Prises de courant (hors indication particulière)	1
Moteurs électriques	0.75

Tableau III.3.1 facteur d'utilisation par récepteur NF EN 12193 [34]

III.2.5 Facteur d'extension K_e

Appelé aussi facteur de réserve, Ce coefficient représente les extensions futures qui pourront être installées ultérieurement sans modification de l'installation. Son rôle de prévoir l'augmentation de la puissance absorbée. Généralement sa valeur varie de 1 à 1.5 [5]

III.3 Méthode de calcul de la puissance d'utilisation des récepteurs

On doit d'abord calculer la puissance active absorbé selon le facteur d'utilisation de chaque élément, ensuite calculer la puissance réactive et apparente de l'élément concerné. L'estimation de la puissance réellement absorbée par une charge électrique tient compte du taux de charge de récepteur par rapport à sa charge nominale ainsi, la détermination de cette puissance nécessite une bonne connaissance du facteur d'utilisation. [34] On a :

$$Pa = \frac{Pu}{\eta} * Ku \quad (\text{III.3})$$

$$Qa = Pa * Tg\varphi \quad (\text{III.4})$$

$$Sa = \sqrt{Pa^2 + Qa^2} = \sqrt{3} * U * I \quad (\text{III.5})$$

Pa : puissance absorbée par récepteur

Pu : puissance utile de récepteur

η : le rendement

Ku : facteur d'utilisation

Qa : puissance réactive du récepteur

Sa : puissance apparente du récepteur

III.4 Bilan de puissance de TGBT N01

III.4.1 Méthode de calcul de bilan de puissance des tableaux secondaires

Le schéma unifilaire de notre installation (voir dans les annexe)

Cette puissance est déterminée en établissement la somme de toutes les puissances actives du groupe de récepteur alimenté par la même branche, multipliées par le facteur de simultanéité correspondant. Elle est donnée par la relation suivante :

$$Ptot = Ks * \sum Pa \quad (\text{III.6})$$

$$Qtot = Ks * \sum Qa \quad (\text{III.7})$$

$$Stot = \sqrt{Ptot^2 + Qtot^2} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

P_{tot} : puissance active totale en tenant compte de facteur de simultanéité de la TGBT.

Q_{tot} : puissance réactive totale en tenant compte de facteur de simultanéité de la TGBT.

S_{tot} : puissance apparente totale en tenant compte de facteur de simultanéité de la TGBT.

Equipements	U(V)	Cos φ	P _n (kW)	η	Tg φ	K _u	Pa(kW)	Qa(kVA R)	Sa(kV A)
Alimente la ligne aseptique	400	0.81	350	0.82	0.72	0.75	320.12	230.49	394.46
Alim bouchon	400	0.8	1.5	0.85	0.75	0.75	1.32	0.99	1.65
Mixeur	400	0.86	105	0.85	0.59	0.75	92.65	54.66	107.57
Convoyeur	400	0.82	55	0.85	0.70	0.75	48.53	33.97	59.24
Etiqueteuse	400	0.81	27	0.85	0.72	0.75	23.82	17.15	29.35
Dateuse	400	0.86	2.11	0.85	0.59	0.75	1.86	1.10	2.16
Fardeleuse	400	0.88	149	0.85	0.54	0.75	131.47	70.99	149.41
Peseuse de poignée	400	0.84	4.7	0.85	0.65	0.75	4.15	2.70	4.95
Palettiseur	400	0.82	45	0.85	0.7	0.75	39.71	27.80	48.47
Housseuse	400	0.81	46	0.85	0.72	0.75	40.59	29.22	50.01
Decaissuse	400	0.82	15	0.85	0.7	0.75	13.24	9.27	16.16
Laveuse de caisse	400	0.85	10	0.85	0.62	0.75	8.82	5.47	10.38
Laveuse de bouteille	400	0.85	100	0.85	0.62	0.75	88.24	54.71	108.82
Convoyeur	400	0.81	40	0.85	0.72	0.75	35.29	25.41	43.49
Remplisseuse	400	0.82	45	0.85	0.7	0.75	39.71	27.30	48.19
Tunnel de pasteurisation	400	0.84	40	0.85	0.65	0.75	35.29	22.94	42.09
Dateuse	400	0.81	5	0.85	0.72	0.75	4.41	3.18	5.44
Etiqueteuse	400	0.86	15	0.85	0.59	0.75	13.24	7.81	15.37
Encaisseuse	400	0.82	15	0.85	0.7	0.75	13.24	9.27	16.16
2 Compresseur 40 bars	400	0.85	630	0.9	0.62	0.75	525	325.5	617.72
Compresseur 40 bar N 3	400	0.81	375	0.9	0.72	0.75	312.5	225	385.07
Chaufferie00	400	0.79	50	0.8	0.78	0.75	46.88	36.57	59.46
Station filtrage eau 00	400	0.8	100	0.8	0.75	0.75	93.75	70.31	117.19

Atelier maintenance	400	0.86	30	0.8	0.59	0.75	28.13	16.60	32.66
Station osmose	400	0.82	110	0.87	0.7	0.75	94.83	66.38	115.75
Combi PET 1	400	0.84	589	0.78	0.65	0.75	566.35	368.13	675.48
Coffret pompe source liquide	400	0.82	60	0.8	0.7	0.75	56.25	39.38	68.66
4 STATION POMPE EAU GLACE	400	0.81	180	0.8	0.72	0.75	168.75	121.5	207.94
Compresseur 7 bar N 01	400	0.8	45	0.75	0.75	0.75	45	33.75	56.25
LIGNE ECRASOIR PASSOIRE	400	0.85	148	0.82	0.62	0.75	135.37	83.93	159.28
Contrôleur de niveau	400	0.84	0.5	0.85	0.65	0.75	0.44	0.29	0.53
Total		0.83	3387.81				3028.95	2021.77	3641.72

Tableau III.4 : Calcul de puissance d'utilisation des récepteurs (TGBT1)

Equipements	U(V)	In(A)	cosφ	Tg φ	Pn(KW)	Qn(KVAR)	Sn(KVA)
Combi PET 3	400	1012.08	0.84	0.65	589	380.46	701.19
Dépalettiseur	400	79.21	0.82	0.7	45	31.41	54.88
dé bouchonneuse	400	17.82	0.81	0.72	10	7.24	12.35
Décasseuse	400	17.60	0.82	0.7	10	6.98	12.20
Laveuse de bouteille	400	169.81	0.85	0.62	100	61.97	117.65
Contrôle de bouteille	400	0.89	0.81	0.72	0.5	0.36	0.62
Laveuse de caisse	400	16.98	0.85	0.62	10	6.20	11.76
Mixeur	400	179.58	0.86	0.59	107	63.49	124.42
Remplisseuse	400	176.02	0.82	0.7	100	69.80	121.95
Contrôle se remplissage	400	0.89	0.81	0.72	0.5	0.36	0.62
Tunnel de pasteurisation	400	77.32	0.84	0.65	45	29.07	53.57

Etiqueteuse	400	45.32	0.86	0.59	27	16.02	31.40
Dateuse	400	8.39	0.86	0.59	5	2.97	5.81
Encaisseuse	400	17.60	0.82	0.7	10	6.98	12.20
Palettiseur	400	79.21	0.82	0.7	45	31.41	54.88
Banderoleuse	400	71.28	0.81	0.72	40	28.96	49.38
Convoyeur	400	96.81	0.82	0.7	55	38.39	67.07
Station CIP	400	33.57	0.86	0.59	20	11.87	23.26
Ligne de remplissage aseptique	400	255.23	0.82	0.7	145	101.21	176.83
Ligne de fruit N 01	400	167.83	0.86	0.59	100	59.34	116.28
Stérilisateur ligne de fruit	400	109.09	0.86	0.59	65	38.57	75.58
2 Concentreur	400	1211.72	0.81	0.72	680	492.31	839.51
Cuiseur de confiture	400	119.69	0.82	0.7	68	47.46	82.93
4 Schiller eaux glace	400	1283	0.81	0.72	720	521.27	888.89
Eclairage externe	400	28.87	1	0	20	0	20
Adm	400	144.37	1	0	100	0	100
Pc hall de production et adml	400	46.19	1	0	32	0	32
ADM Extérieur	400	34.64	1	0	24	0	24
Eclairage pc hall bâtiment verre	400	46.19	1	0	32	0	32
Eclairage produit chimique,	400	40.41	1	0	28	0	28
Coffret Quai porte sectionnelle Siroprie	400	35.64	0.81	0.72	20	14.48	24.69
Poste de garde	400	17.32	1	0	12	0	12
Eclairage salle électrique existante	400	7.22	1	0	5	0	5
Climatisation salle électrique existante	400	21.65	1	0	15	0	15
Eclairage salle électrique	400	7.22	1	0	5	0	5
2 Réseau pc	400	57.74	1	0	40	0	40
Négative	400	178.19	0.81	0.72	100	72.40	123.46

Eclairage hall de production	400	64.95	1	0	45	0	45
Coffret porte sectionnelle bâtiment	400	10.69	0.81	0.72	6	4.34	7.41
Eclairage pc bâtiment fruit	400	23.09	1	0	16	0	16
TOTAL			0.84		3317	2145.32	3950.30

Tableau III.5 : Recueil de données et calculs de puissance installé de TGBT2

Equipements	U(V)	In(A)	Cosφ	Tgφ	Pn(kW)	Qn(KVAR)	Sn(KVA)
Climatisation salle ELG ADM TGBT 3	400	21.65	1	0	15	0	15
Pont roulant	400	45.11	0.8	0.75	25	18.75	31.25
compresseur 7 bar	400	398.65	0.84	0.65	232	149.86	276.19
Compresseur 40 bar	400	713.10	0.84	0.65	415	268.06	494.05
Groupes pompes	400	108.25	0.8	0.75	60	45	75
Extracteur compresseur	400	10.56	0.82	0.7	6	4.19	7.32
Chambre froide	400	21.38	0.81	0.72	12	8.69	14.81
E1	400	44.68	0.84	0.65	26	16.79	30.95
E2	400	159.80	0.84	0.65	93	60.07	110.71
E3	400	134.03	0.84	0.65	78	50.38	92.86
E6	400	44.68	0.84	0.65	26	16.79	30.95
CO2	400	231.97	0.81	0.72	135	97.74	166.67
Siroperie	400	201.4	0.86	0.59	120	71.20	139.53
2 Alim bouchon	400	5.41	0.8	0.75	3	2.25	3.75
2 Contrôleur de niveau	400	1.72	0.84	0.65	1	0.65	1.19
2 Mixeur	400	352.45	0.86	0.59	210	124.61	244.19
Carbonation	400	81.79	0.81	0.72	46	33.30	56.79
2 Convoyeur	400	193.62	0.82	0.7	110	76.78	134.15
2 Etiqueteuse	400	96.23	0.81	0.72	54	39.10	66.67
2 Dateuse	400	7.08	0.86	0.59	4.22	2.50	4.91

Sécheur	400	64.15	0.81	0.72	36	26.06	44.44
Sleeveuse	400	88	0.82	0.7	50	34.9	60.98
2 Fardeleuse	400	488.78	0.88	0.54	298	160.84	338.64
2 Poseuse de poignée	400	16.55	0.82	0.7	9.4	6.56	11.46
2 Palettiseur	400	158.42	0.82	0.7	90	62.82	109.76
2 Heuseuse	400	163.94	0.81	0.72	92	66.91	113.58
COMBI N02	400	1036.77	0.82	0.7	589	411.12	718.29
COMBI N01	400	1049.57	0.81	0.72	589	426.43	727.16
TOTAL			0.83		3697.62	2455.69	4438.78

Tableau III.6 : Recueil de données et calculs de puissance installée de TGBT3

III.4.2 Méthode de calcul de bilan de puissance de la TGBT

Pour le calcul des puissances de la TGBT on doit multiplier la puissance totale obtenue au niveau des tableaux de précédents fois la valeur de facteur d'extension K_e qui correspond à notre tableau général, elle correspond aussi au calcul de puissance à prévoir au poste de transformation et ce, en prenant en compte l'évolution de la charge.

$$P_t = K_e * K_s * P_{tot} \quad (\text{III.9})$$

$$Q_t = K_e * K_s * Q_{tot} \quad (\text{III.10})$$

$$S_t = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2} \quad (\text{III.11})$$

K_e : le facteur d'extension

Coefficient d'extension	K_e	1.2
La puissance d'utilisation consommée par l'installation (KW)	K_e	1.2
La puissance réactive de l'installation (KVAR)	P_t	6158.59
La puissance apparente de l'installation (KVA)	Q_t	3973.13
Courant d'emploi de l'installation (KA)	S_t	7328.98
Facteur de puissance de l'installation	I_e	10.59

Tableau III.7 : Caractéristique de l'installation

III.5 Dimensionnement de batterie de condensateur à installer

Pour réaliser cette partie, nous allons dimensionner les batteries de condensateurs qui fourniront l'énergie réactive nécessaire pour effectuer la compensation de puissance réactive et l'amélioration du facteur de puissance. Par conséquent, ces batteries de compensation sont réalisées dans le poste de transformation elle reste en service en permanence.

Pour améliorer le facteur de puissance de l'installation au niveau de TGBT principal a 0.97

($Tg\varphi = 0.25$), on suit les étapes suivantes :

III.5.1 Choix de la localisation de la compensation :

On voit que la consommation de l'énergie réactive presque similaire des trois TGBT, nous a ramené à choisir un mode de compensation par secteurs qu'on trouve meilleur sur le plan d'investissement à long terme.

Equipements	Pa	Ks	Ptot(kW)	Qtot(kV AR)	Stot(kVA)	Cos φ	Tg φ (kW)
TGBT N01	3028.95	0.6	1817.37	1213.06	2185.03	0.83	0.67
TGBT N02	3063.18	0.6	1837.91	1102.02	2142.98	0.86	0.62
TGBT N03	3411.86	0.6	2047.12	1363.74	2459.77	0.83	0.67
Total			5702.4	3678.82	6805.28	0.84	0.65
TGBT TOTAL	Ke=1.2	0.9	6158.59	3973.13	7328.98	0.84	0.65

Tableau III.8 : Calcul le bilan de puissance des tableaux secondaire

III.5.2 Calcul de la puissance réactive des condensateurs à installer Qc

La puissance réactive Qc des condensateurs est calculée en exploitant la relation suivant :

$$Q_c = P \cdot (Tg\varphi - Tg\varphi') \quad (III.12)$$

La capacité de chaque condensateur :

$$C = \frac{Q_c}{3 \cdot \omega \cdot U^2} \quad (\text{III.13})$$

Exemple de calcul de batterie de compensation pour le TGBT 1

Pour calculer la puissance réactive compenser Q_c , on utilise les formules citées précédemment.

Au niveau de TGBT 1 on a :

$$\cos \varphi = 0.83$$

$$\text{Tg} = 0.67$$

$$\text{On a } Q = 1213.06 \text{ KVAR}$$

$$P = 1817.37 \text{ KW}$$

$$\cos \varphi' = 0.97, \text{ ainsi } \text{Tg} \varphi' = 0.25$$

$$Q_c = P \cdot (\text{Tg} \varphi - \text{Tg} \varphi') = 1817.37 \cdot (0.67 - 0.25)$$

$$Q_c = 763.30 \text{ KVAR}$$

La nouvelle puissance sera égale à la somme vectorielle de la puissance installée et de la puissance du condensateur à installer, mais en valeur algébrique c'est une soustraction.

$$Q' = Q - Q_c \quad (\text{III.14})$$

$$Q' = 1213.06 - 763.30 = 449.76 \text{ KVAR}$$

III.6 Détermination du type de montage des batteries des condensateurs

Le choix de mode de couplage dépend de la capacité de condensateur à installer pour la compensation dans les montages triangle et étoile :

III.6.1 Montage triangle :

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par l'expression suivante :

$$C = 3 \cdot C\Delta \cdot \omega \cdot U^2 \quad (\text{III.15})$$

$$C\Delta = \frac{Q_c}{3 \cdot \omega \cdot U^2} \quad (\text{III.16})$$

$C\Delta$: la valeur de la capacité de condensateur en montage triangle.

III.6.2 Montage étoile :

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est la suivante :

$$Q_c = C_y * \omega * U^2 \quad (\text{III.17})$$

$$C_y = \frac{Q_c}{U^2 * \omega} \quad (\text{III.18})$$

C_y : la valeur de la capacité de condensateur en montage étoile. **Application numérique**

$$C_{\Delta} = \frac{763.30 * 10^3}{3 * 314 * 400^2} = 5.06 \text{ mF}$$

$$C_y = \frac{763.30 * 10^3}{400^2 * 314} = 15.19 \text{ mF}$$

On voit que la valeur de la capacité en montage triangle est trois fois moins élevée que celle de montage étoile

$$C_y = 3 * C_{\Delta} \quad (\text{III.19})$$

Même application pour le TGBT 2 et TGBT 3

Remarque

Il est préférable de choisir le montage triangle des condensateurs car il est avantageux cotés économique et encombrement. Le couplage triangle revient moins cher car les condensateurs seront de capacité plus faible.

Les puissances réactives avant et après la compensation et les valeurs des capacités des condensateurs pour les TGBT sont données dans le tableau.

Charges	Avant Compensation				Après compensation				
	Ptot(kW)	Qtot(kV AR)	Stot(kV A)	Cos φ	Qc(kV AR)	Q'(kV AR)	Cos φ	CΔ	Cy
TGBT1	1817.37	1213.06	2185.03	0.83	763.30	449.76	0.97	5.06	15.19
TGBT2	1837.91	1102.02	2142.98	0.86	624.89	477.13	0.97	4.15	12.44
TGBT3	2047.12	1363.74	2459.77	0.83	859.79	503.95	0.97	5.70	17.11

Tableau III.9 : Les puissances réactives fournies par les batteries de compensation

III.7 Identification du type de compensation

L'identification du type de compensation est définie par la relation $\frac{Q_c}{S_n}$ et le résultat est donné en pourcentage.

On prend par exemple **TGBT N1**

On a $S_n = 2185.03 \text{ KVA}$ $Q_c = 763.30 \text{ KVAR}$

On a $\frac{Q_c}{S_n} = 34.93\%$

Donc le type idéal de compensation à choisir dans ce cas est la compensation automatique

Qc (KVAR)	Sn (KVA)	Qc/Sn (%)	Type compensation
763.30	2185.03	34.93	Automatique
624.89	2142.98	29.16	Automatique
859.79	2459.77	24.98	Automatique

Tableau III.10 : type de compensation de l'énergie réactive

D'après nos résultats la compensation de ces installations s'effectue avec une compensation automatique.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous développons le bilan de puissance, qui nous permet connaître le niveau de consommation électrique. Nous avons déterminé la puissance utile ainsi que la puissance totale de différents récepteurs pour en déduire le facteur de puissance.

A cet effet, deux méthodes de coefficients sont établies : les coefficients d'utilisation et les coefficients de simultanéité.

D'après les résultats calculés, on constate que l'appareil électrique a un facteur de puissance moyen qui peut être amélioré. Pour cela, nous utilisons la compensation des batteries de condensateurs. Il nous permet de limiter l'impact économique en réduisant les factures énergétiques et d'optimiser l'utilisation des réseaux industriels.

VI.1 Introduction

La batterie de compensation est une armoire constituée de plusieurs bancs de condensateurs triphasés, qui sont en fonction du facteur de puissance, automatiquement ajoutés ou soustraits du réseau électrique grâce à des contacteurs. Celle-ci vous apporte différents avantages tels que :

- La diminution des coûts de votre abonnement.
- La suppression des pénalités.
- La réduction des pertes joules de l'installation.
- La suppression du surdimensionnement des installations électriques.
- Une augmentation de la puissance disponible dans l'installation.
- Une diminution des chutes de tension et des pertes en lignes.

VI.2 La simulation de la compensation de la puissance réactive

La simulation de la compensation de l'énergie réactive peut être réalisée à l'aide de logiciels de simulation de circuit électrique tels que MATLAB/Simulink ou PSCAD. Dans ces logiciels, on peut modéliser un système électrique en utilisant des composants électroniques tels que des résistances, des inductances et des capacités. [38]

La simulation des batteries pour la compensation de l'énergie réactive est une méthode permettant d'évaluer l'efficacité d'un système de batteries pour la compensation de l'énergie réactive. Cette technique de simulation permet de modéliser et de simuler le comportement de la batterie réactive en réponse à différents scénarios de charge et de décharge. La simulation est réalisée à l'aide d'un

Logiciel de simulation tel que MATLAB/Simulink. Grâce à la simulation, il est possible de comparer les performances de l'installation à l'aide des batteries de compensation et dans les conditions normales. Afin d'obtenir les meilleures performances, elle peut également être utilisée pour optimiser les réglages du système de batterie. En conclusion, la modélisation des systèmes de batteries à énergie réactive est une technique qui permet d'évaluer et de concevoir des systèmes de batteries à énergie réactive afin d'améliorer la qualité de l'approvisionnement électrique. La modélisation permet de comprendre comment fonctionne le processus de compensation de l'énergie réactive dans un système électrique. [39]

VI.3 Simulation de la TGBT

VI.3.1 Paramètre de système

- ✓ Source triphasé : 30kv, 50 Hz
- ✓ Transformateur : 30Kv/0.4Kv, 2.1 MVA
- ✓ La charge 1845 KW, 1232KVAR
- ✓ La longe de la ligne : 10m, voici la figure suivante.

VI.3.2 Description

Nous utilisons un système de source triphasé et un transformateur triphasé pour alimenter notre installation d'usine. Pour mesurer l'efficacité de notre système, nous calculons la puissance active et la puissance réactive, puis nous trouvons le facteur de correction de puissance en prenant le carré de la puissance active et de la puissance réactive, en additionnant les deux produits et en prenant la racine carrée. Nous calculons également le facteur de puissance en divisant la puissance active par la puissance apparente. Notre charge est connectée en étoile. Une illustration de l'installation de l'usine avant la compensation est disponible ci-dessous.

VI.3.3 Simulation avec une charge fixe

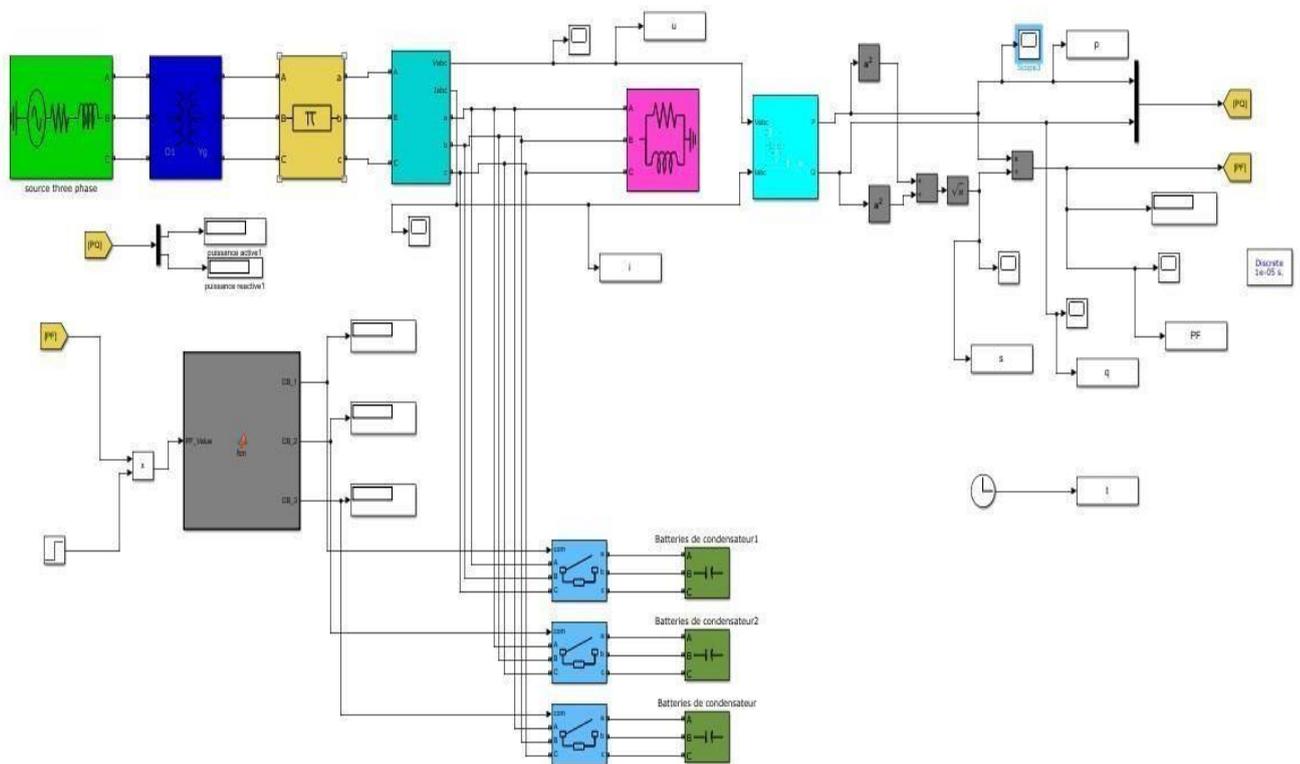


Figure VI.1 – Schéma de simulation d'une installation de charge fixe.

VI.3.3.1 Facteur de puissance

La figure IV.11 présente une courbe de facteur de puissance avant la compensation que le facteur de puissance est constant suivant la consommation à 0.83, par contre après la compensation il croit direct vers la Valeur crête 1 car on n'a appliqué une compensation totale $Q=0$, après il va obtenir une valeur constante vers notre consigne 0.97

Ceci est Notre objectif est d'optimiser le facteur de puissance pour qu'il atteigne des valeurs supérieures à 0,97, dans notre cas nous avons un facteur de puissance de l'ordre de 0,97.

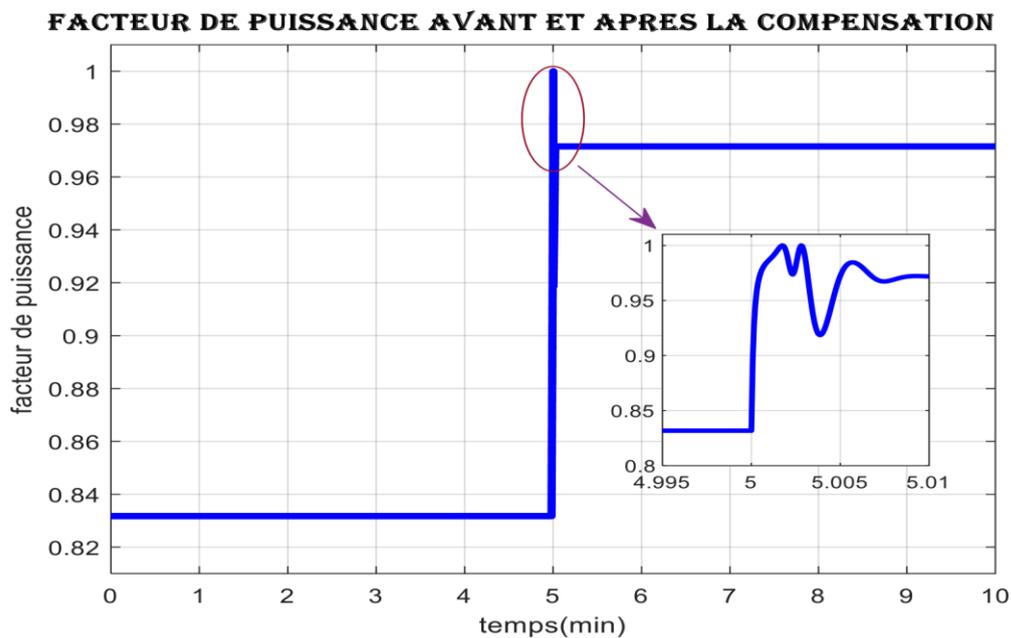


Figure VI.2 - Facteur de puissance avant et après la compensation

Le facteur de puissance mesure l'efficacité de l'utilisation de l'énergie électrique. Avant la compensation le facteur de puissance est bas (0.83), cela signifie qu'il y a une quantité importante d'énergie réactive qui est consommée par le système, cela qui entraîne une augmentation des coûts d'électricité. Après la compensation, le facteur de puissance est amélioré (0.97), ce qui signifie que l'énergie électrique utilise plus efficacement, réduisant ainsi les coûts d'électricité et augmentant la capacité de production de l'installation électrique.

VI.3.3.2 Puissance active

La courbe illustrée par la Figure (VI.12) représente l'évolution de la consommation de la puissance active avant et après la compensation, pour la période allant de 0 à 5 minutes on n'a remarqué une consommation moyenne de la puissance active et 1.6 KW, ensuite On n'a appliqué

une compensation à partir de 5 minutes on n'a enregistré une variation brusque de puissance avec des perturbations après elle s'augmente un peu plus et se stabilise vers une valeur de 1.7 KW.

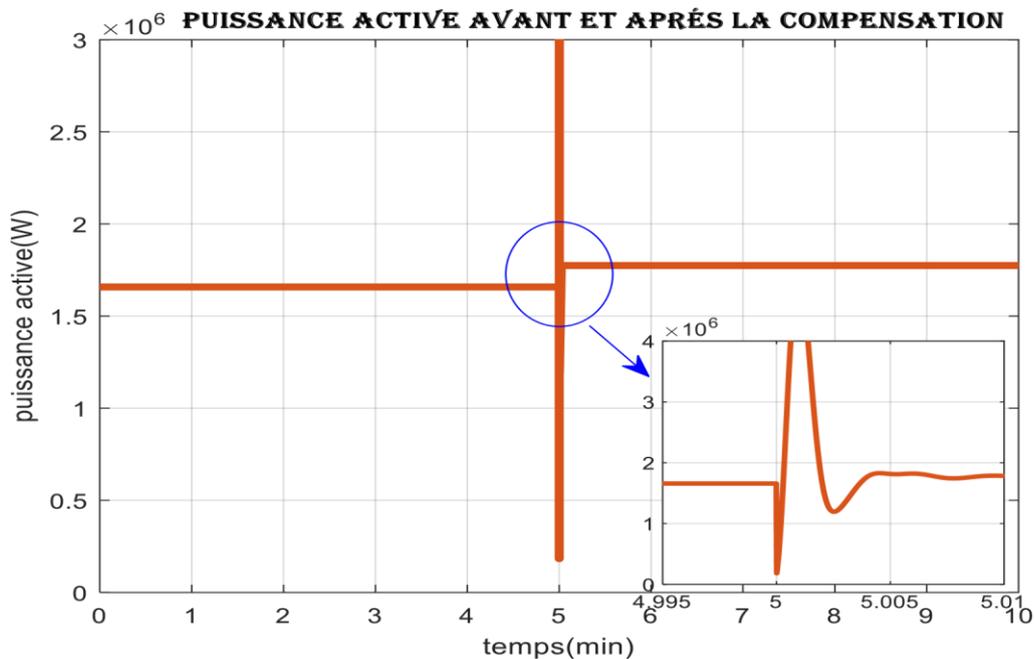


Figure VI.3 - Puissance active avant et après la compensation

L'énergie active, également appelée énergie réelle ou énergie utile, Avant la compensation d'énergie réactive, l'énergie active et l'énergie réactive sont mesurées individuellement car elles sont consommées et produites séparément par le système électrique. Cela signifie que la facturation de l'énergie électrique est basée sur la somme de la consommation d'énergie active et de l'énergie réactive. Après la compensation d'énergie réactive, la quantité d'énergie active réelle consommée est augmentée tandis que la quantité d'énergie réactive ou non utile est réduite. Ainsi, il y a une réduction de la consommation d'énergie, une économie de coûts et une amélioration des performances du système électrique.

VI.3.3.3 Puissance réactive

La courbe illustrée par la Figure (VI.4) montre la puissance réactive qui varie selon le besoin instantané de l'équipement de l'usine à l'exception de la consommation pendant le pic de la journée qui est à 1.2 KVAR, on note une similarité entre l'évolution de la puissance active et réactive. La courbe illustrée par la figure 3 montre une grande diminution au niveau de la consommation de

L'énergie réactive d'une part, et d'autre part on constate qu'elle est presque une valeur moyenne est constante.

Le condensateur a alors compensé 82.81 % de la puissance réactive consommée puisque la moyenne était de 405.5 kVAR avant la correction de facteur de puissance et est devenue 69.71 kVAR après la correction.

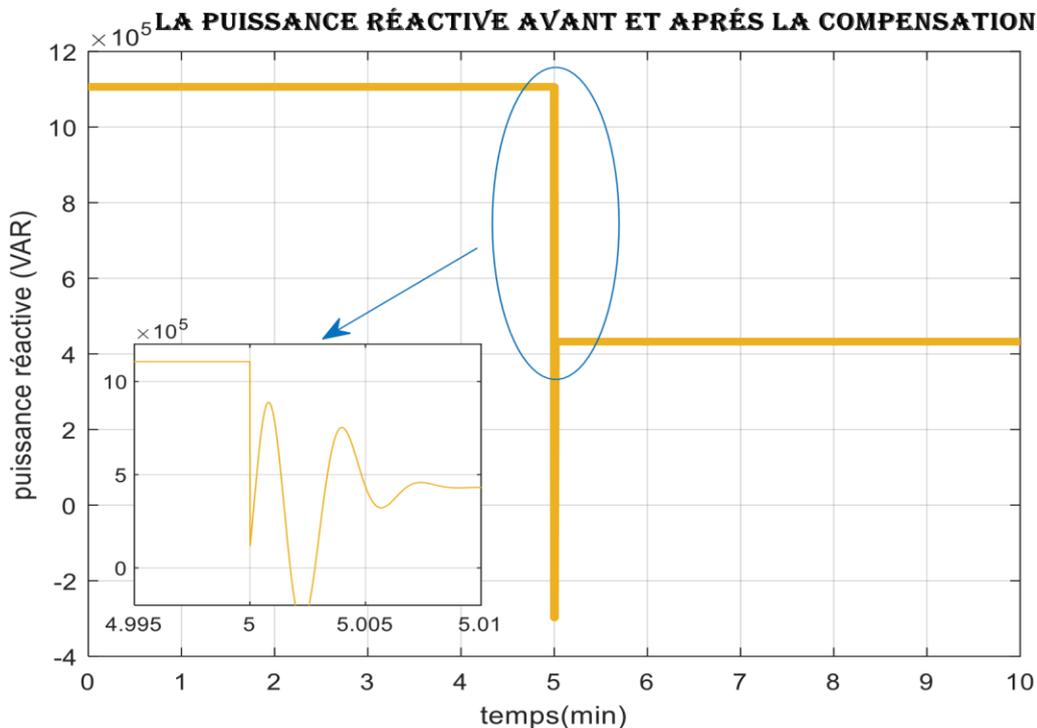


Figure VI.4 - Puissance réactive avant et après la compensation

Lorsque l'énergie réactive n'est pas correctement gérée, cela peut entraîner des perturbations dans le réseau électrique, telles que des chutes de tension et une surchauffe des équipements. La compensation d'énergie réactive consiste à fournir la quantité requise d'énergie réactive pour maintenir le réseau électrique stable et efficace.

Avant la compensation d'énergie réactive, le réseau électrique peut avoir des perturbations en raison d'un excès ou d'un déficit d'énergie réactive. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires pour les compagnies d'électricité et des temps d'arrêt pour les équipements électriques.

Après la compensation d'énergie réactive, le réseau électrique devient plus stable et efficace, car il reçoit la quantité d'énergie réactive requise. Cela se traduit souvent par une amélioration de la qualité de l'énergie électrique, une réduction des coûts pour les compagnies d'électricité et une prolongation de la durée de vie des équipements électriques.

VI.3.3.4 Courant

La figure ci-dessus présente le courant avant et après la compensation. On remarque une variation de courant avant et après la compensation, on n'a enregistré un courant de forme sinusoïdale et alternatif de valeur presque de 4250 A, après il diminue à environs 3800 A grâce à la compensation

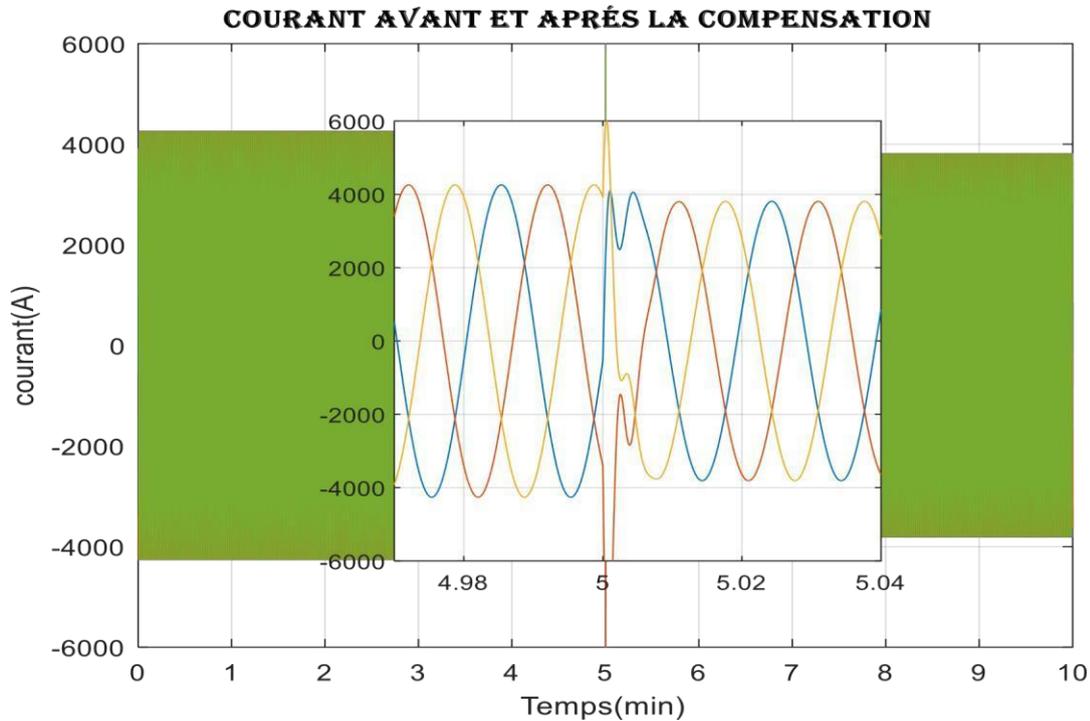


Figure VI.5 - Courant avant et après la compensation

Avant la compensation d'énergie réactive, le courant dans un circuit peut être plus important qu'il ne devrait l'être, car une partie de l'énergie est consommée pour créer un champ magnétique dans le circuit, plutôt que pour effectuer un travail utile. Cela peut entraîner une dégradation des performances du système, une surchauffe des équipements et une augmentation des coûts d'exploitation.

Après la compensation d'énergie réactive, le courant dans le circuit devrait diminuer, car l'énergie réactive est produite localement pour annuler le champ magnétique et améliorer l'efficacité du système. Cela peut entraîner une réduction de la consommation d'énergie, une amélioration des performances du système et une réduction des coûts d'exploitation

VI.3.3.5 Tension

La figure suivante présente la tension avant et après la compensation. On constate une stabilité de tension avant et après la compensation environs 320 V, on n'a remarqué quelques perturbations mais pas grave

La courbe illustrée par la Figure 5 montre qu'il y a des tensions pratiquement sinusoïdales équilibré parce que la tension au niveau de neutre est très faible Figure 5 ce que confirme que les tensions de la phase sont presque équilibrées.

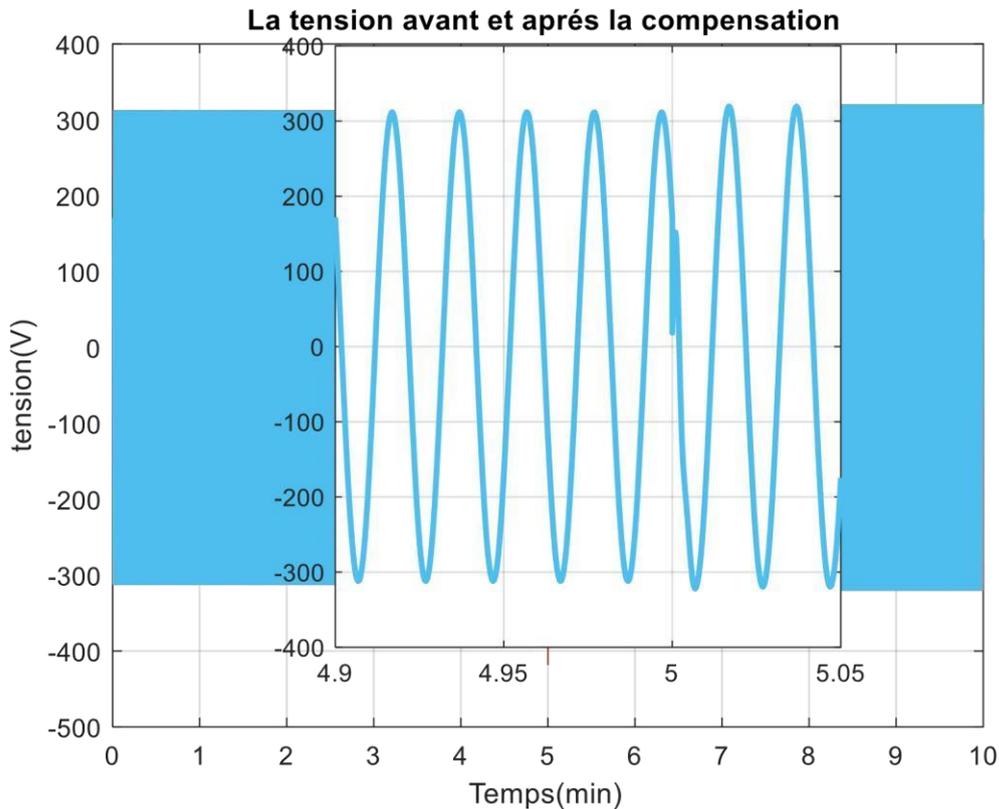


Figure VI.6 : Tension avant et après la compensation

Avant la compensation d'énergie réactive une tension plus faible peut être observée si le système électrique est soumis à une charge inductive importante, telle que des moteurs. Dans ce cas, la tension peut chuter en raison de la consommation élevée d'énergie réactive par ces charges inductives.

Après la compensation d'énergie réactive, la tension peut être améliorée en raison de la libération de l'énergie réactive emmagasinée par les condensateurs ou autres dispositifs de compensation. Cela peut aider à maintenir une tension stable dans le système électrique et à réduire les pertes d'énergie.

VI.3.4 Simulation avec une charge variable

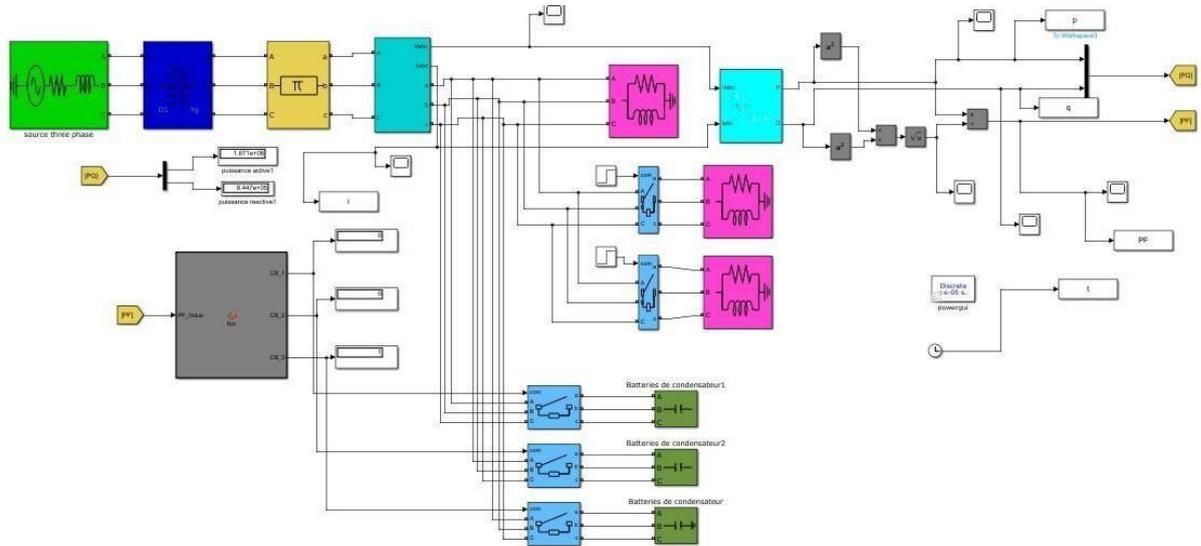


Figure VI.7 – Schéma de simulation d’une charge variable

VI.3.4.1 Facteur de puissance

La courbe illustrée par la Figure 6 présente la valeur max de $\cos \varphi$ avant la compensation qu’une valeur max de $\cos \varphi$ après il diminue avec l’augmentation de la charge avec quelque perturbation ensuite il va se stabilise vers une valeur de 0.88, cela entraine une surcharge de système et une augmentation des pertes d’énergies. Par contre dans l’autre cotée en compensant on voit une amélioration de $\cos \varphi$ vers notre consigne 0.97 avec quelques perturbations, En raison de la réduction de la charge réactive. Cela permet de réduire la surcharge et les pertes d’énergies, ce qui améliore l’efficacité du système électrique.

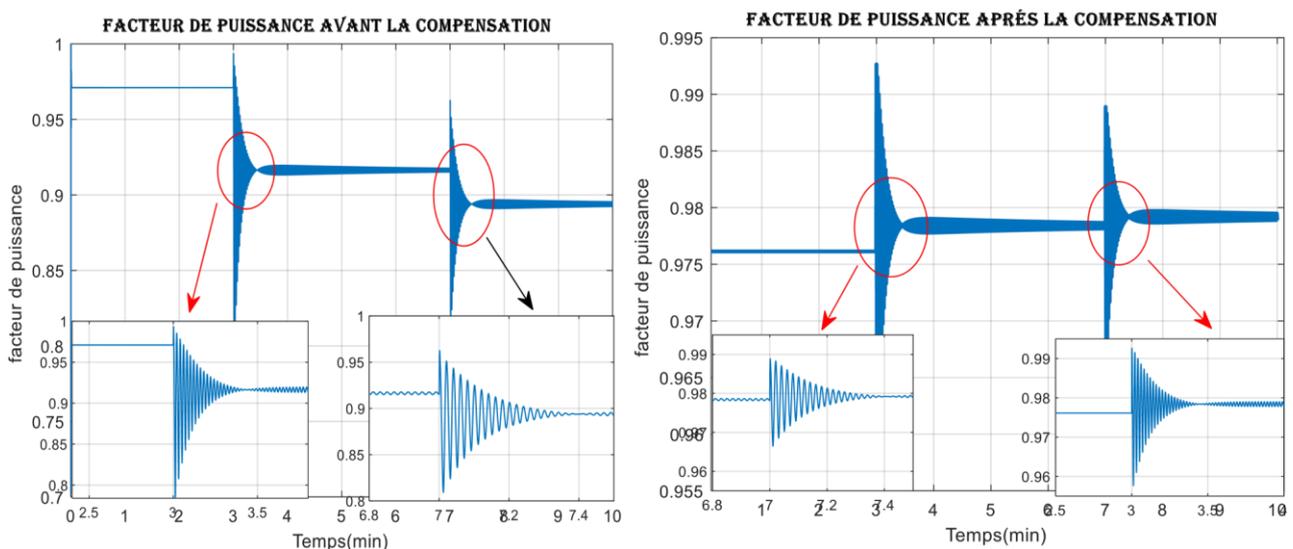


Figure VI.8 - facteur de puissance avant et après la compensation d’une charge variable.

VI.3.4.2 Puissance active

La courbe illustrée par la Figure VI.9, représente la variation de la consommation de la puissance active pour une charge variable avant et après la compensation. On remarque une valeur min de la puissance de 0.6 KW après elle augmente et se stabilise vers une valeur de 1.1 KW avec quelques perturbations. Elle augmente aussi vers 1.7 KW en parallèle avec le besoin de charge, cela peut entrainer une surcharge de réseau et des couts supplémentaires pour les entreprises en raison de la tarification de l'énergie réactive.

Après la compensation c'est le même cas mais une diminution de puissance active avec quelque perturbation, et se stabilise vers une valeur constante et final de 1.7 KW, cela peut améliorer la stabilité de réseau en réduisant les pertes de puissances et en augmentant la capacité de réseau.

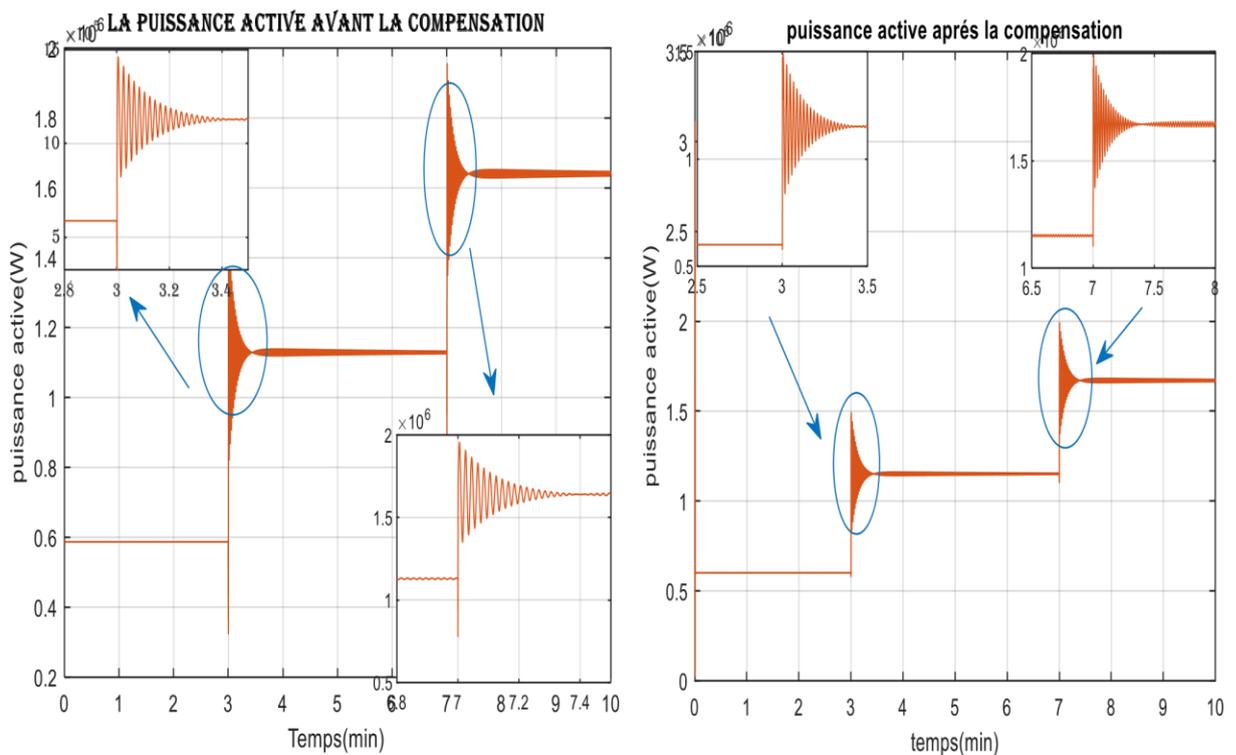


Figure VI.9 - Puissance active avant et après la compensation a une charge variable

VI.3.4.3 Puissance réactive

La courbe illustrée par la Figure VI.10 montre la puissance réactive qui varie selon le besoin instantané de l'équipement de l'usine à l'exception de la consommation, avant la compensation on

va une augmentation de valeur de l'énergie réactive avec l'augmentation de charge avec quelques perturbations, cela peut engendrer un déséquilibre de réseau électrique.

Après la compensation on voit une diminution de valeur à cause des batteries de condensateurs qui ont diminué cette puissance, et stocke l'énergie réactive excédentaire et la fournissent lorsque la charge est en besoin, et peut prolonger la durée de vie des équipements électriques.

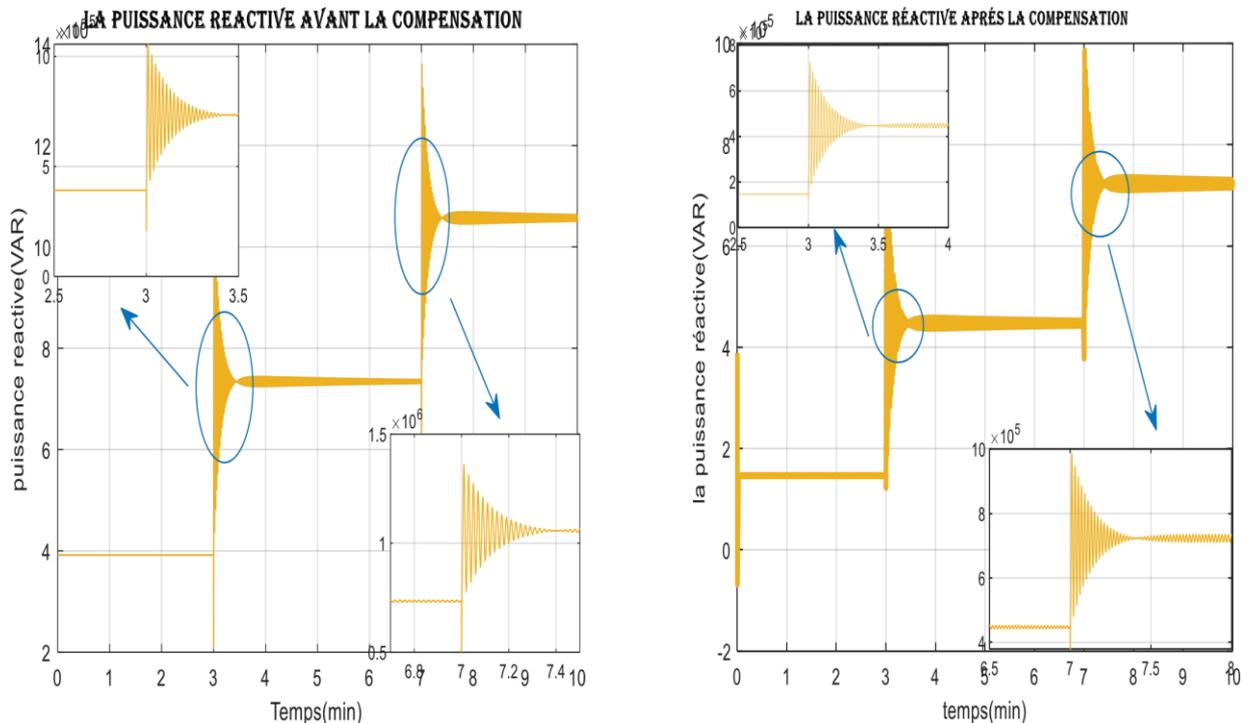


Figure VI.10 - Puissance réactive avant et après la compensation a une charge variable

VI.3.4.4 Courant

La figure suivante présente le courant de la charge avant et après la compensation, le courant dans le circuit dépendra de la valeur de la charge. Si la charge est élevée, le courant sera élevé et vice versa. Cela peut causer des fluctuations de tension dans le circuit.

Après la compensation de la charge variable, le courant dans le circuit sera constant, peu importe la valeur de la charge. Cela se fait en ajustant la tension du circuit afin de maintenir un courant constant à travers la charge. Cette technique de compensation permet de réduire les fluctuations de tension dans le circuit et de maintenir une alimentation électrique stable.

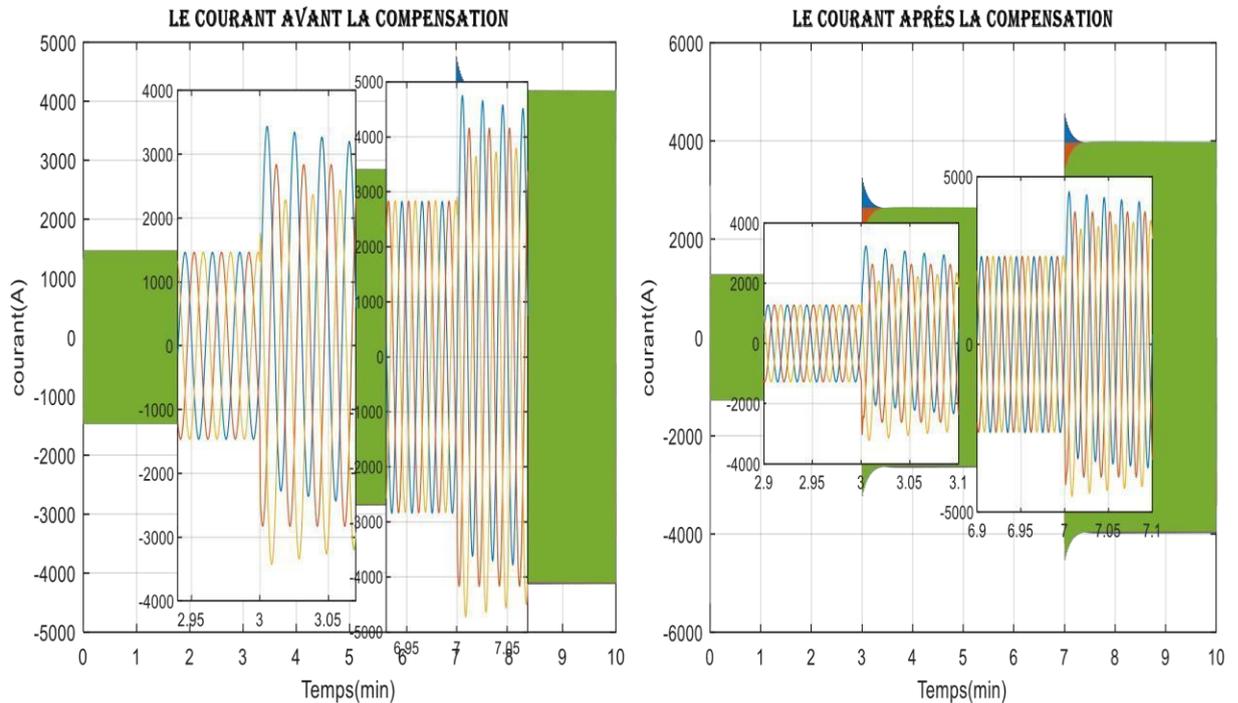


Figure VI.11 - Courant avant et après la compensation à une charge variable

VI.3.4.5 Tension

La courbe illustrée par la Figure 11 montre qu'il y a des tensions pratiquement sinusoïdales équilibré et stable. On constate une stabilité de tension avant et après la compensation environs de 370 V.

Avant la compensation d'une charge variable, la tension du système peut fluctuer et varier en fonction de la demande de courant de la charge. Si la charge est plus élevée, la tension peut diminuer, tandis que si la charge est plus faible, la tension peut augmenter. Après la compensation d'une charge variable, la tension du système sera plus stable car la compensation permet de maintenir la tension à un niveau constant. Cela se fait en ajustant l'intensité du courant pour équilibrer la demande de la charge variable. Par conséquent, la tension reste constante malgré les fluctuations de la charge.

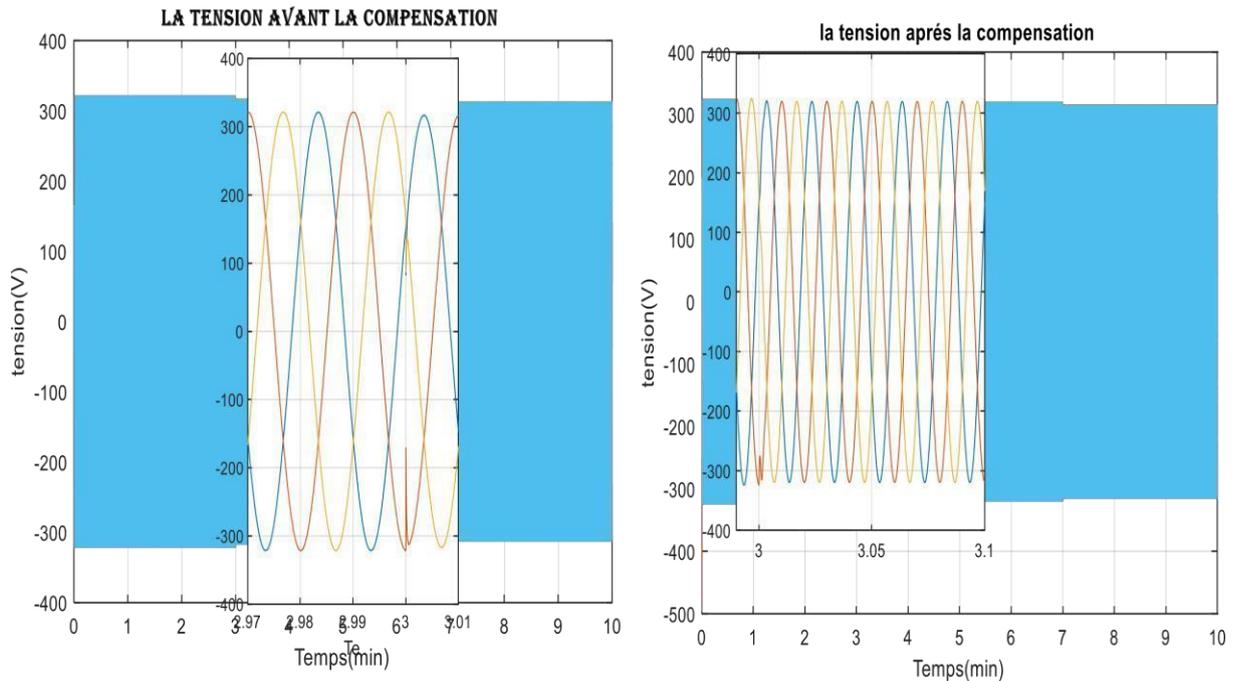


Figure VI.12- Tension avant et après la compensation à une charge variable

La tension avant et après la compensation d'une charge variable va dépendre de plusieurs facteurs tels que la puissance de la charge variable, la qualité de la source d'alimentation, la nature de la charge et le type de compensation utilisé. En général, avant la compensation, la tension risque de chuter en raison de la charge variable qui consomme plus d'énergie. Cela peut entraîner des perturbations dans le réseau électrique et une diminution de la qualité de l'alimentation électrique. Cependant, après la compensation, la tension devrait revenir à une valeur plus stable et constante. La compensation peut être réalisée par différents moyens, tels que l'utilisation de régulateurs de tension ou de filtres passifs ou actifs.

VI.4 Conclusion

Cette étude a permis de mieux comprendre l'importance de l'énergie réactive dans les réseaux électriques et contribuerait à l'amélioration de l'efficacité et de la stabilité des systèmes énergétiques. Pour mener à bien cette recherche, des simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink pour modéliser avec précision le comportement des systèmes électriques en temps réel. Les résultats obtenus prouvent que la compensation de l'énergie réactive est essentielle pour préserver la stabilité de la tension et prévenir les perturbations dans le réseau électrique.

D'après nos résultats de simulation, on remarque que le système est entièrement stable. La puissance active et réactive est visiblement améliorée en incorporant les batteries de condensateurs dans le système tout en maintenant une tension et un courant stable.

Conclusion générale

Nous voici au terme de notre travail intitulé « compensation de l'énergie réactive par les batteries de condensateurs ». Le choix de notre étude a été motivé par le fait que dans le monde actuel où nous sommes appelés à devenir des ingénieurs en maintenance industrielle, il nous est indispensable de connaître la contribution au bon fonctionnement des moyens et des outils des activités de production afin d'avoir une meilleure adaptation dans un environnement industriel.

Le travail que nous avons réalisé porté sur l'étude et le dimensionnement du système de compensation de l'énergie réactive de l'unité **COJEK CEVITAL LAKSEUR MT-BT** (Moyenne tension/Basse tension). Ce qui nous a permis de découvrir l'environnement industriel, de combler nos insuffisances et d'approfondir nos connaissances dans le domaine des installations électriques industrielles. Il nous a aussi permis de toucher à la pratique, de maîtriser la méthodologie du calcul de bilan de puissance ; la technique de compensation d'énergie, ainsi d'acquérir des connaissances dans les techniques de dimensionnement des protections, et la maîtrise d'une bonne exploitation électrique.

La compensation de la puissance réactive, est une opération indispensable qui engendre non seulement des bénéfices techniques mais aussi, des gains économiques aux seins d'une industrie à basse tension. Or, le manque de puissance réactive contribue favorablement à une instabilité de tension, notamment lorsque les générateurs arrivent à leurs limites de production d'énergie réactive.

Dans la première partie on a étudié les différents modes et système de compensation d'énergie réactive par des batteries de condensateur, pour cela on a opté pour une compensation Partielle et automatique pour supprimer les pénalités dus à la consommation excessive d'énergie réactive et diminuer la puissance apparente en l'ajustant au besoin en puissance active de l'installation.

Ensuite, nous avons reçu les données de l'installation et élaborer son bilan de puissance pour déterminer la puissance totale de chaque unité, la valeur de facteur de puissance obtenu entraînant des pertes d'énergie importantes non exploitées est pour cela notre objective d'atteindre le $\cos(\varphi)$ global a 0,97 permet à une réduction de la chute de tension et une

Diminution d'énergie réactive. Notre résultat obtenu a été vérifié et confirmé par le logiciel **ECODIAL**.

Finalement, nous avons présenté une simulation avec **MATLAB-SIMULINK**, d'où Les résultats de la simulation et les représentations graphiques obtenus ont montrés l'importance des batteries de condensateurs pour améliorer le facteur de puissance et de compenser l'énergie réactive au sein d'une entreprise.

Nous espérons néanmoins que ce travail sera un support certain à ceux qui voudraient bien compléter la partie pratique des moyens de compensation de l'énergie réactive.

Résumer

Le courant alternatif est généralement utilisé pour distribuer l'énergie électrique aux utilisateurs via des réseaux à haute, moyenne et basse tension. L'énergie utilisée se compose d'une partie active qui se transforme en chaleur ou en mouvement, ainsi que d'une partie réactive qui est utilisée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques. Bien que l'utilisateur ne bénéficie que de la partie active de l'énergie, la partie réactive ne peut pas être éliminée et nécessite des dispositifs appropriés de compensation pour éviter que la consommation d'électricité ne devienne excessive. Les économies d'énergie réalisées par les processus de compensation d'énergie réactive peuvent atteindre des dizaines de pour cent de la consommation totale d'énergie, permettant ainsi de réduire la demande globale d'énergie provenant du réseau de distribution.

Le premier chapitre présente une introduction à l'énergie électrique ainsi qu'une explication du facteur de puissance, incluant plusieurs définitions liées à la puissance réactive. Les méthodes traditionnelles et contemporaines de compensation de l'énergie réactive sont également abordées, telles que l'utilisation de batteries de condensateurs et la compensation statique de l'énergie. Dans le deuxième chapitre, l'accent est mis sur la compensation de l'énergie réactive à l'aide de condensateurs. Les condensateurs sont installés pour produire de l'énergie réactive en opposition de phase avec la charge inductive afin de compenser la consommation d'énergie réactive et réduire la facture d'électricité. Les différents types de compensation, le choix de l'emplacement, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technique sont également examinés. Le troisième chapitre traite du développement d'un bilan de puissance permettant de déterminer le niveau de consommation électrique. Les coefficients d'utilisation et de simultanéité sont utilisés pour calculer la puissance utile et la puissance totale des différents récepteurs et en déduire le facteur de puissance. Le quatrième chapitre est consacré à la simulation de la compensation de l'énergie réactive. Cette simulation est cruciale pour les ingénieurs en électricité afin de renforcer l'efficacité et la stabilité des systèmes énergétiques. À l'aide du logiciel Matlab/Simulink, les systèmes électriques sont modélisés en temps réel, démontrant ainsi que la compensation de l'énergie réactive est un élément crucial pour maintenir la stabilité de la tension et éviter les perturbations dans le réseau électrique.

Abstract

Alternative current is generally used to distribute electricity to users via high, medium and low voltage networks. The energy used consists of an active part that turns into heat or motion, as well as a reactive part that is used by electrical actors to create their own electromagnetic fields. Although the user only benefits from the active part of the energy, the reactive part cannot be removed and requires appropriate compensation devices to prevent excessive electricity consumption. Energy savings from reactive energy compensation processes can reach tens of percent of total energy consumption, thereby reducing the overall demand for energy from the distribution network.

The first chapter presents an introduction to electrical energy as well as an explanation of the power factor, including several definitions related to reactive power. Traditional and contemporary methods of reactive energy compensation are also dealt with, such as the use of condensator batteries and static power compensation. In the second chapter, the emphasis is placed on the compensation of reactive energy using condensators. Condensers are installed to produce reactive energy in phase opposition with the inductive charge in order to compensate for reactive power consumption and reduce the electricity bill. The different types of compensation, the choice of location, as well as the advantages and disadvantages of this technique are also considered. The third chapter deals with the development of a power balance to determine the level of electricity consumption. Usage and simultaneity coefficients are used to calculate the useful power and total power of the different receivers and deduct the power factor from them. The fourth chapter is devoted to the simulation of reactive energy compensation. This simulation is crucial for electrical engineers to enhance the efficiency and stability of energy systems. Using Matlab/Simulink software, electrical systems are modeled in real time, demonstrating that reactive energy compensation is a crucial element in ensuring voltage stability and avoiding disruption in the power grid.

Equipements	U(V)	In(A)	Cosφ	Pu (KW)	η	Tg φ	Ku	Pa(KW)	Qa(KVA R)	Sa(KVA)
Combi PET 3	400	1012.08	0.84	589	0.78	0.65	0.75	566.35	368.13	675.48
Dépalettiseur	400	79.21	0.82	45	0.85	0.7	0.75	39.71	27.79	48.47
Dé bouchonneuse	400	17.82	0.81	10	0.85	0.72	0.75	8.82	6.35	10.87
Décaisseuse	400	17.60	0.82	10	0.85	0.7	0.75	8.82	6.18	10.77
Laveuse de bouteille	400	169.81	0.85	100	0.85	0.62	0.75	88.24	54.71	103.82
Contrôle de bouteille	400	0.89	0.81	0.5	0.85	0.72	0.75	0.44	0.32	0.54
Laveuse de caisse	400	16.98	0.85	10	0.85	0.62	0.75	8.82	5.47	10.38
Mixeur	400	179.58	0.86	107	0.85	0.59	0.75	94.41	55.70	109.62
Remplisseuse	400	176.02	0.82	100	0.85	0.7	0.75	88.23	61.76	107.70
Contrôle remplissage	400	0.89	0.81	0.5	0.85	0.72	0.75	0.44	0.32	0.54
Tunnel pasteurisation	400	77.32	0.84	45	0.85	0.65	0.75	39.71	25.81	47.60

Etiqueteuse	400	45.32	0.86	27	0.85	0.59	0.75	23.82	14.06	27.66
Dateuse	400	8.39	0.86	5	0.85	0.59	0.75	4.41	2.60	5.12
Encaisseuse	400	17.60	0.82	10	0.85	0.7	0.75	8.82	6.18	10.77
Palettiseur	400	79.21	0.82	45	0.85	0.7	0.75	39.71	27.79	48.47
Banderoleuse	400	71.28	0.81	40	0.85	0.72	0.75	35.29	25.41	43.49

Convoyeur	400	96.81	0.82	55	0.85	0.7	0.75	48.53	33.97	59.24
Station CIP	400	33.57	0.86	20	0.85	0.59	0.75	17.65	10.41	20.49
Ligne de remplissage aseptique	400	255.23	0.82	145	0.82	0.7	0.75	132.62	92.84	161.88
Ligne de fruit N 01	400	167.83	0.86	100	0.82	0.59	0.75	91.46	53.96	106.19
Stérilisateur ligne de fruit N 01	400	109.09	0.86	65	0.82	0.59	0.75	59.45	35.08	69.03
2 Concentreur	400	1211.72	0.81	680	0.84	0.72	0.75	607.14	437.14	748.14
Cuiseur de confiture	400	119.69	0.82	68	0.84	0.7	0.75	60.71	42.5	74.11
4 Schiller eaux glace	400	1283	0.81	540	0.8	0.72	0.75	506.25	363.5	623.82
Eclairage externe	400	28.87	1	20	1	0	1	20	0	20
Adm	400	144.34	1	100	1	0	1	100	0	100
Pc hall de production	400	46.19	1	32	1	0	1	32	0	32
ADM Extérieur	400	34.64	1	24	1	0	1	24	0	24
Eclairage pc hall bâtiment verre	400	46.19	1	32	1	0	1	32	0	32
Eclairage produit chimique, preforme, Siropetie	400	40.41	1	28	1	0	1	28	0	28
Coffret Quai porte sectionnelle Siroprie	400	35.64	0.81	20	0.75	0.72	0.75	20	14.4	24.64
Poste de garde	400	17.32	0.84	12	1	0	1	12	0	12

Eclairage salle électrique existante	400	7.22	1	5	1	0	1	5	0	5
Climatisation salle électrique existante	400	21.65	1	15	1	0	1	15	0	15
Eclairage salle électrique	400	7.22	1	5	1	0	1	5	0	5
2 Réseau pc	400	57.74	1	40	1	0	1	40	0	40
Négative	400	178.19	0.8 1	100	0.9	0.7 2	0.7 5	83.33	60	102.68
Eclairage hall de production	400	64.95	1	45	1	0	1	45	0	45
Coffret porte sectionnelle bâtiment fruit	400	10.69	0.8 1	6	0.75	0.7 2	0.7 5	6	4.32	7.39
Eclairage pc bâtiment fruit	400	23.09	1	16	1	0	1	16	0	16
Total			0.8 6	331 7				3063. 1 8	1836.7	3571.6 3

Tableau 1 : Calcul de puissance d'utilisation des récepteurs (TGBT2)

Equipements	U(V)	In(A)	Cosφ	Pu(KW)	η	Tgφ	Ku	Pa(KW)	Qa(KVAR)	Sa(KVA)
Climatisation salle ELG ADM TGBT 3	400	21.65	1	15	1	0	1	15	0	15
Pont roulant	400	45.11	0.8	25	0.8	0.7 5	0.7 5	23.43	17.59	29.29
compresseur 7 bar	400	398.6 5	0.84	232	0.7 5	0.6 5	0.7 5	232	150.8	276.70
Compresseur 40 bar	400	713.1 0	0.84	415	0.9	0.6 5	0.7 5	345.83	224.79	412.47
Groupes pompes	400	108.2 5	0.8	60	0.7 5	0.7 5	0.7 5	60	45	75
Extracteur compresseur	400	10.56	0.82	6	0.7 5	0.7	0.7 5	6	4.2	7.32
Chambre froide +	400	21.38	0.81	12	0.8 8	0.7 2	0.7 5	10.23	7.36	12.60

E1	400	44.68	0.84	26	0.8	0.6 5	0.7 5	24.38	15.84	29.08
E2	400	159.8 0	0.84	93	0.8	0.6 5	0.7 5	87.19	56.67	103.99
E3	400	134.0 3	0.84	78	0.8	0.6 5	0.7 5	73.13	47.53	87.22
E4	400	309.2 9	0.84	180	0.8	0.6 5	0.7 5	168.75	109.69	201.27
E5	400	159.8 0	0.84	93	0.8	0.6 5	0.7 5	87.19	56.67	103.99
E6	400	44.68	0.84	26	0.8	0.6 5	0.7 5	24.38	15.84	29.08
CO2	400	240.5 6	0.81	135	0.8 1	0.7 2	0.7 5	125	90	154.03
Siroperie	400	201.4	0.86	120	0.8 1	0.5 9	0.7 5	111.11	65.56	129.01
2 Alim bouchon	400	5.41	0.8	3	0.8 5	0.7 5	0.7 5	2.65	1.99	3.31
2 Contrôleur de niveau	400	1.72	0.84	1	0.8 5	0.6 5	0.7 5	0.88	0.57	1.05

2 Mixeur	400	352.4 5	0.86	210	0.8 5	0.5 9	0.7 5	185.29	109.32	215.14
Carbonation	400	81.97	0.81	46	0.8 5	0.7 2	0.7 5	40.59	29.22	50.02

2 Convoyeur	400	193.62	0.82	110	0.85	0.7	0.75	97.06	67.94	118.48
2 Etiqueteuse	400	96.23	0.81	54	0.85	0.72	0.75	47.65	34.31	58.71
2 Dateuse	400	7.08	0.86	4.22	0.85	0.59	0.75	3.72	2.20	4.32
Sécheur	400	64.15	0.81	36	0.85	0.72	0.75	31.76	22.87	39.14
Sleeveuse	400	88	0.82	50	0.85	0.7	0.75	44.12	30.88	53.85
2 Fardeuse	400	488.78	0.88	298	0.85	0.54	0.75	262.94	141.99	298.83
2 Poseuse de poignée	400	16.55	0.82	9.4	0.85	0.7	0.75	8.29	5.81	10.12
2 Palettiseur	400	158.42	0.82	90	0.85	0.7	0.75	79.41	55.59	96.93
2 Heuseuse	400	163.94	0.81	92	0.85	0.72	0.75	81.18	58.45	100.03
COMBI N02	400	1036.77	0.82	589	0.7	0.7	0.75	566.35	396.44	691.22
COMBI N01	400	1049.57	0.81	589	0.78	0.72	0.75	566.35	407.77	697.87
Total			0.83	3697.62				3411.86	2272.9	4100

Tableau 5: Calcul de puissance d'utilisation des récepteurs(TGBT3)

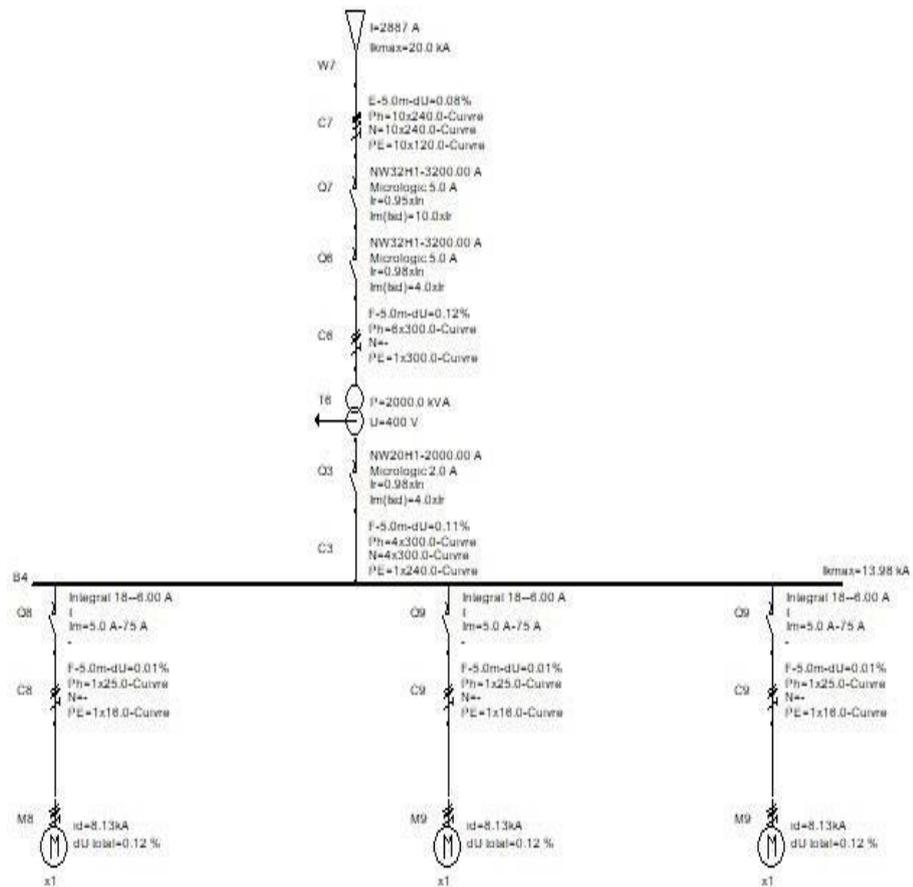


Figure 1 : Schéma unifilaire de l'installation

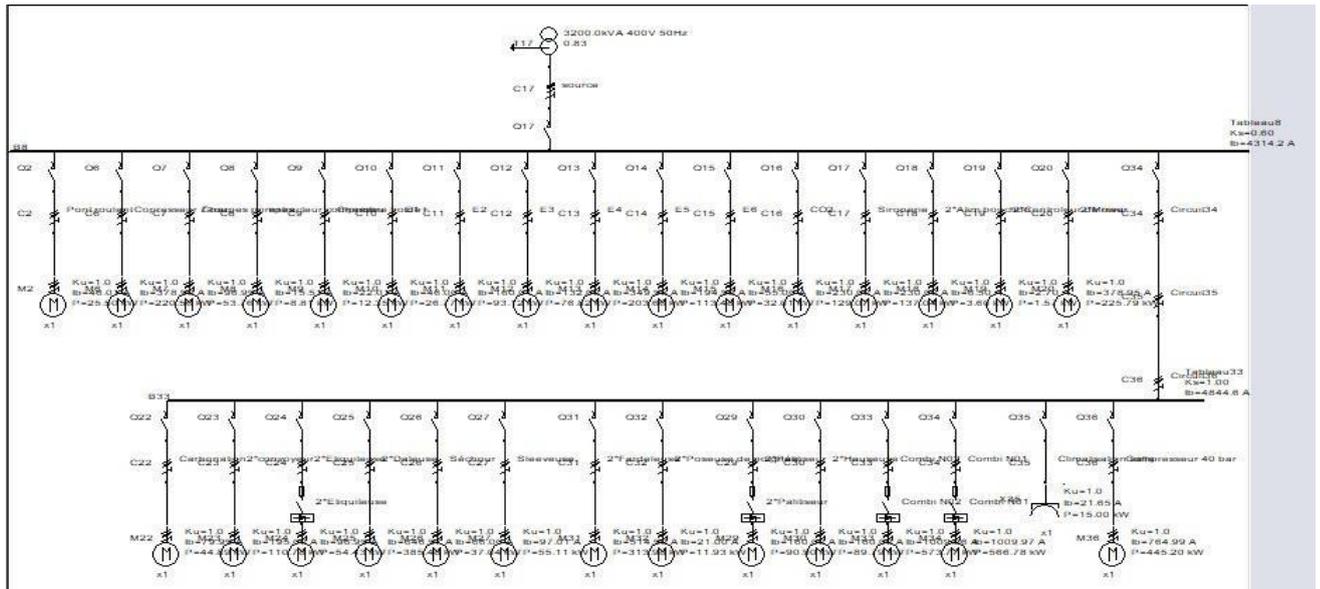


Figure 4 : Schéma unifilaire de TGBT3

Les paramètres de simulation

Paramètre	Symbole	Valeur
Source triphasé	U	30kv, 50 Hz
	f	50 Hz
Transformateur	U	30KV, 0.4KV,
	S	2.1 MVA
La charge	P	1845 KW
	Q	1232KVAR
La longe de la line	L	10m

Tableau 6 : les paramètres de la simulation

Référence

- [1] « Compensation d'énergie réactive et maîtrise de la qualité des infrastructures électriques », catalogue LEGRAND, page 76, a les GLAISINS, 2016
- [2] Gérard GAY “ La compensation de l'énergie réactive ” Intersections : Le magasin Schneider Electronic de l'enseignement technologique et professionnel. No: 16-novembre 2006
- [3] A. Amina « Dimensionnement de batterie de compensation de l'énergie réactive pour la station de pompage des hydrocarbures de Beni Mansour », Mémoire de fin d'étude, département de Génie électrique, Université de Bejaia, 2015.
- [4] H.Semaoui, « Compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB) », Mémoire de magister, Université M'sila, 2016.
- [5] C.Bouchebouba et H.Benattia, « Etude et dimensionnement électrique du nouveau site de la câblerie algérienne », Mémoire de magister département d'électromécanique, Université de Mostaganem, 2019.
- [6] PIERE MEYNAUD « Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension sur les réseaux de transport THT et HT » Technique de l'ingénieur, D4315, 1986.
- [7] SI KADIR ET, S.FEKIK « Compensation de l'énergie réactive par les systèmes FACTS Application d'un SVC » Mémoire de fin d'étude ingénieur année 2007, UMMTO.
- [8] Electric Distribution Systems, Second Edition. Abdelhay A. Sallam and Om P. Malik 2019 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Published 2019 by John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Fiche technique de Schneider "Solutions de compensation d'énergie réactive et filtrage d'harmoniques Moyen tension" 07/2013.
- [10] Theodore wildi «électrotechnique" 3 ème edition, 2006.
- [11] Merlin Gerin, "Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques basse tension N°6", 2011.
- [12] Schneider Electric, « La compensation de l'énergie réactive », Guide technique, Intersections - novembre 2006
- [13] Schneider Electric, « La conception des réseaux industriels en haute tension », ct 169, 10/1993
- [14] Philippe SERRAND et Jean VERSEILLE “Compensation de la puissance réactive et tenue en tension dans les réseaux publics” Technique de l'ingénieur. No: D4 305 – Juin 1986.

- [15] Abdelaàli ALIBI «Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) » Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2009.
- [16] Stéphane GERBEX « Métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositif FACTS dans un réseau électrique » thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne, 2003.
- [17] SS Kanojia, Suketu Rajyaguru, « Compensation de puissance réactive pour BT Réseau de distribution », International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), avril 2019.
- [18] Sidi Salah Mokhtar, « Etude comparative entre les moyens de compensation de l'énergie réactive», Mémoire de magister, Université Badji mokhtar-Annaba, 2017.
- [19] G.Breuer, «Flexible AC Transmission Systems Technology for the Future» Proceeding of 20th Annual Electrical /Electronic Insulation Boston, MA, October. [20] « Encyclopédie des sciences industrielles (Electricité, électronique générale) ».Année 1977, édition QUIETT.
- [21] Electric Distribution Systems, Second Edition. Abdelhay A. Sallam and Om P. Malik 2019
- [22] Legrand Catalogue, « Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques», P0910ALPESFR- EX210027 - MARS 2010. [23] « Electrical-installation.ORG»
- [24] MERLIN GERIN «Guide de la compensation d'énergie réactive et filtrage d'harmoniques HT/MT» GROUPE SCHNEIDER.
- [25] MERLIN GERIN «Condensateurs et batteries BT/MT triphasé» GROUPE SCHNEIDER.
- [26] CHRISTOPHE PREVE «Protection des réseaux électriques» Editions HERMES PARIS, 1998.
- [27] PREVE CHRISTOPHE « Réseau électrique 2 » LAVOISIER, 3 ème éditions.
- [28] Guide de conception des réseaux électriques industriels Shneider
- [29] Legrand Electric Algérie, « Batteries de condensateurs automatiques Alpimatic », EX210027 -ALG 018 - JUIN 2011.
- [30] Gérard GAY “ La compensation de l'énergie réactive ” Intersections : Le magasin Schneider Electronic de l'enseignement technologique et professionnel. No: 16-novembre 2006.
- [31] Schneider Electric, « Compensation de l'énergie réactive et filtrage des harmoniques», Guide de l'installation électrique 2010, GIE_chap_L-2010.indb 26, 22/01/2010.

- [32] **HACHEMAOUI Mokhtar et MAHMOUDI Tahar Etude du réseau Ouest Algérien 2010 ligne (220 kv) en incorporant les dispositifs FACTS**
- [33] **S.Imadouchene et Y.Houcini, «Base de fonctionnement des dispositifs FACTS - Application d'un STATCOM pour la régulation de la tension-», Mémoire de magister, Université Tizi Ouazou, 2010.**
- [34] **MERLIN GERIN « Guide de la compensation d'énergie réactive et filtrage d'harmonique » GROUPE SCHNEIDER, Année 2007.**
- [35] **BAALI Radhouane, DJERIOU Salim, « Étude d'optimisation d'une installation électrique – Application briqueterie », Mémoire, Option: Commande électrique, Université MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, 2007/2008.**
- [36] **Guide technique Schneider Electric « catalogue distribution électrique » 2002.**
- [37] **J.L.LILIEN, « Effets indirects des champs électromagnétiques », Thèse doctorat Institut Montefiore, Université de Liège, 2005.**
- [38] **Grid reactive power compensation by using electric vehicles 2014**
- [39] **Electric Vehicle Charging with Reactive Power Compensation to Distribution Systems ,2020**