

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L' ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHER CHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA

FACULTÉ DE : TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT : GÉNIE ÉLECTRIQUE
N°=.....



DOMAIN :SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROTCHNIQUE
OPTION : RES EAUX ELECTRIQUE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

par :

- Ben hamed khaled
- Chergui Moussa

THÈME

**Etude et Compensation d'énergie réactive dans un réseau HTA
Application université de Msila**

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. Benguesmia Hani	UNIVERSITÉ DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA	Président
Mr. Djeriou Salim	UNIVERSITÉ DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA	Encadreur
Mr. khodja djalal eddine	UNIVERSITÉ DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA	Co - Encadreur
Mr. Rouabhi Riyadh	UNIVERSITÉ DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

Résumé

Ce travail a été réalisé pour une étude et dimensionnement des batteries de compensation HTA au compte de l'université de M'sila. Cependant, une analyse est effectuée sur la consommation d'énergie réactive à partir leurs factures fournis par SONALGAZ ainsi que le choix et mode d'installation de ces batteries. Deux propositions est présentés pour le dimensionnement selon la nature de charge afin de pouvoir les valeurs optimales de ces composantes. Cette étude permettra d'améliorer les indices technico-économiques dans le réseau électrique HTA distribué à l'intérieur de l'université.

Mots Clés : Facteur de puissance, Energie réactive, batteries de compensation HTA, Filtre passif, Les harmoniques, réacteur inductif.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous tenons à remercier « Allah » le tout puissant, pour nous avoir donné la force et la patience. Nous exprimons notre profonde gratitude et nos remerciements : À notre encadreur de mémoire Djeriou salim Maître de Conférence à l'université mohamed boudaif –msila , pour avoir accepté de nous encadrer, pour son enseignement, son support, ses encouragements, sa patience qu'il n'a cessé de nous apporter tout au long de ce travail. Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, pour son aide. Cette page n'aurait probablement pas pu s'écrire sans l'appui moral des membres de nos familles. Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements chaleureux vont également à nos camarades de la promotion 2020 de réseaux électriques et nos amis surtout Tefaha, leur aide, leur humour, et leur soutien moral aux moments où tout allait mal. Finalement, Nous réservons une mention particulière à toutes les personnes qui nous ont apporté le soutien et l'aide attendu.

DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui me
sont chères, mes deux chers parents pour leurs soutiens,*

A tout ma grande famille BEN HAMED

*Sans oublier tous mes amis NEKBIL HOUDIFA ,BEN
HAMED MOUHAMED ,BEN TAYEB YAZID*

A tout mes collègues de promotion de 2020.

{ BEN HAMED KHALED }

DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui me
sont chères, mes deux chers parents pour leurs soutiens,*

A tout ma grande famille CHERGUI

*Sans oublier tous mes amis YACINE GHERAB ,DJEDILI
FOUAD ,*

A tout mes collègues de promotion de 2020.

{ CHERGUI MOUSSA }

SOMMAIRE

- Résumé
- Remerciement
- Dédicaces
- Sommaire
- Liste des figures
- Liste des tableaux

	INTRODUCTION GENERALE.....	1
I	Chapitre : Généralité sur la puissance réactive et la tension dans le réseau électrique MT	
I.1	INTRODUCTION	2
I.2	Théorie de la puissance	2
I.2.1	puissance active.....	2
I.2.2	puissance apparente.....	3
I.2.3	Puissance réactive.....	7
I.2.4	Récepteurs et sources de puissance réactive	8
I.3	Composante active et réactive du courant.....	9
I.3.1	Courant actif (I_a).....	9
I.3.2	Courant réactif (I_r).....	9
I.3.2	Courant apparent (I_t).....	9
I.4	Perturbations de la tension.....	10
I.4.1	Qualité de l'énergie électrique.....	10
I.4.1.1	Qualité de la tension.....	10
I.4.1.2	Fréquence.....	11
I.4.1.3	Forme d'onde.....	11
I.4.1.4	Symétrie.....	11
I.4.1.2	Qualité du courant.....	12
I.4.2	Classification des perturbations électriques	12
I.4.3	Creux de tension et coupures brèves.....	14
I.4.3.1	Définition, origine et conséquences.....	14
I.4.3.2	Représentation dans le plan complexe.....	16
I.5	Propagation.....	16
I.5.1	Propagation en amont et en aval du réseau.....	16
I.5.2	Surtensions et surintensités.....	18
I.5.3	Variations de tension.....	18
I.5.4	Déséquilibre.....	19
I.5.5	Perturbations harmoniques.....	20
I.5.5.1	Harmoniques.....	21
I.5.5.2	Convertisseurs statiques.....	21
I.5.5.3	Dispositifs à caractéristique tension-courant non.....	22
I.5.5.4	Interharmoniques.....	22
I.6	Le facteur de puissance.....	22
I.6.1	Les récepteurs consommant le plus d'énergie réactive sont.....	23
I.7	Conclusion.....	24

Chapitre II : compensation énergie réactive

II.1	INTRODUCTION	25
II.2	Méthodes de compensation de la puissance réactive	25
II.3	Correction du facteur de puissance individuel, partiel et globe	25
II.3.1	Correction unique (fixe) du facteur de puissance.....	26
II.3.2	Correction du facteur de puissance du secteur	26
II.3.3	Compensation globale.....	27
II.3.4	Avantages et inconvénients des méthodes de CFP.....	28
II.4	Dispositifs de compensation de la puissance réactive.....	30
II.4.1	Les dispositifs de compensation peuvent être classés en quatre groupes..	31
II.4.2	Dispositifs de compensation à base de condensateurs de puissance	31
II.5	Batterie de condensateurs basse tension	32
II.5.1	Conception standard des batteries de condensateurs	33
II.5.2	Équipement de la batterie de condensateurs.....	34
II.6	compensation énergie réactive haute tension	35
II.6.1	Batteries de condensateurs haute tension	35
II.6.1.2	Protection contre la surpression	39
II.6.3	Filtres actifs	40
II.6.3.1	Filtres actifs à passage intégral	41
II.6.3.2	Filtres hybrides	42
II.6.3.3	Connexion des filtres au réseau	42
II.6.4	Filtres passifs. Filtrage harmonique	42
II.6.4.1	Phénomène de résonance	42
II.6.4.1	La résonance des séries	43
II.6.4.2	Résonance parallèle	45
II.6.5	Régulateurs de facteur de puissance	47
II.6.6	Protection des batteries	48
II.6.6.1	Protection externe	48
II.6.6.2	Organe de manœuvre	58
II.6.6.3	Selfs de choc	49
II.6.6.4	Protection interne	49
II.6.6.5	Résistances de décharge	50
II.6.6.6	Protection par suppresseur	50
II.6.6.7	Les précautions à prendre	51
II.7	Dimensionnement des câbles	51
II.8	CONCLUSION	52

Chapitre III : étude technique de la compensation énergie réactive HTA

III.1	INTRODUCTION :	53
III.2	Dimensionnement de système de compensation	53
III.2.1	Analyse de la consommation de l'énergie active et réactive	53
III.3	Dimensionnement de la batterie de compensation	59
III.3.1	calcul de l'impédance total avant compensation	60
III.4	Dimensionnement la batterie de compensation	61
III.4.1	calcul les paramètre électrique après la compensation	63
III.4.1.1	calcul de l'impédance total après compensation	63
III.4.2	Simulation de modèle étudiant pour la compensation d'énergie réactive appliqué à l'université de M'sila	65
III.4.2.1	caractéristiques du modèle.....	65
III.4.2.2	représentation la schéma de blocs de la simulation	66
III.4.2.3	résultats des simulations	67
III.5	Dimensionnements des batteries de compensation avec une charge électrique non linéaire	68
III.5.1	Compensation d'énergie réactive à base d'un réacteur inductif	68
III.5.2	Calcule de courant capacitif	70
III.5.3	La chute de tension au borne l' inductance ΔU_L	70
III.5.4	Simulation du modèle étudiant à base de réacteur inductive	71
III.5.4.1	caractéristiques du modèle	71
III.5.3.2	représentations le circuit de simulation	72
III.6	Type de compensation	74
III.6.1	Calculs la valeur de cheque gradin	75
III.7	CONCLUSION	78
	CONCLUSION GENERALE	79

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1)	La puissance est le produit de la tension et du courant, avec la tension et le courant en phase, source	5
Figure (I.2)	La puissance est le produit de la tension et du courant, le courant étant en retard par rapport à la tension d'un angle de phase	6
Figure (I.3)	Triangle de puissance,	8
Figure (I.4)	Diagramme vectorielle des courants.	9
Figure (I.5)	Amplitude d'un creux de tension provoqué par a) un court-circuit b) le démarrage d'un moteur de forte puissance.	15
Figure (I.6)	Creux de tension (a) et sa signature dans le plan complexe (b)	16
Figure (I.7)	Diviseur de tension pour l'étude de la propagation des creux de tension	17
Figure (I.8)	Exemple de surtension	18
Figure (I.9)	Exemple de variation de tension	19
Figure (I.10)	Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases	19
Figure (I.11)	Représentation temporelle d'une distorsion harmonique (harmonique de rang 5)	20

Chapitre II

Figure (II .1)	Illustration de la Correction unique (fixe) du facteur de puissance	26
Figure (II.2)	Illustration de la correction du facteur de puissance du groupe	27
Figure (II.3)	Illustration de la correction globale du facteur de puissance	28
Figure (II .4)	Batterie de condensateurs HTA	33
Figure (II.5)	Batteries de condensateurs haute tension	36
Figure (II .6)	Le condensateur MT monophasé 1. Borne, 2. - isolant, 3. poignée, 5. partie active	37
Figure (II .7)	Mécanisme d'auto régénération des condensateurs	37
Figure (II.8)	Les pertes de puissance en fonction de la température	38
Figure (II.9)	Section 1 de tous les condensateurs à film. Résistance de décharge, 2. fusible interne, 3. élément capacitif	39
Figure (II.10)	Schéma de connexion typique des condensateurs MT a) Delta ; b) double WYE, c) schéma H, source	40
Figure (II.11)	Schéma bloc de la connexion du filtre actif	41
Figure (II.12)	Schéma du circuit de résonance en série, source	43
Figure (II.13)	Dépendance de W_c et W_L du facteur de qualité Q	44
Figure (II.14)	Schéma du circuit de résonance parallèle	44
Figure (II .15)	Dépendance de W_L , et de W_c sur le facteur de qualité Q, source	45
Figure (II .16)	Exemple de réglage de la batterie de condensateurs	47
Figure (II .17)	Exemple d'un condensateur à protection interne	49
Figure (II.18)	Protection par supprimeur	50

Chapitre III

Figure (III1)	Consommation de l'énergie active et réactive durant 2017	54
Figure (III.2)	Consommation de l'énergie active et réactive durant 2018	55
Figure (III.3)	Consommation de l'énergie active et réactive durant 2019	56
Figure (III.4)	Consommation de l'énergie active et réactive durant 3ans	57
Figure (III.5)	Représentation de la consommation de l'énergie	58
Figure (III.6)	Triangle de puissance	61
Figure (III.7)	modèle de base	66

Liste des figures

Figure (III.8)	représentation la tension et courant sans compensation	66
Figure (III.9)	représentation la courant la charge sans compensation	67
Figure (III.10)	représentation la courant la charge avant et après la compensation	67
Figure(III.11)	représentation la puissance réactive avant et après la compensation	68
Figure (III.12)	Filtre passif résonnant	69
Figure(III.13)	modèle de base.	72
Figure(III.14)	courant travers la batterie et bobine	72
Figure (III.15)	la tension au borne la batterie condensateur.	73
Figure (III.16)	représenté la puissance (P,Q,et Q') avec réacteur	73
Figure (III.17)	la tension au borne réacteur	73
Figure (III.18)	courant service avant et après la compensation avec réacteur	74
Figure (III.19)	représentation la tension et courant avec (compensation + réacteur)	74
Figure (III.20)	la compensation automatique d'une installation en moyen tension avec gradins..	75
Figure (III.21)	Principales caractéristiques des condensateurs	76
Figure(III .22)	Armoire avec batterie de condensateur et un réacteur à base d'inductance	77

Liste des tableaux

Tableau (I.1)	Vue d'ensemble des principales perturbations électriques	14
Tableau (II.1)	Avantages et inconvénients des méthodes CFP	30
Tableau (II.2)	Équipement de la batterie de condensateurs basse tension	35
Tableau (III.1)	La consommation de l'énergie durant 2017 Ans	54
Tableau (III.2)	La somme de consommation de l'énergie active et réactive 2017	54
Tableau (III.3)	La consommation de l'énergie durant 2018 Ans	55
Tableau (III.4)	La somme de consommation de l'énergie active et réactive 2018	55
Tableau (III.5)	La consommation de l'énergie durant 2019 Ans	56
Tableau (III.6)	La somme de consommation de l'énergie active et réactive 2019	56
Tableau (III.7)	L'Énergie consommée dans le mois de Février	58
Tableau (III.8)	Durée de fonctionnement au mois de février	58
Tableau (III.9)	la puissance consommée dans mois de Février 2019	59
Tableau(III.10)	Comparaison des deux cas (sans et avec compensation).	63
Tableau(III.11)	caractéristiques du modèle étudié	65
Tableau(III.12)	caractéristiques du modèle à base de réacteur.	71

Symboles et abréviations

Symbole :

S	Puissance apparent
Sh	Puissance apparente des récepteurs produisant des harmoniques
ST	Puissance Apparente Du Transformateur De l'installation
P	Puissance active
Q	Puissance reactive
Es	Energy apparent
Ea	Énergie active
Er	Puissance réactive absorbée
Q_{GL}	Puissance réactive absorbée
Q_{CO}	Puissance réactive consommée
Q_c	Puissance réactive produit par condensateur (à compensée)
Q_{c totale}	Puissance à compensée totale
Q_{totale}	L'énergie Réactive Totale
U	Tension composé (entre ligne)
U_{ref}	Tension de reference
U₁	Tension alimentation
U₂	Tension à la borne de la charge
I	Courant de line
I_a	Courant active
I_r	Courant réactive
I_t	Courant apparent (total)
I_n	Intensité nominale du condensateur
S_{cc}	La puissance de court-circuit
FP	Facteur de puissance
φ	Déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension)
U	Chute de tension
f	Frequencies
ω	Pulsation du réseau
T	Temps
R	Résistance série de la ligne
L	Inductance
C	Capacité du condensateur
X	Réactance série de la ligne

Symboles et abréviations

Abréviations:

HTA	Haute Tension class A
THT	Très Haute Tension
HT	Haute Tension
MT	Moyenne Tension
BT	Basse Tension

INTRODUCTION GENERAL

Au cours des dernières années, l'intérêt pour la compensation de puissance réactive est être important, principalement en raison de la facturation de cette puissance aux clients par le fournisseur d'énergie, De plus, le prix de l'énergie augmente progressivement, ce qui oblige les usines de l'industrie, les établissements publics et les particuliers à minimiser leur consommation d'énergie, y compris la puissance réactive. L'objectif est de minimiser le flux de puissance réactive dans le réseau d'alimentation et de distribution, éliminer ou minimiser également la puissance réactive aspire à limiter l'énergie active et pour but de réduire le prix de la consommation d'énergie électrique. En effet, SONALGAZ veule que leurs clients compensent la puissance réactive et elle-même détermine la valeur de $\text{tg}\varphi$ à conserver pour éviter de payer la puissance réactive.

Il existe peu de solutions permettant de résoudre le problème de la compensation de puissance réactive. L'un d'eux est la compensation de puissance réactive basé sur des batteries de condensateurs. C'est le dispositif de compensation le plus populaire, principalement pour des raisons économiques, ils sont relativement économiques par rapport à des filtres actifs ou à une compensation au moyen de moteurs électriques.

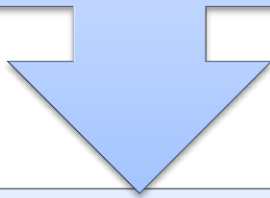
Pour commencer, le but du projet était d'étude et concevoir une batterie de condensateurs à contrôle automatique pour l'université de M'sila avec une puissance nominale devra calculée et une tension de service nominale de 30KV.

La première chose la plus importante avant le dimensionnement des batteries de compensation est de connaître les caractéristiques générales des perturbations électriques, les harmoniques et savoir les différentes origines de ces harmoniques dans le réseau électrique pour éviter les contraintes influent sur les batteries à ce qui présentera dans le chapitre 1.

La prochaine étape pour le chapitre deux consiste à présenter les différents compensateurs de l'énergie réactive dans les installations électriques ainsi que le mode d'installation pour les deux niveaux de tension HTA/BT.

Après cela, une analyse de la consommation d'énergie réactive sera étudiée dans le chapitre trois au compte d'université de M'sila avec des données de trois ans derniers a pour but de savoir une méthode de calcul et dimensionnement les batteries de compensations avec deux propositions de dimensionnement selon le type de charge de l'université.

Chapitre I



Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électrique

I.1 Introduction

Les réseaux de distribution modernes doivent faire face aux nouveaux défis et aux nouvelles opportunités d'un système électrique en pleine évolution technologique, du point de vue technique, le principal changement pour le réseau concerne la nature des charges connectées, d'une part les charges passives classiques ont subi une évolution très importante et d'autre part de nouvelles charges actives ont été connectées au réseau.

Plusieurs types de ces nouvelles charges engendrent des perturbations importantes dans le réseau électrique, ces perturbations peuvent être classées en deux catégories, qui sont :

- Des perturbations causées par les courants perturbateurs, tel que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs.
- Des perturbations causées par les tensions perturbatrices, telle que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées, les creux de tension et les surtensions.

Dans ce premier chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques, ainsi que l'étude des caractéristiques des harmoniques et on cite les différentes origines des harmoniques dans le réseau électrique.

I.2 Théorie de la puissance

I.2.1 Puissance active

La puissance est une mesure de l'énergie par unité de temps. La puissance donne donc le taux d'énergie de la consommation ou la production. Les unités de puissance sont généralement des watts (W). Par exemple, le watt d'évaluation d'un appareil donne le taux de consommation d'énergie. La quantité totale d'énergie consommé par cet appareil est la puissance en watts multipliée par la durée pendant laquelle il a été utilisée ; cette énergie peut être exprimée en unités de wattheures (ou, plus communément, de kilowattheures).

La puissance dissipée par un élément de circuit qu'il s'agisse d'un appareil ou simplement d'un fil est donnée par le produit de sa résistance et le carré du courant à travers : $P = I^2 \cdot R$

Le terme "dissipé" indique que l'énergie électrique est convertie en chaleur. Cette chaleur peut faire partie la fonction prévue de l'appareil comme dans tout dispositif de chauffage électrique, ou il peut être considéré comme un chauffage résistif des lignes de transmission ; le

processus physique est le même. Un autre, La puissance est calculée de manière plus générale comme le produit du courant et de la tension, nous pouvons appliquer la loi d'Ohm pour que les formules: [1]

$$P= I^2.R \text{ et } P = I.V \quad (\text{I.1})$$

$$P= I.V = I.(I.R) = I^2 .R \quad (\text{I.2})$$

I.2.2 -puissance apparente

Appliquer la formule simple $P= IV$ devient plus problématique lorsque la tension et le courant sont qui évoluent dans le temps, comme c'est le cas dans les systèmes à courant alternatif. Dans la notation la plus concise mais la plus abstraite, le pouvoir, Le courant et la tension sont tous des grandeurs complexes, et l'équation de la puissance devient [2].

$$S= I*V \quad (\text{I.3})$$

Ou S est la puissance apparente et l'astérisque désigne le conjugué complexe du I actuel, ce qui signifie que pour les besoins du calcul, le signe (positif ou négatif) de sa composante imaginaire doit être inversé. Tout cela ne devrait pas avoir beaucoup de sens une la discussion sur les quantités complexes et leur représentation par des phases. Dans l'intérêt du développement une compréhension conceptuelle de puissance apparente, remettons à plus tard les élégantes mathématiques et commençons par en considérant directement la puissance, la tension et le courant comme des quantités réelles qui varient dans le temps. Le site la manière fondamentale et correcte d'interpréter la déclaration $P= IV$ quand I et V varient dans le temps est comme un relevé des conditions instantanées. Indépendamment de toutes les complexités à rencontrer, il est toujours varié que la puissance instantanée est égale au produit instantané du courant et tension. En d'autres termes, à tout moment, la puissance est égale à la tension multipliée par le courant instantanée. Cela en écrivant chaque variable en fonction du temps, [2]

$$P (t) = I (t). V (t) \quad (\text{I.4})$$

Où le (t) est le même dans toute l'équation (c'est-à-dire le même instant).

Cependant, la puissance instantanée en tant que telle ne nous intéresse généralement pas beaucoup, dans les systèmes de puissance, nous avons généralement besoin de connaître la puissance transmise ou consommée sur une échelle de temps beaucoup plus grande que 1/60 de seconde. Par conséquent, nous avons besoin d'une expression pour la puissance moyenne sur des cycles entiers de courant et de tension alternatifs. Considérons d'abord le cas d'une charge purement résistive. Tension et sont en phase ; ils oscillent simultanément. La puissance moyenne (le produit moyen de tension et de courant) peut être obtenue en prenant les moyennes (valeurs efficaces) de chacune et ensuite en les multipliant ensemble [2]. Ainsi.

$$P_{act} = I_{RMS} \times V_{RMS} \quad (I.5)$$

La puissance du cas résistif est illustrée dans la figure ci-dessous. Mais considérons maintenant une charge avec réactance. La synchronisation relative de la tension et du courant a été décalée ; leurs maxima ne sont plus coïncidents. En fait, une quantité est parfois négative alors que l'autre est positive. Par conséquent, la puissance instantanée transmise ou consommée (le produit de la tension et du courant) est parfois négative. C'est ce que montre la figure 1. Nous pouvons interpréter la puissance instantanée négative comme disant que l'électricité circule "en sens inverse" le long de la ligne de transmission, ou sort de la charge et revient dans le générateur. [2]

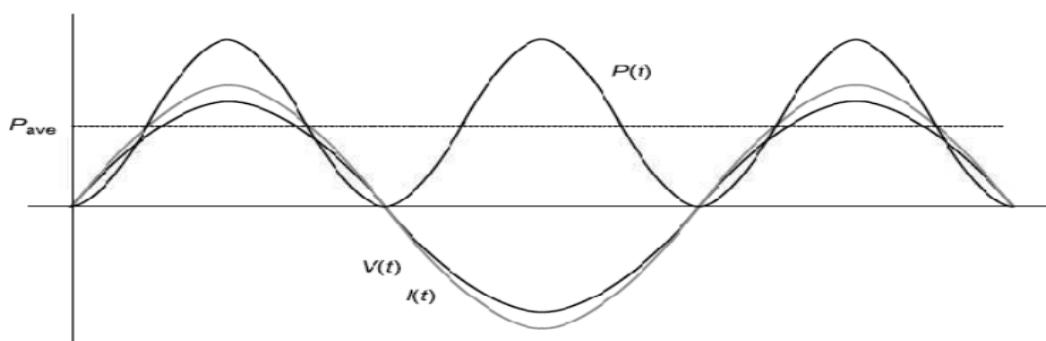


Figure (I.1) La puissance est le produit de la tension et du courant, avec la tension et le courant en phase [2]

L'énergie qui est transférée dans les deux sens appartient aux champs électriques ou magnétiques dans ces charges et générateurs. Comme la puissance instantanée est parfois négative, la puissance moyenne est clairement moindre que dans le cas de la résistance. Mais combien moins ? Heureusement, c'est très facile à déterminer : la puissance moyenne est directement liée à l'importance du déphasage entre tension et courant. Ici, nous sautons la dérivation mathématique et nous déclarons simplement que la réduction en puissance moyenne due au déphasage est donnée par le cosinus de l'angle du déphasage :

$$P_{ave} = I_{RMS} \times V_{RMS} \times \cos \phi \quad (I.6)$$

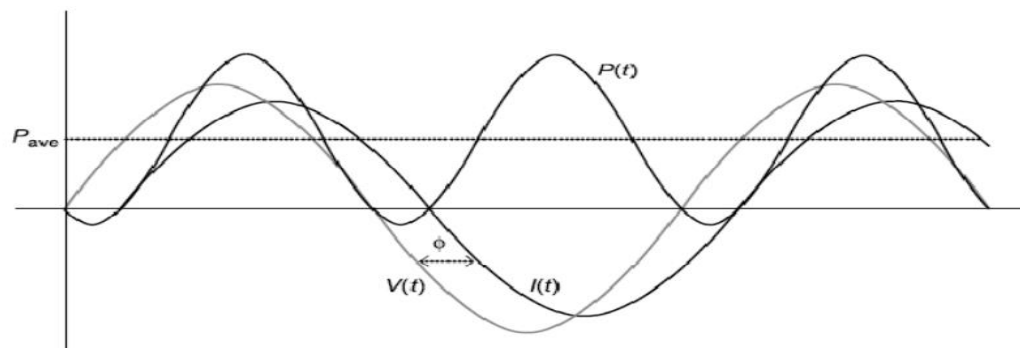


Figure (I.2) La puissance est le produit de la tension et du courant,

Le courant étant en retard par rapport à la tension d'un angle de phase [1], le facteur $\cos \phi$ est appelé le facteur de puissance, souvent abrégé pF. Cette même équation peut aussi être rédigée comme

$$P_{ave} = \frac{1}{2} I_{MAX} \times V_{MAX} \times \cos \phi \quad (I.7)$$

Qui est identique car chaque valeur efficace est liée à la valeur maximale (amplitude) par un facteur de $\frac{1}{\sqrt{2}}$. Cette équation est vraie pour tout type de charge. Dans le cas particulier où il n'y a que résistance et pas de déphasage, nous avons $\phi=0$ et $\cos \phi=1$, il n'est donc pas nécessaire d'écrire le $\cos \phi$, et nous obtenons la formule de la page précédente. Dans un autre cas particulier où la charge est purement réactive (n'ayant aucune résistance), le déphasage serait de $\phi=90$ et $\cos \phi=0$, ce qui signifie que la puissance n'oscille que dans un sens ou dans l'autre, mais elle n'est pas dissipée (la puissance moyenne est nulle). La puissance moyenne correspond à la puissance

effectivement transmise ou consommée par la charge. Elle est également appelée puissance réelle, puissance active ou puissance réelle, et se mesure en watts.

Il y a d'autres aspects de la puissance émise que nous souhaitons préciser. Le produit du courant et la tension, quel que soit leur déphasage, est appelée puissance apparente, désignée par le symbole S . [2]

$$S = I_{RMS} \times V_{RMS} \quad (I. 8)$$

Bien que le pouvoir apparent et le pouvoir réel aient physiquement les mêmes unités, ils sont exprimés différemment pour maintenir une distinction évidente. Ainsi, les unités de puissance apparente sont appelées voltampères (VA). [2]

La puissance apparente est importante dans le contexte de la capacité des équipements. En fait, la quantité cruciale en ce qui concerne les limites de capacité thermique n'est que le courant. Dans la pratique, cependant, le courant est souvent Il n'est pas pratique de le préciser. Comme la tension de fonctionnement d'un équipement donné est généralement assez constante, la puissance apparente est une bonne façon d'indiquer le courant. Le fait est que la puissance apparente La puissance est une bien meilleure mesure du courant que la puissance réelle, car elle ne dépend pas du facteur de puissance. Ainsi, les puissances nominales des équipements des services publics sont généralement indiquées en kVA ou MVA [2].

I.2.3 -Puissance réactive

Enfin, nous précisons également ce que nous pourrions intuitivement considérer comme la différence entre les et la puissance réelle, à savoir la puissance réactive. La puissance réactive est la composante de la puissance qui oscille d'aller et venir à travers les lignes, étant échangés entre les champs électriques et magnétiques et non se dissiper. Il est désigné par le symbole (Q), et sa magnitude [3]

$$Q = I_{RMS} \times V_{RMS} \times \sin \phi \quad (I.9)$$

Là encore, notez comment l'équation converge pour le cas résistif où $\phi=0$ et $\sin \phi=0$, comme il n'y aura pas de puissance réactive du tout. La puissance réactive est mesurée en VAR (également écrit Var ou VAR), pour volt-ampère réactive. Nous pouvons représenter la puissance comme un vecteur dans le plan complexe : à savoir, et une flèche de longueur S

(puissance apparente) qui fait un angle Φ avec l'axe réel. Il s'agit de comme le montre la figure ci-dessous. L'angle Φ est le même que la différence de phase entre le voltage et actuel. [3]

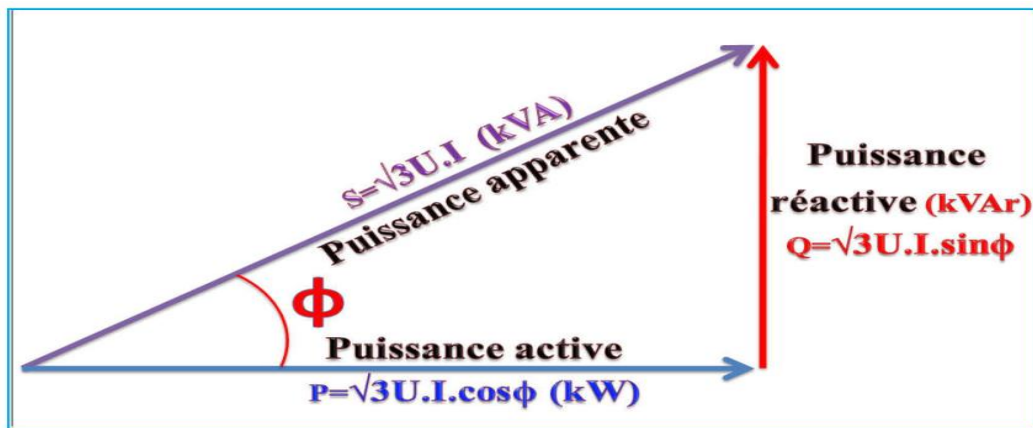


Figure (I.3) Triangle de puissance, source [3]

I.2.4 - Récepteurs et sources de puissance réactive

Il est courant que les dispositifs qui consomment le courant inductif réactif soient appelés les récepteurs de puissance réactive, tandis que les dispositifs consommant du courant capacitif réactif sont appelés les sources d'énergie réactive. [4]

La plupart des équipements industriels consomment de la puissance réactive. Ces appareils sont électriques moteurs, transformateurs, conducteurs, selfs, convertisseurs, fours à arc et électronique de puissance. Dans un circuit aléatoire sans source, la puissance réactive est associée à la fréquence et à la valeur de crête de l'énergie stockée périodiquement dans le champ magnétique et électrique des éléments de circuit. [4]

La puissance réactive des éléments inductifs et capacitifs, respectivement Q_C et Q_L , peut-être exprimée en :

$$Q_L = UI \sin \frac{\pi}{2} = \omega LI^2 \quad (\text{I.10})$$

$$Q_C = UI \sin \left(-\frac{\pi}{2}\right) = \omega Lu^2 \quad (\text{I.11})$$

En se basant sur la loi de la conservation de l'énergie, la puissance réactive de l'entrée dans la source est égal à la somme algébrique de la puissance réactive des éléments inductifs et capacitifs inclus dans un circuit, c'est-à-dire : [4]

$$Q = \sum Q_C + Q_L \quad (I.12)$$

Pour tout circuit électrique, on sait que l'énergie réactive générée est égale à l'énergie consommée. D'après cela, la plupart des charges dans l'industrie sont des charges a besoin d'une énergie réactive inductive pour les fonctionner. Pour cette raison, la demande de puissance réactive est beaucoup plus que ce que le générateur est capable de produire. Par conséquent, il existe des dispositifs qui doivent être connecté au système afin de fournir une source supplémentaire de puissance réactive inductive ou de dispositifs qui absorbera la puissance capacitive. Ces types de dispositifs sont : des batteries de condensateurs, des moteurs, et des sources électroniques de puissance réactive. La coopération de la compensation Les appareils à circuits linéaires font diminuer la composante réactive du courant d'alimentation. [4]

I.3 - Composante active et réactive du courant

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

I.3 1 - Courant actif (I_a) : Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau engendre la puissance active.

I.3 2 - Courant réactif (I_r) : 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 2-Courant apparent (I_t) : 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.

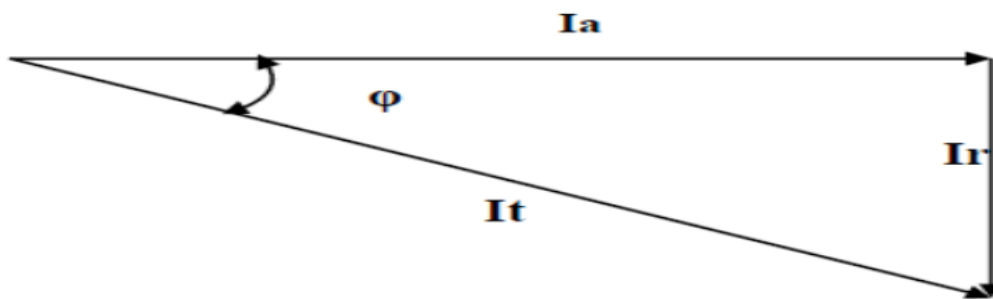


Figure (I.4) Diagramme vectorielle des courants.

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{I.13})$$

$$I_a = I_t \times \cos \varnothing \quad (\text{I.14})$$

$$I_r = I_t \times \sin \varnothing \quad (\text{I.15})$$

\varnothing : Angle de déphasage entre les composantes active et les composantes apparentes

I.4 Perturbations de la tension

I.4.1 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe. [5]

I.4.1.1 Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. [6]

I.4.1.1 Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau. [6]

I.4.1.2 Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$ pendant 99 de l'année, et $\pm 0,5\% - 6\% \div 4$ durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes. [6]

I.4.1.3 Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits. [6]

I.4.1.4 Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre. [6]

I.4.1.2 Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension. [6]

I.4.2 Classification des perturbations électriques

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques :

- les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, Flicker),
- les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale :
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, interharmoniques, bruits),
- la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée :

- les perturbations transitoires,
- les perturbations de courte durée,
- les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le

réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre. Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.

Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

- les défauts au sein des réseaux électriques.
- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...).
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Le tableau I.1 récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la tension est également indiquée en pu (per units) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude. [5]

Durée	Type de perturbations	Amplitude	Origine	Conséquences
<10ms	Transitoires (impulsions et oscillations)	-	Déclenchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutations	Dysfonctionnements gênants
10ms – 1min	Creux de tension	0.1 – 0.9 pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Coupures brèves	<0.1 pu	Courts-circuits	Arrêts d'équipements, pertes de production

	Surtensions	1.1 – 1.8 pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels
Régime établi	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Variations rapides de tension (Flicker)	0.1 – 7 %	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0 – 20%	Charges non linéaires (structures d'électronique de puissance, arcs électriques)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels
	Interharmoniques	0 – 2%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Bruit	0 – 1%	Fours à arc, charges non linéaires	Echauffements, pertes, vieillissements
	Variations de la fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

Tableau : (I.1) Vue d'ensemble des principales perturbations électriques [5]

I.4.3 -Creux de tension et coupures brèves

I.4.3.1 -Définition, origine et conséquences

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min [IEEE Std. 1159]. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min.

Les creux de tension ont pour principale origine les court-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les court-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures

brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (voir figure I.1a). Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (voir figure I.1b). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases. Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.

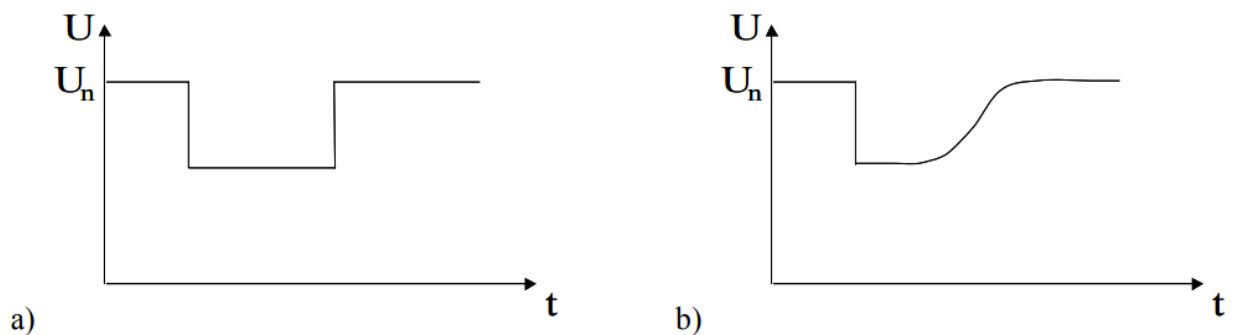


Figure : (I.5) Amplitude d'un creux de tension provoqué par a) un court-circuit b) le démarrage d'un moteur de forte puissance.

Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes. [5]

I.4.3.2 Représentation dans le plan complexe

Les creux de tension monophasés se caractérisent principalement par leur amplitude et leur phase. L'amplitude des creux de tension est liée à leur proximité par rapport au défaut, la nature du défaut et la puissance de court-circuit du réseau. La durée du creux de tension est liée au temps d'élimination du court-circuit par les protections du réseau ou des installations raccordées. En plus de la durée et de l'amplitude, les creux de tension triphasés se caractérisent par le déphasage entre les tensions de phase qui dépend de la nature et de l'endroit du défaut. Les creux de tension triphasés sont souvent analysés dans le plan complexe, où les trois grandeurs sont représentées sous forme des vecteurs caractérisés par leur amplitude et leur phase, appelés également phaseurs. La relation entre les phaseurs dans le plan complexe est appelée signature ou type du creux de tension. Par exemple, le creux de tension de figure (I. 6. (a)) se caractérise par la signature présentée en figure (I.6. (b)) [5]

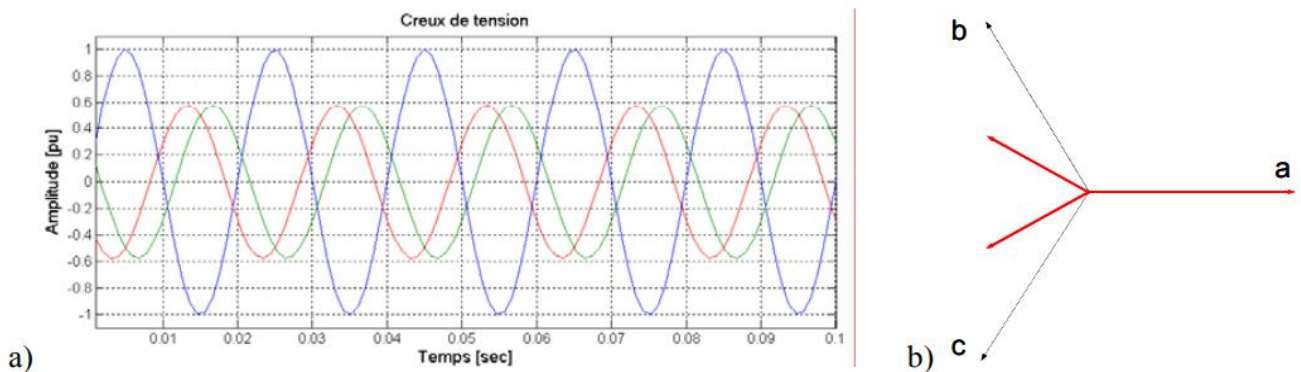


Figure (I.6). Creux de tension (a) et sa signature dans le plan complexe (b)

I.5 Propagation

I.5.1 Propagation en amont et en aval du réseau

Les creux de tension se propagent en amont et en aval du réseau, et leur sévérité dépend de l'endroit de mesure du creux de tension par rapport à l'événement qui l'a engendré.

La propagation des creux de tension en amont dépend de deux paramètres : la puissance de court-circuit et la distance entre l'endroit de défaut et l'endroit de mesure. Plus la puissance de court-circuit est élevée et le défaut éloigné, plus le creux de tension est atténué.

Pour mieux illustrer la propagation des creux de tension, l'exemple d'un diviseur de tension monophasé affecté par un court-circuit franc au point D est présenté en figure I.3.

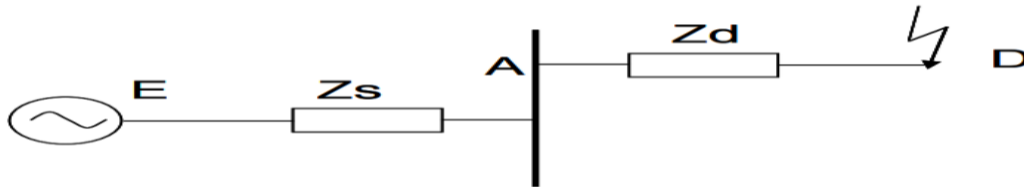


Figure (I.7) Diviseur de tension pour l'étude de la propagation des creux de tension

La tension à l'endroit du défaut D est nulle, puisque le court-circuit est franc. La tension à l'endroit de mesure A est donnée par :

$$V_a = \frac{Z_d}{Z_d + Z_s} \times E \quad (\text{I.16})$$

Si la distance électrique entre l'endroit de défaut et le point de mesure A est importante, l'impédance de ligne Z_d se caractérise par une valeur importante. En conséquence, l'amplitude de la tension V_A est proche à celle de la source E, c'est à dire que le creux de tension mesuré au point A est atténué par rapport au creux de tension mesuré au point D.

Si la puissance de court-circuit au niveau de la source est importante, l'impédance de la source Z_s est faible. En conséquence, la tension V_A est proche de la tension de la source et le creux de tension à l'endroit de la mesure se caractérise par une profondeur moins importante que le creux de tension à l'endroit de défaut.

Le diviseur de tension de figure (I.7) montre que les creux de tension sont atténués lorsqu'ils se propagent en amont dans le réseau. En revanche, les creux de tension se propagent en aval sans s'atténuer. En effet, si on reprend l'exemple de figure (I.7) en supposant que le court-circuit franc est produit avant le point de mesure A, la tension à l'endroit de mesure est nulle et par conséquent, le potentiel du point aval D est également nul. [5]

I.5.2 Surtensions et surintensités

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues

à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1,73 pu, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1,5 pu.

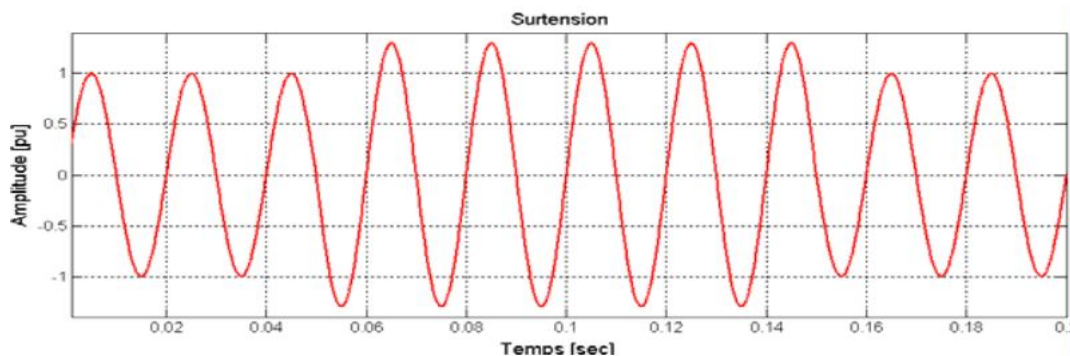


Figure (I.8) Exemple de surtension

Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par Ferro résonance ou par des manœuvres sur le réseau. Ce type de surtensions se caractérise généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires. [5]

I.5.3 Variations de tension

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension qui se manifestent sous deux formes principales :

- Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les $\pm 10\%$ de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.
- Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25. Ces variations sont dues aux charges dont Hz la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatiles ou

à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs. [5]

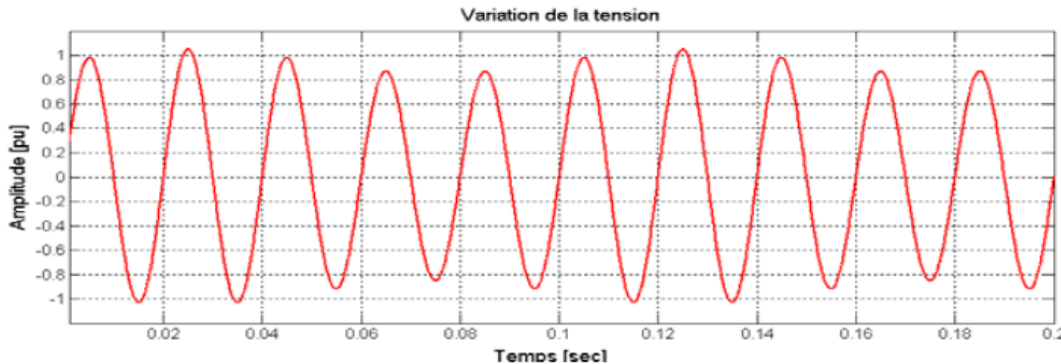


Figure (I.9) Exemple de variation de tension

I.5.4 Déséquilibre

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré figure (I.10).

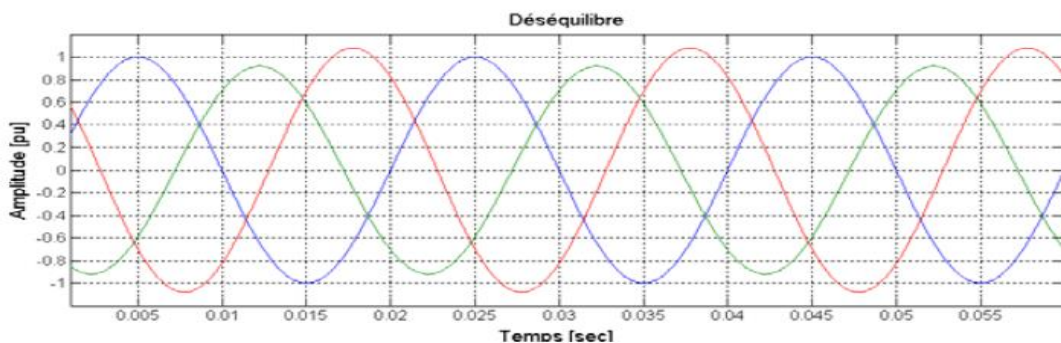


Figure (I.10) Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques.

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre.

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase. [5]

I.5.5 Perturbations harmoniques [7]

Les composantes sinusoïdales d'un signal de fréquences multiples de sa fréquence fondamentale s'appellent harmoniques. L'harmonique de fréquence kf_0 , où f_0 est la fréquence fondamentale et k est un nombre réel positif est dit de rang k .

Les composantes sinusoïdales dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence fondamentale du signal sont nommées les interharmoniques. Les composantes sinusoïdales, dont la fréquence est inférieure à la fréquence fondamentale sont appelées infra harmoniques.

Les perturbations harmoniques sont dues à l'insertion au réseau des charges non linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, etc.). Les harmoniques provoquent des échauffements qui, à terme, diminuent la durée de vie des équipements. Ils peuvent également être à l'origine de troubles fonctionnels (synchronisation, commutation) et d'erreurs de mesure.

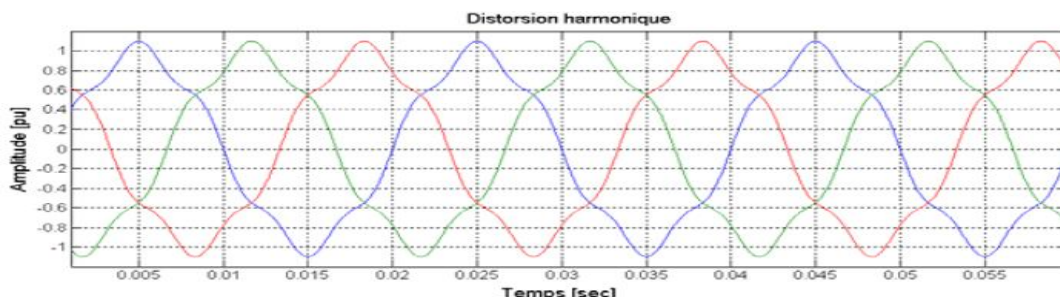


Figure (I.11) Représentation temporelle d'une distorsion harmonique (harmonique de rang 5) [7]

I.5.5.1 Harmoniques

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.).

I.5.5.2 Convertisseurs statiques

- Les cyclo convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif. Ils génèrent des spectres Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée. Un redresseur commandé en pleine onde de p pulsations engendre, du côté continu, des harmoniques de rang P_n , ($n=1,2,3\dots$) et du côté alternatif, des harmoniques de rang $1 \text{ pn} \pm$. Un redresseur commandé en MLI synchrone engendre des harmoniques de rang pair du côté continu et de rang impair du côté alternatif, si l'indice de modulation $m = f_{MLI}/f_0$ est impair et des harmoniques pairs et impairs de deux côtés si m est pair, généralement riches en fréquences et dépendant de leur structure et de leur commande.

Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux. Les gradateurs génèrent des harmoniques dont l'amplitude et la phase dépendent de l'angle d'allumage des thyristors. [7]

I.5.5.3 Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire

Parmi les dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire on distingue :

Les fours à arc : les fours à arc sont connectés directement au réseau de transmission, généralement sans recours à un filtrage adéquat. Leur impédance varie de manière aléatoire et de surcroît, elle est particulièrement asymétrique. Par ailleurs les fours à arc génèrent des harmoniques de toutes les fréquences, ainsi que des inters harmoniques dont les amplitudes dépassent nettement le bruit de fond.

Les inductances saturées, de telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de ce fait provoquent par contre-réaction des déformations notables de ce courant.

Les transformateurs, à cause de leur caractéristique tension-courant non linéaire, les transformateurs génèrent des harmoniques qui dépendent sensiblement de l'amplitude et de la forme de la tension d'alimentation.

Les machines tournantes. Elles engendrent des harmoniques d'amplitudes souvent négligeables. Les petites machines synchrones sont toutefois génératrices de tensions harmoniques de rang 3. [7]

I.5.5.4 Inter harmoniques

L'analyse harmonique des courants et des tensions nous indique qu'en plus des harmoniques de rang entier, il existe des interharmoniques. Ceux-ci ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande.

Les interharmoniques ont principalement pour origine :

Les imperfections du convertisseur et de sa commande (chutes de tension dans les thyristors, variation ou inégalité des angles de commutation, variation de l'impédance vue du côté continu du redresseur.

L'association de plusieurs convertisseurs fonctionnant à des fréquences différentes : variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif.

- les convertisseurs statiques de commande non périodique.
- les fours à arc et les cyclo convertisseurs [8].

I.6 Le facteur de puissance

Par définition le facteur de puissance autrement FP dit le $\cos \phi$ d'un appareil électrique est égal au rapport de la puissance active P (kW) sur la puissance apparente S (kVA) et peut varier de 0 à 1.

$$F_p = \cos \varnothing \cdot \frac{P(kw)}{S(kva)} \quad (\text{I. 17})$$

Il permet ainsi d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive. Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive (*inductance*).

Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (*inductance*). Les appareils de comptage d'énergie enregistrent les consommations d'énergie active et réactive. Les fournisseurs d'électricité font généralement apparaître le $\tan \varnothing$ terme au niveau de leur facture.[2]

$$\tan \varnothing = \frac{Q(kvar)}{p(kw)} = \frac{E_r(kvarl)}{E_a(kwh)} \quad (\text{I. 18})$$

Le $\tan \varnothing$ est le quotient entre l'énergie réactive, (kVArh) et l'énergie active (kWh) consommée pendant la même période.

À l'inverse du $\cos \varnothing$, on s'aperçoit facilement que la valeur du $\tan \varnothing$ doit être le plus petit possible afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive. Le $\cos \varnothing$ et $\tan \varnothing$ sont liés par la relation suivante. [4]

Les récepteurs consommant le plus d'énergie réactive sont :

- ✓ Les moteurs à faible charge.
- ✓ Les machines à souder.
- ✓ Les fours à arc et induction.
- ✓ Les redresseurs de puissance.

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

- ✓ La suppression de la facturation d'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.

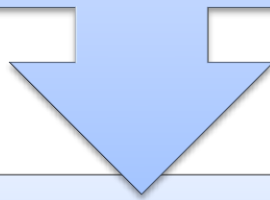
✓L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire

$$F_p = \cos \phi = \frac{1}{\sqrt{(1+\tan \phi)^2}} \quad (\text{I.19})$$

I.7 Conclusion

Les principales perturbations électriques et leurs caractéristiques ont été présentées dans ce chapitre. Dans la suite, une description générale sur la compensation d'énergie réactive et leurs choix selon le niveau de tension avec une généralité sur le filtrage et ses avantages dans les réseaux électriques.

Chapitre II



**Compensation l'énergie
réactive**

II .1 Introduction

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

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 condensateurs. L'association des condensateurs et de bobines d'inductances commandés par des thyristors permet de réaliser des systèmes statiques, capables de produire ou d'absorber de la puissance réactive de manière continue entre deux limites.

II .2 Méthodes de compensation de la puissance réactive

D'une manière générale, une valeur indésirable du facteur de puissance causée par une charge inductive connectée au réseau d'alimentation peut être corrigée (compensée) au moyen de charges ayant un comportement capacitif. En pratique, il existe deux méthodes de compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques, Pour les réseaux électriques non complexes où il y a une petite quantité de charges inductives, la méthode naturelle de compensation peut être suffisante, surtout lorsque les paramètres souhaités du réseau ne sont pas excessifs. Dans le cas de grands réseaux électriques, la méthode mentionnée n'est pas suffisante, il est donc nécessaire d'améliorer les paramètres du réseau au moyen d'une méthode de compensation artificielle de la puissance réactive. [4]

II.3 Correction du facteur de puissance individuel, partiel et global

Il y a peu de configurations possibles de systèmes de compensation, mais il y a trois types de systèmes de base les méthodes que l'on peut distinguer : [5]

II.3.1 Correction unique (fixe) du facteur de puissance

Mis en pratique par le raccordement d'un condensateur de puissance directement aux terminaux d'un appareil qui doit être indemnisé. Grâce à cette solution, La charge du réseau électrique est réduite au minimum, puisque la puissance réactive est générée aux bornes de l'appareil.

Cette méthode élimine les dispositifs de contrôle, puisque le condensateur est mis en marche et arrêté au moyen du même interrupteur que l'appareil. Le principal inconvénient de cette méthode, c'est que le condensateur n'est pas utilisé lorsque l'appareil ne fonctionne pas. En outre, la série de Le type de condensateurs proposés par les fabricants n'est pas toujours suffisant pour répondre aux exigences.

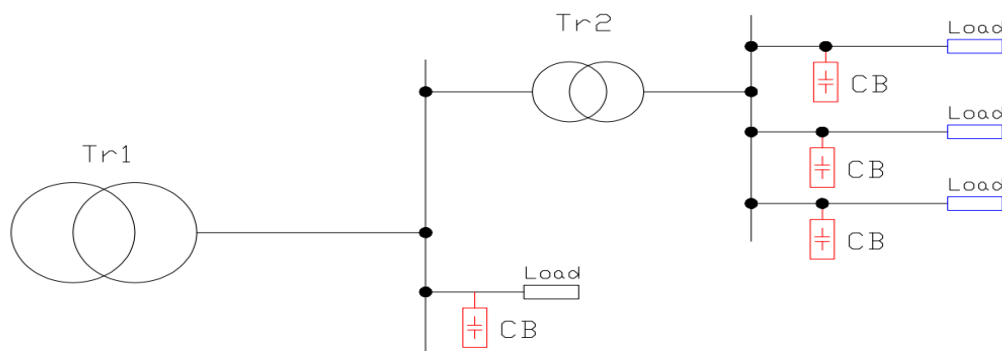


Figure : (II .1) Illustration de la Correction unique (fixe) du facteur de puissance

La figure ci-dessus illustre la connexion des batteries de condensateurs (CB) dans un exemple de système électrique. Il s'agit de On peut remarquer que chaque disjoncteur est directement connecté à une charge particulière.

II.3.2 Correction du facteur de puissance du secteur

Cette méthode est plus efficace que la précédente. La méthode PFC de groupe suppose la compensation d'un groupe de charges alimentées par le même appareillage de commutation. La batterie de condensateurs est généralement contrôlée par un dispositif à microprocesseur appelé "Power régulateur de facteur. De plus, cette méthode force l'application d'une protection pour les condensateurs de puissance.

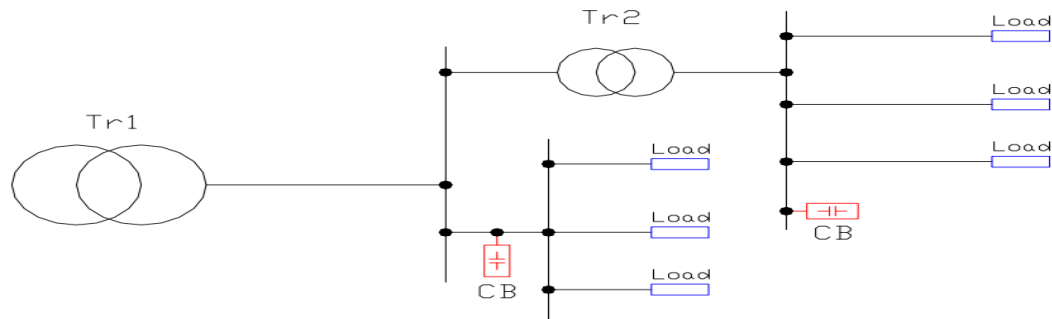


Figure : (II.2) : Illustration de la correction du facteur de puissance du groupe

Dans ce cas, des batteries de condensateurs sont connectées aux barres omnibus, qui alimentent un groupe de charges.

II.3.3 Compensation globale

Cette méthode suppose un dispositif de compensation pour l'ensemble de l'objet (à l'intérieur du poste de transformation ou dans le poste de commutation). Cette solution permet de réduire au minimum les émissions totales de la puissance réactive à installer et le facteur de puissance peuvent être maintenus au même niveau avec l'utilisation d'une régulation automatique qui rend l'IP proche de celle souhaitée. L'inconvénient est que le réseau d'alimentation et de distribution, le transformateur ainsi que le secteur alimentant tous les l'équipement est chargé par un courant réactif.

Ce type de méthode de compensation exige que les batteries de condensateurs aient une large gamme de puissance qui peut être déterminée par des mesures effectuées 24 heures sur 24 sur le lieu d'installation du CB. Ce n'est pas la meilleure solution pour les grandes installations électriques, surtout lorsque la distance entre la source et les récepteurs non linéaires est longue. Plus la distance est grande, plus les pertes sont importantes dans le système de transmission. C'est pourquoi la méthode de PFC la plus couramment utilisée est le groupe tandis que pour les charges non linéaires de grande puissance, une compensation unique est appliquée. [9] [10]

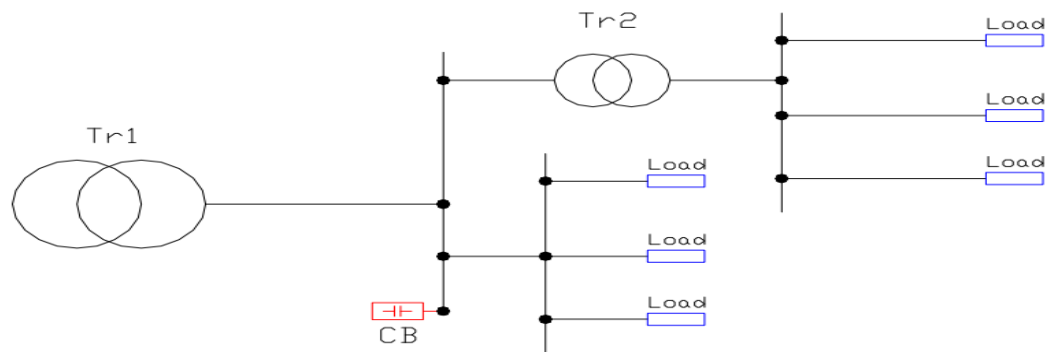


Figure :(II.3) Illustration de la correction globale du facteur de puissance .

En fait, chaque méthode peut être appliquée pour la compensation de la puissance réactive en puissance mais chacun avec une efficacité différente. Afin de mettre en pratique une méthode particulière, il est nécessaire pour remplir certaines conditions. Les facteurs qui déterminent le choix de satisfaire sont les suivantes [5] [9] [10] :

- Nombre de récepteurs dans un réseau et combien d'entre eux ont besoin de (PFC).
- Niveau de compensation demandé pour le réseau.
- Taille et complexité de la grille.
- Possibilité d'un arrangement (CB).
- Type d'équipement connecté au réseau compensé et son comportement (inductif/capacitif).
- Présence harmonique d'ordre supérieur.

Parfois, en fonction des facteurs énumérés ci-dessus, il faut appliquer plus d'une méthode pour satisfaire aux exigences de la (CPF) [5] [9].

II.3.4 -Avantages et inconvénients des méthodes de CFP

Une fois que toutes les méthodes PFC (correction facteur de puissance) ont été examinées dans la section précédente, on peut se concentrer sur les avantages et les inconvénients de chacun.

Méthode de la CFP	Avantages	Inconvénients
Fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Indemnisation sur place De la puissance réactive générée. - Petite puissance de condensateur - Pas de régulateur pour le contrôle. 	<ul style="list-style-type: none"> - Éteindre l'appareil arrête le fonctionnement de batterie de condensateurs - Grande quantité de unités de compensation -Ne compense pas grille entière
Groupe	<ul style="list-style-type: none"> -Nombre minimal de Comparaison des batteries de condensateurs avec l'indemnisation unique - Certaines parties de Les principaux sont compensés (plus proche de la source) 	<ul style="list-style-type: none"> - mauvaise adaptation aux paramètres principaux -a très souvent besoin les dispositifs de contrôle (PFR) - plus cher que le vrac l'indemnisation en termes de le plus grand nombre de les batteries de condensateurs
En vrac	<ul style="list-style-type: none"> - La méthode le moins chère - Nombre limité de batteries de condensateurs 	<ul style="list-style-type: none"> -Assurer une valeur constante de $tg\phi$. -Le réseau à l'intérieur d'un objet n'est pas suffisamment compensé - Risque de distorsions et phénomène de résonance occurrence
Compensation automobile	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de distorsions supplémentaires - Indemnisation effective méthode 	<ul style="list-style-type: none"> -Le plus chère méthode de compensation - Pertes d'énergie pour la surexcitation des synchrone et synchronisée. - Espérance de vie plus courte de moteur électrique La grille - n'est pas entièrement compensé

Tableau : (II .1) Avantages et inconvénients des méthodes CFP.

II.4 Dispositifs de compensation de la puissance réactive

Dans la plupart des cas, le PFC est utilisé pour des raisons économiques. En utilisant un dispositif de compensation, on peut économiser sur la facture d'électricité ainsi que de conserver certains paramètres du réseau déterminés par le fournisseur d'énergie.

La correction du facteur de puissance donne encore plus de bénéfices, que les seules économies. Compenser "inutilement puissance réactive la capacité de transport de courant d'un réseau existant peut être suffisante pour envoyer plus de puissance active à travers elle, en maintenant les mêmes puissances de l'appareil dans la zone d'alimentation et système de distribution. La PFC permet également de diminuer les pertes de transmission et de limiter les chutes de tension.

En général, la fiabilité du réseau s'améliore. Mais il faut savoir que la compensation appareil connecté au réseau, peut également avoir des conséquences négatives comme :

- Génération de transition.
- Génération d'harmoniques d'ordre supérieur.
- Une hausse de tension durable.
- Gain d'harmoniques d'ordre supérieur.
- Chute de tension, coupures et surtensions de courte durée.
- Autres types de distorsions.

Tout cela peut être causé par quelques raisons, comme le phénomène de résonance, des erreurs de conception, l'utilisation d'un équipement inadapté, d'une mauvaise exploitation. Mais malgré toutes les conséquences négatives, il y a également positifs, ce qui améliorera certainement la qualité de l'énergie. Il s'agit des points suivants :

- Limitation de la puissance réactive.
- Ajustement d'une tension aux bornes des récepteurs (charge).
- Filtration harmonique d'ordre supérieur.
- Symétrisations de la tension de phase.

- Limitation des variations de tension et du scintillement.

Compte tenu de ce qui précède, avant de décider du type de dispositif de compensation qui sera utilisé dans un cas particulier, il y a quelques facteurs et conditions qui doivent être pris en considération, comme [9] :

- La classification du réseau, c'est-à-dire la tension, la fréquence et sa valeur réelle (mesure).

- Demande de puissance réactive inductive en tenant compte de l'objectif de compensation.

- Dynamique de la charge.

- Présence d'harmoniques d'ordre supérieur d'un courant et d'une tension.

- Paramètres de court-circuit à l'emplacement futur de la batterie de condensateurs.

- Conditions ambiantes.

- Lieu d'installation.

II.4.1 Les dispositifs de compensation peuvent être classés en quatre groupes

- Compensateurs à base de condensateurs de puissance.

- Compensateurs et filtres actifs pour l'électronique de puissance.

- Systèmes de compensation hybrides (à base de condensateurs de puissance et d'électronique de puissance).

- Machines synchrones.

II.4.2- Dispositifs de compensation à base de condensateurs de puissance

La méthode de correction du facteur de puissance basée sur les condensateurs de puissance est le plus grand groupe utilisé dans l'industrie et par les utilisateurs privés, principalement pour des raisons économiques. Sur d'autre part, ils peuvent être à l'origine de distorsions indésirables sur le lieu d'opération. C'est pourquoi ils doivent être sélectionnés avec soin, conformément aux normes en vigueur.

En termes de tension nominale des condensateurs, on peut distinguer deux groupes de batteries de condensateurs :

- Basse tension ($U_n \leq 1000V$).
- Haute tension ($U_n \geq 1000V$).

II.5 Batterie de condensateurs basse tension

Il existe de nombreux fabricants sur le marché qui proposent des dispositifs de puissance réactive compensation. Les plus couramment utilisées sont les batteries à base de condensateurs. Afin de faire correspondre le disjoncteur approprié aux paramètres du réseau, la puissance apparente, la source d'harmoniques (S_N) et le transformateur (S_T) doivent être connus. Ensuite, en fonction de son rapport, c'est-à-dire ($\frac{S_N}{S_T}$) Exprimé en pourcentage, il est possible de classer les batteries de condensateurs de la manière suivante [6] :

a) Banques de condensateurs standard $\rightarrow \frac{S_N}{S_T} \leq 15\%$

La tension nominale des éléments du disjoncteur est la même que la tension nominale de l'alimentation réseau.

b) Banques de condensateurs surévaluées $\rightarrow 15\% < \frac{S_N}{S_T} \leq 25\%$

Les condensateurs de puissance ont une tension nominale supérieure à la tension nominale du réseau lorsque CB doit être installé. Ce type de disjoncteur n'est pas équipé de réacteurs

c) Banques de condensateurs désaccordées $\rightarrow 25\% < \frac{S_N}{S_T} \leq 60\%$

Ce type est équipé de réacteurs et de condensateurs surdimensionnés connectés en série (circuit d'acceptation). Ils peuvent être utilisés sur le secteur, où les harmoniques d'ordre supérieur sont présents.

Si le ratio de $\frac{S_N}{S_T} \geq 60\%$, il est demandé d'utiliser un filtrage harmonique avec un condensateur.

Les filtres doivent être réglés sur une harmonique ou un groupe d'harmoniques particulier.

Les photos ci-dessous montrent un exemple de configuration d'une batterie de condensateurs (MV).

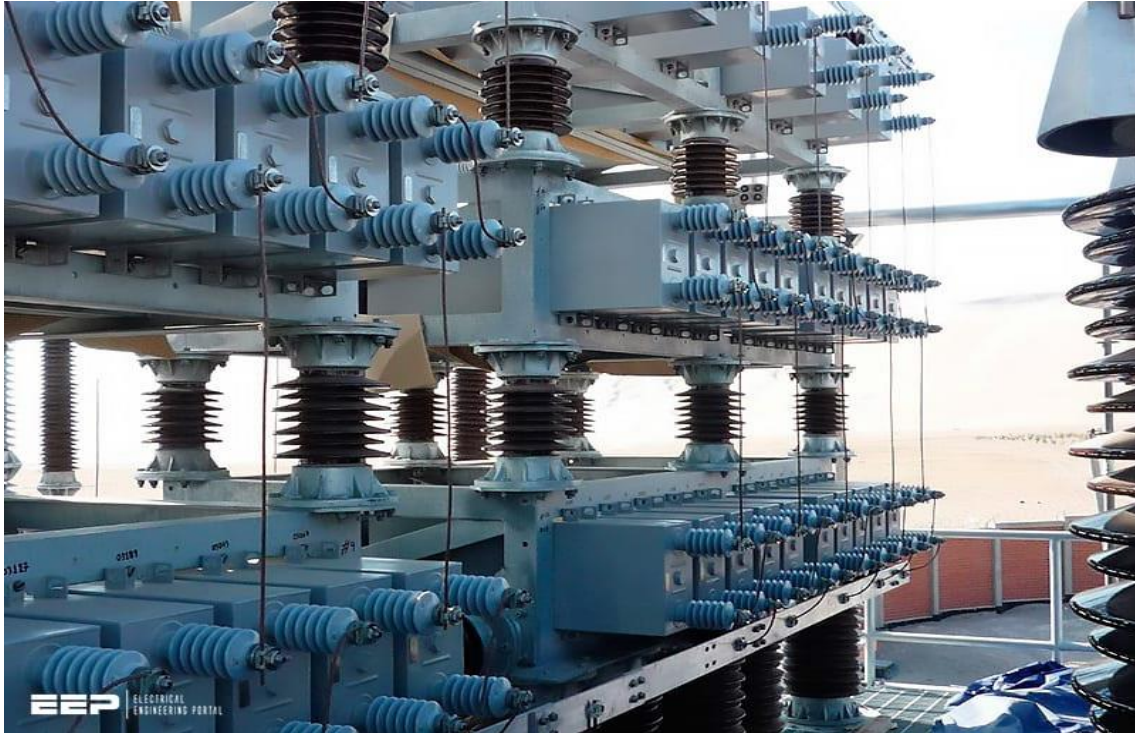


Figure (II .5) Batterie de condensateurs HTA.

II.5.1 Conception standard des batteries de condensateurs

La batterie de condensateurs standard se compose des segments suivants [10] [12] [9] :

- Élément d'alimentation.
- il assure la connexion au réseau électrique.
- Section des câbles.
- comprend la protection des condensateurs, des appareils de commutation et des unités de condensateurs.
- Circuit de contrôle, ce circuit mesure le facteur de puissance réel et décide si connecter ou non les condensateurs.

Le circuit électrique de la batterie de condensateurs peut être divisé en deux groupes :

- Circuit de courant principal.
- Circuit de contrôle.

Le circuit de courant principal est responsable du transfert de l'énergie électrique tandis que le contrôle est responsable.

Le mesure et la prise de décision. Habituellement, dans le cas de batteries de condensateurs désaccordés, il existe une règle selon laquelle suppose un facteur de désaccord commun pour chaque étape du PC. Dans le cas contraire, il y a un risque de surcharge.

II.5.2 Équipement de la batterie de condensateurs

Le matériel de commutation ainsi que la protection des condensateurs contre les courts-circuits doivent être choisis de manière à qu'ils peuvent facilement gérer le courant nominal du condensateur. En outre, ils devraient être capables de supporter 1,3 x le courant nominal passant par le condensateur. Habituellement, l'écart de capacité de la puissance de condensateurs peuvent aller jusqu'à $\pm 10\%$ de la valeur nominale. Par conséquent, le courant circulant dans le condensateur peut atteindre une valeur plus élevée, c'est-à-dire $1,3 \times 1,1 = 1,43$ fois le courant nominal de l'unité de condensateur. De plus, le fonctionnement en commutation peut provoquer des surintensités de haute fréquence. Pour cette raison, tous les l'appareil utilisé dans la batterie de condensateurs doit être adapté à ces conditions [5].

Le tableau ci-dessous présente la batterie de condensateurs basse et haute tension la plus courante matériel :

Tension niveau	Condensateurs	Appareil de commutation	Protection	Automatisation
Basse tension	Le plus souvent Utilisés sont delta Connecté (en interne) condensateurs triphasés	Contacteurs spécialement conçus pour les condensateurs avec module supplémentaire pour la limitation des surtensions de commutation	Fusibles, interrupteur sectionneur, fusible, protection du contrôle circuit	Régulateur de facteur Puissance
Haut Tension	Une phase avec un où Deux isolateurs Trois phases, généralement Connecté en étoile (En interne), parfois connecté delta	Contacteur à vide où SF6	Fusibles HV Relais de surintensité Ou le dégagement de surtension coopérer avec deconnecteurs	Régulateur puissance réactive

Tableau :(II.2) Équipement de la batterie de condensateurs basse tension [5].

En résumé, la conception de la batterie de condensateurs doit être sûre pour l'équipe de maintenance, les appareils doivent tenir compte de toutes les surtensions et surintensités qui peuvent se produire lors de la commutation. Tous les équipements doivent être facilement disponibles pour être remplacés en cas de défaillance.

II .6 Compensations énergie réactive haute tension

II .6 .1 Batteries de condensateurs haute tension

Dans le réseau, lorsque la tension nominale est supérieure à 1 kV, le schéma de connexion du condensateur dépend de leur tension nominale ainsi que d'une connexion entre le point neutre du transformateur et la terre. Des unités à trois phases sont utilisées pour la compensation fixe. Ces condensateurs n'ont pas tout fil de point neutre bien que les enroulements soient intercalés WYE connecté. Afin de le rendre de réaliser une connexion externe au point neutre, des condensateurs monophasés sont utilisés en les connectant dans le cadre du programme WYE. La caractéristique importante est que les batteries de condensateurs et la précision des filtres dépend de la constance de leurs paramètres pendant le fonctionnement normal. Elle peut être causée par des pannes qui vont déclencher et déconnecter les enroulements affectés du condensateur. Afin de surveiller les paramètres de la batterie de condensateurs (détection des changements de capacité causés par des défauts internes) chaque L'étape de compensation ou de filtrage est divisée en deux sections égales (deux étoiles YY). Le courant d'égalisation entre les points neutres des deux sections peut être contrôlé en haute tension.

Les condensateurs à un isolant sont utilisés dans les réseaux à point neutres isolés. Ils doivent également être bien isolée de la terre en mettant les condensateurs sur les isolateurs [13].

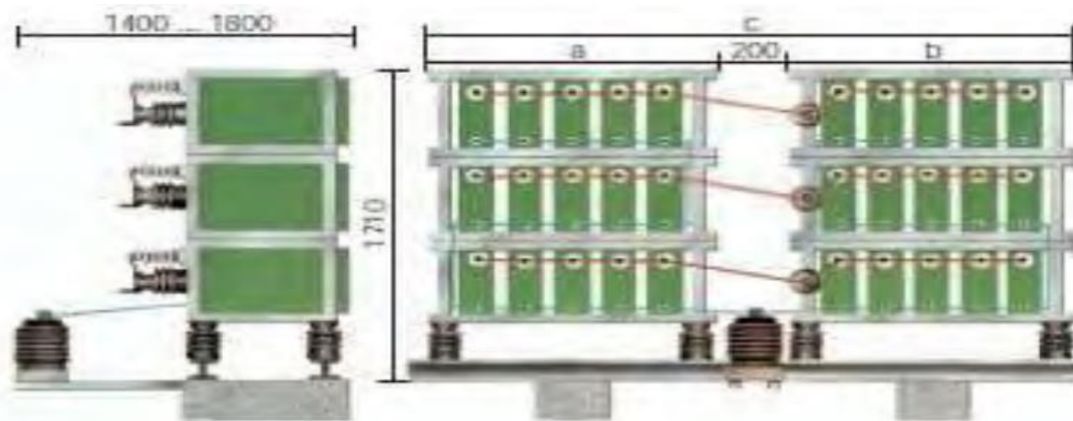


Figure (II.6) Batteries de condensateurs haute tension, source [13]

Un condensateur a deux bornes isolées de son corps peut aussi être connecté en delta, mais cette solution n'est pas utilisée très souvent. Les condensateurs connectés en étoile fonctionnent à la tension de phase, qui est $\sqrt{3}$ fois plus faible que dans le cas d'une connexion delta. En ce qui concerne

la plage de tension limitée les condensateurs haute tension, ils sont souvent connectés en série sur le réseau avec la tension la plus élevée. Les batteries de condensateurs haute tension sont fabriquées sous forme de batteries fermées et aériennes.

La norme dans la production de condensateurs de puissance moyenne tension est qu'ils sont capacitifs, les éléments sont connectés en série ainsi qu'en parallèle. Ils sont imprégnés et placés dans l'enceinte hermétique avec les terminaux. Les condensateurs de puissance sont équipés de condensateurs de décharge avec des résistances, qui assurent l'abaissement de la tension au niveau décrit dans les normes. La figure (II.9) montre la construction d'un condensateur moyenne tension typique de type "tout - film". Le "tout - film" est l'une des technologies les plus récentes de fabrication de condensateurs, où, en tant que diélectrique pour les éléments capacitifs. [15]

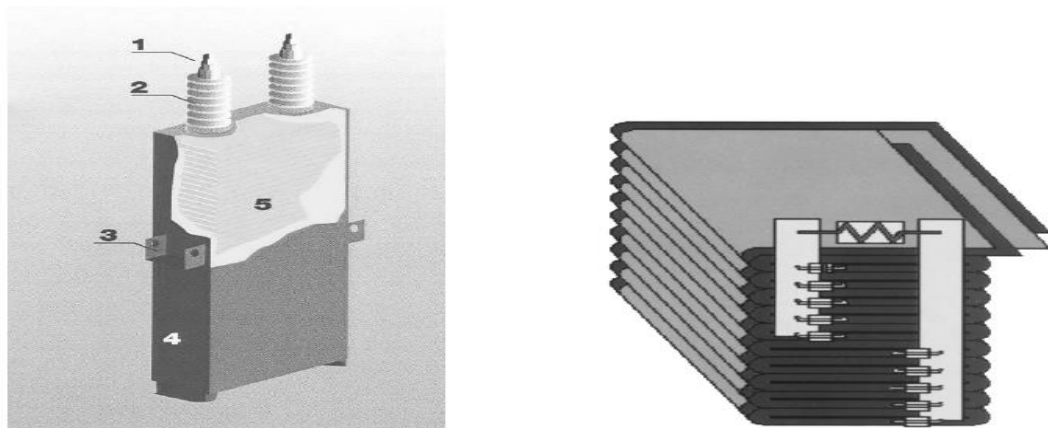


Figure (II.8) Le condensateur MT monophasé 1. Borne, 2. - isolant, 3. poignée, 5. partie active.

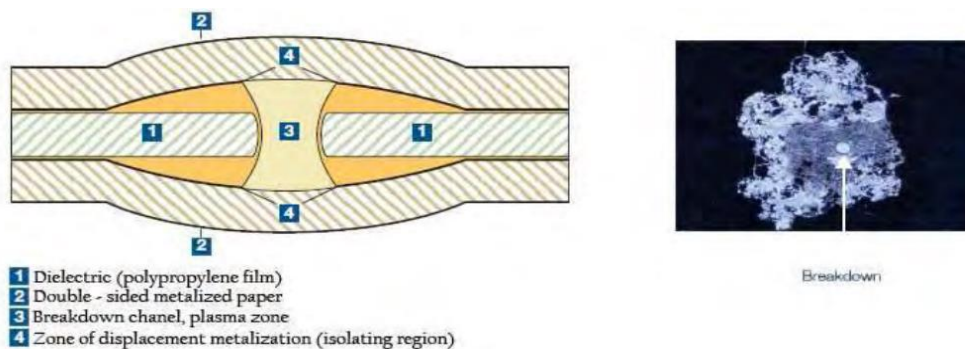


Figure. (II.9) Mécanisme d'auto régénération des condensateurs.

Les condensateurs fabriqués en technologie "tout film" par rapport à l'ancien type de condensateurs ont une espérance de vie beaucoup plus longue en raison de [5] [14] :

- Bonne stabilité thermique associée à de faibles pertes de puissance.
- Bonne stabilité électrique du diélectrique, ce qui permet une absorption plus efficace.
- De plus, cela assure une plus grande résistance aux surintensités et aux décharges instantanées les surtensions ainsi que la constance de la capacité en fonction de la température.

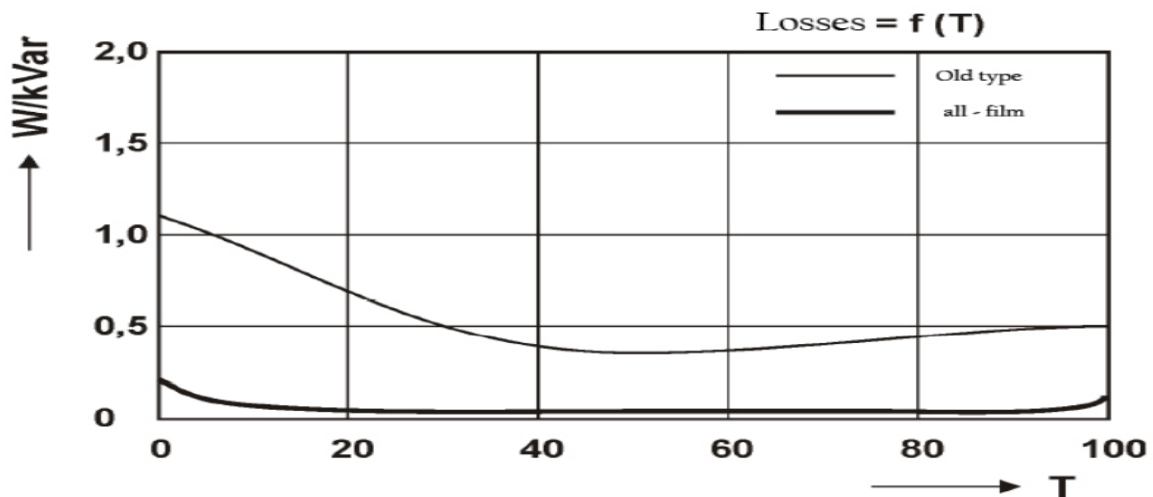


Fig. II(10) Les pertes de puissance en fonction de la température.

Les imprégnations pour condensateurs doivent avoir une très bonne résistance électrique, des pertes diélectriques, le facteur de perméabilité est dû être la résistance au vieillissement. Tous ces paramètres doivent être aussi bons que possible, car ces condensateurs fonctionnent très souvent dans des conditions très difficiles, compte tenu du refroidissement, champ électrique intensif, etc.

Tous les condensateurs doivent être équipés de résistances de décharge, ce qui permettra d'échelonner la tension doit descendre à 70V dans un délai n'excédant pas 10 minutes à partir du moment de la tension de déconnexion. Cependant, les fabricants proposent des résistances de décharge qui peuvent traiter le déchargement en un temps plus court, c'est-à-dire au niveau de 50V en 5 minutes. [15] [16]

Les condensateurs de puissance sont équipés d'une protection interne, qui se déclenche en cas de la défaillance de l'élément capacitif unique du condensateur. Ces protections déconnecteront l'élément brisé sans avoir éteint l'unité de condensateurs. En cas de compensation sophistiquée de

puissance et de tension élevées, les fusibles sont utilisés pour déconnecter l'élément en défaut sans interrompre le fonctionnement du reste de l'équipement du bang de condensateurs pour autant qu'il n'y ait pas d'élévation de tension aux autres condensateurs. [15] [16]

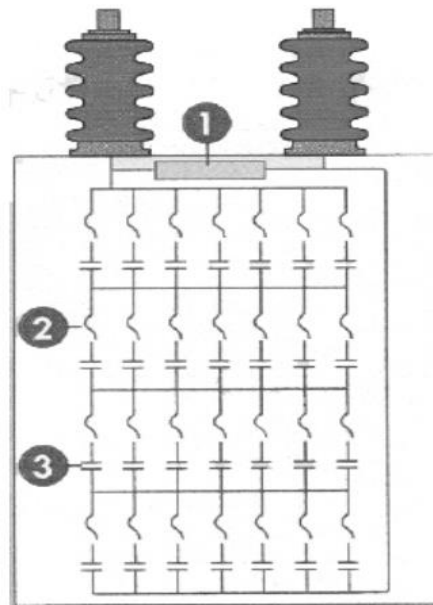


Figure . (II. 11) Section 1 de tous les condensateurs à film. Résistance de décharge, 2. fusible interne, 3. élément capacitif.

II.6.2 Protection contre la surpression

Ce type de protection dans les condensateurs MT est utilisé pour la protection, lorsqu'il n'est pas possible utiliser un fusible interne. Le capteur de surpression est monté hermétiquement sur le condensateur. Dans le il y a une membrane qui réagit à une pression supérieure à la pression normale, ce qui peut être causée par la défaillance des éléments capacitifs de l'unité de condensateurs. [15] [16] [5]

Les condensateurs monophasés peuvent avoir le schéma de connexion suivant :

-Delta : appliqué aux batteries de condensateurs avec la même puissance nominale et la même tension nominale jusqu'à 12kV. Ce type de condensateurs est utilisé pour la compensation fixe des moteurs MT

-WYE

- Double - WYE

-Schéma H: utilisé pour la compensation de la puissance réactive dans les batteries de condensateurs monophasés

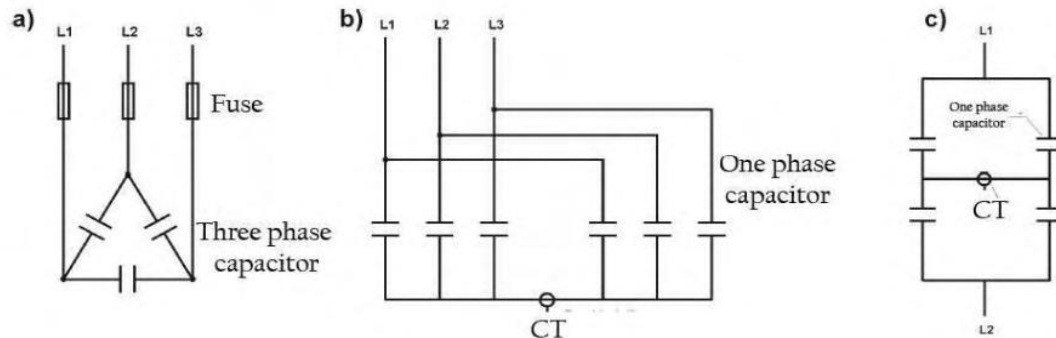


Figure. (II. 12) Schéma de connexion typique des condensateurs MT a) Delta ; b) double WYE, c) schéma H

II.6.3 Filtrés actifs

Les filtres actifs sont une très bonne alternative pour améliorer la qualité de l'énergie et la correction de facteur de puissance. Ils ne sont pas utilisés trop souvent, en raison de leur prix. Les filtres sont des appareils qui atteignent divers objectifs [13] [14] :

- Pour éliminer les harmoniques.
- Pour réduire le signal haute fréquence.
- Compensation de la puissance réactive dans les réseaux pollués par des harmoniques évitant la résonance.

En outre, selon le type d'appareil utilisé, les courants dans les conducteurs de ligne neutres peuvent être déchargés. L'utilisation des filtres présente de nombreux avantages, entre autres, le filtre réduit les coûts techniques et les coûts économiques imputés sur une installation.

La réduction des coûts techniques ou l'optimisation technique de l'installation est réalisée par :

- l'augmentation de la capacité des lignes de distribution.
- Décharge des transformateurs.

- Réduit les pertes et le réchauffement des lignes et des machines électriques.

Lorsqu'un filtre est installé, la valeur efficace réelle du courant est réduite, ce qui donne la valeur la plus élevée et "réduit le facteur de surcharge harmonique, de sorte que, réduit la puissance apparente dans toute l'installation.

La réduction des coûts cachés mentionnée peut être considérée comme une amélioration de la productivité en réduisant les arrêts et les pannes. En outre, elle assure qu'il n'y a pas d'extension de l'installation, car son est suffisante.

II.6.3.1 : Filtres actifs à passage intégral

Ce type de filtration augmente l'impédance équivalente de la source pour des harmoniques particuliers. Ce type de filtre est capable de corriger à la fois les harmoniques de courant absorbées par la charge et la distorsion de tension présente dans le système. L'impédance d'un filtre actif à passage intégral est réglée de la manière suivante un dispositif électronique spécial de puissance. Si la tension de la source d'alimentation génère dès les harmoniques d'ordre, elles peuvent être éliminées par le filtre connecté comme le montre la figure ci-dessous.



Figure. (II.13) Schéma bloc de la connexion du filtre actif.

Le filtre actif produit une tension en opposition de phase qui fait référence à l'énergie non désirée composante harmonique. Les filtres améliorent l'efficacité du filtre parallèle connecté à travers le les terminaux de charge non linéaire [15].

L'impédance du filtre actif devrait l'être :

- Proche de zéro pour la composante harmonique fondamentale.
- Très élevé pour l'harmonique étant filtrée par le filtre parallèle passif. Il provoquera pour faire passer le courant à travers le filtre et l'éliminer du réseau [15].

II.6.3.2 Filtres hybrides

Ce type de solution est obtenu en connectant les filtres actifs et passifs. Les filtres peuvent être connectés en série ou en parallèle. Dans une telle structure, le filtre passif filtre les harmoniques du 5^e ordre, tandis que le filtre actif traite les harmoniques des autres ordres.

II.6.3.3 Connexion des filtres au réseau

Des filtres actifs peuvent être installés à différents endroits du système de distribution.

- De manière centralisée, au niveau de l'appareillage principal d'un système particulier, afin de corriger les harmoniques d'en cours dans l'ensemble du réseau.

- Proche des charges générant des harmoniques, afin d'assurer un filtrage local des harmoniques.

Le circuit LC est connecté au réseau en parallèle. Il peut également conduire les harmoniques provenant d'autres sources que celles pour lesquelles le filtre a été conçu. S'il n'y a pas d'autres filtres, ils peuvent surévaluer le filtre, ce qui permettra d'éviter la surcharge et d'améliorer l'efficacité de filtrage. Les filtres passifs sont conçus pour l'harmonique en question. Il est désaccordé pour les fréquences de résonance, c'est-à-dire 150 [Hz], (la réactance du réacteur est alors de 5 %) ou 250 Hz (la réactance du réacteur est de 4 %). Un tel filtre peut traiter la 3^e et la 5^e harmonique avec n'importe quel même en cas de surcharge. C'est pourquoi ce filtre doit avoir une marge de sécurité [11]. Pour chaque fréquence, il y a peu de paires de circuits LC avec la même fréquence de résonance. Le site La capacité indique la part de la puissance réactive qui peut être compensée. Ensuite, le seul paramètre à déterminer est l'inductance, qui, à son tour, détermine le comportement du circuit LC pour la fréquence harmonique. [15]

II.6.4.2 Phénomène de résonance

La résonance dans un circuit électrique contenant des éléments inductifs et capacitifs peut être considérée comme la différence de phase de la tension et du courant à l'entrée du circuit est égale à zéro pour la fréquence de résonance ω_0 . On distingue deux types de résonance : la résonance de tension (résonance série) et la résonance de courant (résonance parallèle) .[4]

II.6.4.1.2 Résonance série

Le phénomène de résonance est présent, s'il s'agit d'éléments capacitifs et inductifs dans le circuit connectés en série.

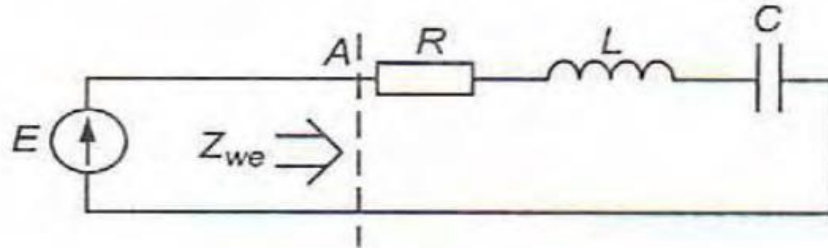


Figure. (II.14) : Schéma du circuit de résonance en série[4]

Les formules de base pour la résonance des séries sont les suivantes :

$$\text{- Pulsation de résonance : } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{- Impédance des ondes : } \rho = \sqrt{LC} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{- Facteur de qualité : } Q = \frac{\rho}{R} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{- Atténuation : } D = \frac{R}{\rho} = \frac{1}{Q} \quad (\text{II.5})$$

Dans le circuit illustré ci-dessus, la pulsation, ω_L à laquelle la tension aux bornes de la bobine est maximale, est supérieure à la pulsation de résonance ω_0 . De plus, la pulsation ω_C à la tension maximale aux bornes du condensateur sont, à leur tour, plus petites que ω_0 . L'écart de ω_C et de ω_L en ce qui concerne dépend du facteur de qualité, ce qui illustre la figure ci-dessous [4].

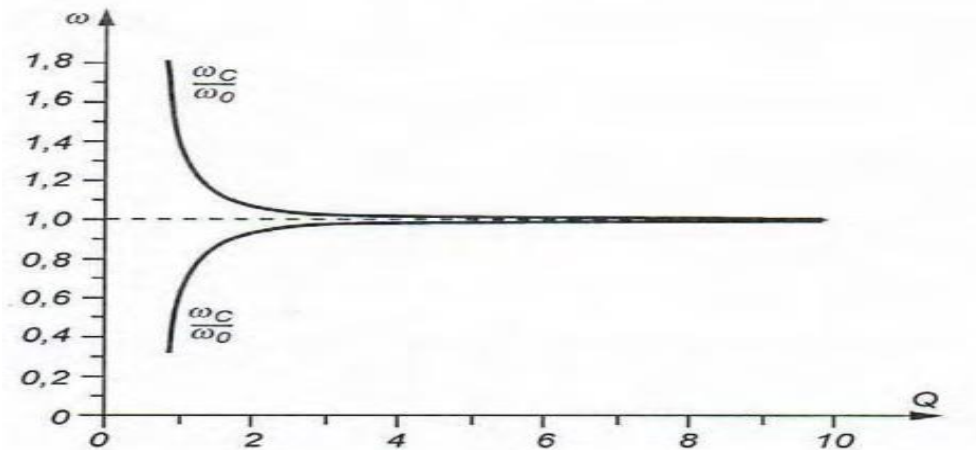


Figure. (II.15) Dépendance de ω_c et ω_L du facteur de qualité Q [4]

Si le Q est compris entre 5 - 8, alors l'écart peut être négligé. Le courant maximal de circuit de résonance en série se produit à la pulsation $\omega = \omega_0$ et ne dépend que de la valeur de la résistance. Ce type de résonance est dangereux pour le réseau avec source de tension. La source de courant a une grande résistance interne ($Q=0$), de sorte qu'il n'y a pas d'augmentation incontrôlée du courant [4].

II.6.4.2 Résonance parallèle

Le phénomène de résonance du courant se produit dans le circuit où se trouve une branche d'éléments inductifs connectés en parallèle.

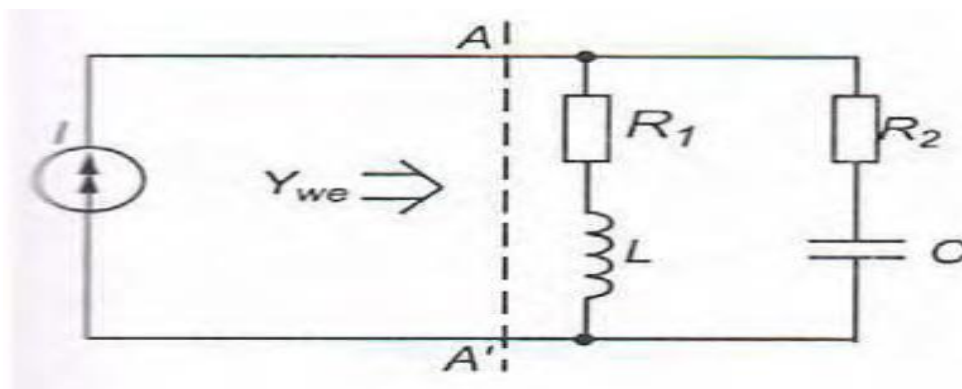


Figure. (II.16) Schéma du circuit de résonance parallèle[4]

Les formules de base pour la résonance parallèle sont les suivantes :

-Pulsation de résonance : $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

- Impédance de l'onde : $\rho = \sqrt{LC}$

- Facteur de qualité : $Q = \sqrt{\frac{\rho^2}{R} - 1}$

- Atténuation : $D = \frac{1}{Q}$

Au facteur de qualité dans la fourchette pour $Q > 6 - 8$ écart de la W_L, W_C, W_{mU}, W_{OR} depuis le W_0 are très petit, et peut être négligé. On peut donc supposer que les valeurs maximales du courant et de la tension aux bornes du circuit de résonance se produit à la pulsation de résonance W_0

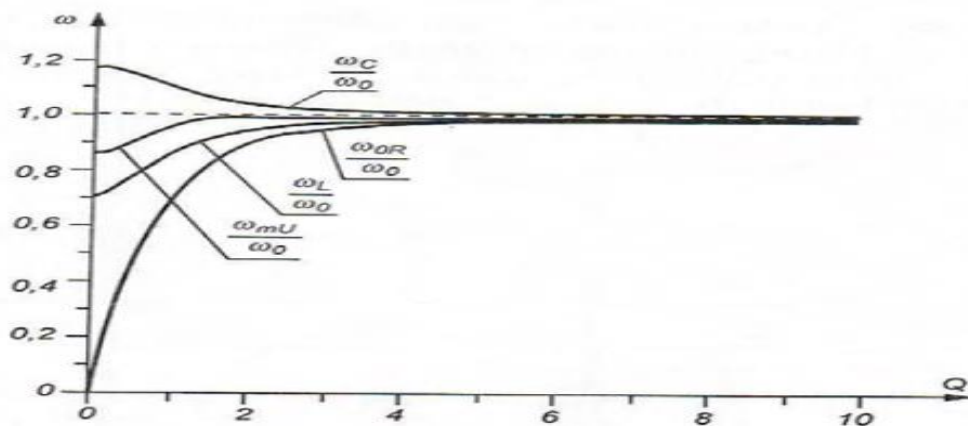


Figure. (II .17) Dépendance de W_L et de W_C sur le facteur de qualité Q [4]

Les courants qui circulent dans le circuit ainsi que la tension aux bornes la charge sont seulement importants, lorsque le circuit est alimenté par la source de tension. Ce type de source est présent dans le réseau aux courants produits par des charges non linéaires.

II.6.5 Régulateurs de facteur de puissance

Les régulateurs de facteur de puissance interviennent à chaque fois qu'un des paramètres suivants :

- Facteur de puissance.
- Puissance réactive.
- Courant réactif.
- Valeur de la tension.

Chaque régulateur de facteur de puissance est équipé des unités et éléments suivants [5] :

a) Unité de mesure qui mesure la valeur qui est supposée être le principe de fonctionnement du RFP et le compare à la valeur fixée par l'utilisateur. Si la valeur réelle de la variable est supérieure à celle qui est réglée, l'unité envoie l'impulsion à l'unité de temps.

b) L'unité de temps permet de distinguer si la variation de la valeur mesurée est suffisamment importante pour prendre une mesure, telle que la commutation du condensateur. En d'autres termes, l'unité de temps aide à éviter les changements inutiles. De plus, il permet de décharger le condensateur avant qu'il ne soit changé une fois de plus. Le retard peut durer de quelques secondes à quelques minutes

c) L'élément de contrôle final envoie l'impulsion qui provoquera le contacteur de condensateur à mettre en marche, selon l'algorithme programmé. Dans certains cas, si la valeur mesurée oscille entre la valeur fixée par l'utilisateur, il y a une probabilité que le RFP puisse envoyer des impulsions inutiles à l'appareil. Afin de éviter cela, il existe un paramètre appelé zone d'insensibilité.

Aujourd'hui, tous les RFP sont des dispositifs électroniques avancés, où toutes les mesures, décisions et le contrôle sont effectués par le microprocesseur.

Les régulateurs de facteur de puissance continuent de mesurer le niveau de puissance réactive dans le réseau où est installé, et détermine le comportement du réseau. Le circuit d'Aron est appliqué comme un système de mesure qui vérifie le niveau actuel dans une phase sur trois. La mesure de tension est effectuée sur deux autres phases. Les résultats de la mesure sont analysés par le microprocesseur. Dans l'étape suivante, il calcule quel est le niveau de puissance réel au et décide si la section de la batterie de condensateurs doit être changée ou non, en se référant à l'algorithme défini par l'utilisateur. [11]

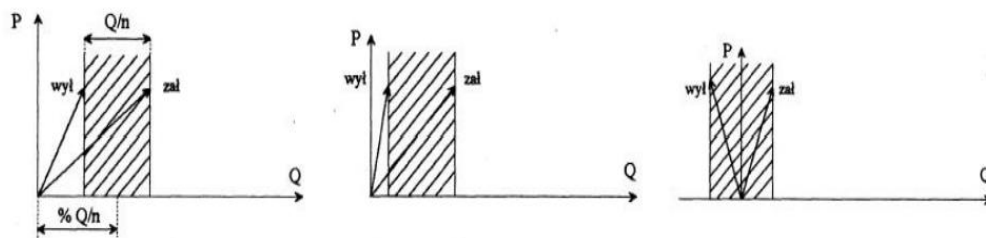
Le circuit de mesure est très précis. Le RFP est capable de contrôler le niveau de puissance réactive, même si le courant secondaire du TC est aussi faible que 40mA. Par conséquent, une charge légère ou un TC mal sélectionné n'affectent pas l'efficacité de la compensation de la puissance réactive. En outre, le processus de régulation peut être adoptée en tenant compte du comportement du réseau ainsi que de la dynamique des changements de puissance réactive. Grâce à cela, une des trois caractéristiques de mesure disponibles du RFP peut être utilisée, ce qui rend le RFP plus universel et plus efficace. [11]

Les algorithmes de traitement des données et la méthode de mesure proposés par le RFP garantissent que le l'appareil fonctionnera correctement même si l'alimentation en courant et en tension est fortement déformée par les harmoniques d'ordre supérieur. [11]

On peut distinguer les paramètres de base suivants des régulateurs de facteur de puissance :

- Nombre de sorties.
- Tension, courant et fréquence nominaux.
- Fourchette de fluctuation de la charge.
- Zone d'insensibilité Q/n .
- Plage de contrôle de la puissance réactive non compensée.
- Durée de fonctionnement des contacteurs.

Le paramètre Q/n décide de la sensibilité du régulateur. Il doit être réglé en tenant compte de tenir compte du condensateur ayant la puissance nominale la plus faible et du rapport de transformation du courant. Le paramètre $Q/n\%$ détermine la puissance réactive qui ne sera pas compensée en fonction de le premier étage de la batterie de condensateurs. En augmentant la valeur de ce paramètre, on provoque un décalage de la valeur seuil de réponse du PFR. En conséquence, la précision de la compensation va diminuer. Le réglage mentionné détermine les caractéristiques de fonctionnement du facteur de puissance régulateur. En choisissant le bon réglage, on peut ajuster la caractéristique, de sorte qu'elle permette le niveau souhaité de la compensation de la puissance réactive.



a) Sous-compensé

b) compensé

c) surcompensé

Figure. (II.18) : Exemple de réglage de la batterie de condensateurs, source [4]

Le premier cas **(a)** montre un réseau sous-compensé, où $\cos \varphi = 1$ et $Q/n \% = 100\%$. Le cas **(b)** avec les réglages de $Q/n \% = 60\%$ et $\cos \varphi = 1$ montrent que le réseau est compensé. Le dernier cas **(c)** à $\cos \varphi = 1$ et $Q/n \% = 0\%$ rend le réseau surcompensé.

II. 6.6 Protection des batteries**II.6.6.1 Protection externe**

Il est indispensable de prévoir une protection externe au condensateur.

Cette protection sera réalisée soit :

- ❖ Par un disjoncteur :
 - Relais thermique, réglage entre 1,3 et 1,5 In.
 - Relais magnétique réglage entre 5 et 10 In.
- ❖ Par fusibles HPC type GI calibre 1,4 à 2 In.

In : intensité nominale du condensateur.

$$I_n = \frac{Q_c}{\sqrt{3} U} \quad (\text{II .6})$$

II.6.6.2 Organe de manœuvre

Dans le cas de charges à cycles ultra rapides (soudeuses...), la manœuvre des condensateurs par système traditionnel (contacteurs électromécaniques) n'est plus adaptée. Des systèmes décompensations à commutation très rapide par contacteurs statiques sont nécessaires.

Le courant d'enclenchement d'un condensateur dépend :

- ❖ La puissance du condensateur.
- ❖ La puissance du court-circuit du réseau sur lequel il est raccordé.
- ❖ La présence ou non de batteries de condensateurs déjà enclenchées.

Lors du choix de l'appareillage il est nécessaire de sensibiliser l'utilisateur sur le choix du matériel (manœuvre de condensateurs).

Des contacteurs sont conçus spécialement par les constructeurs de contacteurs pour la manœuvre des condensateurs et en particulier pour la réalisation des batteries à régulation automatique. Ces contacteurs sont équipés de contacts auxiliaires associés en série à des résistances de précharge permettant lors de l'enclenchement de limiter le courant d'appel [17].

II.6.6.3 Selfs de choc

L'installation de self de choc monophasée en série sur chaque phase de la batterie permet la réduction des courants d'enclenchement à des valeurs acceptable pour l'organe de manœuvre correspondant.

Celle-ci s'avère nécessaire dans le cas de [18] :

- Batterie à gradin.
- Puissance de court-circuit du réseau très importante par rapport à la puissance de la batterie à connecté.
- Manœuvre fréquent de la batterie de condensateur.

II.6.6.4 Protection interne

Outre les protections internes incorporées dans le condensateur :

- Film métallisé auto-cicatrisant.
- Fusibles internes.
- Déconnecteurs à surpression.

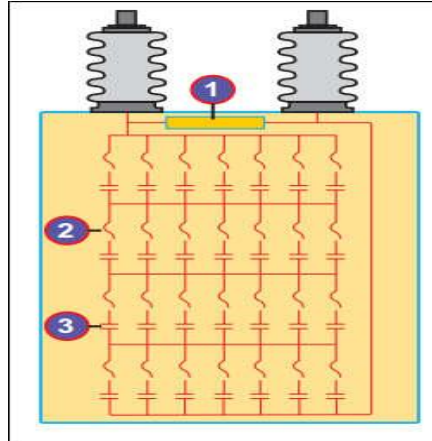


Figure. (II. 19) Exemple d'un condensateur à protection interne [19]

Avec :

1. résistance de décharge.
2. fusible interne.
3. capacité élémentaire.

II.6.6.5 Résistances de décharges

Des précautions seront également prises pour l'appareil de protection des batteries de condensateur car des courants transitoires importants apparaissent à l'enclenchement et au déclenchement des batteries.

Pour limiter ce phénomène, des résistances de décharge sont installées en parallèle sur la batterie de condensateurs [20].

II.6.6.6 Protection par supresseur

La protection par supresseur est intéressante, chaque fois que la protection du condensateur (pour des problèmes de caractéristiques électriques ou de coût) ne peut être réalisée correctement par fusibles internes, ou par contrôle déséquilibré.

Cette protection est réalisée individuellement par condensateur. Elle est formée d'un pressostat vissé hermétiquement à la cuve du condensateur. Ce pressostat est constitué d'une « membrane » sensible à l'augmentation de la pression, générée dans la cuve lors d'éventuels claquages de capacités élémentaires et d'un contact « O.F. » permettant de déclencher l'organe de manœuvre de la batterie (contacteur - interrupteur...)

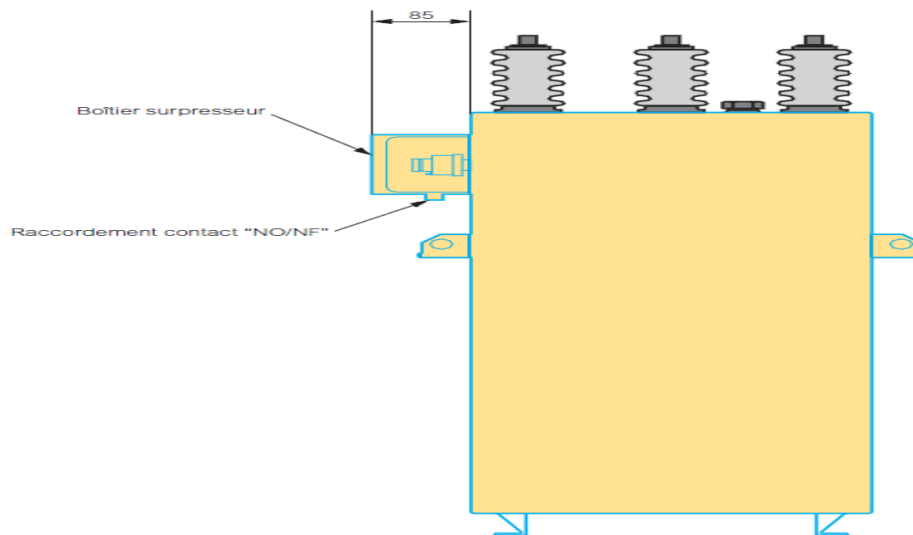


Figure. (II.20) Protection par supresseur.

II.6.6.7 Les précautions à prendre**1. Auto excitation [20]**

- Il faut éviter lors de la compensation de moteur les risques d'auto excitation pouvant provoquer des surtensions.
- Le choix de la batterie doit donc être fait en tenant compte des caractéristiques du matériel à compenser.
- La batterie de condensateurs doit avoir une puissance inférieure à la puissance nécessaire à l'auto excitation du moteur. A défaut, il doit être prévu, dans l'appareillage de commande des condensateurs, une coupure évitant cette auto excitation.

2. Harmoniques

Lors du placement d'une batterie de condensateurs, il faut effectuer une vérification de la présence d'harmoniques dans l'installation : celles-ci peuvent endommager les batteries de condensateurs et provoquer des surtensions dangereuses pour l'installation. Elles peuvent être à l'origine du claquage des condensateurs.

▪ Puissance des pas de régulation

En fonction de la mesure du $\cos \varphi$ ou $\tan \varphi$, on enclenche ou déclenche des éléments condensateurs dont la puissance en kVAr doit permettre de suivre au plus près l'évolution du $\cos \varphi$ souhaité.

- Il faut choisir des pas de régulation suffisamment faibles de manière à éviter le sou ou surcompensation.

II.7 Dimensionnement des câbles

Les normes en vigueur des condensateurs sont établies pour que ceux-ci supportent une surcharge permanente de 30 % en intensité. Ces normes autorisent également une tolérance maximale de 10 % sur la capacité nominale. Les câbles devront donc être dimensionnés au minimum pour [18]:

$$I_{cable} = 1.3 \times 1.1 \times I_N \quad (II.7)$$

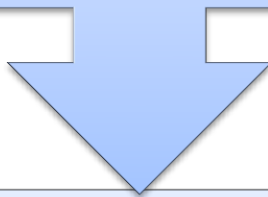
- 1,1 : pour tenir compte de tolérances de la tension du réseau.
- 1,3 : pour tenir compte de courants supplémentaires dus aux harmoniques.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présentées les différents compensateurs de l'énergie réactive, ainsi que le mode d'installation pour les deux niveaux de tension HTA/BT. Une description approfondie pour les batteries HTA avec le dimensionnement des composants constituant l'installation les batteries dans une installation électrique pour protéger et éviter les contraintes endommagent ces batteries.

Dans la partie suivante, on effectuera le choix et une méthode d'étude technique pour le dimensionnement des batteries de condensateurs en HTA au compte de l'université de M'sila.

Chapitre III



**étude technique de la
compensation d'énergie réactive
HTA**

III.1 Introduction

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade de développement (conception), qu'au cours de fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

Dans ce chapitre nous présenterons l'analyse de la consommation d'énergie réactive au compte d'université de M'sila durant les trois années derniers à pour savoir une méthode de calcul et dimensionner les batteries de compensations avec deux propositions de dimensionnement selon le type de charge de l'université; une charge purement sinusoïdale avec un THD de tension dans les règle de l'art pour le premier proposition et l'autre avec une charge casé polluée pour les installations de type inductif concernant les machines des laboratoires et bureautiques de l'université, afin de réaliser cette approche on a recenser les factures de l'université, ceci donnés par le fournisseur de l'énergie SONALGAZ.

III.2 Dimensionnement de système de compensation

Les industries sont obligées de relever leur facteur de puissance global, ils peuvent le faire grâce à des batteries de condensateurs montés sur l'arrivé du courant.

La détermination de la compensation d'une installation est basée sur le calcul de la puissance réactive à compenser Q_c qui se fait par deux approches possibles, en fonction des données disponibles [20] :

III.2.1 Analyse de la consommation de l'énergie active et réactive

D'après les factures des trois années on a les valeurs de consommation de l'énergie active et réactive pour chaque mois, ainsi la valeur de $\cos \phi$:

dat_fact	Energie active (kwh)	Energie réactive (kvarh)	Tanφ [%]
févr.-17	165 190	110 723	67,03
mars-17	132 742	95 601	72,02
avr.-17	108 891	78 238	71,85
mai-17	121 120	89 742	74,09
juin-17	128 607	81 385	63,28
juil.-17	105 760	53 713	50,79
août-17	84 853	39 649	46,73
sept.-17	67 541	37 044	54,85
oct.-17	107 173	63 572	59,32
nov.-17	125 732	91 188	72,53
déc.-17	135 181	103 425	76,51

Tableau (III.1) La consommation de l'énergie durant l'année 2017.

Energie active (Kwh)	Energie réactive (Kvarh)
1 282 790	844 280

Tableau (III.2) La somme de consommation de l'énergie active et réactive 2017.

La consommation totale l'énergie active et réactive en 2017 est illustrer par la figure (III.1)

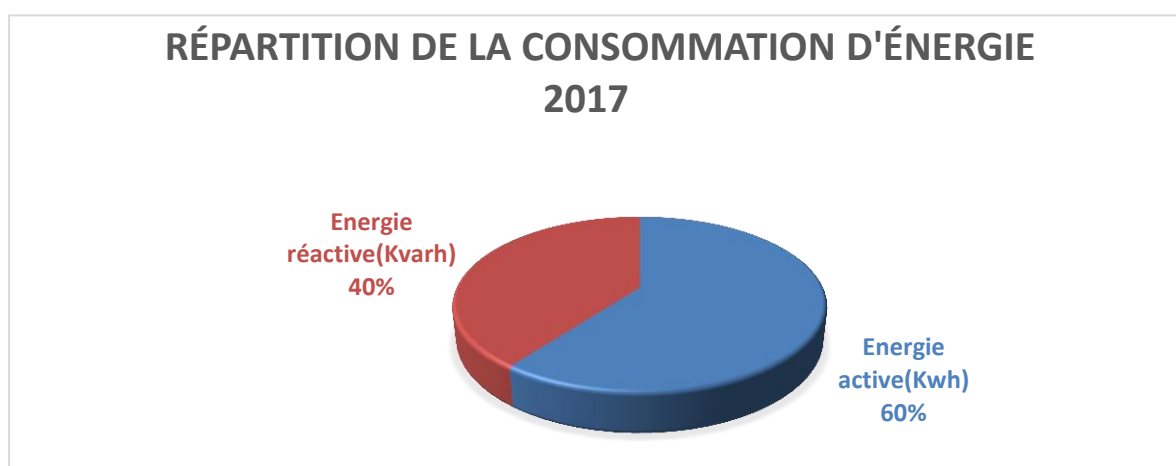


Figure (III.1) Répartition d'énergie durant l'année 2017

Pour l'année 2018 les valeurs des factures mensuelles est présenter par les tableaux suivants :

dat_fact	Energie active (kwh)	Energie réactive (kvarh)	Tanφ [%]
janv.-18	140 848	96 412	68,45
févr.-18	153 091	113 290	74
mars-18	156 380	109 509	70,03
avr.-18	141 890	100 632	70,92
mai-18	130 483	96 281	73,79
juin-18	127 074	93 203	73,35
juil.-18	126 584	78 553	62,06
août-18	132 609	83 298	62,81
sept.-18	76 678	47 130	61,46
oct.-18	141 547	87 046	61,5
nov.-18	147 072	124 094	84,38
déc.-18	148 768	124 098	83,42

Tableau (III.3) La consommation de l'énergie durant l'année 2018

Energie active(Kwh)	Energie réactive(Kvarh)
1 623 024	1 153 546

Tableau (III. 4) La consommation totale de l'énergie active et réactive en 2018

La consommation totale l'énergie active et réactive en 2018 est illustrer par la figure (III.2)

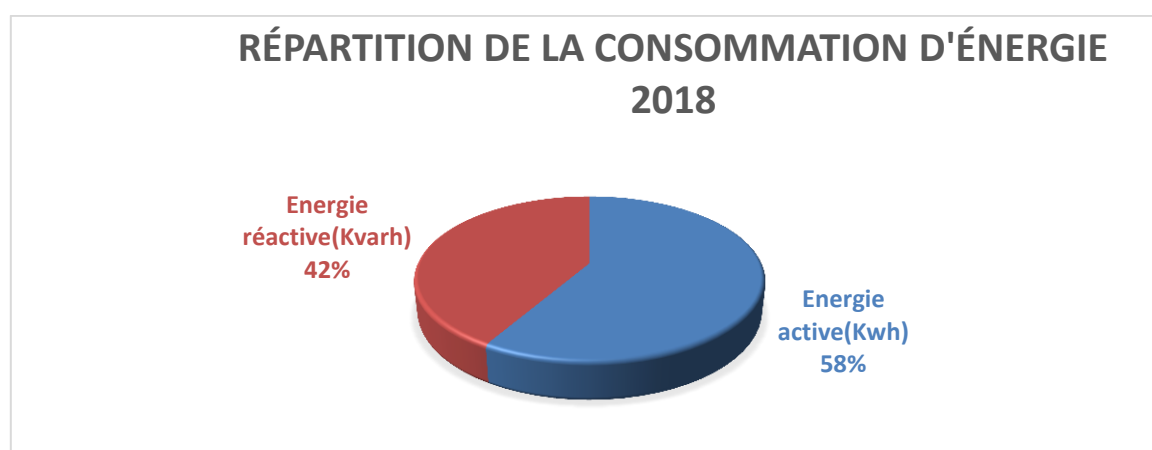


Figure (III.2) Consommation de l'énergie active et réactive durant 2018.

Pour l'année 2019 les valeurs des factures mensuelles est présenter par les tableaux suivants :

dat_fact	Energie active (kwh)	Energie réactive (kvarh)	Tanφ [%]
janv.-19	147 142	113 029	76,82
févr.-19	173 011	138 385	79,99
mars-19	158 648	121 639	76,67
avr.-19	105 433	68 267	64,75
mai-19	103 026	79 533	77,2
juin-19	109 551	88 638	80,91
juil.-19	207 788	134 323	64,64
août-19	204 784	137 862	67,32
sept.-19	87 226	66 118	75,8
oct.-19	125 074	90 452	72,32
nov.-19	141 764	118 334	83,47
déc.-19	151 038	125 590	83,15

Tableau (III.5) La consommation de l'énergie durant l'année 2019

Energie active(Kwh)	Energie réactive(Kvarh)
1 714 485	1 282 170

Tableau (III.6) La somme de consommation de l'énergie active et réactive en 2019

Pour la consommation totale l'énergie active et réactive durant l'année 2018 est illustrer par la figure (III.3)

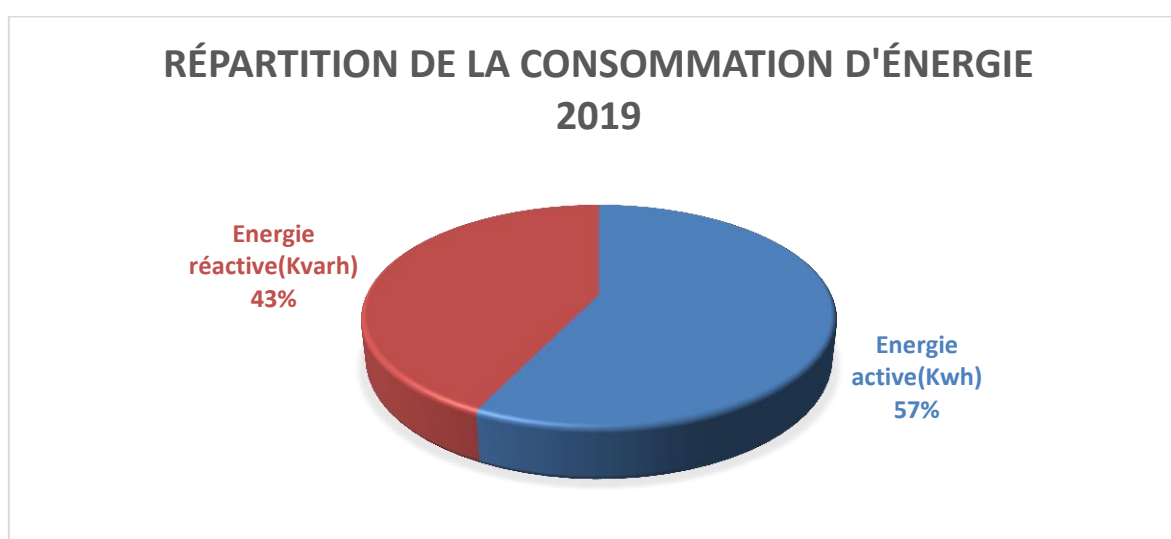


Figure (III.3) Consommation de l'énergie active et réactive durant l'année 2019

La consommation totale de l'énergie au sein de l'université de M'sila durant les trois années dernières se présente par la figure (III.4)

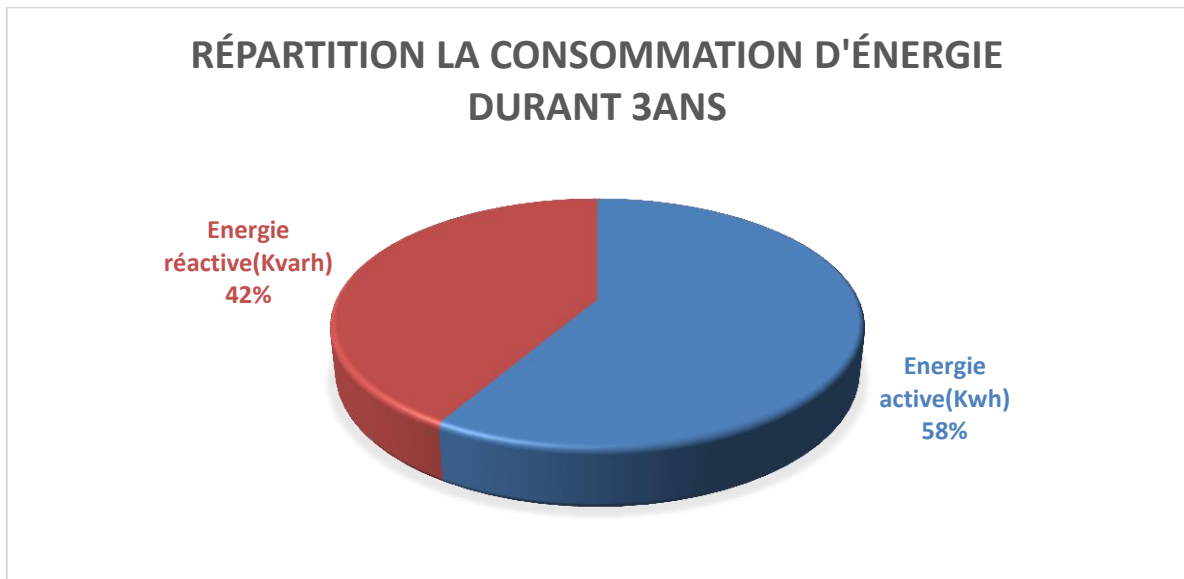


Figure (III .4) Consommation de l'énergie active et réactive durant les 3 années

A partir de ces représentations graphique on remarque une forte consommation de l'énergie réactive qui représente 42% de l'énergie totale, sachant que l'énergie active ne représente que 58% de l'énergie totale consommée, ceci l'université est une consommatrice d'énergie réactive et dépasse la limite admissible par SONELGAZ ($\text{tg } \phi = 0.5$ correspondre a $\cos \phi = 0,89$), et pour cette raison la, nous ferons dimensionner les batteries de compensation pour avoir les limites admissibles de fournisseur d'énergie.

L'allure de la consommation d'énergie durant les trois années présente par la courbe suivante :

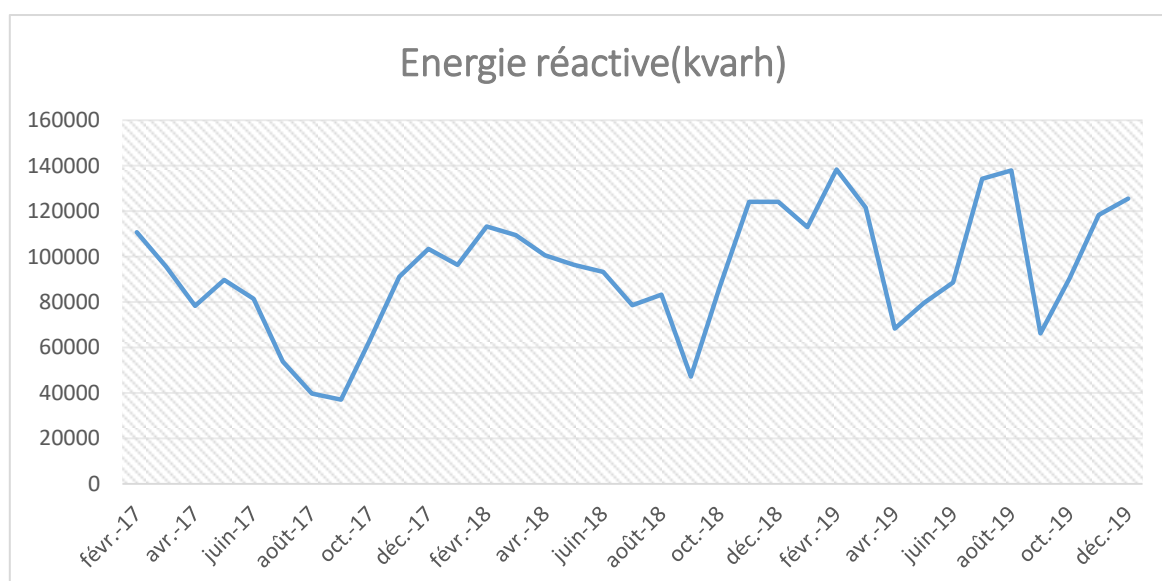


Figure (III.5) Représentation de la consommation mensuelle de l'énergie réactive

D'après la figure ci-dessus, on constate que la consommation de l'énergie réactive n'est pas stable au long de trois ans, la consommation varie aléatoirement, elle prend une valeur maximale de 138385 Kvarh enregistré durant le mois de février 2019

Le mois le plus défavorable pour le dimensionnement est le mois de Février 2019 avec une énergie active 173011kwh et une énergie réactive 138385kvarh avec un facteur de puissance de 0.781

	Kwh	Kvarh	tg	KVA
fevr.-19	173 011	138 385	79,99	221574

Tableau (III.7) L'Energie consommée dans le mois de Février

La durée de travail au mois de février est presque 9heurs pour le fonctionnement bureautique et laboratoires au sein de chaque faculté.

t(heurs)	Régime de travail en h	Jours/mois
252	9	28

Tableau (III.8) Durée de fonctionnement au mois de février

La puissance réactive consommée dans le mois février est :

$$Q = \frac{\text{1 énergie réactive (kVArh)}}{\text{les heures de fonctionnement (h)}} \quad (\text{III. 1})$$

$$Q = \frac{138385 \text{ kVArh}}{9 \text{ } 28 \text{ jour}} = \frac{138385 \text{ kVArh}}{252}$$

$$Q = 549.147 \text{KVAR}$$

Pour la puissance active :

$$P = \frac{\text{l'énergie active (kw h)}}{\text{les heures de fonctionnement (h)}}$$

$$P = \frac{173011 \text{ (kw h)}}{9 \text{ 28 jour}} = \frac{173011 \text{ (kw h)}}{252}$$

$$P = 686.552 \text{ KW}$$

Le facteur de puissance a une valeur :

$$\tan_1 \phi = 0.799 \Rightarrow \cos \phi = 0.781$$

Donc la puissance appelée (apparent) égale à :

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

$$S = \sqrt{549.147^2 + 686.552^2}$$

$$S = 879.15 \text{ kvar}$$

Un tableau récapitule les valeurs de puissances consommées par l'université durant le mois de février présentera par le Tableau (III.7)

La puissance active (KW)	686,5516
La puissance réactive (KVAR)	549,1468
La puissance apparente	879,15

Tableau (III.9) la puissance consommée dans mois de Février 2019

III.3. Dimensionnements des batteries de compensation avec une charge électrique linéaire

La tension de service du réseau électrique de poste UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA est : $V = 17341/30000 \text{ V}$

III.3.1 calculs d'impédance total avant compensation :

$$V = Z_1 \cdot I_1 \quad (\text{III.3})$$

$$P_1 = RI^2 \quad (\text{III.4})$$

$$P_1 = V.I. \cos \phi_1 \quad (\text{III.5})$$

- En utilisant les équations (III.3) et (III.5) on peut écrire :

$$P_1 = \left(\frac{V}{Z_1}\right)^2 \cdot Z_1 \cdot \cos \phi_1 \quad (\text{III.6})$$

$$Z_1 = \frac{V^2}{P_1} \cdot \cos \phi_1$$

$$Z_1 = \frac{17341^2}{685.5/3} \cdot 0.78$$

$$Z_1 = 1025 \Omega$$

On déduit que le courant avant compensation en moyenne tension :

- A l'aide de l'équation (III.3) on peut écrire :

$$I_{rms1} = \frac{V}{Z_1} \quad (\text{III.7})$$

$$I_{rms1} = \frac{17341}{1025} = 16.92 \text{ A}$$

$$I_{rms1} = 16.92 \text{ A}$$

La résistance de charge électrique de l'université se calcule comme suit :

- Avec l'équation (III.4):

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (\text{III.8})$$

$$R = \frac{228,83 \cdot 10^3}{16,92^2} = 799,3 \Omega$$

$$R = 799,3 \Omega$$

La réactance est :

$$X_L = R \cdot \text{tg} \phi_1 \quad (\text{III.9})$$

$$X_L = 799,3 \times 0,799$$

$$X_L = 639,4 \Omega$$

L'inductance L

$$X_L = L \cdot \omega \quad (\text{III.10})$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{639,4}{314}$$

$$L = 2,04 \text{ H}$$

Donc l'impédance électrique de l'université avant compensation est :

$$Z = 1025 \angle (38,65^\circ) = 799,3 + j639,4$$

III.4 Dimensionnement la batterie de compensation :

La puissance réactive, Q_c à compenser d'un équipement électrique peut être déduite à partir de la puissance active et du facteur de puissance de l'installation [9].

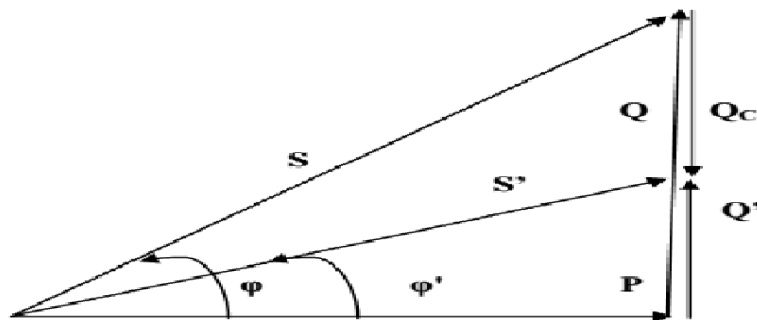


Figure (III.6) Triangle de puissance [9]

❖ Avant compensation

- Puissance active P (en KW).
- Puissance réactive Q (KVAR).
- Puissance apparente S (en KVA).
- Facteur de puissance $\cos\phi$.

❖ Après compensation avec une Puissance réactive de compensation Q_c (en Kvar)

- Puissance active P (en KW).
- Puissance réactive Q' (KVAR) Puissance apparente S' (en KVA).
- Facteur de puissance $\cos\phi$.

Chapitre III Etude technique de la compensation d'énergie réactive HTA

La détermination de la compensation d'une installation est basée sur le calcul de la puissance réactive à compenser (Q_c).

$$Q_c = P (\tan_1 \phi - \tan_2 \phi) \quad (\text{III.11})$$

$$Q_{1ph} = \frac{549,1 \times 10^3}{3}$$

$$Q_{1ph} = 183 \text{ KVAR par phase .}$$

La valeur acceptée par SONELGAZ est $\cos \phi = 0.894$.

Avec $\phi = 26.61^\circ$ de $\tan_2 \phi = 0.5$

- **En utilisant l'équation (III .11) :**

$$Q_c = P (\tan_1 \phi - \tan_2 \phi)$$

$$Q_c = 686.552 \text{ kw} (0.799 - 0.5)$$

$$Q_c = 205.279 \text{ KVAr}$$

$$Q_c = 205.279 \text{ KVAr}$$

La nouvelle valeur de puissance réactive Q' est :

$$Q' = Q_1 - Q_c$$

$$Q' = 549,1 - 205.279$$

$$Q' = 343,821 \text{ KVAr}$$

Donc la puissance appelée (apparent) égale à :

- En utilisant l'équation (III .2) :

$$S = \sqrt{P^2 + Q'^2}$$

$$S = \sqrt{549.147^2 + 343.821^2}$$

$$S = 647.9 \text{ kvar}$$

Chapitre III Etude technique de la compensation d'énergie réactive HTA

Les valeurs de puissance électrique de l'université de M'sila avant et après la compensation ce récapitule dans le tableau suivant :

Sans compensation	Avec compensation
P= 1055 kW	P= 1055 kW
Q= 549.1468 kVAr	Q= 343.821 kVAr
S= 879.15 kVA	S= 647.9 kVA
cos = 0,781	cos = 0,894

Tableau (III 10) Comparaison des deux cas (sans et avec compensation).

Alors la valeur de la capacité est :

$$Q_c = U^2 \cdot W \cdot C \quad (\text{III.12})$$

- A l'aide de l'équation (III.12)) on peut déduire la valeur de capacité de compensation :

$$C = \frac{Q_c}{w \cdot U^2}$$

$$C = 7.28 \times 10^{-7} \text{ farad}$$

III.4.1 calculs les paramètres électriques après la compensation :

Pour mieux enrichie notre étude, nous présenterons une méthode classique de calcul les paramètres électriques de notre université durant le mois de Février, savons que le seuil de facteur de puissance imposée par le fournisseur est

$$\cos \phi_2 = 0.894 \quad ; \quad \phi_2 = 26.61 \quad ; \quad \text{tg } \phi_2 = 0.5$$

III.4.1.1 calcul de l'impédance total après compensation :

On sait que

- A l'aide de l'équations (III .3) et (III . 5) on peut écrire :

$$P = \left(\frac{V}{Z_2}\right)^2 \cdot Z_2 \cdot \cos \phi_2$$

$$Z_2 = \frac{V^2}{P} \cdot \cos \phi_2 \quad (\text{III.13})$$

$$Z_2 = \frac{17341^2}{685.5/3} \times 0.894$$

$$Z_2 = 1176 \Omega$$

On déduit que le courant après compensation (courant de service) :

- A l'aide de l'équation (III.3) on peut écrire :

$$I_{rms2} = \frac{V}{Z_2}$$

$$I_{rms2} = \frac{17341}{1176} = 14.73 \text{ A}$$

$$I_{rms2} = 14.73 \text{ A}$$

La charge résistive de l'université est calculée à travers l'équation (III.4), on peut écrire

$$R_2 = \frac{P}{(I_2)^2} \quad (\text{III.8})$$

$$R_2 = \frac{228,83 \cdot 10^3}{14.73^2}$$

$$R_2 = 1054 \Omega$$

Avec une réactance :

$$X_{L_2} = R_2 \cdot \text{tg } \phi_2 \quad (\text{III.9})$$

$$= 1054 \times 0,5$$

$$X_{L_2} = 527 \Omega$$

Pour une inductance :

$$X_{L_2} = L \cdot \omega \quad (\text{III.10})$$

$$L = \frac{X_{L_2}}{\omega} = \frac{527}{314}$$

$$L = 1,67 \text{ H}$$

Une nouvelle impédance électrique trouvée après la compensation :

$$Z_2 = 1176 \angle (26,61^\circ)$$

$$Z_2 = 1051.4 + j 526.7$$

$$Z_2 = 1051.4 + j 526.7$$

Le courant en moyenne tension passera dans les batteries condensateurs est calculé comme suit :

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} U \sin \frac{\pi}{2}} \quad (\text{III.14})$$

$$I_C = \frac{205,871 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 30 \times 10^3 \sin \frac{\pi}{2}}$$

$$I_C = 3.96 \text{ A}$$

III.4.2 Simulation de modèle étudiant pour la compensation d'énergie réactive appliqué à l'université de M'sila :

III.4.2.1 caractéristiques du modèle :

Blocs	Caractéristique
Source	$U = 30 \text{ kv}$
Fréquence	$F = 50 \text{ HZ}$
Charge	$R = 799,3 \Omega$ $Z = 1025 \Omega$ $L = 2,186 \text{ H}$ $X_L = 639,4 \Omega$
Compensateur	$U_N = 30 \text{ KV}$ $F = 50 \text{ HZ}$ $Q_C = 205,871 \text{ kvar}$ $C = 7,28 \times 10^{-7} \text{ f}$

Tableau (III .11) caractéristiques du modèle étudié

III.4.2.2 Représentation le schéma blocs de la simulation :

Le modèle de circuit utilisé pour la simulation est illustré ci-dessous :

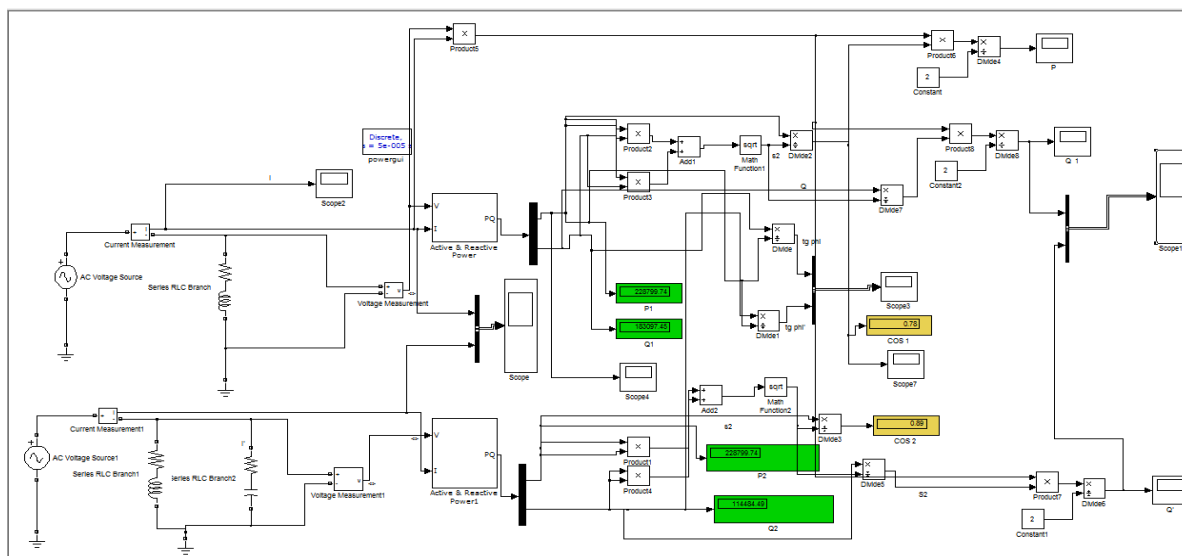


Figure (III.7) : modèle de base

Le modèle ci-dessus montre deux parties de circuits l'un présente l'université sons compensation et l'autre avec une branche de compensation, ces valeurs sont calculées précédemment. L'ensemble de la structure du bloc est composé par :

- D'une source de tension monophasé
- D'un compensateur de puissance réactive.
- D'une charge linéaire triphasée équilibré

III.4.2.3 résultats des simulations :

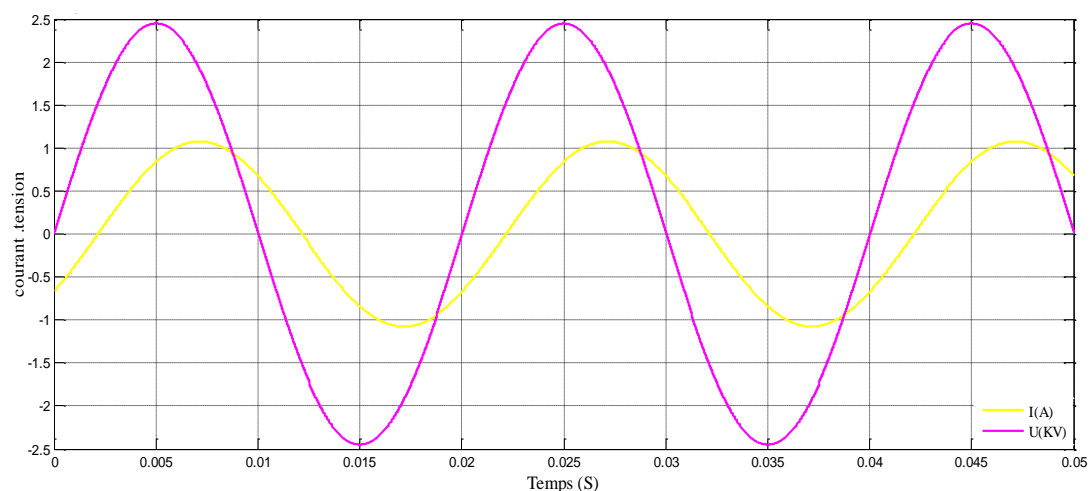


Figure (III.8) représentation de tension et courant de ligne sans compensation

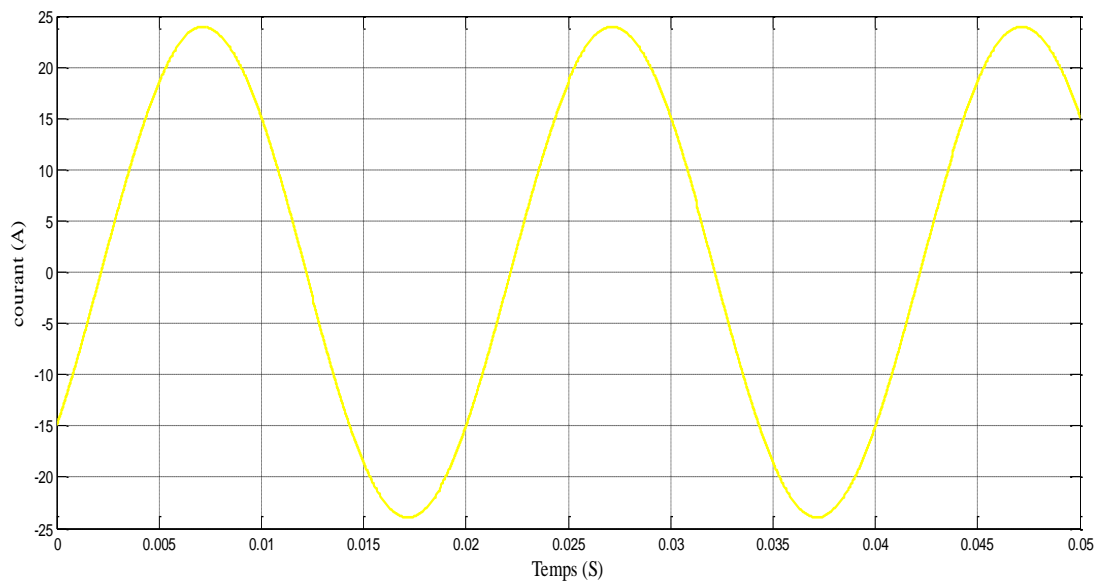


Figure (III.9) représentation de courant de ligne en moyen tension sans compensation

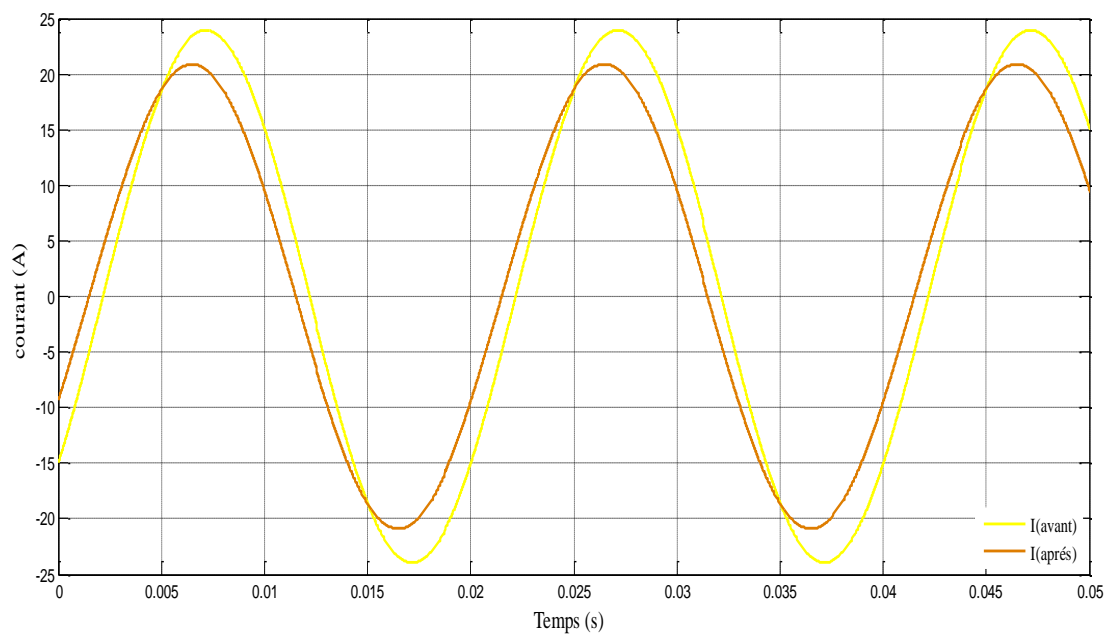


Figure (III.10) représentation de courant de ligne avant et après la compensation

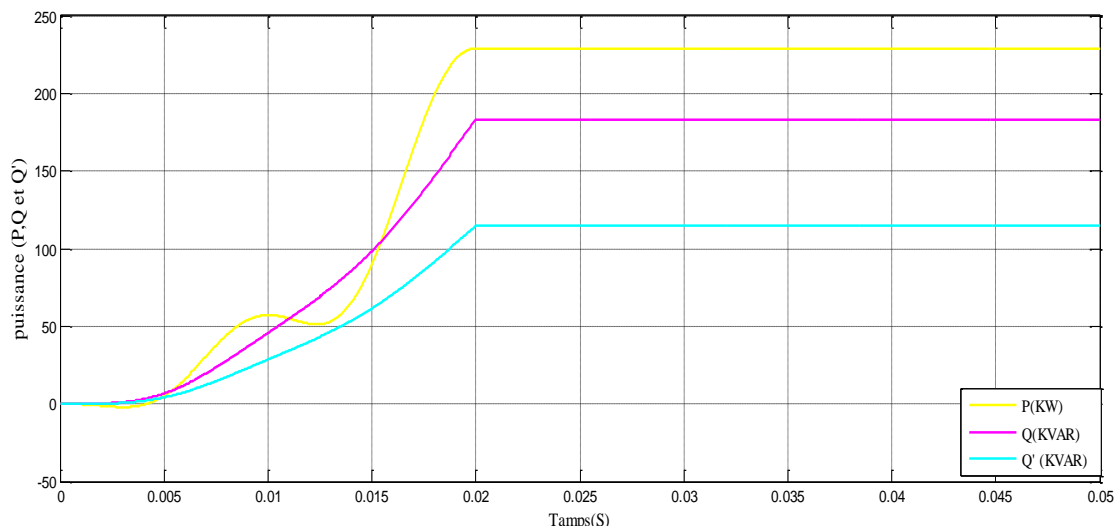


Figure (III.11) représentation de puissance réactive appelée avant et après la compensation

D'après les résultats obtenus par la simulation on constate que les valeurs trouvées sont similaires que l'étudié avec des allures faciles à comprendre ceci avoir une diminution de l'appel de courant de ligne avec une puissance réactive admissible par le fournisseur d'une valeur 343,821 KVAR après la compensation qui doit compenser par une puissance de 205,871 kvar Installée à l'entrée de sous-station MT/MT de l'université de M'sila.

III.5 Dimensionnements des batteries de compensation avec une charge électrique non linéaire :

III.5.1 Compensation d'énergie réactive à base d'un réacteur inductif :

Une réactance shunt est une « bobine d'inductance destinée à être connectée entre phase et terre, entre phase et neutre ou entre phases dans un réseau pour compenser le courant capacitif », c'est-à-dire en « shunt ». Autrement dit c'est un composant électrique haute-tension qui a pour fonction de contrôler la tension d'un réseau électrique en compensant le comportement capacitif d'un réseau par son comportement inductif.[21]

Les réacteurs en série sont utilisés avec des batteries de condensateurs pour deux raisons principales :[22]

- Pour atténuer l'effet des transitoires lors de la commutation des condensateurs.
- Contrôler la fréquence naturelle du condensateur impédance de la banque et du système pour éviter la résonance ou pour absorber le courant harmonique.

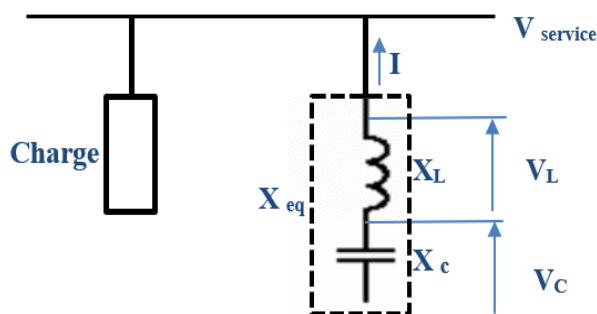


Figure (III.12) Réacteur à base d'inductance

Dans ce contexte, nous présenterons la méthode de calcul des batteries de compensation dans le cas où l'université contient des charges non linéaires afin d'éviter le problème de résonance et pour ceci un réacteur à base d'inductance posé en série avec la batterie de condensateur sera l'une de solution à ce phénomène. la valeur de cette inductance est calculée comme suit :

La tension de service et la valeur de batterie de condensateur sont $U= 30 \text{ kv}$, $Q_c=205,87 \text{ kvar}$

Le réacteur soit une valeur de 03% à 07% de condensateur

Considèrent 07% de réacteur $X_L = 0,07X_c$

La réactance équivalente est

$$X_{eq} = \frac{U^2}{Q} = \frac{(30000)^2}{205,87 \times 10^3}$$

$$= 4371,7 \Omega / \text{ph}$$

On sait que la réactance capacitive est calculée avec

$$X_{eq} = |X_c - X_L| = 0,93X_c = 4371,7$$

$$X_c = \frac{4371,7}{0,93} = 4700,75 \Omega / \text{ph}$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{314 \times 4700,75}$$

$$c = 6,77 \times 10^{-7} \text{ F}$$

La réactance inductive est de l'ordre

$$X_L = 0,07X_c = 0,07 \times 4700,75$$

$$X_L = 329,05 \Omega / \text{ph}$$

Avec d'une inductance L pour dimensionnée ce réacteur est

- En utilisant l'équation (III .10) :

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{329,05}{314}$$

$$L = 1,05 \text{ H}$$

III.5.2 Calcule de courant capacitif

- En utilisant l'équation (III .14) :

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3}U \sin\frac{\pi}{2}} = 3.96A$$

III.5.3 Calcule la chute de tension aux bornes de l'inductance ΔU_L

$$Z_L = \frac{U}{I} = X_L H = \frac{U}{I} \Rightarrow \Delta U_L = \sqrt{3} I \cdot X_L$$

$$\Delta U_L = 1.73 \times 3,96 \times 329,05$$

$$\Delta U_L = 2,25425 \text{ kv}$$

La tension au borne condensateur est ajustable à l'ordre de $\pm 10\%$ (une recommandation), la valeur de tension au borne condensateur est :

$$V_C = 30\text{kv} \times 1,1 + 2,25425\text{kv}$$

$$V_C = 35,25425\text{kv}$$

La puissance de la batterie est :

- En utilisant l'équation (III .12) :

$$Q_C = \frac{U^2}{X_L} = \frac{35,25425\text{kv}^2}{329,05}$$
$$= 264,393 \text{ kvar}$$

Le kit de batteries de condensateurs avec le réacteur à base d'inductance pour l'université de M'sila devra installer avec les valeurs suivantes :

$$L = 1,05 \text{ H}$$

$$C = 6,77 \times 10^{-7} \text{ F}$$

III.5.4 Simulation du modèle étudiant à base de réacteur inductive

Pour la simulation nous présenterons le réacteur à base d'inductance aliment la charge électrique qui présente l'université avec les paramètres et les valeurs trouvés dans la partie précédente, et nous intéressons de voir les caractéristiques de ce réacteur tel que le courant et la tension au bornes des ces éléments.

III.5.4.1 caractéristiques du modèle

Blocs	Caractéristique
Source	$U = 30 \text{ kv}$
Fréquence	$F = 50 \text{ HZ}$
Charge	$R = 799,3 \Omega$ $Z = 1025 \Omega$ $L = 2,186 \text{ H}$ $X_L = 639,4 \Omega$
Compensateur	$U_N = 36 \text{ KV}$ $F = 50 \text{ HZ}$ $Q_C = 264,393 \text{ kvar}$ $C = 6,77 \times 10^{-7} \text{ F}$ $L = 1,05 \text{ H}$

Tableau (III .12) caractéristiques du modèle à base de réacteur.

III.5.4.2 représentations circuit de simulation

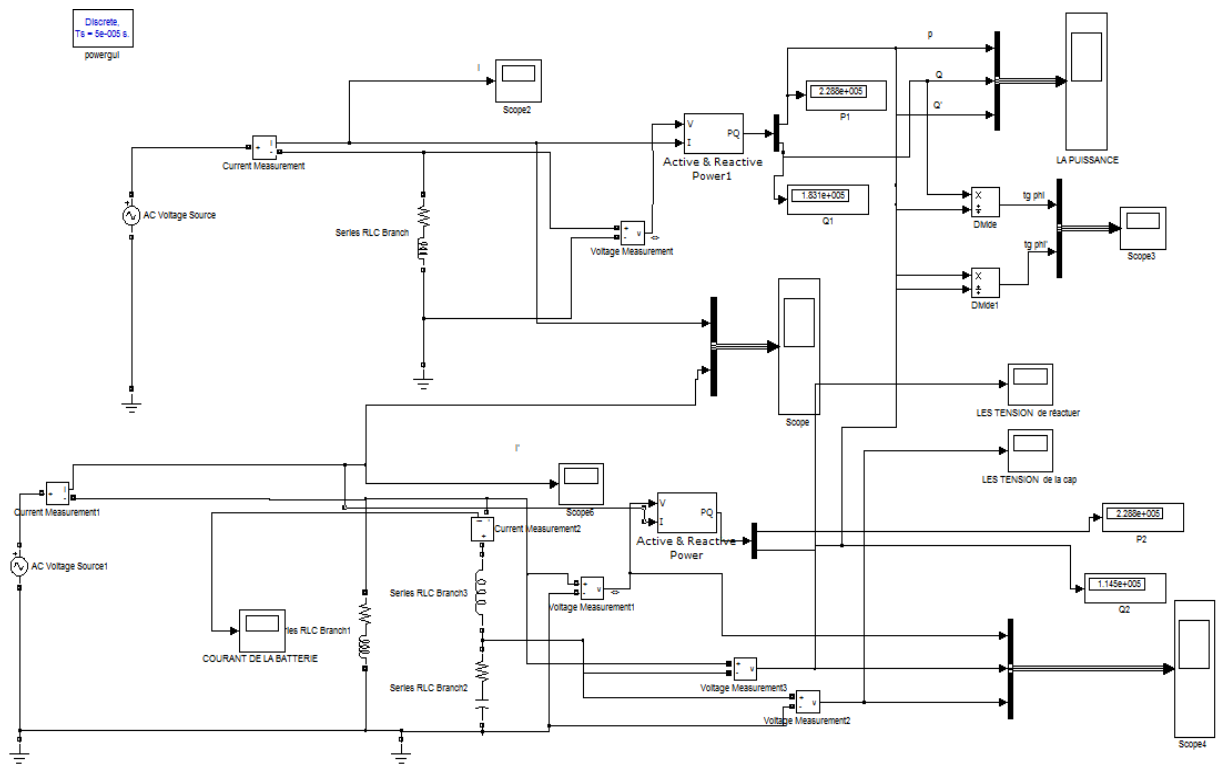


Figure (III.13) modèle de base.

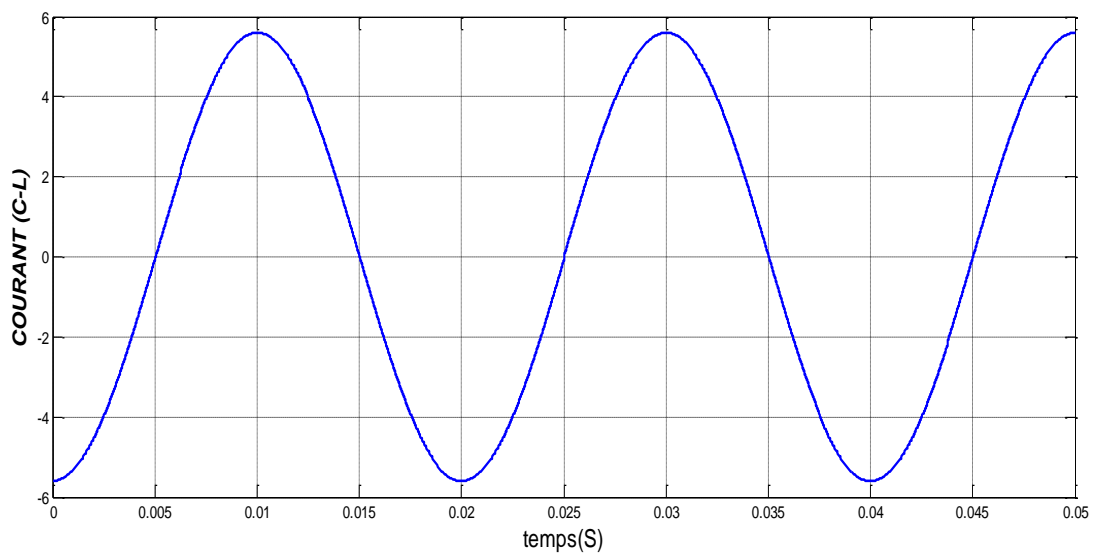


Figure (III.14) Courant de la batterie et le réacteur.

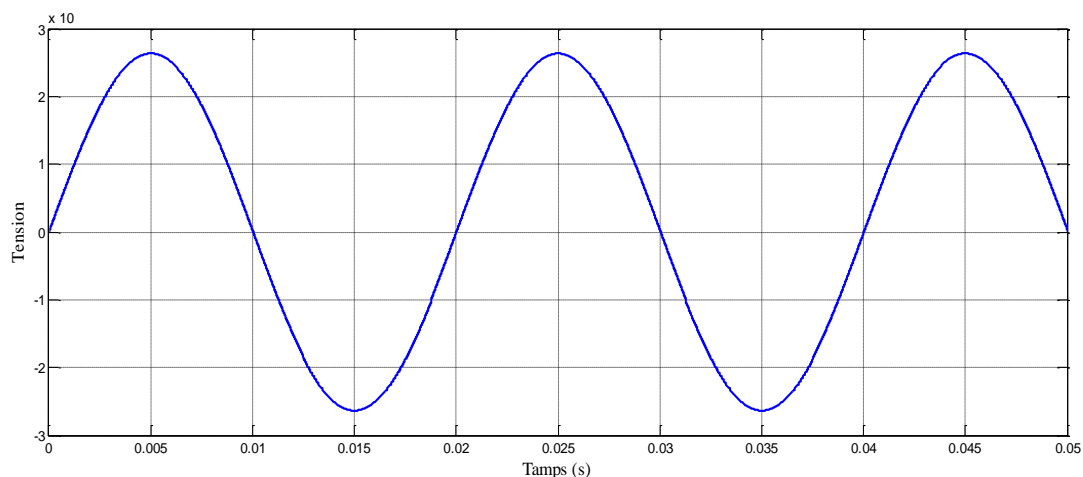


Figure (III.15) la tension au borne de batterie condensateur.

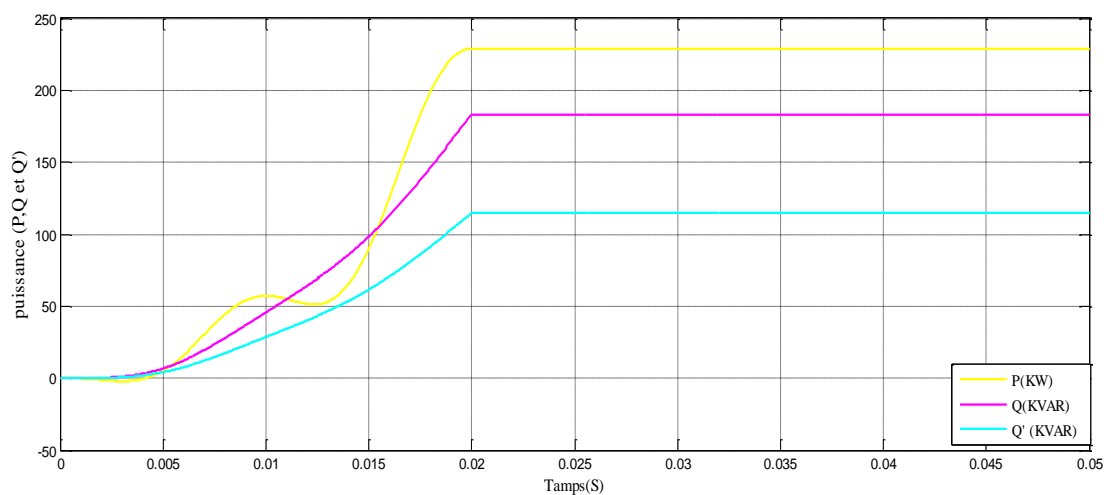


Figure (III.16) représenté la puissance (P, Q,et Q') avec le réacteur .

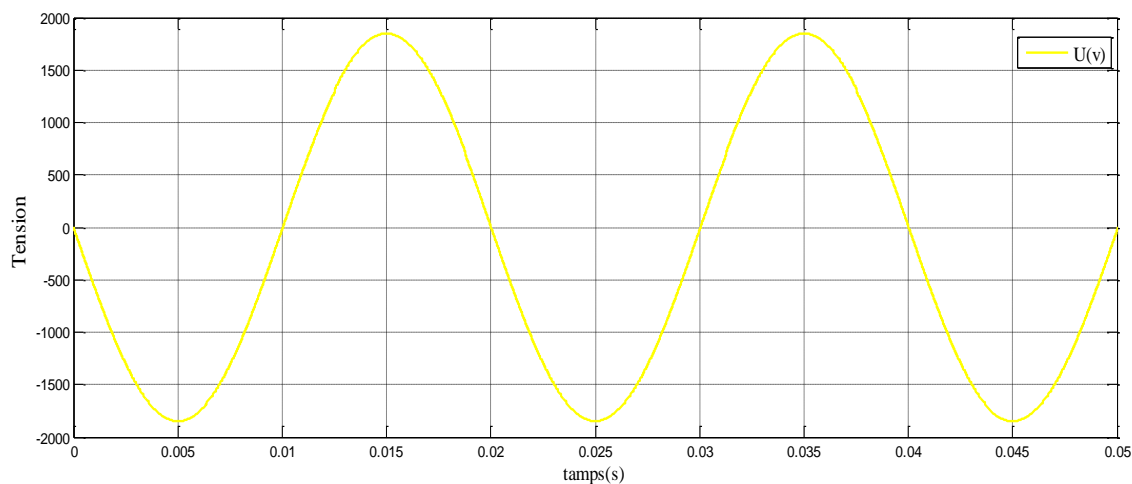


Figure (III.17) la tension au borne de réacteur

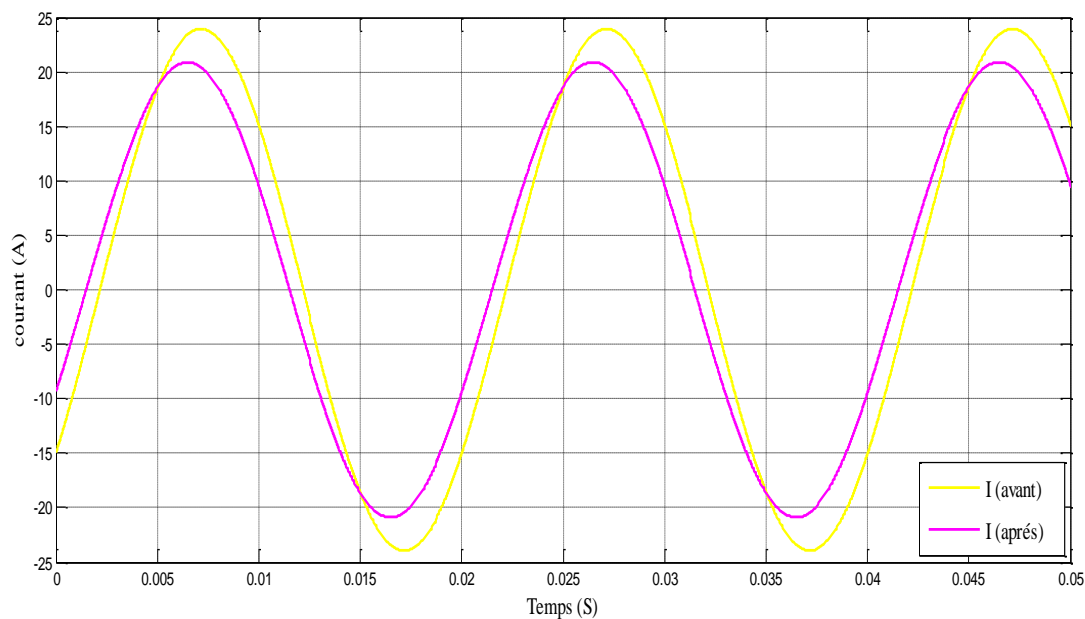


Figure (III.18) courant de ligne avant et après la compensation avec le réacteur

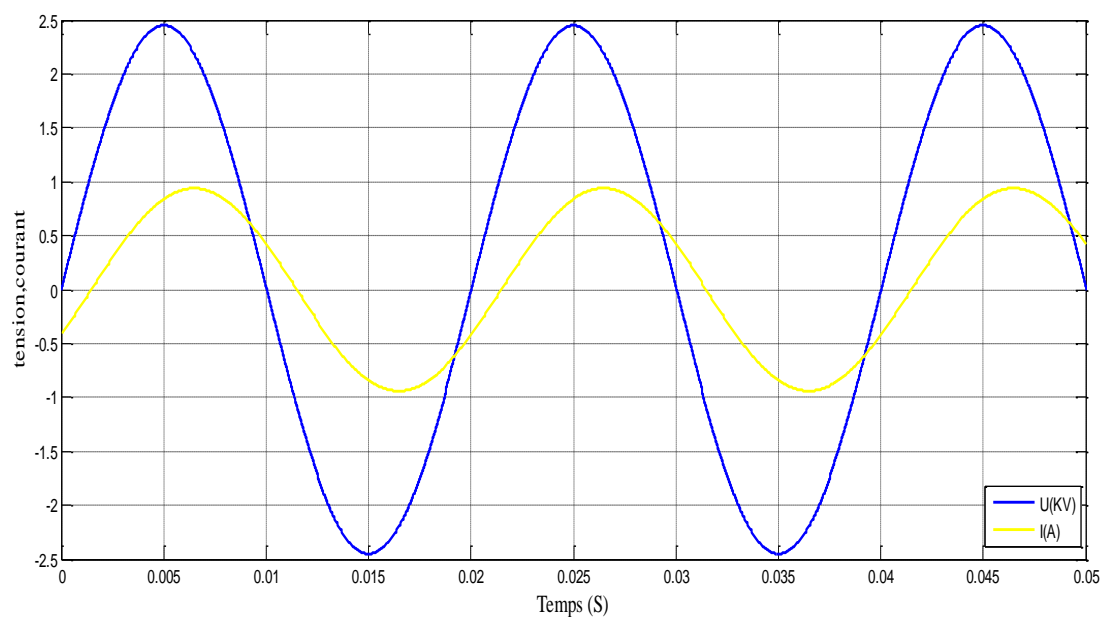


Figure (III.19) l'allure la tension et courant avec réacteur

III.6 Type de compensation :

La charge de l'université est variée par palier en fonction du besoin de puissance apparente à chaque instant, pour mieux d'adapter la compensation d'énergie réactive nous proposons une régulation automatique permettant une compensation immédiate selon les variations des consommations d'énergie.

III.6.1 Calculs la valeur de cheque gradin :

Dans ce contexte nous voulons de partager la batterie de compensation en plusieurs gradin en moyen tension, la valeur de batterie est de 264,393 Kvar, comme un choix minimal on devise la valeur de la batterie total Q_C sur trois gradin Q_{C1}, Q_{C2}, Q_{3C} :

$$Q_{C1} = Q_{C2} = Q_{C3} = \frac{Q_C}{3} = 88,13 \text{ kvar}$$

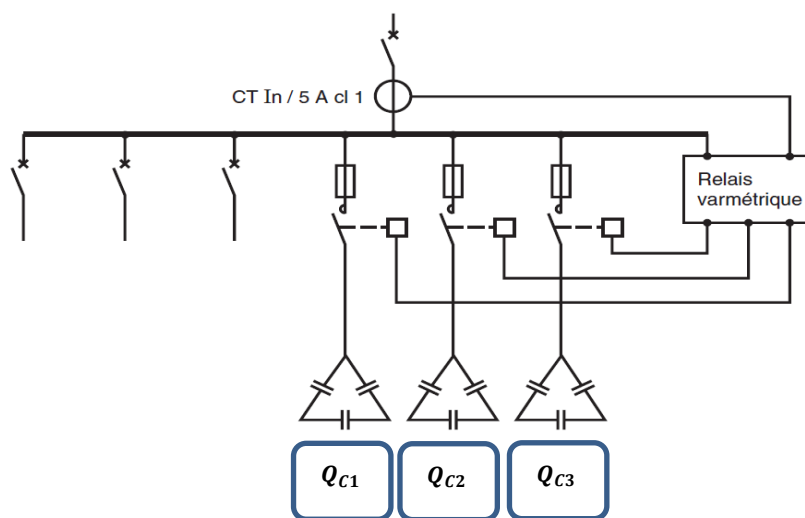


Figure (III.20) la compensation automatique d'une installation en moyen tension avec gradins.

Comme ce que nous avons étudié dans la paragraphe III.5, on pose un réacteur à base d'inductance de chaque gradin et ils doivent similaires et de mêmes caractéristiques.

$$U = 30 \text{ kv}$$

$$Q_{C1} = 88,13 \text{ kvar}$$

La valeur de réactance équivalente est

$$\begin{aligned} X_{eq} &= \frac{U^2}{Q_{C1}} = \frac{(30000)^2}{88,13 \times 10^3} \\ &= 10212,18 \Omega / \text{ph} \end{aligned}$$

Considèrent la réacteur à de 07% de valeur de réactance capacitive

$$X_L = 0,07 X_c$$

$$X_{eq} = |X_{C1} - X_L| = 0,93 X_{C1} = 13617,79 \Omega / \text{ph}$$

$$X_{C1} = \frac{10212,18}{0,93} = 10980,84 \Omega / \text{ph}$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{314 \times 10980.84} = 2.9 \times 10^{-7} \text{ F}$$

$$C_1 = 2.9 \times 10^{-7} \text{ F}$$

$$X_L = 0,07 X_{C1} = 0,07 \times 10980.84 = 768.65 \Omega / \text{ph}$$

$$X_L = 768.65 \Omega / \text{ph}$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{768.65}{314}$$

$$L = 2.44 \text{ H}$$

Le courant capacitif est de valeur :

$$I_{C1} = \frac{Q_C}{\sqrt{3} U \sin \frac{\pi}{2}}$$

$$I_{C1} = \frac{88,13 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 30 \times 10^3 \sin \frac{\pi}{2}} = 1.69 \text{ A}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = 1.69 \text{ A}$$

Suite au études technique de dimensionnement de batteries de compensations faite précédemment, on peut choisir des batteries compatibles avec les datasheets données par les fournisseurs dans les comptoirs électrique et comme présentée dans la datasheet de Schneider présentée comme suit :

Caractéristiques électriques	
Tolérance de capacité	-5 % à +10 % pour éléments et batteries jusqu'à 100 kvar -5 % à +5 % pour éléments et batteries au-delà de 100 kvar
Gamme de température	Min : de -50 à +5°C Max : de +40 à +55°C
Intensité de surcharge admissible	1,3 x I _N
Tension de surcharge admissible	1,1 x U _N , 8 h toutes les 24 h 1,15 x U _N , 30 min chaque 24 h 1,2 x U _N , 5min 1,3 x U _N , 1min 2,15 x U _N pour 10 s (type test)
Dispositif de décharge	Jusqu'à 75 V en 3 min ou moins



Figure (III.21) Principales caractéristiques des condensateurs.

Chapitre III Etude technique de la compensation d'énergie réactive HTA

Une vue de l'armoire devra posée au niveau de sous station HTB/HTB de l'université de M'sila est similaire au l'image sous dessous

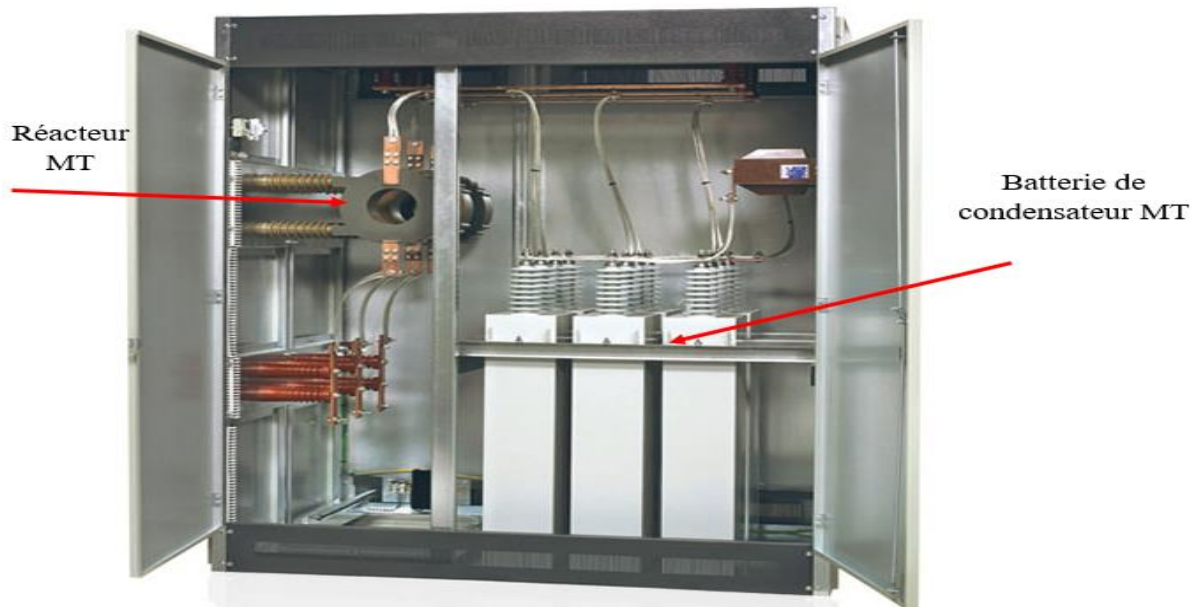


Figure (III.22) Armoire avec batterie de condensateur et un réacteur à base d'inductance

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons tenté de mettre en évidence le rôle et le dimensionnement des compensateurs et des réacteurs connectés sur le réseau électrique en HTB, la puissance réactive dont nous avons besoin et le mode d'installation des batteries de compensations afin de permettre de diminuer les contrainte technique et économique de l'effet réactive dans les réseaux électrique.

Les résultats de la simulation et les représentations graphiques obtenus sous l'environnement MATLAB-SIMULINK ont montrés l'apport du compensateur et le réacteur optimisés à la compensation de l'énergie réactive dans le réseau électrique à l'enceinte du l'université de M'sila.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude et simulation une méthode de compensation d'énergie réactive en HTA appliqué à l'université de M'sila pour atteindre une valeur désignée par le fournisseur d'énergie, afin de réduire les contraintes techniques écoulés dans le réseau de distribution moyen tension à l'enceinte de l'université.

Pour ce faire, nous avons commencé par une description générale sur la théorie de puissances pour nous permettons de connaître les différentes puissances et un aperçu sur les perturbations influent sur le réseau électrique y a compris les creux de tension, surtension, le déséquilibre et les harmoniques causé par des charges non linières dans les réseaux électriques.

Après, nous avons procédé en premier temps à définir les différents compensateurs d'énergie réactive ainsi le mode d'installations pour les réseaux HTA. Puis, une généralité présentée pour le dimensionnement les composants constituant l'installation des batteries dans les installations électriques à pour protéger et éviter les contraintes endommagent ces batteries.

Une méthode analytique effectué à partir les factures de consommation d'énergie électrique dans le dernier chapitre pour le dimensionnement des batteries de condensateurs avec des réacteurs à base d'inductance en HTA au compte de l'université de M'sila, afin de nous permettre de minimiser les contraintes techniques et économiques sous l'effet de l'énergie réactive.

D'après notre étude, la compensation d'énergie réactive de l'université de M'sila est l'un des moyens les plus efficaces de réduire la consommation d'énergie électrique fournie par SONALGAZ et améliorer la qualité de l'énergie. La compensation peut améliorer les indices technico-économiques dans le réseau électrique HTA distribué à l'intérieur de l'université et il résulte des avantages importants cités comme suit :

- ✓ Réduire les coûts et générer des bénéfices plus élevés pour le compte de l'université,
- ✓ Réduire les pertes au long de réseau HTA,
- ✓ Éviter les frais de pénalité de SONALGAZ pour la consommation excessive de puissance réactive,
- ✓ Augmenter la capacité d'énergie et réduire les coûts sur les nouvelles installations,
- ✓ Améliorer le facteur de puissance du système.

Reference

- [1]. Meier, Alexandra. *Electric Power Systems: A Conceptual Introduction* (Wiley Survival Guides in Engineering and Science). s.l. : Wiley - IEEE Press, 2006.
- [2] . Legrand Catalogue, « *Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques*», P0910ALPESFR- EX210027 - MARS 2010.
- [3]. Schneider Electric, « *Guide de conception des réseaux électriques industriels* », n° : 6 883 427/A, 04/2010.
- [4]. Ryszard Strzekecki, Henryk Supronowicz. *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy*. Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000.
- [5] . Vanya Ignatova. *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique..* Energie électrique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006. Français. fftel-00170713f
- [6]. Schneider Electric, « *La conception des réseaux industriels en haute tension*», ct 169, 10/1993.
- [7]. ALPTEC 8, « *La solution pour la régulation automatique du facteur de puissance*», Legrand Catalogue, AT 13001 - FR – 07/ 2013.
- [8]. Schneider Electric, « *La compensation de l'énergie réactive*», Guide technique, Intersections - novembre 2006.
- [9] Legrand Catalogue, « **Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux** »
- [10]. A combined time-domain and frequency-domain approach to hybrid compensation in unbalanced no sinusoidal systems. L, Czarnecki. Milan : IEEE Stresa - Italy, 1993.
- [11]. Łukiewski, Mirosław. *Dobór dławików ochronnych do baterii pojemnościowych*. Lubliniec : Elhand Transformatory - materiały informacyjne.
- [12]. Pacholski, inż. Edward. *Kompensacja mocy biernej w przemysłowych układach zasilająco - rozdzielczych z napędami synchronicznymi na przykładzie KGHM "Polska Miedź" S.A oddział Zakłady wzbogacania rud*. Polkowice : Elma Energia - materiały informacyjne.
- [13]. Krzysztof Matyjasek, Łukasz Matyjasek. *Wybrane zagadnienia z zakresu wyboru rodzaju urządzeń do kompensacji mocy biernej na bazie kondensatorów energetycznych. Prezentacja konkretnych rozwiązań*. s.l. : Elma Energia - materiały informacyjne.
- [14]. EPCOS. *MKV Power Electronic Capacitors*. [pdf] www.epcos.com : EPCOS.

Reference

- [15]. Circuitor. Protection and control. Reactors for filtering. [Katalog produktów] s.l. : Circuitor.
- [16]. Circuitor. Power Factor Correction and harmonic filtering. Automatic power factor regulators. [Electronic Catalogue] s.l. : Circuitor, 2009.
- [17] Legrand Catalogue, « Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques», P0910ALPESFR- EX210027 - MARS 2010.
- [17] Legrand Electric Algérie, « Batteries de condensateurs automatiques Alpimatic », EX210027 - ALG 018 - JUIN 2011.
- [18] Legrand Catalogue, « Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques», P0910ALPESFR- EX210027 - MARS 2010.
- [19] Site web : <http://www.energiepluslesite.be/index.php?id=11473>.
- [20] KIFOUCHE REZKI << Identification des courants harmoniques et génération du courant référence "application au convertisseur statique">> mémoire magister en génie électrique Université M'hamed Bouguarra Boumerdes , 2005.
- [21]. Standardsdirect. [Online]
http://www.standardsdirect.org/standards/standards2/StandardsCatalogue24_view_15442.html.
- [22]. Takom. Kompensacja mocy biernej. Witryna fiormy Takom. [Online]
http://www.takom.pl/n_pliki/Baterie4.htm. PERTURBATIONS ELECTRIQU