

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Par : **ZIDANE WALID** et **ZENDAGUI CHAKIB**

Etude Technico économique d'une installation d'un système pour la contribution moderne de la maitrise de l'énergie réactive

Soutenu publiquement, le **01/07/2019** devant le jury composé de :

LOUCIF. M	Univ. Tlemcen	Président
MELIANI. S. M	Univ. Tlemcen	Encadreur
LARABI. A	Univ. Tlemcen	Co-encadreur
BRIKCI NIGASSA. M. A	Univ. Tlemcen	Examineur
BENHABIB. M. C	Univ. Tlemcen	Examineur
BENYAHIA. A	SBC. Henaya	Invité
DJENAN. M	SBC. Henaya	Invité

Année Universitaire: 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force d'atteindre notre objectif et accomplir notre travail.

*Nous voudrions dans un premier temps remercier, notre encadreur de mémoire mémoire **S. M. MELIANI** maitre de conférence à la faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen et mémoire **A. LARABI** pour Leurs patiences, Leurs disponibilités et surtout ses judicieux conseils, qui nous ont aidé à bien mener ce mémoire.*

*Nous remercions également à Monsieur **M. LOUCIF**, Maitre de conférences à l'Université Abou Bekr- Belkaïd, qui a accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance du présent mémoire de Master. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.*

*Notre remerciements vont également aux membres du jury Monsieur **M. C. BENHABIB** Maitre de conférence à la faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen et Monsieur **M.A. BRIKCI NIGASSA** Maitre de conférence à la faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant à l'évaluation de ce travail.*

*Nous remercions aussi le géant d'entreprise **A. BENYAHIA** et le technicien supérieur **M. DJENAN** au niveau de l'usine, qui ont partagé leurs connaissances et leurs expériences dans ce milieu, tout en nous accordant leurs confiance et une large indépendance dans la préparation de ce mémoire.*

Enfin, nous remercions nos amis qu'on n'a pas cités et qui ont toujours été là pour nous. Leurs soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Dédicace

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

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

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

Et je le dédie :

Atous les membres de ma famille, ma soeurs "Hadjer", mes deux frères « Mohamed » et « Abdessalem ».

Atous mes amis et mes collègues avec qui j'ai partagé de très bons moments tout le long de ces années.

Atouts les enseignants et les collègues de la promotion de la deuxième année Master 2018/2019.

**ZENDAGUI
CHAKIB**

Dédicace

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

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

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

Et je le dédie :

Atous les membres de ma famille, ma soeurs "Yasmine", mes frères « Ayoub », « Mohamed » et « Karam ».

Atous mes amis et mes collègues avec qui j'ai partagé de très bons moments tout le long de ces années.

Atouts les enseignants et les collègues de la promotion de la deuxième année Master 2018/2019.

**ZIDANE
WALID**

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I Généralité	2
Introduction	2
I.1 Classification des perturbations électriques	3
I.1.1 Creux de tension et coupures brèves	3
I.1.2 Variations de tension	4
I.1.3 Déséquilibre	5
I.1.4 Harmoniques et inter-harmoniques	6
I.2 Problématique de l'énergie réactive en milieu industriel	8
I.2.1 Définitions et rappels essentiels	8
I.2.2 Théorème de Boucherot	9
I.2.3 Techniques de détermination de la puissance réactive nécessaire à la compensation	12
I.2.3.1 Calcul à partir de mesure	12
I.2.3.2 Calcul à partir de bilan de puissance	12
I.3 Puissance transmise par une ligne électrique	14
I.3.1 Transport de l'énergie réactive	14
I.4 Moyens de compensation de la puissance réactive	15
I.4.1 Compensateur synchrone	15
I.4.2 Inductances	16
I.4.3 Condensateur- batterie de compensation	16
I.5 Principe de la compensation d'énergie réactive	17
I.6 Type de compensation	18
I.6.1 Système à compensation fixe	18
I.6.2 Système à compensation automatique	19
I.7 Installation des condensateurs de compensation	20
I.7.1 Compensation globale	20
I.7.2 Compensation partielle	20
I.7.3 Compensation individuelle	21
Conclusion	22
Chapitre II Filtre actif de puissance parallèle	23

III.1.1.4	Calcul des différentes puissances consommées par toute l'installation de l'usine	57
III.1.2	Mesure des puissances consommées	59
III.1.2.1	Description des appareils de mesure	59
III.1.2.1.1	Pince ampèremétrique	59
III.1.2.1.2	Compteur intelligent de SONELGAZ	59
III.1.2.2	Enregistrement des données	60
III.1.3	Validation de la méthode par comparaison entre les puissances estimées et mesurées	61
III.1.4	Interprétation des résultats	62
III.1.4.1	Puissance installée	62
III.1.4.2	Puissances consommées	62
III.1.4.3	Synthèse sur la puissance réactive	62
III.2	Calcul des batteries de compensation	62
III.3	Choix de mode de compensation	63
III.3.1	Justification de notre choix	63
III.3.2	Emplacement des batteries de compensation	64
III.4	Type de compensation	64
III.5	Résultat obtenu après compensation	65
III.6	Étude économique	66
III.6.1	Structure de tarification	66
III.6.2	Expression de la formule tarifaire	66
III.6.3	Tarification	67
III.6.4	Synthèse	67
	Conclusion	68
	Conclusion générale	69
	Bibliographie	70
	Annexes	72

Table des figures

I.1	Amplitude d'un creux de tension provoqué par fort puissance	4
I.2	Exemple de variations de tension	5
I.3	Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases	5
I.4	Harmonique de courant et/ou de tension [4]	6
I.5	Composition vectorielle des puissances	8
I.6	Composition vectorielle des courants	9
I.7	Déphasage entre la tension et le courant	9
I.8	Pourcentage de diminution des pertes en ligne pour une puissance active constante en fonction de l'amélioration du facteur de puissance [5]	11
I.9	Pourcentage d'augmentation de la puissance transportée à pertes actives égales en fonction de l'amélioration du facteur de puissance [5]	12
I.10	Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne	14
I.11	Principe de la compensation d'énergie réactive	17
I.12	Compensation fixe	18
I.13	Compensation automatique d'une installation	19
I.14	Synthèse localisations de compensation	21
II.1	Principe d'un filtre actif parallèle	24
II.2	Structure générale du filtre actif parallèle	25
II.3	Structure générale d'un onduleur	25
II.4	Commande d'un filtre actif de puissance	27
II.5	Schéma de principe de la méthode séparation des puissances [10]	29
II.6	Boucle de régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle	29
II.7	Algorithme p-q d'identification des courants de référence	31
II.8	Commande du filtre actif par la méthode des courants instantanées SRF	33
II.9	Schéma de principe d'une P.L.L classique	34
II.10	Schéma simplifié de la P.L.L [10]	34
II.11	Principe de commande des courants par hystérésis	35
II.12	Principe de commande des courants par commande MLI	36
II.13	Schéma d'un réseau triphasé à trois fils alimentant une charge non linéaire	36
II.14	Résultats de simulation d'un filtre actif de puissance avant le filtrage	37

II.15	Modèle de simulation du système étudié	38
II.16	Résultat de simulation d'un filtre actif de puissance après le filtrage	39
II.18	Résultat de simulation d'un filtre actif de puissance après le filtrage	41
II.19	Schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires	41
II.20	Filtre actif de puissance parallèle à quatre bras	42
II.21	Principe de la commande par méthode directe dite théorie p-q-r modifié	45
II.22	Schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires	46
II.23	Tension de source triphasée	47
II.24	The average and standard deviation of critical parameters	47
II.25	Modèle de simulation du système étudié	48
II.26	The average and standard deviation of critical parameters	49
III.1	Niveau, atelier et groupe de l'usine	54
III.2	Plaque signalétique	55
III.3	Puissance consommée par chaque niveau	58
III.4	Pince ampèremétrique	59
III.5	Compteur intelligent de SONELGAZ	60
III.6	Localisation des batterie des condensteurs	63
III.7	Emplacement des batteries de compensation	64
III.8	Armoire de compensation en gradin	65
III.9	Facteur de puissance après la compensation	65
III.10	Schéma simplifié du cycle de la formule tarifaire	66

Liste des tableaux

I.1	Facteur de simultanéité pour armoire de distribution	13
I.2	Facteur de simultanéité en fonction de l'utilisation	14
II.1	Tensions générées par l'onduleur à structure de tension	26
II.2	Modes de compensation de la commande des puissances instantanées	30
II.3	Modes de compensation de la commande des puissances instantanées	33
II.4	Paramètres de simulation du FAP	36
II.5	Paramètres de simulation du FAP	38
II.6	Tensions générés par l'onduleur de tension à quatre bras	43
II.7	Modes de compensation de la commande des puissances instantanées	44
II.8	Paramètres de simulation du FAP	46
II.9	Paramètres de simulation du FAP	48
III.1	Puissance installée de l'atelier 1	55
III.2	Puissance installée de l'atelier 2	56
III.3	Puissance installée de l'atelier 3	56
III.4	Coefficients d'utilisation K_u	56
III.5	Coefficients de simultanéité K_s	57
III.6	Puissance utilisé de niveau 1	57
III.7	Puissance utilisé de niveau 2	58
III.8	Puissance utilisé de niveau 3	58
III.9	Puissance apparente avec facteur d'extension	58
III.10	Puissance consommée de l'atelier 1	60
III.11	Puissance consommée de l'atelier 2	61
III.12	Puissance consommée de l'atelier 3	61
III.13	Comparaison entre les puissances calculé et mesuré	61
III.14	Énergie réactive doit compense et capacité des condensateurs nécessaire	63

Liste des symboles

FPB	Filtre passe bas
FAP	Filtre Actif Parallèle
FMV	Filtre Multi Variables
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
SRF	Théorie du référentiel lié au synchronisme
THD	Taux de distorsion Harmonique
FFT	Fast Fourier Transformer
i_{f123}	Courant injecté par le filtre
i_{ref}^*	Courant référence
V_{s123}	Tension de source triphasé
i_{s123}	Courant de source triphasé
V_{dc}	Tension aux borne du condensateur de l'onduleur
C_{dc}	Condensateur de stockage
R_{s123}	Résistance de source triphasé
l_{S123}	LL'inductance de source triphasé
R_{c123}	Résistance de ligne triphasé
l_{c123}	LL'inductance de ligne triphasé
r_f	Résistance de filtre de sortie
l_f	Inductance de filtre de sortie
l_d	L'inductance de la charge
l_d	L'inductance de la charge
i_n	Courant de neutre
p	Puissance instantanée active
q	Puissance instantanée réactive
Pu	Puissance Utilisée
Pa	Puissance Absorbée
$\cos \varphi$	Facteur de puissance
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
Qc	Puissance réactive fournie par des condensateurs

Ia	Courant actif consommé
Ir	Courant réactive
It	Courant total
Wa	L'énergie active consommée
Wr	L'énergie réactive consommée
Ku	Facteur d'utilisation
Ks	Facteur de simultanéité
Ke	Facteur d'extension

INTRODUCTION GÉNÉRALE

A travers l'analyse des consommations en électricité au niveaux industrielle, il a été enregistré des harmoniques et une consommation très importante en énergie réactive.

Lorsque la consommation de l'énergie réactive dépasse la moitié de l'énergie active, il est appliqué une pénalisation financière qui est proportionnelle à la quantité de l'énergie réactive consommée. Or dans le cas contraire, c'est une bonification, et cette fois ci, il s'agit d'un montant à déduire de la facture. De plus, du fait d'un courant d'appel plus important, la circulation de l'énergie réactive sur le réseau de distribution entraîne des surcharges au niveau des transformateurs, de l'échauffement des câbles d'alimentation, des pertes en ligne supplémentaires et des chutes de tension considérables.

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est nécessaire d'éliminer les harmoniques et produire de l'énergie réactive le plus près possible des installations industrielles, pour éviter qu'elle ne soit pas transportée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle « le filtrage et la compensation de l'énergie réactive ».

La tâche qui nous a été confiée par l'entreprise consiste à réaliser une étude sur les besoins en équipements pour éliminer les harmoniques, produire l'énergie réactive nécessaire et le dimensionnement des batteries de compensations au niveau de l'usine de carrelage, conformément aux exigences de l'entreprise. La réalisation de cet objectif exige une connaissance détaillée de toute l'installation électrique de l'usine ainsi que tous les équipements (machines, transformateurs, etc.). Cela sera suivi par un calcul du bilan de puissance qui nous permettra de dimensionner le système de compensation et les éléments du réseau interne (câbles, élément de protection).

Pour cet effet, nous avons subdivisé ce travail en trois chapitres. Le premier porte sur des généralités sur les harmonique et l'élaboration du bilan de puissance qui va nous permettre de déterminer la puissance réellement consommée et le facteur de puissance. Le deuxième chapitre est réservé au filtre actif qui élimine les harmoniques et la compensation de l'énergie réactive. Le troisième chapitre est une partie pratique consacrée à l'élaboration du bilan de puissance de l'usine pour le choix du système de compensation et le type des batteries de condensateurs à installer, ainsi que le mode et le système de compensation.

CHAPITRE

I

GÉNÉRALITÉ

Introduction

L'énergie électrique doit être fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie

Mais, en réalité l'onde de tension n'est jamais parfaitement sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude de cette onde varient en permanence, ceci est dû en partie à la présence des charges non linéaire.

Dans ce chapitre on va classer les différentes perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique et exposer leurs causes et leurs conséquences. Ainsi nous présenterons quelques solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques.

I.1 Classification des perturbations électriques

La surveillance de la qualité de l'énergie est un service essentiel que de nombreux producteurs d'électricité fournissent à leurs importants clients industriels et commerciaux. Classer les différentes perturbations électriques est une tâche difficile qui nécessite un niveau élevé de connaissances en ingénierie. En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques, à savoir :

- 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. Ainsi selon [1] nous trouvons :

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

Pour mieux comprendre les perturbation détériorant la qualité d'énergie électrique, nous allons les décrire plus en détail. Ainsi nous avons [2] :

I.1.1 Creux de tension et coupures brèves

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10 ms jusqu'à 1 min.

Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90 % de la valeur nominale et d'une durée de 10 ms à 1 min.

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance.

Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause des creux de tension et des 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 figureI.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 figureI.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.

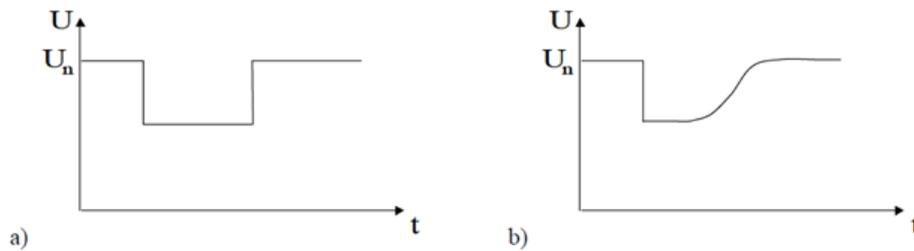


FIGURE I.1 – Amplitude d'un creux de tension provoqué par fort puissance

I.1.2 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 produisent 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 conduisent à une composition spectrale de fréquence dans la bande de 0,5 à 25Hz .

Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents.

Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière.

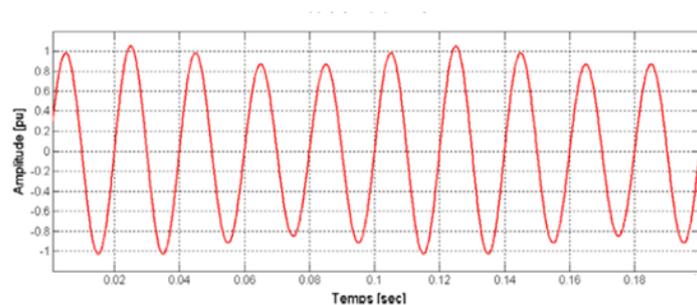


FIGURE I.2 – Exemple de variations de tension

I.1.3 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 $\pm 120^\circ$.

Quand les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré (figure I.2).

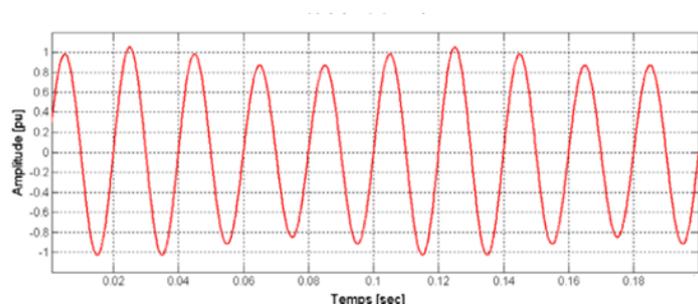


FIGURE I.3 – Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases

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.

I.1.4 Harmoniques et inter-harmoniques

Selon le pays, la fréquence de ligne est généralement de 50 Hz ou 60 Hz. En pratique, les formes d'onde de tension et de courant ne sont pas sinusoïdales, surtout lorsque des charges non linéaires sont présentes et engendrent des harmoniques dans le réseau électrique. Ces harmoniques sont des composants d'une forme d'onde périodique qui oscillent avec une fréquence multiple de la fréquence de ligne.

Par contre, les inter-harmoniques sont des composants dont les fréquences ne sont pas des multiples entiers de la fréquence de la puissance fondamentale.

Les sources d'harmoniques actuelles les plus courantes sont les redresseurs à diodes ou à thyristor qui transforment des tensions ou courants alternatifs en tensions ou courants continus.

D'autres sources d'harmoniques existent telles que les variateurs de vitesse, les fours à arc et les dispositifs à base d'électronique de puissance.

Les harmoniques de courant peuvent provoquer une dissipation de l'énergie en chaleur. En présence d'une résonance, ces harmoniques peuvent également détruire les équipements électriques ou enclencher des disjoncteurs.[3]

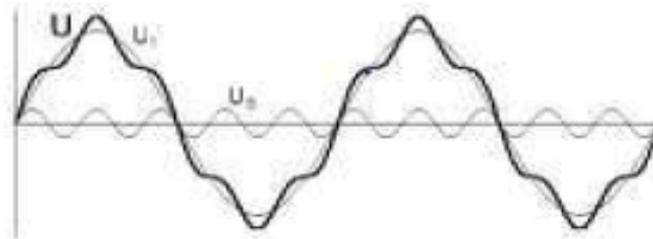


FIGURE I.4 – Harmonique de courant et/ou de tension [4]

Les outils de calcul permettant la détection et la présence des harmoniques sont le calcul du taux de distorsion harmonique THD et le calcul du facteur de puissance F_p .

Le calcul du taux de distorsion harmonique THD sert à connaître si le réseau électrique est pollué ou non et s'il y a une présence ou pas d'harmonique. Ainsi, si le THD est égal à zéro, cela indique l'absence d'harmonique. Dans la littérature, il existe deux expressions pour évaluer le THD, à savoir :

- **Taux de Distorsion Harmonique Individuel THD_n** : Ce taux de distorsion harmonique individuel de rang n est le rapport entre la valeur efficace I_n de l'amplitude de l'harmonique n et celle du fondamentale I_0 :

$$THD_n = \frac{I_n}{I_0} 100 \quad (I.1)$$

- **Taux de Distorsions Harmoniques** : Ce taux de distorsion harmonique est de caractère global. Il permet de caractériser la déformation globale et se calcule de deux façons [AM.BE 15], à savoir :

1. Taux de Distorsion Harmonique Totale par rapport au fondamental THD_f et est exprimé comme suit :

$$THD_f = \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_0} 100 \quad (I.2)$$

2. Taux de Distorsion Harmonique Totale noté THD_s relatif à la valeur efficace est comme suit :

$$THD_s = \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}} 100 \quad (I.3)$$

Le THD_s est rarement utilisé, sauf indication contraire, on applique en général la relation du THD_f

Une autre remarque importante lors de la présence des harmoniques est le calcul du facteur de puissance. La puissance apparente S est composée de trois parties : une puissance active P , une puissance réactive Q et une puissance déformante D .

C'est cette puissance déformante contient les harmoniques. Son expression est donnée par l'équation suivante :

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

Dans le cas d'un signal sinusoïdal, le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.5)$$

Ce facteur de puissance est toujours inférieur à 1

I.2 Problématique de l'énergie réactive en milieu industriel

Beaucoup de machines industrielles fonctionnent grâce à la présence d'un champ magnétique interne. La création et l'entretien de ce champ magnétique réclame de l'énergie réactive, on rappelle que seule la puissance active est utilisable.

L'énergie réactive est indispensable au fonctionnement des machines mais n'apporte aucune valeur ajoutée à l'entreprise. [5]

I.2.1 Définitions et rappels essentiels

Toute machine électrique utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

- L'énergie active consommée (kWh) résulte de la puissance active $P(\text{kW})$ des récepteurs. Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- L'énergie réactive consommée (kvarh) sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive $Q(\text{kvar})$ des récepteurs.
- L'énergie apparente (kVAh) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente $S(\text{kVA})$ des récepteurs, somme vectorielle de $P(\text{kW})$ et $Q(\text{kvar})$.

Ces puissances active et réactive sont données par les expressions suivantes :

- Puissance active : $P = UI \cdot \cos \varphi$ (kW),
- Puissance réactive : $Q = UI \cdot \sin \varphi$ (kvar).
- Puissance apparente : $S = UI$ (kVA).

En triphasé ces trois puissances sont multipliées par $\sqrt{3}$, composition vectorielle des puissances indiquées sur la figure I.5 suivant :

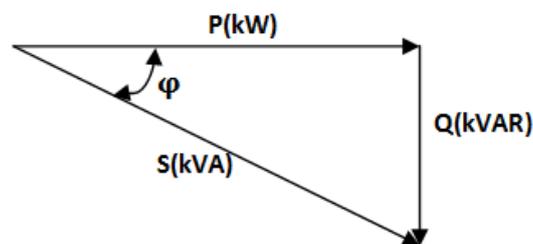


FIGURE I.5 – Composition vectorielle des puissances

Nous pouvons également les représenter par les composantes active et réactive du courant (figure I.6), comme le montre les expressions suivantes :

- Courant transformé en puissance mécanique ou chaleur : $I_a = I \cdot \cos \varphi$.
- Courant pour l'excitation : $I_r = I \cdot \sin \varphi$.
- Courant dans les conducteurs : $I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$.

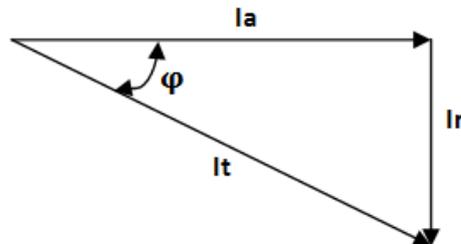


FIGURE I.6 – Composition vectorielle des courants

Comme nous l'avons dit plus haut le facteur de puissance est l'écart angulaire entre les vecteurs que représente la tension et l'intensité; dont on le désigne par le cosinus de l'angle $\cos \varphi$.

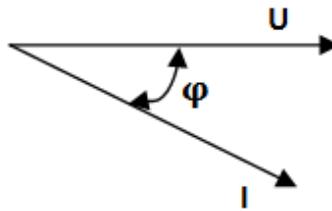


FIGURE I.7 – Déphasage entre la tension et le courant

Ainsi le facteur de puissance est égal à :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\text{Puissance active (KW)}}{\text{Puissance apparente (KVA)}} \quad (I.6)$$

I.2.2 Théorème de Boucherot

Si un circuit contient n composants absorbant chacun une puissance active P_i et une puissance réactive Q_i alors les puissances totales du circuit vérifient :

$$\begin{aligned} P_T &= \sum_{i=1}^n P_i \\ Q_T &= \sum_{i=1}^n \pm Q_i \end{aligned} \quad (I.7)$$

La conservation des puissances actives est une version de la conservation de l'énergie et n'implique aucune condition de fréquence. Par contre l'égalité concernant les puissances réactives n'est valide que

dans les circuits dont tous les éléments fonctionnent à la même fréquence. Si on considère les puissances apparentes S_i on a :

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \quad (I.8)$$

Dans l'environnement industriel actuel, la prolifération des charges consommant de l'énergie réactive branchées sur les réseaux de distribution électrique entraîne une dégradation du facteur de puissance, dus aux :

- Moteurs asynchrones ordinaires,
- Lampes à ballast magnétiques à fluorescence ou à décharge,
- Fours à induction et à arc,
- Machines à souder.

Les conséquences dus à la consommation de cette énergie réactive sont nombreuses, à savoir :

- Des surcharges au niveau des transformateurs.
- Des chutes de tension en bout de ligne.
- L'échauffement des câbles d'alimentation donc des pertes d'énergie actives .
- et le surdimensionnement des protections.

Pour ces raisons, il est nécessaire d'amélioration du facteur de puissance d'une installation présente car ayant de multiples avantage d'ordre **économique** et **technique** : [6]

- **Avantage économique** : Ces avantages matérialisent l'impact de la compensation sur une installation et permettent d'évaluer le temps de retour de l'investissement consenti pour les compenser, à savoir :

- Suppression de la facturation des consommation excessives d'énergie réactive dans le cas d'un contrat.

- Réduction de la puissance souscrite en kVA

- Diminution de l'énergie active consommée.

- Au point de livraison, le distributeur d'énergie fournit gratuitement de l'énergie réactive (50% de l'énergie actives). Donc l'énergie réactive consommée au-delà de $\tan \varphi$ autorisé par le distributeur d'énergie est facturée dans les barèmes de prix en vigueur, la quantité d'énergie réactive facturée $W_f = W_r - W_{gr} = W_a(\tan \varphi - 0.5)$

- $W_a(kWh)$: Énergie active consommée mensuellement pendant la période soumise à limitation.

- $W_r(Kvarh)$: Énergie réactive consommée mensuellement pendant la période soumise à limitation.

- $W_{gr} = 0.5.W_a$: Quantité d'énergie réactive livrée gratuitement.

- **Avantage Technique** :

Parmi les avantages techniques que nous pouvons cité :

1. Pour des charges à faible facteur de puissance alimentées par les lignes de distribution surchargées sont souvent à l'origine de chutes de tension. La présence d'une batterie de condensateur en bout de ligne permet leur diminution.

Ainsi le maintien relatif de la tension en bout de ligne est définie par la formule suivante :

$$\Delta U\% = \frac{X_L \times Q}{10 U^2} \quad (I.9)$$

Dans laquelle :

- X_L =réactance de la ligne en Ω
 - Q = Puissance réactive de la batterie de condensateur en Kvar
 - U = Tenion nominal des condensateurs en kV
2. La diminution des pertes en ligne à puissance active constante ; et en fnction de l'amélioration du facteur de puissance et donc de la diminution de l'énergie réactive, et donc les pertes watts qui sont intégrées dans la consommation enregistrée par les compteurs d'énergie active (kWh) diminue. Le graphique ci-dessous donne en fonction de l'amélioration du facteur de puissance le pourcentage de diminution des pertes en ligne pour une puissance active constante.

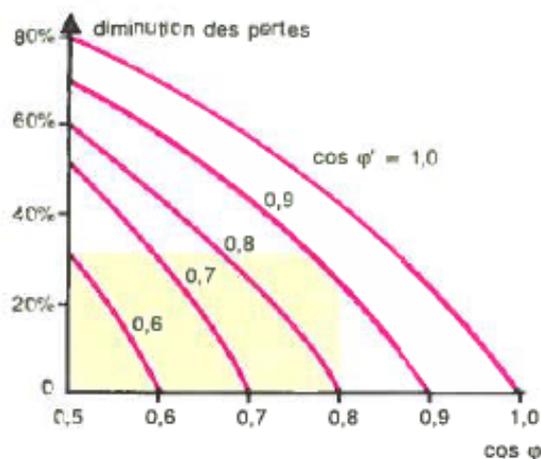


FIGURE I.8 – Pourcentage de diminution des pertes en ligne pour une puissance active constante en fonction de l'amélioration du facteur de puissance [5]

Avec :

$\cos \varphi$: Facteur de puissance de l'installation non compensée

$\cos \varphi'$: Facteur de puissance de l'installation compensée

3. Augmentation de la puissance disponible au secondaire des transformateur

4. Augmentation de la puissance transportée par les lignes à pertes égales

Le graphique ci-dessous donne, en fonction de l'amélioration du facteur de puissance, le pourcentage d'augmentation de la puissance transportée à pertes actives égales.

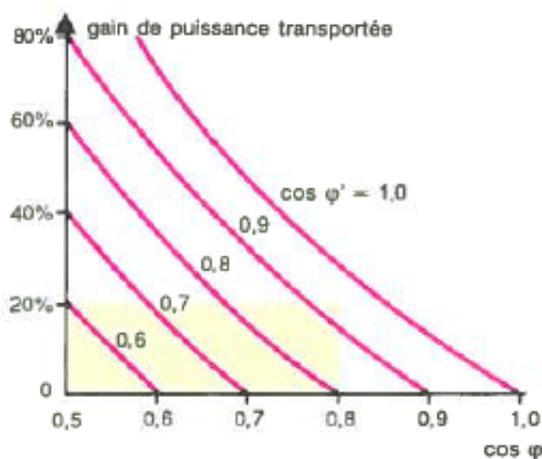


FIGURE I.9 – Pourcentage d'augmentation de la puissance transportée à pertes actives égales en fonction de l'amélioration du facteur de puissance [5]

Exemple :

Pour passer de $\cos \varphi = 0,6$ à $\cos \varphi = 0,9$

- Les pertes en ligne sont diminuées de 60 % (à puissance active constante Figure II.21).
- La puissance transportée est augmentée de 55% (à pertes actives constantes - Figure I.9).

I.2.3 Techniques de détermination de la puissance réactive nécessaire à la compensation

I.2.3.1 Calcul à partir de mesure

I.2.3.2 Calcul à partir de bilan de puissance

L'objet de cette méthode est de faire un inventaire de tous les récepteurs de l'installation pour l'estimation de la puissance d'utilisation.[7]

- **Puissance d'une installation :**

La puissance installée (kW) est la somme des puissances nominales de tous les récepteurs de leurs installations. Ainsi, l'indication de la puissance nominale P_n est marquée sur la plupart des appareils et équipements électriques. Cependant il faut savoir qu'en pratique la puissance nominale n'est pas toujours la puissance réellement consommée par le récepteur.

- **Puissance utilisée :**

Elle représente la puissance réellement demandée au point source par les divers circuits d'une

installation électrique. Elle est plus faible que la puissance installée vu que les récepteurs n'absorbent pas tous simultanément leurs puissances nominales. Son estimation permet d'évaluer la puissance réellement utilisée. Néanmoins sa détermination nécessite la connaissance des trois facteurs suivants : le facteur d'utilisation (k_u), le facteur de simultanéité (k_s) et le facteur d'extension (k_e).

- **Facteur d'utilisation k_u :**

En général, les récepteurs électriques ne fonctionnent pas à leurs puissances nominales d'où l'introduction du facteur d'utilisation pour le calcul de la puissance absorbée. Sachant que pour chaque type de récepteur il est associé un facteur d'utilisation bien déterminé. Ainsi, dans une installation électrique, ce facteur peut être estimé en moyenne à 0.75 pour les moteurs, et 1 pour l'éclairage.

- **Facteur de simultanéité K_s :**

Les récepteurs d'une installation ne fonctionnent pas simultanément. C'est pourquoi il est permis d'appliquer aux différents ensembles de récepteurs (ou de circuit) des facteurs de simultanéité. La détermination des facteurs de simultanéité nécessite la connaissance détaillée de l'installation considérée et l'expérience des conditions d'exploitation, notamment pour les moteurs et les prises de courant.

- **Facteur d'extension K_e :**

Le rôle de ce facteur, également appelé facteur de réserve, est de prévoir une augmentation de la puissance absorbée. ce coefficient varie de 1 à 1,3.

On ne peut donc pas donner des valeurs précises applicables à tous les cas. Les normes NF C 14-100, NF C 63-410 et le guide UTEC 15-105 donnent des indications sur ces facteurs.

Nombre de récepteurs	Facteurs de simultanéité k_s
1 à 3	0.9
4 à 5	0.8
5 à 9	0.7
10 et en plus	0.6
Ensembles partiellement testés choisir dans tous les cas	1

TABLE I.1 – Facteur de simultanéité pour armoire de distribution

Utilisation	Facteurs d'utilisation k_u
Eclairage	1
Chauffage et conditionnement d'air	1
Prises de courant	0.1 à 0.2
Pour le moteur le plus puissant	1
Pour le moteur suivant	0.75
Pour les autres	0.6

TABLE I.2 – Facteur de simultanéité en fonction de l'utilisation

I.3 Puissance transmise par une ligne électrique

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

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

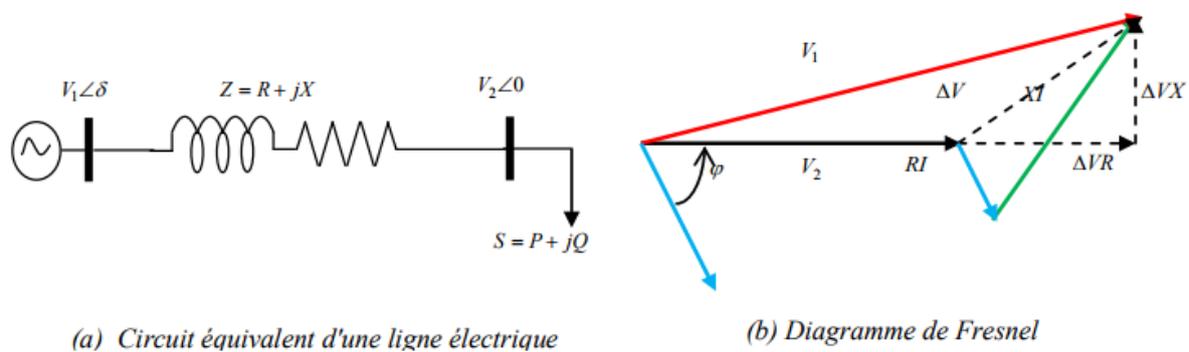


FIGURE I.10 – Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne

I.3.1 Transport de l'énergie réactive

Le transport de l'énergie réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, la compensation de la puissance réactive est utilisée pour limiter ce transport de puissance réactive.

I.4 Moyens de compensation de la puissance réactive

Les compensateurs parallèles permettent le contrôle de la tension en un point du réseau grâce à l'injection de puissance réactive. Ces compensateurs sont connectés entre phase et terre.

Il en existe de plusieurs types :

I.4.1 Compensateur synchrone

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

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

Avantages :

Ce moyen de compensation est avantageux :

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

Inconvénients :

Il a été délaissé de son application comme compensateur malgré leurs mérites pour les inconvénients :

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

I.4.2 Inductances

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau

I.4.3 Condensateur- batterie de compensation

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

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

On distingue trois types :

- Des batteries de condensateurs HT
- Des batteries de condensateurs MT
- Des batteries de condensateurs BT

Le condensateur est le plus utilisé compte-tenu :

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

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

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

I.5 Principe de la compensation d'énergie réactive

Le principe de la compensation d'énergie réactive est de générer la puissance réactive à proximité de la charge pour éviter qu'elle ne soit fournie à travers le réseau. C'est ce qu'on appelle "compensation de l'énergie réactive".

En effet, pour une même puissance active P utilisée, il faut fournir d'autant plus de puissance apparente S que le $\cos \varphi$ est faible, c'est-à-dire que l'angle φ est élevé. Sur la figure I.11a montre que la puissance réactive Q_c fournie par des condensateurs permet de réduire la puissance apparente de la valeur S à la valeur S' .

la figure I.11b présente la composition vectorielle des différents courants et pour un courant actif donné, Le courant total fourni par le réseau I_{t2} est réduit dans les conducteurs.

Avec :

I_a = Courant actif consommé.

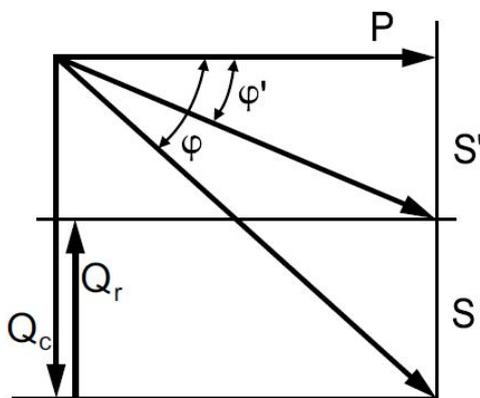
I_{t1} = Courant total avant compensation.

I_{r1} = Courant réactif fourni au travers du transformateur avant compensation.

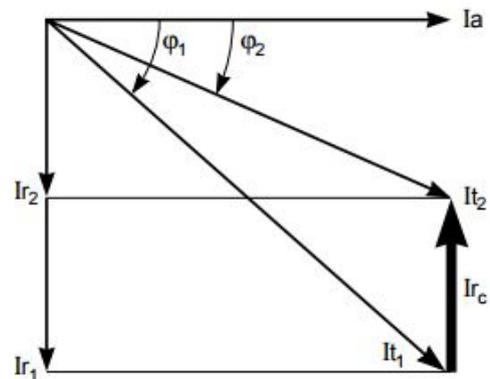
I_{t2} = Courant total après compensation.

I_{r_c} = Courant réactif fourni par le condensateur.

I_{r2} = Courant réactif fourni par le transformateur après compensation ($I_{r2} = I_{r1} - I_{r_c}$)



(a) Diagramme des puissances



(b) Composition vectorielle des différents courants, et l'effet de la compensation.

FIGURE I.11 – Principe de la compensation d'énergie réactive

I.6 Type de compensation

En basse tension, la compensation de l'énergie réactive s'effectue au choix avec deux systèmes d'équipements :

I.6.1 Système à compensation fixe

Il utilise des condensateurs de valeur fixe délivrant une puissance réactive constante. C'est un fonctionnement de type "tout ou rien".

La mise sous tension de ces batteries est :

- Soit manuelle par disjoncteur ou interrupteur.
- Soit semi-automatique par contacteur commandé à distance.

Ce type de batteries est généralement utilisé dans les cas :

- D'installation électrique à charge constante fonctionnant 24/24 h.
- De compensation réactive des transformateurs.
- De compensation individuelle de moteurs.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est inférieure ou égale à 15 % de la puissance du transformateur.

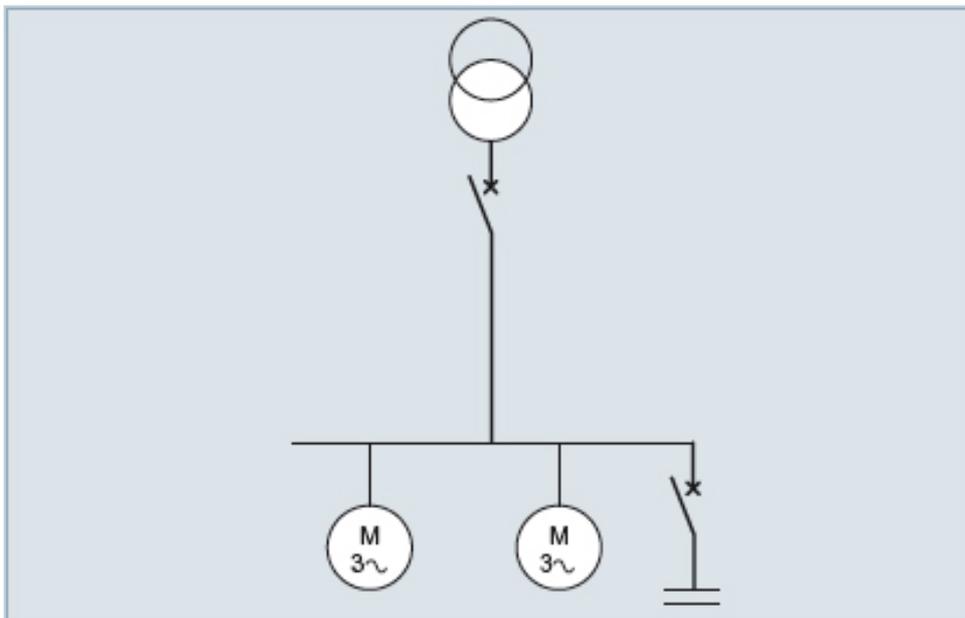


FIGURE I.12 – Compensation fixe

I.6.2 Système à compensation automatique

Mettant en jeu une batterie de condensateurs divisée en gradins et commandée par un régulateur, ce dernier adapte la puissance réactive fournie aux besoins de l'installation en fonction du $\cos \varphi$. Ces batteries sont également utilisées dans le cas :

- D'installation électrique à charge variable.
- De compensation de tableaux généraux (TGBT) ou gros départ.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est supérieure à 15% de la puissance du Transformateur.

Une batterie de condensateurs à régulation automatique est divisée en gradins. Chaque gradin est commandé par un contacteur. L'enclenchement du contacteur met le gradin en service en parallèle avec les gradins connectés à l'installation, le déclenchement du contacteur, au contraire, le met hors service. Ainsi la capacité totale de la batterie de condensateurs varie par palier en fonction du besoin de kVAR.

Un relais varométrique mesure la valeur du facteur de puissance de l'installation et en commandant l'ouverture ou la fermetures des contacteurs des gradins en fonction de la charge, régule la valeur du facteur de puissance de l'installation à la valeur consignée. La tolérance sur la régulation est déterminée par la taille de chaque gradin. Le transformateur de courant TC associé au relais varométrique doit être installé sur une des phases de l'arrivée alimentant les charges à compenser, comme décrit dans le schéma de la figure I.13

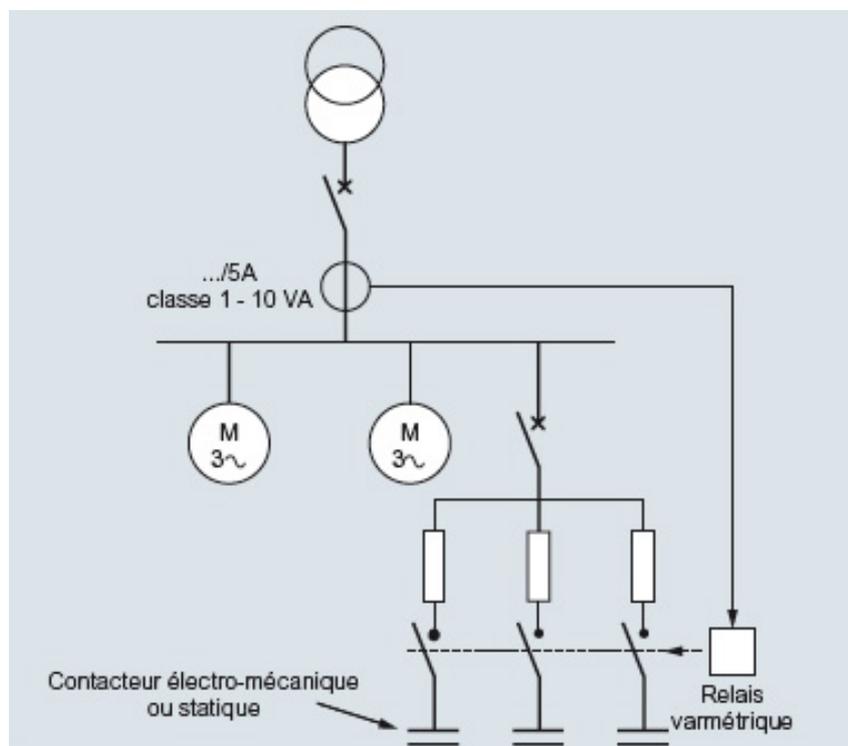


FIGURE I.13 – Compensation automatique d'une installation

I.7 Installation des condensateurs de compensation

I.7.1 Compensation globale

Lorsque la charge est stable et continue, une compensation pour l'ensemble de l'installation est raccordée en tête d'installation BT et reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation.

Intérêt :

Le foisonnement naturel de l'installation entraîne un dimensionnement faible de la batterie et un nombre élevé d'heures de fonctionnement. Elles sont donc amorties encore plus rapidement.

De plus, ce type de compensation :

- Supprime les facturations complémentaires pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : tarif vert),
- Diminue la puissance apparente (ou appelée) en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW).

Exemple ci-dessous : (voir figure I.14)

- batterie HT sur réseau de distribution HT(1),
- batterie MT pour abonné MT (2),
- batterie BT régulée ou fixe pour abonné BT (3).

I.7.2 Compensation partielle

Une compensation partielle est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents. La batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être réalisée.

Avantages :

La compensation partielle de l'installation :

- Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessives d'énergie réactive.
- Réduit la puissance apparente d'utilisation (en kVA), calculée habituellement à partir des charges installées.
- Soulage le transformateur d'alimentation, ce qui permet d'alimenter des charges supplémentaires si nécessaire.
- Réduit les pertes en ligne dans ces mêmes câbles.

Exemple ci-dessous : (voir figure I.14)

- batterie MT sur réseau MT (4),
- batterie BT par atelier pour abonné MT (5).

I.7.3 Compensation individuelle

Une compensation individuelle est à envisager dès que la puissance du récepteur (en particulier d'un moteur) est significative par rapport à la puissance de l'installation. La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive.

Avantages :

La compensation individuelle réduit :

- Pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive,
- Puissance apparente consommée (en kVA),
- Section des câbles et les pertes en ligne.

Exemple ci-dessous : (voir figure I.14)

- batterie de condensateurs BT (6)

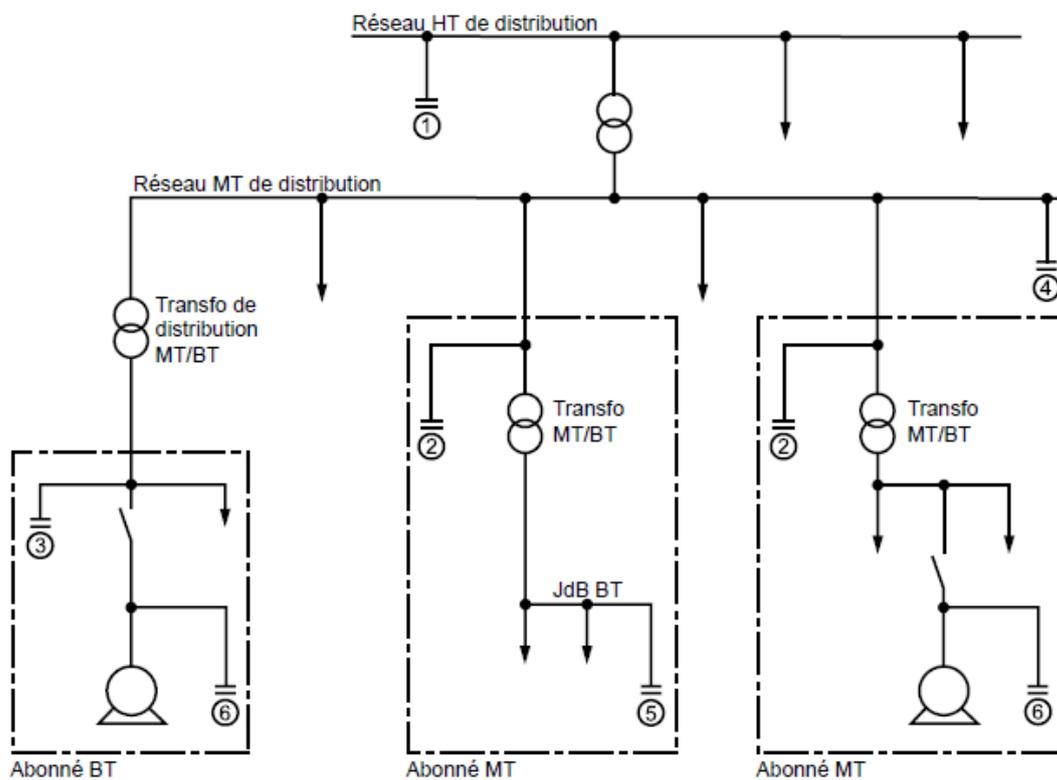


FIGURE I.14 – Synthèse localisations de compensation

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales perturbations qui peuvent apparaître dans les réseaux de distribution, leur origine et conséquences sur les charges connectées.

Ensuite, on a vu l'objectif de la compensation d'énergie réactive en milieu industrielle et nous avons représenté différentes méthodes pour calculer le bilan de puissance qui nous a permis de connaître le niveau de consommation en énergie électrique dans le but d'améliorer le facteur de puissance de l'installation électrique industrielle .

Dans le chapitre suivant, on se propose d'effectuer une étude d'un filtre actif parallèle d'une installation électrique industrielle HTA/BTB pour compenser les perturbations dans les réseaux électriques.

CHAPITRE

II

FILTRE ACTIF DE PUISSANCE PARALLÈLE

Introduction

Le filtrage actif de puissance parallèle (FAP) est une solution moderne et efficace permettant de compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive lorsqu'il est monophasé ou triphasé (équilibré ou déséquilibré).

En général, le filtre actif de puissance parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux basse tension et moyenne tension. Pour cela nous spécifions deux types de filtres actifs parallèles, les filtres actif de puissance à trois bras et les filtres actifs de puissance à quatre bras.

Ainsi, dans ce chapitre nous allons présenter une description générale des différentes parties constituant un filtre actif de puissance parallèle.

II.1 Étude de la partie puissance d'un filtre actif de puissance à trois bras

L'utilisation de charges non linéaires produisant des harmoniques de courant dans le système de distribution jouent un rôle majeur dans la détérioration de la qualité de la puissance. La solution la plus efficace est l'utilisation des filtres actifs parallèle pour éliminer les harmoniques de courant et compenser la puissance réactive afin d'obtenir une très bonne qualité de l'alimentation. La figure suivante propose un filtre actif de puissance connecté en parallèle au réseau électrique.

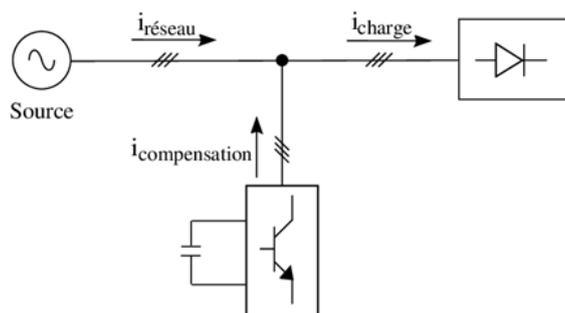


FIGURE II.1 – Principe d'un filtre actif parallèle

D'après cette figure, nous remarquons que les filtres actifs de puissance parallèle sont des onduleurs, constitués de convertisseurs à base d'interrupteurs de puissance, associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Ainsi, la structure générale du filtre actif de puissance parallèle se présente sous la forme de deux blocs : La partie puissance et la partie contrôle-commande.

- La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (IGBT, MOSFET, etc.) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- Et D'un filtre de sortie.

- Partie commande est constituée :

- D'un bloc d'identification des courants perturbés.
- D'un système de régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- Et D'un système de régulation du courant injecté sur le réseau.

Ainsi nous pouvons représenter le schéma complet d'un filtre actif de puissance par la figure suivante :

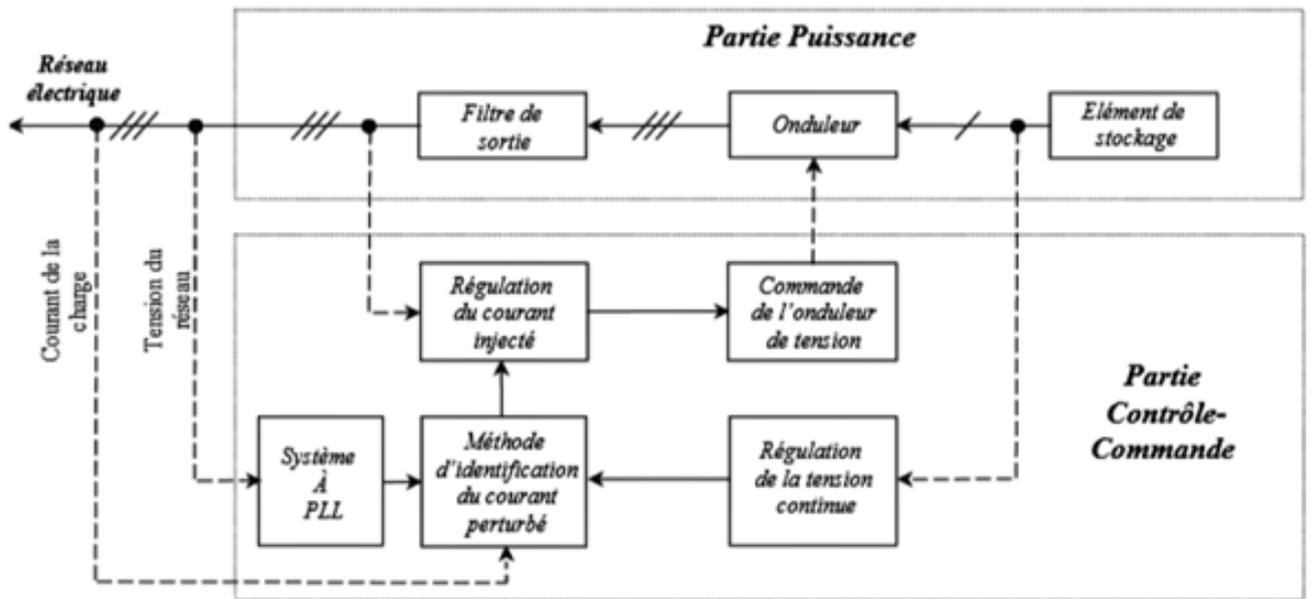


FIGURE II.2 – Structure générale du filtre actif parallèle

La structure générale la plus utilisée d'un filtre actif de puissance connectée à un réseau électrique à trois fils est un onduleur à trois bras. Cet onduleur est connecté côté continu par un système de stockage de type condensateur C_{dc} afin de délivrer une tension V_{dc} quasi constante. Côté alternatif, il est connecté au réseau électrique via un filtre de type passif habituellement du premier ordre (L,R), comme le montre la figure suivante. [14]

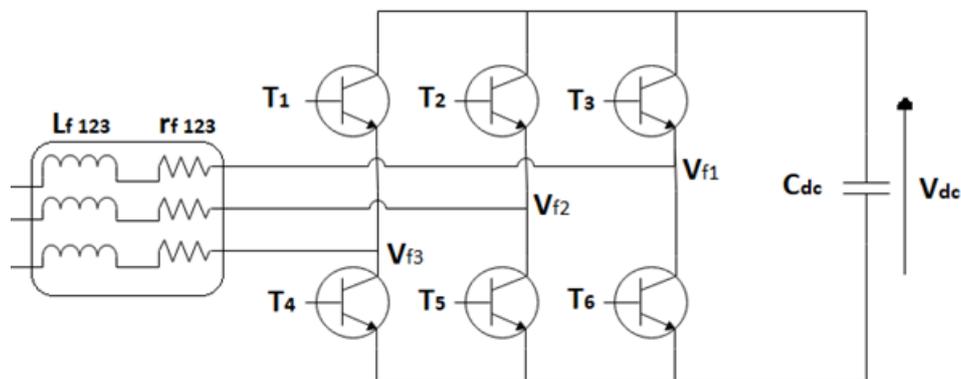


FIGURE II.3 – Structure générale d'un onduleur

En pratique, on commande les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Le tableau II.1 montre les combinaisons possibles des tensions V_{f1} , V_{f2} , et V_{f3} de l'onduleur.

Numéro de l'état	Interrupteurs fermés	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}
1	T4, T5, T6	0	0	0
2	T1, T5, T6	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$
3	T2, T4, T6	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$
4	T1, T2, T6	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$
5	T3, T4, T5	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$
6	T1, T3, T5	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	T2, T3, T4	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
8	T1, T2, T3	0	0	0

TABLE II.1 – Tensions générées par l'onduleur à structure de tension

II.2 Étude de la partie commande d'un filtre actif de puissance à trois bras

La partie contrôle-commande d'un filtre actif de puissance est en général constituée de :

- Méthode d'identification des courants harmoniques.
- Régulation du bus continu de l'onduleur de tension (dans ce travail on utilisera le régulateur PI).
- Commande de l'onduleur de tension pour générer des signaux de commutation des semi-conducteurs en utilisant, l'hystérésis, ou la MLI classique ou la MLI vectorielle.

Pour identifier les courants d'harmoniques des charges non-linéaires, il existe deux stratégies de commande, qui sont :

- Commande dite directe (figure II.4a) qui est basée sur la mesure du courant de la charge polluante puis, de l'extraction des composantes harmoniques de ce courant. Le filtre actif injecte ainsi les courants harmoniques sans information sur les courants coté réseau.
- Commande dite indirecte (figure II.4b) qui consiste à mesurer les courants coté source, et d'imposer la forme sinusoïdale sur ces courants.

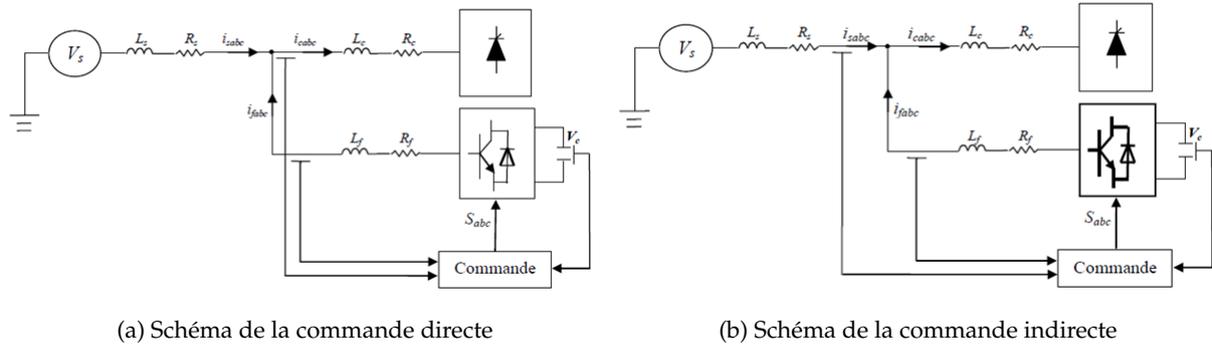


FIGURE II.4 – Commande d'un filtre actif de puissance

Nous allons dans ce paragraphe nous intéresser à la stratégie de commande dite directe. Cependant il faut savoir qu'il faut une bonne méthode afin d'identifier les courants harmoniques. Ainsi le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant d'une charge non linéaire est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif de puissance (précision, dynamique, .etc.).

Dans la littérature, on trouve plusieurs méthodes qui décrivent différents algorithmes d'identification possibles, tel que la méthode de détection du référentiel lié au synchronisme par exemple, reposant sur la transformée de Concordia. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

Il existe une autre méthode d'identification qui est en même temps la plus utilisée et qui est appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage d'être simple.

II.2.1 Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées (p-q)

La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. AKAGI. Cette méthode exploite la transformation $(\alpha-\beta)$ pour obtenir les puissances réelles et imaginaires.

Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère $(\alpha-\beta)$ associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_S) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_{ch}).

La transformation de Clarke notée transformation $(\alpha-\beta)$ permet d'écrire les relations suivantes dans un système triphasé équilibré :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

La puissance active instantanée en absence des harmoniques, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$p(t) = V_\alpha \times I_\alpha + V_\beta \times I_\beta \quad (\text{II.3})$$

et la puissance imaginaire instantanée en absence des harmoniques peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -V_\beta \times I_\alpha - V_\alpha \times I_\beta \quad (\text{II.4})$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant et de la tension. Nous pouvons ainsi établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

De cette expression on peut décomposer les puissances réelles et imaginaires instantanées en deux composantes :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

\bar{p} et \bar{q} les composantes continue de p et q

\tilde{p} et \tilde{q} les composantes alternatives de p et q

Pour une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, on utilise un filtre passe-bas avec soustraction entre l'entrée du filtre et sa sortie afin d'obtenir un filtre équivalent au filtre passe haut. comme montre la figure II.6 :



FIGURE II.5 – Schéma de principe de la méthode séparation des puissances [10]

Le filtre passe bas utilisée est de type Butterworth de second ordre, sa fonction de transfert est donnée par l'expression suivante :

$$H_{\text{FBP}} = \frac{w_c^2}{s^2 + 2\xi w_c s + w_c^2}$$

Un autre élément important utilisé dans la commande est la régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur pour maintenir cette tension à une valeur quasi-constante en utilisant un régulateur proportionnel intégral (PI). Cette régulation se fait comme le montre la figure (II.6). La valeur de la tension mesurée V_{dc} est comparée à sa référence V_{dc}^{ref} , le signal d'erreur obtenu est ensuite appliqué à l'entrée du régulateur PI. [10]

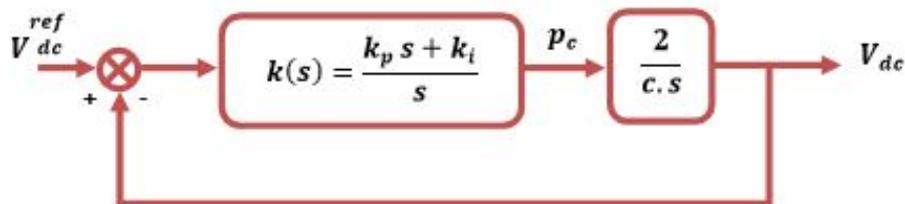


FIGURE II.6 – Boucle de régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle

Après avoir calculé la fonction de transfert en boucle fermée, puis avoir fait l'identification avec la fonction de transfert de deuxième ordre, nous obtenons :

$$K_p = \frac{C w_c^2}{2}$$

$$K_i = \frac{\xi w_c C}{2}$$

Avec ξ : le coefficient d'amortissement $\frac{\sqrt{2}}{2}$

L'équation II.5 nous permet de définir les composantes de courant comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

En introduisant (II.6) dans (II.7), les courants dans les axes α - β deviennent :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Selon la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant soit l'énergie réactive ou l'ensemble des deux. Le tableau(II.6) résume les méthodes de compensation possibles [4].

	Compensation des courants harmoniques	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des courants harmoniques et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$	$p_f = 0$ et $q_f = \tilde{q}$	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$

TABLE II.2 – Modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Notre objectif est de compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive en même temps. Ainsi l'équation (II.8) devient :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

A partir de la transformation inverse de Concordia, on détermine les courants de référence :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Ainsi, l'algorithme de commande est illustré par la figure II.7 :

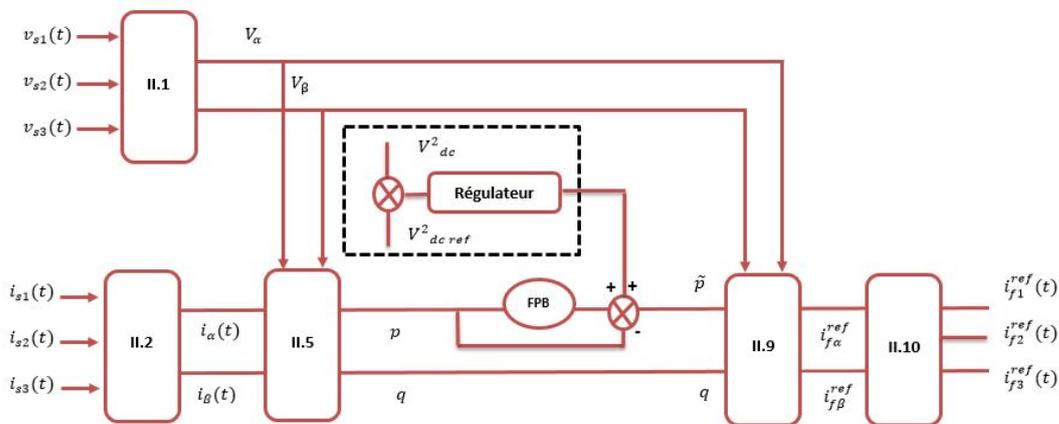


FIGURE II.7 – Algorithme p-q d'identification des courants de référence

II.2.2 Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)

Cette méthode a été introduite par BHATTACHARYA. Il exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de ligne $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$ et $i_{c3}(t)$. Ensuite, une seconde transformation est opérée pour passer des courants de ligne en d-q, ce qui permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives. Cela nous permet d'éliminer à l'aide d'un simple filtre passe bas, la composante continue du courant. L'avantage majeure de cette méthode par rapport à la précédente réside dans le fait que les éventuelles tensions harmoniques n'ont plus d'influence sur les courants identifiés et par conséquent le filtrage sera meilleur.

Son principe est basé sur la transformée de Concordia appliquée aux courants de ligne $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$ et $i_{c3}(t)$ vers un système diphasé $(\alpha-\beta)$.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Ensuite deux signaux $\cos(\hat{\theta})$ et $\sin(\hat{\theta})$ sont tirés de la tension fondamentale du réseau à partir d'une PLL, ce qui nous donne :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Ainsi les courants fondamentaux dans les axes d-q contiennent deux parties :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

\bar{i}_d et \bar{i}_q Les composantes continue de p et q et

\tilde{i}_d et \tilde{i}_q Les composantes alternatives de p et q

Nous obtenons alors :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

soient :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Selon la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et/ou l'énergie réactive. Le tableau suivant résume les méthodes de compensation possibles.

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$i_{dc} = \tilde{i}_d$ et $i_{qc} = i_q$	$i_{dc} = 0$ et $i_{qc} = \tilde{i}_q$	$i_{dc} = \tilde{i}_d$ et $i_{qc} = i_q$

TABLE II.3 – Modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Si l'objectif est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive en même temps, l'équation (II.15) devient :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

Les courants de référence sont alors calculés à partir de la transformation inverse de Concordia, soit :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

Ainsi l'algorithme de commande est illustré par la figure II.8 :

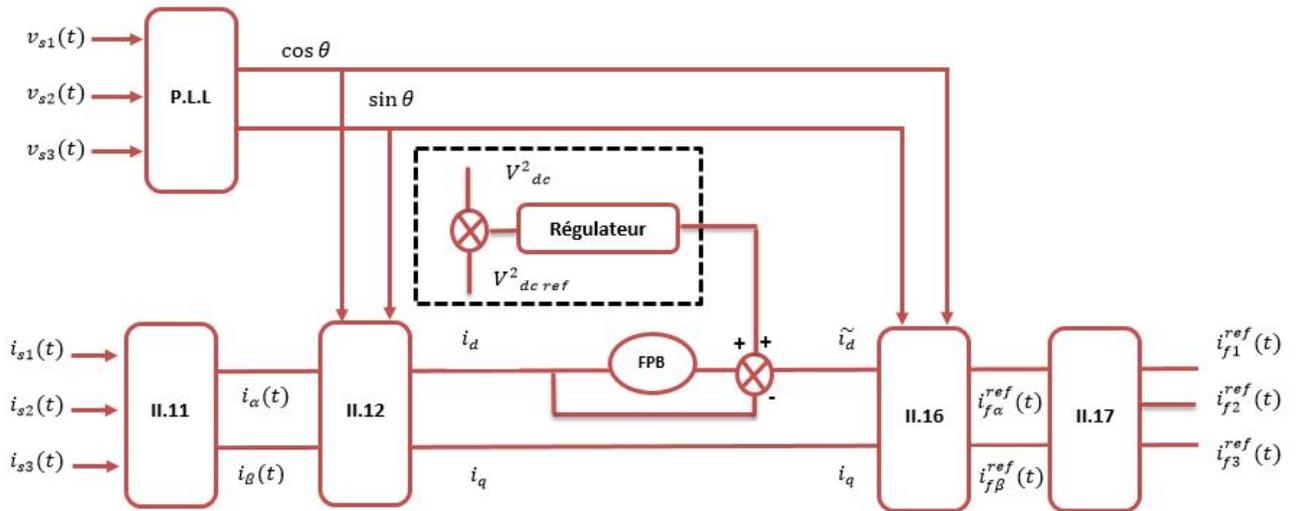


FIGURE II.8 – Commande du filtre actif par la méthode des courants instantanées SRF

Le calcul du filtre d'extraction des puissances et la régulation de la tension aux bornes du régulateur se fait comme la commande précédente. La seule différence entre les deux stratégies de commande réside dans l'introduction d'une PLL qui est utilisée pour extraire la phase de la composante fondamentale directe de la tension (V_{dc}). La figure suivante montre le schéma fonctionnel d'une P.L.L. : [10]

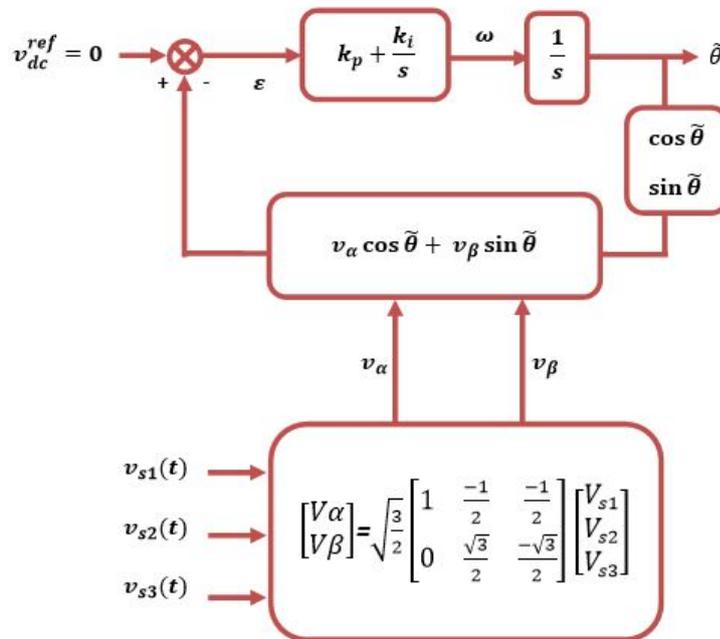


FIGURE II.9 – Schéma de principe d'une P.L.L classique

De cette figure nous pouvons obtenir le schéma simplifié de la P.L.L. :

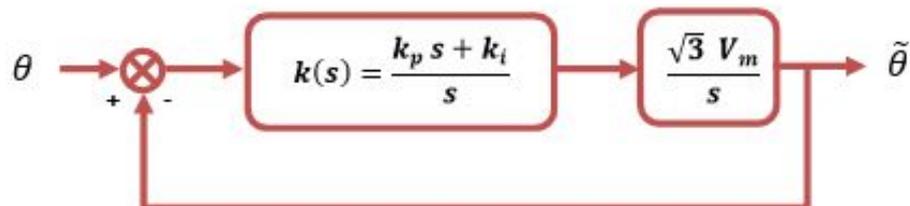


FIGURE II.10 – Schéma simplifié de la P.L.L [10]

II.2.3 Contrôle de l'onduleur

II.2.3.1 Contrôle par hystérésis

La commande par hystérésis est très utilisée en raison de sa facilité d'utilisation. En effet, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant de courant sans nécessité d'une connaissance approfondie du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure II.11 montre le principe de fonctionnement de l'hystérésis. La différence entre le courant de référence i_{ref}^* et le courant produit par l'onduleur i_f génère une erreur. Cette erreur est ensuite comparée à un modèle appelé hystérésis pour fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation du semi-conducteur. [8]

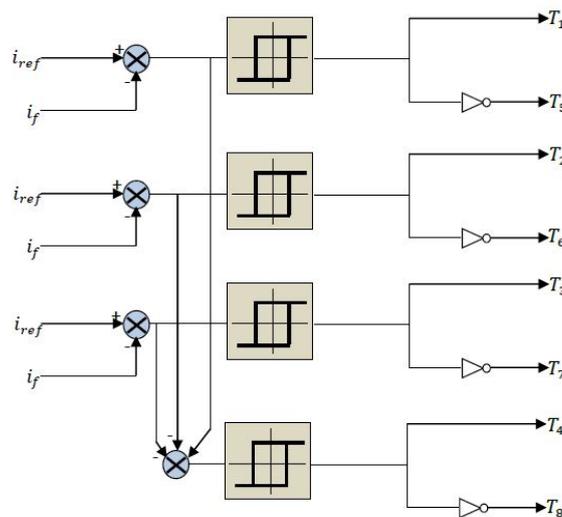


FIGURE II.11 – Principe de commande des courants par hystérésis

II.2.3.2 Contrôle par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La figure II.12 illustre le principe de contrôle par MLI. Dans ce cas, la différence entre le courant de référence i_{ref} et le courant réel i_{inj} génère une erreur qui est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulateur, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire est fixe. [9]

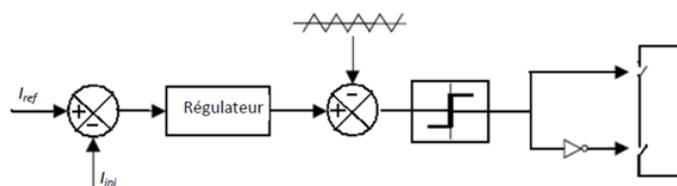


FIGURE II.12 – Principe de commande des courants par commande MLI

II.2.4 Résultats de simulations

Afin de valider les commandes du filtre actif parallèle de puissance (FAP) que nous avons présenté et qui est l'une des solutions modernes et efficaces pour éliminer les harmoniques de courant par les charges non linéaires et compenser l'énergie réactive, nous allons présenter les résultats obtenues lors de nos simulations.

II.2.4.1 Présentation du réseau électrique à 3 fils sans filtre actif de puissance

Considérons un réseau électrique à trois fils connecté à une charge triphasée, comme le montre la figure ci-dessous : Les paramètres de ce système sont donnés comme suit :

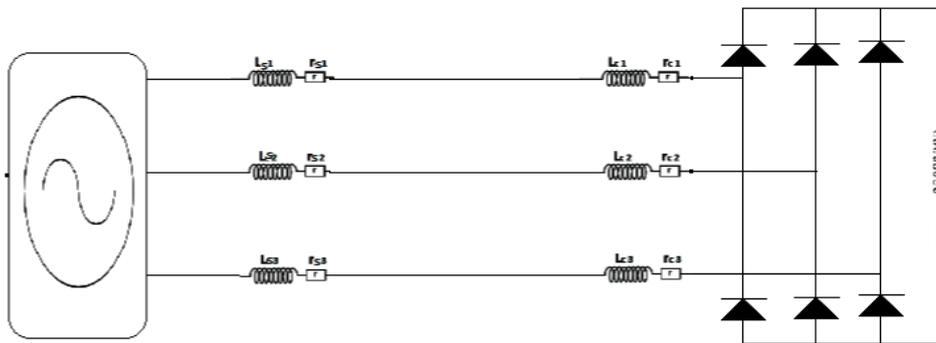


FIGURE II.13 – Schéma d'un réseau triphasé à trois fils alimentant une charge non linéaire

V_s [V]	f_s [Hz]	$r_{s1,2,3}$ [m Ω]	$l_{s1,2,3}$ [μ H]	$r_{c1,2,3}$ [Ω]	$l_{c1,2,3}$ [μ H]
230	50	0.01	0.01	2.73	23.19

R_{Charge} [Ω]	L_{Charge} [mH]
1.2	0.026

TABLE II.4 – Paramètres de simulation du FAP

En utilisant Matlab / SimPowerSystem, nous obtenons les résultats de simulation suivant :

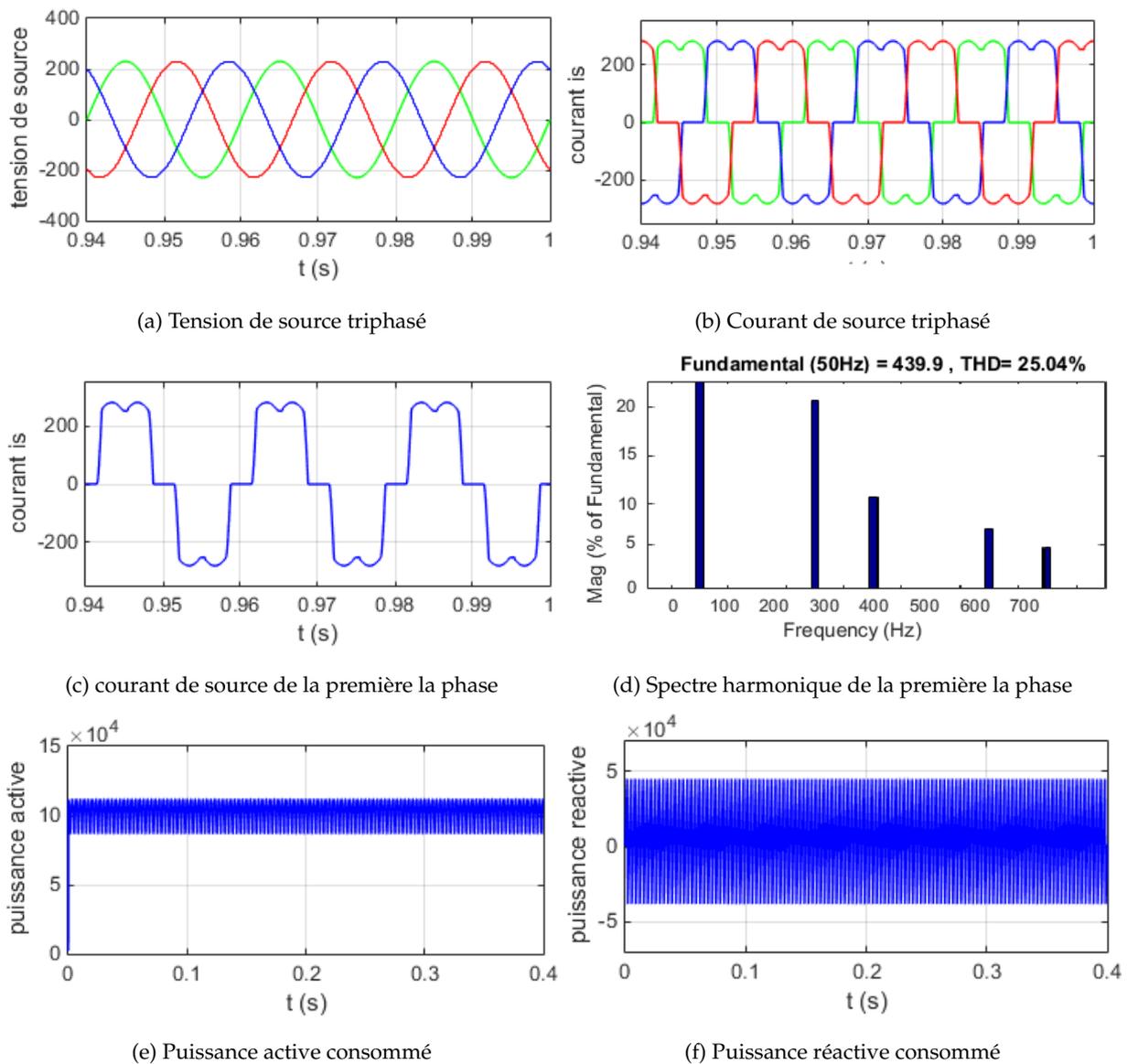


FIGURE II.14 – Résultats de simulation d'un filtre actif de puissance avant le filtrage

De ces figures nous remarquons que :

- Les tensions coté source forment un signal sinusoïdale mais que les courants de ligne des trois phases $i_{s123}(t)$ sont loin d'être sinusoïdaux, car ils sont riches en harmoniques.
- Les courants de ligne de la troisième phases et leurs spectres harmoniques **THD=25.02%**

Le but du filtrage actif est de ramener ce **THD** à une valeur inférieure à 5%, comme l'impose la norme CEI. est de ce fait compenser la puissance réactive.

II.2.4.2 Système avec filtre actif de puissance parallèle à trois fils

Dans cette partie , nous allons présenter les résultats de simulation de l'ensemble réseau triphasé à trois fils / charge non-linéaire/ filtre actif parallèle, La figure suivante présente le schéma de système étudiée :

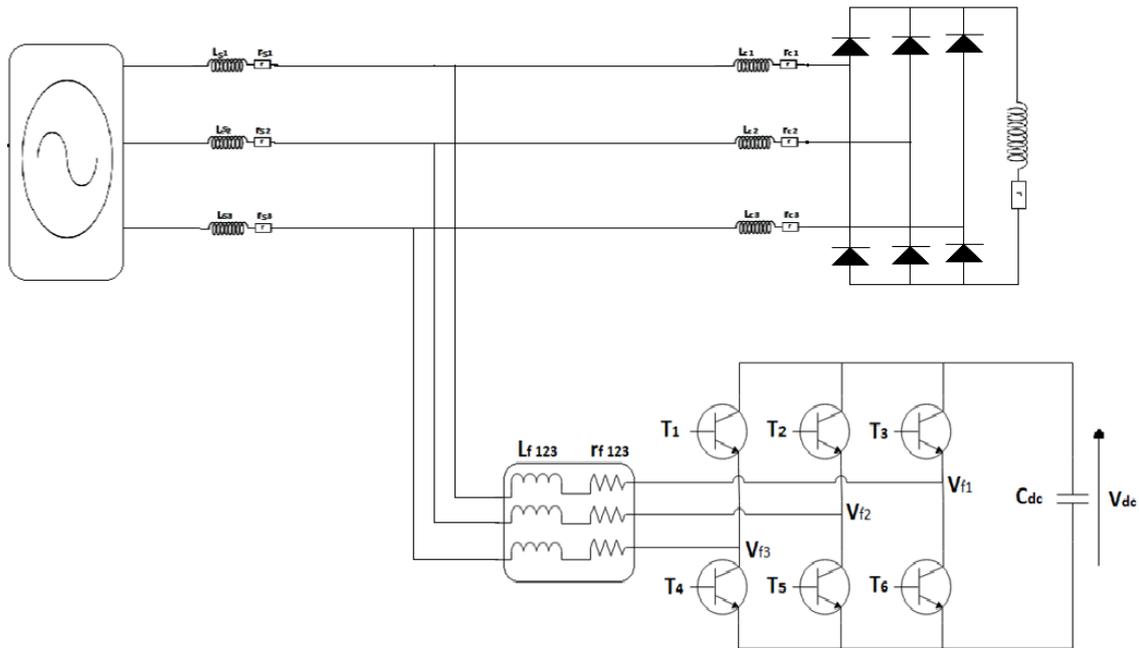


FIGURE II.15 – Modèle de simulation du système étudié

Les paramètres du filtre actif de puissance à trois bras :

r_f [mΩ]	l_c [μH]	C_{mF} [V]	V_{dc} [V]
0.01	100	60	700

TABLE II.5 – Paramètres de simulation du FAP

Les deux commandes utilisés du filtre actif de puissance pour éliminer les harmoniques de courant générer par les charges non linéaires et compenser l'énergie réactive sont :

II.2.4.2.1 Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées (p-q)

Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont comme suit :

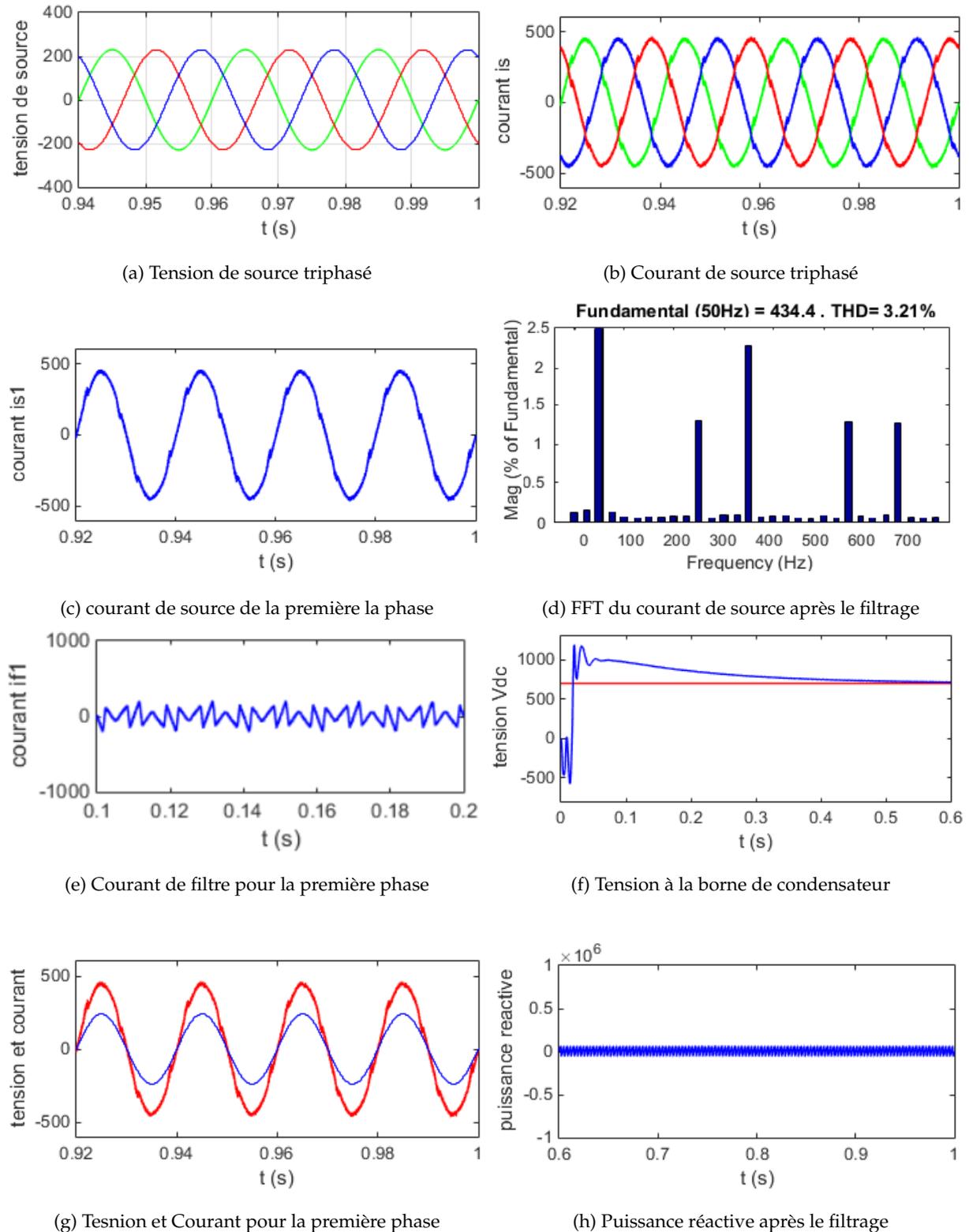


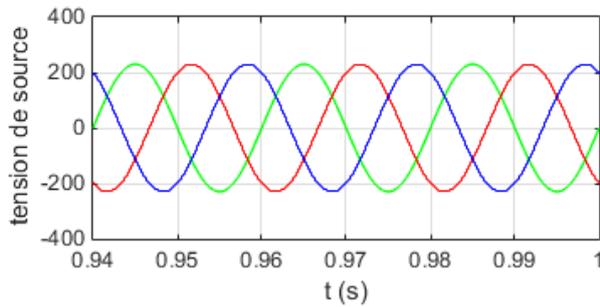
FIGURE II.16 – Résultat de simulation d'un filtre actif de puissance après le filtrage

D'après les figures ci-dessus, nous remarquons que le filtre actif de puissance élimine les harmoniques de courant dans chaque phase. Ainsi, le courant de source après filtrage est sinusoïdale et le THD est inférieur à 5%. Pour notre cas, le THD est égale à 3.21%.

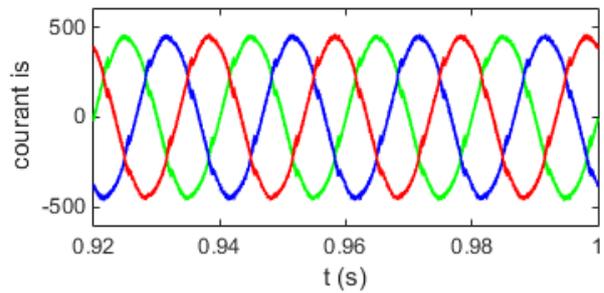
De plus, d'après les même figures nous remarquons que le filtre actif de puissance arrive à compenser l'énergie réactive qui a été consommée par la charge non linéaire. Nous remarquons également de la figure II.16f que la tension V_{dc} est constante en régime permanent.

II.2.4.2.2 Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)

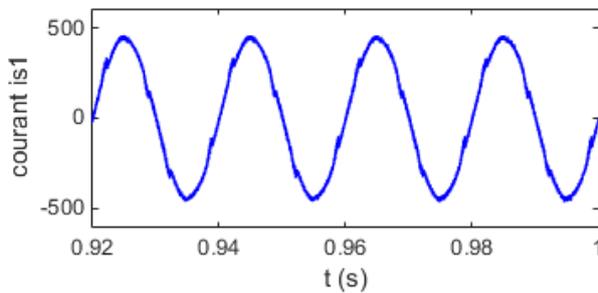
Concernant les résultats de simulation que nous avons obtenus en utilisant cette deuxième commande de filtre actif de puissance sont comme suit :



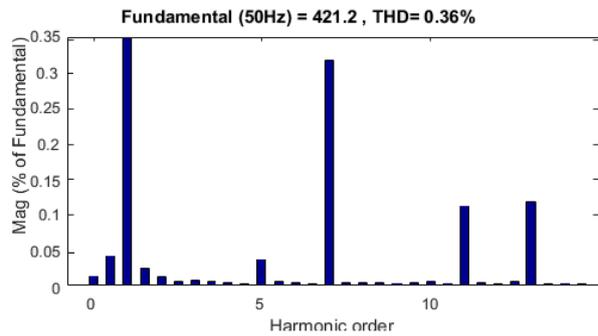
(a) Tension de source triphasé



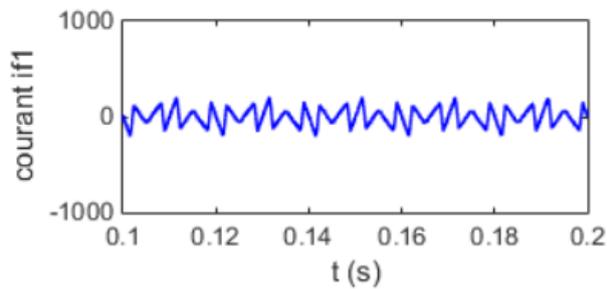
(b) Courant de source triphasé



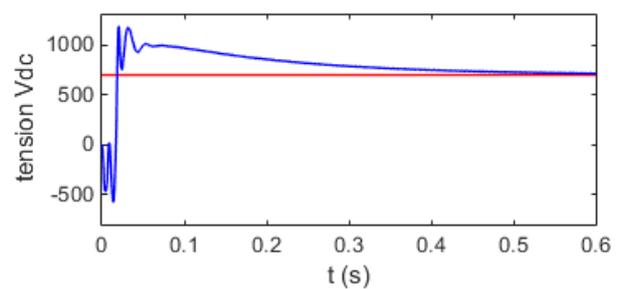
(c) courant de source de la première la phase



(d) FFT du courant de source après le filtrage



(e) Courant de filtre pour la première phase



(f) Tension à la borne de condensateur

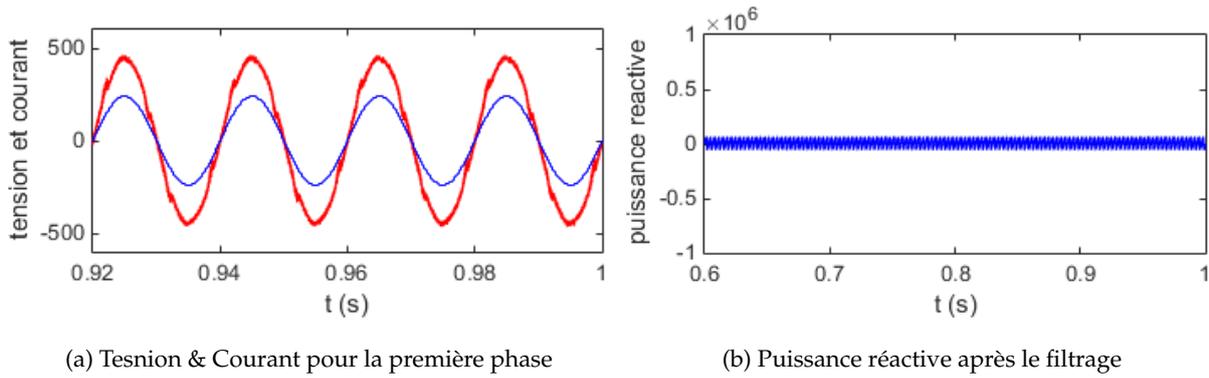


FIGURE II.18 – Résultat de simulation d'un filtre actif de puissance après le filtrage

D'après les figures ci-dessus, nous remarquons que le filtre actif de puissance élimine les harmoniques de courant dans chaque phase. Ainsi, le courant de source après filtrage est sinusoïdale et le THD est inférieur à 5%. Pour notre cas, le THD est égale à 0.36%.

De plus, d'après les même figures nous remarquons que le filtre actif de puissance arrive à compenser l'énergie réactive qui a été consommée par la charge non linéaire. Nous remarquons également de la figure II.17f que la tension V_{dc} est constante en régime permanent.

II.3 Commande d'un filtre actif de puissance à quatre bras

II.3.1 Description du système

Le système qu'on désire utiliser est une source de tension triphasée à quatre fils (trois phases + neutre) ayant une inductance l_s et une résistance r_s

La charge utilisée dans notre système est une charge non linéaire constituée de trois charges monophasée de type pont redresseur monophasée à diode débitant chacune d'elles sur une charge l,r , Comme l'illustre la figure ci-dessous.

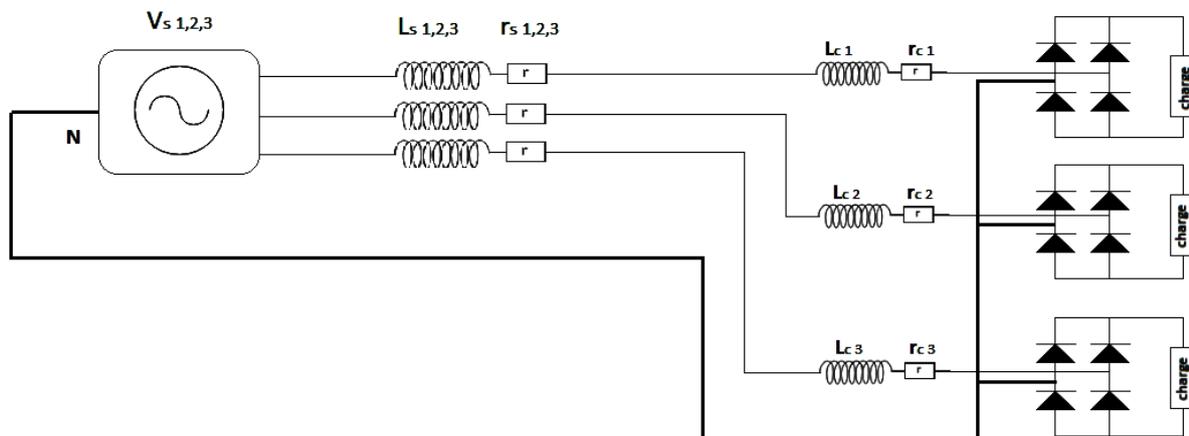


FIGURE II.19 – Schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires

II.3.2 Étude du filtre actif parallèle à quatre bras

Un filtre actif de puissance est essentiellement constitué de deux parties :

- Partie puissance
- Partie commande - contrôle

II.3.2.1 Partie puissance du FAP

Dans cette section nous nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- L'onduleur à quatre bras.
- Filtre de couplage.
- Système de stockage de l'énergie.

II.3.2.1.1 Description de l'onduleur triphasé à quatre bras

Dans notre étude, nous utilisons un onduleur de tension comprenant quatre bras constitué de huit interrupteurs réversibles en courant (IGBT) comme l'illustre la figure ci-après :

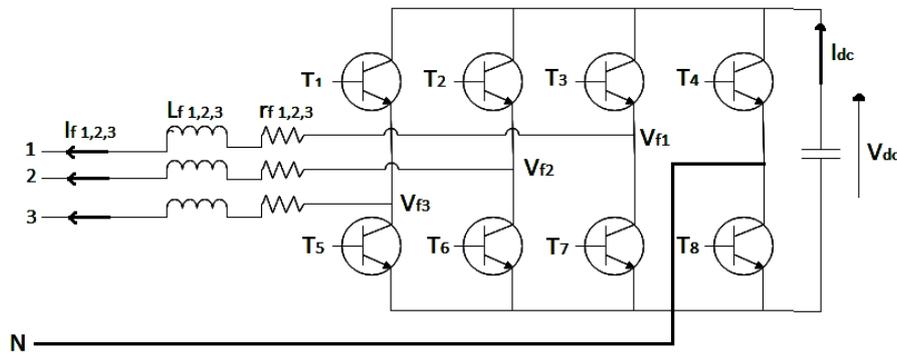


FIGURE II.20 – Filtre actif de puissance parallèle à quatre bras

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau II.6 et sont obtenus Grâce aux expressions suivantes :

$$v_{f1} = (T_1 - T_4)v_{dc} \quad (\text{II.18})$$

$$v_{f2} = (T_2 - T_4)v_{dc} \quad (\text{II.19})$$

$$v_{f3} = (T_3 - T_4)v_{dc} \quad (\text{II.20})$$

et

$$i_{dc} = T_1 \times i_1 + T_2 \times i_2 + T_3 \times i_3 + T_4 \times (-i_N) \quad (\text{II.21})$$

k	s_4	s_3	s_2	s_1	v_{f3}	v_{f2}	v_{f1}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	V_{dc}
2	0	0	1	0	0	V_{dc}	0
3	0	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}
4	0	1	0	0	V_{dc}	0	0
5	0	1	0	1	V_{dc}	0	V_{dc}
6	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	0
7	0	1	1	1	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}
8	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
9	1	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
10	1	0	1	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
11	1	0	1	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
12	1	1	0	1	$-V_{dc}$	0	0
13	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
14	1	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$
15	1	1	1	1	0	0	0

TABLE II.6 – Tensions générés par l'onduleur de tension à quatre bras

II.3.2.2 Étude de la partie commande

La partie contrôle-commande est constituée de :

- Commande de l'onduleur de tension.
- Détermination des courants de référence .
- Identification des courants de références.

II.3.2.2.1 Méthode directe dite théorie p-q-r modifiée [11]

Cette méthode introduite par KIM est réalisée par une double transformation, à savoir une première transformation des tensions simple et des courants de ligne des axes a-b-c aux $\alpha \beta$, puis une seconde transformation des $\alpha \beta o$ aux axes p-q-r. Son principe est énoncé comme suit :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$ et $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$.

La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes a-b-c aux axes $\alpha - \beta - o$, comme le montre la relations suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

En utilisant une P.L.L qui génère des tensions équilibrées dans les axes $\alpha \beta$ sans homopolaires et synchrones à la tension fondamentale du réseau, nous obtenons :

$$\begin{aligned} V_\alpha &= \sin(\hat{\theta}) \\ V_\beta &= \cos(\hat{\theta}) \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

Une seconde transformation dans un nouveau système appelé p-q-r, sera donc réalisée :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) & 0 \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Les puissances active et réactive instantanées sont données par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Suivant la fonction que nous voulons donner au filtre actif de puissance, nous pouvons ici aussi compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un d'eux. Le tableau suivant résume les modes de compensations possibles.

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$	$p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = q$

TABLE II.7 – Modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Si nous voulons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation II.25 deviendra :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Ce qui donne dans les axes $\alpha - \beta - o$:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-h} \\ i_{\beta-h} \\ i_{o-h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) & 0 \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{a-h} \\ i_{b-h} \\ i_{c-h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-h} \\ i_{\beta-h} \\ i_{c-h} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

La figure suivante présente le schéma de principe pour l'identification des courants de référence par méthode directe dite théorie p-q-r modifiée :

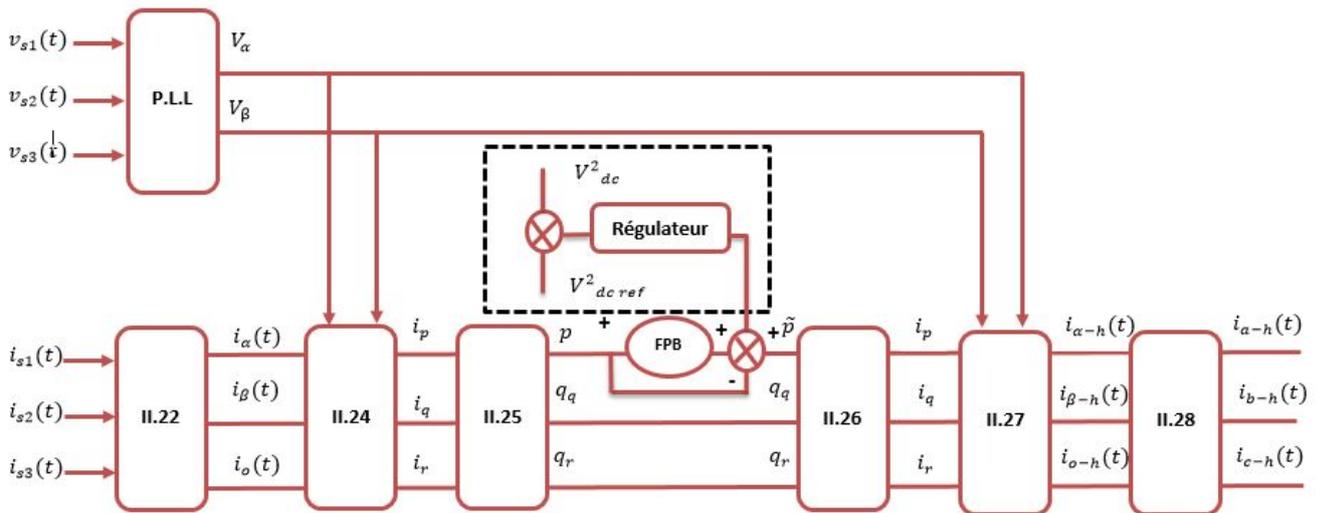


FIGURE II.21 – Principe de la commande par méthode directe dite théorie p-q-r modifié

II.3.3 Résultats de simulations

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est l'une des solutions modernes et efficaces pour éliminer les harmoniques de courant par les charges non linéaires et compenser l'énergie réactive.

Nous allons présenter les résultats obtenus lors de nos simulations pour la méthode directe dite théorie p-q-r modifiée.

II.3.3.1 Présentation du système sans filtre actif de puissance

On considère le réseau électrique à quatre fils connecté à trois charges monophasées, comme le montre la figure ci-dessous :

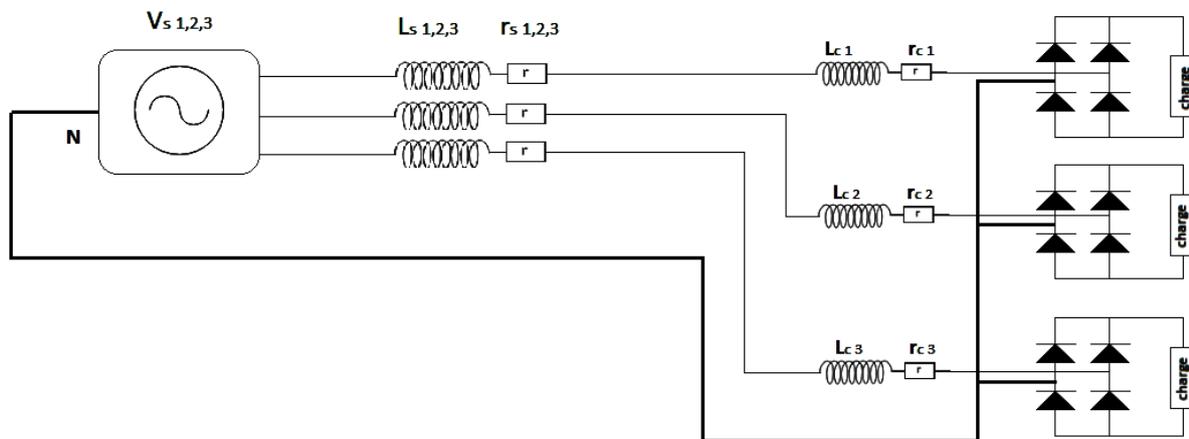


FIGURE II.22 – Schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires

Lorsque le système déséquilibré, nous prenons les paramètres suivants :

V_{seff} [V]	f [Hz]	r_s [mΩ]	l_s [μH]	r_c [mΩ]	l_c [μH]
400	50	0.01	0.01	12.87	105
R_{d_L1} [Ω]	L_{L1} [mH]	R_{d_L2} [Ω]	L_{L2} [mH]	R_{d_L3} [Ω]	L_{L3} [mH]
1.2	1	0.79	1	0.8	1

TABLE II.8 – Paramètres de simulation du FAP

Les résultats de simulation que nous obtenons sont comme suits :

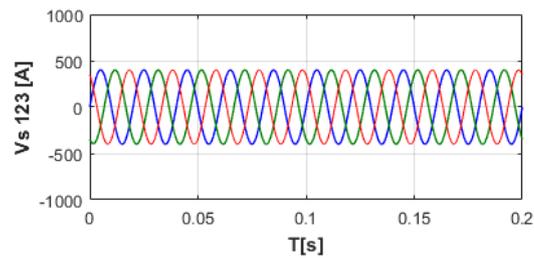
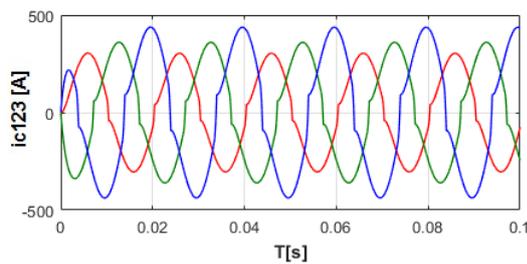
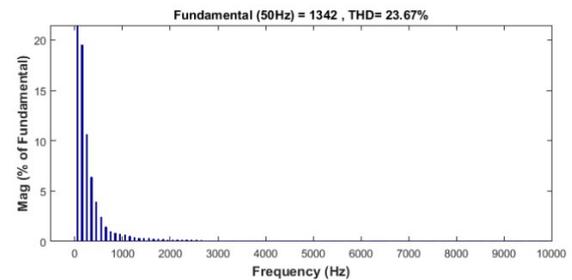


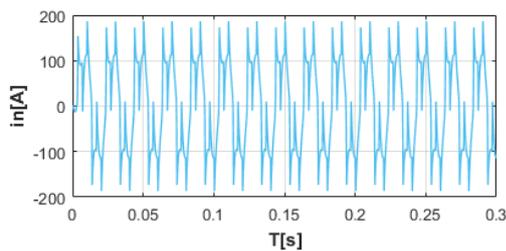
FIGURE II.23 – Tension de source triphasée



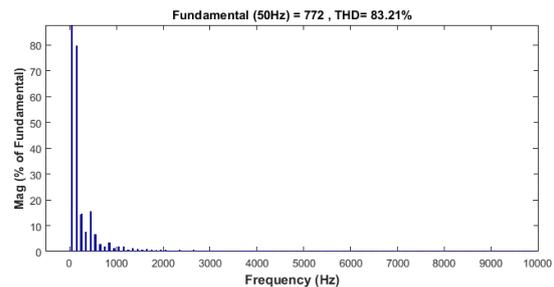
(a) Courant de charge triphasé déséquilibré



(b) Spectre harmonique de la première phase



(c) Courant de neutre



(d) Spectre harmonique de courant de neutre

FIGURE II.24 – Résultat de simulation d'un filtre actif de puissance avant le filtrage

D'après les figures II.23 et II.24, nous remarquons que :

- Les tensions côté source forment un signal sinusoïdale équilibré
- Spectre harmonique de la première phase des courants des lignes donne un **THD=23.67%** par contre spectre harmonique de courant de neutre atteint un **THD=83.21%**

Le but du filtrage actif est de ramener ce **THD** à une valeur inférieure à **5%**, comme l'impose la norme CEI.

II.3.3.2 Système avec filtre actif de puissance parallèle à quatre bras

Dans cette partie , nous allons présenter les résultats de simulation de l'ensemble réseau triphasé à quatre fils / charge non-linéaire monophasé / filtre actif parallèle. La figure suivante présente le schéma de système étudié :

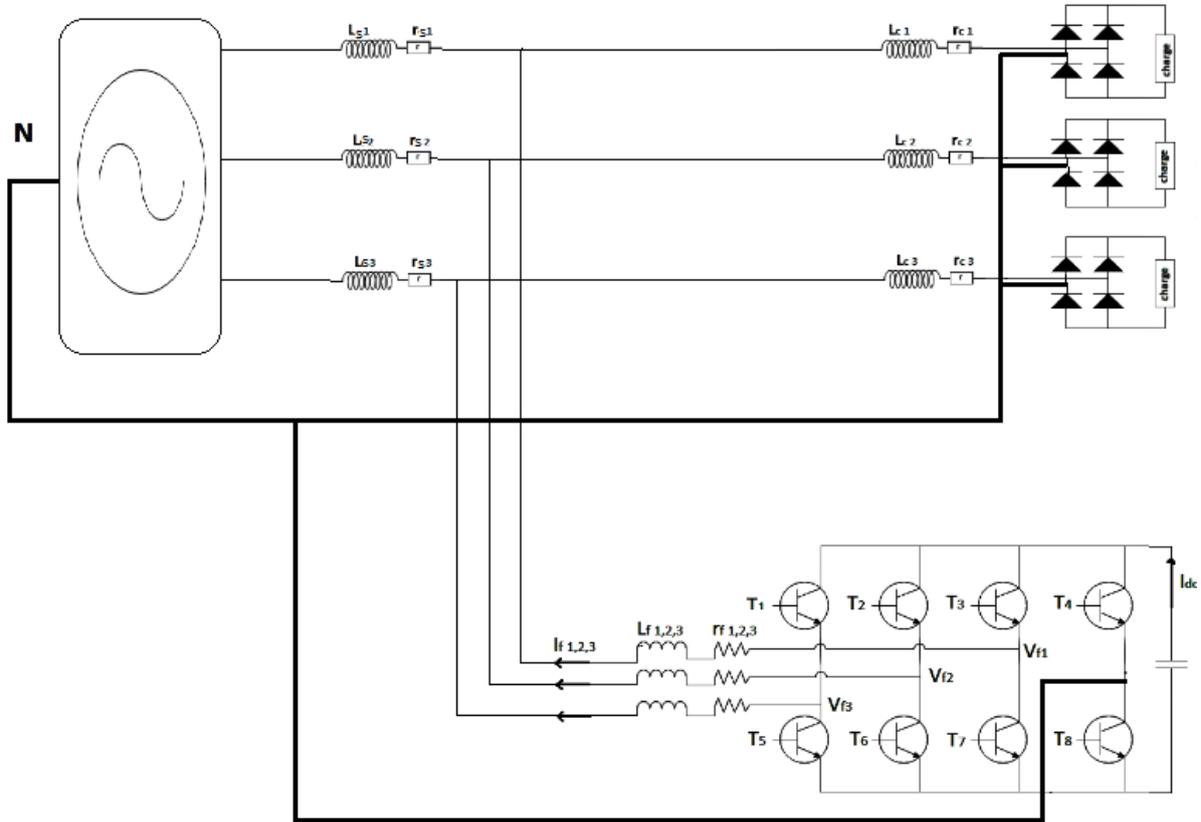


FIGURE II.25 – Modèle de simulation du système étudié

Les paramètres du filtre actif de puissance à quatre bras :

r_f [mΩ]	l_c [μH]	C_{mF} [V]	V_{dc} [V]
5	100	12	700

TABLE II.9 – Paramètres de simulation du FAP

II.3.3.2.1 Simulation d'un filtre actif de puissance à quatre bras avec la Commande p-q-r modifiée

En utilisant Matlab / SimPowerSystem, nous obtenons les résultats de simulation suivants :

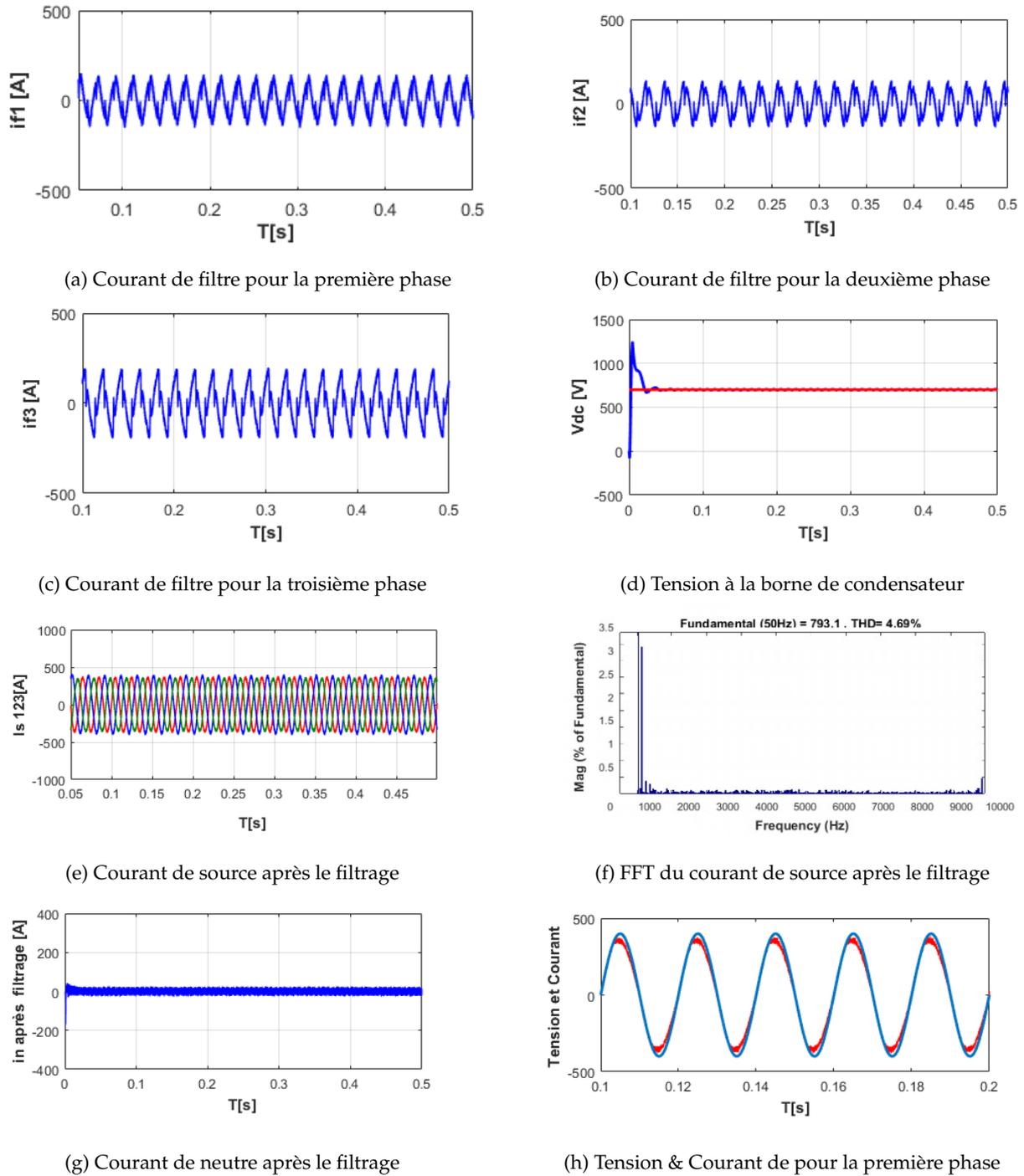


FIGURE II.26 – Résultat de simulation d'un filtre actif de puissance après le filtrage

De ces figures, nous remarquons que les courants de sources ont nettement diminuer et que le THD de chacune des phases est inférieure à 5% et qu'il y a également eu la compensation de l'énergie réactive.

Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes fixées comme objectif d'éliminer les harmoniques de courant et de compenser l'énergie réactive générée par les charges dite non linéaire. Pour cet effet, nous avons utilisé un filtre actif de puissance parallèle basé sur un onduleur de tension de deux niveaux avec l'utilisation des trois techniques d'extraction de courants de référence :

- Méthode des puissances instantanées (p-q) pour la compensation des réseaux électriques à trois fils.
- Théorie de référentiel synchrone (d-q) pour la compensation des réseaux électriques également à trois fils.
- Commande p-q-r modifié pour la compensation des réseaux électriques à quatre fils

Ces méthodes donnent de très bons résultats, ceci a été confirmé par les simulations réalisées, car les THD obtenus étaient tous inférieur à 5% et l'énergie réactive été compensée.

CHAPITRE

III

ÉTUDE ÉCONOMIQUE DE LA COMPENSATION DE L'ÉNERGIE RÉACTIVE

Introduction

La demande de puissance active étant incompressible, la réduction des pertes de puissance ne peut être réalisée qu'en agissant sur la composante réactive du courant transitant dans les lignes de distribution. Un des moyens les plus indiqués sont les batteries de condensateurs. Cependant, il ne suffit pas d'installer des batteries de condensateurs pour dire qu'on est arrivé à bout du problème de l'important transit des courants réactifs dans les branches de ces lignes.

Le choix des puissances des batteries et leurs emplacements et même leurs temps de mise en service doit être fait de sorte que le retour économique attendu soit positif. Ce concept de la compensation économique de l'énergie réactive est donc un problème type d'optimisation.

L'objet de ce chapitre est de fournir une méthodologie proposée par Schneider pour l'estimation de la puissance d'utilisation.

Afin de concevoir une installation, il est nécessaire d'estimer le plus justement possible la puissance maximale (puissance d'utilisation) que devra fournir le distributeur d'énergie.

Baser le calcul de la puissance d'utilisation simplement sur la somme arithmétique des puissances de tous les récepteurs installés existants conduirait à des résultats économiquement extraordinairement surévalués et serait en termes d'ingénierie d'une mauvaise pratique.

L'objet de ce chapitre est de fournir une méthodologie pour l'estimation de la puissance d'utilisation. Il est nécessaire, pour cette estimation, d'évaluer quelques facteurs prenant en compte :

- Diversité (le non fonctionnement simultané de tous les récepteurs pour un groupe donné),
- Niveau d'utilisation réel des récepteurs installés (par exemple un moteur électrique n'est généralement pas utilisé à sa pleine capacité de charge, etc.),
- Niveau d'utilisation prévisionnel des récepteurs installés et des extensions de charges possibles.
- Facteur d'extension (ou réserve) : on utilise un facteur de réserve afin de modifier l'ensemble de l'installation. S'applique au niveau des armoires de distribution principales.

Après avoir fait une recherche bibliographique, nous avons conclu que la méthodologie d'étude de Schneider respecte les normes internationales d'analyse et d'étude des projets d'électricités.

[12] [13] Pour concrétiser notre travail, nous allons appliquer cette méthode pour analyser l'usine de production de carrelage SBC Tlemcen du groupe BENYAHIA Hennaya-Tlemcen. Cela va leur aider à faire une estimation précise de la puissance réactive et éventuellement essayer de la compenser en installant des batteries de compensation optimales et à moindre cout.

III.1 Détermination du bilan de puissance

Les valeurs données sont basées sur l'expérience de Schneider et sur des enregistrements réalisés sur des installations existantes. En plus de fournir une base de données pour le calcul de l'installation de chaque circuit, la méthodologie proposée permet, à partir de ces calculs de base, de fournir une valeur globale pour la puissance d'utilisation de l'installation, sur laquelle peut être spécifié le cahier des charges du système de fourniture en énergie (réseaux de distribution, transformateur MT/BT, ou groupe électrogène).

III.1.1 Estimation de la puissance consommée basée sur la méthode de Schneider

Cette méthode sert à élaborer un bilan de puissance. Elle comprend trois étapes énumérées comme suit :

- ① Subdivision de l'installation de l'usine en plusieurs niveaux et groupes. Pour cette étape, on a besoin d'une description précise de l'architecture de l'usine qui sera fournie en premier lieu,
- ② Prélèvement de la puissance active installée (puissance nominale ou maximale de l'usine) à partir des plaques signalétiques de différentes machines et détermination de la puissance réactive et apparente installées,
- ③ Détermination des coefficients d'utilisation et de simultanéité décrit dans le chapitre 1. On ajoutera aussi un facteur d'extension (ou réserve). Ce dernier peut nous montrer s'il y a risque de surcharge non détectée,
- ④ Calcul des puissance consommées.

III.1.1.1 Subdivision de l'installation en niveaux et groupes

III.1.1.1.1 Description de l'architecture

L'usine est une fabrique de carrelage depuis 1994 constitué principalement de grains de marbre, poudre de marbre et de ciment. Devisée en trois ateliers, chaque un fait un type de carreau et dimension différent :

Atelier 1 : carreau monocouche sans sable de 40 cm × 40 cm × 1.7 cm avec une capacité de production de 700m² en 8h.

Atelier 2 : carreau bicouche avec sable et ciment noir de 33 cm × 33 cm × 2.6 cm avec une capacité de production de 500 m² en 8h.

Atelier 3 : carreau bicouche de 25 cm × 25 cm × 2.5 cm avec une capacité de production de 600 m² sur 8h.

III.1.1.1.2 Subdivision des différents ateliers

L'installation est composée d'un transformateur d'alimentation de 630KVA qui alimente les trois ateliers qui à leur tour sont équipés de plusieurs groupes de machines.

Le premier atelier est composé de trois groupes, dont le premier groupe est constitué de huit (08) moteurs électriques, le deuxième a plus de dix (10) moteurs et le troisième groupe a dix (10) moteurs. Le deuxième atelier est composé de deux groupes, le premier est constitué de huit (8) moteurs et le deuxième a douze (12) moteurs. Le troisième atelier est composé de deux groupes dont le premier et le deuxième sont constitués de sept (7) moteurs chacun.

Donc le premier niveau représente les groupes des machines, le second niveau désignera les ateliers et enfin le troisième niveau représente le transformateur. Le schéma suivant explique cette subdivision :

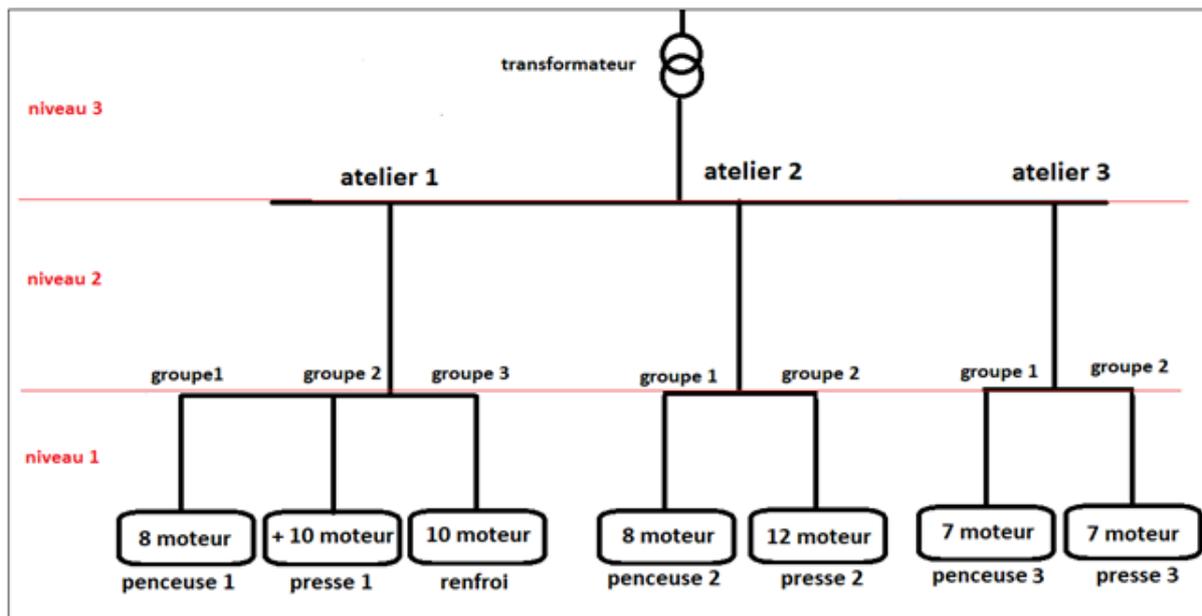


FIGURE III.1 – Niveau, atelier et groupe de l'usine

III.1.1.2 Prélèvement de la puissance installée

La puissance installée (kW) est la somme des puissances nominales de tous les récepteurs de l'installation. L'indication de la puissance nominale (P_n) est marquée sur la plupart des appareils et équipements électriques. En pratique, la puissance nominale n'est pas toujours la puissance réellement consommée par le récepteur.

Cette puissance est prélevé à partir de la plaque signalétique. Voici quelques photos des plaques signalétiques :



(a)



(b)



(c)

FIGURE III.2 – Plaque signalétique

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

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

A l'aide des formules qu'on a déjà expliqué dans le chapitre 1 et à travers les données enregistrées dans des tableaux « Excel » ci-dessous, nous avons calculé les puissances installées (apparente, active et réactive) puis nous avons fait une sommation des puissances pour connaître la puissance totale absorbée par l'atelier en plein charge. Le tableau ci-dessous résume la puissance installée.

Puissance apparente kVA	573.72
Puissance réactive kVAR	315.30
Puissance active kW	477.22
cos φ	0.83

TABLE III.1 – Puissance installée de l'atelier 1

Puissance apparente kVA	533,96
Puissance réactive kVAR	289.85
Puissance active kW	448.39
$\cos \varphi$	0.83

TABLE III.2 – Puissance installée de l'atelier 2

Puissance apparente kVA	285.65
Puissance réactive kVAR	158.20
Puissance active kW	237.65
$\cos \varphi$	0.83

TABLE III.3 – Puissance installée de l'atelier 3

III.1.1.3 Détermination des coefficients d'utilisation K_u et de simultanéité K_s

Le coefficient d'utilisation K_u s'applique individuellement à chaque récepteur. Ceci se vérifie pour des équipements comportant des moteurs susceptibles de fonctionner en dessous de leur pleine charge. Dans une installation industrielle, ce coefficient peut être estimé en moyenne à 0,75 pour les moteurs.

Dans notre cas nous avons procédé au calcul des coefficients en divisant la puissance mesurée par la puissance nominale prise sur les plaques signalétiques et nous avons trouvé les valeurs des coefficients suivant :

Atelier	Groupe	K_u
Atelier 1	Groupe 1	0.7
	Groupe 2	0.7
	Groupe 3	0.7
Atelier 2	Groupe 1	0.7
	Groupe 2	0.6
Atelier 3	Groupe 1	0.8
	Groupe 2	0.7

TABLE III.4 – Coefficients d'utilisation K_u

Le coefficient de simultanéité K_s et un facteur pour des groupe des moteurs qui ne fonctionne pas simultanément, c'est le rapport, exprimé en valeur numérique ou en %, de la puissance maximale appelée par un groupe d'appareils électriques, au cours d'une période déterminée.

Dans notre cas et suite au manque d'information au niveau de l'usine, nous avons pris ce coefficient selon la norme NF- Vocabulaire Électrotechnique International décrit dans le chapitre 1 :

Niveau	Atelier	Groupe & départ	Ks
Niveau 3	/	1 départ	0.9
Niveau 2	/	2-3 départ	0.9
Niveau 1	Atelier 1	Groupe 1	1
		Groupe 2	0.6
		Groupe 3	0.6
	Atelier 2	Groupe 1	1
		Groupe 2	0.6
	Atelier 3	Groupe 1	1
Groupe 2		0.6	

TABLE III.5 – Coefficients de simultanété Ks

III.1.1.4 Calcul des différentes puissances consommées par toute l'installation de l'usine

Le calcul se fait par groupe de machine puis par niveau. D'abord nous avons commencé de calculer les puissances en appliquant le théorème de Boucherot pour chaque groupe puis pour chaque niveau. Le résultat est illustré par le schéma et le tableau suivant :

Niveau	Atelier	Groupe	Ku	Ks	S_{in} (kVA)	S_{un1} (kVA)
Niveau 1	Atelier 1	Groupe 1	0.7	1	318	223
		Groupe 2	0.7	0.6	122	51
		Groupe 3	0.7	0.6	81	34
	Atelier 2	Groupe 1	0.7	1	374	262
		Groupe 2	0.6	0.6	160	58
	Atelier 3	Groupe 1	0.8	1	228	182
		Groupe 2	0.7	0.6	58	24

TABLE III.6 – Puissance utilisé de niveau 1

Avec :

S_{in} : Puissance apparente installée de chaque groupe

S_{un1} : Puissance apparente utilisée de chaque groupe de même niveau 1

Niveau	Atelier	N ^{br} de Groupe	Ks	S _{un2} (kVA)
Atelier 1	Atelier 1	3	0.9	277
	Atelier 2	2	0.9	287
	Atelier 3	2	0.9	182

TABLE III.7 – Puissance utilisé de niveau 2

S_{un2} : puissance apparente utilisé au niveau 2

Niveau	N ^{br} de départ	Ks	S _{un3} (kVA)
3	3	0.9	671

TABLE III.8 – Puissance utilisé de niveau 3

S_{un3} : puissance apparente utilisé au niveau 3

	Facteur d'extension	S _{un2} (kVA) Sans Ke	S _{un2} (kVA) Avec Ke
Niveau 3	15 %	671	771

TABLE III.9 – Puissance apparente avec facteur d'extension

Le schéma suivant est un résumé de ce travail :

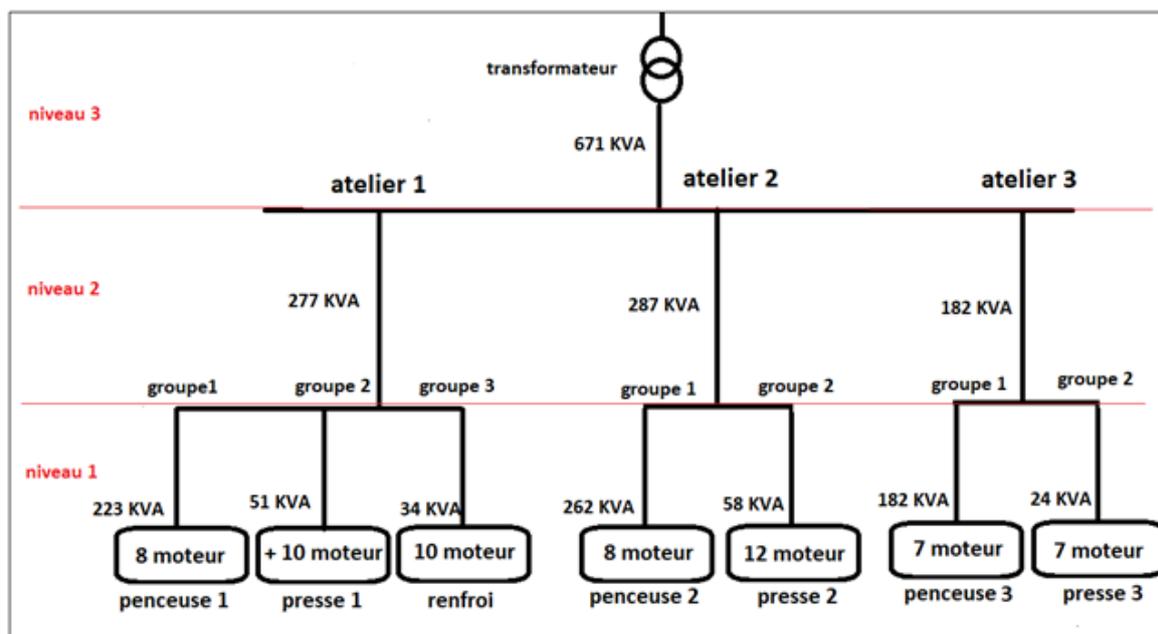


FIGURE III.3 – Puissance consommée par chaque niveau

III.1.2 Mesure des puissances consommées

Dans notre cas, du moment que nous ne disposons pas assez d'informations concernant les coefficients, nous avons opté pour la deuxième méthode basée sur les valeurs mesurées : puissance apparente, facteur de puissance et courant absorbée en utilisant un multimètre sophistiqué pour la mesure des données.

III.1.2.1 Description des appareils de mesure

III.1.2.1.1 Pince ampèremétrique

La pince ampèremétrique est donc un appareil de mesure servant à mesurer le courant dans un circuit électrique. Le fonctionnement de la pince ampèremétrique se base sur la mesure indirecte du courant circulant dans un conducteur à partir du champ magnétique ou du champ électrique que génère cette circulation de courant.

Le nom de pince provient de la forme du capteur de champ magnétique. La pince peut s'ouvrir, de manière à enlacer le fil dans lequel circule un courant



FIGURE III.4 – Pince ampèremétrique

III.1.2.1.2 Compteur intelligent de SONELGAZ

Un compteur «intelligent» qui permet de communiquer directement avec les systèmes d'information et des gestionnaires de réseau de distribution d'électricité. Ainsi, et en plus du fait de rendre caduc les relevés sur site, le compteur intelligent permet d'informer le client de sa consommation en temps réel. Il s'agit aussi de centraliser l'ensemble des informations afin de permettre à la Sonelgaz d'agir sur la consommation.



FIGURE III.5 – Compteur intelligent de SONELGAZ

III.1.2.2 Enregistrement des données

Les tableaux suivants récapitulent les données qu'on a prises :

Grandeurs aux niveaux de l'atelier de production 1	Valeurs consommées
Courant penseuse (A)	77
Courant presse (A)	327
Tension (V)	395
Facteur de puissance ($\cos \varphi$)	0,68
Puissance apparent S (kVA)	276,40
Puissance active P (kW)	187,95
Puissance réactive Q (kVAR)	202,66

TABLE III.10 – Puissance consommée de l'atelier 1

Grandeurs aux niveaux de l'atelier de production 2	Valeurs consommées
Courant penseuse (A)	74
Courant presse (A)	327
Tension (V)	395
Facteur de puissance ($\cos \varphi$)	0,68
Puissance apparent S (KVA)	274,40
Puissance active P (KW)	186,56
Puissance réactive Q (KVAR)	201.16

TABLE III.11 – Puissance consommée de l'atelier 2

Grandeurs aux niveaux de l'atelier de production 3	Valeurs consommées
Courant penseuse (A)	220
Courant presse (A)	70
Tension (V)	395
Facteur de puissance ($\cos \varphi$)	0,65
Puissance apparent S (KVA)	198.41
Puissance active P (KW)	128.96
Puissance réactive Q (KVAR)	150.78

TABLE III.12 – Puissance consommée de l'atelier 3

III.1.3 Validation de la méthode par comparaison entre les puissances estimées et mesurées

Atelier	Puissance calculée (KVA)	Puissance mesurée (KVA)
1	277	279
2	287	274
3	182	198

TABLE III.13 – Comparaison entre les puissances calculé et mesuré

Nous avons remarqué que les calculs obtenus par la méthode de Schneider coïncide avec celles mesurée avec une différence négligeable.

III.1.4 Interprétation des résultats

III.1.4.1 Puissance installée

Nous avons remarqué que l'atelier 1 et 2 ayant la plus grande puissance électrique installée avec une puissance d'environ 670 KVA pour l'atelier 1 et 630 KVA pour l'atelier 2 environ, bien que l'atelier 3 a une faible puissance installée avoisinant 280KVA comparée à la puissance des deux ateliers précédents. Pour l'énergie réactive, si les machines travaillent en plein charge (charge nominale) comme indiquée sur les plaques signalétiques le facteur de puissance atteint au maximum la valeur 0.75 pour les petits moteurs, 0.80 pour les moteurs à moyennes puissances et 0.85 pour les moteurs à grandes puissances. Par conséquent, le facteur global sera de l'ordre 0.80. Dans les normes un facteur de puissance qui dépasse ou égale les 0.80 est un bon facteur de puissance, par contre si le facteur est inférieur à 0.80, il sera néfaste pour l'installation électrique de l'usine et pour le réseau. Donc si tous les moteurs de l'usine fonctionnent en régime nominale, on aura un bon facteur de puissance.

III.1.4.2 Puissances consommées

Nous remarquons que la puissance consommée est faible comparée à la puissance installée. Ainsi, l'atelier 1 et 2 ont une consommation de 270 KVA chacune et l'atelier 3 ne dépasse 200KVA. Cela, nous a induit à obtenir un faible facteur de puissance inférieure à la norme donc très mauvais à l'installation et au réseau.

III.1.4.3 Synthèse sur la puissance réactive

Nous avons remarqué que chaque atelier a une consommation entre 150 et 200 KVAR, donc pour une bonne compensation est préférable. Donc, il sera judicieux et économique d'utiliser des batteries de compensation.

III.2 Calcul des batteries de compensation

Le calcul de l'énergie réactive à compenser est basé sur les mêmes lois qu'on a déjà citées dans le premier chapitre. Donc dans cette étape, nous avons appliqué les formules du chapitre 1 pour calculer l'énergie réactive à compenser en utilisant le tableur Excel pour nous faciliter le calcul qui se fait sur la base du $\cos \varphi$ mesuré et désiré. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de la puissance réactive à fournir par les batteries de condensateurs et ainsi que leurs capacités totales.

N° du atelier	$\cos \varphi$ à atteindre	$\cos \varphi$ réel mesuré	Q_c (kVAR)	Capacité des condensateurs à installer (μF)
Atelier 1	0.95	0.68	142.66	946.56
Atelier 2	0.95	0.68	139.84	939.54
Atelier 3	0.95	0.68	108.39	737,45

TABLE III.14 – Énergie réactive doit compense et capacité des condensateurs nécessaire

III.3 Choix de mode de compensation

III.3.1 Justification de notre choix

Une compensation individuelle est faite pour les moteurs travaillant en régime permanent 24h avec une puissance stable où fixe, alors que la compensation globale est faite pour des ateliers proches de l'alimentation.

Nous avons évité la compensation individuelle parce que les machines ne travaillent pas tout le temp (régime permanent).

Donc il reste les deux choix, partielle ou globale. Dans notre cas, nous avons le choix entre une compensation globale ou partielle (Figure ci-dessous).

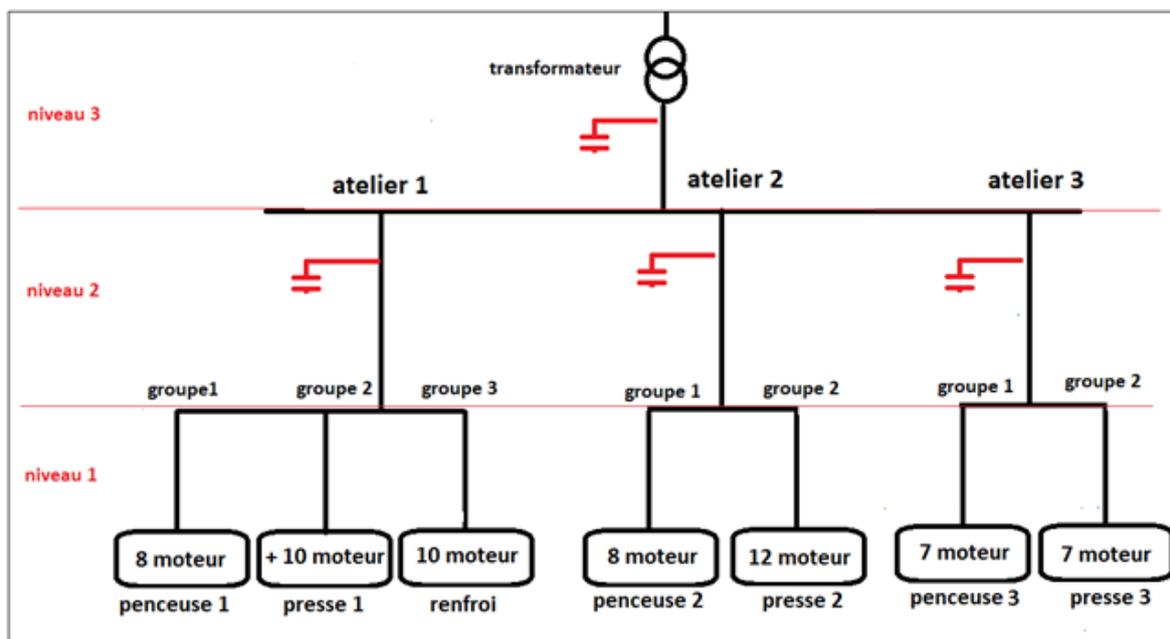


FIGURE III.6 – Localisation des batterie des condensteurs

L'usine se compose de 3 ateliers éloignés de 100 à 200 m de l'alimentation. Pour éviter l'échauffement et l'augmentation des pertes dans les câbles, nous avons évité la compensation globale.

III.3.2 Emplacement des batteries de compensation

Finalement, c'est la compensation partielle qu'on a choisi, c-à-d une armoire de compensation pour chaque atelier.

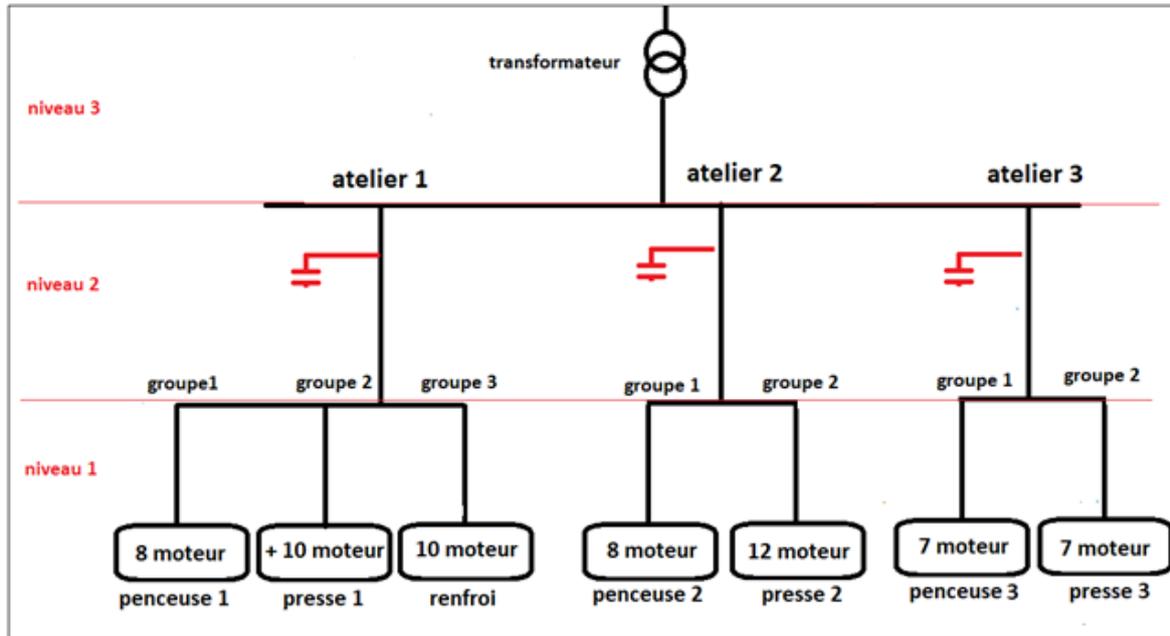


FIGURE III.7 – Emplacement des batteries de compensation

III.4 Type de compensation

Dans le cas de la compensation globale ou par ateliers, le ratio Q_c/S_n permet de choisir entre un équipement de compensation fixe ou automatique.

Le seuil de 15 % est une valeur indicative conseillée pour éviter les effets de la surcompensation à vide :

- $Q_c/S_n < 15\%$: compensation fixe
- $Q_c/S_n > 15\%$: compensation automatique.

Avec :

Q_c : Puissance (kVAr) de la batterie à installer

S_n : Puissance apparente (kVA) du transformateur de l'installation

Application numérique :

Pour la atelier A on a :

$$\frac{Q_{c1}}{S_n} = \frac{142}{630} = 0.22 > (15\%)$$

Donc la compensation automatique est la mieux adapté c'est à dire chaque atelier a une armoire de compensation en "gradins".

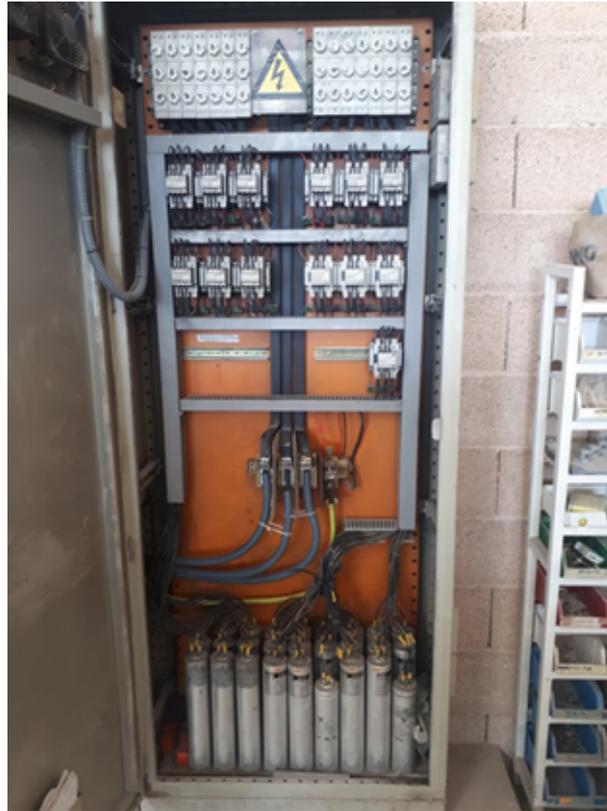


FIGURE III.8 – Armoire de compensation en gradin

III.5 Résultat obtenu après compensation

Les résultats réels obtenus après réalisation de ce type de système sur l'atelier 1 sont comme suits :

- Une élévation de facteur de puissance a 0.95 comme indiqué dans la figure III.9,
- Une baisse d'échauffement considérable des câbles. D'alimentation.



FIGURE III.9 – Facteur de puissance après la compensation

III.6 Étude économique

La structure de la tarification est un polynôme comportant un terme constant, un terme relatif à l'énergie et un autre à la puissance. Cette structure sert à calculer le montant de la facture électricité en hors taxes.

III.6.1 Structure de tarification

Cette structure est caractérisée par :

- La minimisation des coûts de l'énergie électrique,
- La modulation des prix de l'énergie selon les heures de son utilisation pour assurer une égalité de traitement de tous les clients d'un même niveau de tension,
- L'incitation à l'effacement des heures chargées de la journée en offrant plusieurs tarifs (rationaliser l'utilisation de l'énergie)

III.6.2 Expression de la formule tarifaire

L'expression est basée sur le schéma suivant :



FIGURE III.10 – Schéma simplifié du cycle de la formule tarifaire

1. **Terme constant** : concerne les frais mensuels liés à la gestion des clients (techniques et commerciales).
2. **Terme qui facture les deux énergies** :
 - Énergie active
 - Énergie réactive
3. **Terme qui facture la puissance** :
 - **Puissance Mise à Disposition (PMD)** : Réservée par la Société de Distribution de l'Électricité et du Gaz du Centre au client en vertu d'un accord et qu'il peut appeler selon ses besoins, à son gré et à tout moment (son unité de mesure est le kW). Elle est choisie par le client, en général avec le conseil des agents commerciaux parmi les puissances normalisées, contractée pour une durée de 5 ans,
 - **La Puissance Maximum Appelée (PMA)** : Elle est dite puissance absorbée ou atteinte. C'est le maximum de puissance demandée par le client durant le mois de facturation et elle est donnée par un registre du compteur.

III.6.3 Tarification

Les prix mentionnés de l'énergie réactive par SONELGAZ est de 0.4553 Da Pour 1 kVARh. L'usine fonctionne 8 heures par jour et 26 jours par mois $W_r (\text{kVARh}) = 202 \times 8 \times 24$
 $W_r = 42016 \text{ KVARh}$

III.6.4 Synthèse

Donc dans notre cas, l'usine consomme 42640 kVARh par mois Le prix de consommation par mois est de 19129.00 DA ce qui est obtenu par le calcul de $42016 \text{ kVARh} \times 0.45 \text{ Da}$. Si on place des batteries de compensation, l'usine va économiser la somme de 19 129,00 Da/mois et gagner 1000 Da de bonus de majoration. Ainsi l'usine économise 23 millions de centimes chaque année.

Conclusion

L'énergie réactive est une « énergie improductive » pour les utilisateurs. Elle est nécessaire pour le fonctionnement particulièrement. Malheureusement elle est nuisible pour le réseau électrique. Pour compenser celle-ci, il est nécessaire de fournir l'énergie réactive à la place du réseau de distribution par l'installation d'équipements de compensation.

Dans ce chapitre nous avons diminué la quantité d'énergie réactive en améliorant le facteur de puissance au milieu industriel par la méthodologie proposée par " SCHNEIDER ".

A la lumière de ce chapitre, il a été constaté que :

- Suppression de la facturation d'énergie réactive.
- Diminution de la puissance souscrite en kVA.
- Limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte-tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre travail a été consacré à l'étude du filtre actif de puissance et la compensation de l'énergie réactive d'une installation électrique industrielle HTA/BTB (Moyenne tension/Basse tension) dans le but d'éliminer les perturbations de types courant provenant des charges non linéaires et de compenser l'énergie réactive.

Dans le premier chapitre, on a présenté les principales perturbations qui affectent les réseaux électriques, leurs origines et leurs conséquences sur les charges connectées. Ensuite, nous avons présenté la méthode pour calculer le bilan de puissance dont le but est d'améliorer le facteur de puissance de l'installation électrique industrielle.

Dans le second chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme solution de dépollution des harmoniques de courant et de l'énergie réactive générée par les charges polluantes. Pour cela, nous avons présenté l'onduleur ainsi que le filtre de découplage. On a fait appel à trois techniques d'extraction de courants de référence aux simulations : « p-q ; d-q ; p-q-r modifiée » pour être appliquées à la commande de notre filtre actif de puissance de façon directe..

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une méthode économique pour compenser l'énergie réactive, au milieu industriel, au niveau l'usine S.B.C Tlemcen. Nous avons fait un bilan de puissance qui nous a permis de déterminer la puissance réellement consommée et la puissance réactive installée pour améliorer le facteur de puissance d'une installation électrique industrielle BT.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HEYDT, «*Electric Power Quality : A Tutorial Introduction*» , IEEE Computer Applications in Power vol.11, no.1, January 1998, pp.15-19.
- [2] VANYA IGNATOVA, «*Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique.Application aux creux de tension et à la pollution harmonique* » , thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER, 20 Octobre 2006.
- [3] TAHRI MERYEM & ZOUKHA DJEMAA , «*Étude et simulation d'une commande robuste pour filtre actif de puissance à deux Bras a point milieu pour la compensation de courant harmonique* » , Mémoire de fin de master, Université de Tlemcen,14 Juin 2017.
- [4] VERONIQUE BEAUVOIS, «*Qualite de la tension, qualite de l'electricite*» , cours Universite de Liege, Novembre 2008.
- [5] MERLIN GERIN , «**Condensateur et équipement moyenne tension rectriphase* » , Guide technique.
- [6] SCHNEIDER ELECTRIC, «*La compensation de l'énergie réactive* » , Guide technique, N° 16 - Novembre 2006.
- [7] SCHNEIDER ELECTRIC, «*Règles générales de conception d'une installation électrique* » , Guide de l'installation électrique 20/01/2010,16 :24 :32.
- [8] Karim KHELIFI & Mohamed TIENLI, «*Étude comparative de techniques d'extraction de courants de référence pour un filtre actif parallèle à quatre bras*» , Mémoire de fin de master, Université de Tlemcen,17 Juin 2017.
- [9] Fatiha EMMERI & Zouleykha GHEMBAZA, «*Étude et simulation d'un circuit de commande pour filtre actif de puissance à quatre bras pour un réseau à quatre fils*» , Mémoire de fin de master, Université de Tlemcen,25 Juin 2015 .
- [10] Tahri Meryem & Zoukha Djemaa, «*Etude et simulation d'une commande robuste pour filtre actif de puissance à deux Bras a point milieu pour la compensation de courant harmonique*» , Mémoire de fin de master, Université de Tlemcen,14 Juin 2017

- [11] **M.C. Benhabib & S. Saadate**, «*New control approach for four-wire active power filter based on the use of synchronous reference frame*», Article publié 24 Juin 2004
- [12] **SCHNEIDER ELECTRIC**, «*Compensation de l'énergie réactive*», Guide technique. 01/2015
- [13] **SCHNEIDER ELECTRIC**, «*Solutions de compensation d'énergie réactive et filtrage d'harmoniques*», Guide technique.2013
- [14] **M.C. Benhabib**, «*Contribution à l'étude des différent topologie et commandes des filtres actifs parallèle à structure tension* », Thèse de doctorat en génie électrique le 17 décembre 2004

ANNEXES

Annexe A : Puissance installée de l'atelier 1

Charge	P utile (kW)	I_n (A)	$\cos(\varphi)$	S(kVA)	P(KW)	Q(KVAR)
M1 : Ponceuse	45	81	0,86	56,12	48,26	28,64
M2 : Ponceuse	55	99	0,87	68,59	59,67	33,82
M3 : Ponceuse	45	81	0,86	56,12	48,26	28,64
M4 : Ponceuse	35	70	0,87	48,50	42,19	23,91
M5 : Ponceuse	30	56	0,85	38,80	32,98	20,44
M6 : Ponceuse	30	56	0,85	38,80	32,98	20,44
M7 : Ponceuse	30	56	0,85	38,80	32,98	20,44
M8 : Ponceuse	18	35	0,85	24,25	20,61	12,77
M1 : Robot	4	9,8	0,76	6,79	5,16	4,41
M2 : Robot	3,5	7	0,76	4,85	3,69	3,15
M : Prese	75	160	0,75	110,85	83,14	73,32
M1 : Referoid	0,5	1	0,75	0,69	0,52	0,46
M2 : Referoid	0,75	1,5	0,75	1,04	0,78	0,69
M3 : Referoid	0,75	1,5	0,75	1,04	0,78	0,69
M4 : Referoid	0,75	1,5	0,75	1,04	0,78	0,69
M : Referoid	0,75	1,5	0,75	1,04	0,78	0,69
M6 : Referoid	1	2,1	0,75	1,45	1,09	0,96
M7 : Referoid	14	30	0,8	20,78	16,63	12,47
M8 : Referoid	30	62	0,85	42,95	36,51	22,63
M9 : Referoid	0,75	1,5	0,75	1,04	0,78	0,69
M8 : Pompe	7,5	14,7	0,85	10,18	8,66	5,36

Annexe B : Puissance installée de l'atelier 2

Charge	P utile (kW)	I_n (A)	$\cos(\varphi)$	S(kVA)	P(KW)	Q(KVAR)
M1 : Ponceuse	30	60	0,84	41,57	34,92	22,55
M2 : Ponceuse	30	60	0,84	41,57	34,92	22,55
M3 : Ponceuse	30	60	0,84	41,57	34,92	22,55
M4 : Ponceuse	30	60	0,84	41,57	34,92	22,55
M6 : Ponceuse	30	60	0,84	41,57	34,92	22,55
M6 : Ponceuse	30	60	0,84	41,57	34,92	22,55
M7 : Ponceuse	45	90	0,84	62,35	52,38	33,83
M8 : Ponceuse	45	90	0,84	62,35	52,38	33,83
M8 : Ponceuse	45	90	0,84	62,35	52,38	33,83
M8 : Ponceuse	4	8,8	0,83	6,10	5,06	3,40
M8 : Ponceuse	0,75	1,5	0,78	1,04	0,81	0,65
M8 : Ponceuse	0,75	1,5	0,78	1,04	0,81	0,65
M8 : Ponceuse	0,75	1,5	0,78	1,04	0,81	0,65
M8 : Ponceuse	0,75	1,5	0,78	1,04	0,81	0,65
M4 : Presse	0,75	1,5	0,78	1,04	0,81	0,65
M4 : Presse	1,5	3	0,8	2,08	1,66	1,25
M4 : Presse	1,5	3	0,8	2,08	1,66	1,25
M4 : Presse	22	42,61	0,84	29,52	24,80	16,02
M4 : Presse	20	43	0,85	29,79	25,32	15,69
M4 : Presse	9.25	18.1	0.84	12.54	10.53	6.80
M4 : Presse	7.5	14.7	0.85	10.18	8.66	5.36
M4 : Broyeur	50	105	0.85	72.75	61.83	38.32

Annexe C : Puissance installée de l'atelier 3

Charge	P utile (kW)	I_n (A)	$\cos(\varphi)$	S(kVA)	P(KW)	Q(KVAR)
M1 : penceuse	37	68	0,85	47,11	40,05	24,82
M2 : penceuse	22	42	0,83	29,10	24,15	16,23
M3 : penceuse	37	68	0,85	47,11	40,05	24,82
M4 : penceuse	30	58	0,82	40,18	32,95	23,00
M5 : penceuse	22	42	0,83	29,10	24,15	16,23
M6 : penceuse	22	42	0,83	29,10	24,15	16,23
M7 : penceuse	2,2	9	0,78	6,24	4,86	3,90
M8 : presse	18,5	34	0,83	23,56	19,55	13,14
M8 : penceuse	3	6,3	0,8	4,36	3,49	2,62
M8 : penceuse	4	8,8	0,82	6,10	5,00	3,49
M8 : penceuse	8	16,8	0,85	11,64	9,89	6,13
M8 : penceuse	2	4	0,75	2,77	2,08	1,83
M8 : penceuse	4	8	0,8	5,54	4,43	3,33
M8 : penceuse	2.2	5.4	0,76	3.74	2.84	2,43

Résumé : ce mémoire présente un filtre actif shunt de puissance comme solution pour la correction du facteur de puissance, réduction du taux d'harmonique, et la compensation de la puissance réactive.

Ce filtre est commandé par une stratégie basée sur l'estimation des courants de références par la méthode des puissances instantanées pour la génération des signaux nécessaire à ce filtre comme le courant de référence. Une partie pratique consacrée à l'élaboration du bilan de puissance de l'usine pour le choix du système de compensation et le type des batteries de condensateurs à installer, ainsi que le mode et le système de compensation.

Abstract : this memory presents an active power shunt filter as a solution for power factor correction, harmonic rate reduction, and reactive power compensation. This filter is controlled by a strategy based on current estimation. of references by the instantaneous power method for the generation of signals necessary for this filter as the reference current, is a practical part dedicated to the development of the power balance of the plant for the choice of the compensation system and the type capacitor banks to install, as well as mode and compensation system.

Résumé : ce mémoire présente un filtre actif shunt de puissance comme solution pour la correction du facteur de puissance, réduction du taux d'harmonique, et la compensation de la puissance réactive.

Ce filtre est commandé par une stratégie basée sur l'estimation des courants de références par la méthode des puissances instantanées pour la génération des signaux nécessaire à ce filtre comme le courant de référence. Une partie pratique consacrée à l'élaboration du bilan de puissance de l'usine pour le choix du système de compensation et le type des batteries de condensateurs à installer, ainsi que le mode et le système de compensation.

Abstract : this memory presents an active power shunt filter as a solution for power factor correction, harmonic rate reduction, and reactive power compensation. This filter is controlled by a strategy based on current estimation. of references by the instantaneous power method for the generation of signals necessary for this filter as the reference current, is a practical part dedicated to the development of the power balance of the plant for the choice of the compensation system and the type capacitor banks to install, as well as mode and compensation system.

ملخص: تقدم هذه الذاكرة عامل تصفية تحويل الطاقة النشط لتصحيح معامل القدرة وتقليل معدل التوافقية وتعويض القدرة التفاعلية. يتم التحكم في هذا الفلتر من خلال استراتيجية تعتمد على تقدير التيارات المرجعية من خلال طريقة القدرة الآنية لتوليد إشارات لا تتطلب هذا الفلتر كتيار مرجعي. جزء عملي لتطوير توازن الطاقة في المصنع لاختيار نظام التعويض ونوع المكثفة التي سيتم تثبيتها، وكذلك وضع ونظام التعويض.