

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN
ELECTROTECHNIQUE
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTS
MOYENS DE COMPENSATION DE L'ENERGIE
REACTIVE

Proposé et dirigé par :
M^r : D. BOUGUEDAD
M^r : K. HADJ SAID

Etudié par :
Toufik.SI AHMED

PROMOTION 2010

Résumé :

La compensation de la puissance réactive vise plusieurs objectifs dont les principaux sont :

- le maintien d'un niveau de tension le plus élevé possible dans les réseaux de transport et de répartition afin de limiter les pertes en ligne tout en restant compatible avec la tenue des matériels.
- garantir un fonctionnement stable pour l'utilisation optimale des appareils et autres récepteurs.

Notre travail consiste à une étude comparative des moyens de compensation de l'énergie réactive

Mot clé : compensateur ; capacité ; condensateur, moteur synchrone ; systèmes FACTS

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : Généralités

Introduction	2
I-1 l'énergie réactive	2
I-2- composantes active et réactive du courant	2
I-3- Composantes active et réactive de la puissance	3
I-4 Facteur de puissance	4
I-4-1 Définition	5
I-4-2 La valeur $tg \varphi$	5
I-4-3 : Importance du facteur de puissance	5
I-4-4 : Inconvénients d'un faible facteur de puissance	7
I-4-5-Causes du mauvais facteur de puissance	8
I-4-6- Amélioration du facteur de puissance	11
I-4-6-1-Action directe sur l'installation	11
I-4-6-2- Action indirecte.....	11
I-5- Les principales sources d'énergie réactive	11
I-5-1 l'Alternateur	11
I-5-2- Câble sous-terrain	12
I-5-3- Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs.....	12
I-6- Les principaux consommateurs de l'énergie réactive	12
I-6-1- Machines à excitation (générateurs et moteurs).....	12
I-6-2- Système de la technologie des semi-conducteurs	13
I-7 Effet de l'énergie réactive	14
I-7-1 $cos \varphi$ et le courant absorbé.....	14
I-7-2 Surdimensionnement générale du réseau	16
I-7-2-1-Alternateur	16
I-7-2-2-Transformateur	16
I-7-2-3-Les lignes de transport d'énergie	16
I-7-2-4-Jeux de barres	17
I-7-2-5-Appareils de protection	17
I-7-3- Rendement des appareils électriques.....	17
I-7-4 - Chute de tension	17
I-7-5 - Tarification de l'énergie réactive	18
I-8- Compensation de l'énergie réactive	19
I-8-1 But de la compensation	19
I-8-2 Moyens de compensation de l'énergie réactive	19
Introduction	19
I-8-2-1 Batteries de condensateurs	19
I-8-2-2- Compensateurs statiques	20

I-8-2-3- Compensateur synchrone	22
 Chapitre II : compensation par condensateurs	
II.1. Définition	24
II.2. Constitution de la batterie de condensateurs.....	24
II.3. Choix du branchement des condensateurs	24
a)Montage triangle	24
b) Montage en étoile	25
II.4. Schémas de branchement des batteries de condensateurs	26
a)Batteries montées en triangle	26
b) Batterie en double étoile	27
II.5. Les différents types de compensation	28
II-5-1-Batteries fixes	28
II-5-2-Batterie de condensateurs en gradins avec régulation automatique	28
II-5-3-Principe et intérêt de la compensation automatique	28
II.6. Les différents modes de compensation (emplacement des condensateurs).....	30
II-6-1-Compensation globale	30
II-6-2-Compensation par secteur.....	31
II-6-3-Compensation individuelle	33
II-6-4-Lieu d'installation des condensateurs	36
II.7. Compensation par condensateurs sur le réseau public	37
II-7-1- Installation série	37
II-7-2- Installation shunt	39
II-7-3- Raccordement des condensateurs au réseau	42
II-7-4-Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs	44
II.8. Compensation par batterie de condensateurs dans une charge	44
II-8-1- Cas du montage des condensateurs aux bornes du moteur	45
II-8-2-Cas du montage des condensateurs en parallèle avec commande séparée	47
II.9-Compensation par condensateur dans une source	48
II-10-Compensation de l'énergie réactive absorbée par un transformateur seul	51
 Chapitre III : Compensateur synchrone	
III-1- Définition.....	52
III-2- Théorie sur le fonctionnement du compensateur synchrone	53
III-3-compensateur synchrone dans le réseau électrique	56
III-4-compensateur synchrone dans la charge.....	56
III-5- Avantages et inconvénients des compensateurs synchrones	58
 Chapitre IV : Compensation statique	
IV-1- Introduction	60

IV-2- le TCSC, compensateur série contrôle par thyristor	60
Avantages et inconvénients de ce compensateur	62
IV-3- SPS, déphaseur statique	63
Avantages et inconvénients de ce compensateur	64
IV-4- Contrôleur de transit de puissance entre ligne (IPFC)	64
IV-5- STATCOM, compensateur statique série, d'énergie réactive de type avance	65
IV-5-1-Modélisation de la zone de régulation (zone 1)	67
IV-5-2-Avantages et inconvénients du système STATCOM	68
IV-6- Contrôleur de puissance unifiée (UPFC)	69
Avantages et inconvénients de ce compensateur	71
IV-7- Compensateur synchrone statique série (SSSC)	72
IV-7-1-Principe de fonctionnement du SSSC	73
IV-7-2-Avantages et inconvénients de ce compensateur	75
IV-8- Compensateur statique (SVC)	75
IV-8-1- Définition du SVC	75
IV-8-2- Caractéristique de réglage U-I d'un SVC	76
IV-8-3 fonctionnement et schéma du SVC	77
IV-8-3-1- Réactance commandé par thyristor : (TCR)	78
IV-8-3-2 Condensateur commandé par thyristor (TSC)	80
IV-8-4- Avantages et inconvénients de la compensation par SVC	82
IV-9- Conclusion	83
Chapitre V : Etude comparative des moyens de compensation de la puissance réactive	
V-1-Introduction	84
V-2-Comparaison entre les différents moyens de compensation	84
Conclusion générale	87

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le réglage de la tension et l'apport de la puissance réactive sont les paramètres essentiels dans la qualité de l'énergie électrique.

La compensation de la puissance réactive vise plusieurs objectifs dont les principaux sont :

- le maintien d'un niveau de tension le plus élevé possible dans les réseaux de transport et de répartition afin de limiter les pertes en ligne tout en restant compatible avec la tenue des matériels.
- garantir un fonctionnement stable pour l'utilisation optimale des appareils et autres récepteurs.

L'étude des moyens de compensation est une étape nécessaire pour l'analyse et l'étude comparative de ces moyens afin de répondre aux exigences de fonctionnement des systèmes électriques, réduire les chutes de tension et les pertes joule, éviter les surdimensionnements des réseaux et enfin permettre de transporter plus de puissance.

Notre travail qui consiste à une étude comparative des moyens de compensation est accompli en suivant les étapes suivantes :

Dans le premier chapitre, nous avons cité les notions générales sur l'énergie électrique. Nous avons mis en évidence l'énergie réactive et ses inconvénients majeurs (pertes joule, chute de tension, augmentation des investissements), ainsi que le facteur de puissance.

Le deuxième chapitre, est consacré à la compensation par batteries de condensateurs dans les différents lieux (source, réseau et charge).

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la compensation par compensateur synchrone dont nous avons mis en évidence son rôle dans les lignes de transport et dans la charge.

Dans le quatrième chapitre, nous avons cité les différents systèmes FACTS, et leurs insertions dans les réseaux.

Le cinquième chapitre, a été consacré à une comparaison entre les moyens de compensation étudiés dans le mémoire.

Nous terminons enfin par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités

Introduction

Augmenter le $\cos\varphi$ revient à diminuer $\operatorname{tg}\varphi$, ce qui s'obtient par une diminution de l'énergie réactive absorbée. Il s'agit donc de fournir de l'énergie réactive en utilisant des dispositifs de compensation qui apportent à l'ensemble de l'installation tout ou une partie de l'énergie réactive qu'elle consomme.

Le réseau n'a plus alors qu'à fournir la différence entre l'énergie réactive demandée par l'ensemble des appareils d'utilisation et celle produite par les dispositifs précités.

I-1 l'énergie réactive :

Tout système électrique (câble, lignes, transformateurs, moteurs, éclairages, etc.) utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

L'énergie active résulte de l'utilisation de puissance active P exprimée en Watt essentiellement par les récepteurs. Elle se transforme intégralement en énergie mécanique ou lumineuse ou calorifique.

L'énergie réactive consommée sert essentiellement à l'amélioration des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive Q exprimée en VAR.

L'énergie apparente est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente des récepteurs, somme vectorielle de la puissance active et de la puissance réactive. Elle permet de déterminer la valeur du courant absorbé par un récepteur.

I-2- composantes active et réactive du courant :

A chacune de ces énergies active et réactive correspond un courant.

Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau. Le courant réactif (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, en arrière (récepteur inductif) ou en avant (récepteur capacitif).

Le courant (I) *total* est le courant résultant qui parcourt le câble (ou la ligne) électrique depuis la source jusqu'au récepteur.

Ce courant est déphasé d'un angle φ par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension), comme indiqué sur la figure I-1.

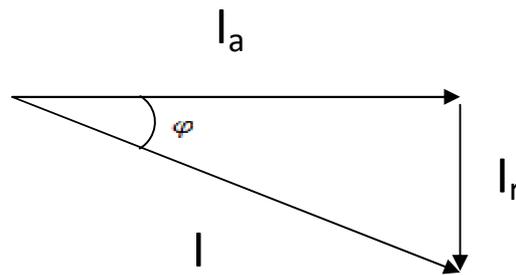


Fig I-1 Diagramme vectoriel des courants [1]

Les courants actif, réactif, total et le déphasage, sont liés par les relations suivantes : [1]

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \dots\dots\dots (I-1)$$

$$I_a = I \cos \varphi \dots\dots\dots (I-2)$$

$$I_r = I \sin \varphi \dots\dots\dots (I-3)$$

Dans le cas d'absence d'harmoniques, $\cos \varphi$ est appelé facteur de puissance.

I-3- Composantes active et réactive de la puissance :

Pour des courants et des tensions ne comportant pas de composantes harmoniques, le diagramme précédent établis pour les courants est aussi valable pour les puissances ; il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau.

On définit ainsi pour un circuit monophasé :

La puissance active :

$$P = VI \cos \varphi \text{ (en W ou kW) } \dots\dots\dots (I-4)$$

La puissance réactive :

$$Q = VI \sin \varphi \text{ (en VAR ou kVAR) } \dots\dots\dots (I-5)$$

Ces puissances se composent vectoriellement comme indiqué sur la figure I-2

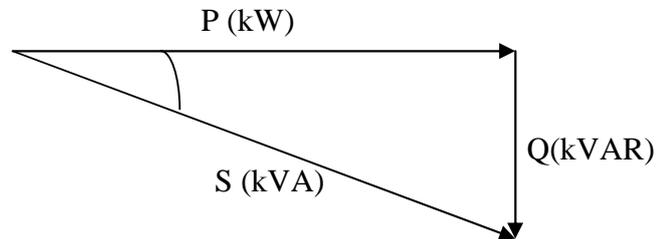


Fig I-2 Diagramme vectoriel des puissances active, réactive et apparente [1]

La puissance apparente :

$$S = VI$$

$$\text{D'où} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (I-6)$$

Dans ce cas $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ est appelé facteur de puissance.

I-4 Facteur de puissance :

I 4-1 Définition :

Le facteur de puissance est défini par le rapport suivant:

$$f = \frac{P}{S} = \frac{\text{Puissance active (kW)}}{\text{Puissance apparente (kVA)}} \quad (I-7)$$

En l'absence d'harmoniques (les signaux sont parfaitement sinusoïdaux), le facteur de puissance est égal à $\cos \varphi$.

Par contre, en présence d'harmoniques, ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$F = F_d \cos \varphi \quad (I-8)$$

F_d : facteur de déformation

Par exemple, pour un variateur de vitesse (générateur de courants harmoniques de valeur importante) :

$$F=0,54 \quad \cos\varphi = 0,85 \quad [1]$$

Dans le cas où P et S ne sont pas constants, on définit un facteur de puissance moyen dans un intervalle donné, obtenu en effectuant le rapport des énergies mesurées dans cet intervalle de temps.

$$(\cos\varphi)_{\text{moy}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = \frac{P_t}{\sqrt{P_t^2+Q_t^2}} = \frac{E_{\text{tot}}}{\sqrt{E_{\text{tot}}^2+W_{\text{tot}}^2}} \quad (\text{I-9})$$

Avec E_{tot} et W_{tot} désignant respectivement les énergies actives et réactives consommées pendant le temps t.

Le facteur de puissance est une grandeur très utile qui permet d'évaluer la consommation ou l'apport en puissance réactive de l'élément mis en jeu. En effet, si le facteur de puissance est proche de 1, cette donnée nous permet de constater que l'élément étudié ne consomme pratiquement aucune puissance réactive, il ne consomme que de la puissance active. Contrairement, si le facteur de puissance est proche de 0, ça nous permet de constater que cet élément consomme uniquement de la puissance réactive. Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus grande qu'il se rapproche de 0.

I-4-2 La valeur $\text{tg } \varphi$:

L'énergie est mesurée à l'aide d'appareils de comptage estimant idéalement l'énergie active et réactive consommées ; pour cela en plus du facteur de puissance $\cos\varphi$, il a été établi la $\text{tg}\varphi$ qui est le rapport entre l'énergie réactive (kVARH) et l'énergie active (kWH) consommées pendant la même durée.

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\text{puissance réactive (kVAR)}}{\text{puissance active (kW)}} \quad (\text{I-10})$$

I-4-3 : Importance du facteur de puissance :

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

Si le facteur de puissance ($\cos \varphi$) diminue, l'intensité appelée augmente, les pertes par effet joule augmentent en raison du carré de cette intensité (RI^2), les chutes de tension sont importantes et le rendement de l'installation diminue ce qui conduit au surdimensionnement des transformateurs, câbles et également les appareils de commande.

Pour avoir une idée concrète de l'importance du facteur de puissance, on propose l'exemple suivant :

Tableau I : comparaison de deux installations consommant la même puissance active : [2]

	Installation A	Installation B
Puissance active consommée	70 kW	70 kW
$\cos \varphi$	0,7	0,9
$\text{tg} \varphi$	1,02	0,48
$Q=P \text{ tg} \varphi$	71,4 kVAR	33,9 k VAR
Q non facturé (0,6P)	42 k VAR	42 k VAR
Facturation de l'énergie réactive	29,4 k VAR	0
Bonification (énergie réactive remboursée)	0	11,9 k VAR
Puissance apparente S consommée ($\frac{P}{\cos \varphi}$)	100 k VA	78 k VA
Reserve de puissance	0	22 k VA
Intensité consommée $I = \frac{S}{U\sqrt{3}}$	151 A	118A

Dans le tableau ci-dessus, on a considéré deux installations A et B alimentées chacune par un transformateur de 100 k VA sous 380 V. Ces deux installations consomment 70 kW chacune mais, l'une sous $\cos \varphi = 0,7$ et l'autre sous $\cos \varphi = 0,9$, on constate :

- L'installation à $\cos \varphi = 0,7$ payera des pénalités au distributeur d'énergie électrique.
- L'installation à $\cos \varphi = 0,7$ est saturée alors que l'installation à $\cos \varphi = 0,9$ dispose de 22 k VA.
- Dans l'installation à $\cos \varphi = 0,7$ transite inutilement 33 A de plus que dans celle où $\cos \varphi = 0,9$. Les pertes en ligne (kWh) proportionnelles au carré du courant sont supérieures à 66% donc augmentent d'autant la facture ;
- La tension au bout de ligne est améliorée à $\cos \varphi = 0,9$; les chutes de tension étant proportionnelles au courant ;
- L'utilisateur de l'installation de $\cos \varphi = 0,9$ peut se contenter d'un abonnement de 80 k VA. [4]

I-4-4 : Inconvénients d'un faible facteur de puissance :

La circulation de l'énergie réactive a une influence importante sur le choix des matériels et le fonctionnement des réseaux. Elle a, par conséquent, des incidences économiques.

En effet, pour une même puissance active P utilisée, la figure I-3 montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente ($S_2 > S_1$) que le $\cos \varphi$ est faible, c'est-à-dire, que l'angle est élevé.

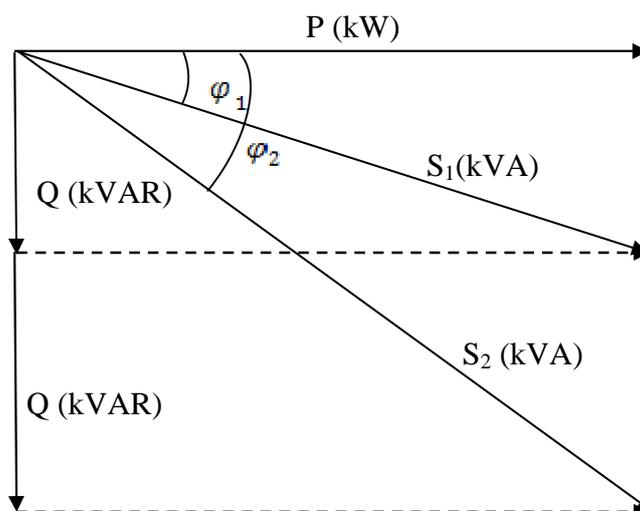


Fig. I-3 Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur de la puissance apparente [1]

De façon identique (voir figure I-4) pour un même courant actif utilisé I_a (pour une tension U constante) il faut fournir d'autant plus de courant ($I_2 > I_1$) que le $\cos \varphi$ est faible (l'angle φ élevé)

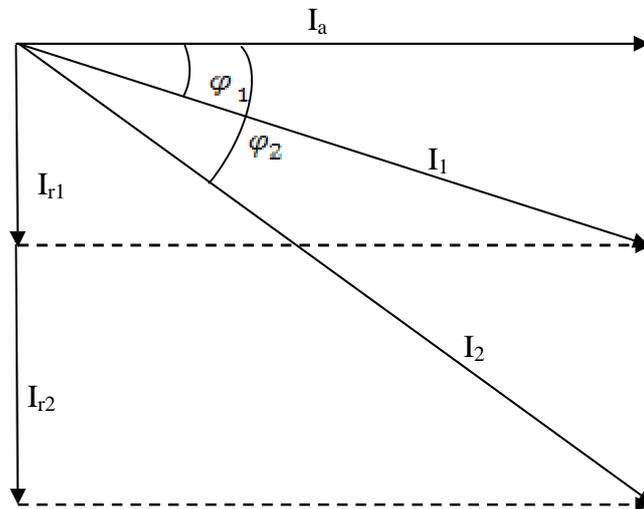


Fig I-4 Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur du courant apparent [1]

Ainsi, en raison de l'augmentation du courant, la circulation d'énergie réactive provoque :

- Des surcharges et des échauffements supplémentaires dans les transformateurs et les câbles qui ont pour conséquence des pertes d'énergie active.
- Des chutes de tension.

Les conséquences de la circulation d'énergie réactive conduisent donc à surdimensionner les équipements électriques du réseau.

I-4-5-Causes du mauvais facteur de puissance :

Dans une installation bien dimensionnée, un bon facteur de puissance est obtenu lorsque chaque machine consomme une puissance active proche de sa valeur nominale. Mais il reste toujours que cette installation consomme une certaine puissance réactive due au courant magnétisant des transformateurs et des moteurs asynchrones. Cette puissance est indépendante de la puissance active consommée par les éléments de l'installation. Maintenant, le mauvais facteur de puissance est obtenu lorsque la puissance active absorbée diminue, c'est-à-dire que les éléments de l'installation consomment des puissances actives loin de leurs valeurs nominales. Donc $\cos \varphi$ diminue, ce qui risque de pénaliser le consommateur.

En pratique, un mauvais facteur de puissance est souvent le résultat d'une mauvaise utilisation du matériel, c'est le cas des exemples suivants :

- Un fonctionnement à faible charge ou à vide d'un transformateur.
- Un fonctionnement à niveau de tension d'alimentation élevée ou à des marches à vide ou à faible charges pour les moteurs asynchrones
- Une mauvaise conception de l'éclairage fluorescent.

Tableau II : éléments influant sur le facteur de puissance [2]

<u>Moteurs asynchrones ordinaires.</u> le $\cos \phi$ est essentiellement fonction des :	
caractéristiques de la construction...	-puissance nominale ($\cos \phi$ augmente avec la puissance active) -vitesse nominale (à puissance égale, $\cos \phi$ diminue lorsque le nombre de pôles augmente) -qualité de la construction
Condition d'utilisation.....	-charge ($\cos \phi$ maximale aux fortes charges ; marche à vide ou à faible charge à éviter) -tension d'alimentation ($\cos \phi$ augmente lorsque la tension diminue)
<u>Transformateurs de puissances.</u> le $\cos \phi$ est essentiellement fonction des :	
caractéristiques de la construction...	-puissance nominale ($\cos \phi$ augmente avec la puissance active) -type de transformateur (selon la caractéristique du matériau magnétique) -qualité de la construction
Condition d'utilisation.....	-consommation propre d'énergie réactive (marche à vide ou à faible charge à éviter)
<u>Appareils d'éclairage</u>	
Lampes à incandescence.....	- $\cos \phi$ égale à l'unité
Lampes à fluorescence.....	- $\cos \phi$ est faible (inférieur à 0.4)
<u>Appareils électrothermiques</u>	
Chauffage par résistances.....	- $\cos \phi$ pratiquement égale à l'unité
Soudage par résistances.....	-valeurs diverses (en moyenne $\cos \phi$ de l'ordre de 0.5 à 0.6)
Soudage par arc.....	-postes statiques : $\cos \phi$ faible (de l'ordre de 0.3 à 0.4) le plus souvent, sauf si compensation par condensateurs -groupes rotatifs (moteurs asynchrones ordinaires) -transformateurs-redresseurs : $\cos \phi$ assez satisfaisants
Chauffage par induction	
à basse fréquence.....	- $\cos \phi$ assez satisfaisant en général
Chauffage par induction	
à haute fréquence et chauffage diélectrique.	$\cos \phi$ satisfaisant (supérieure à 0,6 ou 0,7)
Four à arcs.....	-la valeur moyenne de $\cos \phi$ est voisine de 0,8
<u>Autres appareils</u>	
Redresseur à courant et onduleurs...	- $\cos \phi$ assez satisfaisant pour les redresseur à diodes ;pour les systèmes à thyristors cela dépend du type de montage et de la valeur de l'angle
Moteurs spéciaux.....	- $\cos \phi$ en général excellent (fonction de réglage)

I-4-6- Amélioration du facteur de puissance

I-4-6-1-Action directe sur l'installation : [3]

L'énergie réactive absorbée par les transformateurs et les moteurs varie faiblement entre la marche à vide et la marche à pleine charge, par contre l'énergie active augmente avec la puissance fournie, dès lors, il est évident qu'à vide et à faible charge, le $\cos \varphi$ est très mauvais, il faudra donc :

- Une restriction des machines à vides ou à faibles charges des transformateurs et des moteurs.
- Une utilisation en faible charge pour les moteurs pendant de longues durées d'un couplage étoile au lieu d'un couplage triangle.
- Emploi d'un transformateur supplémentaire pour alimenter les circuits de protection et d'éclairage.

Ces actions permettent d'avoir de bons résultats du point de vue facteur de puissance et rendement, mais elles restent insuffisantes pour obtenir la valeur bien déterminée du facteur de puissance.

I-4-6-2- Action indirecte : [3]

Dans ce cas, on ne modifie pas l'installation, mais on produit de l'énergie réactive à proximité de son lieu de consommation, pour cela on utilise différents procédés à savoir :

- les batteries de condensateurs
- les compensateurs statiques
- compensateurs synchrones

I-5- Les principales sources d'énergie réactive :

I-5-1 L'Alternateur :

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

En effet la puissance réactive est commandée

I-5-2- Câble sous-terrain :

La capacitance d'une ligne de transport formée de câbles dépasse de beaucoup l'importance de sa résistance et de son inductance. Une telle ligne agit surtout comme une inductance

C'est cette caractéristique du câble (grande capacitance) qui rend son utilisation limitée surtout pour le transport de l'énergie sur les grandes distances.

I-5-3- Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs :

Dans les lignes aériennes de transport d'énergie électrique à HT qui sont caractérisées par une longueur considérable, les capacités doivent être prises en considération du fait que leur valeur ne sont pas négligeables devant les réactances de ces lignes mais surtout en régime à vide ou sous-charge. Ces lignes aériennes deviennent capacitives, par conséquent génératrices de puissance réactive.

Le schéma équivalent d'une ligne de transport de l'énergie électrique à HT est représentée par la figure ci-après :

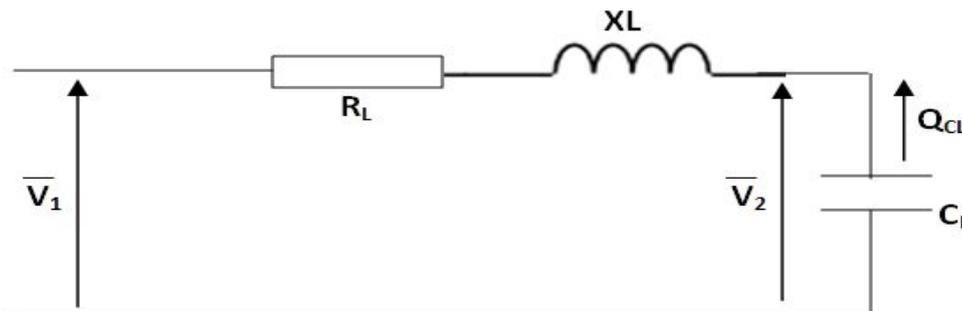


Fig I-5 Schéma équivalent d'une ligne de transport d'énergie fonctionnant à vide [2]

I-6- Les principaux consommateurs de l'énergie réactive :**I-6-1- Machines à excitation (générateurs et moteurs)**

Les machines ne fonctionnent que si leurs circuits magnétiques est excité par un courant magnétisant ($I_r = I \sin \varphi$) qui met en évidence la quantité d'énergie réactive demandée.

Le moteur asynchrone à rotor court-circuité peut être représenté en schéma simplifié comme un transformateur de puissance, d'où une consommation permanente et importante d'énergie réactive qui augmente avec le couple.

I-6-2- Système de la technologie des semi-conducteurs : [4]

Le facteur de puissance des systèmes de la technologie des semi-conducteurs est différent de $\cos\phi$ car le régime est alternatif non sinusoïdal.

A titre illustratif, on considère le redresseur triphasé tout thyristors monté en pont de Grectz qui contrôle la vitesse d'un moteur à courant continu entraînant une charge à vitesse variable. La vitesse de rotation du moteur est donnée par l'expression suivante : [5]

$$N = \frac{E}{\frac{p}{a} n \Phi} = \frac{U - RI}{\frac{p}{a} n \Phi} \dots \dots \dots (I - 11)$$

N (tr/mn) : vitesse du moteur

U(v) : tension d'alimentation du moteur

R() : résistance de l'induit du moteur.

I(A) : courant absorbé par le moteur.

(W_b)= flux magnétique traversant l'induit.

n : le nombre de conducteur de l'induit.

2a : le nombre de voies en parallèles de l'induit

2p : le nombre de poles

Sachant que :

$$U = \frac{2 V_s \sqrt{2}}{2\pi} \cos\alpha = V_0 \cos\alpha \dots \dots \dots (I - 12)$$

Avec :

$$V_0 = \frac{2 V_s \sqrt{2}}{2\pi}$$

V_s : tension de source d'alimentation du redresseur.

A partir de (11) et (12) on déduit que :

La vitesse de rotation du moteur(N) est fonction de la tension U, alors pour augmenter ou diminuer la vitesse N, il faut augmenter ou diminuer la tension U. D'autre part le facteur de puissance est :

$$F_p = \frac{3}{\pi} \cos \alpha \quad (I-13) \quad [5]$$

Sachant que la vitesse (N) de rotation du moteur est fonction de la tension U qui elle-même proportionnelle à $\cos \alpha$, donc pour une faible vitesse du moteur, $\cos \alpha$ doit être faible ce qui nécessite une consommation importante d'énergie réactive.

I-7 Effet de l'énergie réactive :

I-7-1 $\cos \varphi$ et le courant absorbé :

Un consommateur de l'énergie électrique aussi petit qu'il soit (usine, cité, atelier,...) est caractérisé par les grandeurs électriques à savoir :

- la tension à ses bornes
- la puissance absorbée
- le facteur de puissance F

En triphasé

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi \text{ d'où } I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \quad (I-14)$$

Lorsqu'une installation ou un appareil qui fonctionne à puissance et à tension constante présente un faible facteur de puissance, alors il y aura un appel important de courant et par conséquent une augmentation des pertes par effet Joule qui va affecter le comportement du réseau.

Les pertes de puissance dans une ligne :

$$\Delta p = 3RI^2 \quad (I-15)$$

$$S = \sqrt{3} UI \text{ d'où } I = \frac{S}{\sqrt{3} U} \quad (I-16)$$

Donc :

$$\Delta p = R \frac{S^2}{U^2} \quad (I-17)$$

Et en définitive :

$$\Delta p = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (I-18)$$

Δp : perte de puissance par effet Joule [W]

R : résistance de la ligne []

P : puissance active [W]

Q : puissance réactive [VAR]

De (14) et puisque $P = c^{te}$ et $U = c^{te}$,

$$I = \frac{C^{ste}}{\cos \varphi}$$

Si on a un mauvais $\cos \varphi$, alors I sera grand :

$$\Delta U = R \cdot I$$

$$\Delta U = \frac{\rho \cdot l}{S} I \quad \text{D'où} \quad S = \frac{\rho \cdot l \cdot I}{\Delta U} \quad (I-19)$$

Avec :

S : La section du conducteur [mm^2]

ρ : Résistivité du matériau [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]

l : Longueur de la ligne [m]

I : L'intensité traversant le conducteur [A]

ΔU : La chute de tension dans la ligne [V]

Alors : si I est grand, il faut employer un conducteur de section importante afin de satisfaire la contrainte d'échauffement, par conséquent l'augmentation du coût d'investissement.

De plus si $\cos\varphi$ est faible, alors la chute de tension sera grande ce qui va influencer sur la qualité de la tension aux différents nœuds alimentant les abonnés à desservir.

I-7-2 Surdimensionnement générale du réseau :

Les sites de production d'énergie électrique sont souvent éloignés des consommateurs, ce qui nécessite des lignes de transport en HT très longues, des postes de transformation, des postes d'interconnexion et des appareils de protection.

Cette structure doit être surdimensionnée si elle est le siège d'un transit excessif de puissance réactive.

I-7-2-1-Alternateur :

Le dimensionnement du circuit magnétique limite la production de l'énergie réactive de l'alternateur à une valeur nominale correspondante à un facteur de puissance limite.

Si on a une demande importante de l'énergie réactive, la puissance apparente appelée par le réseau augmente et à une tension constante on aura donc un courant élevé.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} \quad (I - 20)$$

Puisque P et U sont constants, le facteur de puissance va diminuer par rapport à sa valeur nominale et l'échauffement sera élevé. Comme le facteur de puissance est limité, dans cette condition, on doit augmenter la puissance apparente S c'est-à-dire surdimensionner le générateur.

I-7-2-2-Transformateur :

Si le réseau fait appel à une énergie réactive élevée, alors la puissance apparente augmente. Devant la même contrainte que précédemment, on doit surdimensionner le transformateur

I-7-2-3-Les lignes de transport d'énergie :

A vide les lignes électriques fournissent de l'énergie réactive, grâce aux réactances capacitives des lignes. En service le réseau sera traversé par un courant plus grand, donc les chutes de tension dans les lignes seront également élevées.

Pour remédier à cela, il faut diminuer la résistance de ces lignes, ce qui entraîne l'augmentation de la section du conducteur d'où le surdimensionnement des lignes de transport d'énergie électrique.

I-7-2-4-Jeux de barres :

L'augmentation du courant due à l'excès de l'énergie réactive induit une augmentation des courants de Foucault dans les barres, donc cela provoquera l'échauffement de ces dernières ce qui entraînera leur dilatation. Pour contrecarrer ce problème, il faut surdimensionner les barres conductrices.

I-7-2-5-Appareils de protection :

Le pouvoir de coupure est l'une des caractéristiques de dimensionnement des appareils de protection. Si le facteur de puissance d'une ligne à protéger est mauvais, le courant qui la traverserait sera élevé, donc les parties actives de ces appareils seront le siège d'un échauffement, d'où la nécessité de surdimensionnement pour éviter la fusion de ces parties actives.

I-7-3- Rendement des appareils électriques :

Le rendement d'un appareil (récepteur) électrique est donné par :

$$\eta = \frac{p_u}{p_{abs}} \quad (I - 21)$$

Avec :

Pu : puissance utile [W]

Pabs : puissance absorbée [W]

$$\text{Or : } P_u = P_{abs} - P \quad (I - 22)$$

Avec :

P : perte de puissance [W]

$$\eta = \frac{p_{abs} - \Delta P}{p_{abs}} \Leftrightarrow \eta = 1 - \frac{\Delta p}{p_u + \Delta p} \quad (I - 23)$$

Si l'énergie réactive est assez élevée, alors le facteur de puissance diminue, donc le courant augmente et les pertes par effet Joule qui sont une fonction quadratique du courant augmentent. Aussi ce qui entraîne forcément la diminution du rendement du récepteur.

I-7-4 - Chute de tension :

Les chutes de tension pour une ligne aérienne sont données sous forme approchées par la formule :

$$\Delta u = \sqrt{3}(RI \cos \varphi + XI \sin \varphi) \quad (I - 24)$$

Or :

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi \text{ et } Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad (I-25)$$

D'où :

$$\Delta U = \frac{R.P + X.Q}{U} \quad (I-26)$$

Avec :

U : la chute de tension [V]

R : résistance de la ligne []

X : la réactance de la ligne []

Q : l'énergie réactive [VAR]

P : l'énergie active [W]

U : tension efficace entre phase [V]

Alors si on a un transit important de l'énergie réactive à une puissance active constante, d'après la formule on aura une augmentation de chute de tension.

I-7-5 - Tarification de l'énergie réactive :

Pour un faible facteur de puissance, le courant augmente, les pertes ainsi que les chutes de tension vont augmenter, tout ça va entraîner un surdimensionnement général du réseau et par conséquent, le coût d'investissement sera élevé et le prix d'un KWh augmentera, donc le consommateur aura à régler des factures élevées. Pour cela des organismes de protection (SONELGAZ, EDF, ...) oblige l'utilisateur (les usines) à améliorer son facteur de puissance si non il a de bonnes raisons pour les pénaliser.

I-8- Compensation de l'énergie réactive :**I-8-1 But de la compensation :**

Nous avons vu précédemment (paragraphe I-7) que le transit de l'énergie réactive est à l'origine des pertes Joule, chute de tension et surdimensionnement du réseau. Donc pour palier (remédier) à ces problèmes, on doit faire appel à la compensation de l'énergie réactive qui consiste à produire l'énergie réactive au plus près de la demande.

Par conséquent, compenser l'énergie réactive permet :

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

I-8-2 Moyens de compensation de l'énergie réactive :**Introduction**

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

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

I-8-2-1 Batteries de condensateurs

Une batterie de condensateur est un groupe de condensateurs unitaires connectés électriquement les uns aux autres (mise en série ou en parallèles, groupement triangles ou étoiles). Les condensateurs sont généralement reliés aux réseaux par l'appareillage (fusible, contacteurs, interrupteurs,). Un groupe de condensateurs reliés aux réseaux par les mêmes appareillages est appelé gradin.

Chaque gradin constitue donc l'ensemble autonome. Un ensemble de gradins peut posséder les mêmes organes de protection (disjoncteurs, etc....), cet ensemble de gradins est appelé : Batterie. Les batteries de condensateurs peuvent être montées en étoile ou en triangle.

Citons un exemple d'un gradin de condensateurs couplés en étoile sur une ligne triphasée

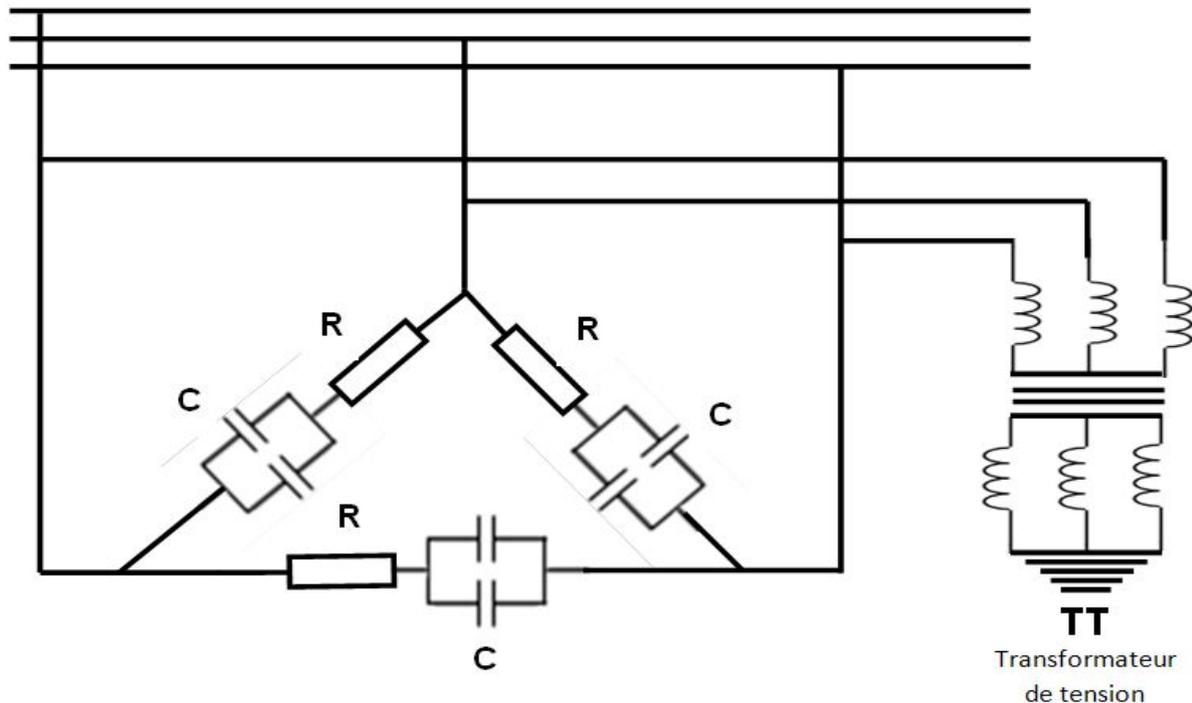


Fig I-6 : Schéma de couplage de condensateur Schunt [6]

Les batteries de condensateurs seront l'objet de notre étude dans le deuxième chapitre.

I-8-2-2- Compensateur statique : [8]

Afin d'assurer un bon fonctionnement des réseaux électriques et des récepteurs, et pour une bonne qualité de service, au cours de ces dernières années, des compensateurs statiques d'énergie réactives ont été conçus ; les éléments les plus usuels sont :

- T.C.R : inductance commandée par thyristor / Thyristor Controlled Rector.
- T.S.C: condensateur commuté par thyristor / Thyristor Swiched Capacitor.
- T.S.R: inductance commutée par thyristor / Thyristor Swiched Reactor.
- M.S.C : compensateur commuté mécaniquement / Mechanically Swiched Capacitor

Différentes configurations de compensateurs statiques :

Dans les systèmes électriques, la compensation se fait aisément à l'aide des configurations illustrées par la figure I-7.

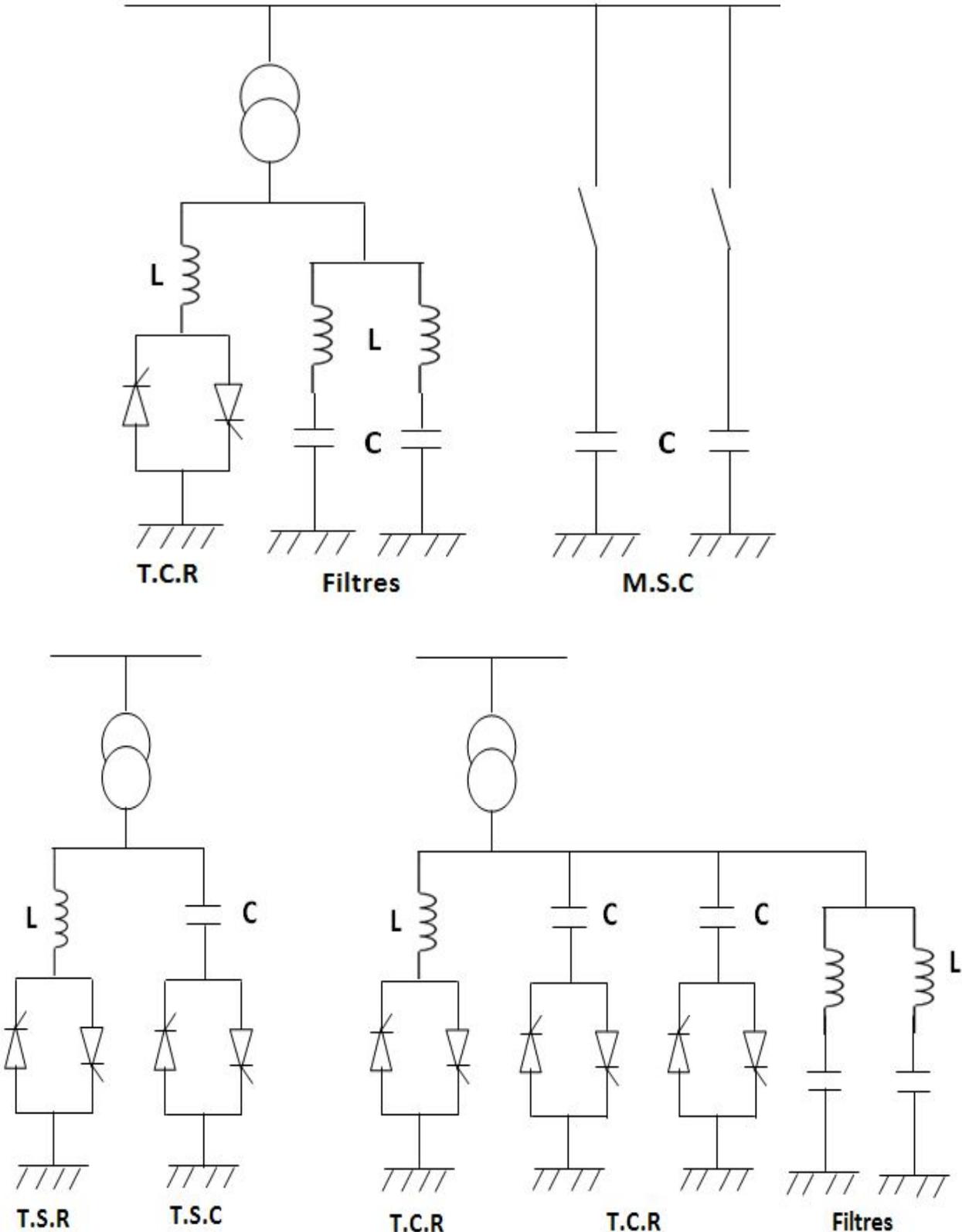
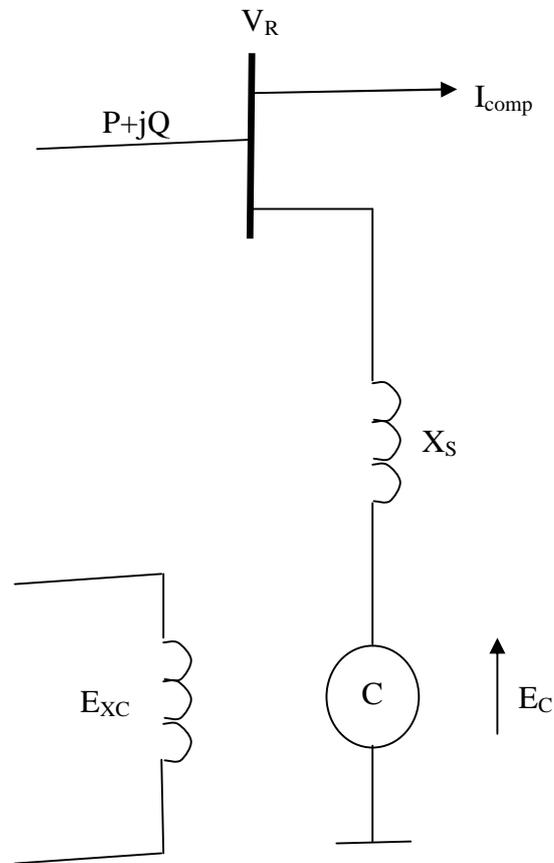


Fig I-7 Configuration des S.V.C utilisées pour la commande de la puissance réactive [8]

I-8-2-3- Compensateur synchrone [4]**Figure I-8 : Schéma simplifié d'un compensateur synchrone**

Le compensateur synchrone C_s est un moteur synchrone fonctionnant à vide c'est-à-dire il n'entraîne aucune charge, donc il n'absorbe aucune puissance active aux pertes près et dont l'excitation est réglable. Le C_s génère de la puissance réactive lors du régime de surexcitation (il se comporte comme une capacité) et absorbe de l'énergie réactive quand il est sous-excité (il se comporte comme une bobine). Donc, le C_s fonctionne dans l'un ou l'autre des régimes en fonction du régime de charge et de la ligne.

Au régime de charge de la ligne, il est surexcité et au régime de sous-charge, il est excité par la puissance. Le C_s consomme une faible puissance active. E_c sera en phase avec la tension en jeu de barres V_R

$$I_{comp} = \frac{|U_R| - |E_C|}{\sqrt{3} j X_S} \text{ et } Q_S = |U_R| \frac{|E_C| - |U_R|}{X_S} \quad (I-27)$$

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

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

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

Chapitre II

Compensation par condensateur

II.1. Définition : Les condensateurs génèrent de l'énergie réactive avec un très bon rendement. Les critères fondamentaux des choix des condensateurs sont la tension et la température. Les condensateurs sont classés en catégories de températures. La valeur minimum est la température de l'air ambiante à laquelle le condensateur peut-être mis sous la tension. La valeur maximum est celle à laquelle il peut être utilisé.

Les caractéristiques nominales devant figurer sur la plaque signalétique :

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

Les surtensions et l'échauffement abrègent la vie des condensateurs.

II.2. Constitution de la batterie de condensateurs :

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

Ces éléments sont disposés en série puis en parallèle et sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile susceptible d'assurer le refroidissement. Cela constitue une unité, ces unités peuvent aussi être associées en série, en parallèle, en triangle ou en étoile.[3]

II.3. Choix du branchement des condensateurs :

Pour le branchement des batteries de condensateurs, on a le choix entre les montages triangle et étoile pour un même courant de ligne I.

a) Montage triangle :

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

$$Q_{C\Delta} = 3.C_{\Delta}.\omega.U^2 \quad (\text{II-1})$$

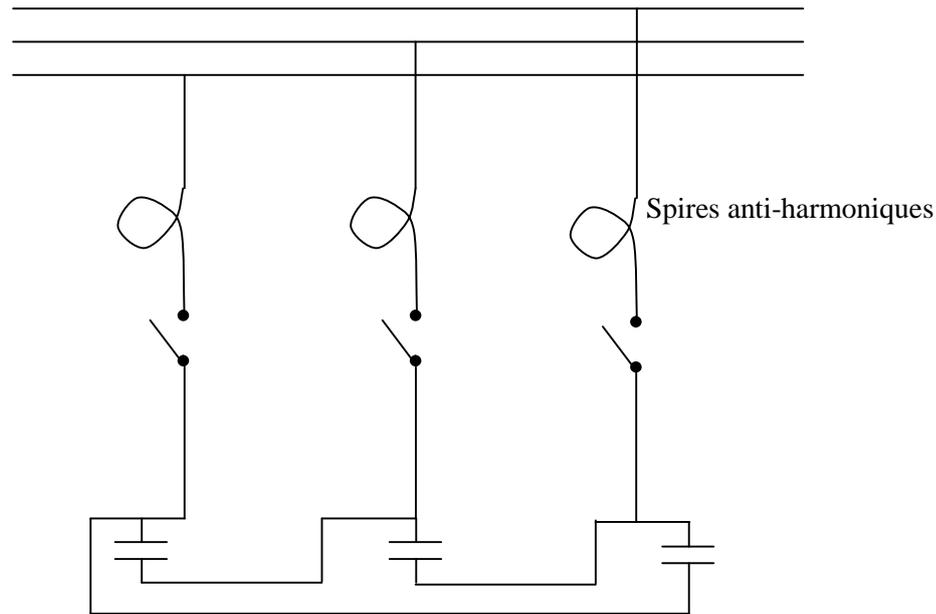


Figure II-1 : Schéma de raccordement des batteries en triangle [4]

b) Montage en étoile :

Dans le couplage en étoile, les tensions composées sont $\sqrt{3}$ fois plus grandes que les tensions simples ($U = \sqrt{3} V$).

La puissance réactive fournie est :

$$Q_{C\lambda} = 3.C_{\lambda}.\omega.\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 = C_{\lambda}.\omega U^2$$

Puisque : $Q_{C\lambda} = Q_{C\Delta} \quad \Rightarrow \quad 3.C_{\Delta}.\omega U^2 = C_{\lambda}.\omega U^2$

$$C_{\lambda} = 3.C_{\Delta}$$

Remarque :

Pour une même puissance réactive en étoile, nous devons utiliser une capacité 3 fois plus grande qu'en triangle. Il est donc plus économique de brancher une batterie de condensateurs en triangle qu'en étoile.

II.4. Schémas de branchement des batteries de condensateurs :**a) Batteries montées en triangle : [9]**

Pour ce type de batteries, une protection contre les surtensions est nécessaire.

Soit par fusible HPC, soit par relais à maximum de courant en TI sur chaque phase.

Important :

On choisira des fusibles HPC avec un calibre au minimum de 1,7 fois le courant nominal de la batterie. Le choix du calibre sera fait selon le cahier technique.

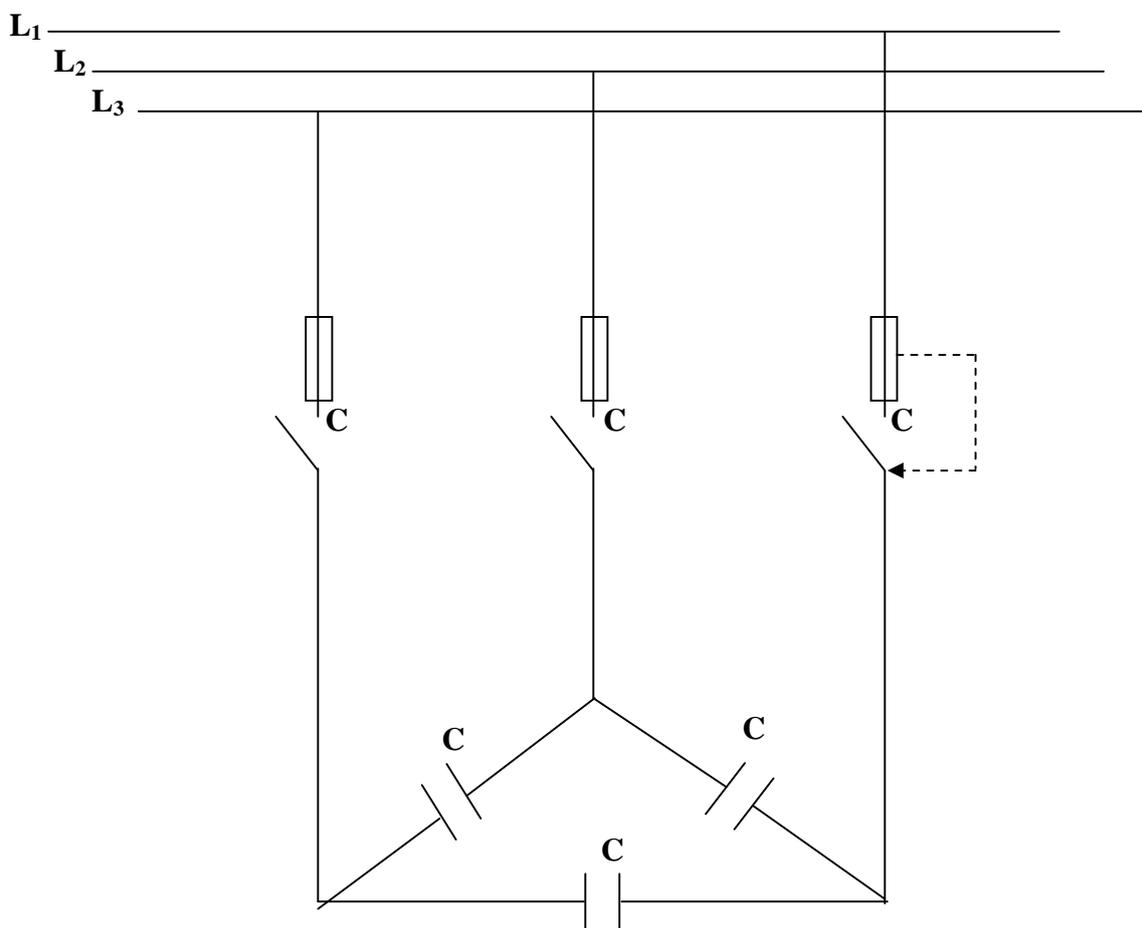


Figure II.2 : Schéma d'une batterie triangle [9]

b) Batterie en double étoile :

La batterie est divisée en deux étoiles, permettant de détecter un déséquilibre entre les deux neutres par un relais approprié. On peut le concevoir pour tout type de réseau jusqu'aux réseaux THT.

On utilisera le schéma suivant pour grandes puissances à installer essentiellement en batteries fixes.

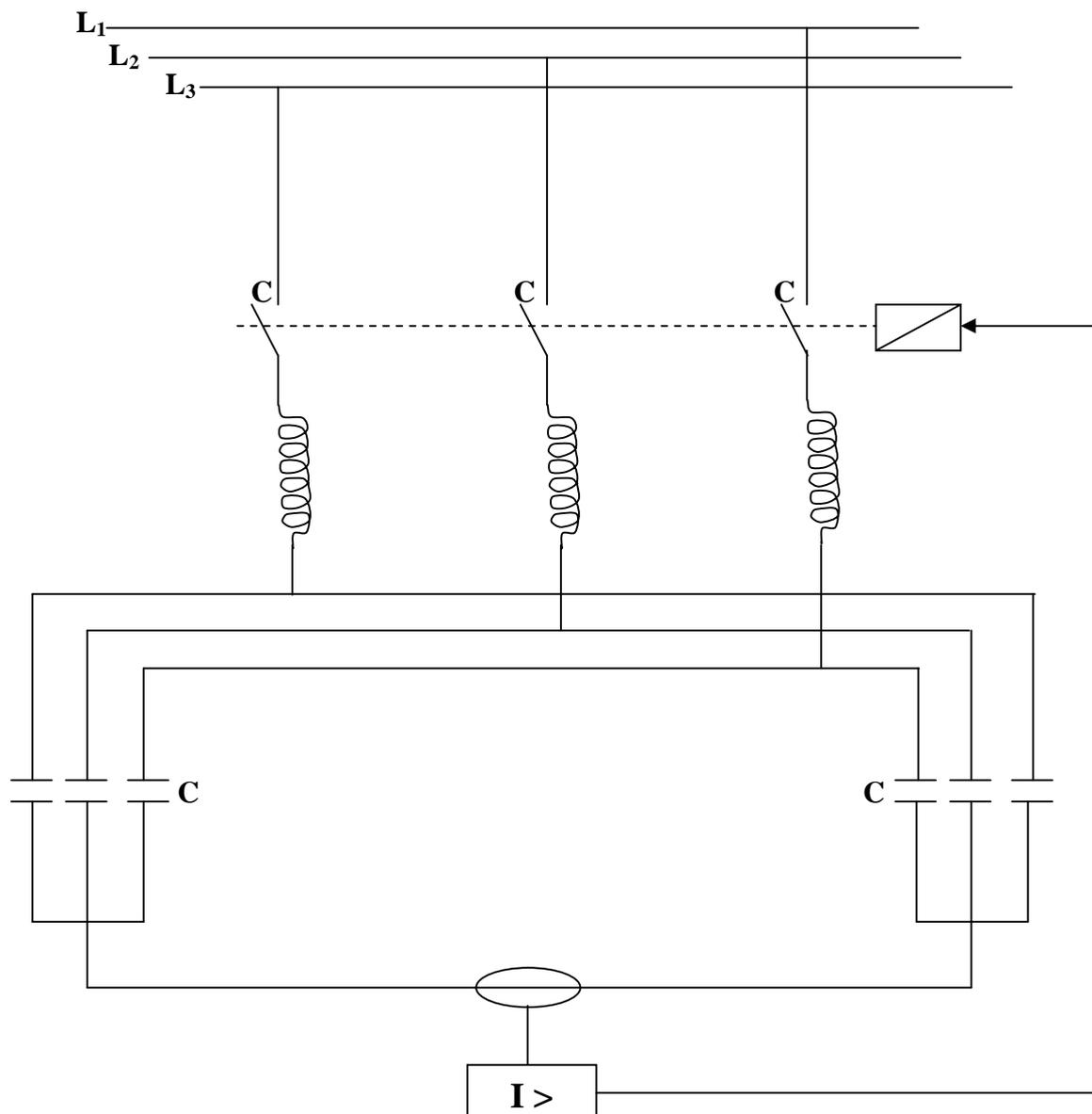


Figure II.3 : Schéma d'une batterie en double étoile [9]

II.5. Les différents types de compensation :

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits :

- Les condensateurs de valeurs fixes ou batteries fixes ;
- Les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batterie automatique)

qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation. [1]

II-5-1-Batteries fixes :

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

- aux bornes des récepteurs ;
- sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible. [1]

II-5-2-Batterie de condensateurs en gradins avec régulation automatique :

Ce type d'équipement permet d'ajuster la puissance réactive fournie aux variations de consommation, et ainsi de maintenir le $\cos \phi$ à la valeur désirée.

Il s'utilise dans les cas où la puissance réactive consommée est forte vis-à-vis de la puissance du transformateur et varie dans les proportions importantes, c'est-à-dire essentiellement :

- aux bornes des tableaux généraux BT ;
- sur les départs de puissance importante.

II-5-3-Principe et intérêt de la compensation automatique [1] :

Les batteries de condensateurs sont divisées en gradins (voir Figure II.4). La valeur de $\cos \phi$ est détectée par un relais varmétrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du $\cos \phi$ désiré.

Le transformateur de courant doit être placé en amont des récepteurs et des batteries de condensateurs.

La surcompensation est néfaste car elle augmente anormalement la tension de service.

La compensation automatique permet donc d'éviter les surtensions permanentes résultant d'une surcompensation lorsque le réseau est peu chargé.

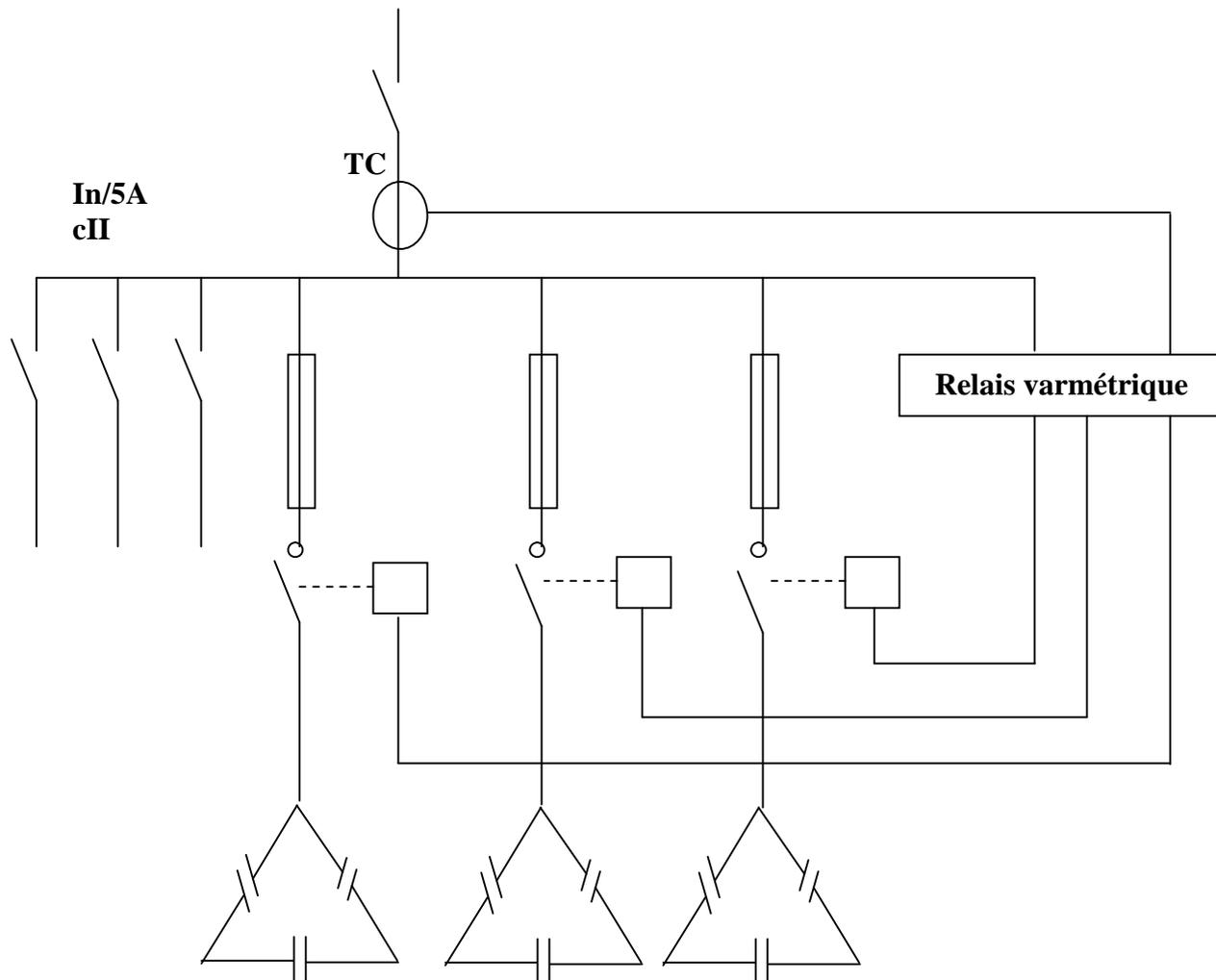


Figure II-4 : Principe de la compensation automatique d'une installation [1]

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

Règle usuelle en basse tension :

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

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

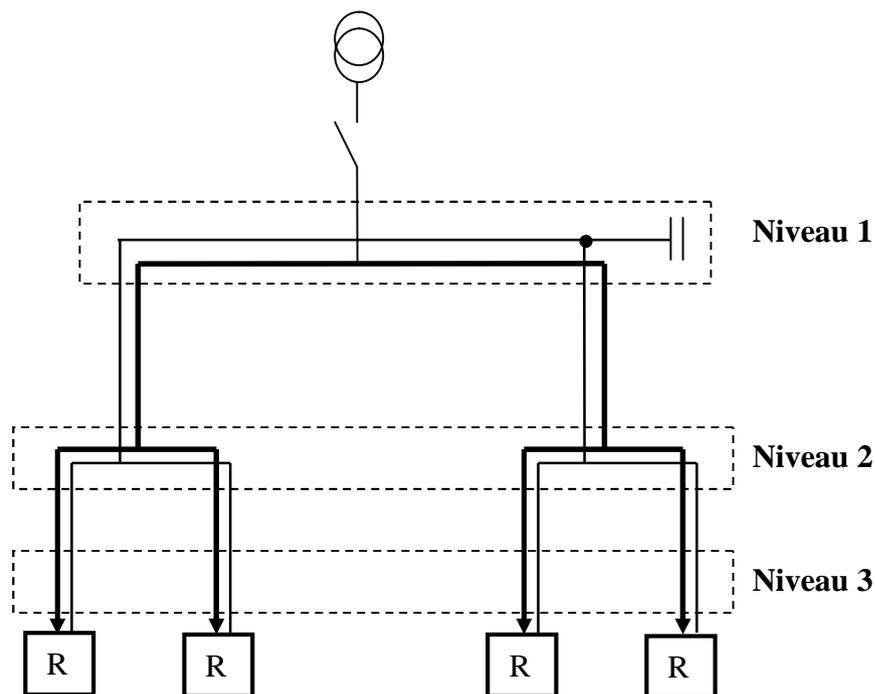
La compensation peut être globale, par secteur ou individuelle.

En principe, la compensation idéale est celle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande.

Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc dans la pratique, un optimum technico-économique [1].

II-6-1-Compensation globale :**Principe :**

La batterie est raccordée en tête d'installation (voir figure II.5), et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la période de facturation de l'énergie réactive pour un fonctionnement normal de site.



→ Circulation de l'énergie réactive.

Figure II.5 : Compensation globale [1]

Intérêt :

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

Ce type de compensation peut, suivant le cas :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Diminuer la puissance apparente en l'ajustant au besoin en puissance active de l'installation.
- Augmenter la puissance active disponible du transformateur de livraison.

Remarque :

- Le courant réactif circule dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations situées en aval de la batterie ne sont pas diminuées.

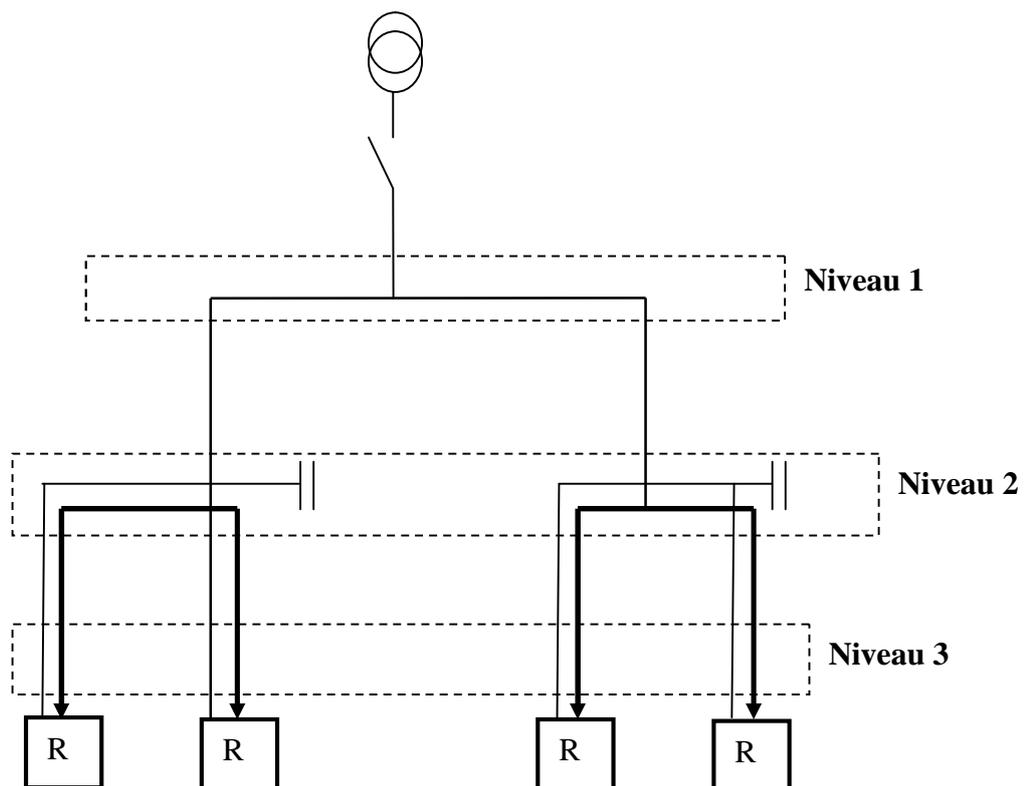
Utilisation :

Lorsque la charge est régulière, une compensation globale convient.

II-6-2-Compensation par secteur :**Principe :**

La batterie est raccordée au tableau de distribution (Voir figure II.6) et fournit l'énergie demandée au secteur de l'installation.

Une grande partie de l'installation est soulagée, en particulier les canalisations alimentant chaque secteur.



→ Circulation de l'énergie réactive.

Figure II.6 : Compensation par secteur [1]

Intérêt :

Ce type de compensation permet de :

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

Remarque :

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

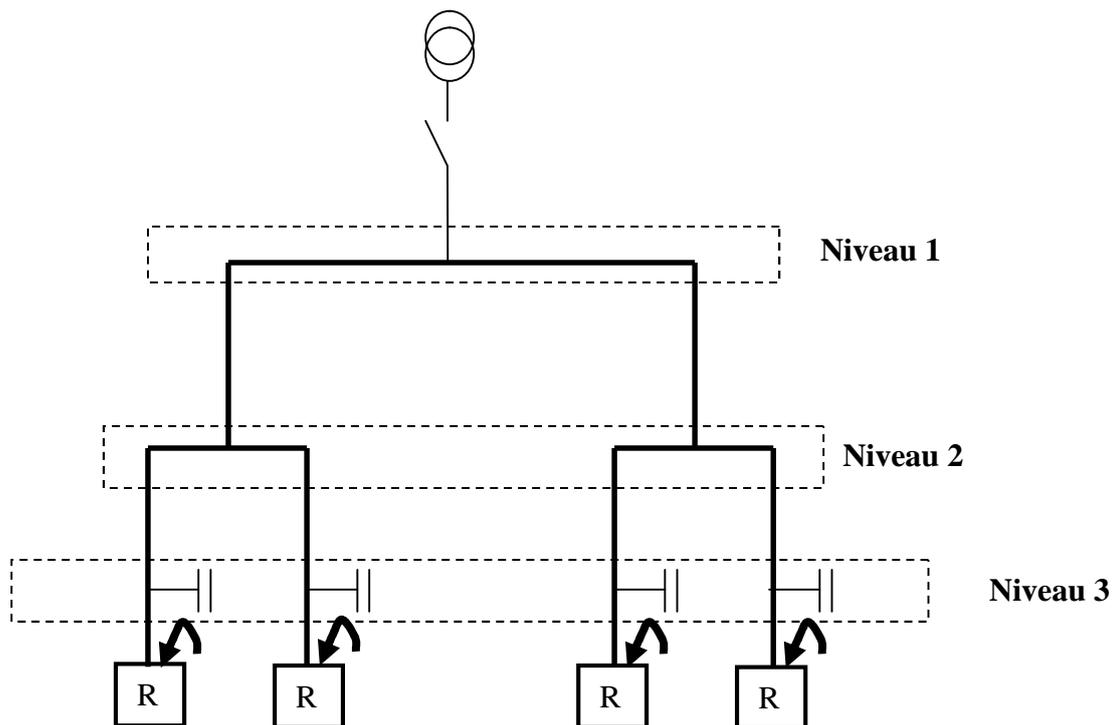
Utilisation :

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

II-6-3-Compensation individuelle :**Principe :**

La batterie est raccordée directement aux bornes du récepteur (Voir figure II.7).

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



➔ Circulation de l'énergie réactive.

Figure II.7 : Compensation individuelle [1]

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

Intérêt :

Ce type de compensation permet de :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : Tarif vert en France).
- Augmenter la puissance active disponible du transformateur et la puissance active qui peut être véhiculée dans les canalisations situées en amont du récepteur.
- Réduit les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations entre le niveau 3 et le niveau 1.

Remarque :

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

Utilisation :

Une compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance du transformateur.

C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantage mais qui est le plus coûteux.

II-6-4-Lieu d'installation des condensateurs :

Réseau HT de distribution

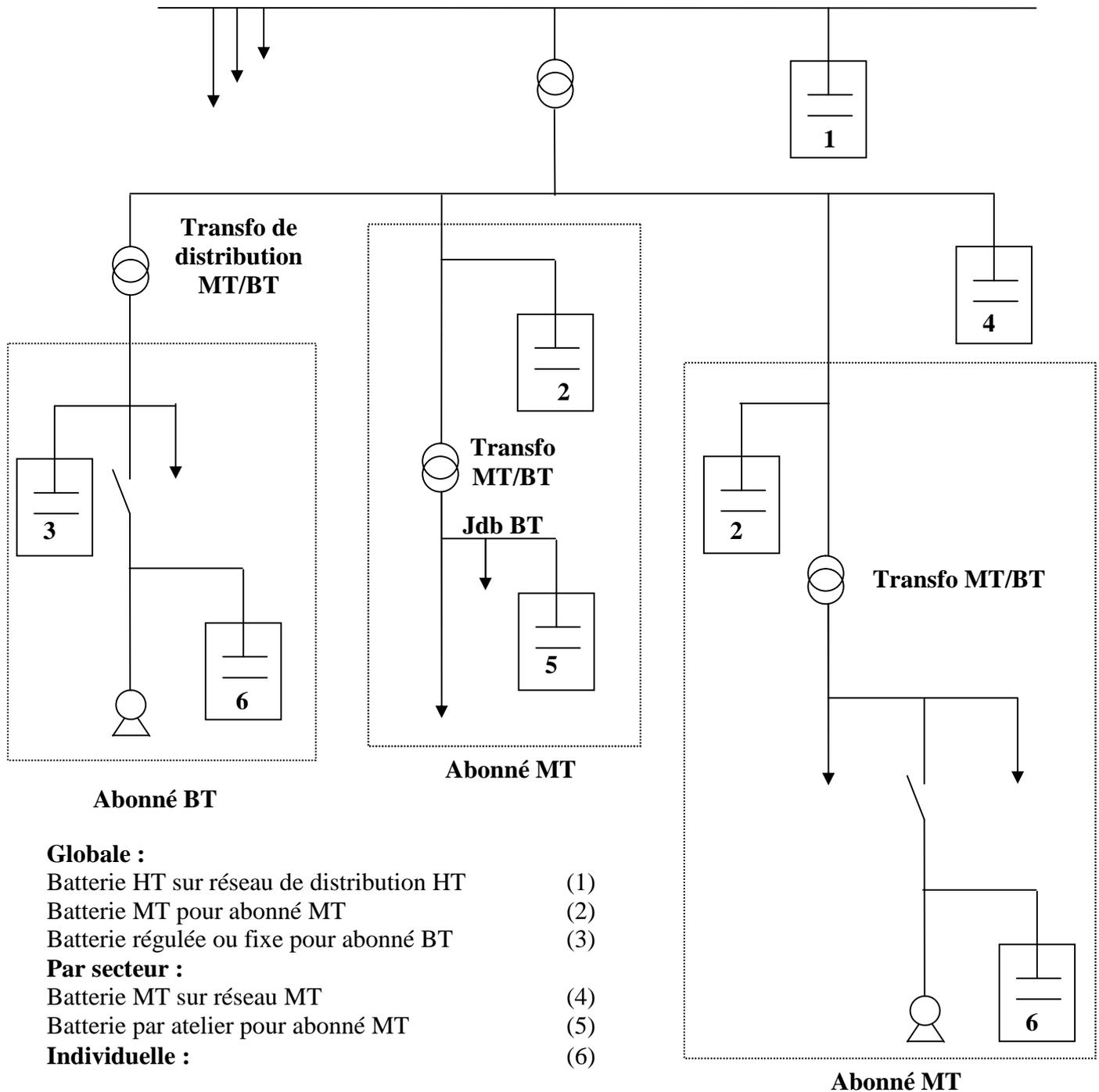


Figure II.8 : Installation des batteries de condensateur [9].

II.7. Compensation par condensateurs sur le réseau public :

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

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

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

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

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

II-7-1- Installation série :

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

Considérons le calcul de la puissance de la batterie de condensateur à installer afin de compenser la chute de tension sur un réseau. La figure II.9, montre un modèle de réseau dans lequel un condensateur série est installé.

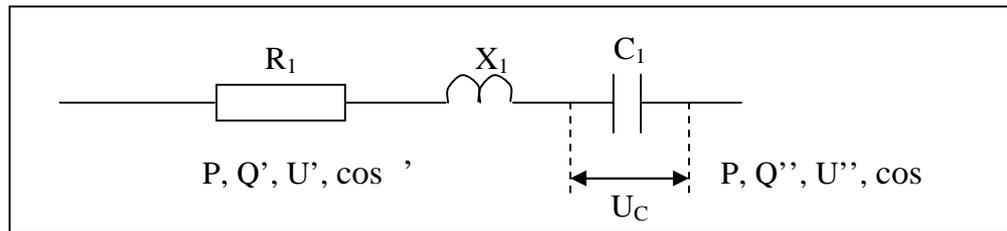


Figure II.9 : Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série [6]

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

Nous avons alors :

$$P = \sqrt{3}.U'.\cos \varphi'.I \text{ de l'amont.} \quad (\text{II-2})$$

$$P = \sqrt{3}.U''.\cos \varphi.I \text{ de l'aval.} \quad (\text{II-3})$$

$$\frac{P}{P} = \frac{U'.\cos \varphi'}{U''.\cos \varphi} \Rightarrow \cos \varphi' = \frac{U''}{U'}.\cos \varphi$$

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

Donc on va avoir :

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

La puissance compensée est de :

$$Q_C = Q' - Q'' = P (\operatorname{tg} \varphi' - \operatorname{tg} \varphi) \quad (\text{II-4})$$

$$Q_C = P \left(\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} - \frac{\sqrt{U'^2 - U''^2 \cos^2 \varphi}}{U''.\cos \varphi} \right) \quad (\text{Puissance compensée}).$$

II-7-2- Installation shunt :

Considérons maintenant le schéma de la Figure II.10, qui représente un jeu de barres de puissance ($P+jQ$) alimentant une charge à travers une ligne, les deux sont représentées par une seule impédance ($R+jLw$). La charge est composée d'un récepteur à un mauvais facteur de puissance, d'où l'installation d'une batterie de condensateur shunt de puissance (jQ_C).

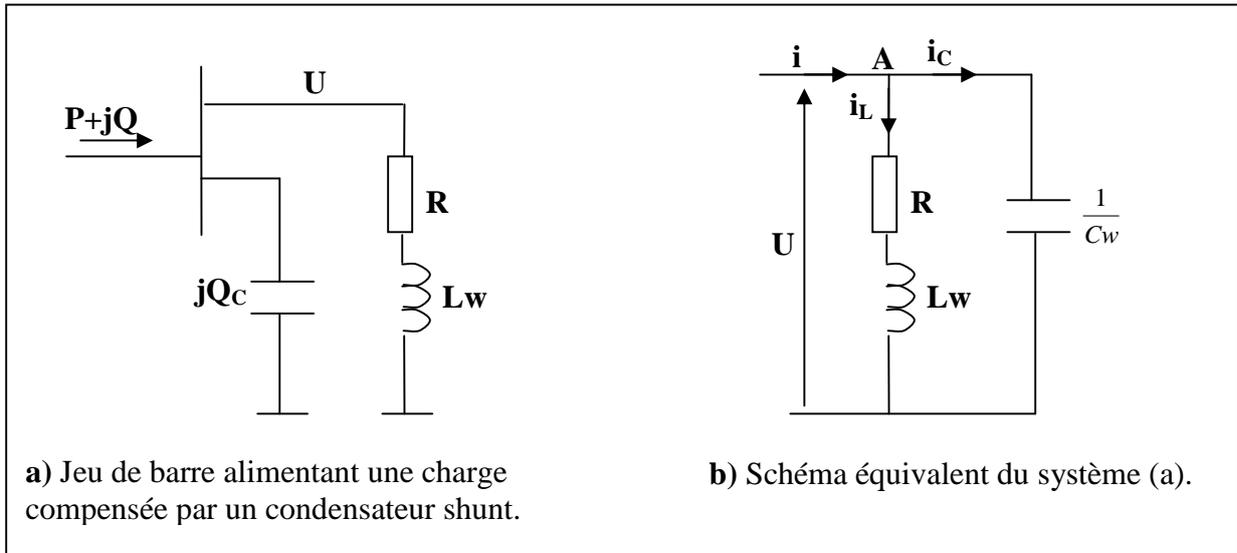


Figure II.10 : Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre.

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

Avant compensation :

Nous avons au nœud A de la figure II.10 :

$$i = i_L + i_C \tag{II-5}$$

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

$$i_C = 0$$

et :

$$i = i_L = I_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \cos \omega t + j \cdot I_m \sin \omega t \tag{II-6}$$

D'où :

$$\varphi_1 = \text{artg} \left(\frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} \right) \dots \dots \dots (II - 7)$$

Le facteur de puissance d'avant compensation vaut alors :

$$\cos \varphi_1 = \cos \left[\text{artg} \left(\frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} \right) \right] \dots \dots \dots (II - 8)$$

Après compensation :

$$i = i_L + i_C$$

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

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

$$I_m \cdot \cos \varphi_2 + j \cdot I_m \cdot \sin \varphi_2 = I_{mL} \cdot \cos \varphi_1 + j \cdot I_{mL} \cdot \sin \varphi_1 + j \cdot I_{mC}$$

$$I_m \cdot \cos \varphi_2 + j \cdot I_m \cdot \sin \varphi_2 = I_{mL} \cdot \cos \varphi_1 + j (I_{mC} + I_{mL} \cdot \sin \varphi_1)$$

$$\varphi_2 = -\text{artg} \left(\frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} \right) = \text{artg} \left(\frac{I_{mC} + I_{mL} \sin \varphi_1}{I_{mL} \cos \varphi_1} \right) \dots \dots \dots (II - 9)$$

$$\varphi_2 = \text{artg} \left(\frac{I_{mC} + I_{mL} \sin \varphi_1}{I_{mL} \cos \varphi_1} \right)$$

$$\varphi_2 = \text{artg} \left(\frac{\sin \varphi_1 + \frac{I_{mC}}{I_{mL}}}{\cos \varphi_1} \right)$$

Le facteur de puissance après compensation vaut alors

$$\cos \varphi_2 = \cos \left\{ \text{artg} \left(\frac{\sin \varphi_1 + \frac{I_{mC}}{I_{mL}}}{\cos \varphi_1} \right) \right\} \dots \dots \dots (II - 10)$$

On voit bien que :

$$2(\text{après comp}) < 1(\text{avant comp}) \Rightarrow \cos 2(\text{après comp}) > \cos 1(\text{avant comp})$$

Donc, le facteur de puissance est amélioré par l'installation du condensateur shunt.

Pour déterminer la puissance du condensateur, référons-nous à la figure II.11 représentant les diagrammes vectoriels des différents courants.

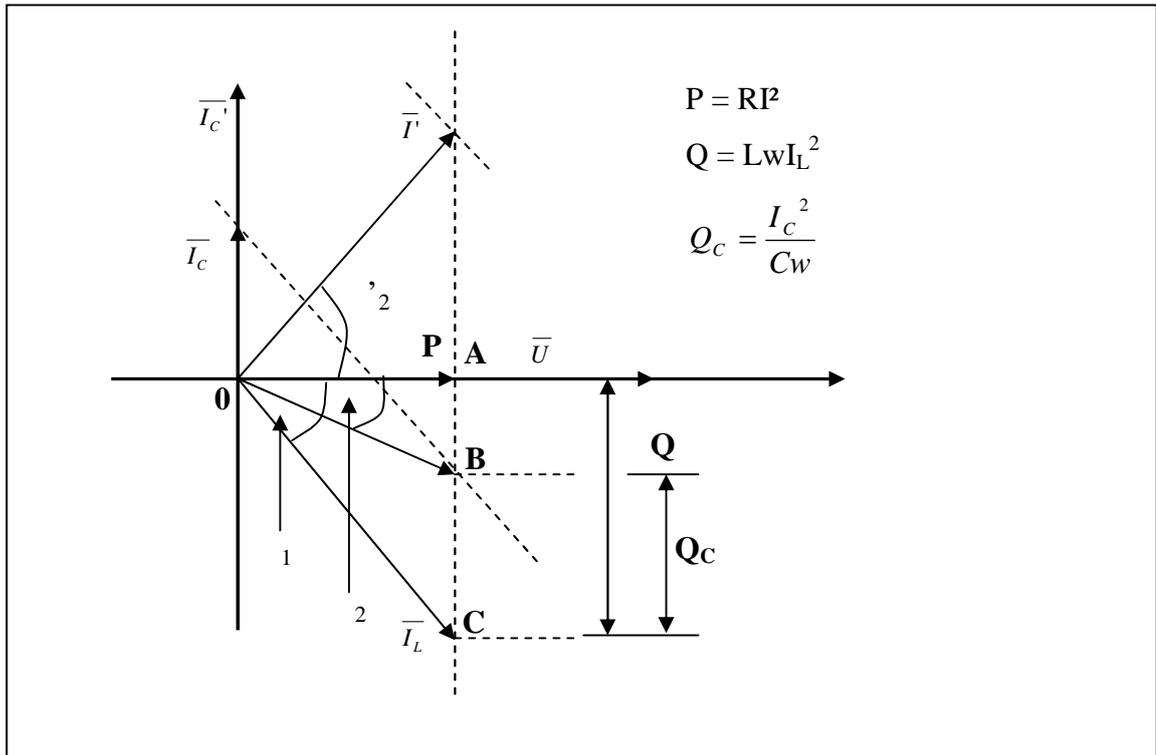


Figure II.11 : Diagramme vectoriel du schéma de la figure II.10.b [6]

Nous avons :

$$tg \varphi_1 = \frac{Q}{P} \dots \dots \dots (II - 11)$$

Du triangle (OAC) :

$$tg \varphi_1 = \frac{AC}{OA} \dots \dots \dots (II - 12)$$

Du triangle (OAB), on déduit :

$$tg \varphi_2 = \frac{AC - BC}{OA} = \frac{Q - Q_c}{P} = \frac{Q}{P} - \frac{Q_c}{P} \dots \dots \dots (II - 13)$$

Donc :
$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{Q_C}{P} \dots \dots \dots (II-14)$$

Finalement, la puissance du condensateur est :

$$Q_C = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \dots \dots \dots (II-15)$$

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

II-7-3- Raccordement des condensateurs au réseau :

La Figure II.12, représente le schéma de branchement d'un condensateur série à travers des disjoncteurs. P étant un parafoudre pour assurer la protection et le transformateur TT permet la mise à la terre des charges partielles après le débranchement du condensateur.

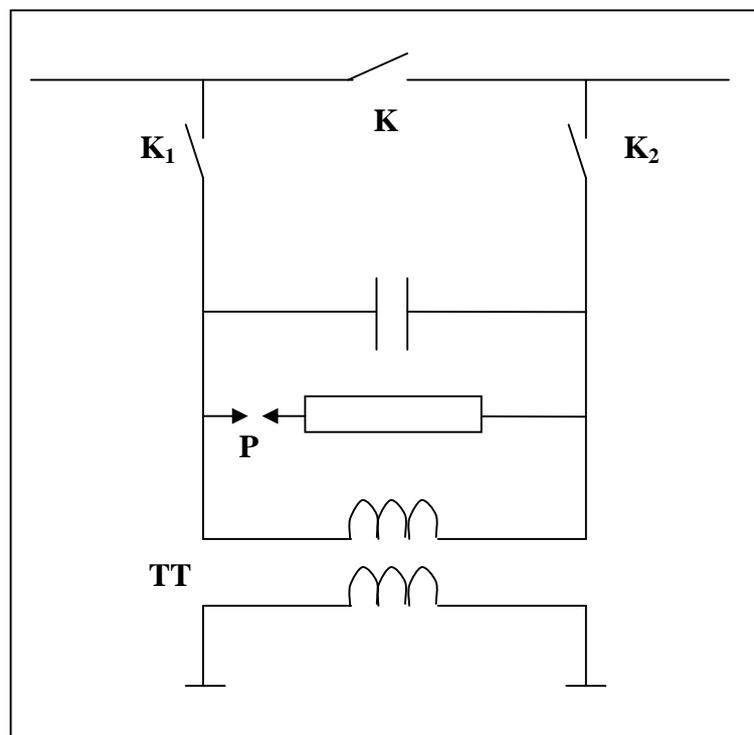


Figure II.12 : Schéma de branchement d'un condensateur série [6].

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

Tableau II-1 : Différents couplages de condensateurs shunt (3~)

Couplage	Etoile (Y)	Triangle ()	Comparaison
Impédance 3~ (XC) des condensateurs)	$X_{CY} = \frac{V}{I}$	$X_{C\Delta} = \frac{3V}{I}$	$X_{C\Delta} = 3X_{CY}$
Puissance (Q) des condensateurs	$Q_Y = 3VI \sin$	$Q = \sqrt{3} \cdot UI \cdot \sin$	$Q_Y = 3 Q$

La figure II.13, représente un gradin de condensateurs couplés en triangle sur une ligne triphasée.

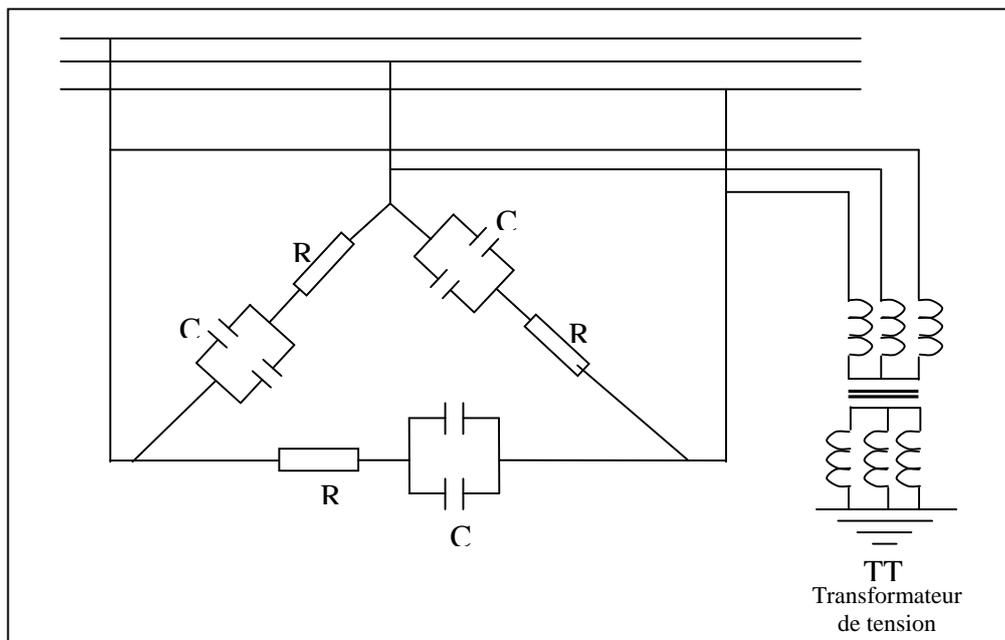


Figure II.13 : Schéma de couplage de condensateur shunt [6]

En cas de claquage d'un condensateur sur la figure II.13, la résistance R connectée en série, permet d'éviter le court-circuit des autres condensateurs. Le transformateur de tension, TT, permet l'élimination des charges résiduelles après la mise hors service des condensateurs.

Les batteries de condensateurs peuvent être raccordées en étoile, mais dans ce cas, le problème de surtension survient en cas d'avarie d'une phase.

II-7-4-Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs :

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

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

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

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

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

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

II-8-1- Cas du montage des condensateurs aux bornes du moteur :

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

$$Q_C \leq 0,9\sqrt{3}U_n I_0 \quad [1] \quad (\text{II-16})$$

I_0 : Courant à vide du moteur.

I_0 peut être estimé par l'expression suivante :

$$I_0 = 2I_n(1 - \cos \varphi_n) \quad [1] \quad (\text{II-17})$$

I_n : Valeur du courant nominal du moteur.

$\cos \varphi_n$: $\cos \varphi$ du moteur à la puissance nominale.

U_n : Tension composée nominale.

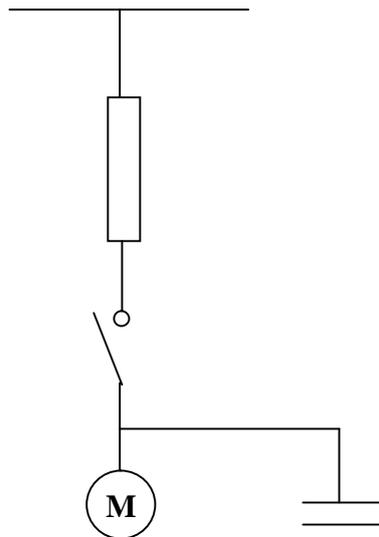


Figure II.14 : Montage des condensateurs aux bornes du moteur [1]

Les tableaux II-2 et II-3 donnent les valeurs maximales de compensation aux bornes des moteurs BT et MT usuels qui évitent les surtensions dangereuses par auto-excitation.

La valeur de la compensation maximale correspond à la compensation du moteur à vide, ce qui ne représente que 50% des besoins de puissance réactive en charge.

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

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

Tableau II-2 : Compensation réactive maximale (kVAR) aux bornes des moteurs asynchrones BT [1]

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

Le réglage de la protection du moteur contre les surcharges (relais thermique,etc.) doit tenir compte de l'abaissement de la valeur du courant dû à la compensation.

Ce montage a l'avantage de ne nécessiter qu'un seul appareil de manœuvre.

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

Tableau II-3 : Compensation réactive maximale (kVAR) aux bornes des moteurs asynchrones MT [1]

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

II-8-2-Cas du montage des condensateurs en parallèle avec commande séparée : (Voir figure II.15) :

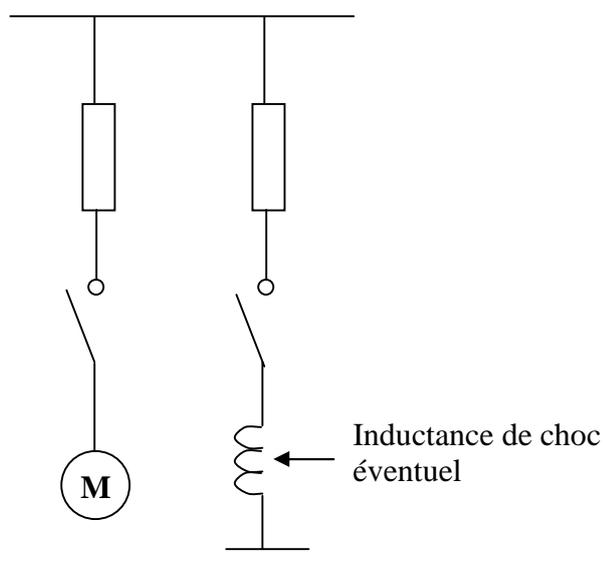


Figure II.15 : Montage des condensateurs avec commande séparée [1]

Pour éviter tout risque de surtension dangereuse par auto-excitation ou bien dans le cas où le moteur démarre à l'aide d'un appareillage spécial (résistances, inductances, autotransformateur, etc.), les condensateurs ne seront enclenchés qu'après le démarrage.

De même, les condensateurs doivent être déconnectés avant la mise hors tension du moteur.

On peut, dans ce cas, compenser totalement la puissance réactive du moteur à pleine charge.

Attention :

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

II.9-Compensation par condensateur dans une source (aux bornes d'un transformateur) :

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

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

Exemple : Un transformateur de puissance $S = 630$ kVA alimente une charge de puissance active $P_1 = 450$ kW avec un \cos moyen égale à 0,8.

On détermine :

$$\text{La puissance apparente : } S_1 = \frac{450}{0,8} = 563 \text{ kVA}$$

$$\text{La puissance réactive : } Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = 338 \text{ kVAR} \quad (\text{II-18})$$

L'extension envisagée nécessite une puissance active supplémentaire

$P_2 = 100$ kW avec $\cos = 0,7$, on déduit les caractéristiques de cette puissance supplémentaire :

$$\text{La puissance apparente : } S_2 = \frac{100}{0,7} = 143 \text{ kVA}$$

$$\text{La puissance réactive : } Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = 102 \text{ kVAR} \quad (\text{II-19})$$

Sans compensation, la puissance apparente aux bornes des transformateurs serait :

$$S' = \sqrt{(P_1^2 + P_2^2)^2 + (Q_1^2 + Q_2^2)^2} = 704 \text{ kVA} \quad (\text{II-20})$$

Elle est supérieure à la puissance nominale du transformateur.

Déterminons la puissance nominale des condensateurs permettant d'éviter le remplacement du transformateur.

La puissance active total à fournir est :

$$P = P_1 + P_2 = 550 \text{ kW} \quad (\text{II-21})$$

Pour $P = 550\text{kW}$, la puissance réactive maximale que peut fournir le transformateur de 630KVAR est :

$$Q_m = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{630^2 - 550^2} = 307\text{kVAR} \quad (\text{II-22})$$

La puissance réactive total à fournir à la charge avant compensation est :

$$Q_1 + Q_2 = 338 + 102 = 440\text{kVAR} \quad (\text{II-23})$$

La puissance minimale de la batterie à installer est donc :

$$Q_C = 440 - 307 = 133\text{kVAR}$$

On obtient alors :

$$\text{Cos} = \frac{P}{S} = \frac{550}{630} = 0,873$$

On pourrait effectuer une compensation totale ($\text{Cos} = 1$) ; ce qui permettrait d'avoir un réserve de puissance de : $630 - 550 = 80\text{kW}$; la batterie de condensateur à installer serait alors de 439 kVAR . On constate que la compensation totale demanderait une installation importante de condensateurs pour un faible gain sur la puissance active disponible.

Le diagramme des puissances de la figure II.16 illustre les calculs effectués.

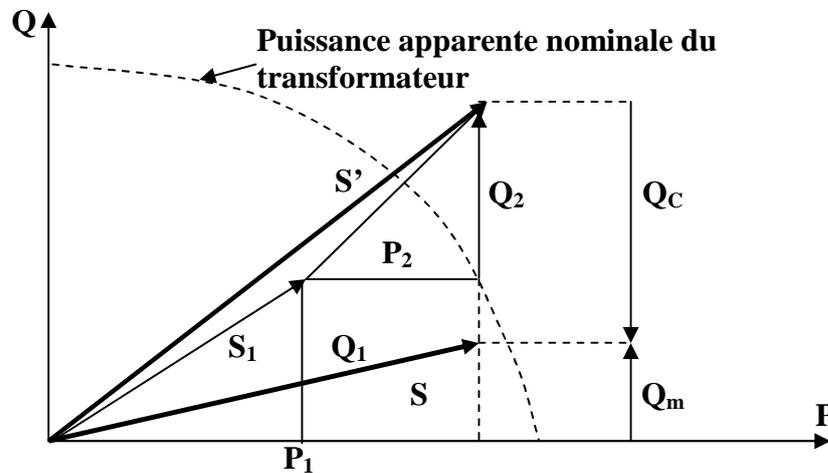


Figure II.16 : Diagramme des puissances de l'exemple [1]

II-10-Compensation de l'énergie réactive absorbée par un transformateur seul :

Un transformateur absorbe de l'énergie réactive en fonction de son courant magnétisant à vide et de la puissance qu'il fait transiter.

Par exemple, le tableau II-4 indique la consommation de puissance réactive des transformateurs 20kV/400V à isolement liquide. Elle n'est pas négligeable, elle est égale à 6 à 9% de la puissance du transformateur.

Cette consommation doit être ajoutée à celle de l'installation située en aval pour obtenir le $\cos \phi$ désiré côté 20kV.

En France, pour un client HTA à comptage BT, EDF tient compte de la consommation d'énergie réactive du transformateur en majorant systématiquement de 0,09 la valeur de $\tan \phi$ mesurée sur l'installation BT.

Il facture donc l'énergie réactive dès que la valeur de $\tan \phi$ dépasse 0,31 au lieu de 0,4 pour un comptage HT.

Tableau II-4 : Consommation de puissance réactive des transformateur 20KV/400V à l'isolement liquide.[1]

Puissance du transformateur (kVA)	Consommation de puissance réactive (kVAR)	
	A vide	A plein charge
100	2,5	6,1
160	3,7	9,6
250	5,3	14,7
315	6,3	18,4
400	7,6	22,9
500	9,5	28,7
630	11,3	35,7
800	20	54,5
1000	23,9	72,4
1250	27,4	94,5
1600	31,9	126,2
2000	37,8	176

Chapitre III

Compensateur synchrone

III-1- Définition :

On appelle compensateur synchrone, un moteur synchrone qui tourne à vide et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport ou sur un réseau. Pour régulariser la tension d'un réseau, on doit lui fournir une puissance réactive pendant les heures de pointes. Intervenant, pendant les périodes creuses, on doit absorber l'excès de la puissance réactive généré par les lignes.

Le compensateur synchrone permet de compenser ces fluctuations de puissance réactive, en ajustant l'excitation selon les besoins. Le compensateur agit alors comme une énorme capacitance ou inductance variable dont la valeur est réglable en faisant varier le courant d'excitation de son rotor.

La plupart de ces machines ont une capacité de l'ordre de 200 MVar on les refroidit à l'hydrogène [9] .

Le démarrage se fait de même façon que pour les moteurs synchrones conventionnels. Cependant, si le réseau est incapable de supporter l'appel de puissance pendant le démarrage, on utilise les moteurs asynchrones pour les accélérer jusqu'à la vitesse synchrone, par exemple, les compensateurs synchrones de 160 Mvar installés au porte de dorsey à Winnipeg au Canada sont accélérés pour les moteurs à rotor, bobiné ayant une puissance de 1270 kW.

Les machines synchrones peuvent fonctionner soit en moteur ou en générateur. Lorsqu'elles sont surexcitées, elles fournissent de l'énergie réactive, et sont des générateurs (alternateurs). Tandis qu'elles consomment cette énergie réactive, en régime sous excité, dans ce cas elles sont appelées moteurs.

Quelque soit le mode de fonctionnement, le rotor doit tourner à une vitesse constante en corrélation avec la fréquence du réseau, ce qui explique l'appellation synchrone de ce type de machines.

$$N = \frac{60f}{P}$$

N : vitesse de rotation (tours/ minute)

f : fréquence du réseau (Hertz),

P: nombre de paires de pôles.

III-2- Théorie sur le fonctionnement du compensateur synchrone:

Le modèle de la machine synchrone peut être réduit en une source de tension \bar{E} en série avec une inductance X ($R \ll X_d$) d'après la théorie simplificatrice de potier (figure III-1)

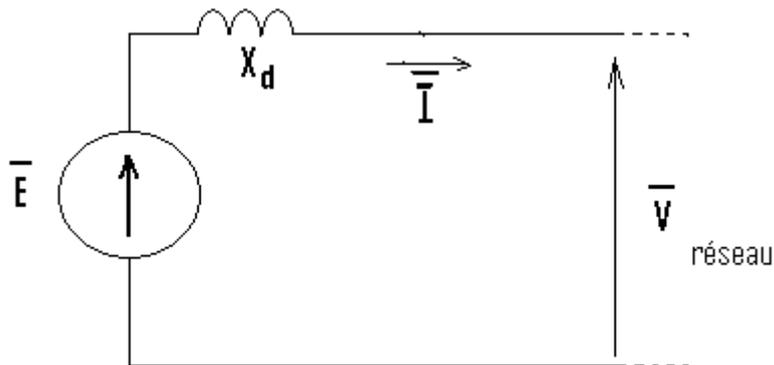


Figure III-1- Schéma équivalent de la machine synchrone [6]

De la figure III-1, on tire l'équation des tensions suivante :

$$\text{Avec :} \quad \bar{E} = \bar{V} + jX_d \bar{I} \quad (\text{III-1})$$

E , fem due à l'excitation du compensateur synchrone ;

V , tension du réseau ;

X_d , réactance de fuite du compensateur synchrone ;

I , courant échangé avec le réseau

La puissance active consommée par le compensateur

$$P = 3VI \cos \varphi \quad (\text{III-2})$$

La puissance réactive est :

$$Q = 3VI \sin \varphi \quad (\text{III-3})$$

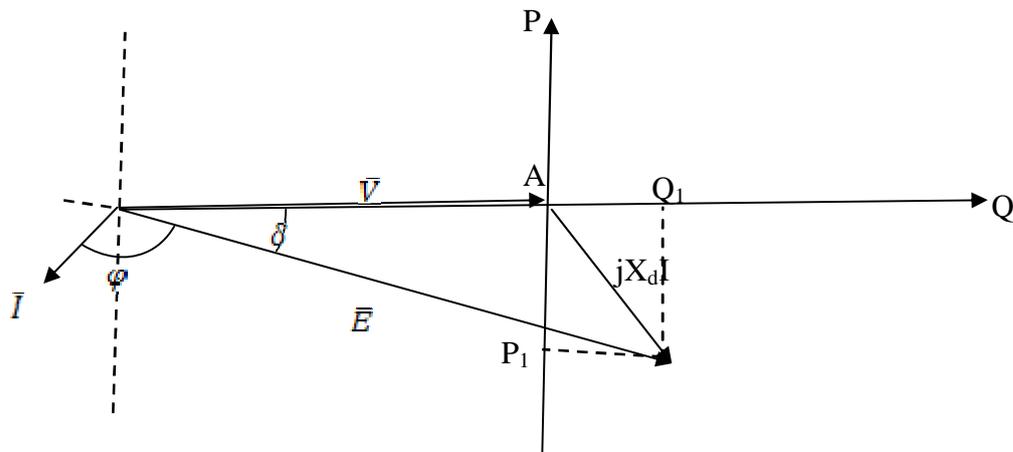


Figure III-2- Représentation vectorielle des tensions du compensateur synchrone [6]

Par projection sur l'axe (P) on obtient :

$$AP_1 = X_d I \cos \varphi = E \sin \delta \quad (\text{III-4})$$

$$\Rightarrow I \cos \varphi = \frac{P}{3.V} = \frac{AP_1}{X_d} \quad (\text{III-5})$$

$$\Rightarrow P = \frac{3.V}{X_d} . AP_1 \quad (\text{III-6})$$

En remplaçant AP_1 par $E \sin \delta$, on trouve :

$$P = \frac{3.V}{X_d} . E \sin \delta \quad (\text{III-7})$$

Avec une projection sur l'axe (Q) on

$$AQ_1 = X_d I \sin \varphi = E \cos \delta - V \quad (\text{III-8})$$

$$\Rightarrow I \sin \varphi = \frac{Q}{3.V} \quad (\text{III-9})$$

$$\Rightarrow \frac{3.V}{X_d} . AQ_1 \quad (\text{III-10})$$

En remplaçant AQ_1 par $E \cos \delta - V$ à partir de (III-8)

Obtient :

$$Q = \frac{3EV}{X_d} \cos \delta - \frac{3V^2}{X_d} \quad (\text{III-11})$$

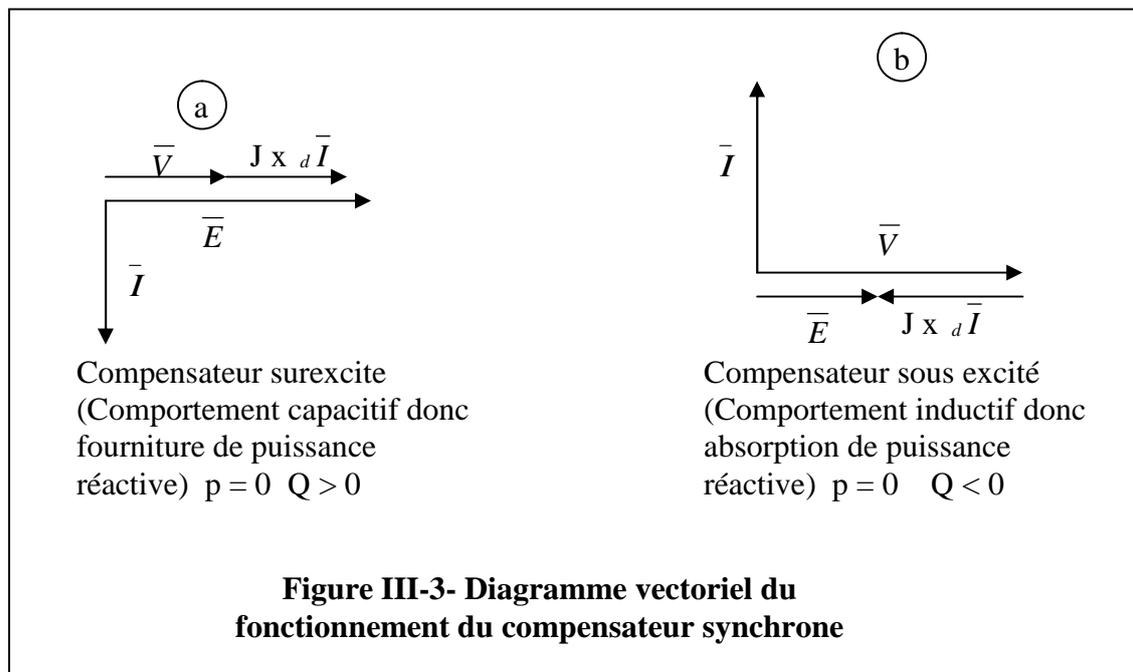
Comme le compensateur synchrone fonctionne à vide, donc la puissance réactive est alors :

$$P = 0 \Rightarrow Q = \frac{3.V(E - V)}{X_d} \quad (\text{III-12})$$

Le sens de transit de la puissance réactive, du compensateur vers le réseau ou du réseau vers le compensateur dépend du signe de $(E - V)$

Ainsi :

- Si $E - V > 0$ $E > V$, le compensateur est dit capacitif. Il fonctionne en régime surexcité, donc il fournit de l'énergie réactive.
- Si $E - V < 0$ $E < V$, le compensateur est dit inductif, Il fonctionne en régime sous-excité, donc il absorbe de l'énergie réactive.



- Si $(E - V) > 0$ cela correspond au cas figure III-3a
- Si $(E - V) < 0$ cela correspond au cas figure III-3-b

III-3- compensateur synchrone dans le réseau électrique :

On utilise souvent des moteurs synchrones tournant à vide dans les réseaux électriques, et dont le rôle est d'injecter de la puissance réactive en régime surexcité dans le réseau, ou alors de puiser du réseau de la puissance réactive en régime sous excité afin de relever le facteur de puissance.

Le compensateur synchrone est branché sur le réseau à travers un transformateur survolteur, (figure III-4).

Le compensateur est branché à proximité de la charge pour réduire au mieux le transit de puissance réactive.

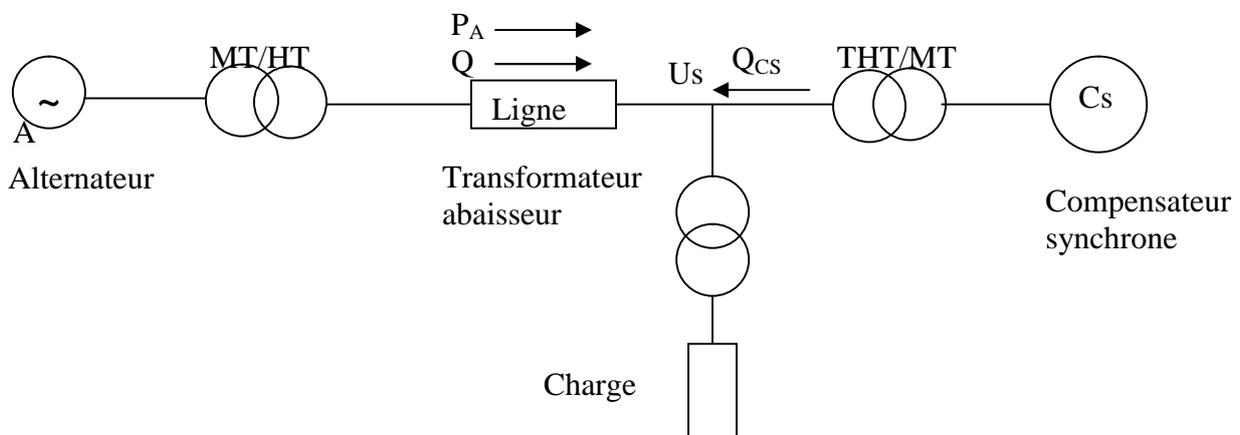


Figure (III-4) : Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau [6]

III.4.compensateur synchrone dans la charge

On va placer un compensateur synchrone dans une charge constituée d'un moteur asynchrone à $\cos\varphi$ très mauvais entraînant un générateur shunt débitant sur une charge résistive variable comme le montre la figure ci-dessous.

En augmentant le courant d'excitation J du moteur synchrone, le $\cos\varphi$ s'améliore.

II- 5- Avantages et inconvénients des compensateurs synchrones :

Les compensateurs synchrones présentent les avantages suivants :

- ils permettent une régulation locale de la tension près du besoin, donnent une certaine inertie et permettent d'augmenter le transit de puissance.
- ils procurent une plage de variation de puissance réactive, ce qui réduit le nombre de manœuvre d'élément shunt (condensateur, ou inductance)
- on peut les alimenter directement à des tensions élevées.
- l'emplacement de ces équipements permet des gains tant au niveau de la stabilité transitoire qu'au niveau de la stabilité de tension tout en offrant une flexibilité d'exploitation.
- ce type de compensateur est beaucoup performant sur les longues distances (cas de transport d'énergie HT ou THT)
- ces compensateurs ont pour apanage de réguler la fourniture par l'alternateur de puissance réactive ou d'estimer la tension en certains points du réseau.

Les compensateurs synchrones présentent les inconvénients suivants:

- le coût onéreux de ces compensateurs ainsi que leur entretien
- il a besoin d'un générateur à courant continu pour assurer son excitation ; cet organe supplémentaire augmente le prix du moteur.
- on 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 de démarrage.
- le compensateur synchrone contribue également à l'alimentation de la puissance de court-circuit au point de branchement.
- le temps de réponse aux événements sévère, (par exemple : pertes d'un groupe- court circuit triphasés) est relativement lent.

Inconvénients du compensateur synchrone aux bornes d'une charge :

- un compensateur synchrone doit délivrer une importante puissance réactive, ce qui nécessite un grand courant d'excitation donc une grande section des enroulements inducteurs (pour limiter l'échauffement) et un nombre de spires très important (une grande fmm) .
- la puissance réactive fournie par un compensateur est d'autant plus élevée que le courant I absorbé est grand, ce qui nécessite un induit volumineux, Pour tout cela s'ajoute le système de refroidissement de ces compensateurs ; pour cela les compensateurs synchrones sont très gros et coûteux. [8].

Remarque :

L'importance relative des moteurs synchrones tend à décroître à présent .On leur préfère des batteries de condensateur.

Les compensateurs synchrones commencent à disparaître sur les réseaux pour des raisons d'exploitation.

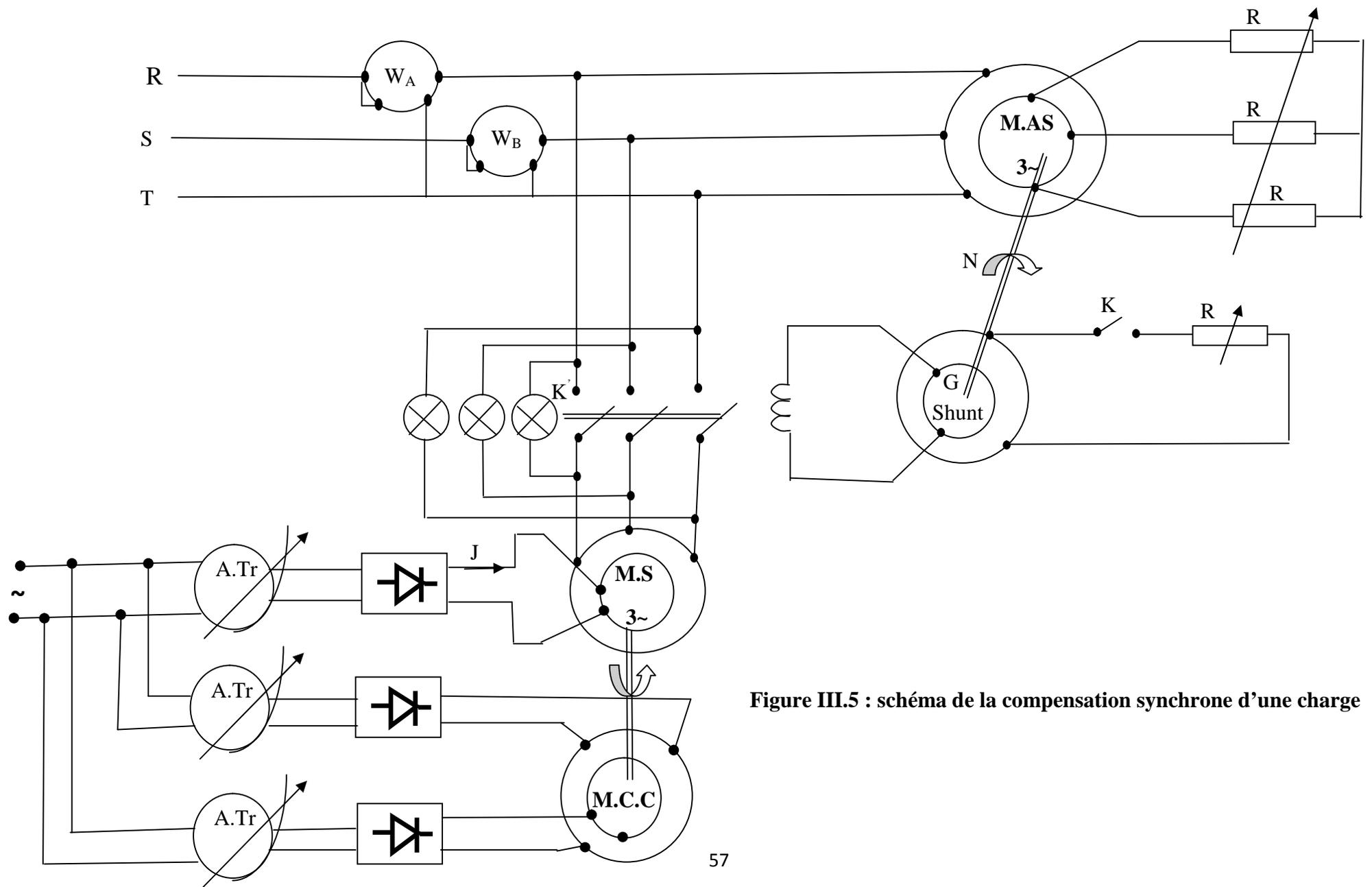


Figure III.5 : schéma de la compensation synchrone d'une charge

Chapitre IV

La compensation statique

IV-1- Introduction :

Les systèmes FACTS (flexible AC Transmission System) ; systèmes flexibles de transmission à courant alternatif sont des systèmes lancés par EPRI (Electric Power Research Institute), qui est un consortium dédié à la recherche dans le domaine de l'exploitation de l'énergie électrique et regroupe un certain nombre de compagnies américaines.

En 1998, EPRI a lancé un projet qui vise surtout à trouver des moyens capables d'améliorer les capacités des réseaux de transport en augmentant leur flexibilité.

Les dispositifs FACTS ont pour objectifs de contrôler la tension et le transit de la puissance dans les réseaux afin d'augmenter leur capacité de charge jusqu'à leurs limites thermique maximales.

Parmi les dispositifs FACTS on peut citer les principaux dans ce chapitre.

IV-2- le TCSC, compensateur série contrôle par thyristor

Comme le montre la figure IV-1-, il s'agit d'une réactance série commandée par thyristors en parallèle avec un condensateur.

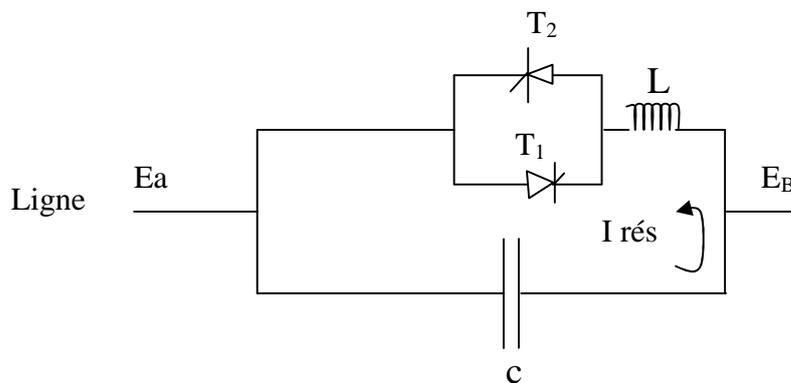


Figure IV-1- : Schéma de base d'un TCSC

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteur électronique (pleine conduction), l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance. Suivant l'angle d'amorçage des thyristors, la valeur de l'impédance sera variable.

Le condensateur fournit une puissance réactive constante et l'inductance absorbe une puissance réactive variable, nous pouvons alors avoir une impédance équivalente totale d'expression :

$$X(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) - L\omega^2 C} \quad \text{(IV-1) [12]}$$

Or, il existe une zone où cette impédance est indéfinie (zone de résonance). Cette zone correspond à la valeur de l'angle α pour laquelle le dénominateur de l'expression (IV-1) est nul.

α : Angle d'amorçage des thyristors.

Les courbes théoriques obtenues avec l'équation (IV-1) si α est choisi dans la plage de 90° à 180° sont les suivantes :

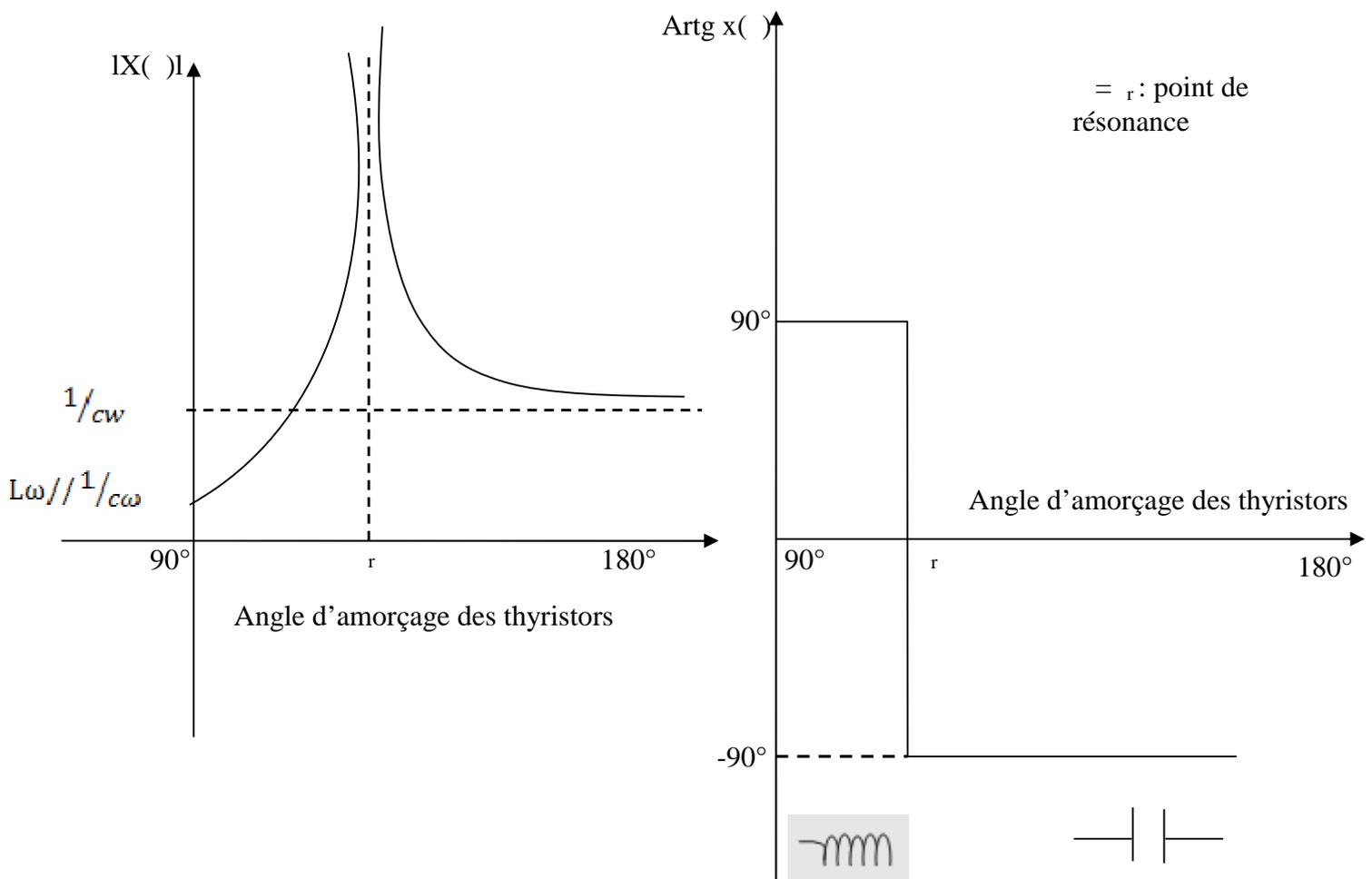


Figure IV-2- : Module et phase (α)

La courbe $\text{Artg}(x(\alpha)) = f(\alpha)$ montre :

Un domaine inductif si : $\alpha < \alpha_r$.

Un domaine capacitif si : $\alpha > \alpha_r$.

Donc le TCSC peut théoriquement se comporter comme une inductance autant qu'un condensateur.

Avantages et inconvénients de ce compensateur :

Le TCSC présente les avantages suivants :

- le TCSC permet d'avoir une impédance équivalente de la ligne variable avec une grande vitesse de commande, donc un meilleur contrôle du transit de la puissance et une augmentation de la puissance maximale transmissible.
- le TCSC permet de faire varier la puissance active totale transportée en agissant sur la valeur de $x(\alpha)$.

$$P = \frac{E_A E_B}{X(\alpha)} \sin(\delta) \quad \text{[IV-2] [9]}$$

P : Puissance active totale transportée [MW].

E_A : Tension ligne à ligne à l'extrémité A de la ligne [KV]

E_B : Tension ligne à ligne à l'extrémité B de la ligne [KV]

δ : Angle entre les tensions au deux extrémités de la ligne [°]

- le changement d'une puissance à l'autre se fait presque instantanément, ce changement ultra-rapide de la puissance constitue un avantage lorsqu'on doit maintenir la stabilité à l'une ou l'autre des deux régions.
- amélioration du plan de charge et une stabilisation du réseau.

Le TCSC présente les inconvénients suivants :

- le principal inconvénient de ce modèle est la discontinuité de l'impédance de TCSC au point de résonance (pour $\alpha = \alpha_r$). Cette discontinuité est moyennement gênante, nous n'avons pas intérêt à faire travailler le TCSC trop près de la résonance, car cela entraîne une déformation des courants et des tensions trop importantes.
- l'implantation d'un TCSC sur une ligne de fort transit est un facteur déstabilisant.
- la commande de TCSC est relativement complexe et demande un personnel très qualifié.

IV-3- SPS, déphaseur statique

La fonction de ce dispositif est de donner un moyen de contrôle de puissance transmise, ce qui est obtenu en variant l'angle de transmission par l'intermédiaire de thyristors installés sur des transformateurs variables.

Le principe de fonctionnement du déphaseur commandé par thyristors est basé sur l'injection d'une tension en quadrature sur les trois phases de la ligne de transport d'énergie avec la tension simple de la phase correspondante.

Un tel déphaseur est montré sur la (figure IV-3), une seule phase étant représentée.

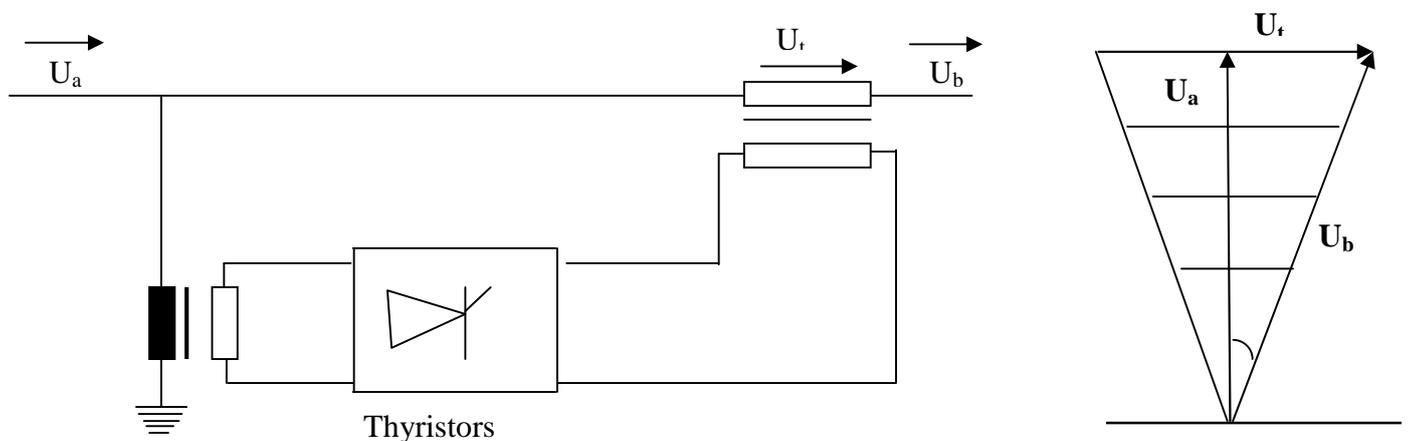


Figure : IV-3- Déphaseur commandé par thyristors

Au début de la ligne la tension vaut \vec{U}_a et à l'extrémité de la même ligne, la tension vaut \vec{U}_b . En injectant une tension \vec{U}_t , on crée un déphasage, entre \vec{U}_a et \vec{U}_b comme \vec{U}_t est variable par la commande des thyristors, nous pouvons avoir toute une plage de variation de l'angle δ (déphasage entre \vec{U}_a et \vec{U}_b).

Ces déphaseurs ont été créés afin de remplacer les déphaseurs mécaniques, dits transformateurs déphaseurs.

Jusqu'en 1997, ce type de compensateur n'était pas couramment utilisé, seule une étude est menée afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nord ouest du Minnesota et le nord de l'Ontario.

Ce déphaseur est utilisé à fin d'amortir les oscillations de puissance moyennant l'ajout d'une boucle d'amortissement dans sa régulation et pour aussi égaliser le courant entre les lignes de transmissions

Avantages et inconvénients de ce compensateur

Le SPS présente les avantages suivants :

- il ne génère pas d'harmonique car les thyristors sont commandés en interrupteurs électroniques (pleine conduction) ;
- en injectant la tension en quadrature on obtient une tension réglable, ainsi un contrôle rapide ;

Ce compensateur présente les inconvénients suivants :

- comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'y adjoindre un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation ;
- ce type de dispositif présente une différence fondamentale avec les autres dispositifs : il ne fait que transiter une certaine puissance active et réactive, mais il n'est pas capable d'engendrer ou d'en absorber.

IV-4- Contrôleur de transit de puissance entre ligne (IPFC)

Le IPFC (interline power flow contrôler) est un système de gestion de la transmission de puissance dans un réseau multi-lignes, c'est -à- dire il assure le contrôle des transits dans le cas d'un système de lignes multiples, dans lequel au moins deux lignes possèdent une compensation série par SSSC. Il fournit une possibilité par cette interaction de transférer de la puissance active entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissance active et réactive sur les lignes ou de décharger une ligne en surcharge vers une autre moins chargée.

En résumé, la demande de compensation en puissance active d'une ligne est entièrement fournie par l'autre.

La figure (IV-4) présente le schéma de principe d'un tel système avec une liaison commune entre les deux SSSC.

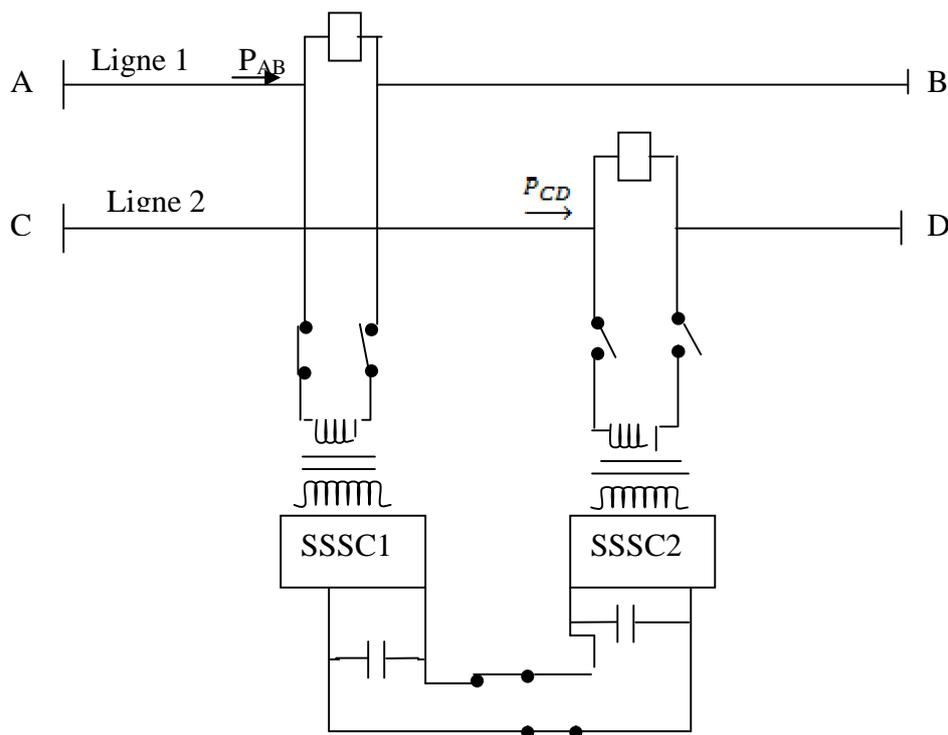


Figure (IV-4) Principe d'utilisation du contrôle de transit de puissance entre ligne [11]

IV-5- STATCOM, compensateur statique série, d'énergie réactive de type avance (STATIC compensateur).

Vers la fin des années 70, le besoin d'une compensation dynamique des réseaux de distribution électrique était devenu incontournable. L'arrivée des thyristors GTO a conduit au développement d'autres types de FACTS shunt. Cette nouvelle technologie a un système fondamental différent des conventionnels SVC. Il s'agit des STATCOMs (STATIC Compensateur).

Le STATCOM est similaire au compensateur synchrone tournant classique mais avec un temps de réponse plus court car il fonctionne sans inertie mécanique. Ce dispositif peut se présenter sous forme d'onduleur de tension ou de courant. Il offre la possibilité d'absorber ou de fournir de l'énergie réactive avec une grande rapidité.

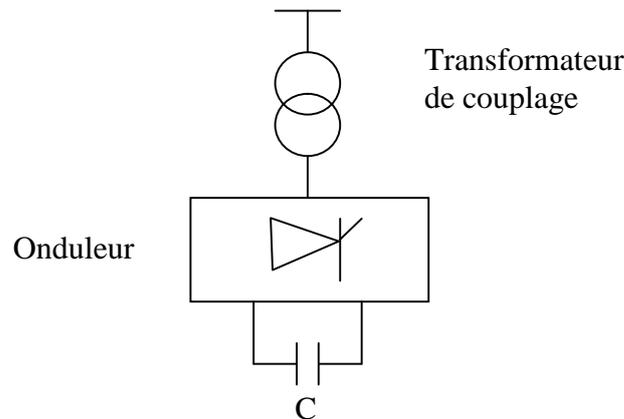


Figure IV-5- Schéma de principe d'un STATCOM

Le fonctionnement du STATCOM est simple, grâce à une source de tension continue (condensateur) un onduleur produit un jeu de tensions triphasées couplées en phase avec celle des tensions d'une ligne de transport d'énergie électrique via une inductance faible correspondant en général à l'inductance de fuites par phase du transformateur de couplage.

L'échange d'énergie entre la ligne et le STATCOM sera contrôlé par l'amplitude de la tension de sortie du compensateur qui sera générée par l'onduleur. Le STATCOM considéré ici peut donc être représenté par une source de tension alternative en aval d'une bobine de couplage. Sa caractéristique statique est représentée sur la figure.

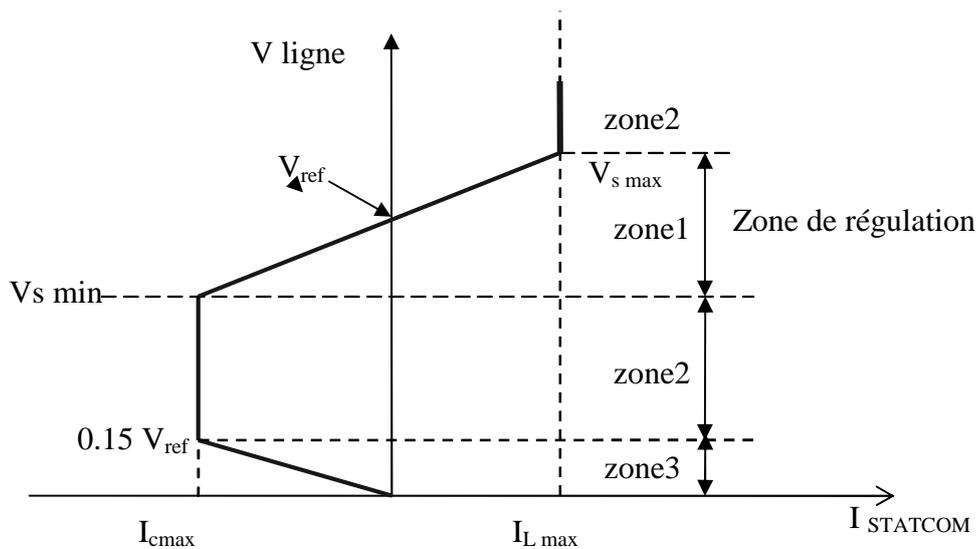


Figure IV-6 : Caractéristique V-I du STATCOM [12]

V_{smax} : tension limite de fonctionnement du STATCOM en régulation

V_{ref} : tension en sortie de l'onduleur

V_{smin} : tension limite de fonctionnement du STATCOM en régulation

$I_{\text{S STATCOM}}$: courant absorbé par le STACOM

I_{cmax} : courant en surcharge capacitive

$I_{\text{L max}}$: courant en surcharge inductive

La caractéristique du STATCOM peut être découpée en trois zones :

- Zone 1 : zone de régulation
- Zone 2 : zone de surcharge (inductive ou capacitive)
- Zone 3 : zone où le STATCOM ne peut pas répondre à la charge.

IV-5-1-Modélisation de la zone de régulation (zone 1) : [12]

Le STATCOM peut être simplement modélisé dans cette zone par un nœud PV connecté à la charge soutenue par une réactance X_{SL} .

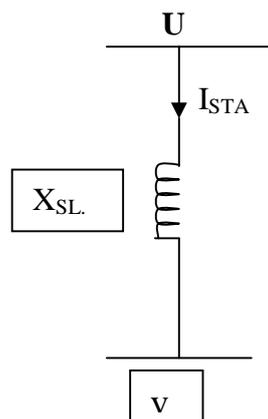


Figure (IV-7)-Modélisation de la zone de régulation

Nœud V : P=0

$$V=V_{ref}$$

X_{SL} : pente de la caractéristique

$$X_{SL} = \frac{V_{s\max} - V_{s\min}}{I_{L\max} - I_{C\max}} \dots\dots\dots (IV- 3)$$

$$I_{L\max} = \frac{Q_{\max}}{V_{\max}} \quad , \quad I_{C\max} = \frac{Q_{\min}}{V_{S\min}} \dots\dots\dots (IV- 4)$$

$$\Rightarrow X_{SL} = \frac{V_{s\max} - V_{s\min}}{\frac{Q_{\max}}{V_{S\max}} - \frac{Q_{\min}}{V_{S\min}}} \dots\dots\dots (IV - 5)$$

Q_{\max} : puissance réactive maximale fournie par le STATCOM

Q_{\min} : puissance réactive maximale absorbée par le STATCOM

$$I_{STATCOM} = \frac{V_{LIGNE} - V_{ref}}{X_{SL}} \dots\dots\dots (IV-6)$$

IV-5-2-Avantages et inconvénients du système STATCOM :

Le STATCOM présente les avantages suivants :

- l'avantage primordial du système STATCOM est sa réponse rapide et son niveau de sortie consistant qui présentent le plus grand intérêt pour limiter les conséquences des perturbations du réseau électrique ;
- la réduction de l'espace nécessaire pour l'installation à cause de l'absence de réactance et des batteries de condensateurs ;
- l'utilisation d'onduleurs à plusieurs niveaux permet de ne pas utiliser de filtres d'harmonique sur la partie alternative ;
- des performances dynamiques améliorées ;
- le STATCOM peut continuer, pendant un court temps, de produire une certaine énergie électrique comme un compensateur synchrone qui stocke l'énergie dans sa masse de rotation.

Le STATCOM présente les inconvénients suivant :

- la nécessité d'utiliser des dispositifs de type GTO .Actuellement ces dispositifs sont plus chers et ils ont, comparativement aux thyristors classiques, des pertes plus grandes, des tensions et des courants plus faibles.
- sa commande est relativement complexe, et demande un personnel très qualifié.

IV-6- Contrôleur de puissance unifié (UPFC)

Le contrôleur de puissance unifié UPFC (Unified power flow controlled) est constitué de deux onduleurs interconnectés par une liaison continue (figure IV-9).

Le premier onduleur est connecté en parallèle sur le réseau et le second insère une tension en série sur la ligne.

On note :

V_t : la tension insérée par le second onduleur.

V_a : la tension au début de la ligne.

V_b : La tension à fin de la ligne.

Ce dispositif a donc la faculté à lui seul de répondre aux exigences des réseaux selon le mode de contrôle choisi, on peut avoir les principales compensations :

- Les compensations shunts.
- Les compensations séries
- Les compensations par déphaseurs.

On remarque que la structure de l'onduleur 1 est celle du STATCOM. Cet onduleur peut donc être utilisé pour faire de la compensation d'énergie réactive et maintenir la tension V_a .

La tension de la ligne après la sortie de l'UPEC, V_b est la somme de deux autres tensions :

$$V_b = V_a + V_t \dots\dots\dots (IV-7)$$

La tension V_t doit être à la pulsation du réseau, son amplitude et sa phase étant réglées avec l'onduleur 2. V_t évolue entre 0 et V_{tmax} et sa phase est comprise entre 0 et 2π .

Le réglage de V_t en phase avec V_a permet de régler la tension de sortie de l'UPEC V_b . Ce mode de fonctionnement permet de faire du maintien de tension ou une régulation de tension.

V_t peut être aussi réglée en quadrature avec le courant. Ce mode de fonctionnement permet donc de faire varier l'impédance apparente de la ligne en fonction de l'amplitude de la tension V_t . Il s'agit d'un fonctionnement en compensation série.

Enfin V_a pourra être réglée de sorte qu'elle soit de même amplitude que V_b mais déphasée d'un angle α . on obtiendra alors un fonctionnement de l'UPFC en déphaseur, voir figure IV-8

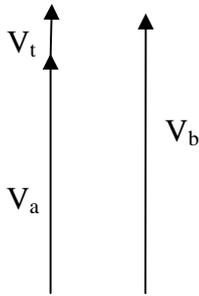


Figure IV-8-a
 V_t en phase

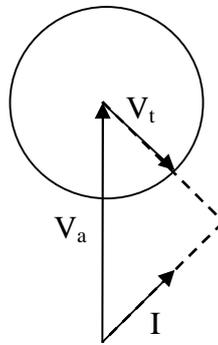


Figure IV-8-b
comp- série

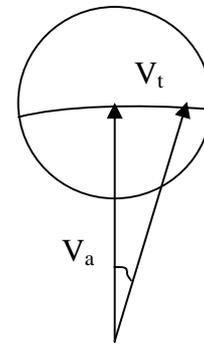


Figure IV-8-b
Fonctionnement déphaseurs

Figure (IV-8) : Mode de fonctionnement de l'UPFC [10]

Avantages et inconvénients de ce compensateur

L'UPFC présente les avantages suivants :

- l'énorme avantage de ce compensateurs est bien sur la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne en un seul dispositif FACTS comprenant seulement deux onduleurs de tensions triphasées ;
- il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément ,en changeant la commande des onduleurs ,ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à de modifications du réseau en privilégiant une des fonctions temporairement ;
- Il pourra être utilisé afin d'amortir les oscillations de puissance .De plus il pourra alterner différentes fonctions :

Par exemple, la fonction shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que les fonctions séries et déphaseurs pourront être utilisées afin d'amortir les oscillations de puissance ;

- l'avantage économique du convertisseur à commutation forcée, est d'utiliser peu de composants passifs, la même structure de convertisseur convient aux trois schémas de base pour le réglage des transits : compensateur shunt, composeur série ou déphaseur.

Ceci le met en avant des autres systèmes de compensations et de contrôle du transit de puissance, il lui permet certainement une grande place dans les réseaux du futur proche ;

Ce compensateur présente l'inconvénient suivant :

- Ce dispositif est composé de deux onduleurs et sa commande à un niveau de complexité élevé.

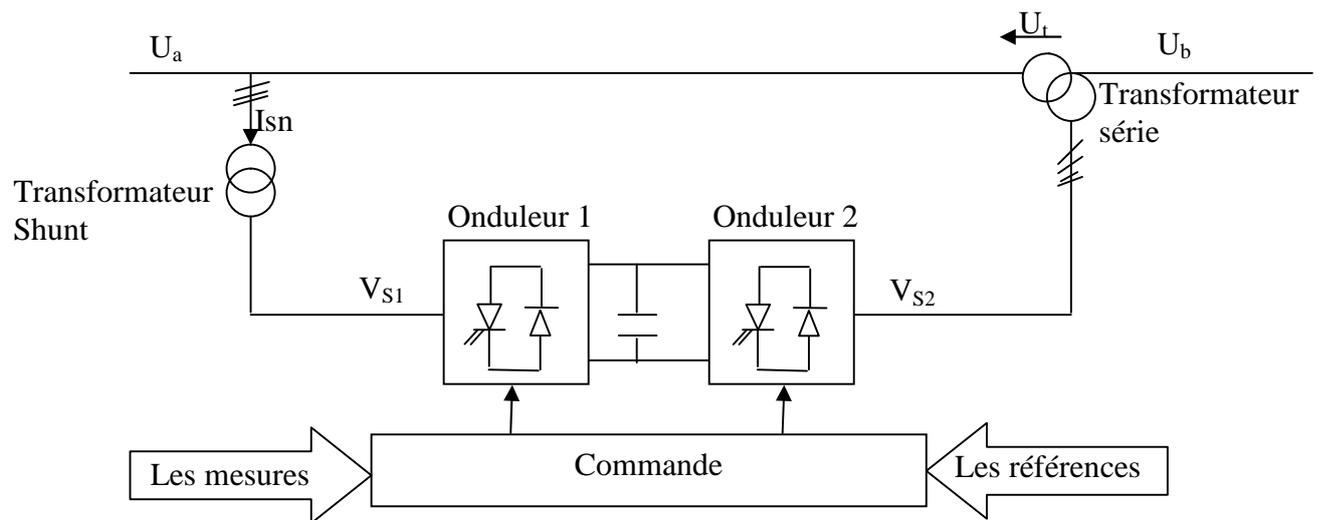


Figure IV-9- Schéma d'un contrôleur de puissance [10]

IV-7- Compensateur synchrone statique série (SSSC)

Ce type de compensateur série est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (figure (IV-7)).

Son rôle est d'introduire une tension (V_b) triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport.

Grace à cette tension (V_b) contrôlable à la fréquence du réseau le SSSC permet non seulement d'avoir une tension d'amplitude avec celui-ci mais aussi de maintenir cette tension constante si le courant varie ou de la contrôler indépendamment de l'amplitude du courant.

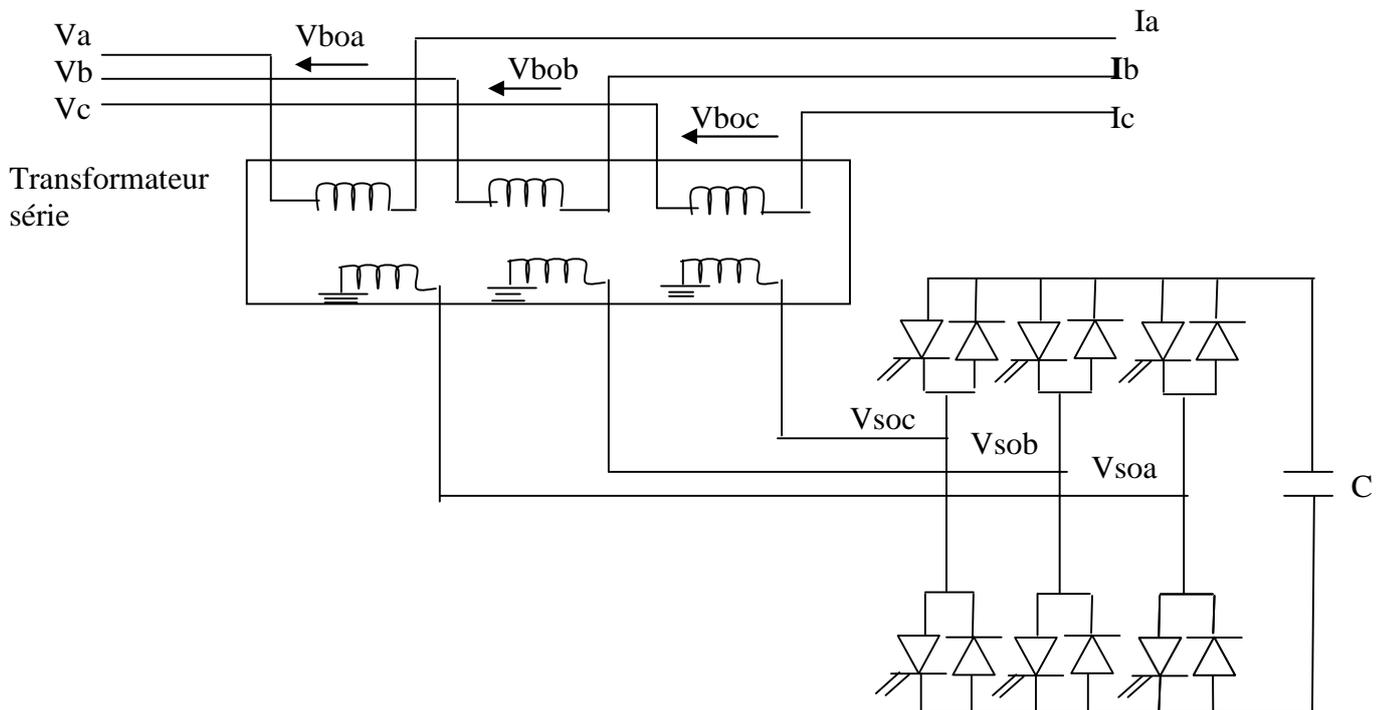


Figure IV-10- Compensateurs synchrone statique série [10]

IV-7-1-Principe de fonctionnement du SSSC :

Pour réaliser une compensation capacitive (réduction de la chute de tension inductive totale), la tension est dépassée de 90° en arrière du courant, la tension de sortie de l'onduleur peut être inversée réalisant ainsi une compensation inductive, ayant le même effet qu'un accroissement de réactance de la ligne, ce qui limite le courant de défaut.

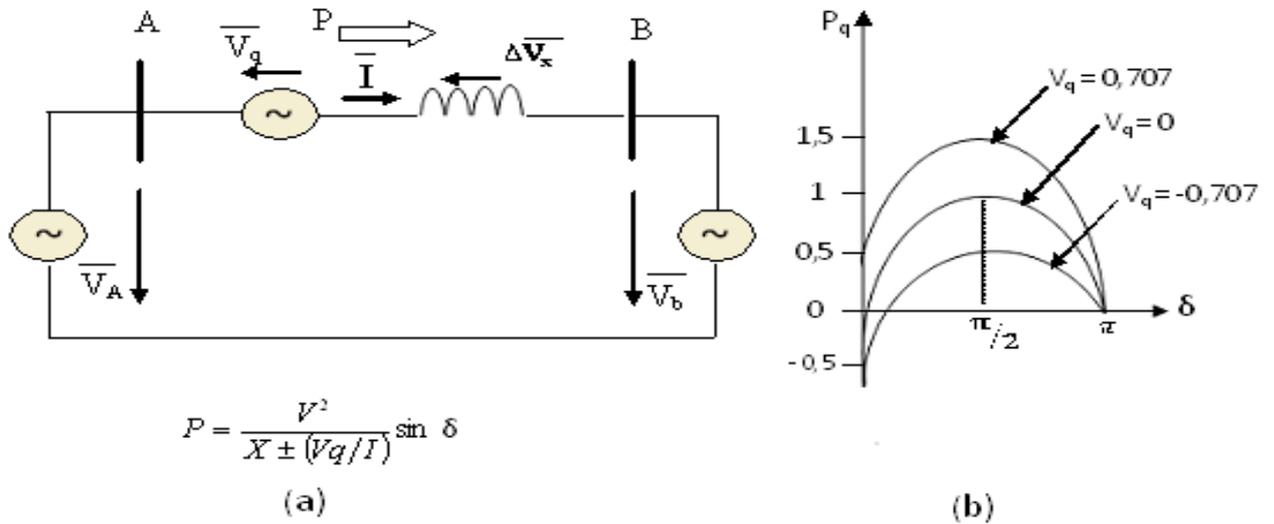


Figure (IV-11) : (a) Schéma simplifié d'un CSSS (b) caractéristique $p = f(\delta)$ pour diverses valeurs de V_q [11]

On constate que cette puissance est augmentée d'une fraction fixe de la puissance maximale transmissible par la ligne non compensée ($I_{max} = \frac{V^2}{X} \sin \delta$) indépendamment de δ dans

l'intervalle $\left(0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}\right)$

La relation généralisée pour la tension de compensation peut être exprimée sous la forme.

$$\bar{V}_q = -jKX\bar{I} \dots\dots\dots (IV-8) [10]$$

K : Paramètre de contrôle de la tension

X : Réactance de la ligne

I : Courant de ligne

IV-7-2-Avantages et inconvénients de se compensateur

Le SSSC présente les avantages suivants :

- Il n'insère pas de condensateurs en série sur la ligne, il ne peut donc en aucun cas provoquer de phénomènes d'oscillations. De plus son encombrement est réduit par rapport à un condensateur série de type avancé (TCSC) ;

Le SSSC présente les inconvénients suivants :

- sa commande est très complexe que le TCSC ;

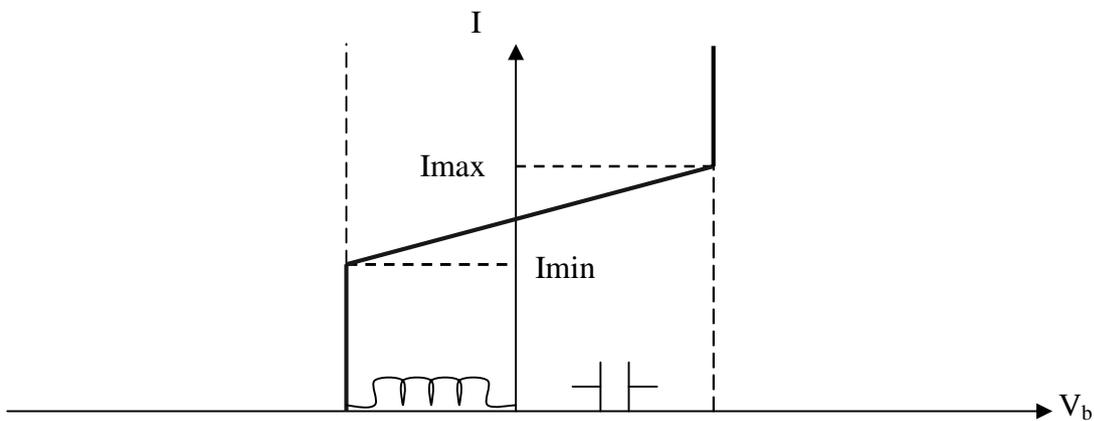


Figure (IV-12) : caractéristique I-V_b de CSSS [10]

IV-8- Compensateur statique (SVC)

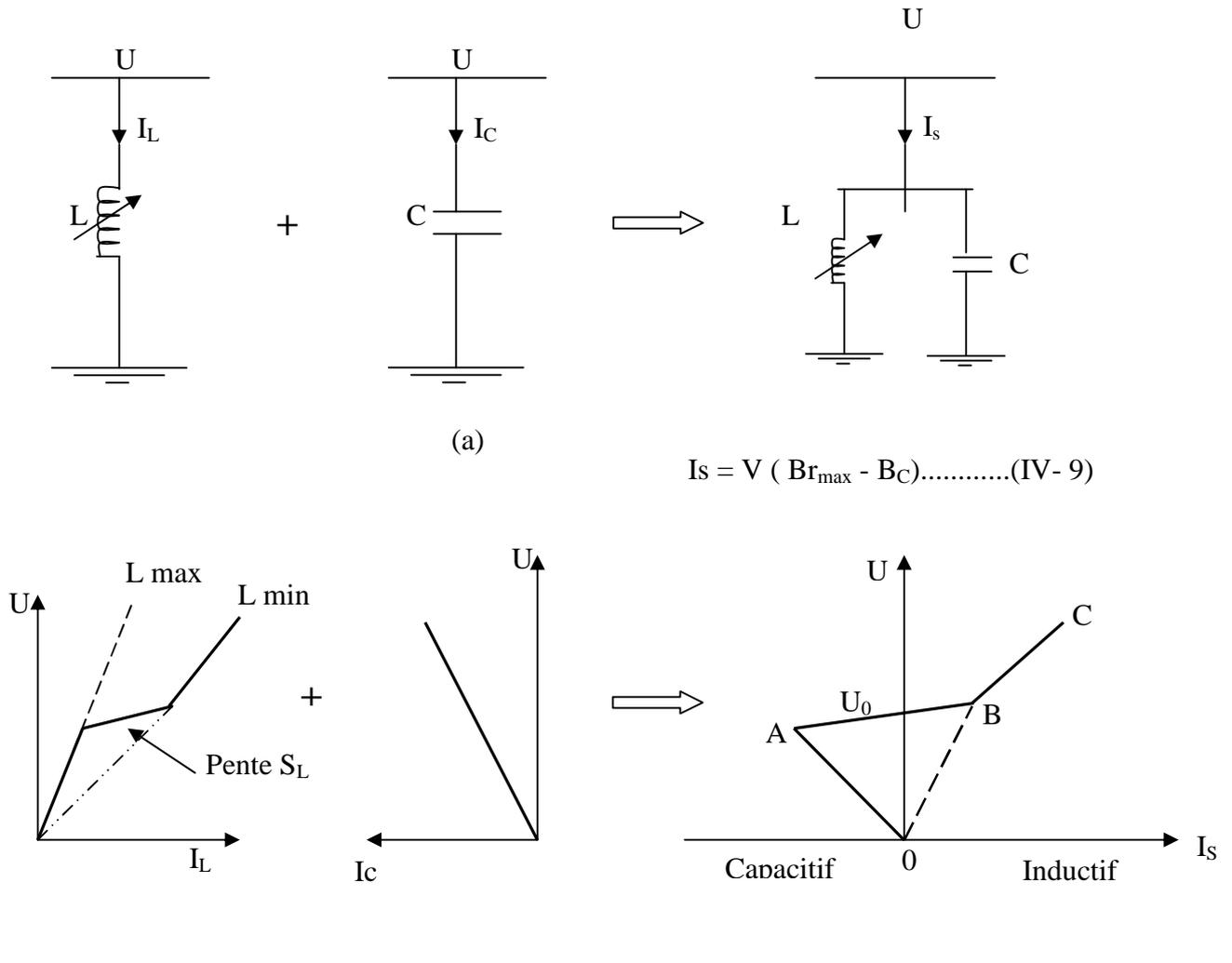
IV-8-1- Définition du SVC :

Le compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur des limites désirées. Le SVC injecte ou absorbe de la puissance réactive dans le nœud où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge.

IV-8-2- Caractéristique de réglage U-I d'un SVC :

Du point de vue du fonctionnement dans un réseau électrique, un compensateur statique peut être représenté par une capacité et une inductance connectées en dérivation en un nœud, avec possibilité de réglage pour le contrôle de la tension et de la puissance réactive.

La figure (IV-13) représente la caractéristique U-I d'un compensateur statique formé du montage d'une inductance contrôlée en parallèle avec un condensateur.



$$I_s = V (B_{r_{max}} - B_C) \dots \dots \dots (IV- 9)$$

Figure (IV-13) : les caractéristiques V-I d'un compensateur statique (a, b) [11]

En comparant la caractéristique statique V-I du STATCOM (figure IV-7) à celle du SVC classique figure (IV-13), on voit bien que le STATCOM est capable de fournir son plein courant capacitif à n'importe quelle tension ou presque. Cette aptitude à soutenir la tension du réseau est supérieure à celle obtenue pour un SVC classique qui devient dans cette zone comme un banc de condensateur pour lequel le courant décroît en fonction de la tension.

IV-8-3- Fonctionnement et schéma du SVC :

Le principe de fonctionnement du SVC est basé sur l'association d'une réactance avec un condensateur tous deux commandés par thyristors. Le premier est appelé TCR (Thyristor controlled réactance) et le deuxième TSC (thyristor switched capacitor).

L'ensemble est connecté à un nœud du réseau électrique à travers un transformateur comme le montre la figure suivante.

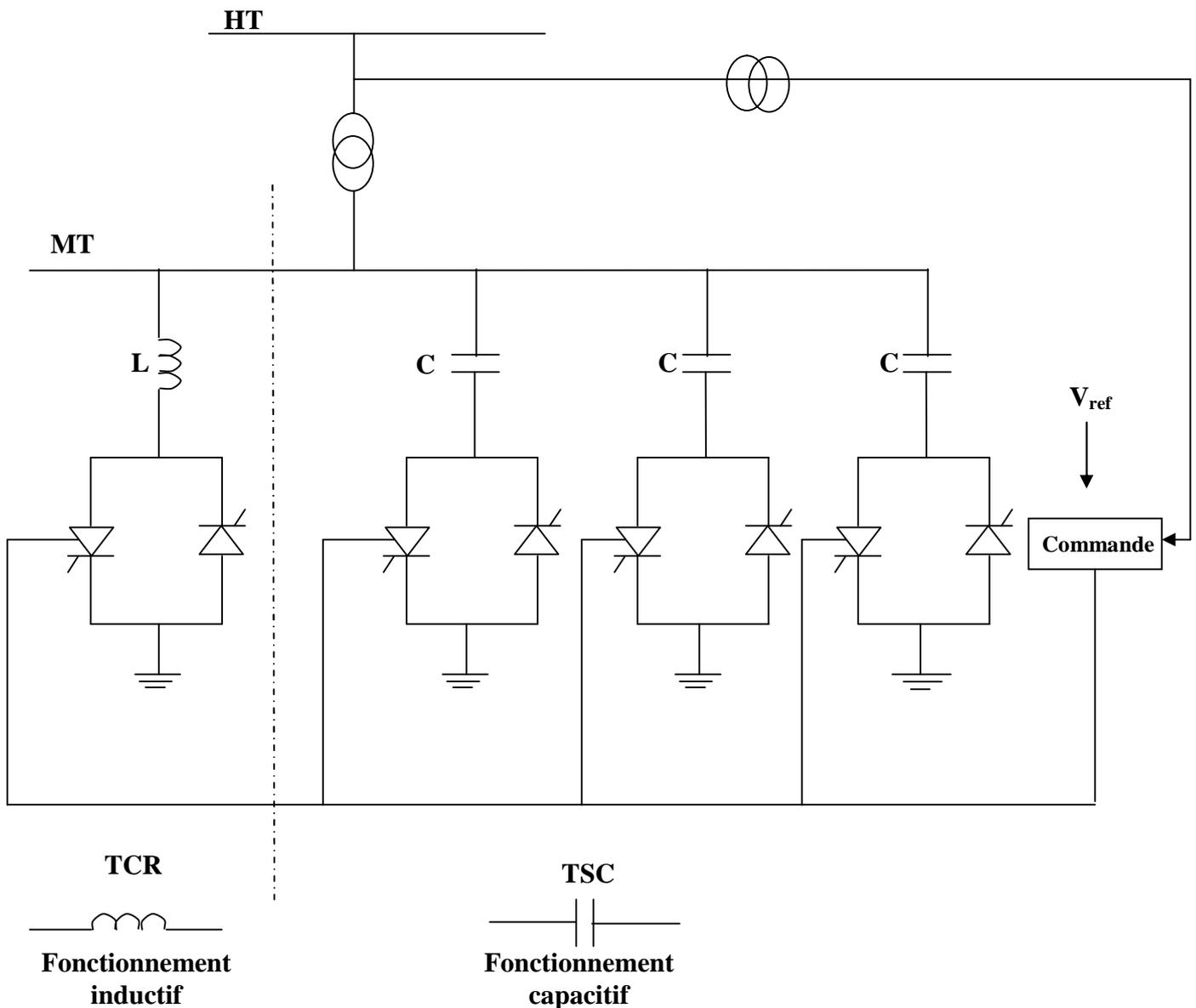


Fig. IV.14 : Schéma conventionnel d'un SVC [11]

Par action sur le courant de gâchette des thyristors et en faisant varier l'angle de conduction de ces derniers, nous pouvons faire face aux fluctuations de tensions engendrées par les variations de charge. En effet, le SVC peut accomplir cette double tâche en fonctionnant différemment, soit en absorbeur ou en générateur de puissance réactive. En ce qui suit, nous allons exposer ces deux types de fonctionnement séparément.

IV-8-3-1- Réactance commandé par thyristor : (TCR)

Le TCR est constitué d'une inductance en série avec deux thyristors en tête bêche comme le montre la figure (IV-15)

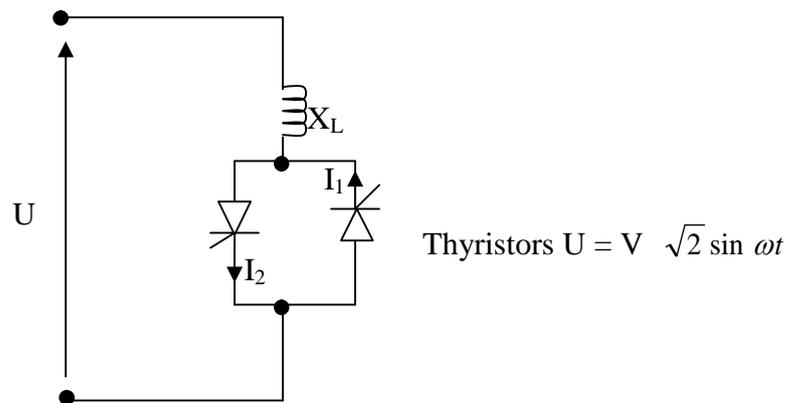


Figure IV-15- Réactance commandée par thyristors [11]

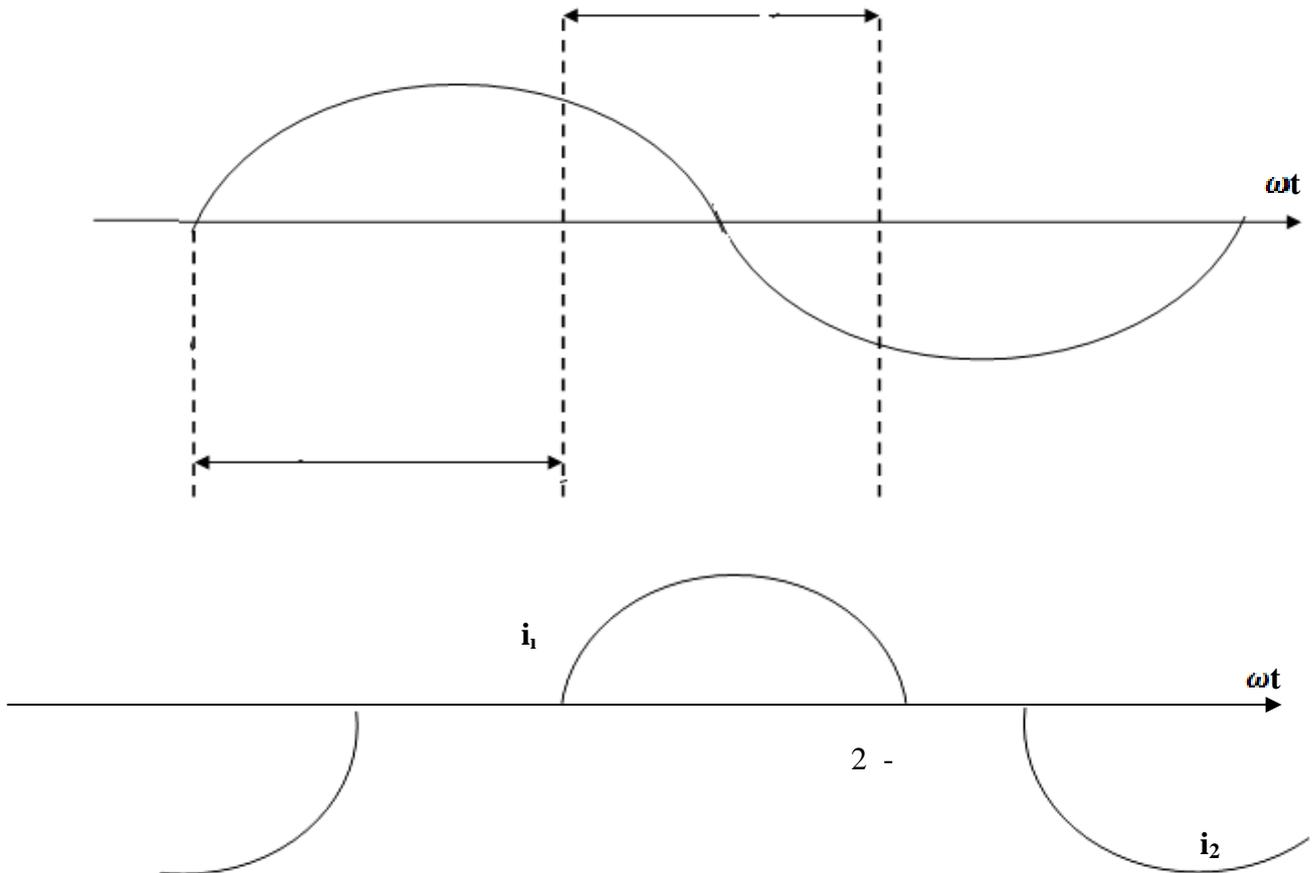


Fig. IV.16 : Forme d'onde de tension et de courant [4]

La valeur instantanée du courant, valable entre $t = \alpha$ et $t = 2\pi - \alpha$

est : $i = \frac{\sqrt{2}U}{X_1} (\cos \alpha - \cos \omega t) \dots \dots \dots (IV - 10)$

La composante fondamentale de ce courant correspond à une absorption variable de puissance réactive en fonction de l'angle d'allumage (α), et peut-être déterminée par décomposition de fourrier, par la relation.

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_1} U \dots \dots \dots (IV-11)$$

La puissance réactive consommée par l'inductance :

$$Q_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_1} U^2 \dots \dots \dots (IV-12)$$

U : valeur efficace de la tension

X_1 : t : réactance de l'inductance pour le fondamental

$\sigma = 2(\pi - \alpha)$: durée de conduction

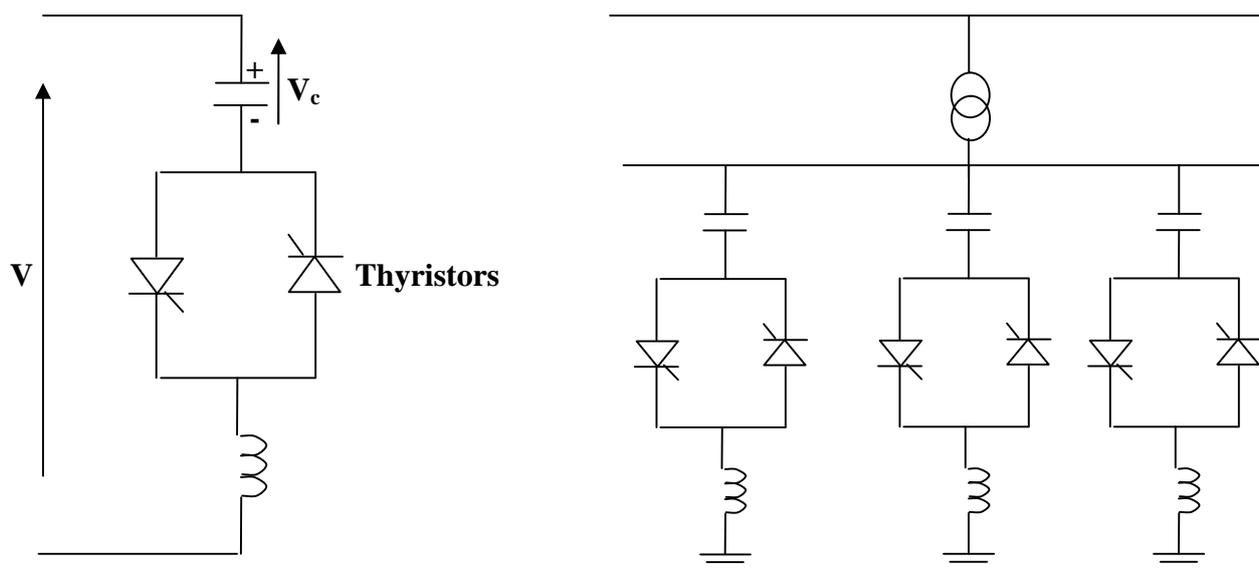
: L'angle d'allumage des thyristors.

Dans ce qu'on a présenté jusqu'ici, l'élément TCR a été considéré comme un dispositif monophasé, pour les systèmes triphasés on utilise une connexion en triangle qui contient trois dispositifs TCR monophasés.

IV-8-3-2- Condensateur commandé par thyristor (TSC) :

Le TSC (thyristor switchshed capacitor) est constitué essentiellement d'un banc de condensateurs dont chacun est commandé par deux thyristors en tête-bêche. Pour limiter les surtensions transitoires provoquées par la mise sous tensions des condensateurs ainsi que les effets de résonance, une petite inductance est rajoutée en série avec les condensateurs.

Le schéma typique d'un TSC est donné sur la figure. (IV-17).



a) Schéma d'un TSC

b) 3 TSC

Fig. IV.17 : Condensateur commandé par thyristor TCS [11]

En fonction de la variation de la tension sur le jeu de barre par rapport à la tension de référence le TSC connecte ou déconnecte un ou plusieurs bancs de condensateurs.

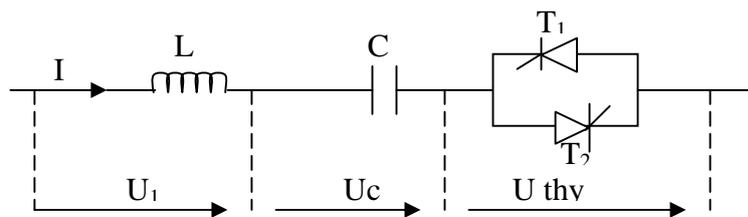
Les condensateurs sont chargés à la valeur de crête de la tension du réseau au début.

Maintenant, si la tension aux bornes du condensateur est supérieure à celle du réseau, les thyristors sont amorcés et un courant se met à circuler du condensateur vers le réseau.

Il y aura une impulsion de courant (changement discontinu $-C \, dV/ \, dt$) ce qui justifie la présence de l'inductance pour atténuer ces impulsions qui sont nuisibles pour les thyristors. Si les condensateurs et dans l'état débranché, il reste chargé avec son énergie stockée. Pour le brancher de nouveau, il faut attendre que la tension à ses bornes soit égale à celle du réseau. En fonction de la valeur de la tension aux bornes du TSC, l'équipement de commande et de contrôle introduit dans le circuit un nombre plus au moins grand d'éléments (condensateurs) pour que la tension sur le thyristor soit minimale, on doit s'intéresser au choix du moment de la commutation.

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs peut se faire avec le minimum possible de perturbation transitoires si la valve à thyristor devient passante aux instants où la tension de condensateur et la tension CA du réseau sont égales (c'est-à-dire lorsque $U_{\text{THY}} = 0$).

Le déclenchement de la batterie de condensateurs peut avoir lieu en coupant l'impulsion de gâchette des thyristors dès que le courant de valve passe par zéro (comme le montre la figure (VI-18)).



$$U = U \sqrt{2} \sin \omega t$$

Figure IV-18- Schéma de principe d'un TSC [11].

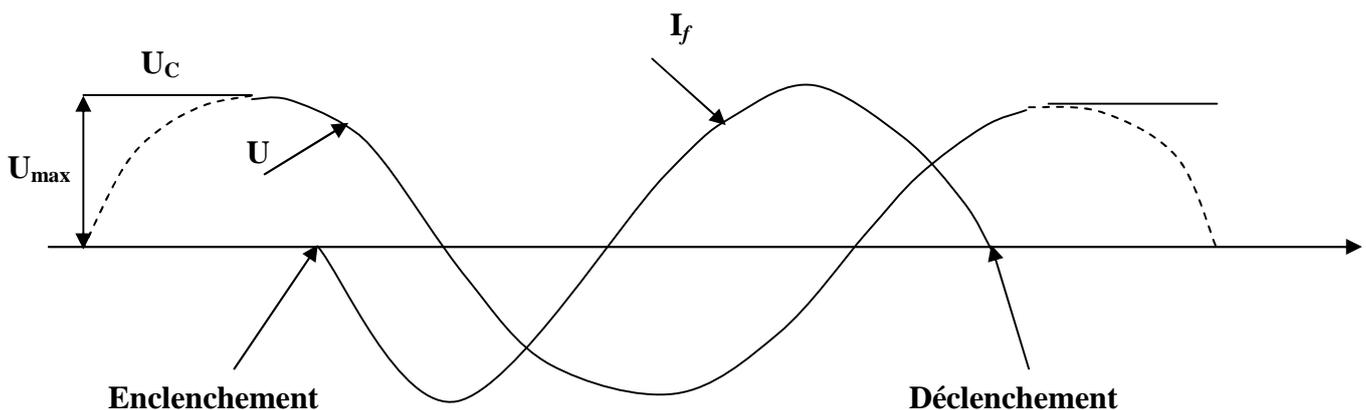


Fig. IV.19 : Forme d'onde de courant et de tension dans le cas $U_C = U_{\text{max}}$ ($U_{\text{thy}} = 0$) [4]

IV- 8-4- Avantages et inconvénients de la compensation par SVC :

Ce compensateur présente les avantages suivants :

Parmi les bénéfices de la compensation statique, on peut citer :

- amélioration des niveaux de tension dans le réseau
- augmentation de la capacité de transit de puissance active du réseau
- augmentation de la marge de stabilité transitoire
- augmentation de l'amortissement des oscillations électromécaniques
- réduction des surtensions temporelles

Ce compensateur présente les inconvénients suivants :

- les systèmes qui fonctionnent à leurs limites d'exploitation sont fortement dépendants de la compensation par SVC, donc peuvent souffrir facilement d'un effondrement de la tension.
- la puissance réactive générée est en fonction du carré de la tension, alors le SVC ne peut maintenir le niveau de tension requis par le réseau.
- les interactions entre le SVC et les autres éléments de types FACTS ou d'autres éléments d'électronique de puissance utilisés dans les réseaux peuvent être gênantes. Donc il est nécessaire de faire une coordination entre les dispositifs connectés en différents lieux en s'assurant que leur action est positive et fiable dans les réseaux.
- le SVC ne peut contrôler qu'un seul paramètre important qui est la tension, pour le contrôle de l'angle et de l'impédance, d'autres dispositifs seront indispensables.
- enfin le SVC est très cher et demande beaucoup de place au sol pour son installation.

IV-9- Conclusion :

L'introduction des FACTS dans les systèmes de puissances et particulièrement dans les réseaux électriques offre plusieurs possibilités dont les principales sont :

- le contrôle de la puissance active, afin qu'une certaine quantité soit dirigée selon les couts indiquées,
- le chargement des lignes de transport près de leurs limites : courant admissible en régime permanent, stabilité thermique en régime de court-circuit,
- des interconnexions mieux réalisées et sûres entre les systèmes voisins ; par conséquent réduction des réserves de puissance dans les systèmes,
- la prévention des incidents en cascades par limitation de l'impact des défauts et du mauvais fonctionnement des équipements.

Chapitre V

Etude comparative des moyens de compensation de l'énergie réactive

Chapitre V : Etude comparative des moyens de compensation

V-1-Introduction :

L'adaptation entre l'offre et la demande de puissance réactive nécessite l'emploi de matériel aux caractéristiques très différentes mais adéquats pour chaque cas de compensation.

Plusieurs situations peuvent se présenter :

- Fluctuation de la tension, de la puissance demandée ;
- Variation brusque et aléatoire de la demande en puissance ;
- Compensation de charge ou de réseau.

Pour chaque catégorie de compensation, un dispositif adéquat doit être installé afin de bénéficier de ses avantages et d'éviter ses inconvénients.

V-2- Comparaison entre les différents moyens de compensation :

Dans ce tableau nous résumons les principaux avantages et inconvénients des différents moyens de compensation.

Chapitre V : Etude comparative des moyens de compensation

Moyens de compensation	Avantages	Inconvénient
Batteries de condensateur et inductance	<ul style="list-style-type: none"> - Compensation parallèle ou en série pour le condensateur et diminue la réactance de la ligne ; - Accroît la limite transmissible de puissance ; - Améliore la stabilité du système ; - Simplicité de construction (pas de complexité) ; - Grande durée de vie ; - Installation facile ; - Absence d'usure mécanique ; - Entretien réduit ; - Faible volume occupé ; - Pertes faibles ; - Moins de consommation de la puissance active. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lents pour les phénomènes transitoires ; - Risque de surcompensation en cas de variation de charge ; - Sensible aux surtensions et aux surcharges ; - Capacités très coûteuses pour les grandes puissances ; - Résonance avec les courants et les tensions harmoniques ; - Risque de surtension.
Compensateur synchrone	<ul style="list-style-type: none"> - Fournitures ou absorption de la puissance réactive selon l'excitation ; - Grande flexibilité pour toute condition de charge ; - Absence de résonance par les harmoniques ; - Limitation des courants et des tensions harmoniques ; - Régulation locale de la tension près du besoin ; - Stabilisation de la tension et alimentation de la puissance du court-circuit. 	<ul style="list-style-type: none"> - Entretien trop onéreux ; - Limitation de la quantité de puissance fournie en raison de l'échauffement des conducteurs ; - Limitation en puissance absorbée pour un fonctionnement stable ($< 1/2$) ; - Coût élevé tant en investissement qu'en installation ; - Utilisé seulement pour les compensations de la puissance réactive mais pas pour la régulation de la tension ; - Nombre de manœuvre limité.
Compensation statique	<ul style="list-style-type: none"> - Injection / absorption rapide de la puissance réactive ; - Maintien de la tension à une valeur proche de la tension de consigne ; - Amélioration de la stabilité statique ; - Augmentation de la puissance transmissible ; - Amortissement des oscillations. - Amélioration de la stabilité dynamique ; - Compensation de charge déséquilibrée ; - Vitesse de repense très grande ; - Contribution insignifiante à la puissance de court-circuit ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque d'effondrement de la tension du réseau à cause de la dépendance des compensateurs statiques ; - Interaction avec les autres dispositifs FACTS ; - Coût onéreux ; - Injection des harmoniques dans le réseau ; - Commande complexe nécessitant un personnel qualifié pour la gestion.

Chapitre V : Etude comparative des moyens de compensation

	<ul style="list-style-type: none"> - Entretien faible ; - Possibilité de réglage par le contrôle de la tension et de la puissance réactive. 	
Installation globale	<ul style="list-style-type: none"> - Faible dimensionnement de la batterie au foisonnement naturel des charges ; - Service permanent et donc rapidité de l'amortissement ; - Diminution de la puissance apparente en l'ajustant du besoin en puissance active de l'installation ; - Elle augmente la puissance active disponible de transformateur de livraison ; - Soulage de transformateur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Circulation du courant réactif dans l'installation du niveau 1 jusqu'au récepteur ; - Pertes par effet joule et les chutes de tension dans les canalisations situées en aval de la batterie ne sont pas diminuées ; - Convenance limitée aux charges régulières.
Installation par secteur	<ul style="list-style-type: none"> - Supprime les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive ; - Augmente la puissance active disponible des transformateurs et la puissance active qui peut être véhiculé dans les canalisations situés en amont du récepteur compensé ; - Réduit les pertes par effet joule et les chutes de tension dans les canalisations entre le niveau 2 et le niveau 1 ; - Le coutant réactif circule dans l'installation jusqu'au récepteur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de surcompensation en cas de variation importante de la charge.
Installation individuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Supprime la facturation d'énergie réactive ; - Produit de l'énergie à l'endroit où elle est consommée ; - Diminue les pertes joule dans toute la ligne ; - Le courant réactif n'est pas véhiculé dans les canalisations de l'installation. 	

V-3-Conclusion :

Plusieurs moyens sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive, certains participent à la stabilité des systèmes compensés, d'autres au contraire créent de nouvelles contraintes au système.

Le choix du moyen de compensation doit répondre aux exigences fixées dès le départ et atteindre aussi l'objectif de compensation de régulation ou de maintien de la tension proche des conditions idéales de fonctionnement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les problèmes de tenue de la tension et de la compensation de l'énergie réactive sont différents selon que l'on se situe au niveau du segment transport-répartition ou au niveau de la distribution.

Les moyens de compensation et de réglage à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations périodique liées à l'évolution journalière des transites des puissances et aussi aux variations brusques liées aux incidents sur le réseau.

Notre travail consiste à étudier divers dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de tenue de la tension : des condensateurs et des inductances fixes, des compensateurs synchrones, des groupes de productions eux même, des compensateurs statiques et des transformateurs avec changement de prise.

Plusieurs moyens sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive, certains participent à la stabilité des systèmes compensés, d'autre au contraire créent de nouvelles contraintes au systèmes.

Le choix du moyen de compensation doit répondre aux exigences fixées dès le départ et atteindre aussi l'objectif de compensation de régulation ou de maintien de la tension proche des conditions idéales de fonctionnement.

Notre étude est générale, nous espérons que notre travail sera d'un support utile pour toute étude approfondie de chaque moyen de compensation.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PREVE CHRISTOPHE « Réseau électrique 2 » LAVOISIER, 3^{ème} éditions.
- [2] PIERE MEYNAUD « Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension sur les réseaux de transport THT et HT » Technique de l'ingénieur, D4315 ,1986.
- [3] « Encyclopédie des sciences industrielles (Electricité, électronique générale) ».Année 1977, édition QUIETT.
- [4] A.SI KADIR et, S.FEKIK « Compensation de l'énergie réactive par les systèmes FACTS- Application d'un SVC » Mémoire de fin d'étude ingénieur année 2007, UMMTO.
- [5] GUY SEGUIER « Electronique de puissance » DUNOD, 7^{ème} édition.
- [6] IMMADOUCHENE, G « Compensation de la puissance réactive sur les réseaux d'énergie électrique -Application SVC » Mémoire Ingénieur Année 2007, UMMTO.
- [7] P.MEGHAND, « Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension dans les installation industrielles », Technique de l'ingénieur, D4310,PP4, 1986.
- [8] D.BENSALAH et HOUASSINE .H « Mise en pratique d'un compensateur synchrone » Mémoire Ingénieur Année 2001, UMMTO.
- [9] MERLIN GERIN « Guide de la compensation d'énergie réactive et filtrage d'harmonique » GROUPE SCHNEIDER, Année 2007.
- [10] ESKANDAR GHLIPOUR SHAHRAKI ; « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire de réseau » thèse de doctorat de l'université Henry POINCARRE, Nancy-1
- [11] « système flexible de transmission d'énergie en courant alternatif (FACTS) » cahiers techniques de l'ingénieur.
- [12] PASSELERGUE Jean-Christophe « Etude de l'insertion d'un STATCOM sur les performances statiques d'un réseau » thèse D.E.A Génie Electrique de l'école doctorale de l'INP Grenoble, année 1995