

N° Ordre...../FHC/UMBB/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

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

**MASTER**

Présenté par

**LAMA WAIL**

Et

**DAHLOUM DHIAA EDDINE**

Filière : Hydrocarbures  
Spécialité : Électricité industrielle

**Thème**

---

**Compensation de l'énergie réactive à l'aide d'un SVC**

---

Devant le jury :

KIFOUCHE	Rezki	MAA	UMBB	Président
KHELIFI	Fateh	MAA	UMBB	Examineur
BENDJEGHABA	Omar	Pr	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

## ***Remerciement :***

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience de faire ce travail.*

*Je remercie, en deuxième position, ma chère mère et mon cher père, mes frères et mes sœurs.*

*Également, je remercie l'encadreur de ce mémoire Mr. Bendjeghaba Omar pour son encadrement.*

*Nous adressons nos remerciements à messieurs, le président et Les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer et D'examiner notre travail.*

*Je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la Réalisation de ce travail.*

*Enfin, je ne peux oublier de remercier mes amis, mes collègues de département d'électrification.*

## RESUMES (Français et Arabe)

### Résumé:

La stabilité des réseaux électriques est une question très importante dans la planification et l'exploitation de ces réseaux.

Parmi les indicateurs de qualité de l'énergie électrique, nous citons le niveau de tension et l'ordre des pertes qui sont considéré comme les deux principales préoccupations importantes des gestionnaires des réseaux électriques.

Pour cela, ce travail se concentre sur l'amélioration de la stabilité de la tension statique ainsi que la réduction des pertes, en prenant en compte systèmes flexibles à courant alternatif (FACTS) et plus particulièrement les compensateurs statiques de puissance réactive (SVC).

Mots clefs : déviation totale de tension totale (TVD), perte actives et réactives totales.

### ملخص

يعد استقرار شبكات الكهرباء مسألة مهمة للغاية في تخطيط وتشغيل هذه الشبكات ومن مؤشرات جودة الطاقة الكهربائية، نذكر مستوى الجهد وترتيب الفاقد اللذين يعتبران من الاهتمامات الرئيسية لمديري شبكات الكهرباء ولهذا السبب، يركز هذا العمل على تحسين استقرار الجهد الساكن وكذلك تقليل الخسائر، مع الأخذ في الاعتبار (SVC) وبشكل خاص معوضات الطاقة التفاعلية الساكنة (FACTS) أنظمة التيار المتردد المرنة

الكلمات المفتاحية: انحراف الجهد الكلي؛ إجمالي الخسائر النشطة والمتفاعلة

# Sommaire

Introduction générale: .....	1
<b>CHAPITRE I :Présentation de complexe GL1/Z.....</b>	
I.1    Présentation de l'Organisme d'Accuile (Sonatrach): .....	2
I.1.1.    Historique : .....	2
I.1.2.    La dimension internationale de la SONATRACH : .....	2
I.1.3.    Mission du complexe GL1/Z : .....	2
I.1.4.    Situation géographique du complexe GL1/Z : .....	2
I.1.5.    Objectifs de GL1/Z : .....	2
I.2    Description du Complexe : .....	2
I.3    Description du procédés de liquéfaction : .....	3
I.3.1.    Zone d'utilités : .....	3
I.3.2.    Zone Process : .....	3
I.3.3.    Chargement et Stockage : .....	4
I.4    Organisation Administrative du Complexe : .....	5
I.4.1.    Description des Départements Maintenance : .....	6
I.5    Conclusion: .....	7
<b>CHAPITRE II:Le concepte de la puissance réactive .....</b>	
II.1    Introduction : .....	8
II.2    Les Puissances Actives , Réactives , Apparents : .....	8
II.2.1.    La puissance active P : .....	8
II.2.2.    La puissance réactive Q : .....	8
II.2.3.    La puissance apparent S : .....	8
II.3    Composantes active et réactive du courant : .....	9
II.4    Composantes active et réactive de la puissance : .....	10
II.5    Le Facteur De Puissance : .....	10
II.6    Les Consommateurs De La Puissance Réactive : .....	12

II.6.1.	Machine à excitation (générateur et moteurs) :.....	12
II.6.2.	Système de la technologie des semi-conducteurs : .....	12
II.7	Les producteurs de la puissance réactive :.....	12
II.7.1.	L'Alternateur.....	12
II.7.2.	Câble sous-terrain.....	12
II.7.3.	Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs .....	12
II.8	L'effet de la puissance réactive dans le réseau électrique :.....	13
II.8.1.	Chute de tension : .....	13
II.8.2.	Inconvénient d'un faible facteur de puissance : .....	14
II.8.3.	Surdimensionnement général du réseau : .....	16
II.8.4.	Rendement des appareils électriques :.....	17
II.8.5.	Tarifification de l'énergie réactive : .....	17
II.9	Le Concept De Compensation: .....	17
II.9.1.	Objectif de la compensation .....	17
II.10	Conclusion : .....	18
<b>CHAPITRE III:Techniques de compensation de l'énergie réactive.....</b>		
III.1	Introduction :.....	19
III.2	Compensations traditionnelles : .....	19
III.2.1.	Compensateurs synchrones.....	19
III.2.2.	Batterie de condensateur.....	20
III.2.3.	Inductances : .....	26
III.2.4.	Les transformateurs déphaseurs PST : .....	27
III.3	Compensation moderne (FACTS) :.....	28
III.3.1.	Concepts de base et définitions:.....	28
III.3.2.	Nécessité des dispositifs FACTS : .....	29
III.3.3.	Classification des systèmes FACTS :.....	29
III.3.4.	Apports et avantages des dispositifs FACTS :.....	38
III.3.5.	Coût des dispositifs FACTS :.....	39

III.4	Dispositifs FACTS en exploitation :.....	40
III.5	Conclusion : .....	40
<b>CHAPITRE IV :Calcul de l'écoulement de puissance .....</b>		
IV.1	Introduction :.....	41
IV.2	But de l'étude Ecoulement de puissance : .....	41
IV.3	Classification des jeux de barre :.....	41
IV.3.1.	Nœud de charge :.....	41
IV.3.2.	Nœud Générateur : .....	41
IV.3.3.	Nœud de référence (jeu de barre balancier, slack bus, swing bus) : .....	41
IV.4	Equations d'écoulement de puissance :.....	42
IV.4.1.	Formation de la matrice admittance :.....	42
IV.4.2.	Formulation des équations de tension : .....	43
IV.4.3.	Formulation des équations d'écoulement de puissance : .....	43
IV.4.4.	Méthodes numériques appliquées pour la résolution de l'écoulement de charges : 45	
IV.5	Conclusion : .....	48
<b>CHAPITRE V :Application et résultats.....</b>		
V.1	Introduction :.....	50
V.2	Description des systèmes utilisés : .....	50
V.3	Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE14 : .....	51
V.3.1.	Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état d'équilibre :	51
V.3.2.	Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état perturbé :	54
V.3.3.	Intégration du SVC dans un réseau test de 14 jeux de barres :.....	57
V.3.4.	Comparaison entre les résultats sans et avec SVC :.....	61
V.3.5.	Interprétation :.....	63
V.4	Conclusion : .....	63
	Conclusion générale: .....	64

## Liste des figures

Figure I-1 Répartition des départements d'organisation GL1/Z.....	5
Figure I-2 Description des Départements. ....	6
Figure II -1 Composante vectorielle des courants.....	9
Figure II-2 Composition vectorielle des puissances.....	10
Figure II-3 circuit équivalent du réseau électrique.....	13
Figure II-4 Le diagramme vectoriel des tensions.....	14
Figure II-5 Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur du courant apparent. ....	15
Figure II-6 Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur de la puissance apparent. ....	15
Figure III-1 Schéma équivalent de la machine synchrone.....	19
Figure III-2 Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau. ....	20
Figure III-3 Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série. ....	21
Figure III-4 Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre. ....	22
Figure III-5 Diagramme vectoriel du schéma de la figure III.4.....	24
Figure III-6 Compensation globale. ....	25
Figure III-7 Compensation partielle .....	25
Figure III-8 Compensation individuelle. ....	26
Figure III-9 Schéma de montage d'un absorbeur sur un jeu de barres HT.....	26
Figure III-10 Effet du fonctionnement d'un transformateur déphaseur. ....	28
Figure III-11 Classification des systèmes FACTS .....	29
Figure III-12 Schéma d'un TCSC composé de plusieurs modules identiques. ....	30
Figure III-13 Système TCSR : a). Montage, b). Réactance apparent.....	32
Figure III-14 Compensateur synchrone statique série.....	33
Figure III-15 Compensateur statique à capacités commutées par Thyristor et réacteurs contrôlés par thyristors. ....	34
Figure III-16 Zone de fonctionnement V-I d'un compensateur de type TSC-TCR.....	35
Figure III-17 Courant capacitif .....	36
Figure III-18 Courant inductif.....	36
Figure III-29 Structure de STATCOM.....	36
Figure III-20 Schéma de base d'un UPFC. ....	37
Figure V-1 Topologie du réseau étudié IEEE14. ....	50
Figure V-2 Les tensions de chaque jeu de barre de réseau à l'état d'équilibre.....	53
Figure V-3 Les pertes actives et réactives dans les lignes. ....	53
Figure V-4 La tension de chaque jeu de barre de IEEE14(l'état perturbé).....	56
Figure V-5 Les pertes actives et réactives dans les lignes (l'état perturbé.....	56
Figure V-6 Topologie du réseau IEEE14 avec SVC.....	57
Figure V-7 La tension de chaque jeu de barre de IEEE14 en présence du SVC.....	60

Figure V-8 Les pertes actives et réactives dans les lignes en présence du SVC.....	60
Figure V-9 Les pertes actives sans avec SVC.....	62
Figure V-10 Les pertes réactives sans et avec SVC.....	62

## Liste des tableaux

Tableau IV-1 Les variable connues et inconnues de chaque type de nœud. ....	42
Tableau V-1 Niveau des tensions, puissances générées, consommées d'IEEE14 à l'état d'équilibre. ....	51
Tableau V-2 Les données des lignes étudié d'IEEE14.....	52
Tableau V-3 Variation de la charge réactive. ....	54
Tableau V-4 Niveau des tensions, puissances injectées et consommées d'IEEE14 (l'état perturbé).....	54
Tableau V-5 Les données des lignes étudié de IEEE14 (l'état perturbé). ....	55
Tableau V-6 Les tensions et les angles au niveau de 14 jeux de barres en présence du SVC..	58
Tableau V-7 Les données des lignes étudié de IEEE14 en présence du SVC.....	59
Tableau V-8 Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 14 jeux de barres avec SVC et sans SVC.....	61

## Listes des symboles et abréviations

**P** : Puissance active

**Q** : Puissance réactive

**S** : Puissance apparente

**I<sub>a</sub>** : Courant actif

**I<sub>r</sub>** : Courant réactive

**I<sub>t</sub>** : Courant apparente

**P<sub>u</sub>** : Puissance utile

**P<sub>abs</sub>** : Puissance absorbée

$\eta$  : Rendement

**I<sub>Bus</sub>** : Vecteur des courants injectés

**V<sub>Bus</sub>** : Vecteur des tensions.

**I\*** : Le conjugué de courant I.

**V<sub>i</sub>** : Tension au nœud i.

**Y<sub>Bus</sub>** : Matrice admittance.

**P<sub>loss</sub>** : Pertes de puissance active.

**Q<sub>loss</sub>** : Pertes de puissance réactive.

**Cos  $\theta$** : facteur de puissance

**$\theta$** : Déphasage de la ligne.

**I<sub>ij</sub>** : Courant dans la branche ij.

**Y<sub>ij</sub>** : Admittance de la ligne entre nœud i et j.

**P<sub>i</sub>** : La puissance active injectée au nœud i.

**Q<sub>i</sub>** : La puissance réactive injectée au nœud i.

**$\Delta P / \Delta Q$**  : l'écart entre les valeurs spécifiées et calculées pour les puissances active et réactive.

**P<sub>spéc</sub> / Q<sub>spéc</sub>** : la puissance active / réactive spécifiées.

**P<sub>calc</sub> / Q<sub>calc</sub>** : la puissance active / réactive calculées.

**V<sub>s</sub>** : tension du réseau (départ).

**V<sub>r</sub>** : tension du réseau (arrivé).

**F** : fréquence de réseau.

**R** : la résistance de la ligne.

**L** : l'inductance de la ligne.

**C** : la capacité du circuit commun.

**THT** : Les réseaux de transport très haut tension.

**HT** : Les réseaux de répartition sont à haute tension.

**MT** : Les réseaux moyenne tension.

**FACTS** : Système de Transmission en Courant Alternatif Flexible.

**SVC** : Compensateur var Statique.

**TCSC** : Condensateur série contrôlé par thyristors.

**TCR** : Inductance commutée par thyristors.

**TSC** : Condensateur commuté par thyristors.

**STATCOM**: Compensateur Synchrone Statique.

**IEEE**: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**TSR**: Thyristor Switched Reactor.

**SSSC**: Statice Synchrones Série Compensateur.

**UPFC**: Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer.

### Introduction générale:

L'électricité est l'épine dorsale de notre société moderne, alimentant tout, des systèmes d'éclairage domestique aux industries lourdes. Cependant, le transport et la distribution de l'électricité ne sont pas sans leurs défis. Parmi les diverses contraintes auxquelles sont confrontés les réseaux électriques, le maintien de la qualité de l'énergie, notamment en termes de tension et de courant, est crucial pour assurer un fonctionnement stable et efficient du système.

Dans ce contexte, l'énergie réactive joue un rôle essentiel. Elle est nécessaire pour maintenir la tension à des niveaux acceptables dans les réseaux électriques, en particulier lorsqu'ils sont soumis à des charges inductives importantes. Cependant, la gestion de l'énergie réactive présente des défis, car sa production et sa consommation ne sont pas toujours équilibrées, ce qui peut entraîner une dégradation de la qualité de l'énergie, des pertes excessives et une inefficacité du système.

Pour remédier à ces problèmes, les Systèmes de Compensation Statique de Puissance (SVC) ont émergé comme une solution efficace. Les SVC sont des dispositifs flexibles capables de fournir ou d'absorber de l'énergie réactive instantanément, en fonction des besoins du système. Leur utilisation permet d'améliorer la stabilité de tension, de réduire les pertes dans le réseau et d'optimiser l'efficacité énergétique globale.

Cette étude se propose d'explorer en profondeur le rôle et l'impact des SVC dans la compensation d'énergie réactive. Nous aborderons les aspects théoriques et pratiques de la compensation d'énergie réactive, Ainsi bien structurer, notre travail sera divisé en cinq chapitres, dont le premier sera consacré à la présentation du complexe GL1/Z lieu où s'est déroulé notre stage de fin d'études. Dans le deuxième chapitre, nous avons détaillé tous les termes qui ont une relation avec la compensation d'énergie réactive et l'amélioration du réseau électrique tel qu'amélioration de tension et de facteur de puissance.

Puis, Dans le troisième chapitre nous avons classé les différents compensateurs de l'énergie réactive, ainsi expliqué le principe de la compensation et comment choisir l'emplacement et le type de compensation

Ensuite, dans le quatrième chapitre, on s'est intéressée au calcul de l'écoulement de puissance et son importance d'estimation des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal. Ces grandeurs comprennent les tensions aux nœuds, les puissances injectées à ces derniers ainsi que celles qui circulent dans les lignes et les transformateurs

Finalement, dans le dernier chapitre, on a mis en évidence l'efficacité du SVC dans l'amélioration de la stabilité de tension d'un système IEEE standard à 14 jeux de barres. La simulation des modèles étudiés sans/avec SVC est faite sur le logiciel MATLAB, Puis en fait l'analyse des résultats de simulation, Par la suite nous avons effectué une étude comparative succincte en termes d'amélioration de la stabilité de tension et la réduction des pertes du réseau sans et avec compensation.

# **CHAPITRE I :**

**Présentation de complexe  $GL_1/\mathbb{Z}$**

**I.1 Présentation de l'Organisme d'Accueil (Sonatrach):****I.1.1. Historique :**

L'état créa par décret du 31 décembre 1963, complété par celui du 21 septembre 1966, la société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures liquides et gazeux SONATRACH : (**S**ociété **N**ational de **T**ransport et **C**ommercialisation des **H**ydrocarbures).

Instrument actif du recouvrement de la souveraineté économique dans un domaine vital pour le devenir de pays. Ce que lui a permis de se frayer un chemin parmi les plus grandes compagnies du monde.

**I.1.2. La dimension internationale de la SONATRACH :**

Grâce à la situation géographique privilégiée du pays, la SONATRACH a dû développer son action commerciale vers les états unis et l'Europe et évidemment les pays de Maghreb. La SONATRACH occupe une place capitale dans l'économie du pays.

**I.1.3. Mission du complexe GL1/Z :**

Le complexe GL1/Z, un des fleurons de la technologie gazière, située à BETHIOUA à une trentaine (30) de kilomètres d'Oran a vu la pose de sa première pierre le 16 juin 1973. Le complexe GL1/Z a pour mission de traiter le gaz naturel transporté par gazoduc en provenance des champs gazetiers de Hassi R'mel en gaz naturel liquéfié (GNL) avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gazoline, ce gaz est ensuite transporté dans les méthaniers à destination de l'étranger.

**I.1.4. Situation géographique du complexe GL1/Z :**

Il s'étend sur une superficie de 72 hectares, le procédé utilisé est « air product » sa réalisation fut confiée à CHEMICO (USA) jusqu'au 20 Novembre 1975 puis à BECHTEL INC (USA) à compter du 21 janvier 1976, quand à son début de mise en service ce fut le mois de février 1978.

Pour ce qui est de sa source d'approvisionnement il s'agit des champs gaziers de HASSI R'MEL.

**I.1.5. Objectifs de GL1/Z :**

Le complexe GL1/Z dont l'objectif fondamental est la liquéfaction du gaz naturel En provenance de HASSI RMEL par un gazoduc ces 42 pouces. GL1/Z a été conçu pour produire 53220 m<sup>3</sup> de GNL (jour. Son procédé de liquéfaction «AIR PRODUCTS » Consiste à abaisser la température du gaz par échange thermique au moyen d'un Réfrigérant mixte (MCR) pré-refroidi en propane.

**I.2 Description du Complexe :**

Le complexe GL1/Z est implanté à BETHIOUA à 8 Km à l'est de la ville d'ARZEW et s'étend sur une superficie de 72 hectares. Il comprend 06 six trains de liquéfaction identique et fonctionnement en parallèle, une capacité de stockage de 300.000 m<sup>3</sup> (03 bacs de 100.000 m<sup>3</sup> chacun) stocké à -162° C à la pression atmosphérique, une pompe d'expédition GNL, un quai de chargement avec deux postes M2 et M3 Pour des méthaniers allant jusqu'à 125.000 m<sup>3</sup>. Le complexe de GL1/Z a été conçu dans le but de réduire le volume de gaz naturel par une

transformation physique de l'état vapeur à l'état liquide GNL afin qu'il soit transporté et commercialisé.

### **I.3 Description du procédés de liquéfaction :**

Le complexe GL1/Z est composé de trois zones distinctes :

- Zone Utilité : Productions d'électricités, vapeurs, azote, air instrument, production d'hypochlorite de sodium.
- Zone Process : Traitement et liquéfaction du gaz
- Zone Stockage et expédition : Stockage GNL, chargements des bateaux.

#### **I.3.1. Zone d'utilités :**

Cette zone s'occupe de la production de :

- **L'électricité** : Elle est produite par 3 turbo générateurs d'une puissance de 18 MW chaque un.
- **La vapeur** : La vapeur haute pression est utilisée pour les turbines-compresseurs pour une puissance optimale, tandis que la vapeur basse pression sert aux rebouilleurs pour un transfert de chaleur efficace.
- **L'air comprimé et l'azote** : L'air sert d'instrument de contrôle et de service, permettant de réguler divers paramètres opérationnels. L'azote, quant à lui, est utilisé pour les opérations d'inertage, garantissant la sécurité et la stabilité des processus en évitant les réactions indésirables avec l'oxygène.
- **Réseau de gaz combustible** : les principales sources de gaz combustible sont le ballon de détente d'azote au niveau du train de process, les vapeurs de GNL dans les bacs de stockage. Enfin les vapeurs de retour des navires au cours du chargement. Ce gaz combustible est utilisé dans les chaudières.  
Elle comprend aussi un circuit d'eau de refroidissement alimenté par six pompes dont le débit de refoulement est de 45000 m<sup>3</sup>/h chacun ; ainsi qu'un canal de réception et d'évacuation d'eau de mer de débit 400000 m<sup>3</sup>/h.
- **Circuit eau de mer** : L'eau de mer est nécessaire au refroidissement des appareils dans la zone utilités et la zone process, elle sert aussi à produire de l'énergie électrique. Une partie de cette eau de mer est utilisée pour produire de l'eau distillée.

#### **I.3.2. Zone Process :**

Dans cette zone, la charge de gaz naturel (GN) venant directement de HASSI R'MEL est traitée dans les six trains de liquéfaction. Le but du procédé de liquéfaction du GN et de pouvoir le transporter facilement en grandes quantités.

Chaque train de liquéfaction est composé de 08 sections :

- La section de décarbonatation (élimination du CO<sub>2</sub>).
- La section de déshydratation (élimination de H<sub>2</sub>O).
- La section de démercurisation (élimination de Hg).
- Le pré refroidissement.
- La section séparation et tour de lavage.
- La section de fractionnement.
- La section de refroidissement au propane.
- Le circuit de réfrigérant mixte.
- La section de liquéfaction.

- La section de stockage.

Les sections les plus importantes sont :

- **Section de décarbonatation :**

Pour éviter toute congélation du CO<sub>2</sub> au niveau du système de liquéfaction, on injecte une solution de MonoEthanolAmine MEA. Ainsi, le gaz naturel sort de cette section avec une teneur inférieure à 90 ppm (partie par million).

- **Section de deshydratation :**

Après la section de décarbonatation le gaz naturel est acheminé vers une section de deshydratation qui consiste en l'élimination de l'eau contenue dans le gaz naturel car à de très basse température l'eau se gélifie.

- **Section de démercurisation :**

Le GN doit aussi être traité pour réduire sa teneur en mercure jusqu'à **0.001 ppm** dans un demercuriseur grâce à des absorbants solides imprégnés de soufre, puis il subit une filtration dans deux filtres à poussières pour lui procurer un bon degré de pureté.

Il faut noter qu'après l'effectuation des opérations précédentes, chaque sortie est munie d'un système de contrôle permettant d'analyser la composition du GN et de savoir la teneur des différentes substances à éliminer, d'où l'appellation analyseurs.

- **Section de séparation :**

C'est la section qui s'occupe de la séparation des composant lourd (C2, C3, C4, C5+) et légers (Hé, N2, Cl) du GN.

- **Section de fractionnement :**

Le propane, le butane et gazoline destinés à la commercialisation sont récupérés dans cette section.

- **Section de liquéfaction :**

Cette section sert à refroidir progressivement Le gaz naturel au propane par échange thermique avec le MCR.

Le gaz naturel se transforme, ainsi, en liquide (GNL) sortant à une température de (-162°C) et une pression 1.05 bar.

### **I.3.3. Chargement et Stockage :**

Il existe 3 bacs de stockage qui reçoivent tout le GNL produit par les 6 trains. Chaque bac de capacité de 100000 m<sup>3</sup> stocke le GNL à une pression atmosphérique. Les bacs de stockage sont en acier à double paroi pour l'isolation thermique. Une fois le bac chargé, une partie du GNL s'évapore à cause de la chaleur infiltrée par les murs. Les vapeurs collectées sont distribuées au compresseur de fuel dans chaque train.

Le GNL peut être transféré d'un bac à un autre à l'aide de pompes de transfert quand le changement n'a pas eu cours.

Le chargement de GNL est précédé par le refroidissement des pipelines. Une pompe tire une partie du GNL à partir des bacs et la pompe dans le piping.

**I.4 Organisation Administrative du Complexe :**

- Le complexe GL1/Z est composé de dix départements, dont Six sont regroupés en deux Sous-directeur : sous-directeur personnel exploitation.
- La répartition de ces départements est représentée par l'organigramme suivant :

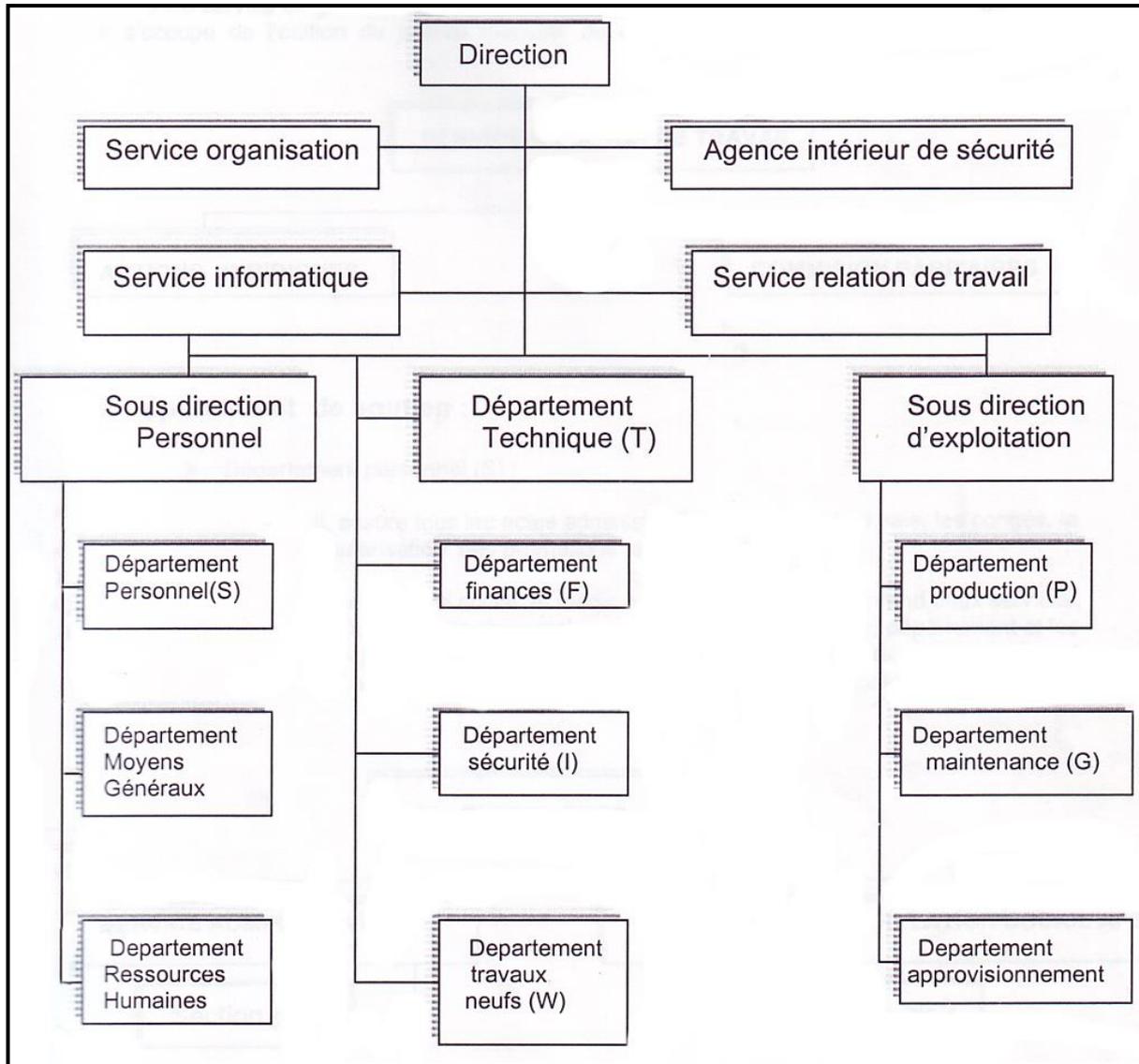


Figure I-1 Répartition des départements d'organisation GL1/Z.

- Les départements : personnel, moyens généraux, ressources humaines, sont des structures de soutien.
- Les départements : finance, technique, sécurité, travaux neufs, sont des structures de contrôle.
- Les départements : maintenance, production, approvisionnement, sont des structures d'exploitation.

**I.4.1. Description des Départements Maintenance :**

Au total le département de maintenance est formé de six services répartis selon l'organigramme Suivant :

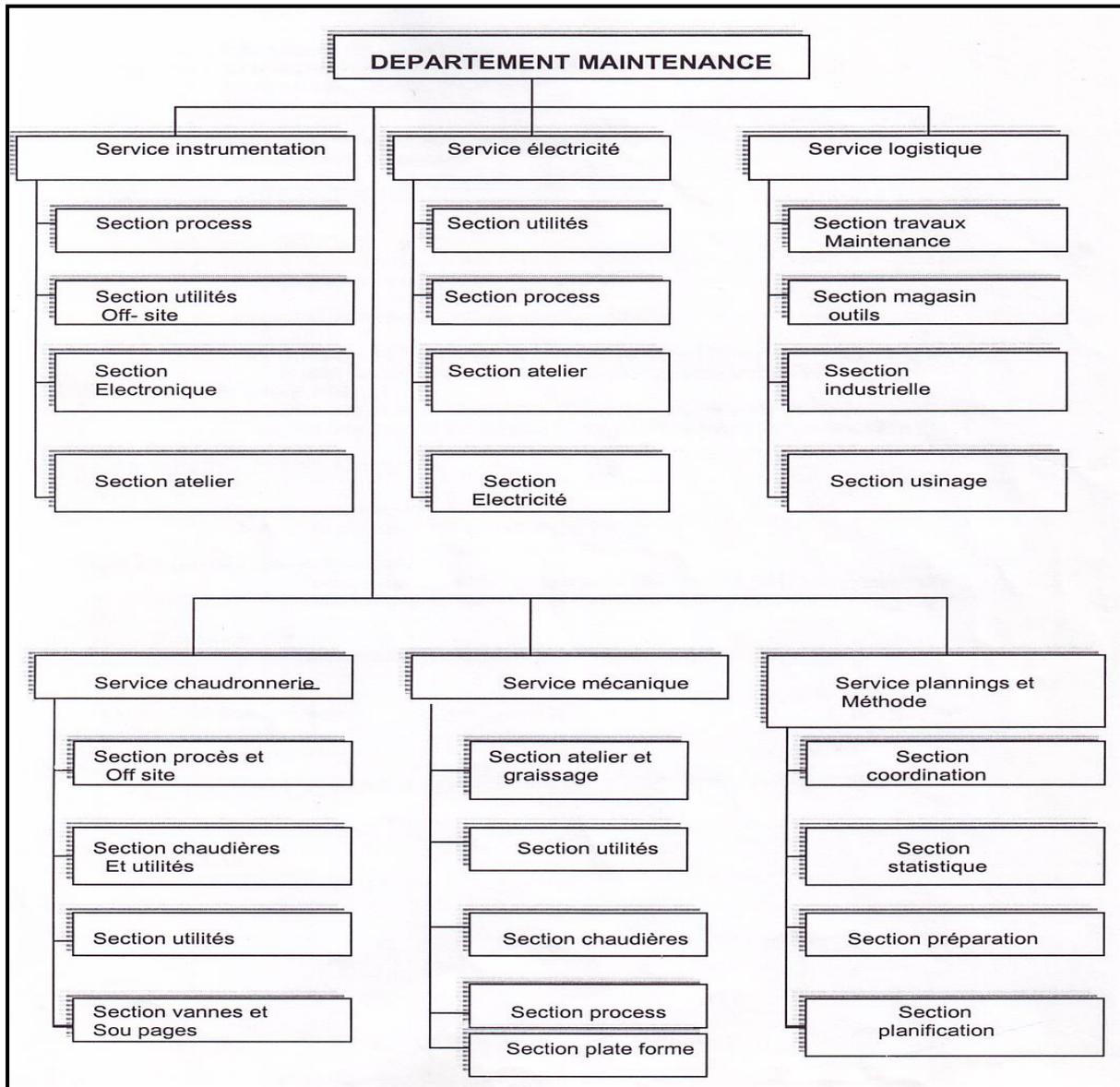


Figure I-2 Description des Départements.

**I.4.2. Département Maintenance (G) :**

La prise en charge de la maintenance prédictive, préventive, et curative de tous les Equipement est installation du complexe GL1/Z.

1. La coordination avec la structure concernée, notamment les départements production, Approvisionnement, sécurité, technique.
2. La planification des divers travaux.
3. La préparation et la procuration de la pièce de recharge.
4. La réalisation des travaux par le biais des divers services d'exécution.

Parmi les six services ce qui intéresse est le domaine de l'électricité qui se détaille comme suit :

**I.4.1.1. Service Electricité:**

- **Section utilité:** Elle s'occupe de l'opération de dessalage de l'eau de mer, la production d'énergie électrique, l'air comprimé, chloration et chargement.
- **Section procès:** Elle s'occupe du bon fonctionnement des équipements électriques des 06 trains.
- **Section chaudières:** Elle s'occupe de la maintenance des équipements électriques des chaudières.
- **Section Atelier:** Eclairages des bâtiments et réseau d'incendie.
- **Section climatisation:** Elle veille au bon fonctionnement de la climatisation des sous-stations et des bâtiments administratifs.

**I.5 Conclusion:**

Ce chapitre est entièrement consacré à la présentation du complexe GL1/Z lieu où s'est déroulé notre stage de fin d'études.

# **CHAPITRE II:**

**Le concept de la puissance réactive**

### II.1 INTRODUCTION :

La gestion efficace de l'électricité est plus importante que jamais dans un contexte où la demande énergétique mondiale ne cesse d'augmenter et où la transition vers des sources d'énergie renouvelables est devenue une priorité.

L'énergie consommée est composée d'une partie active, transformée en chaleur ou en mouvement, et d'une partie réactive transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques.

Les réseaux électriques font face à de nombreux défis, dont la compensation d'énergie réactive est un domaine crucial pour assurer un fonctionnement stable, efficace et durable. La présence de l'énergie réactive dans le flux d'électricité est essentielle, mais elle peut entraîner des pertes d'énergie et des déséquilibres dans les réseaux électriques. La compensation d'énergie réactive a pour objectif de réduire ces effets néfastes en équilibrant les charges et en améliorant la qualité de l'électricité fournie aux utilisateurs finaux. [1]

### II.2 Les Puissances Actives , Réactives , Apparents :

#### II.2.1. La puissance active P :

La puissance active représente la quantité de puissance réellement consommée par un appareil électrique pour effectuer un travail utile Dans un réseau électrique, Elle est celle qui génère le travail réel et contribue directement à l'accomplissement des tâches électriques nécessaires. Par conséquent, elle est un indicateur clé de l'efficacité énergétique d'un système ou d'un appareil, Cette puissance est mesurée en watts.

**En réseau monophasé :**

$$P = V.I. \cos \varphi \quad (\text{II.1})$$

**En réseau triphasé :**

$$P = \sqrt{3}U.I. \cos \varphi \quad (\text{II.2})$$

#### II.2.2. La puissance réactive Q :

La puissance réactive est mesurée en voltampères réactifs (VAR) et n'est pas directement convertie en travail mécanique, lumière ou chaleur. Cependant, elle est indispensable pour maintenir le flux d'électricité dans les équipements électriques et assurer leur bon fonctionnement. Elle correspond à la puissance « non utile », « invisible » de l'électricité.

**En réseau monophasé :**

$$Q = V.I. \sin \varphi \quad (\text{II.3})$$

**En réseau triphasé :**

$$Q = \sqrt{3}U.I. \sin \varphi \quad (\text{II.4})$$

#### II.2.3. La puissance apparent S :

La puissance apparente est une mesure combinée de la puissance active et de la puissance réactive dans un système électrique. Elle représente la quantité totale d'énergie qui circule dans un circuit, La puissance apparente est une mesure importante car elle permet de dimensionner correctement les équipements électriques, tels que les transformateurs, les générateurs, les onduleurs, etc., elle est exprimée en voltampères (VA).

En réseau monophasé :

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = V.I \quad (\text{II.5})$$

En réseau triphasé :

$$S = \sqrt{3} \sqrt{(P^2 + Q^2)} = \sqrt{3}U.I \quad (\text{II.6})$$

### II.3 Composantes active et réactive du courant :

Le courant électrique est associé à chacune de ces énergies actives et réactives :

- **courant actif  $I_a$**  est en phase avec la tension dans un circuit résistif pur, ce qui signifie que sa direction et son amplitude varient proportionnellement à la tension.
- **courant réactif  $I_r$**  est déphasé à  $90^\circ$  par rapport à la tension dans un circuit, ce qui signifie que sa direction et son amplitude ne sont pas alignées avec celles de la tension. Le déphasage peut être en avance (récepteur capacitif) ou en retard (récepteur inductif), selon la nature de l'élément réactif.
- **Courant apparent  $I_t$**  représente le courant effectif qui circule dans un circuit alternatif lorsque la réactance capacitive ou inductive est prise en compte.

(Voir figure II.1):

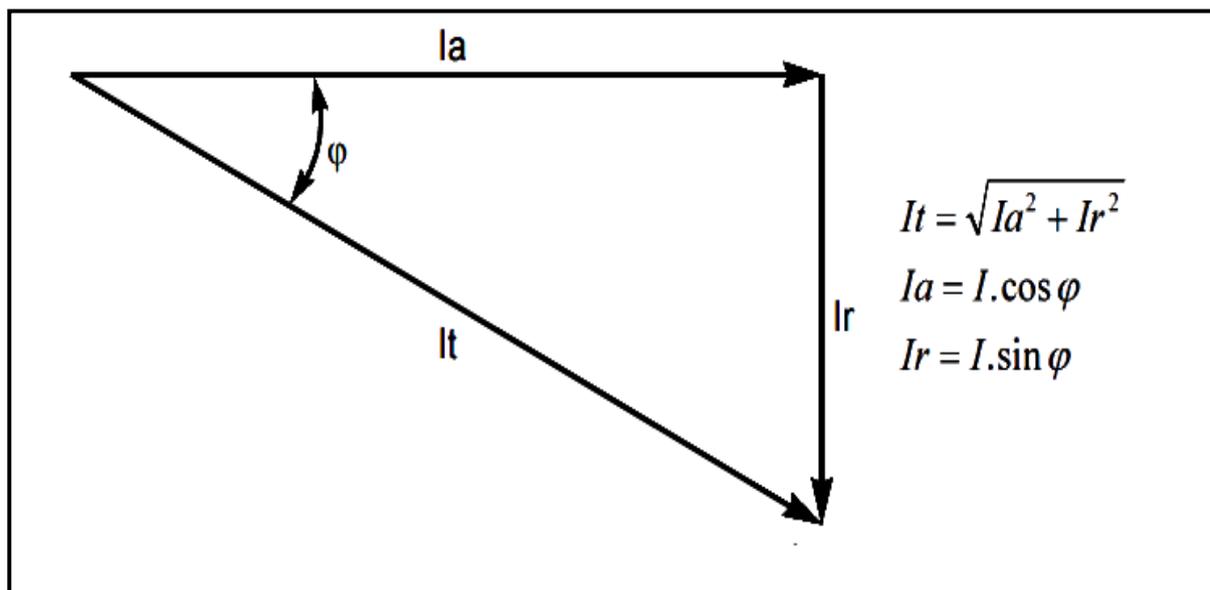


Figure II-1 Composante vectorielle des courants.

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

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{II.7})$$

$$I_a = I_t \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.8})$$

$$I_r = I_t \cdot \sin \varphi \quad (\text{II.9})$$

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

#### II.4 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 :

$S = U \cdot I$  : Puissance apparente en (kVA).

$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$  : Puissance active en (kW).

$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$  : Puissance réactive en (kVAR).

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

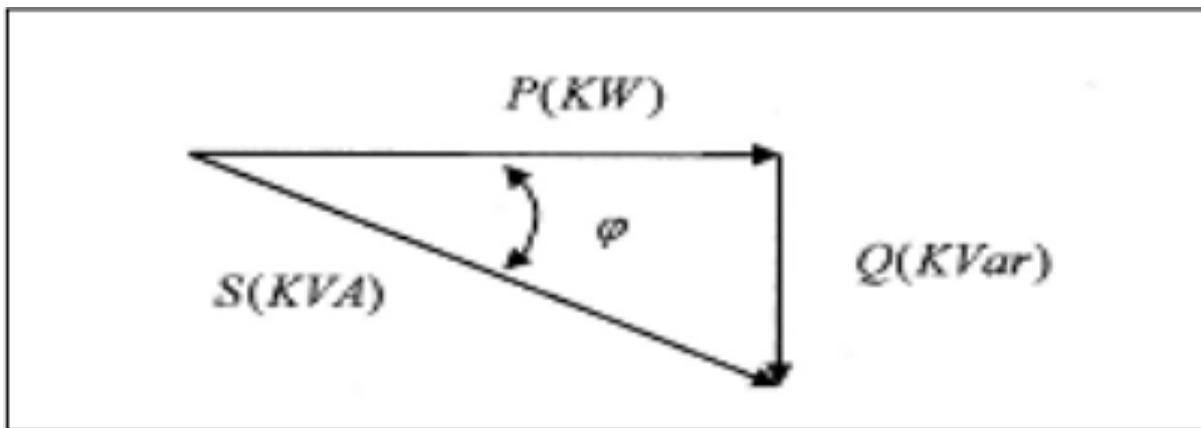


Figure II-2 Composition vectorielle des puissances.

P, Q, S et  $\varphi$  sont reliés par ces relations :

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.10})$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (\text{II.11})$$

$$Q = P \cdot \text{tg } \varphi \quad (\text{II.12})$$

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (\text{II.13})$$

#### II.5 Le Facteur De Puissance :

Le facteur de puissance est une mesure importante dans les systèmes électriques, en particulier dans les applications industrielles et commerciales. Il indique l'efficacité avec laquelle l'énergie électrique est utilisée. Un facteur de puissance élevé indique une utilisation efficace de l'énergie, tandis qu'un facteur de puissance bas indique un gaspillage d'énergie.

Le facteur de puissance est défini comme le rapport de la puissance active (exprimée en watts) à la puissance apparente (exprimée en voltampères). Il est généralement exprimé comme un nombre entre 0 et 1. on l'appelle également cosinus  $\varphi$ . [2]

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{puissance active}}{\text{puissance apparente}} \quad (\text{II.14})$$

$$F_p = \frac{P(\text{kW})}{S(\text{kVA})} \quad (\text{II.15})$$

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

$$F_p = \cos \varphi = \frac{P(\text{kW})}{S(\text{kVA})} \quad (\text{II.16})$$

En revanche, en présence d'harmoniques, ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$F_p = F_d \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.17})$$

$F_d$ : facteur de déformation.

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. Dans les mêmes conditions, nous avons également la relation :

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q(\text{kVAR})}{P(\text{kW})} = \frac{\text{puissance réactive}}{\text{puissance active}} \quad (\text{II.18})$$

Le facteur de puissance est une grandeur très utile qui permet d'évaluer la consommation en puissance réactive de l'élément mis en jeu. En effet, si le facteur de puissance est proche de 1, cette donnée peut être utilisée pour déterminer que l'élément étudié est pratiquement non consommé puissance réactive. En revanche, si le facteur de puissance est proche de 0, cela nous permet de constater que cet élément consomme uniquement de la puissance réactive. Un facteur de puissance est inférieur à 1, la consommation d'énergie réactive augmente (à mesure qu'elle se rapproche de 0).

Voici les valeurs approximatives de  $\cos \varphi$  des principaux actionneurs consommateurs d'énergie réactive :

- Moteur asynchrone à 100% de charge :  $\cos \varphi = 0.85$
- Moteur asynchrone à 50% de charge :  $\cos \varphi = 0.73$
- Lampe à incandescence :  $\cos \varphi = 1$
- Lampe à fluorescence :  $\cos \varphi = 0.5$
- Chauffage par induction :  $\cos \varphi = -0.5$

Ces valeurs démontrent l'importance de la part réactive de la consommation énergétique des actionneurs qui comportent des circuits magnétiques.

les avantages d'un bon facteur de puissance ( $\cos \varphi \rightarrow 1$ ,  $\text{tg } \varphi \rightarrow 0$ ) :

- La suppression de la facturation d'énergie réactive.
- Réduction de la puissance consommée par kVA.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.

### **II.6 Les Consommateurs De La Puissance Réactive :**

Les consommateurs de puissance réactive sont des équipements électriques qui nécessitent une certaine quantité de puissance réactive pour fonctionner correctement. La puissance réactive est une composante de la puissance électrique totale qui est nécessaire pour maintenir les champs électromagnétiques des équipements.[3]

#### **II.6.1. Machine à excitation (générateur 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 transmis.

#### **II.6.2. Système de la technologie des semi-conducteurs :**

En électronique de puissance, le facteur de puissance est différent de  $\cos \varphi$  car le régime est alternatif non sinusoïdal. Il est bien connu que les systèmes d'électronique de puissance ont facteur de puissance relativement faible, ce qui entraîne beaucoup de consommation puissance réactive.

On peut également citer la salle informatique et la consommation de la puissance réactive produite dans les ménages par des récepteurs basés sur l'électronique de puissance (lampes LBC, etc.).

### **II.7 Les producteurs de la puissance réactive :**

#### **II.7.1. 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. [4]

#### **II.7.2. Câble sous-terrain**

A vide les lignes électriques fournissent de l'énergie réactive, grâce aux réactances capacitatives des lignes. La capacité des lignes électriques formées par des câbles est plus importante que leur résistance et leurs inductances ,Ces lignes font généralement office d'inducteurs, cette caractéristique du câble (grande capacité) qui rend son utilisation limitée. Surtout pour la transmission d'énergie sur de longues distances. [4]

#### **II.7.3. 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-chargé. Ces lignes aériennes deviennent capacitives, par conséquent génératrices de puissance réactive. [4]

## II.8 L'effet de la puissance réactive dans le réseau électrique :

### II.8.1. Chute de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est donc inférieure à la fin de la ligne qu'à son point d'origine. Et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante. La tension d'un réseau où la consommation est éloignée de la production sera différente d'un réseau où la production et la consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, Les nœuds du réseau où les centrales débitent présentent une tension élevée, tandis que les points de consommation éloignés des centrales présentent une tension relativement basse. [5]

Considérant maintenant sur la figure II.3 le schéma équivalent d'une ligne de transmission, d'impédance complexe  $Z = R + jX$ , et destinée à alimenter la charge  $Z_c$ . La tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance :

$$S_2 = P_2 + j Q_2 \quad (II.19)$$

(Voir figure II.3):

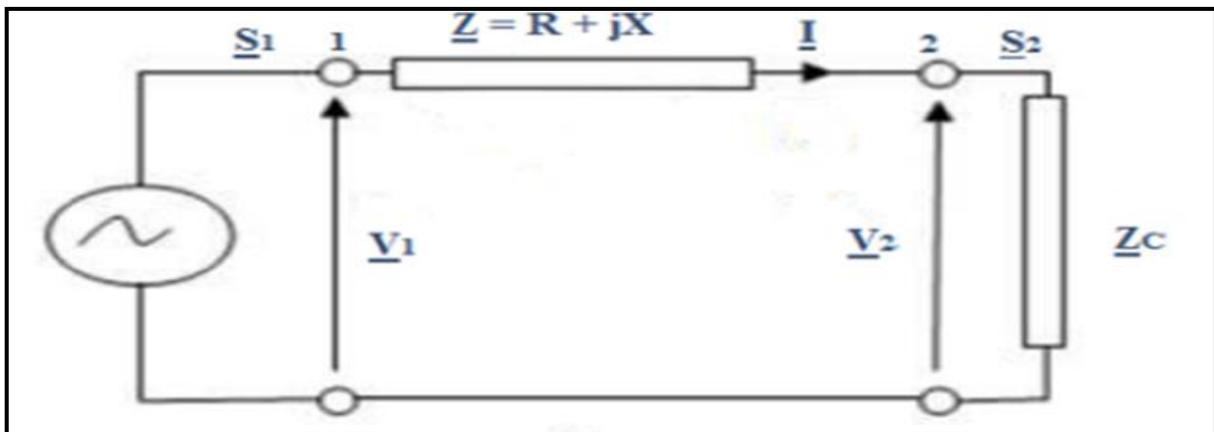


Figure II-3 circuit équivalent du réseau électrique.

Les puissances apparentes :

$$S_1 = P_1 + j Q_1 \quad (II.20)$$

$$S_2 = P_2 + j Q_2 \quad (II.21)$$

La relation qui relie les tensions est donnée par :

$$V_1 = V_2 + R.I + jX.I \quad (II.22)$$

Le diagramme vectoriel des tensions est représenté sur la Figure II.4 :

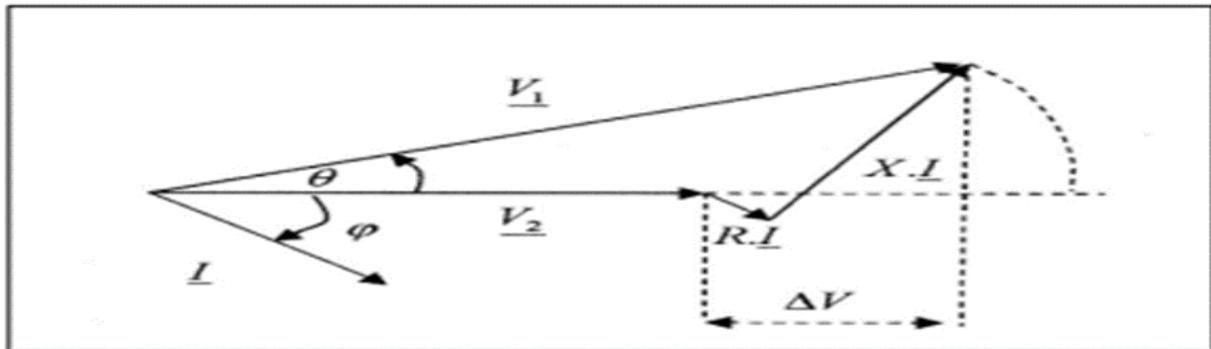


Figure II-4 Le diagramme vectoriel des tensions.

En cas de faible charge du réseau, le diagramme des tensions conduit à assimiler la chute de tension  $\Delta V$  à :

$$\Delta V = V_1 \cdot \cos \varphi - V_2 \quad (\text{II.23})$$

L'angle de transport étant petit (réseau peu chargé), si  $\varphi$  désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité du récepteur 2, pour un réseau monophasé, on peut écrire :

$$\Delta V = R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi \quad (\text{II.24})$$

$$\Delta V = R \cdot I \cdot \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + X \cdot I \cdot \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi \quad (\text{II.25})$$

$$\Delta V = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V_2} \quad (\text{II.26})$$

U est considérée comme la tension interphase du réseau triphasé correspondant à V,P et Q sont les transitions triphasées de puissance et obtiennent la différence de tension relative :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U^2} \quad (\text{II.27})$$

Pour les lignes de transport (HT), nous pouvons supposer que  $R \ll X$  ( $R \rightarrow 0$ ) . L'écart de tension entre deux points du réseau sera réduit à :

$$\Delta U = \frac{X \cdot Q}{U} \quad (\text{II.28})$$

Cette dernière relation montre bien que la chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par la charge.

### II.8.2. Inconvénient d'un faible facteur de puissance :

Un faible facteur de puissance dans un système électrique présente plusieurs inconvénients qui peuvent affecter la stabilité, l'efficacité et la qualité de l'électricité fournie. tels que :

- a) Intensité de courant en ligne trop élevée: 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.

Pour utiliser le même courant actif  $I_a$  (pour une tension  $U$  constante) il faut fournir plus de courant ( $I_2 > I_1$ ) car le  $\cos \varphi$  est faible (l'angle  $\varphi$  élevé) (voir figure II.5) :

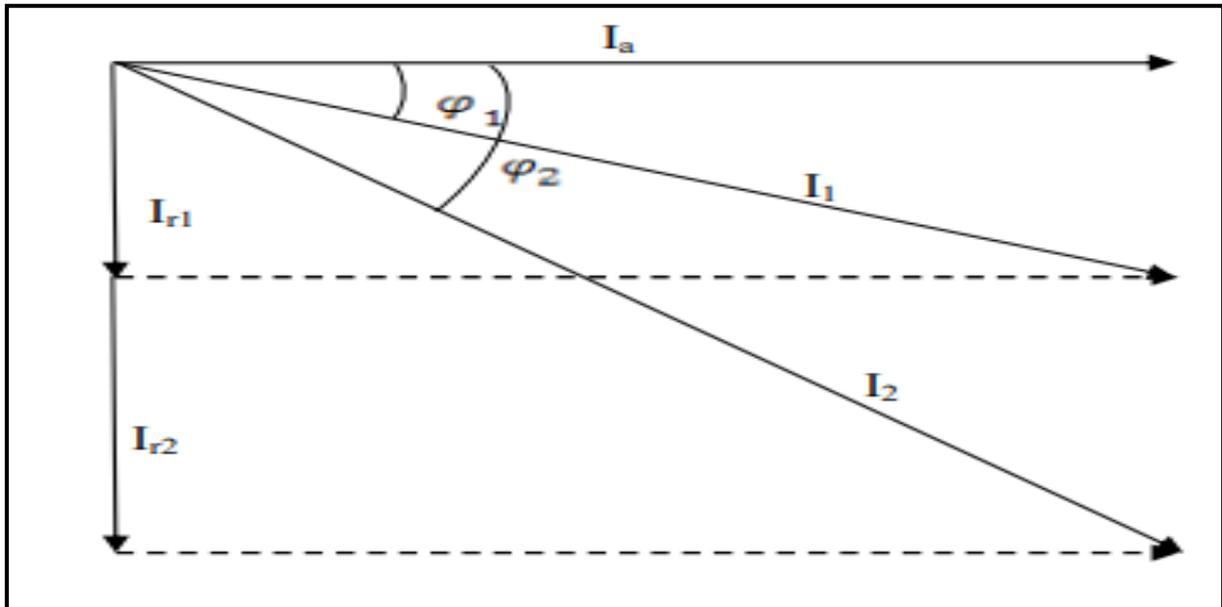


Figure II-5 Influence du  $\cos \varphi$  sur la valeur du courant apparent.

Ainsi, l'augmentation du courant entraîne une circulation d'énergie réactive qui entraîne ce qui suit :

- Une surcharge et une surchauffe supplémentaires des transformateurs et des câbles entraînent une perte d'énergie active.
  - Des chutes de tensions.
- b) Augmentation de la puissance apparente en kVA : Pour une même puissance active  $P$  utilisée, la figure II.6 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.

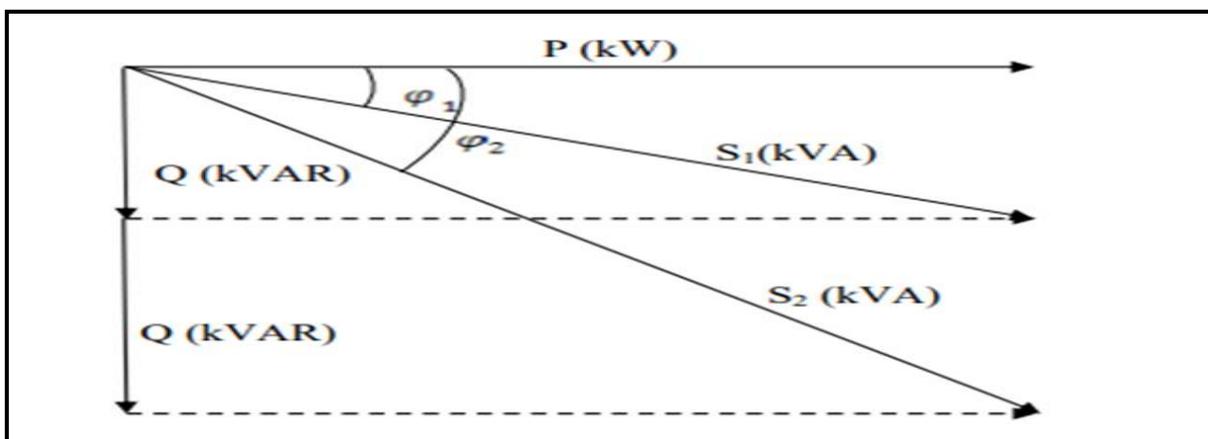


Figure II-6 Influence du  $\cos \varphi$  sur la valeur de la puissance apparente.

- c) La facturation de l'énergie réactive.
- d) Saturation des transformateurs.
- e) Dégradation de la qualité de l'installation électrique.

### **II.8.3. Surdimensionnement général du réseau :**

Les réseaux de transport assurent la liaison entre les centres de production et les zones de consommation. Ils permettent aussi d'échanger de la puissance à travers les lignes d'interconnexion, entre pays ou grandes zones relevant des gestionnaires de réseaux différents. Les sites de production d'énergie électrique sont fréquemment 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. [5]

#### **II.8.3.1. Alternateur :**

Le dimensionnement du circuit magnétique limite la puissance réactive délivrée par l'alternateur à une valeur nominale qui correspond au facteur de puissance spécifié.

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

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \quad (\text{II.29})$$

Parce que P et U sont constants, le facteur de puissance diminue par rapport à sa valeur nominale et l'échauffement sera) élevé. Étant donné que le facteur de puissance est limité, dans cet état, la puissance apparente S augmente, c'est-à-dire surdimensionner le générateur.

#### **II.8.3.2. 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

#### **II.8.3.3. Les lignes de transport d'énergie :**

Les lignes électriques produisent de l'énergie réactive en cas à vide , grâce aux réactances capacitatives des lignes. En service , le réseau est traversé par un courant plus important. Par conséquent, la chute de tension de la ligne devient importante.

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. [5]

#### **II.8.3.4. Jeux de barres :**

L'augmentation du courant résultant d'un excès de puissance réactive entraîne une augmentation des courants de Foucault dans les barres. cela provoque un échauffement de ces

derniers, ce qui entraîne leur expansion. Afin de résoudre ce problème, il est nécessaire de surdimensionner les jeux de barres [5].

#### II.8.4. Rendement des appareils électriques :

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

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (II.30)$$

Avec :

$P_u$  : Puissance utile [W]

$P_{abs}$  : Puissance absorbé [W]

or:

$$P_u = P_{abs} - \Delta P \quad (II.31)$$

Avec :

$\Delta P$  : perte de puissance [W]

$$\eta = \frac{P_{abs} - \Delta P}{P_{abs}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_u + \Delta P} \quad (II.32)$$

Lorsque l'énergie réactive est suffisamment élevée, le facteur de puissance diminue, ce qui entraîne une augmentation du courant et une augmentation des pertes par effet Joule, qui sont une fonction quadrature du courant. De plus, cela entraîne inévitablement une baisse du rendement du récepteur.

#### II.8.5. Tarification de l'énergie réactive :

Un facteur de puissance bas signifie que l'installation consomme plus d'énergie réactive par rapport à l'énergie active qu'elle utilise réellement pour effectuer un travail. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires pour les fournisseurs d'électricité. (le prix du kilowattheure va augmenter) ce qui conduit à des réseaux généralement surdimensionnés, donc les consommateurs organismes de protection (SONELGAZ, EDF, etc.) exigent des utilisateurs (usines) qu'ils augmentent leur facteur de puissance. Sinon ils ont de bonnes raisons pour les pénaliser.

### II.9 Le Concept De Compensation:

#### II.9.1. Objectif de la compensation

Les réseaux de transport et d'interconnexion en très hautes tension (THT) et (HT) permettent d'acheminer l'énergie électrique des centres de productions jusqu'au consommateur à tout instant. Précédemment nous avons vu que le transit de la puissance réactive engendre des perturbations (pertes joule et chutes de tension) et surdimensionnement du réseau., or que cette puissance est indispensable pour faire fonctionner les machines et les transformateurs, il est donc nécessaire de produire l'énergie réactive auprès de la demande pour :

- La diminution de la chute de tension.
- Eviter le surdimensionnement des réseaux.

- 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.

### **II.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté une étude détaillée concernant les profils de la tension, courant et l'écoulement de la puissance active et réactive sur les lignes de transport d'énergie électrique en régime permanent.

Les lignes longues ont un impact significatif sur la régulation de la tension et la stabilité du réseau. En outre, il est démontré qu'il est nécessaire de compenser ces lignes pour respecter les deux contraintes fondamentales du transport d'énergie électrique.

Dans ce chapitre, les critères justifiant la compensation des lignes sont essentiellement des critères de régime permanent : maintien de la tension en régime permanent à une valeur acceptable et augmentation de la puissance transportable de façon stable. Cependant, l'utilisation simultanée de la compensation série et de la compensation shunt inductive est très importante pour avoir une qualité d'énergie transportée le long de la ligne. La compensation conventionnelle (séries et shunts) et la compensation moderne utilisant les dispositifs FACTS (basées sur l'électronique de puissance) seront traitées en détail dans le prochain chapitre.

# **CHAPITRE III:**

**Techniques de compensation de la puissance réactive**

**III.1 INTRODUCTION :**

Le terme compensation est utilisé pour décrire l'insertion de dispositifs de puissance réactive (capacitifs ou inductifs) dans le réseau pour obtenir l'effet souhaité peut inclure l'amélioration du profil de la tension, un facteur de puissance amélioré, des performances de stabilité améliorées et une capacité de transmission améliorée. cette appareils réactifs sont connectés en série ou en parallèle (shunt).

Les techniques de compensation sont constituées soit par des machines tournantes ou par des condensateurs. Ces condensateurs de base sont regroupés en série ou en parallèle pour créer des batteries de condensateurs.

L'association des condensateurs et des bobines d'inductances commandés par des thyristors permet de réaliser des systèmes statiques (FACTS), capables de produire ou d'absorber la puissance réactive est continuellement comprise entre deux limites. [6]

**III.2 Compensations traditionnelles :**

**III.2.1. Compensateurs synchrones**

Ce sont les alternateurs et les moteurs synchrones. En agissant sur le courant d'excitation, on fait varier la puissance réactive de la machine. Pour un fort courant d'excitation, la machine fournie de la puissance réactive ( $Q > 0$ ) et pour un faible courant d'excitation, elle absorbe de la puissance réactive ( $Q < 0$ ). Les machines synchrones peuvent donc fournir une partie de la puissance réactive demandée.

D'après la théorie de Potier, le modèle simplifié d'une machine synchrone est représenté sur la figure III.1 par une source de tension  $E$  en série avec une inductance. [6]

$X_d = (R \ll X_d)$

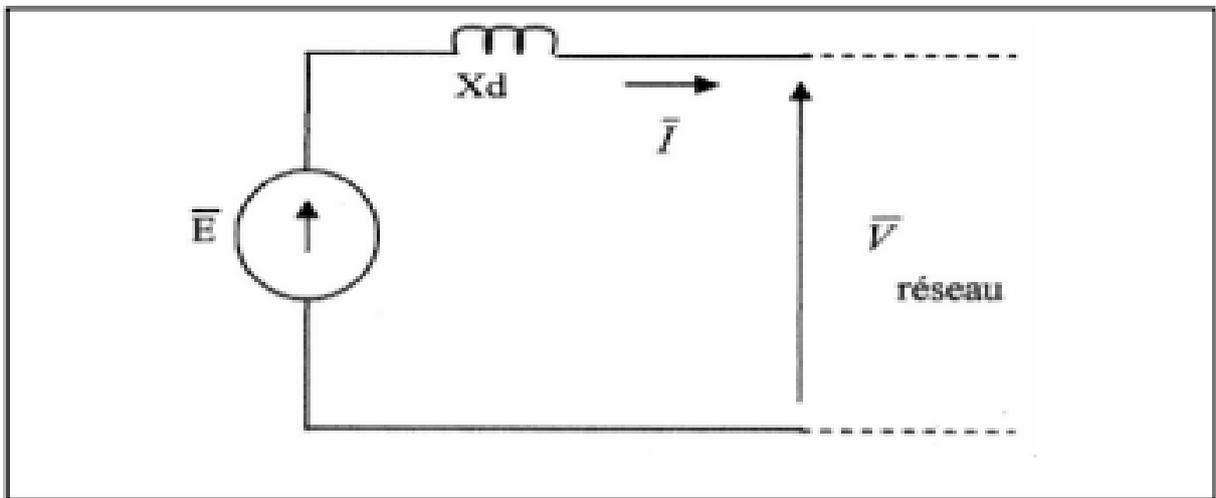


Figure III-1 Schéma équivalent de la machine synchrone.

De la figure II.1, on tire l'équation des tensions suivante :

$\bar{E} = \bar{V} + jX_d \bar{I}$  (III.1)

La puissance active consommée par le condensateur est donnée par :

$P = 3V.I. \cos \varphi$  (III.2)

La puissance réactive aussi est donnée par:

$$Q = 3V.I. \sin \varphi \quad (III.3)$$

Voir figure (III.2):

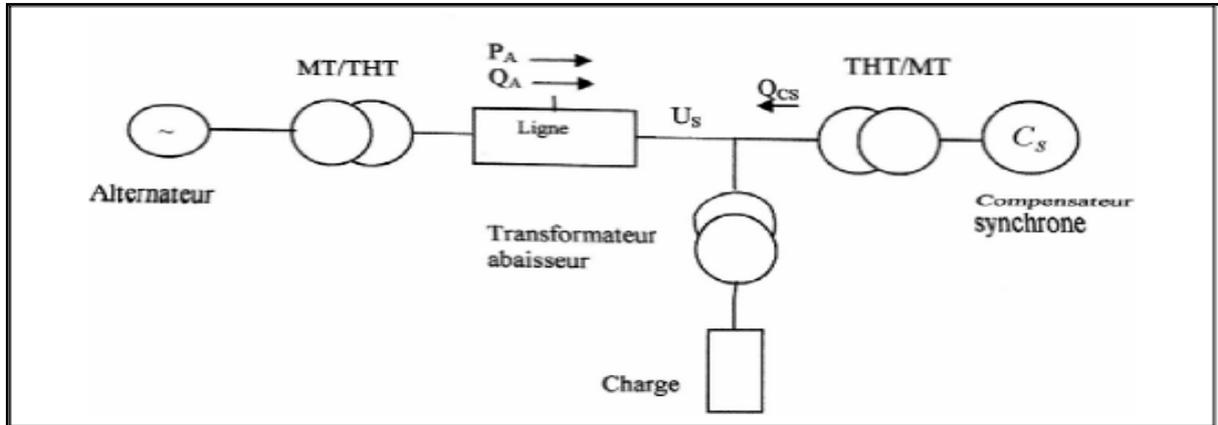


Figure III-2 Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau.

Le raccordement du compensateur synchrone au réseau se fait à travers un transformateur survolteur comme le montre la figure III.2, le compensateur est branché à côté de la charge pour réduire la portée du transit de la puissance réactive.

### III.2.2. Batterie de condensateur

La compensation par les batteries de condensateurs est une méthode largement utilisée dans les systèmes électriques pour corriger les déséquilibres de l'énergie réactive. Ces batteries sont constituées de plusieurs condensateurs connectés en parallèle et sont utilisées pour fournir une compensation statique de l'énergie réactive dans un réseau électrique. [6]

Les batteries de condensateurs fournissent une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de ces batteries :

**Batteries de condensateurs HT :** Raccordées aux jeux de barres HT/MT des postes THT/HT, son rôle important est de compenser la perte réactive des réseaux HT et THT, mais une partie d'entre elles participent également à la compensation des charges ; leur puissance est de l'ordre de 20 à 30 MVAR et représentent environ 20% du parc des condensateurs installés.

**Batteries de condensateurs MT :** Raccordées aux jeux de barres HT/MT des postes ou THT/MT ; leur rôle principal est de compenser l'appel total de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport ; n fonction du réglage de la tension MT, l'installation et le réglage dimensionnel seront effectués au cas par cas. En pratique, les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins de 2,3 ou 4 MVAR, chaque gradin à sa propre commande et l'ensemble dépend de la puissance des transformateurs HT/MT auxquels ils sont raccordés. Le dimensionnement de la taille des gradins est fait de manière à limiter environ 5% de la variation de tension maximale sur le jeu de barres MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

**III.2.2.1. Installation série:**

Les batteries en série sont peu utilisées sur les réseaux, surtout à moyenne et basse tension. Par contre, sur les lignes de transport à grande distance, sous des tensions supérieures à 220kV, leur utilisation est fréquente et leur puissance réactive est toujours importante. Ces batteries jouent, en plus de l'amélioration de la capacité de transport d'énergie du réseau d'autres rôles :

- Maintien de la tension d'un réseau à facteur de puissance normal.
- Répartition des charges, dans le cas de lignes fonctionnant en parallèle

Les puissances des batteries en série atteignent quelques centaines de méga vars. Elles comportent des plates-formes isolées, à la même tension que la ligne.

Considérons les calculs de la puissance de la batterie de condensateur à installer afin de compenser la chute de tension sur un réseau. La Figure III.3 montre un modèle de réseau sur lequel un condensateur série est installé.

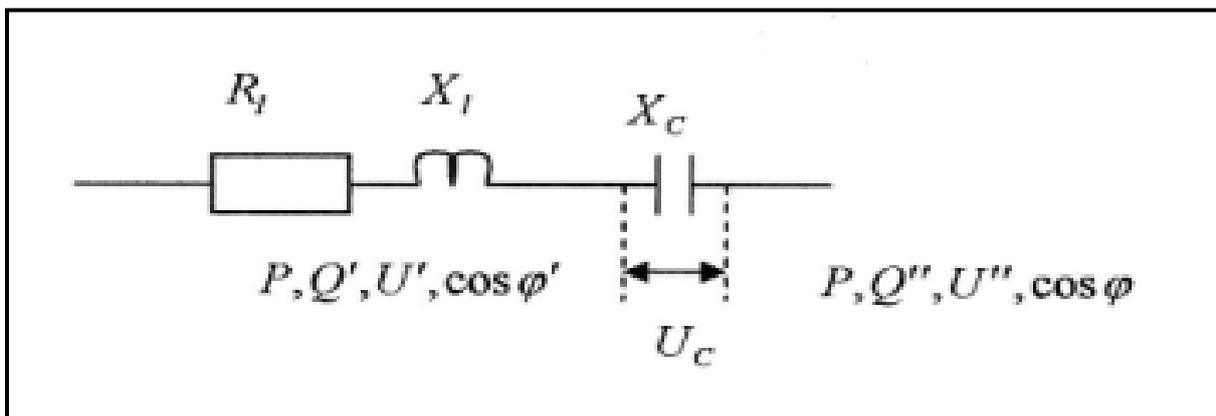


Figure III-3 Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série.

La puissance active P est considérée constante avant et après le condensateur, cependant les paramètres Q', U' et cos phi' sont considérés à l'amont, Q'', U'' et cos phi à l'aval du condensateur.

$$P = \sqrt{3}U'.\cos \varphi' .I \quad \text{de l'amont} \quad (III.4)$$

$$P = \sqrt{3}U''.\cos \varphi .I \quad \text{de l'aval} \quad (III.5)$$

$$\frac{P}{P} = \frac{U'.\cos \varphi'}{U''.\cos \varphi} = 1 \quad \cos \varphi' = \frac{U''}{U'} .\cos \varphi \quad (III.6)$$

$$tg \varphi' = \frac{\sqrt{1-\cos^2 \varphi'}}{\cos \varphi'} = \frac{\sqrt{U'^2-U''^2 \cos \varphi}}{U''.\cos \varphi} \quad (III.7)$$

sachant que :  $tg \alpha = \frac{\sqrt{1-\cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}$        $\alpha$  : angle quelconque

La puissance compensée est de:

$$Q_c = Q' - Q'' = P(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi') \quad (\text{III.8})$$

$$Q_c = P \left( \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} - \frac{\sqrt{U'^2 - U''^2 \cos^2 \varphi}}{U'' \cdot \cos \varphi} \right) \quad (\text{III.9})$$

$$Q_c = \frac{P}{\cos \varphi} \left( \sin \varphi - \sqrt{\left(\frac{U'}{U''}\right)^2 - \cos^2 \varphi} \right) \quad (\text{Puissance compensée}) \quad (\text{III.10})$$

### III.2.2.2. Installation shunt:

Une batterie de condensateurs shunt est une installation en dérivation du réseau. Elle est raccordée entre phases, ou entre phase et neutre. Les batteries peuvent être installées en simple étoile ou en double étoile, quand elles sont raccordées entre phase et neutre ou terre. Elles sont installées en triangle, quand elles sont entre phases. Les batteries shunts sont le plus souvent utilisées sur les réseaux

Elles peuvent être :

- Uniques : Lorsque leur puissance réactive est faible et la charge relativement stable
- Multiples ou fractionnées : Ce type de compensation est communément appelé en « gradins » (condensateur + disjoncteur). Ce type de batterie est très utilisé par certaines grosses industries (forte puissance installée) et les distributeurs d'énergie (dans les postes sources). Il permet une régulation pas par pas de l'énergie réactive.

Considérons maintenant le schéma de la figure (III.4), qui montre le bus de puissance ( $P+jQ$ ) alimentant la charge à travers la ligne, tous deux représentés par une seule impédance ( $R+jL\omega$ ). En supposant que la charge a un faible facteur de puissance, une batterie de condensateurs shunt de puissance( $jQ_c$ ) est installée.

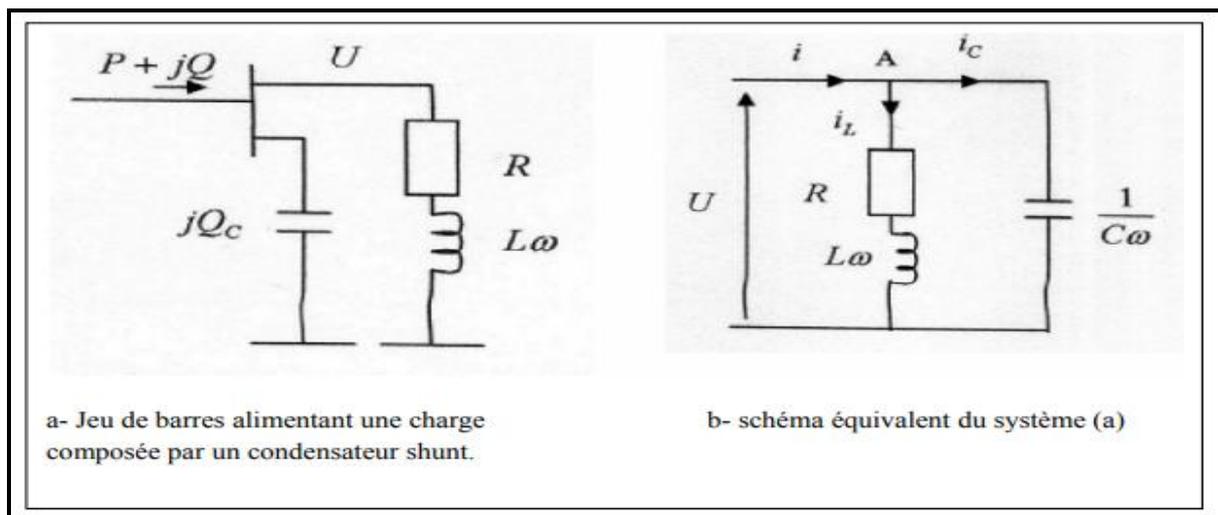


Figure III-4 Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre.

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

- **Avant compensation** : Nous avons au nœud A de la figure III.4.b :

$$i = i_C + i_L \quad (III.11)$$

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

$$i_C = 0 \quad (III.12)$$

Et

$$i = i_L = I_m^{\angle \varphi_1} \quad (III.13)$$

$$\dot{I} = I_m \cdot \cos \varphi_1 + j I_m \cdot \sin \varphi_1 \quad (III.14)$$

D'où

$$\varphi_1 = \text{artg}\left(\frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1}\right) \quad (III.15)$$

Le facteur de puissance d'avant compensation vaut alors :

$$\cos \varphi_1 = \cos\left[\text{artg}\left(\frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1}\right)\right] \quad (III.16)$$

- **Après compensation** :

$$i = i_C + i_L \quad (III.17)$$

$$\text{avec: } i = I_m^{\angle \varphi_2}; \quad i_m = I_{mL}^{\angle \varphi_1} \text{ et } i_C = I_{mC}^{\angle +\frac{\pi}{2}} \quad (III.18)$$

Alors :

$$I_m^{\angle \varphi_2} = I_{mL}^{\angle \varphi_1} + I_{mC}^{\angle +\frac{\pi}{2}} \quad (III.19)$$

$$I_m \cdot \cos \varphi_2 + j I_m \cdot \sin \varphi_2 = I_{mL} \cdot \cos \varphi_1 + j I_{mL} \cdot \sin \varphi_1 + j I_{mC} \quad (III.20)$$

$$= I_{mL} \cdot \cos \varphi_1 + j(I_{mC} + I_{mL} \cdot \sin \varphi_1) \quad (III.21)$$

$$\varphi_2 = -\text{arctg}\left(\frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2}\right) = \text{arctg}\left(\frac{I_{mC} + I_{mL} \cdot \sin \varphi_1}{I_{mL} \cdot \cos \varphi_1}\right) \quad (III.22)$$

$$= \text{arctg}\left(\frac{I_{mC} + I_{mL} \cdot \sin \varphi_1}{I_{mL} \cdot \cos \varphi_1}\right) \quad (III.23)$$

$$= \text{arctg}\left(\frac{\sin \varphi_1 + \frac{I_{mC}}{I_{mL}}}{\cos \varphi_1}\right) \quad (III.24)$$

Le facteur de puissance après compensation vaut alors:

$$\cos \varphi_2 = \cos \left[ \arctg \left( \frac{\sin \varphi_1 + \frac{Imc}{ImL}}{\cos \varphi_1} \right) \right] \quad (III.25)$$

On voit bien que:

$$\varphi_{2(\text{après comp})} < \varphi_{1(\text{avant comp})} \implies \cos \varphi_{2(\text{après comp})} > \cos \varphi_{1(\text{avant comp})} \quad (III.26)$$

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

- Pour déterminer la puissance du condensateur, référent-nous à la figure (III.5) représentant les diagrammes vectoriels des différents courants.

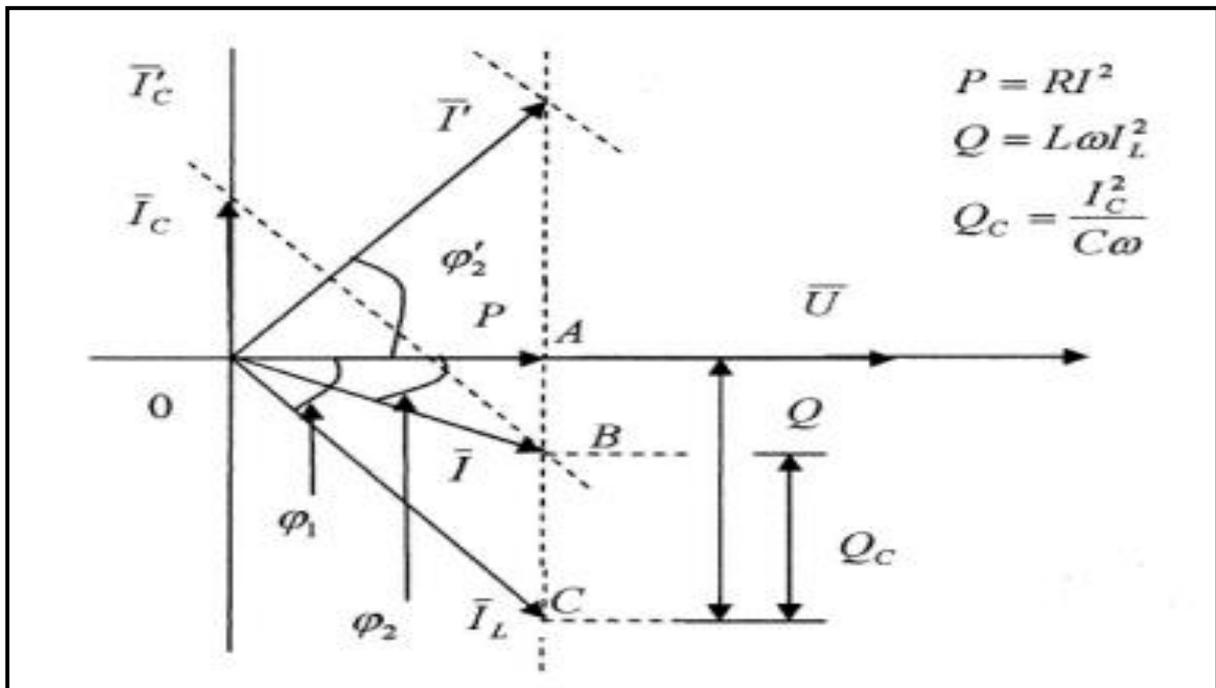


Figure III-5 Diagramme vectoriel du schéma de la figure III.4

Nous avons :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q}{P} \quad (III.27)$$

Du triangle (AOC) on déduit :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{AC}{OA} \quad (III.28)$$

Du triangle (OAB) on déduit :

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{AC-AB}{OA} = \frac{Q-Q_C}{P} = \frac{Q}{P} - \frac{Q_C}{P} = \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{Q_C}{P} \quad (III.29)$$

Finalement, la puissance du condensateur est :

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (III.30)$$

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

### III.2.2.3. Les modes de compensation par batteries :

Dans une installation électrique les batteries de condensateurs peuvent être implantées à trois niveaux différents : [6]

#### III.2.2.3.1. La compensation globale :

Pour une compensation globale, la batterie est raccordée en tête d'installation et garantit la compensation pour l'ensemble des charges. C'est LA solution la plus courante utilisée pour éliminer les pénalités imposées par le gestionnaire de réseau. Une solution qui permet aussi de soulager le poste de transformation. (Voir figure III.6)

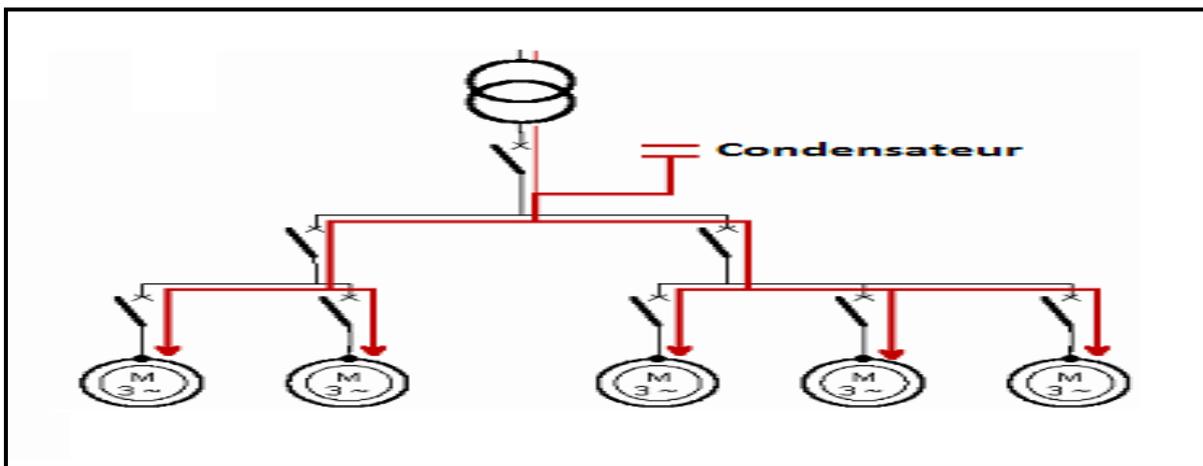


Figure III-6 Compensation globale.

#### III.2.2.3.2. Compensation partielle ou par secteur :

Pour une compensation partielle ou par secteurs, la batterie est implantée au niveau du groupe d'installations à compenser. Lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers avec des régimes de charge différents, c'est la solution préconisée. (Voir figure III.7)

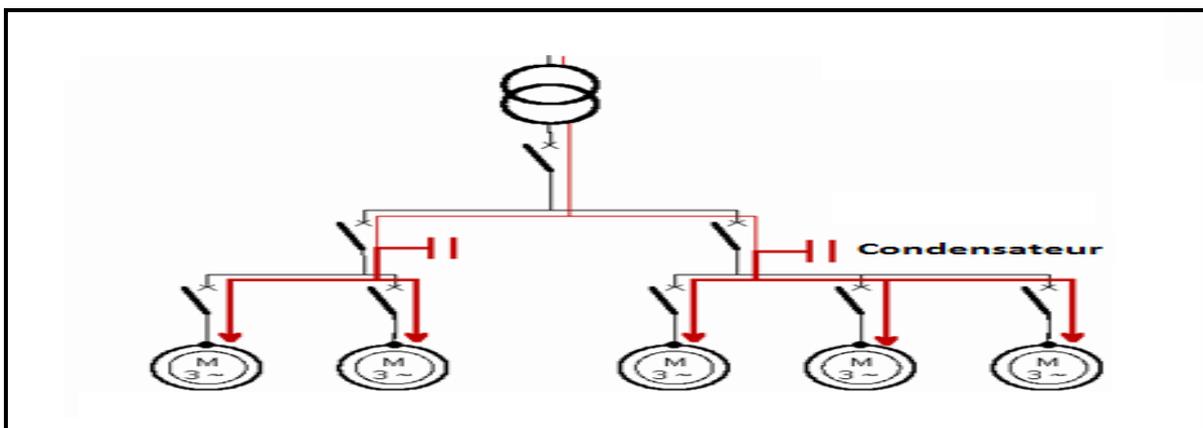


Figure III-7 Compensation partielle

### III.2.2.3.3. Compensation individuelle :

La batterie de condensateur est raccordée directement aux bornes de récepteurs. Elle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur. Elle constitue la solution idéale techniquement pour les gros consommateurs, l'énergie réactive étant produite là où elle est consommée, et en fonction de la demande.

(Voir figure III.8)

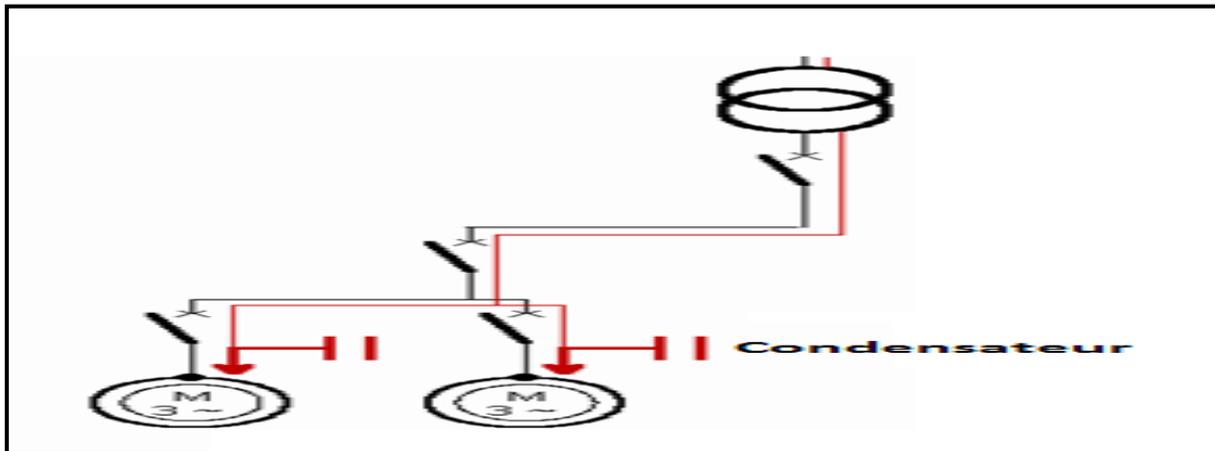


Figure III-8 Compensation individuelle.

### III.2.3. Inductances :

L'inductance complète le rôle de la batterie de condensateurs pour assurer la stabilité de la tension. En effet, pendant la période hors pointe de surcharge, la puissance réactive générée n'est pas totalement consommée par les consommateurs.

Des inducteurs sont donc installés sur les lignes THT ou HT pour stocker cet excédent d'énergie réactive et éviter qu'il ne transite par la ligne.

Cela soulage les surtensions sur le et renvoie cette énergie au réseau selon les besoins. [6]

Pour comprendre cette technique, nous avons sélectionné un exemple du réseau EDF. (Voir figure III.9)

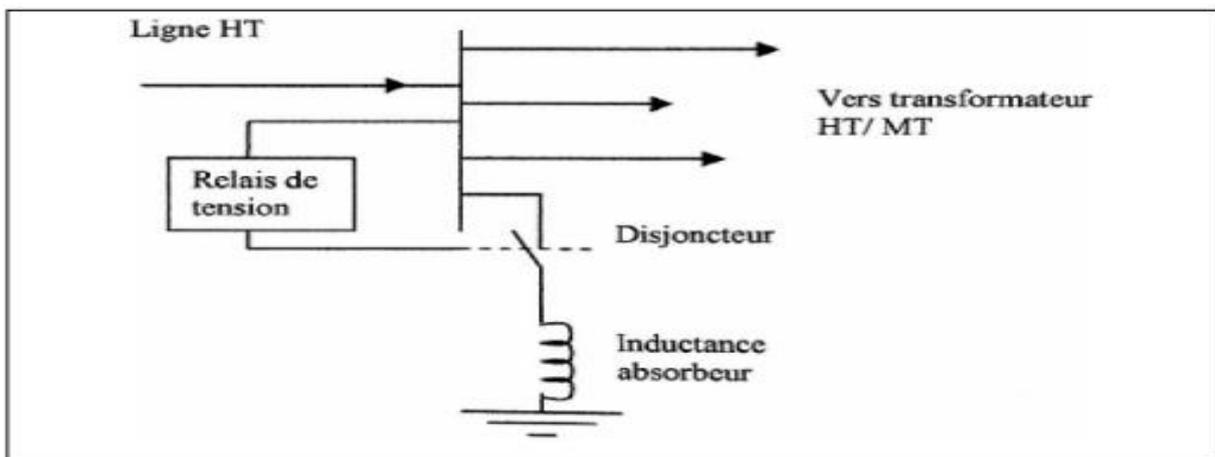


Figure III-9 Schéma de montage d'un absorbeur sur un jeu de barres HT.

Le relais de tension connecte l'inductance au réseau dans le cas suivant :

À des tensions supérieures à la tension maximale de fonctionnement du jeu de barres, le relais réglé exactement sur cette valeur détectera cette surtension, et une fois le disjoncteur fermé, cette surtension sera immédiatement absorbée par l'inducteur .

Le courant circulant à travers l'inductance crée une chute de tension qui réduit la tension au niveau de la barre omnibus à la tension réglée .

Le disjoncteur s'ouvre uniquement lorsque la tension atteint à nouveau la valeur de fonctionnement.

### **III.2.4. Les transformateurs déphaseurs PST :**

Un transformateur déphaseur, parfois aussi appelé transformateur phaseur, est un dispositif utilisé dans les circuits électriques pour produire un déphasage contrôlé entre les tensions ou les courants. Contrairement à un transformateur de puissance standard qui conserve généralement la même phase entre l'entrée et la sortie, un transformateur déphaseur est conçu spécifiquement pour introduire un décalage de phase entre les signaux.

Ce type de transformateur est souvent utilisé dans diverses applications, notamment dans les circuits d'amplificateurs audio, les réseaux électriques pour la compensation de la puissance réactive, et dans les systèmes de contrôle de la transmission d'énergie électrique.

Le principe de fonctionnement repose sur la configuration spécifique des enroulements primaire et secondaire du transformateur. En ajustant les caractéristiques de conception du transformateur, telles que le nombre de spires et le couplage magnétique entre les enroulements, il est possible de contrôler précisément le déphasage entre les signaux. [6]

La figure III.10 ci-dessous montre l'effet d'un transformateur déphaseur sur un système électrique composé d'un générateur de 100 MW et de deux lignes parallèles.

L'un d'entre eux est équipé d'un transformateur déphaseur et ses prises sont numérotées de 1 à 19, 10 étant la prise principale.

Sur la photo de gauche, le changeur de prise du transformateur déphaseur est sur la prise principale, il n'y a pas de déphasage et son effet est nul.

Les deux lignes électriques transportent 50 mégawatts de puissance.

Dans le schéma de droite, le transformateur déphaseur fournit un déphasage qui renvoie 73 MW vers l'autre ligne.

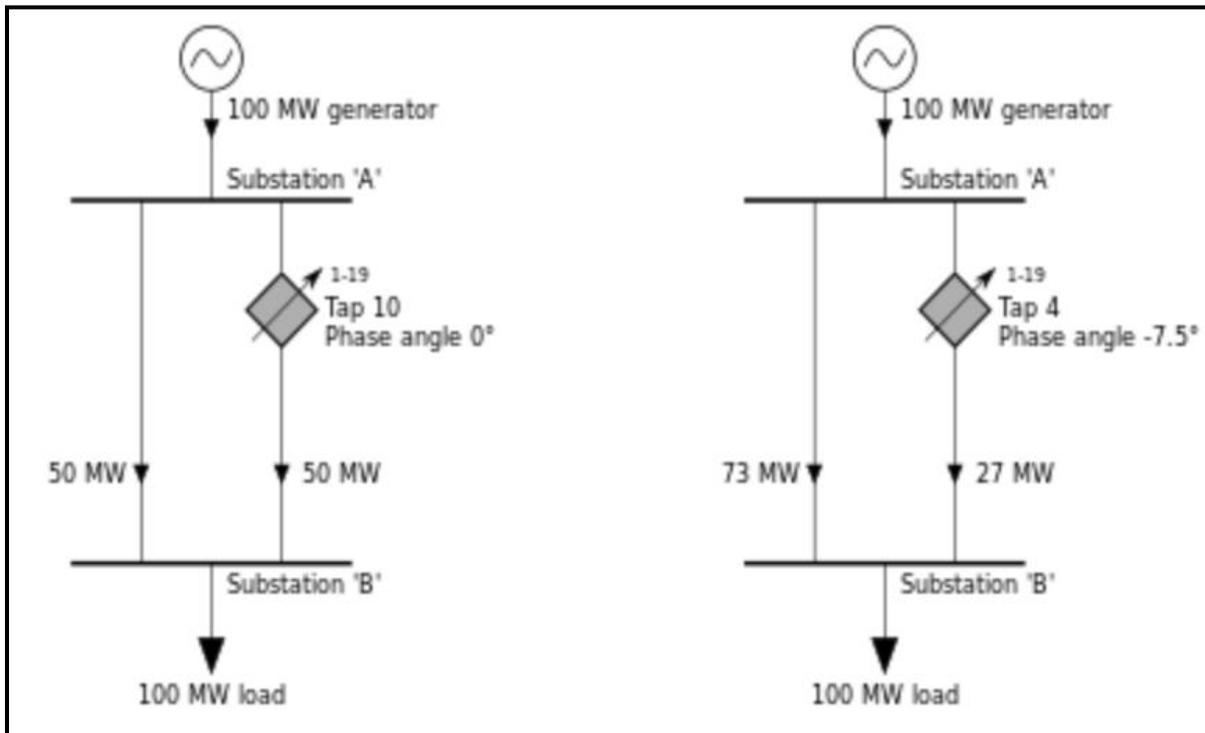


Figure III-10 Effet du fonctionnement d'un transformateur déphaseur.

### III.3 Compensation moderne (FACTS) :

#### III.3.1. Concepts de base et définitions:

Les problèmes des réseaux énoncés ci-dessus devenant plus présents d'année en année, EPRI (Electric Power Research Institute), qui représente un consortium dédié à la recherche dans les réseaux électriques et regroupant des compagnies d'électricité américaines, a lancé en 1988 le concept FACTS (Flexible AC Transmission System) qui est un projet à long terme. La technologie FACTS utilise l'électronique de puissance et plus particulièrement des systèmes à thyristors qui permettent d'obtenir des vitesses de commande nettement supérieures à celles des systèmes mécaniques qui sont encore largement utilisés, et un niveau de maintenance bien inférieur car les systèmes mécaniques s'usent beaucoup plus rapidement que les systèmes statiques. Les systèmes FACTS sont les suivants :

- **Compensateurs statique d'énergie réactive:** ils soutiennent la tension en fournissant de la puissance réactive à l'endroit où ils sont connectés.
- **Condensateurs séries réglables:** ils augmentent la puissance transmise par une ligne en diminuant son impédance apparente.
- **Déphaseurs:** Ce sont des transformateurs à rapport de transformation complexe. Ils permettent donc de régler la puissance transmise par les lignes sur lesquelles ils sont implantés.
- **UPFC (Unified Power Flow Controller):** Ce compensateur est capable de contrôler les trois paramètres qui permettent de modifier le transit de puissance active de la ligne de transport (tension, impédance et déphasage).

En fait, il réunit les fonctions des trois précédents types de FACTS (compensateur shunt, compensateur série et déphaseur).[7]

### III.3.2. Nécessité des dispositifs FACTS :

La compensation de l'énergie réactive des lignes de transmission permet d'ajuster le profil de tension le long de ces lignes tout en conservant un bon contrôle de la puissance active transmise.

Il a été reconnu que la stabilité peut être améliorée si la compensation réactive d'un système de transmission change rapidement, quelle que soit sa nature.

Les méthodes traditionnelles de compensation d'énergie réactive reposent sur des batteries de condensateurs ou des bobines fixes ou contrôlées mécaniquement.

Ces méthodes ne sont pas efficaces pour contrôler les réseaux électriques lors de perturbations graves.

Grâce aux progrès récents de la technologie IGBT et GTO, le temps de réponse de ces appareils a été réduit à quelques millisecondes.

Il est donc possible de répondre à la demande avec des corrections rapides grâce aux appareils FACTS. [8]

### III.3.3. Classification des systèmes FACTS :

Les systèmes FACTS sont classifiés comme étant donnée par la figure suivante:

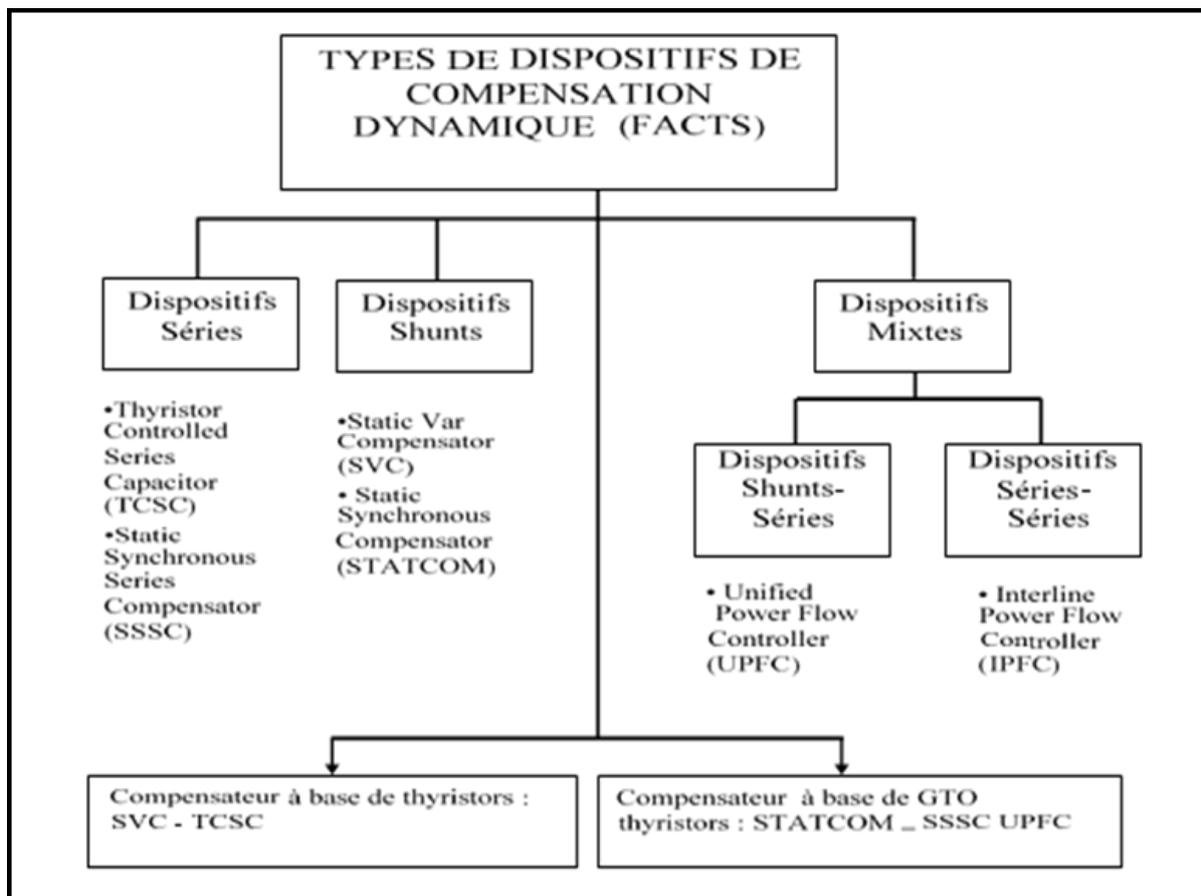


Figure III-11 Classification des systèmes FACTS

**III.3.3.1. Compensateurs séries :**

Les compensateurs séries FACTS (Flexible AC Transmission System) sont des dispositifs électroniques insérés en série dans une ligne de transport d'énergie électrique. Ils injectent une tension variable dans la ligne, ce qui modifie son impédance de manière contrôlée. Cette tension est généralement produite par des thyristors ou des onduleurs et peut être capacitive ou inductive selon l'effet désiré. [9]

**A. Condensateurs séries contrôlés par thyristors TCSC :** la figure suivante représente le schéma d'un TCSC .

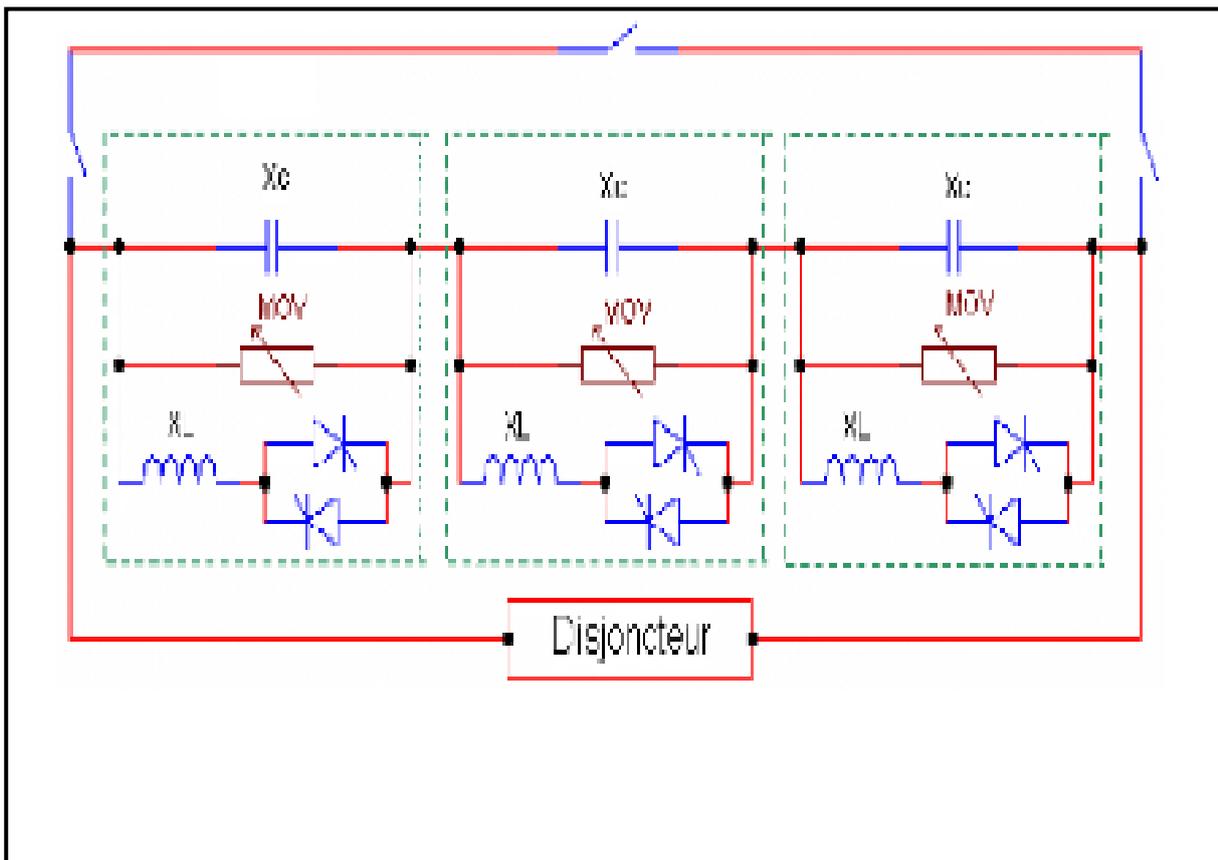


Figure III-12 Schéma d'un TCSC composé de plusieurs modules identiques.

Un condensateur série commandée par thyristors TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) est formé d'une inductance commandée par thyristors en parallèle avec un condensateur. Ce montage permet un réglage continu sur une large gamme de la réactance capacitive à la fréquence fondamentale. Les montages peuvent varier selon les fabricants. La figure (III.12) illustre le schéma du TCSC composé de plusieurs modules identiques tous contrôlés de la même façon. En pratique, une varistance à oxyde métallique ou MOV (*Metal Oxide Varistor*) est insérée en parallèle afin de protéger le condensateur contre les surtensions.

La valeur de l'impédance du TCSC est modifiée en contrôlant le courant circulant dans l'inductance au moyen de la valve à thyristors.

L'expression de l'impédance est donnée par l'équation suivante où  $\alpha$  représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors :

$$X_{\text{TCSC}}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) - LC\omega^2}$$

L'action du contrôle du TCSC est exprimée en termes de pourcentage de compensation donné par :

$$k_c = \frac{x_c}{x_L} \cdot 100\%$$

Trois régimes de fonctionnement peuvent être distingués :

- ✚ **Les thyristors sont bloqués** : Le courant de la ligne passe uniquement par le condensateur. Le TCSC a alors une impédance fixe correspondant à celle du condensateur.
- ✚ **Les thyristors sont en pleine conduction** : L'impédance du TCSC est fixe et correspond à l'impédance équivalente résultant de la mise en parallèle de la capacité et de l'inductance.
- ✚ **Les thyristors sont commandés en conduction partielle** : Un courant de boucle circule dans le TCSC et la réactance apparente de ce dernier est supérieure à celle de la capacité (ou de l'inductance) seule.

### **B. Compensateur réactif contrôlé par thyristor TCSR :**

Le TCSR est un compensateur inductif connecté en série avec la ligne de transmission, constitué d'une inductance  $X_{ind1}$  en parallèle avec une autre inductance  $X_{ind2}$  contrôlée par thyristor fournissant une réactance série inductive variable.

Lorsque l'angle d'amorçage de la réactance contrôlée par le thyristor est de  $180^\circ$ , le thyristor cesse de conduire et la réactance incontrôlable  $X_{ind1}$  agit comme un limiteur de courant de défaut.

Lorsque l'angle d'allumage diminue en dessous de  $180^\circ$ , la réactance équivalente chute à un angle de  $90^\circ$ .

Sous cet angle, nous avons une combinaison parallèle de deux réactances.

Le TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) illustré ci-dessus se compose d'un inducteur (L1) connecté en parallèle et d'un autre inducteur (L2) contrôlé par un thyristor anti-parallèle, fournissant une réactance inductive variable en série. voir figure (III.13)

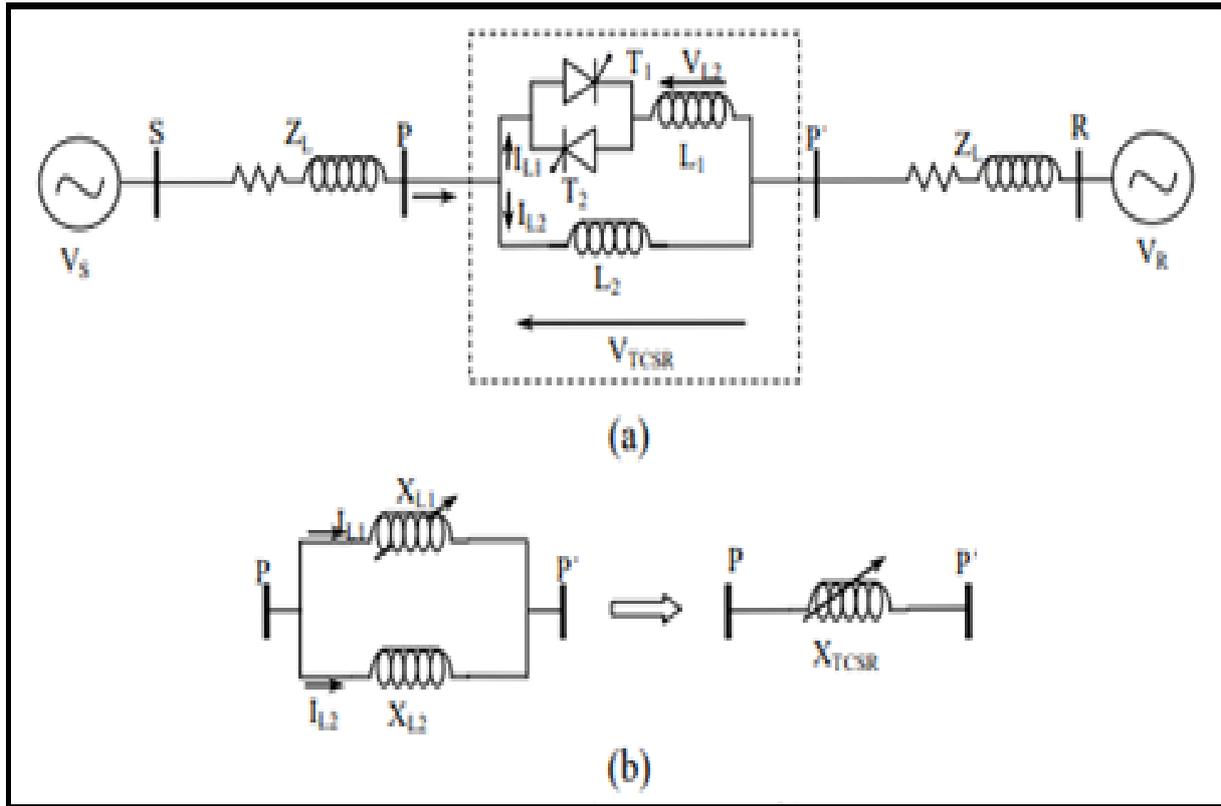


Figure III-13 Système TCSR : a). Montage, b). Réactance apparent

**C. Compensateur synchrone statique série SSSC :**

Le compensateur statique série synchrone SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) est un dispositif FACTS de la deuxième génération. Il est formé d'un onduleur inséré en série dans la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur. Le SSSC agit sur le courant de ligne en insérant une tension en quadrature avec ce dernier, la tension pouvant être capacitive ou inductive. Un SSSC est capable d'augmenter ou diminuer le flux de puissance dans une ligne, voire d'en inverser le sens. Le comportement d'un SSSC peut être assimilé à celui d'un condensateur ou d'une inductance série réglable. La différence principale réside dans le fait que la tension injectée n'est pas en relation avec le courant de ligne. De ce fait, le SSSC présente l'avantage de pouvoir maintenir la valeur de la tension insérée constante, indépendamment du courant. Il est donc efficace tant pour des petites charges (faibles courants) que pour des grandes charges.

(Voir figure III.14).

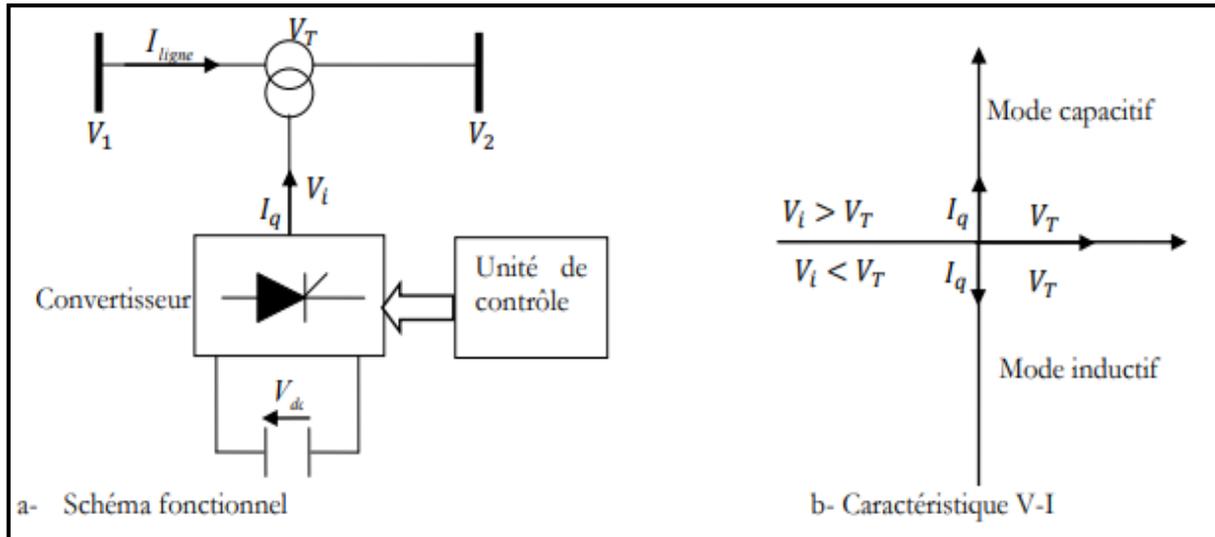


Figure III-14 Compensateur synchrone statique série.

La compensation en série est obtenue en alimentant la ligne de courant à un angle de  $90^\circ$  par rapport au courant.

Cette compensation correspond à un condensateur série à la fréquence fondamentale.

En revanche, si la tension est injectée  $90^\circ$  en avance sur le courant de ligne, la compensation a le même effet qu'une augmentation de l'impédance réactive de la ligne.

### III.3.3.2. Compensateurs shunts :

Les compensateurs de shunt alimentent le réseau via des points de connexion.

Son principe est basé sur des impédances variables connectées en parallèle au réseau et consommant (ou injectant) un courant variable.

Cette injection de courant modifie la puissance active et réactive circulant dans la ligne.

Les compensateurs shunt les plus couramment utilisés sont le SVC et le STATCOM . [10]

#### A. Compensateur statique de l'énergie réactive SVC :

Un SVC (Static VAR Compensator ou Compensateur Statique de Puissance Réactive) est un dispositif de compensation de puissance réactive connecté en dérivation utilisé dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique en courant alternatif (CA). La fonction principale d'un SVC est de réguler la tension à un point spécifique du réseau en contrôlant dynamiquement l'injection ou l'absorption de puissance réactive

Les principaux composants d'un SVC sont:

- Réacteurs commandés par thyristors (TCR): Ce sont des bobines d'inductance contrôlées par des thyristors qui peuvent faire varier l'inductance et absorber de la puissance réactive (VARs inductifs) du système.
- Batteries de condensateurs commutées par thyristors (TSC): Ce sont des bancs de condensateurs qui sont mis en circuit ou hors circuit par des thyristors pour générer ou absorber de la puissance réactive (VARs capacitifs).

- Filtres d'harmoniques: Ce sont des filtres passifs conçus pour absorber les courants harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie du système.
- Système de contrôle: C'est un système de contrôle sophistiqué qui surveille la tension du réseau et ajuste dynamiquement les TCR et les TSC pour maintenir le niveau de tension souhaité.

Le SVC fonctionne en ajustant l'échange de puissance réactive avec le réseau. Lorsque la tension du système est basse, le SVC génère de la puissance réactive (VARs capacitifs) en mettant en circuit des bancs de condensateurs, ce qui aide à augmenter la tension. Inversement, lorsque la tension du système est élevée, le SVC absorbe de la puissance réactive (VARs inductifs) en contrôlant les TCR, ce qui aide à réduire la tension. (Voir figure III.15).

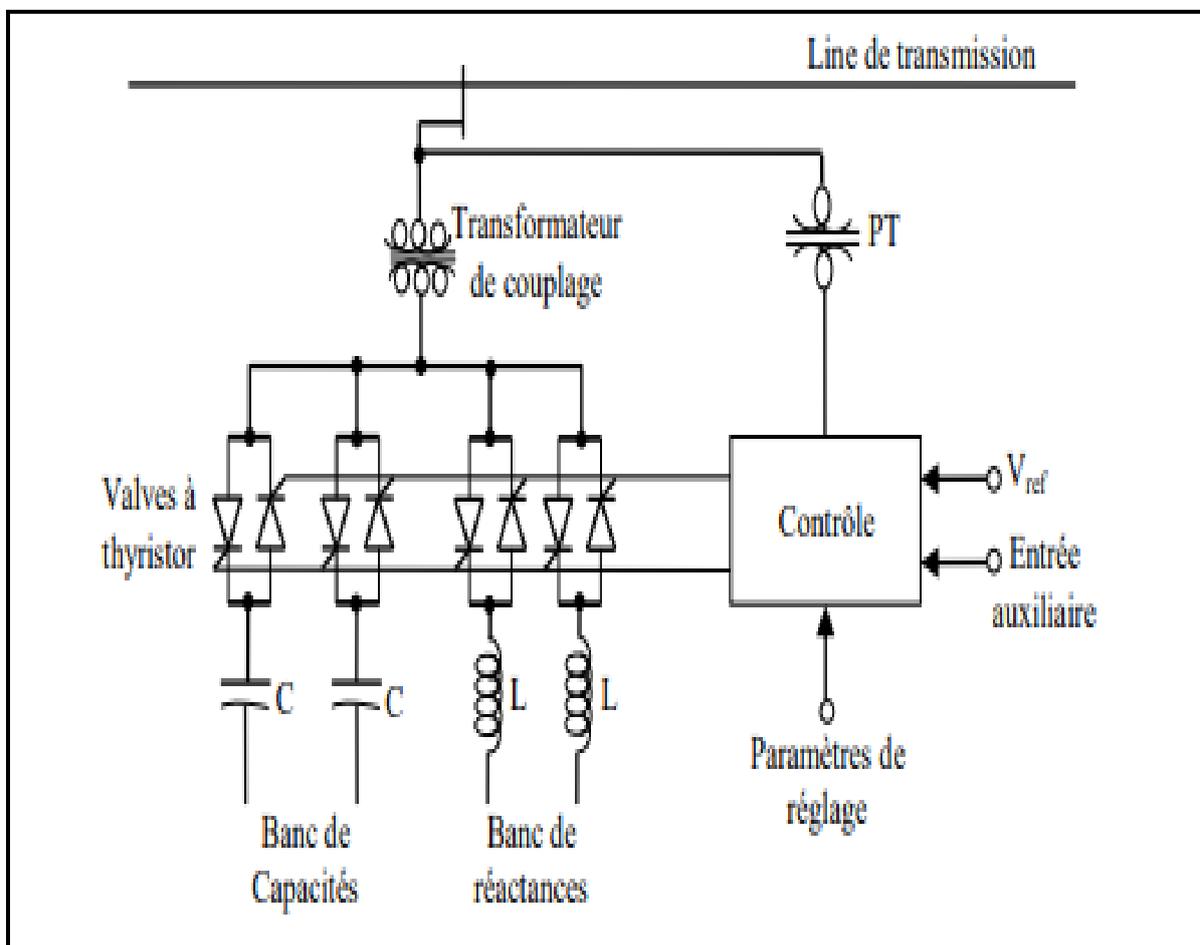


Figure III-15 Compensateur statique à capacités commutées par Thyristor et réacteurs contrôlés par thyristors.

La caractéristique VI du SVC est illustré à la figure suivante:

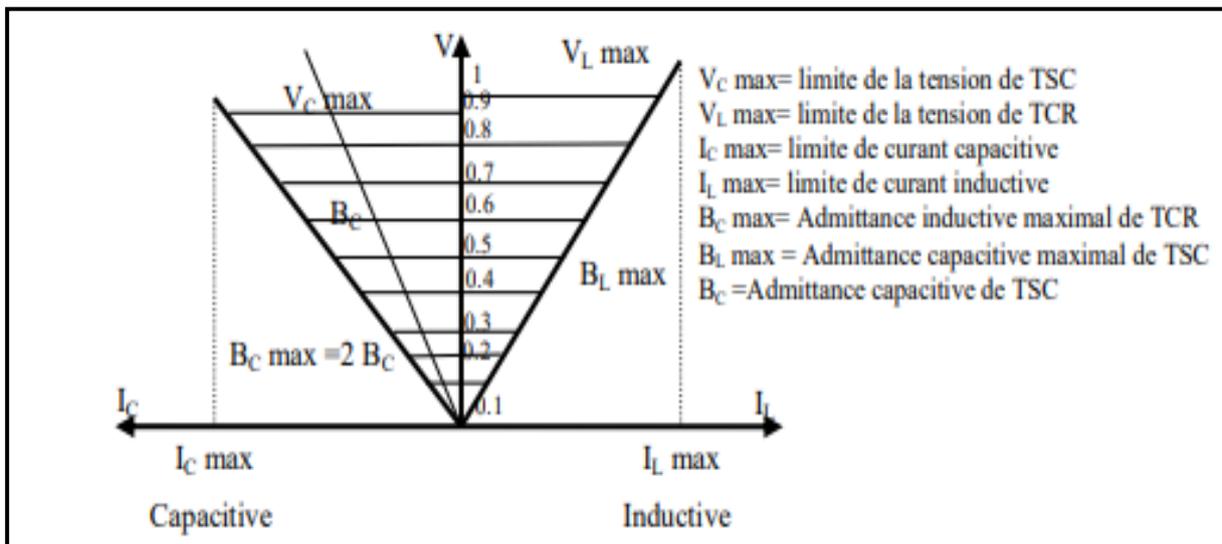


Figure III-16 Zone de fonctionnement V-I d'un compensateur de type TSC-TCR.

Elle indique que la régulation avec une pente donnée autour de la tension nominale peut être obtenue dans la plage de fonctionnement normal défini par le courant maximal capacitif et le courant maximal inductif du SVC.

### B. Compensateur synchrone statique STATCOM :

Un STATCOM (Static Compensator ou Compensateur Statique) est un dispositif de compensation réactive avancé basé sur l'électronique de puissance, faisant partie de la famille des systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS).

Contrairement aux compensateurs de puissance réactive conventionnels comme les SVC qui utilisent des inductances et des condensateurs commutés, le STATCOM est basé sur une source de tension alternative convertie à partir d'une source de tension continue à l'aide d'un convertisseur de source de tension (VSC).

Les principaux composants d'un STATCOM sont:

- 1) **Convertisseur de source de tension (VSC) :** Constitué de semi-conducteurs de puissance comme les transistors bipolaires à gâchette isolée (IGBTs), il convertit la tension continue en tension alternative triphasée.
- 2) **Dispositif de stockage d'énergie CC :** Généralement une batterie de condensateurs ou une source externe de tension continue.
- 3) **Transformateur de couplage :** Connecte le STATCOM au réseau électrique.
- 4) **Système de contrôle:** Régule la tension de sortie du STATCOM pour contrôler le flux de puissance réactive.

Le fonctionnement du STATCOM est basé sur la régulation de la tension alternative produite à ses bornes. En faisant varier l'amplitude de cette tension, le STATCOM peut soit absorber soit générer de la puissance réactive au point de raccordement au réseau.

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

Si  $V_S < E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $2\pi+$  par rapport à la tension  $E$  et le courant est capacitif. (Voir Figure III.17).

Si  $V_S > E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $2\pi-$  par rapport à la tension  $E$  et le courant est inductif. (Voir Figure III.18).

Si  $V_S = E$ , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

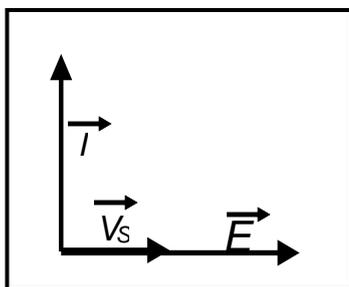


Figure III-17 Courant capacitif

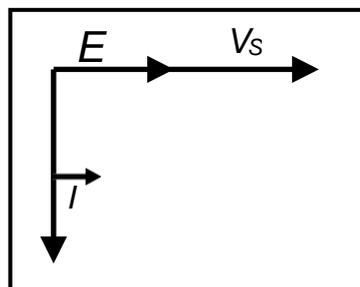


Figure III-18 Courant inductif.

La figure suivante représente la structure de STATCOM:

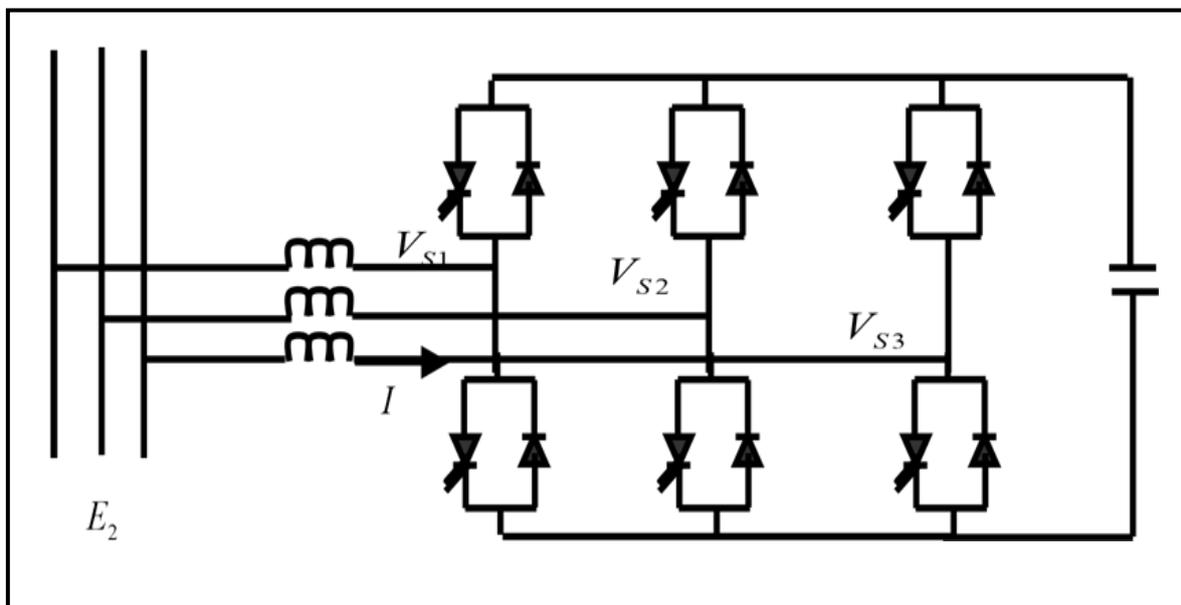


Figure III-19 Structure de STATCOM.

**III.3.3.3. Compensateurs série-shunt (hybrides) :**

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent de manipuler un seul des trois paramètres qui déterminent la puissance (tension, impédance et angle) transférée sur la ligne.

En combinant deux types d'appareils (shunt et série), on peut obtenir un appareil hybride capable de contrôler simultanément les différentes variables mentionnées ci-dessus.

**A. Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance UPFC :**

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Unified Power Flow Controller) est formé de deux convertisseurs de tension reliés par une liaison à courant continu formée par un condensateur. Il s'agit en fait de la combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC. Le principe de l'UPFC consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne pour le réinjecter avec une phase appropriée. Le convertisseur (1), connecté en parallèle, a pour fonction de prélever la puissance active et de la délivrer au convertisseur série (2). Ce dernier génère une tension  $U_{pq}$ , contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne. (Voir figure III-20)

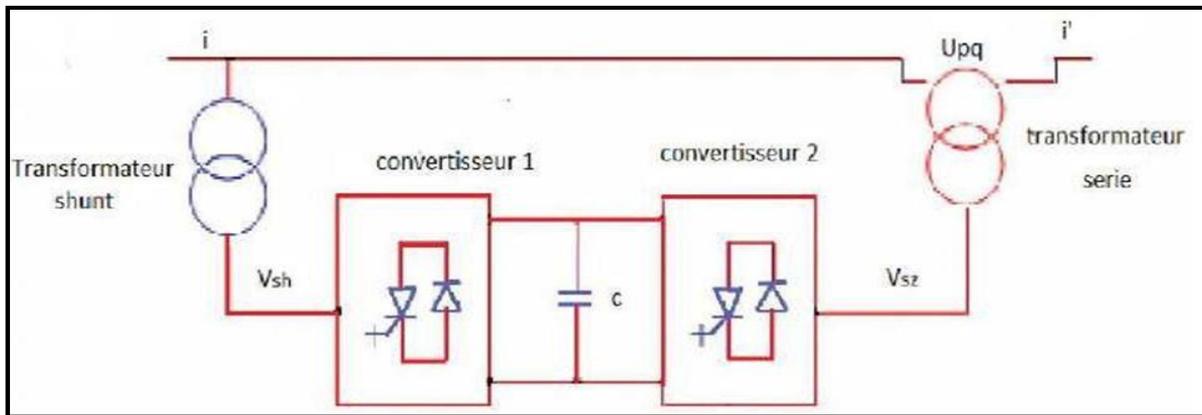


Figure III-20 Schéma de base d'un UPFC.

Le convertisseur shunt peut également générer de la puissance réactive indépendamment du transfert de puissance active et ainsi contrôler la tension  $U_i$ .

L'UPFC permet de contrôler simultanément les trois paramètres régissant les transits de puissances dans les lignes. Il peut de ce fait agir à la fois sur les puissances active et réactive. En général, il possède trois variables de commande et peut s'exploiter dans différents modes. Le convertisseur shunt règle la tension au nœud  $i$ , alors que l'autre branché en série règle les puissances active et réactive ou la puissance active et la tension au nœud.

**B. Le Déphaseur Statique (SPS- Static Phase Shifter):**

Ces déphaseurs ont été créés afin de remplacer les déphaseurs mécaniques (transformateurs déphaseurs).

Les déphaseurs commandés par thyristors fonctionnent en injectant sur les trois phases de la ligne de transport d'énergie une tension en quadrature avec la tension simple de la phase correspondante.

Un tel déphaseur est montré par la figure. III.21, une seule phase étant représentée.

Comme pour les dispositifs FACTS vus précédemment, le déphaseur peut être utilisé afin d'amortir les oscillations de puissance moyennant l'ajout d'une boucle d'amortissement dans sa régulation.

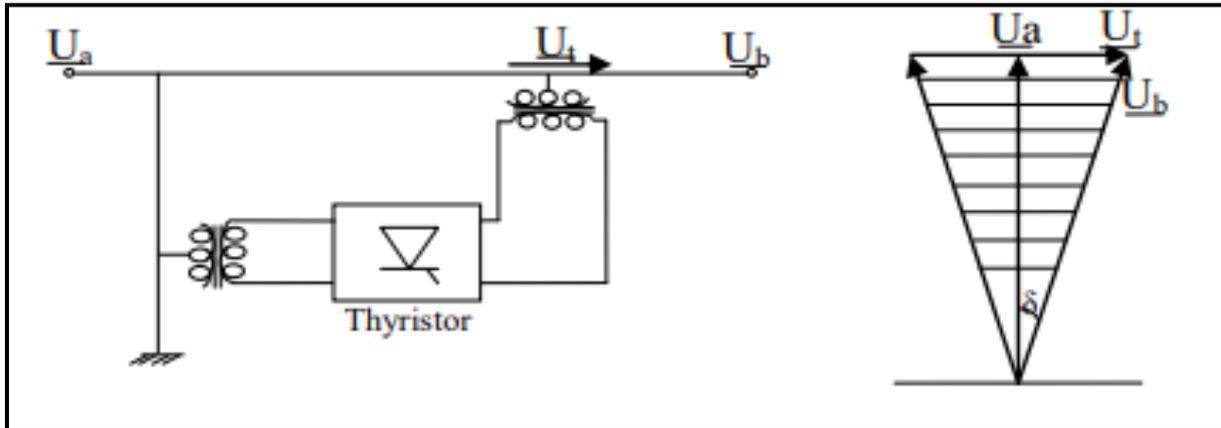


Figure III-21 Déphaseur commandé par thyristors.

### III.3.4. Apports et avantages des dispositifs FACTS :

Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) sont une famille de technologies qui permettent de contrôler et d'optimiser le flux de puissance dans les réseaux électriques. Ils offrent une large gamme d'avantages par rapport aux méthodes de contrôle traditionnelles, notamment :

- **Amélioration de la stabilité du réseau:** Les FACTS peuvent aider à amortir les oscillations de puissance et à améliorer la stabilité du réseau, ce qui peut réduire le risque de pannes de courant.
- **Augmentation de la capacité de transmission de puissance:** Les FACTS peuvent être utilisés pour augmenter la capacité de transmission de puissance des lignes de transmission existantes, ce qui peut retarder ou éliminer le besoin de construire de nouvelles lignes.
- **Réduction des pertes de transmission:** Les FACTS peuvent aider à réduire les pertes de transmission, ce qui peut améliorer l'efficacité du réseau électrique et réduire les coûts d'exploitation.
- **Amélioration de la qualité de l'alimentation:** Les FACTS peuvent être utilisés pour améliorer la qualité de l'alimentation, ce qui peut réduire les dommages aux équipements sensibles.

- **Facilitation de l'intégration des énergies renouvelables:** Les FACTS peuvent faciliter l'intégration des sources d'énergie renouvelables intermittentes, telles que l'énergie solaire et éolienne, sur le réseau électrique.
- **Protection des systèmes électriques:** Les FACTS peuvent être utilisés pour protéger les systèmes électriques contre les perturbations, telles que les courts-circuits et les surtensions.
- **Gestion des congestions:** Les FACTS peuvent être utilisés pour gérer les congestions sur le réseau électrique, ce qui peut améliorer le flux de puissance et réduire les coûts.
- **Augmentation de la flexibilité du réseau:** Les FACTS peuvent augmenter la flexibilité du réseau électrique, ce qui le rend plus facile à exploiter et à gérer.

En plus de ces avantages généraux, les dispositifs FACTS offrent également des avantages spécifiques à chaque application. Par exemple, les STATCOM (Static Synchronous Compensator) sont couramment utilisés pour réguler la tension, tandis que les SSSC (Static Synchronous Series Compensator) sont utilisés pour contrôler le flux de puissance.

Les dispositifs FACTS sont une technologie essentielle pour l'amélioration des performances des réseaux électriques. Ils sont de plus en plus utilisés dans les applications de transport d'électricité à haute tension et devraient jouer un rôle encore plus important à l'avenir, à mesure que la demande d'électricité continue de croître et que les sources d'énergie renouvelables deviennent plus répandues. [11]

### III.3.5. Coût des dispositifs FACTS :

Le coût des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que :[12]

- **Type de dispositif:** Le type de dispositif FACTS le plus courant est le STATCOM (Static Synchronous Compensator), qui a un coût généralement compris entre 1 et 5 millions de dollars US par MVA (megavolt-ampère). Les dispositifs FACTS plus complexes, tels que les UPFC (Unified Power Flow Controller), peuvent coûter plusieurs dizaines de millions de dollars.
- **Taille du dispositif:** La taille du dispositif FACTS est également un facteur important du coût. Les dispositifs plus grands sont généralement plus coûteux que les dispositifs plus petits.
- **Niveau de tension:** Le niveau de tension du système électrique sur lequel le dispositif FACTS est installé est également un facteur du coût. Les dispositifs FACTS installés sur des systèmes à haute tension sont généralement plus coûteux que les dispositifs FACTS installés sur des systèmes à basse tension.
- **Technologie utilisée:** La technologie utilisée pour construire le dispositif FACTS est également un facteur du coût. Les dispositifs FACTS fabriqués avec des technologies plus récentes sont généralement plus coûteux que les dispositifs FACTS fabriqués avec des technologies plus anciennes.
- **Fabricant:** Le fabricant du dispositif FACTS est également un facteur du coût. Les dispositifs FACTS fabriqués par des fabricants réputés sont généralement plus coûteux que les dispositifs FACTS fabriqués par des fabricants moins connus.

### III.4 Dispositifs FACTS en exploitation :

- **Augmentation de la capacité de transmission de puissance sur le corridor Hydro-Québec - New-England:** Un système SVC (Static Var Compensator) a été installé pour augmenter la capacité de transmission de puissance sur le corridor Hydro-Québec - New-England. Le SVC permet de stabiliser la tension et d'améliorer le flux de puissance sur la ligne, ce qui a permis d'augmenter la capacité de transmission de 250 MW.
- **Amélioration de la stabilité du réseau en Chine:** Un système UPFC (Unified Power Flow Controller) a été installé pour améliorer la stabilité du réseau électrique dans une région éloignée de la Chine. L'UPFC permet d'amortir les oscillations de puissance et d'améliorer la stabilité du réseau, ce qui a permis de réduire le risque de pannes de courant.
- **Intégration de l'énergie solaire au Japon:** Un système STATCOM a été installé pour intégrer l'énergie solaire au réseau électrique au Japon. Le STATCOM permet de réguler la tension et de stabiliser le flux de puissance en provenance des centrales solaires, ce qui a permis de faciliter l'intégration de l'énergie solaire au réseau.

Les dispositifs FACTS sont une technologie prometteuse qui peut apporter de nombreux avantages aux réseaux électriques. Ils devraient jouer un rôle encore plus important à l'avenir, à mesure que la demande d'électricité continue de croître et que les sources d'énergie renouvelables deviennent plus répandues. [13]

### III.5 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), ainsi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC, IPFC. Cette classification est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique.

Le choix des contrôleurs particuliers cependant, dépend de la condition d'application et de l'exécution désirée. Les débuts d'analyse avec l'étude et les problèmes d'identification de système se sont associés au système existant.

Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux.

# **CHAPITRE IV :**

## **ÉCOULEMENT DE PUISSANCE**

### **DANS UN RESEAU ELECTRIQUE**

### IV.1 Introduction :

Le module « écoulement de puissance » permet d'établir les conditions de fonctionnement en régime permanent du réseau. Le calcul de répartition de charge est sans aucun doute le calcul le plus fréquemment effectué dans les réseaux d'énergie électrique. Il s'agit de déterminer l'état électrique complet du réseau, à savoir l'amplitude de la phase de tension à tous les nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent à partir des consommations et des productions spécifiées en ces nœuds.

Les mesures dans un réseau de distribution sont souvent sujettes à des erreurs, ce qui rend impossible leur utilisation directe telle qu'elles sont transmises aux centres de conduite. Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer des calculs appropriés pour déterminer les tensions et courants à d'autres points du réseau. Ces calculs se basent sur des données telles que les consommations des clients, les impédances des lignes et le schéma d'exploitation du réseau.

Dans ce chapitre on présente les techniques de résolution du problème d'écoulement de puissance à savoir de quelques méthodes de calculs. [14]

### IV.2 But de l'étude Ecoulement de puissance :

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique est une étape cruciale dans l'étude et la conception des réseaux électriques. Cette analyse est indispensable pour la planification, la gestion des échanges de puissance entre les centres de production et l'optimisation des opérations. Elle est également essentielle pour évaluer la stabilité transitoire, la stabilité dynamique, estimer l'état du réseau et prendre les mesures appropriées en cas d'incident. L'analyse de la répartition de puissance dans ce réseau pourrait servir de base pour planifier une extension future.[15]

### IV.3 Classification des jeux de barre :

Dans le réseau électrique, les jeux de barres sont définis par quatre variables : la puissance active (P) et réactive (Q), la tension (V) et l'angle de phase ( $\theta$ ). Généralement, deux de ces variables sont connues et les deux autres doivent être déterminées.

#### IV.3.1. Nœud de charge :

C'est un jeu de barres où uniquement une ou plusieurs charges sont connectées. Dans ce jeu de barres les puissances active et réactive sont les deux variables connues, les deux autres sont à déterminer. Ce genre de jeux de barre est appelé aussi (P-Q)

#### IV.3.2. Nœud Générateur :

Dans ces jeux de barres, les variables connues sont la puissance active et l'amplitude de la tension [V], les deux autres sont aussi à déterminer. Dans ce nœud les limites de la puissance réactive sont spécifiées. Ce genre de jeux de barre est appelé aussi (P-V) auxquels les générateurs sont raccordés.

#### IV.3.3. Nœud de référence (jeu de barre balancier, slack bus, swing bus) :

Ce nœud est aussi appelé nœud de référence, l'amplitude de la tension ainsi que son angle de phase sont imposées, ce dernier est choisi généralement égal à zéro. Tous les autres nœuds

sont comparés à celui-ci pour déterminer leur angle de phase. En plus des puissances exigées par les charges il fournit une puissance qui sera perdue dans les lignes. Voir tableau (IV-1)

Type de Nœuds	Variables connues	Variables inconnues
PQ	Les puissances active et réactive (P, Q)	l'amplitude de la tension et son angle phase (V,δ)
PV	les puissances actives et la tension (PV)	Angle de phase de tension et puissance réactive (Q,δ)
référence	l'amplitude de la tension et son angle phase (V,δ)	Les puissances active et réactive (P, Q) et le courant

Tableau IV-1 Les variable connues et inconnues de chaque type de nœud.

#### **IV.4 Equations d'écoulement de puissance :**

##### **IV.4.1. Formation de la matrice admittance :**

On utilise des équations de courant obtenues dans les nœuds pour déterminer cette matrice.

D'après le Théorème de Kirchhoff dans les trois jeux de barre, on obtient les équations suivantes Au nœud 1 :

$$I_1 = I_{11} + I_{12} + I_{13}$$

$$I_1 = V_1 y_{11} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13}$$

$$I_1 = V_1 (y_{11} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y_{12} - V_3 y_{13}$$

$$I_1 = V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} + V_3 Y_{13}$$

Ainsi on obtient les éléments de la matrice admittance.

$Y_{11}$ : Admittance de charge shunt ' pour nœud 1.

$$Y_{11} = y_{11} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{12} = -y_{12}, Y_{13} = -y_{13}$$

Les équations finales sont :

$$I_1 = V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} + V_3 Y_{13}$$

$$I_2 = V_2 Y_{21} + V_2 Y_{22} + V_3 Y_{23} \tag{IV.1}$$

$$I_3 = V_1 Y_{31} + V_2 Y_{32} + V_3 Y_{33}$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \tag{IV.2}$$

En général, on peut écrire :

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (IV.3)$$

$I_{bus}$ : Vecteur des courants injectés.

$Y_{bus}$ : Matrice admittance.

$V_{bus}$ : Vecteur des tensions.

#### IV.4.2. Formulation des équations de tension :

$$I_i = Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} Y_{ij} V_j \quad (IV.4)$$

On a aussi :

$$P_i - jQ_i = I_i^* V_i \quad (IV.5)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (IV.6)$$

En remplaçant (V.4) dans (V.6), on obtient :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} Y_{ij} V_j \quad (IV.7)$$

Donc :

$$Y_{ii} V_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} Y_{ij} V_j \quad (IV.8)$$

On peut déduire :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} Y_{ij} V_j \right] \quad (IV.9)$$

#### IV.4.3. Formulation des équations d'écoulement de puissance :

En utilisant les mêmes étapes avec l'équation de tension. On obtient l'équation d'écoulement de puissance :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} Y_{ij} V_j \quad (IV.10)$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left[ Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} Y_{ij} V_j \right] \quad (IV.11)$$

Où :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle -\theta_{ii}, Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$$

$$V_i^* = |v_i| \angle -\delta_i = |v_i| \angle \delta_i, |v_j| \angle \delta_j$$

Nous aurons :

$$P_i - jQ_i = |v_i|^2 |Y_{ii}| \angle -\theta_{ii} + \sum_{j \neq i}^n |Y_{ij}| |v_i| |v_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j - \delta_i \quad (\text{IV.12})$$

Finalement :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |v_i| |v_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (\text{IV.13})$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |v_i| |v_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (\text{IV.14})$$

#### IV.4.3.1. Formulation de l'équation des pertes en puissance active :

On a l'équation :

$$P_{loss_{ij}} = P_{ij} + P_{ji} \quad (\text{IV.15})$$

Où :

$$P_{ji} = |v_j|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + |Y_{ij}| |v_i| |v_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad (\text{IV.16})$$

$$P_{ij} = |v_i|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + |Y_{ij}| |v_i| |v_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{IV.17})$$

Et à partir de là nous avons :

$$P_{loss} = \left[ 2|v_{ij}| |v_j| \cos(\delta_i - \delta_j) + |v_i|^2 + |v_j|^2 \right] |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} \quad (\text{IV.18})$$

Nous avons aussi:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

$$G_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij}$$

$$B_{ij} = |Y_{ij}| \sin \theta_{ij}$$

Donc :

$$P_{loss_{ij}} = G_{ij} \left[ 2|v_{ij}| |v_j| \cos(\delta_i - \delta_j) + |v_i|^2 + |v_j|^2 \right] \quad (\text{IV.19})$$

**IV.4.3.2. Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive :**

$$Q_{lossij} = Q_{ij} + Q_{ji}$$

Où :

$$Q_{ji} = -|v_j|^2 |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} + |Y_{ij}| |v_i| |v_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad (IV.20)$$

$$Q_{ij} = -|v_i|^2 |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} + |Y_{ij}| |v_i| |v_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (IV.21)$$

Finalement :

$$Q_{lossij} = (|v_i|^2 - |v_j|^2) B_{ij} - |Y_{ij}| |v_i| |v_j| [\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + \sin(\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i)] \quad (IV.22)$$

**IV.4.4. Méthodes numériques appliquées pour la résolution de l'écoulement de charges :**

Pour résoudre les équations d'écoulement de puissances, un grand nombre de solutions numériques sont disponibles. Ce sont en gros :

- La méthode de GAUSS-SEIDEL.
- La méthode de NEWTON-RAPHSON.
- La méthode découplée rapide.

**IV.4.4.1. Méthode de Gauss–Seidel (GS) :**

Cette méthode est inspirée de la méthode de Gauss et s'est évoluée dans le temps grâce à des travaux de recherche effectués. La méthode de Gauss–Seidel (GS) est utilisée pour la résolution des systèmes de petite taille.

La formule de la tension dans les nœuds PQ est donnée par:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j \right] \quad (IV.23)$$

On pose :

$$KL_i = \frac{P_i - jQ_i}{Y_{ii}}$$

$$KL_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}}$$

D'où l'expression finale de la tension pour chaque nœud :

$$v_i^{k+1} = \frac{KL_i}{[v_i^k]^*} - \sum_{j=1}^{j-1} YL_{ij} v_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^{j=n} YL_{ij} v_j^k \quad (IV.24)$$

Algorithme de Gauss Seidel :

**1ereEtape** : Formation de la matrice admittance.

**2emeEtape** : Estimation des valeurs initiales des tensions nodales  $v_i^0$  et  $\delta_i^0$

**3emeEtape** : Calcul des tensions pour chaque nœud suivant la relation.

Détermination des paramètres  $KL_i$  ET  $KL_{ij}$

Initiation des itérations k=0

**4emeEtape** : Calcul itératif des tensions pour chaque nœud par la relation:

$$v_i^{k+1} = \frac{KL_i}{[v_i^k]^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} v_j^{i+1} - \sum_{j=i+1}^n YL_{ij} v_j^k \quad (IV.25)$$

On calcule l'écart entre les valeurs d'une même tension trouvé aux itérations suivantes :

$$\Delta v_i^k = v_i^{k+1} - v_i^k$$

On introduit la facture d'accélération pour réduire le nombre d'itérations

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \alpha \Delta v_i^k$$

Calcul le facteur de convergence suivant:

$$v_i^{k+1} - v_i^k < \varepsilon, i = 2 \dots \dots, n$$

**5emeEtape:** Une fois le test de convergence est vérifié les valeurs des tensions de la dernière itération sont retenues, on calcule :

➤ Les puissances transitées :

$$S_{ij} = V_{ij}^* (V_i - V_j) Y_{ij}^* + V_i^* V_i \frac{Y_{ij}^*}{2} \quad (IV.26)$$

➤ Les puissances injectées :

$$S_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S_{ij} \quad (IV.27)$$

➤ Les pertes :

$$S_L = \sum_{i=1}^n S_i \quad (IV.28)$$

*{Si non aller à l'étape 4}*

#### IV.4.4.2. La Méthode itérative de Newton-Raphson :

Le problème de l'écoulement de puissance peut être résolu aussi par la méthode de Newton-Raphson. En réalité, parmi nombreux méthode disponible pour l'analyse de l'écoulement de

puissance, la méthode de Newton-Raphson est considérée comme la méthode la plus raffinée et la plus importante. Elle n'est pas la plus simple que la méthode de Gauss Seidel, mais elle est la plus rapide (convergence) surtout pour les réseaux de tailles importantes équation de puissance réel. [15]

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad , i= 1, 2, 3 \dots \dots \dots, n \quad (IV.29)$$

$$S_i = V_i (\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j)^* = V_i (\sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^*) \quad (IV.30)$$

Alors:

$$V_i = |v_i| \angle \theta_i \quad (IV.31)$$

On définit :

$$\theta_{ij} = \theta_j - \theta_i \quad (IV.32)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (IV.33)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n |v_i| |v_j| \cos(\theta_i - \theta_j) + j[\sin(\theta_i - \theta_j) \omega(G_{ij} - jB_{ij})] \quad (IV.34)$$

**Etape 1 :** On définit le type de jeux de barres  $i=1$ , un jeu de barre référence ( $\theta_1, V_1$ ) connues ( $P_1, Q_1$ ) à déterminer :

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (IV. 35)$$

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (IV. 36)$$

$$X = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (IV. 37)$$

$G_{ij} + jB_{ij}$ : La partie réelle et imaginaire de la matrice  $Y_{ij}$ .

$\theta_{ij}$ : La différence des phases entre les jeux de barres  $i$  et  $j$ .

**Etape 2 :** On définit les fonctions de  $P_i(x)$  et  $Q_i(x)$ .

$$P_i = \sum_{j=1}^n v_i v_j \omega (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \quad (IV. 38)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |v_i| |v_j| \omega (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) + B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (IV. 39)$$

**Etape 3 :** On forme l'équation  $F_i(x) = 0$

$$\begin{cases} P_i(X) - P_i = 0 \\ Q_i(X) - Q_i = 0 \end{cases} \quad (IV. 40)$$

Ou  $P_i$  et  $Q_i$  sont des puissances spécifiées.

$$F_i(x) = \begin{bmatrix} P_2(X) - P_2 = 0 \\ P_3(X) - P_3 = 0 \\ \vdots \\ P_n(X) - P_n = 0 \\ Q_2(X) - Q_2 = 0 \\ Q_3(X) - Q_3 = 0 \\ \vdots \\ Q_n(X) - Q_n = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [0] \quad (IV. 41)$$

**Etape 4 :**

$$J_{11} = \delta P_i(X) / \delta \theta_j$$

$$J_{12} = \delta P_i(X) / \delta V_j \quad (IV. 42)$$

$$J_{21} = \delta Q_i(X) / \delta \theta_j$$

$$J_{22} = \delta Q_i(X) / \delta V_j$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (IV. 43)$$

**J:** matrice jacobienne.

#### IV.4.4.3. Méthode de Newton-Raphson modifié (Fast-découplé) :

En se basant sur les cas des différents réseaux étudiés à constater les valeurs des Sub-matrices  $J_{12}$  et  $J_{21}$  que sont très petites.

$$J \begin{vmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{vmatrix} \approx \begin{vmatrix} J_{11} & 0 \\ 0 & J_{22} \end{vmatrix} ; J_{12} = \frac{\partial V}{\partial |V|} \approx 0 ; J_{21} = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \approx 0$$

L'explication de ces faibles valeurs revient au fait que la puissance active  $P$  dépend nécessairement du  $\theta_i$  ; et non du  $|V_i|$  par contre  $Q_i$  dépend essentiellement du  $|V_i|$  et non  $\theta_i$ . Généralement  $B_{ij} \approx 0$  et  $\theta_{ij} \approx 0$  d'où  $\theta_i - \theta_j = 0$  alors  $\sin \theta_{ij} = 0$ . La conductance est presque nulle car les éléments connectés aux réseaux sont d'origine réactive.

#### IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de l'écoulement de puissance, l'objectif de cette dernière, la classification des jeux de barre et la classification des variables de l'écoulement de puissance. Nous avons présenté aussi la formulation des équations de l'écoulement de puissance et la résolution du problème de l'écoulement de puissance.

Parmi les méthodes de résolution de problème de l'écoulement de puissance, On trouve la méthode de Newton-Raphson qui est considérée comme la méthode la plus raffinée et la plus importante. Etant donné que nous avons choisi d'utiliser le SVC (Static Var Compensator) comme dispositifs de compensation. Donc le prochain fera l'objet de notre application sur un réseau standard IEEE14

# **CHAPITRE V :**

**Application et résultats**

**V.1 Introduction :**

Il est essentiel de maintenir les tensions des différents jeux de barres à des niveaux acceptables dans tous les réseaux de transport. Les systèmes de transmission AC flexible (FACTS) constituent des outils de contrôle rapides et adaptables qui facilitent la transmission de puissance et améliorent la stabilité des réseaux électriques. Le contrôleur shunt dynamique SVC, en tant que dispositif FACTS, permet de réguler la tension et d'amortir les oscillations causées par les perturbations du réseau.

L'étude des flux de puissance revêt une importance capitale pour déterminer les paramètres de chaque nœud du réseau, notamment la puissance (active et réactive) et la tension (modules et angles).

**V.2 Description des systèmes utilisés :**

Nous avons pris comme système test, le système IEEE14 représenté sur la Figure V,1, il possède:

- 14 jeux de barres.
- 04 transformateurs.
- 05 générateurs.
- 11 charges.
- 20 lignes de transmissions.

Les données relatives au réseau sont exprimées en P.U par rapport à la puissance de base de 100MVA et le fréquence 50Hz.

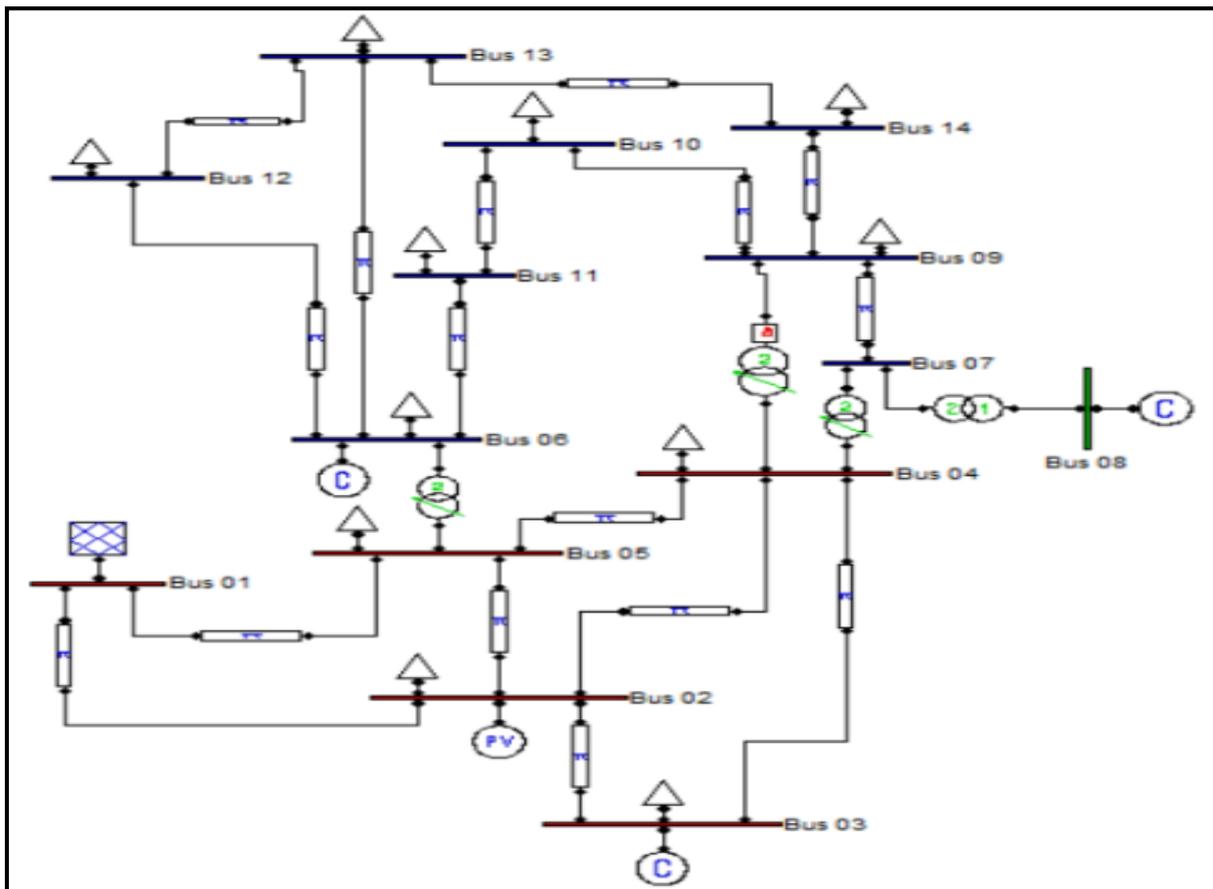


Figure V-1 Topologie du réseau étudié IEEE14.

**V.3 Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE14 :**

L'analyse de la stabilité du réseau nécessite le calcul de l'écoulement de puissance, afin de définir les conditions initiales du système avant d'ajuster les compensateurs. Il permet notamment de calculer les tensions aux différents nœuds du réseau, ainsi que les puissances transmises et injectées. Les résultats du calcul de l'écoulement de puissance à partir du MATLAB.

**V.3.1. Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état d'équilibre :**

Les résultats de calcul de l'écoulement de puissance conventionnel sont obtenus par MATLAB. Ils sont indiqués sur les tableaux ci-après :

BUS	V[p.u]	Phase [rad]	$P_{gén}$ [MW]	$Q_{gén}$ [MVAR]	$P_{cons}$ [MW]	$Q_{cons}$ [MVAR]	$P_{nette}$ [MW]	$Q_{nette}$ [MVAR]
<i>Bus 1</i>	1.06	0	232.405	-17.285	0	0	232.405	-17.285
<i>Bus 2</i>	1.045	-4.981	40	41.149	21.7	12.7	18.3	28.449
<i>Bus 3</i>	1.01	-12.709	0	23.553	94.2	19	-94.2	4.553
<i>Bus 4</i>	1.02	-10.346	0	0	47.8	-3.9	-47.8	3.9
<i>Bus 5</i>	1.021	-8.796	0	0	7.6	1.6	-7.6	-1.6
<i>Bus 6</i>	1.07	-14.258	0	13.370	11.2	7.5	-11.2	5.870
<i>Bus 7</i>	1.077	-13.346	0	0	0	0	0	0
<i>Bus 8</i>	1.011	-13.346	0	-4.002	0	0	0	-4.002
<i>Bus 9</i>	1.052	-14.911	0	0	29.5	16.6	-29.5	-16.6
<i>Bus10</i>	1.048	-15.08	0	0	9	5.8	-9	-5.8
<i>Bus11</i>	1.055	-14.798	0	0	3.5	1.8	-3.5	-1.8
<i>Bus12</i>	1.055	-15.111	0	0	6.1	1.6	-6.1	-1.6
<i>Bus13</i>	1.05	-15.183	0	0	13.5	5.8	-13.5	-5.8
<i>Bus14</i>	1.033	-16.034	0	0	14.9	5	-14.9	-5

Tableau V-1 Niveau des tensions, puissances générées, consommées d'IEEE14 à l'état d'équilibre.

LIGNE	BUS	BUS	Départ		Arrivé		Pertes	
			P	Q	P	Q	P	Q
1	1	2	156.758	-17.445	-152.463	30.552	4.295	13.107
2	1	5	75.647	5.890	-72.880	5.536	2.767	11.426
3	2	3	73.095	5.963	-70.780	3.789	2.315	9.752
4	2	4	56.150	-1.169	-54.472	6.262	1.678	5.092
5	2	5	41.518	2.124	-40.616	0.628	0.902	2.752
6	3	4	-23.420	3.651	23.789	-2.709	0.369	0.942
7	4	5	-61.099	18.273	61.622	-16.628	0.524	1.645
8	4	7	27.511	-15.648	-27.511	17.609	0	1.961
9	4	9	15.360	0.935	-15.360	0.284	0	1.219
10	5	6	41.263	14.535	-41.263	-10.409	0	4.127
11	6	11	7.442	4.375	-7.380	-4.246	0.062	0.129
12	6	12	7.823	2.608	-7.750	-2.456	00.73	0.152
13	6	13	17.809	7.636	-17.592	-7.209	0.217	0.427
14	7	8	0	-20.031	0	20.640	0	0.609
15	7	9	28.130	24.954	-28.130	-23.613	0	1.340
16	9	10	5.146	3.419	-5.135	-3.390	0.011	0.029
17	9	14	9.335	3.097	-9.224	-2.861	0.111	0.236
18	10	11	-3.856	-2.410	3.880	2.446	0.015	0.036
19	12	13	1.650	0.856	-1.643	-0.850	0.007	0.006
20	13	14	5.735	2.259	-5.676	-2.139	0.059	0.120
<b>Pertes actives [MW]</b>							<b>14.357</b>	
<b>Pertes réactives [MVAR]</b>							<b>58.977</b>	

Tableau V-2 Les données des lignes étudié d'IEEE14.

Il convient de remarquer que la tension au niveau des jeux de barres étaient d'environ l'unité même pour ceux qui sont loin des sources d'énergie. De plus, les pertes de puissance active et réactive dans ce réseau à l'état d'équilibre sont environ de l'ordre de:

$P = 14.357[\text{MW}]$

$Q = 58.977[\text{MVAR}]$

Les tensions de chaque jeu de barre du réseau a l'état normal et les pertes des puissances active et réactive dans chaque jeu de barres sont représentées par les figures suivantes :

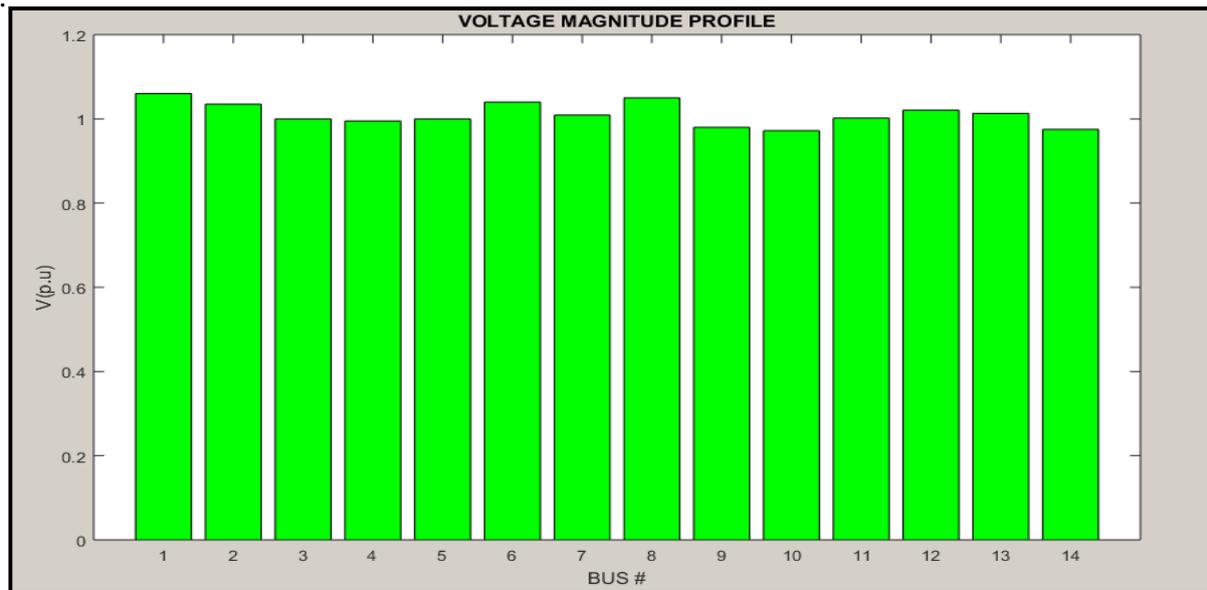


Figure V-2 Les tensions de chaque jeu de barre de réseau à l'état d'équilibre.

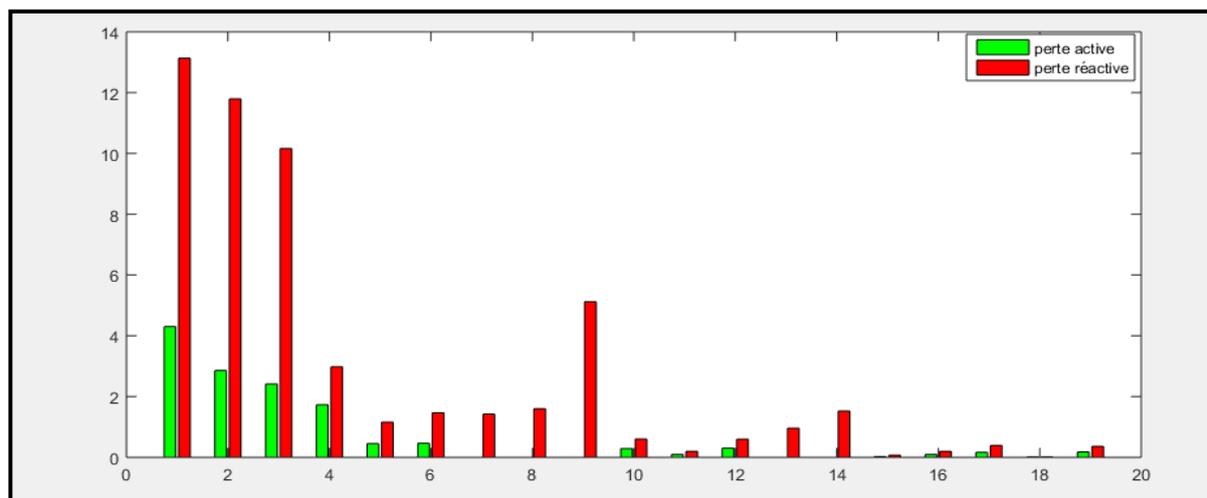


Figure V-3 Les pertes actives et réactives dans les lignes.

**V.3.2. Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état perturbé :**

Dans cette partie, nous allons procéder à une autre simulation (État perturbé) de même réseau IEEE14, cette simulation correspond à une augmentation de charge réactive au niveau des jeux de barres 14 et 13. (voir Tableau V-3)

Jeux de barre	Avant	Après
13	5.8 [MVAR]	78.8 [MVAR]
14	5 [MVAR]	75 [MVAR]

Tableau V-3 Variation de la charge réactive.

Les résultats de calcul de l'écoulement de puissance sont obtenus par les tableaux suivantes :

BUS	V [p.u]	Phase [rad]	$P_{cons}$ [MW]	$Q_{cons}$ [MVAR]	$P_{gén}$ [MW]	$Q_{gén}$ [MVAR]	$P_{nette}$ [MW]	$Q_{nette}$ [MVAR]
<i>Bus 1</i>	1.060	0	0	0	257.191	33.687	257.191	33.687
<i>Bus 2</i>	1.025	-5.283	21.7	12.7	40	42.567	18.3	29.867
<i>Bus 3</i>	0.99	-13.824	94.2	19	0	43.933	-94.2	24.933
<i>Bus 4</i>	0.967	-10.954	47.8	-3.9	0	0	-47.8	3.9
<i>Bus 5</i>	0.977	-9.610	7.6	1.6	0	0	-7.6	-1.6
<i>Bus 6</i>	1.02	-18.361	11.2	7.5	0	172.375	-11.2	164.875
<i>Bus 7</i>	0.951	-14.654	0	0	0	0	0	0
<i>Bus 8</i>	1.04	-14.654	0	0	0	52.696	0	52.696
<i>Bus 9</i>	<b>0.877</b>	-16.847	29.5	26.6	0	0	-29.5	-26.6
<i>Bus10</i>	<b>0.881</b>	-17.169	9	20.8	0	0	-9	-20.8
<i>Bus11</i>	<b>0.946</b>	-17.872	3.5	1.8	0	0	-3.5	-1.8
<i>Bus12</i>	<b>0.931</b>	-18.582	6.1	1.6	0	0	-6.1	-1.6
<i>Bus13</i>	<b>0.862</b>	-15.881	13.5	<b>78.8</b>	0	0	-13.5	-78.8
<i>Bus14</i>	<b>0.687</b>	-13.367	14.9	<b>75</b>	0	0	-14.9	-75

Tableau V-4 Niveau des tensions, puissances injectées et consommées d'IEEE14 (l'état perturbé).

ligne	BUS	BUS	Départ		arrivée		Pertes		
			P	Q	P	Q	P	Q	
1	1	2	173.438	13.628	-168.212	2.319	5.226	15.947	
2	1	5	83.753	25.790	-80.062	-10.548	3.691	15.242	
3	2	3	77.406	5.429	-74.712	5.919	2.694	11.347	
4	2	4	60.985	16.51	-58.778	-9.811	2.207	6.698	
5	2	5	48.122	14.287	-46.755	-10.116	1.367	4.171	
6	3	4	-19.488	21.788	20.072	-20.297	0.584	1.491	
7	4	5	-54.249	-5.119	54.674	6.457	0.426	1.337	
8	4	7	28.366	18.616	-28.366	-16.103	0	2.513	
9	4	9	15.649	21.986	-15.649	-17.795	0	4.191	
10	5	6	60.153	17.492	-60.153	-8.028	0	9.464	
11	6	11	11.492	32.717	-10.394	-30.418	1.098	2.299	
12	6	12	14.977	28.184	-13.747	-25.680	1.203	2.505	
13	6	13	26.874	110.39	-18.660	-94.224	8.213	16.166	
14	7	8	0	-48.172	0	52.696	0	4.524	
15	7	9	29.005	64.419	-29.005	-58.345	0	6.074	
16	9	10	2.919	-5.909	-2.901	5.956	0.018	0.048	
17	9	14	12.735	55.876	-7.306	-44.325	5.429	11.551	
18	10	11	-6.099	-26.756	6.894	28.618	0.795	1.862	
19	12	13	7.674	24.08	-6.047	-22.608	1.627	1.472	
20	13	14	11.207	38.031	-7.594	-30.675	3.613	7.356	
							<b>Pertes actives [MW]</b>		<b>38.191</b>
							<b>Pertes réactives [MVAR]</b>		<b>126.257</b>

Tableau V-5 Les données des lignes étudié de IEEE14 (l'état perturbé).

On voit bien qu'il y a une chute de tension au niveau des jeux de barres 9,10,11,12 et notamment au niveau des jeux de barres 13,14.

Il est évident qu'il existe une corrélation directe avec l'augmentation des pertes en puissance active et réactive de ce réseau dans cet état :

$P = 38.191[\text{MW}]$

$Q = 126.257[\text{MVAR}]$

Les tensions de chaque jeu de barre d'un réseau perturbée et les valeurs des puissances active et réactive dans chaque jeu de barres sont représentées par les figures suivants :

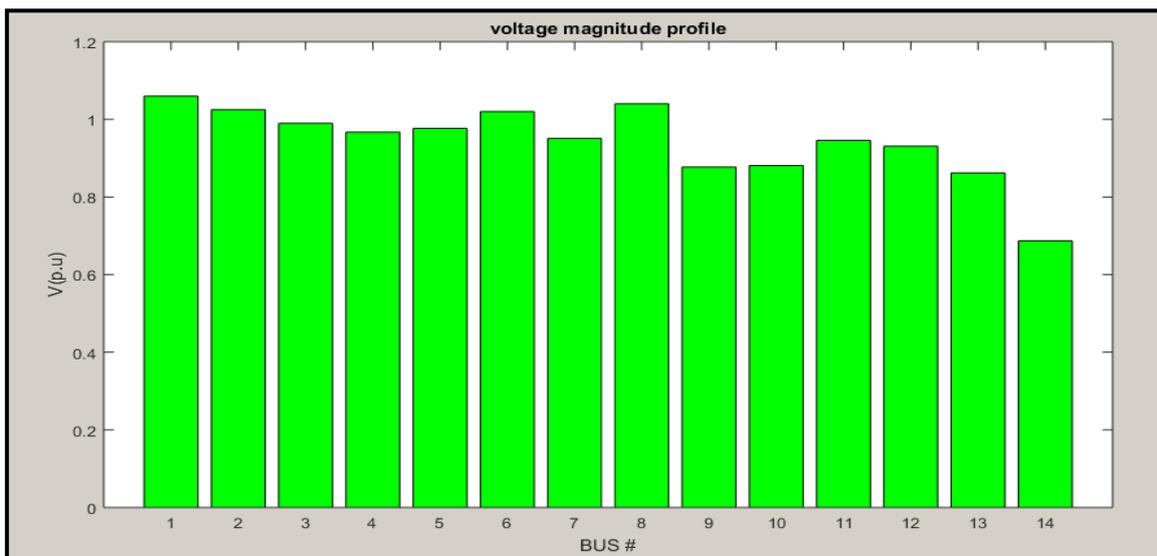


Figure V-4 La tension de chaque jeu de barre de IEEE14(l'état perturbé).

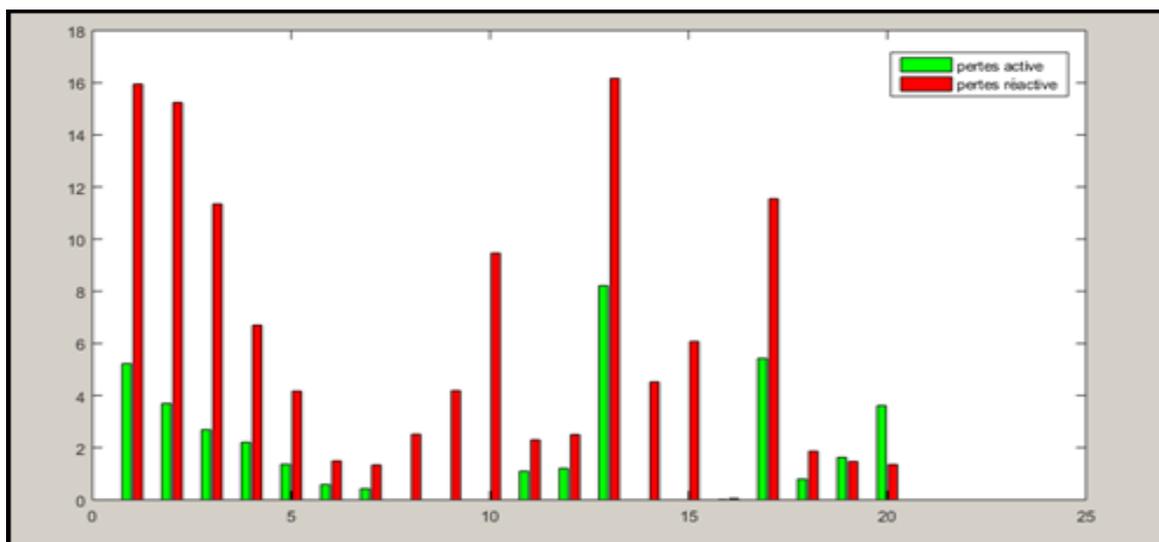


Figure V-5 Les pertes actives et réactives dans les lignes (l'état perturbé).



Les tableaux ci- dessous illustres ces résultats :

<b>BUS</b>	<b>V</b> [p.u]	<b>Phase</b> [rad]	<b><math>P_{cons}</math></b> [MW]	<b><math>Q_{cons}</math></b> [MVAR]	<b><math>P_{gén}</math></b> [MW]	<b><math>Q_{gén}</math></b> [MVAR]	<b><math>P_{nette}</math></b> [MW]	<b><math>Q_{nette}</math></b> [MVAR]
<i>Bus 1</i>	1.060	0	0	0	245.443	2.192	245.443	2.192
<i>Bus 2</i>	1.035	-5.106	21.700	12.700	40.000	29.140	18.300	16.440
<i>Bus 3</i>	1	-13.149	94.2	19	0	28.837	-94.2	9.837
<i>Bus 4</i>	1.002	-10.672	47.8	-3.9	0	0	-47.8	3.9
<i>Bus 5</i>	1.05	-9.419	7.6	1.6	0	0	-7.6	-1.6
<i>Bus 6</i>	1.12	-16.516	11.2	7.5	0	-225.06	-11.2	-232.56
<i>Bus 7</i>	1.012	-13.654	0	0	0	0	0	0
<i>Bus 8</i>	1.05	-13.654	0	0	0	22.674	0	22.674
<i>Bus 9</i>	<b>0.983</b>	-15.288	29.5	26.6	0	0	-29.5	-26.6
<i>Bus10</i>	<b>0.989</b>	-15.541	9	20.8	0	0	-9	-20.8
<i>Bus11</i>	<b>1.05</b>	-16.107	3.5	1.8	0	0	-3.5	-1.8
<i>Bus12</i>	<b>1.045</b>	-18.169	6.1	1.6	0	0	-6.1	-1.6
<i>Bus13</i>	<b>1.072</b>	-19.38	13.5	<b>78.8</b>	0	0	-13.5	-78.8
<i>Bus14</i>	<b>0.930</b>	-15.567	14.9	<b>75</b>	0	0	-14.9	-75

Tableau V-6 Les tensions et les angles au niveau de 14 jeux de barres en présence du SVC.

ligne	BUS	BUS	Départ		arrivée		Pertes	
			P	Q	P	Q	P	Q
1	1	2	164.376	-1.748	-159.711	15.985	4.666	14.238
2	1	5	81.066	9.67	-77.863	3.559	3.203	13.229
3	2	3	74.501	5.752	-72.051	4.568	2.45	10.320
4	2	4	58.055	3.057	-56.222	2.506	1.833	5.562
5	2	5	45.455	0.494	-44.355	2.861	1.1	3.354
6	3	4	-22.149	8.099	22.522	-7.148	0.373	0.951
7	4	5	-54.59	-6.028	54.992	7.293	0.403	1.265
8	4	7	25.22	6.895	-25.22	-5.509	0	1.386
9	4	9	14.247	9.988	-14.247	-8.370	0	1.618
10	5	6	55.571	-8.109	-55.571	15.126	0	7.018
11	6	11	12.004	33.975	-11.021	-31.916	0.983	2.059
12	6	12	7.548	-14.390	-7.289	14.928	0.259	0.538
13	6	13	28.874	-57.778	-26.672	62.111	0.202	4.334
14	7	8	0	-21.852	0	22.674	0	0.822
15	7	9	25.788	27.237	-25.788	-25.726	0	1.511
16	9	10	2.217	-7.581	-2.197	7.636	0.021	0.055
17	9	14	8.773	15.167	-8.369	-14.308	0.404	0.860
18	10	11	-6.803	-28.436	7.521	30.116	0.717	1.680
19	12	13	1.189	-16.528	0.727	16.947	0.463	0.419
20	13	14	13.899	75.695	-6.531	-60.692	1.368	4.003
							<b>Pertes actives</b>	<b>20.443</b>
							<b>Pertes réactives</b>	<b>75.222</b>

Tableau V-7 Les données des lignes étudié de IEEE14 en présence du SVC.

Il est à noter qu'après l'intégration du SVC aux jeux de barres 13 et 14, les tensions aux jeux de barres 09, 10, 11, 12, et particulièrement aux jeux de barres 13 et 14, ont subi une évolution significative.

Les pertes en puissance active et réactive de ce réseau en présence du SVC sont de l'ordre de:

$P = 26.443 \text{ [MW]}$

$Q = 86.222 \text{ [MVAR]}$

Les tensions de chaque jeu de barre d'un réseau perturbée avec SVC et les valeurs des puissances active et réactive dans chaque jeu de barres sont représentées par les figures suivantes :

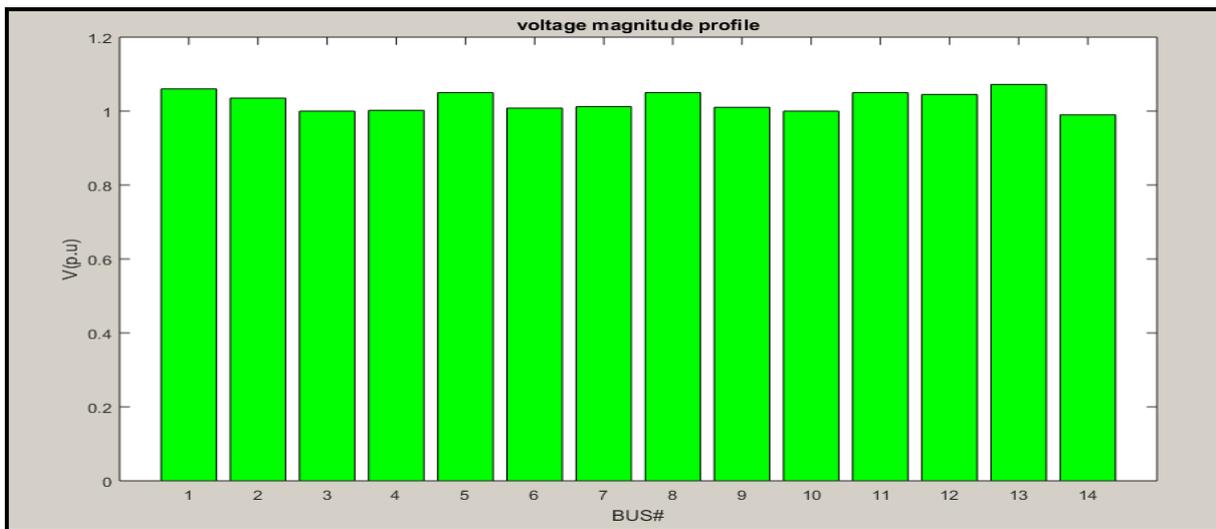


Figure V-7 La tension de chaque jeu de barre de IEEE14 en présence du SVC.

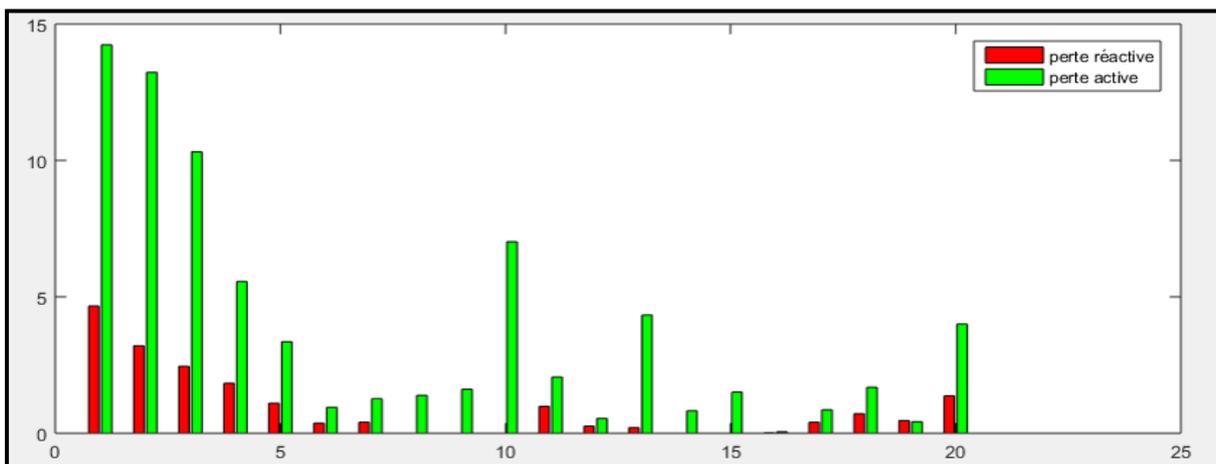


Figure V-8 Les pertes actives et réactives dans les lignes en présence du SVC.

V.3.4. Comparaison entre les résultats sans et avec SVC :

V.3.4.1. Comparaison entre les résultats du transit de puissance sans et avec SVC :

Le tableau ci-dessous montre les résultats de l'écoulement de puissance, pour les deux cas (SANS, avec SVC) dans le réseau de 14 jeux de barres qui sont obtenus par MATLAB :

BUS	SANS SVC			AVEC SVC		
	V [p.u]	$P_{gén}$ [MW]	$Q_{gén}$ [MVAR]	V [p.u]	$P_{gén}$ [MW]	$Q_{gén}$ [MVAR]
BUS 1	1.060	257.191	33.687	1.060	245.443	2.192
BUS 2	1.025	40.000	42.567	1.035	40.000	29.140
BUS 3	0.990	0	43.933	1.000	0	28.837
BUS 4	0.967	0	0	1.002	0	0
BUS 5	0.977	0	0	1.050	0	0
BUS 6	1.020	0	172.375	1.120	0	-225.06
BUS7	0.951	0	0	1.012	0	0
BUS 8	1.040	0	52.696	1.050	0	22.674
BUS 9	0.877	0	0	0.983	0	0
BUS 10	0.881	0	0	0.989	0	0
BUS 11	0.946	0	0	1.050	0	0
BUS 12	0.931	0	0	1.045	0	0
BUS 13	<b>0.862</b>	0	0	<b>1.072</b>	0	0
BUS 14	<b>0.687</b>	0	0	<b>0.930</b>	0	0
Total perte sans svc				Total perte avec svc		
Puissance active		<b>38.191</b>		Puissance active		<b>20.443</b>
Puissance réactive		<b>126.257</b>		Puissance réactive		<b>75.222</b>

Tableau V-8 Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 14 jeux de barres avec SVC et sans SVC.

**V.3.4.2. Comparaison entre les résultats de la perte de puissance sans et avec SVC :**

Les figures (V 9 et V 10) ci-dessous montrent les résultats des pertes de puissance, pour les deux cas (sans SVC, avec SVC) dans le réseau de 14 jeux de barres qui sont obtenus par MATLAB :

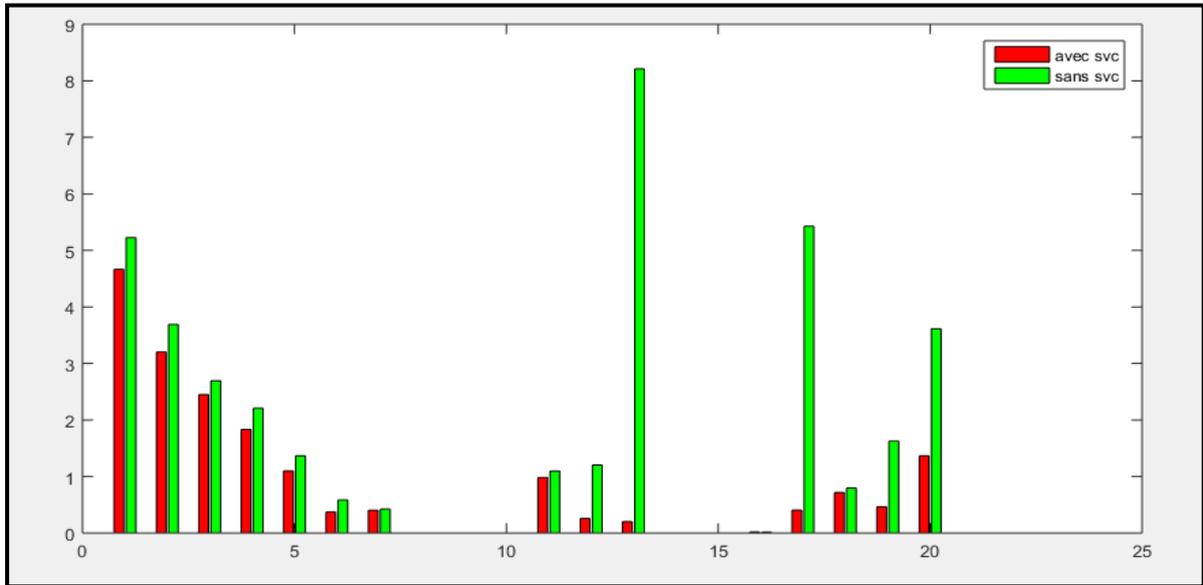


Figure V-9 Les pertes actives sans avec SVC.

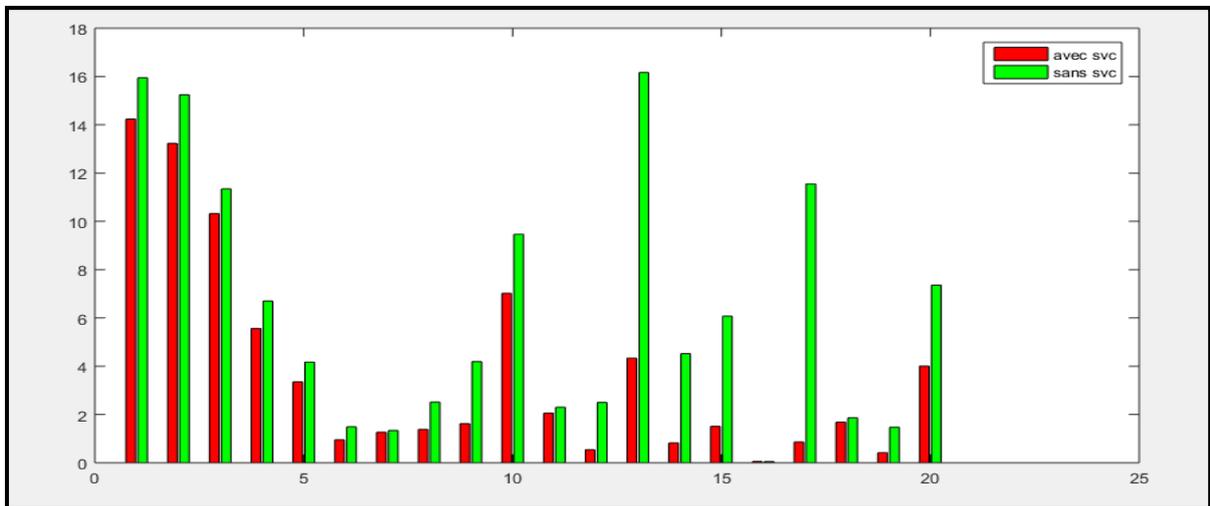


Figure V-10 Les pertes réactives sans et avec SVC.

### **V.3.5. Interprétation :**

Il est observé que les résultats du flux de puissance après l'intégration du SVC évoluent, avec une amélioration significative de la tension et de la puissance réactive, ainsi qu'une diminution des pertes (actives et réactives) au niveau de la barre où le dispositif est intégré. (jb13 , jb14). De cette manière, Ce dispositif joue un rôle important dans la régulation et l'amélioration de la tension pour garantir la stabilité du système pour les autres jeux de barres.

### **V.4 Conclusion :**

L'étude de la répartition des charges est essentielle pour obtenir tous les paramètres du réseau électrique, comme nous l'avons abordé dans ce chapitre. La méthode de Newton-Raphson a été sélectionnée parmi les méthodes de résolution.

Nous avons également exposé la difficulté de maintenir la charge réactive stable et son impact, ce qui entraîne des baisses de tension dans les jeux de barres et des pertes supplémentaires sur les lignes de transmission. Ainsi, nous avons démontré l'efficacité des dispositifs FACTS de type SVC pour améliorer la stabilité statique de tension (améliorer les performances du réseau électrique) sur le réseau IEEE 14.

Selon nos résultats de simulation, notamment en analysant les plans de tension du réseau étudié et leur écoulement de puissance, nous avons conclu que le dispositif de contrôle SVC peut jouer un rôle crucial dans le domaine de la compensation de puissance réactive et du contrôle de tension de chaque nœud.

### **Conclusion générale:**

La présente étude a exploré en profondeur le rôle crucial des Systèmes de Compensation Statique de Puissance (SVC) dans la gestion de l'énergie réactive au sein des réseaux électriques. En examinant les aspects théoriques et pratiques de la compensation d'énergie réactive, nous avons mis en lumière l'importance vitale de ces dispositifs pour assurer la stabilité, la fiabilité et l'efficacité des systèmes électriques modernes.

Tout d'abord, nous avons souligné l'importance de l'énergie réactive dans le maintien des niveaux de tension dans les limites acceptables, en particulier face à des charges inductives variables. Nous avons ensuite démontré comment les SVC peuvent répondre de manière dynamique à ces variations, en fournissant ou absorbant de l'énergie réactive selon les besoins du système, contribuant ainsi à maintenir la qualité de l'énergie et à minimiser les pertes.

Ensuite, en illustrant nos propos par des études de simulations, nous avons confirmé l'efficacité et les bénéfices tangibles des SVC dans des contextes réels. En se basant sur les résultats trouvés, il se révèle que les SVC sont des outils polyvalents et essentiels pour relever les défis complexes auxquels sont confrontés les opérateurs de réseaux électriques.

En conclusion, on peut dire que cette étude apporte une contribution significative pour la compréhension de la compensation d'énergie réactive par SVC.

### Références bibliographiques:

- [1] Michel.Crappe « commande et régulation des réseaux électrique » Chap2.Trait EGEM série génie électrique.la voiser 2003.
- [2] Gilbert Droun « compensateur statique de puissance réactive » Technique de l'ingénieur D4315.2001.
- [3] "Réseaux électriques - Tome 2 : Production et transport de l'énergie électrique" par Jean-Pierre Chanteur et Pascal Rillot (Dunod)
- [4] "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control" par Xiao-Ping Zhang et Christian Rehtanz.
- [5]N. G. Hingirani. "FACTS technology and opportunities", IEE FACTS Colloquium, pp. 1-10, 1994.
- [6] Boudjma. Remadi "etudes des moyens de compensation d'énergie réactive" mémoire de master, université de Blida,2020
- [7] la compensation d'énergie réactive « Guide de Conception des Réseaux Electriques industriels » cahier technique Schneider électrique, 6 883 427/A, 2005.
- [8] Haimour Rachida, « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Électrique », Mémoire de Magister ENSET ORAN -2009.
- [9] Houari BOUDJELLA " controle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC)". Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes - Magister en Electrotechnique option conversion d'énergie et commande 2008
- [10] Theodore Wildi, « électrotechnique », 3éme édition, Québec, canada ; 1978.
- [11] Rahmani, R., Hamouda, M. B., & Nait-Said, M. S. (2015). Static Var Compensator (SVC) and Static Synchronous Compensator (STATCOM) Technologies in Power Systems: A Review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 825-833.
- [12]N. G. Hingirani. "FACTS technology and opportunities", IEE FACTS Colloquium, pp. 1-10, 1994.
- [13] "Compensation optimale de l'énergie réactive dans les réseaux électriques par FACTS (SVC)" par Abdelkrim Ben Abdelkader et Mohamed Boucherit (Revue Sciences et Technologies, Université de Blida)
- [14] "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems" par Narain G. Hingorani et Laszlo Gyugyi.
- [15] Delendi. Louardi « contrôle de l'écoulement de puissance active par un système FACTS » mémoire de magister, Université Batna, 2009.