

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière électrotechnique  
Spécialité machine électrique

présenté par

BOUDJEMA AIMAN

&

REMADI AMINE

# Etudes des moyens de compensation d'énergie réactive

Proposé par : BELAZZOUG Messaoud

Année Universitaire 2019-2020

## **REMERCIEMENTS**

*Nous remercions infiniment nos parents qui nous ont donné la force et l'intelligence pour faire ce travail....*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et particulièrement Mr BELLAZOUG pour sa disponibilité et son engagement.*

*Nous remercions nos deux familles pour leurs soutiens et tous nos amis pour la bonne ambiance....*

*Je dédie ce travail à mes chers parents et mes frères ainsi à tous mes amies*

# Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Symboles et abréviations

-Introduction générale 1

## CHAPITRE I

I-1-Introduction 2

I-2-Définition de l'énergie réactive consommée 2

I-3-Définition de la compensation de l'énergie réactive 3

I-4- Les principales sources d'énergie réactive 3

1 -L'Alternateur 3

2-Câble sous-terrain 3

3-Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs 3

I-5- Les principaux consommateurs de l'énergie réactive 4

1- Machines à excitation (générateurs et moteurs) 4

2- Système de la technologie des semi-conducteurs 4

I-6-différents types de récepteurs 5

1-Des récepteurs résistifs 5

2- Des récepteurs inductifs 5

3- Des récepteurs capacitifs 6

I-7-Intérêt de la compensation de l'énergie réactive 7

I-8- Puissance et courant réactif 8

1-Composantes active et réactive du courant 8

|  |    |
|--|----|
| I-9- facteur de puissance                                    | 9  |
| 1- définition  | 9  |
| 2- Caractérisation d'un récepteur en fonction de son         | 10 |
| 3- Effets du facteur de puissance                            | 11 |
| 4_ Amélioration du facteur de puissance                      | 13 |
| 4-1-Action directe sur l'installation                        | 13 |
| 4-2- Action indirecte  | 14 |
| I-10 -Stabilité des réseaux électriques                      | 14 |
| 1- Stabilité angulaire                                       | 14 |
| 1-1-Stabilité angulaire aux petites perturbations            | 15 |
| 1-2-Stabilité transitoire                                    | 15 |
| 2 -Stabilité de fréquence                                    | 15 |
| 3 -Stabilité de tension                                      | 15 |
| 3-1-Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations | 16 |
| 3-2-Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations | 16 |
| I -11- Causes d'instabilité de tension                       | 16 |
| 1-Production trop éloignée de la consommation                | 17 |
| 2-Manqué local d'énergie réactive                            | 17 |
| I-12-Qualité de la tension                                   | 17 |
| 1-Dégradation de la qualité de la tension                    | 18 |
| I-13 -Exemple de compensation d'énergie réactive             | 20 |
| I-14- Conclusion   | 20 |

## CHAPITRE II

|   |    |
|---|----|
| II-1-Introduction   | 21 |
| II-2-Les types de compensation sont   | 22 |
| II-2-1- Batteries de condensateurs  | 22 |
| II -2-1-1-Types de batteries  | 23 |
| 1-batterie shunt  | 23 |
| 2-batterie série  | 24 |
| II -2-1-2-Les avantages des   | 25 |
| II -2-1-3-Les inconvénients des batteries   | 25 |
| II-2-2-compensateur synchrone   | 26 |
| II-2-2-1-Les avantages de compensation synchrone  | 28 |
| II-2-2-2-Les inconvénients de compensation synchrone                                    | 28 |
| II-2-3-Etapes à suivre pour déterminer le compensateur adapté à<br>un réseau électrique | 29 |
| 1- COMPENSATION GLOBALE   | 29 |
| 2-COMPENSATION PAR SECTEUR  | 29 |
| 3-COMPENSATION INDIVIDUELLE   | 29 |
| II-2-4- Compensation de technologie FACT  | 31 |
| II-2-4-1- Introduction  | 31 |
| II-2-4-2- Nécessité des dispositifs FACTS   | 31 |
| II-2-4-3- Les types de compensation FACTS   | 32 |
| 1 -Compensateurs shunts   | 32 |
| -Compensateur statique (SVC)  | 33 |
| -Compensateur STATCOM   | 35 |
| 2- Compensateurs série  | 36 |
| -Compensateur TCSC  | 37 |
| -Compensateur SSSC  | 39 |

|   |    |
|---|----|
| 3-Dispositifs FACTS combinés série-parallèle    | 40 |
| -Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC | 40 |
| II -3-Conclusion                                | 41 |

## **CHAPITRE III**

|   |    |
|---|----|
| III-1-Introduction  | 42 |
| III-2-Les avantages et les Inconvénients des moyens de compensation | 42 |
| 1-Batteries de condensateur   | 42 |
| 1-1-les avantages   | 42 |
| 1-2-les inconvénients   | 42 |
| 2-Compensateur synchrone  | 43 |
| 2-1- les avantages  | 43 |
| 2-2-inconvénients   | 43 |
| 3-Compensateur FACTS  | 43 |
| 3-1-TCSC  | 43 |
| 3-1-1-les avantages   | 43 |
| 3-1-2- les inconvénients  | 43 |
| 3-2-STATCOM   | 44 |
| 3-2-1-les avantages   | 44 |
| 3-2-2- les inconvénients  | 44 |
| 3-3 SVC   | 44 |
| 3-3-1-Les avantages   | 44 |
| 3-3-2 les inconvénients   | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 3-4- SSSC   | 45 |
| 3-4-1-Les avantages   | 45 |
| 3-4-2-Les inconvénients                                     | 45 |
| 3-5-UPFC  | 45 |
| 3-5-1-les avantages   | 45 |
| 3-5-2 Les inconvénients                                     | 45 |
| III-3-Les contraintes des dispositifs FACTS                 | 46 |
| III-4-Coût des dispositifs FACTS                            | 46 |
| III-6- Synthèse des dispositifs FACTS                       | 57 |
| III-7-EXMPLE DE SIMULATION                                  | 48 |
| III-7-1-Introduction  | 48 |
| III-7-2-Description générale                                | 48 |
| III-7-3- Logiciel de simulation                             | 48 |
| III-7-4-Application du système étudié de 6 J.B              | 49 |
| III-7-5- Application du système étudié de 9 J.B             | 51 |
| 1-sans compensation   | 52 |
| 2-compensation avec SVC                                     | 53 |
| 2-1 Variation de la charge réactive au JB (05)              | 54 |
| 2-2 Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06      | 55 |
| 2-3 : Variation de la charge réactive aux JBs (05,06 et 08) | 56 |
| 3-compensation avec STATCOM                                 | 57 |
| 3-1 :Variation de la charge réactive au JB (05)             | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 3-2 : Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06   | 69 |
| 3-3 :Variation de la charge réactive aux JBs (05,06 et 08) | 60 |
| Comparaisons entre SVC et STATCOM                          | 60 |
| III-8-CONCLUSION   | 61 |
| CONCLUSION Générale  | 62 |
| Annexe   |    |

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. I-1</b> Schéma équivalent d'une ligne de transport d'énergie fonctionnant à vide  | 3  |
| <b>Figure I-2</b> : présentation de l'allure du courant et tension d'un récepteur Résistif.  | 5  |
| <b>Figure I-3</b> : présentation de l'allure du courant et tension d'un récepteur inductif   | 5  |
| <b>Figure I-4</b> : présentation de l'allure du courant et tension d'un récepteur capacitif. | 6  |
| <b>Figure I-5</b> : Influence de la puissance réactive                                       | 7  |
| <b>Figure I-6</b> : composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent.         | 8  |
| <b>Figure I-7</b> : composition vectorielle des puissances active, réactive et apparente.    | 9  |
| <b>Figure I-8</b> : Puissance instantanée avec un facteur de puissance égal à 1.             | 11 |
| <b>Figure I-9</b> : Puissance instantanée avec un facteur de puissance égal à 0,7            | 11 |
| <b>Figure I-10</b> : Puissance instantanée avec un facteur de puissance égal à 0,2.          | 12 |
| <b>Figure I-11</b> : Classification des types de stabilité des réseaux électriques.          | 16 |
| <b>Figure I-12</b> : Variation rapide de la tension.   | 19 |
| <b>Figure I-13</b> : Creux de tension  | 19 |

### Chapitre II

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II-1</b> : compensation du déphasage( $\varphi$ )                        | 21 |
| <b>Figure II-2</b> : batterie de compensation                                      | 22 |
| <b>Figure II-3</b> : batterie shunt en étoile                                      | 23 |
| <b>Figure II-4</b> : batterie shunt en triangle                                    | 24 |
| <b>Figure II-5</b> : Batterie série  | 25 |
| <b>Figure II.6</b> : Compensateur synchrone  | 27 |
| <b>Figure II -7</b> : Schéma simplifié d'un compensateur synchrone                 | 27 |
| <b>FigureII-8</b> :Différentes zones d'implantation des batteries de condensateurs | 30 |

|  |    |
|--|----|
| <b>FigureII-9:</b> Avantages et inconvénients des différentes zones d'implantation | 30 |
| <b>Figure II-10 :</b> Représentation du TCR  | 33 |
| <b>Figure II-11 :</b> Représentation du TCR  | 33 |
| <b>Figure II-12 :</b> Représentation du SVC  | 34 |
| <b>Figure II-13 :</b> Exemple d'un SVC   | 34 |
| <b>FigureII-14 :</b> Courant capacitif   | 35 |
| <b>FigureII-15 :</b> Courant inductif  | 35 |
| <b>FigureII-16 :</b> Structure de STATCOM  | 36 |
| <b>FigureII-17 :</b> Exemple d'un STATCOM  | 36 |
| <b>FigureII-18 :</b> Schéma d'un TCSC.   | 37 |
| <b>FigureII-19 :</b> Régimes de fonctionnement du TCSC                             | 37 |
| <b>FigureII-20 :</b> Schéma de base du SSSC  | 39 |
| <b>FigureII-21 :</b> Caractéristique statique du SSSC                              | 39 |
| <b>FigureII-22 :</b> Schéma de base d'un UPFC                                      | 40 |

### **Chapitre III**

|   |    |
|---|----|
| <b>FigureIII-1 :</b> réseau 6 j.b   | 49 |
| <b>FigureIII-2 :</b> Amplitude des tensions   | 49 |
| <b>FigureIII-3 :</b> angles de tension  | 49 |
| <b>FigureIII-4 :</b> la puissance de générateur   | 51 |
| <b>FigureIII-5 :</b> la puissance de charge   | 51 |
| <b>FigureIII-6 :</b> Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres                        | 51 |
| <b>FigureIII-7 :</b> Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres sans compensation      | 52 |
| <b>FigureIII-8 :</b> amplitude des tensions   | 52 |
| <b>Figure III 9 :</b> Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres avec compensation svc | 53 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure III -10:</b> amplitudes des tensions (Q=3.05) sans compensation                  | 54 |
| <b>Figure III -11</b> amplitudes des tensions (Q=3.07) sans compensation                   | 54 |
| <b>Figure III -12</b> amplitudes des tensions (Q=3.07) avec compensation svc               | 55 |
| <b>Figure III-13</b> Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres avec compensation statcom | 57 |
| <b>Figure III-14</b> amplitude des tensions sans compensation (Q=3.05)                     | 58 |
| <b>Figure III-15</b> amplitude des tensions sans compensation (Q=3.07)                     | 58 |
| <b>Figure III-16</b> amplitude des tensions avec compensation statcom (Q=3.07)             | 59 |

## LISTE DES TABLEAU

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau III-01</b> Comparaison des coûts des contrôleurs FACTS                                  | 46 |
| <b>Tableau III-02</b> Performances des principaux FACTS  | 47 |
| <b>Tableau III-03</b> Amplitude de tensions et thêta pour 6 J.B                                    | 50 |
| <b>Tableau III-04</b> Puissances actives et réactives  | 50 |
| <b>Tableau III-05</b> Amplitude de tensions pour 9 J.B sans compensation                           | 53 |
| <b>Tableau III-06</b> amplitude des tensions Variation de la charge réactive aux JB 05             | 55 |
| <b>Tableau III-07</b> amplitude des tensions Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06    | 56 |
| <b>Tableau III-08</b> amplitude des tensions Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06    | 57 |
| <b>Tableau III-09</b> amplitude des tensions Variation de la charge réactive aux JB 05             | 59 |
| <b>Tableau III -10</b> amplitude des tensions Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06   | 60 |
| <b>Tableau III -11</b> Amplitude des tensions Variation de la charge réactive aux JB (05,06 et 08) | 60 |
| <b>Tableau III -12:</b> Amplitude des tensions Comparaisons entre SVC et STATCOM                   | 61 |

## LISTE DES SYMBOLES ET Abréviations

|  |                      |
|--|----------------------|
| It courant apparent  | [ka]                 |
| Ia courant actif   | [ka]                 |
| Ir courant réactif   | [ka]                 |
| $\phi$ déphasage entre le courant apparent et le courant actif | [rad]                |
| $\cos\phi$ facteur de puissance                                | [.]                  |
| P puissance active   | [kw]                 |
| Q puissance réactive   | [kvar]               |
| S puissance apparente  | [kvar]               |
| P pertes joules  | [J]                  |
| L longueur de la ligne   | [km]                 |
| K conductivité du conducteur                                   | [ $\Omega \cdot m$ ] |
| U tension entre phases   | [Kv]                 |
| A section du fil.  | [m <sup>2</sup> ]    |
| Ih courant harmonique  | [ka]                 |
| Vr tension du réseau   | [kv]                 |
| Qc puissance réactive de compensation                          | [kvar]               |
| $\tan\phi_1$ Tangente du déphasage $\phi$ avant compensation   | [.]                  |
| $\tan\phi_2$ Tangente du déphasage $\phi$ après compensation   | [.]                  |
| Iex courant d'excitation                                       | [a]                  |
| F fréquence  | [hz]                 |
| C capacité   | [ $\mu f$ ]          |

Vs tension de sortie [kv]

Xl réactance inductive [h]

## Abréviations

|         |   |
|---------|---|
| FACTS   | Flexible alternatif curant transmission systèmes. |
| TSR.    | Thyristor Switched Reactor.                       |
| RCT     | Réactances commandés par thyristor                |
| CSPR    | Compensateur Statique de Puissance Réactive       |
| CCT     | condensateur commandé par thyristor               |
| TSC     | Thyristor Switched Capacitor.                     |
| SVC     | Static Var Compensator.                           |
| STATCOM | Static Synchronous Compensator.                   |
| TCSC    | Thyristor Controlled Series Capacitor.            |
| UPFC    | Unified Power Flow Controller.                    |
| GTO     | Gate Turn Off                                     |
| J.B     | Jeux de barres                                    |

## ملخص

زيادة الطلب للطاقة الكهربائية والسوق الحرة للتجارة والكهرباء دفعت وكالات توزيع الكهرباء للاهتمام بالجودة والتكلفة، وخاصة في شبكات النقل. للحد من خسائر الطاقة بسبب تيارات الفروع القوية والتحسين لتوتر شبكات التوزيع الوسيلة الأكثر استعمالا هي وضع نظام FACTS لهذا السبب تم إعطاء حل هورستية يعتمد على عامل الحساسية لفقدان الطاقة، وقد تم تطبيق الحل على عدد من الشبكات والنتائج تم مقارنتها مع عدد من المؤلفين الذين عالجوا هذه المشكلة

كلمات مفتاحية : شبكات النقل ، تيارات الفروع ، نظام FACTS , معامل الحساسية

## Résumé :

L'accroissement de la demande en énergie électrique et l'échange de marchés d'électricité, ont poussé les organismes distributeurs à prêter une grande attention à la qualité, à la fiabilité de système électrique et au coût de ce dernier, particulièrement dans les réseaux électriques. Afin de réduire les pertes de puissance dues au transit de forts courants réactifs et améliorer le profil de la tension des lignes électriques. Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes électriques sont les systèmes classiques et FACTS « *Flexible Alternating Current Transmission System* ».

Dans notre travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du contrôleur SVC et STATCOM.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle SVC et STATCOM peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds.

***INTRODUCTION***

***GENERALE***

## ***INTRODUCTION GENERALE :***

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

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

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

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

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

Dans le premier chapitre 1 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

Le deuxième 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

Dans le troisième chapitre nous avons simulé les faits de compensation d'énergie réactive sur simulink matlab (SVC STATCOM) et on a consacré à une comparaison entre les moyens de compensation étudiés

***CHAPITRE I***

***GÉNÉRALITÉS SUR***

***LA***

***COMPENSATION DE***

***L'ÉNERGIE***

***Réactive***

## **I-1-Introduction :**

Toute machine électrique utilisant du courant alternatif (moteurs asynchrones, transformateurs, inductance, convertisseurs statiques : redresseurs, ligne...etc) met en jeu deux formes d'énergie :

- L'énergie active.
- L'énergie réactive.

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant alternatif par des réseaux en haute, moyenne et basse tension. L'énergie consommée est composée d'une partie "active", transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie "réactive" transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques. L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active" ; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite. Les économies d'énergie réalisées se chiffrent par dizaines de pour cent de la consommation globale, situant les procédés de compensation d'énergie réactive en première ligne du combat pour la réduction de l'impact des activités humaines sur l'écosystème de notre planète.

- Pour la puissance active, on montre qu'il est plus économique de la produire d'une manière centralisée et de la distribuer ensuite aux clients. Le coût du transport est bien moins élevé que le surcoût d'une production réalisée localement.
- En revanche, pour la puissance réactive, il est économiquement plus intéressant de la produire localement par des générateurs d'énergie réactive autonomes : par les condensateurs. Elle ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée.

Cette pratique est appelée compensation de l'énergie réactive.

Le principe de la compensation serait donc, selon la demande du réseau, de fournir de la puissance réactive ou de l'absorber. En analysant la nature de la puissance réactive, on peut conclure que la puissance réactive est une chose très importante pour les réseaux électriques.

[1]

## **I-2-Définition de l'énergie réactive consommée :**

C'est une forme de puissance mise en jeu par un réseau ou une installation possédant une capacité, elle est transformée par les équipements électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques. De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la

puissance réactive suivant leur charge. C'est une énergie parasite pour le réseau, son unité c'est le kvarh.

### I-3-Définition de la compensation de l'énergie réactive :

C'est l'installation d'une source d'énergie réactive afin de produire une quantité d'énergie réactive au plus près des charges pour éviter qu'elle ne circule sur le réseau électrique du distributeur afin de diminuer la quantité d'énergie réactive fournie par la source et améliorer la stabilité du réseau électrique. Avec augmentation  $\cos \varnothing$  [2]

### I-4- Les principales sources d'énergie réactive :

#### 1 -L'Alternateur :

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

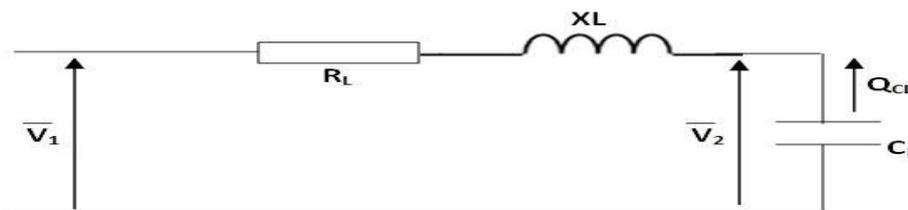
#### 2- Câble sous-terrain :

La capacitance d'une ligne de transport formée de câbles dépasse de beaucoup l'importance de sa résistance et de son inductance. Une telle ligne agit surtout comme une inductance C'est cette caractéristique du câble (grande capacitance) qui rend son utilisation limitée surtout pour le transport de l'énergie sur les grandes distances.

#### 3- Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs :

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

Le schéma équivalent d'une ligne de transport de l'énergie électrique à HT est représentée par la figure ci-après : [3]



**Figure. I-1** Schéma équivalent d'une ligne de transport d'énergie fonctionnant à vide

**I-5- Les principaux consommateurs de l'énergie réactive :**

**1- Machines à excitation (générateurs et moteurs)**

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

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

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

Le facteur de puissance des systèmes de la technologie des semi-conducteurs est différent de  $\cos \varphi$  car le régime est alternatif non sinusoïdal. A titre illustratif, on considère le redresseur triphasé tout thyristors monté en pont de Greatz qui contrôle la vitesse d'un moteur à courant continu entrainant une charge à vitesse variable.

La vitesse de rotation du moteur est donnée par l'expression suivante :

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

N (tr/mn) : vitesse du moteur

U(v) : tension d'alimentation du moteur

R( $\Omega$ ) : résistance de l'induit du moteur. I(A) : courant absorbé par le moteur.

$\Phi (W_b)$  : flux magnétique traversant l'induit. n : le nombre de conducteur de l'induit.

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

2p : le nombre de pôles

Sachant que :

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

Avec :

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

$V_s$  : tension de source d'alimentation du redresseur.

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

La vitesse de rotation du moteur(N) est fonction de la tension U, alors pour augmenter ou diminuer la vitesse N, il faut augmenter ou diminuer la tension U. D'autre part le facteur de puissance est [5] :

$$F_p = \frac{3}{\pi} \cos \alpha$$

## I-6-différents types de récepteurs :

Dans les circuits à courant alternatif, il existe trois types de récepteurs :

### 1-Des récepteurs résistifs :

Un filament de lampe, le fil chauffant d'un grille-pain ou d'un chauffage électrique d'appoint etc..., constituent des résistances pures. Toute l'énergie fournie par la source s'y trouve entièrement convertie en chaleur. On parle de chauffage par effet Joule. Une résistance s'oppose au passage du courant. L'importance de ce frein est mesurée en Ohms ( $\Omega$ ).

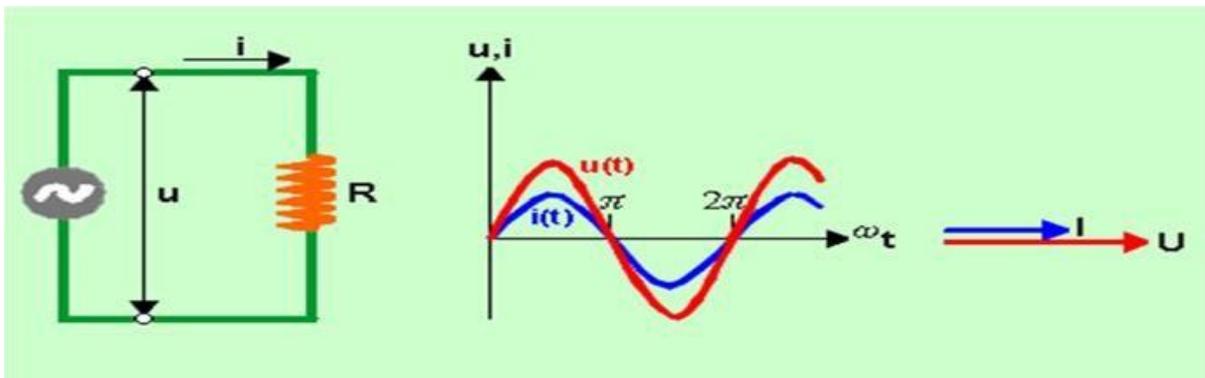


Figure I-2 : présentation de l'allure du courant et tension d'un récepteur

Résistif.

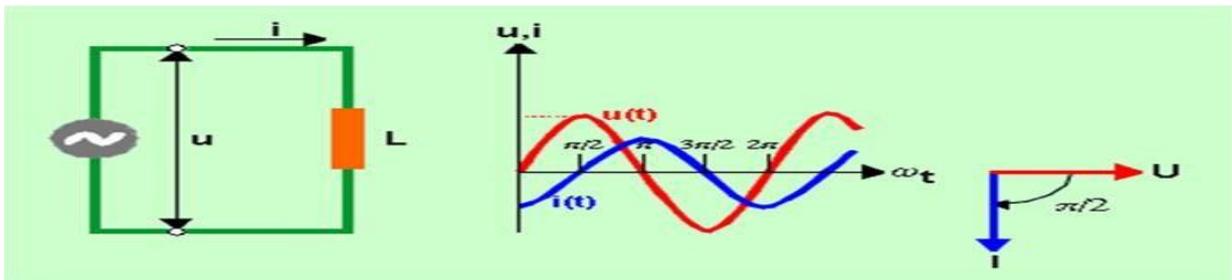
### 2- Des récepteurs inductifs :

Une bobine de fil conducteur constitue une inductance, encore appelée "self" ou "réactance inductive". On la rencontre dans les moteurs (bobinages), dans les ballasts des tubes fluorescents etc... Cette bobine réagit constamment aux variations du courant qui la traverse, suite à un phénomène magnétique. Si cette bobine (considérée comme une self pure) est

soumise à un courant continu, elle n'aura aucun effet sur celui-ci. Si par contre on veut lui faire passer du courant d'intensité variable (c'est le cas dans les circuits alternatifs), elle va réagir en opposant une résistance au passage du courant.

L'importance de ce frein est mesurée par la valeur de l'inductance  $L$ , exprimée en Henry.

Ce type d'impédance aura un deuxième effet sur le courant : une bobine retarde le courant par rapport à la tension. On dit qu'elle déphase le courant. Ainsi, une inductance pure verra son courant déphasé de  $90^\circ$  en retard sur la tension.

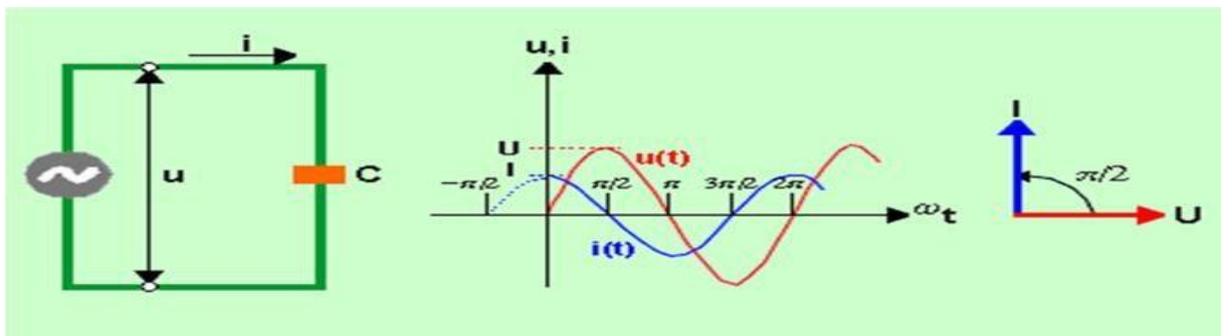


**Figure I-3:** présentation de l'allure du courant et tension d'un récepteur inductif.

### 3- Des récepteurs capacitifs :

Un condensateur, encore appelée "réactance capacitive", est un réservoir de charges électriques. Si on le soumet à la tension d'un générateur, il va accumuler des charges. Ces charges seront restituées au réseau lorsque la tension d'alimentation diminuera. S'il s'agit d'une tension alternative, le condensateur se charge et se décharge au rythme de la fréquence alternative.

La valeur d'un condensateur ( $C$ ) est exprimée en Farad. Ce type d'impédance aura également un effet de déphasage du courant par rapport à la tension, mais cette fois le courant est déphasé en avance de  $90^\circ$  sur la tension.



**Figure I-4 :** présentation de l'allure du courant et tension d'un récepteur capacitif.

### I-7-Intérêt de la compensation de l'énergie réactive :

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active  $P$ , il faut fournir d'autant plus de puissance apparente, donc de courant, que la puissance réactive est importante.

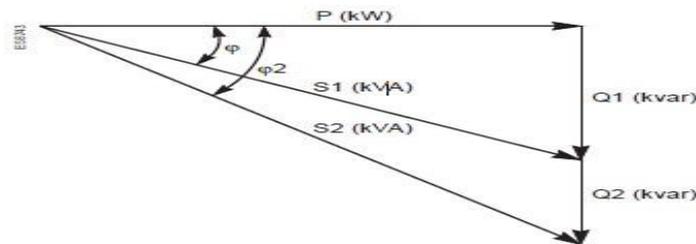


Figure I.5 : Influence de la puissance réactive.

Ainsi, du fait d'un courant appelé plus important, la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne :

- Des pénalités à payer au fournisseur d'énergie,  
Des surcharges au niveau des transformateurs et l'échauffement des câbles d'alimentation,
- L'augmentation de la puissance souscrite au fournisseur d'énergie, des pertes Joules et des chutes de tension,
- Le surdimensionnement et la dégradation de la qualité de l'installation électrique.

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est nécessaire de produire une quantité d'énergie réactive au plus près des charges afin d'éviter qu'elle ne circule sur le réseau électrique du distributeur. C'est ce que l'on appelle "compensation de l'énergie réactive".

La compensation de l'énergie réactive va permettre :

- D'économiser sur le dimensionnement des équipements électriques car la puissance appelée diminue,
- D'augmenter la puissance active disponible au secondaire des transformateurs
- De diminuer les chutes de tension et des pertes en lignes,
- D'économiser sur la facture d'électricité, en supprimant la consommation excessive d'énergie réactive.

Pour inciter les utilisateurs à se préoccuper de leur consommation d'énergie réactive, les distributeurs facturent l'énergie réactive consommée au-delà d'un seuil fixé.

L'intérêt économique de la compensation de l'énergie réactive est mesuré en comparant le coût de l'installation des moyens de compensation aux économies qu'elle procure. Le coût dépend de plusieurs paramètres :

- La puissance installée ;
- Le niveau de tension ;
- Le fractionnement en gradins et sa commande [6]

### **I-8- Puissance et courant réactif :**

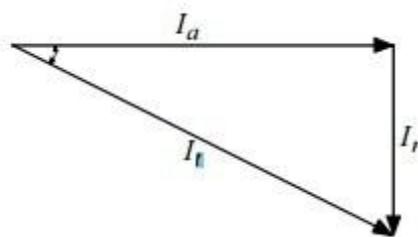
#### **1- Composantes active et réactive du courant :**

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

Le courant actif ( $I_a$ ) est en phase avec la tension du réseau. Il est porteur de la puissance active. Le courant réactif ( $I_r$ ) est déphasé de  $90^\circ$  par rapport au courant actif, en arrière (récepteur inductif) ou en avant (récepteur capacitif).

Le courant apparent est le courant résultant qui parcourt le câble électrique depuis la source jusqu'au récepteur. Ce courant est déphasé d'un angle  $\phi$  par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension).

Pour un courant ne comportant pas de composantes harmoniques, ils se composent vectoriellement en valeurs efficaces comme indiqué sur la figure 1.



**Figure I-6 :** composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent.

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LA COMPENSATION DE L'ÉNERGIE RÉACTIVE

$I_t$  : courant apparent (ka).  $I_a$ : courant actif (ka).  $I_r$  : courant réactif (ka).  $\varphi$ : déphasage entre le courant apparent et le courant actif (égal au déphasage entre le courant apparent et la tension).

Les courants actifs, réactif, apparent et le déphasage sont liés par les relations suivantes :

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi$$

$$I_r = I \cdot \sin \varphi$$

Dans le cas d'absence d'harmoniques  $\cos \varphi$  est égal au facteur de puissance. Le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances. Il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau.

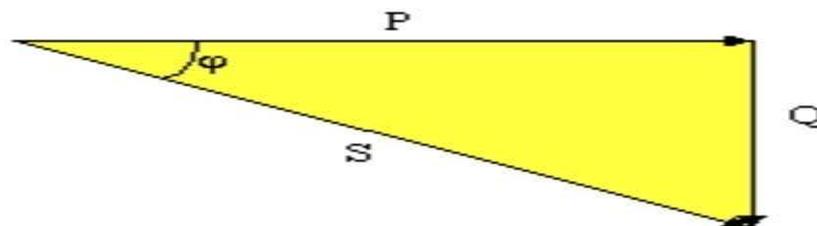
On définit ainsi, pour un circuit monophasé :

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

La puissance réactive :  $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$  (en kvar ).

La puissance apparente :  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I$  (en kVA ), permet de déterminer la valeur du courant absorbé par un récepteur. Elle oscille entre la charge et la source.  $\varphi$  : déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension)  
[7]

Ces puissances se composent vectoriellement comme indiqué sur la figure 1-7



**Figure I-7** : composition vectorielle des puissances active, réactive et apparente.

### **I-9- facteur de puissance :**

#### **1- définition :**

Le facteur de puissance est une caractéristique d'un récepteur électrique. Pour un dipôle électrique alimenté en régime de courant variable au cours du temps, le facteur de puissance

de l'installation est le quotient de la puissance active en kW consommée par l'installation sur la puissance apparente en kVA fournie à l'installation.

En l'absence d'harmoniques, il est égal au cosinus de l'angle de déphasage  $\varphi$  entre la puissance active et la puissance apparente.

$$f = \frac{P}{S} = \frac{\text{Puissance active (kW)}}{\text{Puissance apparente (kVA)}} \quad (\text{le } \cos \varphi \text{ est compris entre 0 et 1})$$

Un facteur de puissance proche de 1 optimise le fonctionnement d'une installation. Par contre, en présence d'harmoniques ces deux valeurs peuvent être très différentes :  $F = F_d \cdot \cos \varphi$ .

$F_d$ : facteur de déformation

Il est possible d'exprimer la  $\tan \varphi$  en l'absence d'harmoniques, avec :

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\text{puissance réactive (kVAR)}}{\text{puissance active (kW)}}$$

La valeur la plus faible de  $\tan \varphi$  optimise l'installation. (C'est une mesure du rendement électrique d'une installation). Et on a la relation :

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \quad [7]$$

### **2- Caractérisation d'un récepteur en fonction de son facteur de puissance :**

Lorsque le facteur de puissance est égal à 1, on dit que le récepteur est purement résistif. Ce qui ne veut pas dire que c'est un conducteur ohmique idéal (ou résistance pure) et donc ; le courant a la même allure que la tension mais que ce récepteur n'a aucun caractère inductif ou capacitif et qu'il n'y a aucun déphasage entre le fondamental du courant qu'il appelle et la phase de la tension qui lui est appliquée.

✓ Lorsque le facteur de puissance est égal à 0, on dit que le récepteur est purement réactif, il n'absorbe aucune puissance au réseau et ne dissipe aucune énergie sous forme de chaleur.

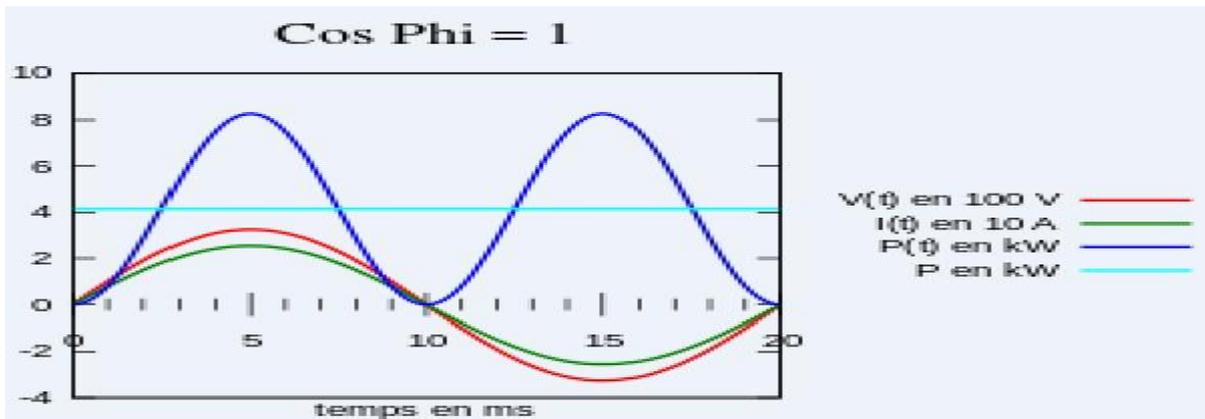
✓ Ces deux cas extrêmes ne correspondent qu'à des modèles. Les récepteurs réels n'étant jamais idéaux. Mais ces modèles peuvent bien convenir dans les conditions d'utilisation du récepteur considéré. [4]

## 3 -Effets du facteur de puissance :

Le schéma ci-contre représente la puissance instantanée (produit de la tension et du courant instantanés) consommée par un dipôle soumis à une tension de 220 (V) et traversé par un courant de 18 (A) dans trois cas :

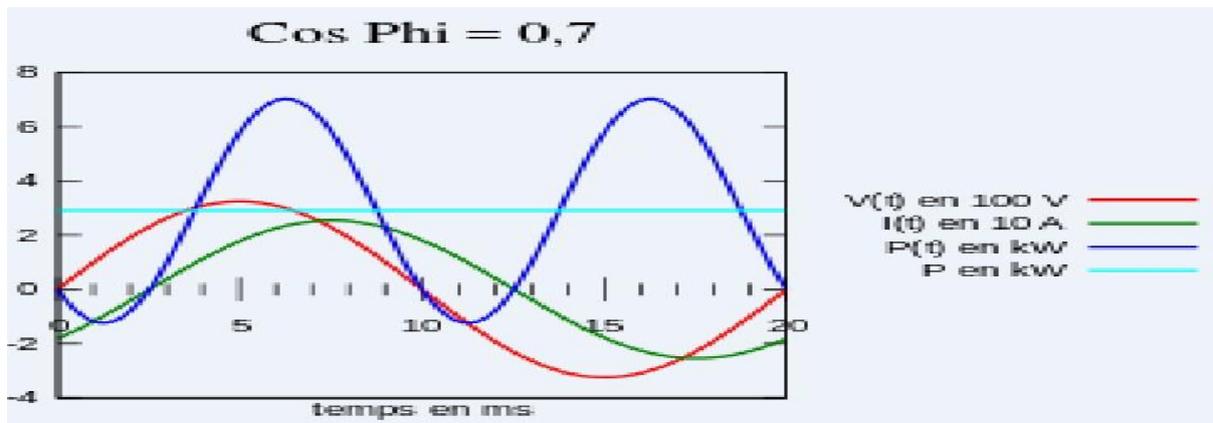
-Le facteur de puissance est égal à 1 (valeur maximale): la tension et le courant sont en phase

La puissance instantanée est toujours positive et la puissance moyenne est maximale.



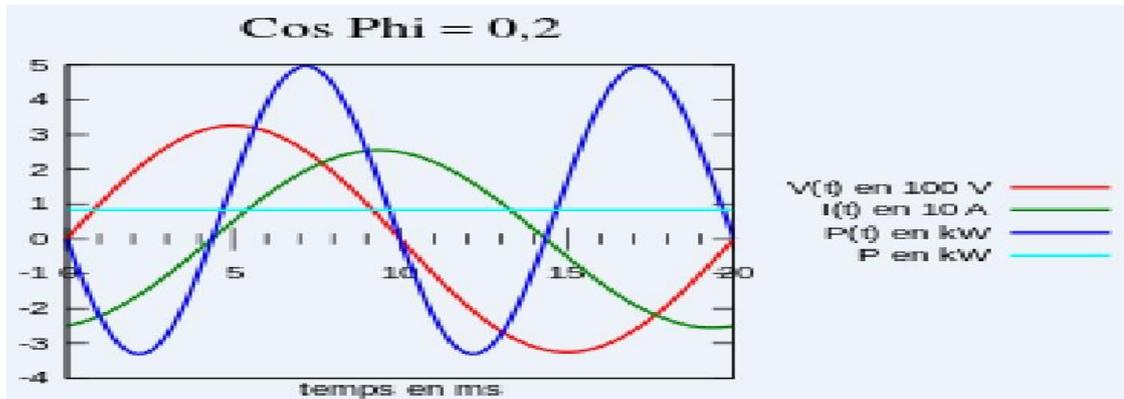
**Figure I-8:** Puissance instantanée avec un facteur de puissance égal à 1.

- Le facteur de puissance est égal à 0,7 (valeur intermédiaire) : le courant suit toujours une courbe périodique, mais elle est « en retard » comparativement à la courbe de la tension. La puissance prend par moment des valeurs négatives, le dipôle refoule périodiquement de l'énergie sur le réseau :



**Figure I-9 :** Puissance instantanée avec un facteur de puissance égal à 0,7.

Le facteur de puissance est égal à 0,2 (valeur faible) : le courant est le même, la puissance instantanée fluctue avec la même amplitude, mais elle est fortement décalée vers le bas par rapport aux courbes précédentes. La puissance moyenne est faible : 20 % de la puissance mise en jeu lorsque le facteur de puissance est unitaire.



**Figure I-10** : Puissance instantanée avec un facteur de puissance égal à 0,2.

- La situation d'un dipôle inductif tel une bobine : le courant est en retard sur la tension. La puissance périodiquement restituée provient de l'énergie magnétique stockée. Une situation « symétrique » se produit avec un dipôle capacitif : dans ce cas, le courant est en avance sur la tension. La puissance périodiquement restituée provient de l'énergie de la charge électrique stockée. Les effets de dipôles plus complexes (par exemple un grand nombre de télévisions) peuvent modifier la tension nominale du réseau d'alimentation, engendrer des perturbations de l'onde sinusoïdale et produire des courants harmoniques susceptibles de perturber le bon fonctionnement d'autres appareils (en général, ces perturbations proviennent de l'installation de l'utilisateur). Elles sont générées entre autres par les alimentations à découpage (téléviseurs, ordinateurs...), les variateurs de vitesse ou d'éclairage qui polluent le réseau électrique.). Les distorsions harmoniques entraînent l'échauffement des câbles, moteurs et transformateurs, et donc un vieillissement prématuré avec risques de surintensité ainsi que des pertes d'énergie par effet JOULE. Le gestionnaire du réseau de distribution s'engage à maintenir un taux de distorsion harmonique acceptable, quitte à imposer des contraintes à certains clients qui les génèrent.

Les pertes des lignes électriques sont égales à :

$$\text{Pertes} = \frac{L \times P^2}{K \times S \times U^2 \times \cos(\varphi)^2}$$

Où  $L$  : est la longueur de la ligne.  $P$  : la puissance active transportée.

$K$  : la conductivité du conducteur.  $U$  : la tension entre phases et  $S$  : la section du fil.

Le maintien d'un facteur de puissance élevé est donc intéressant au niveau des pertes. La relation ci-dessus peut d'ailleurs s'écrire plus simplement :  $\text{pertes} = R \times I^2$  avec  $R$  : la résistance de la ligne et  $I$  : la valeur efficace du courant qui circule dans la ligne.

-En Algérie, le facteur de puissance est considéré normal s'il atteint 85% à 90%. Dès que le facteur de puissance soit faible dans une entreprise consommant de l'énergie électrique, l'entreprise paye une amende et lorsque ce facteur est élevé, elle reçoit une prime. Donc, l'amélioration du facteur de puissance est une tâche extrêmement importante pour l'économie.

Le consommateur devrait donc soit payer la part de la puissance réactive correspondante, soit prévoir une installation de compensation de la puissance réactive. En principe, il est possible d'agir sur le facteur de puissance en intervenant sur la puissance active, en pratique on fait varier la puissance réactive soit en la diminuant, soit en l'augmentant. Ce réglage s'appelle évidemment la compensation [8]

### **4\_ Amélioration du facteur de puissance**

#### **4-1-Action directe sur l'installation [9]**

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

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

- Emploi d'un transformateur supplémentaire pour alimenter les circuits de protection et d'éclairage.

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

### **4-2- Action indirecte [9] :**

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

- Les batteries de condensateurs
- Les compensateurs statiques
- Compensateurs synchrones

### **I-10 -Stabilité des réseaux électriques :**

La stabilité est un problème crucial dans les réseaux électriques depuis les années 1920. Plusieurs blackouts de grande ampleur provoqués par l'instabilité du réseau électrique ont illustré l'importance de ce problème. La stabilité du réseau électrique est semblable à celle de n'importe quel système dynamique et a des principes mathématiques fondamentaux. La stabilité des réseaux électriques est définie en général par leur capacité de rester à un point de fonctionnement stable après l'apparition d'une petite perturbation et de retrouver un point de fonctionnement stable après l'apparition d'une grande perturbation On peut classer les types de la stabilité comme suit :

[10]

#### **1- Stabilité angulaire :**

Etant donné que les systèmes de puissance recourent principalement aux machines synchrones pour la génération de puissance électrique, un aspect important est le fonctionnement de ces générateurs au synchronisme. La stabilité angulaire (ou stabilité d'angle rotorique) implique l'étude des oscillations électromécaniques inhérentes aux réseaux électriques (oscillations

angulaires de quelques générateurs menant à la perte du synchronisme de ces derniers avec d'autres générateurs) . Elle est définie comme étant la capacité d'un ensemble de machines

synchrones interconnectées capables de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après avoir été soumis à une perturbation. [11]

L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques soit d'une machine et du reste du système ou d'un groupe de machines et du reste du système. Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme. Ce qui met en danger l'équilibre production-consommation du système. Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations ou de la stabilité transitoire :[12]

### **1-1-Stabilité angulaire aux petites perturbations :**

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations. Cas d'une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement etc... [12][11]

### **1-2-Stabilité transitoire :**

La stabilité transitoire concerne la capacité du réseau à maintenir le synchronisme suite à une perturbation sévère comme un court-circuit, arrêt d'un générateur etc... La réponse du système comporte de grandes variations des angles rotoriques et est influencée par la relation non linéaire entre couples et angles.

### **2 -Stabilité de fréquence :**

La stabilité de fréquence est la capacité d'un système électrique à maintenir sa fréquence à la suite d'une grave perturbation résultant en un déséquilibre significatif entre la production et la consommation. L'instabilité se manifeste sous la forme de variations de fréquence soutenues, menant au déclenchement de générateurs et/ou de charges.

### **3 -Stabilité de tension :**

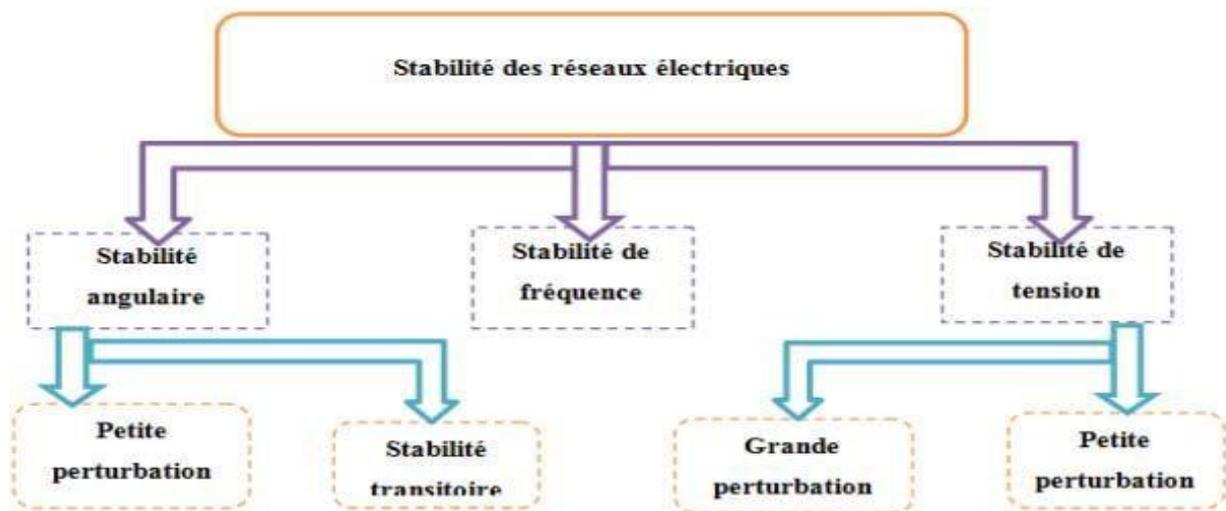
La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds dans des conditions de fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension. Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations :

### 3-1-Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations :

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production etc...

### 3-2-Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations :

Elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des noeuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit etc... Dans ce mémoire, nous nous intéressons seulement à la stabilité de tension. Une étude détaillée sera présentée dans la section suivante



**Figure I-11** : Classification des types de stabilité des réseaux électriques.

### I-11- Causes d'instabilité de tension :

Les problèmes d'apparition du phénomène d'écroulement de tension sont toujours liés à la difficulté de régler la tension au-dessus d'une certaine valeur appelée tension critique. Généralement, l'effondrement de tension se produit dans les réseaux électriques qui sont fortement chargés, court-circuités et/ou ont un manque de la puissance réactive. Dans cette situation, le réseau électrique ne peut pas assurer la puissance réactive demandée par la charge. Ceci est dû à des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive de telle sorte que la puissance réactive des générateurs et des systèmes FACTS soient limités par des contraintes physiques. En plus, la puissance réactive générée par des bancs de

condensateur est relativement réduite à des tensions basses. La limite sur le transport d'énergie réactive est due principalement aux pertes réactives élevées dans les lignes électriques fortement chargées.

Les principales causes de l'instabilité de tension sont présentées dans la section suivante [13] :

### **1-Production trop éloignée de la consommation :**

La plupart du temps les sources d'énergie électrique se trouvent loin des zones de consommation. Cette situation rend le transport de l'énergie réactive très difficile à cause des pertes réactives très élevées. Cette difficulté de transport d'énergie réactive augmente la probabilité d'apparition d'une instabilité ou d'un effondrement de tension.

### **2-Manqué local d'énergie réactive [13] :**

L'effondrement de tension est fortement lié au manque de la puissance réactive requise pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise. A un certain niveau de charge, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge à cause des limitations sur la production et la transmission de celle-ci. La limitation de production de la puissance réactive inclut les générateurs et les équipements FACTS ainsi que la puissance réactive limitée des condensateurs. La limite de production de la puissance réactive des générateurs est due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique. Sans la limitation thermique, l'instabilité et l'effondrement de tension sont souvent impossibles. Dans le même contexte, les équipements FACTS sont de très grande dimension. La meilleure solution à ce problème est de produire cette énergie localement, proche de la consommation, par l'installation de batteries de condensateurs, de compensateurs synchrones (génératrices synchrones avec  $P=0$ ) ou des compensateurs statiques (FACTS)

### **I-12-Qualité de la tension :**

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles de la manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie. Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence. [14]

Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de 10 % autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- les creux de tension et coupures brèves.
- les variations rapides de tension (flicker).
- les surtensions temporaires ou transitoires.

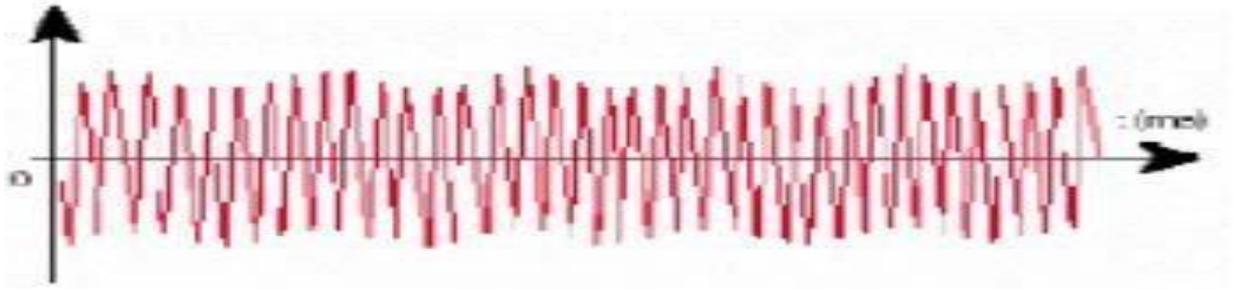
### **1- Dégradation de la qualité de la tension :**

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble etc... Ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques : (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillesse d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...)
- Installations perturbatrices : Fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils etc...

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension, lorsque celle-ci est présente, sont brièvement décrits ci-après

- Variation ou fluctuation de la fréquence :  
Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans + ou - 1% de l'intervalle 50 Hz.
- -Fluctuation de tension (flicker) :  
Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure I-12), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes...etc. [15]

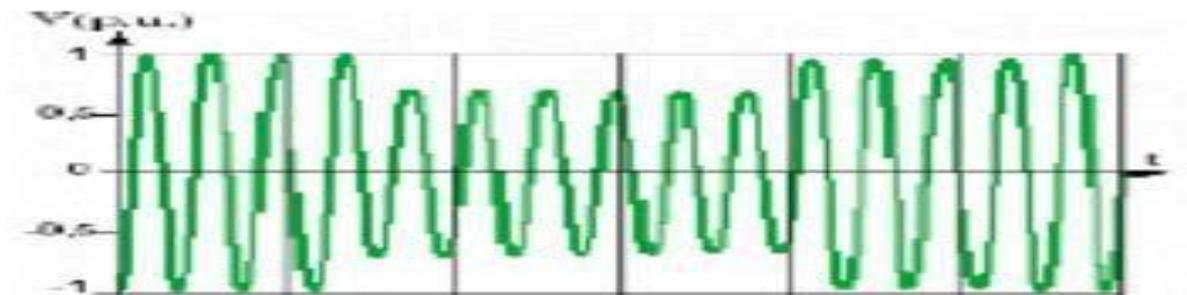


**Figure I-12 :** Variation rapide de la tension.

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelques 10 %.

- Creux de tension :

Les creux de tension sont produits par des court-circuit survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure I-13). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des «fluctuations de tension»). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1-0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT) [16]



**Figure I-13 :** Creux de tension.

Ils sont caractérisés par leurs : amplitude et durée, et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné. Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être

extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

### **I-13 -Exemple de compensation d'énergie réactive :**

Son mesure aux bornes d'une ligne d'alimentation, un courant de 1000 A sous une tension de 390 V. Il n'y a pas de condensateurs de compensation du  $\cos \phi$  et on mesure  $\cos \phi = 0,77$ .

On ramène le  $\cos \phi$  à 0,92 par l'installation de condensateurs

- Puissance réactive :  $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi = 1,73 \cdot 390 \cdot 1000 \cdot 0,64 = 431 \text{ kvar}$
- Puissance active :  $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi = 1,73 \cdot 390 \cdot 1000 \cdot 0,77 = 519 \text{ kW}$
- Puissance apparente :  $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 1,73 \cdot 390 \cdot 1000 = 674 \text{ kVA}$

Puissance de compensation

$$Q_c = P \cdot (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) = 519 \cdot (0,828 - 0,426) = 209 \text{ kVAr.}$$

- La nouvelle puissance réactive :  $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi = 1,73 \cdot 390 \cdot 1017 \cdot 0,391 = 271 \text{ kVAr}$   
ou  $Q = Q_1 - Q_c = 431 - 240 = 271 \text{ kVAr}$ .

Le courant devient :  $P = 519 \text{ kW} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \Rightarrow I = P / \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi = 519 \cdot 1000 / 1,73 \cdot 390 \cdot 0,92 = 836 \text{ A}$

- La nouvelle puissance réactive :  $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi = 1,73 \cdot 390 \cdot 836 \cdot 0,391 = 220 \text{ kVAr}$   
ou  $Q = Q_1 - Q_c = 431 - 220 = 211 \text{ kvar}$ .

### **I-14- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons détaillé tous les termes qui ont une relation avec la compensation d'énergie réactive et l'amélioration du réseau électrique.

# ***CHAPITRE II***

***MOYENS DE  
COMPENSATION***

***DE  
L'ÉNERGIE  
RÉACTIVE***

**II-1-Introduction :**

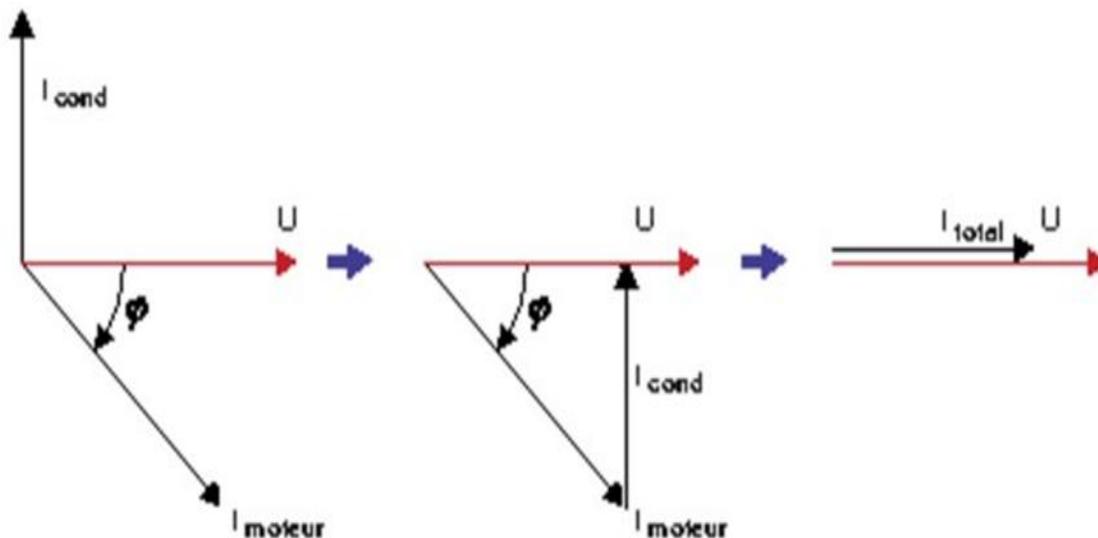
L'énergie réactive est à l'origine des pertes Joule, chute de tension et surdimensionnement du réseau. Donc pour résoudre ces problèmes, on doit faire appel à la compensation de l'énergie réactive qui consiste à produire l'énergie réactive au plus près de la demande. Par conséquent, compenser l'énergie réactive permet :

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

Si la consommation d'énergie réactive est anormalement élevée, on soupçonnera la présence d'équipements à forte composante inductive. Dans ce cas, le courant consommé est en retard par rapport à la tension.

On parle d'un déphasage d'un angle  $\phi$ . On compense ce déphasage en adjoignant à l'installation :

- Batteries de condensateurs,
- Machines synchrones
- Inductance ou FACTS.



**Figure II-1** : compensation du déphasage( $\phi$ ).

## **II-2-Les types de compensation sont :**

### **II-2-1- Batteries de condensateurs :**

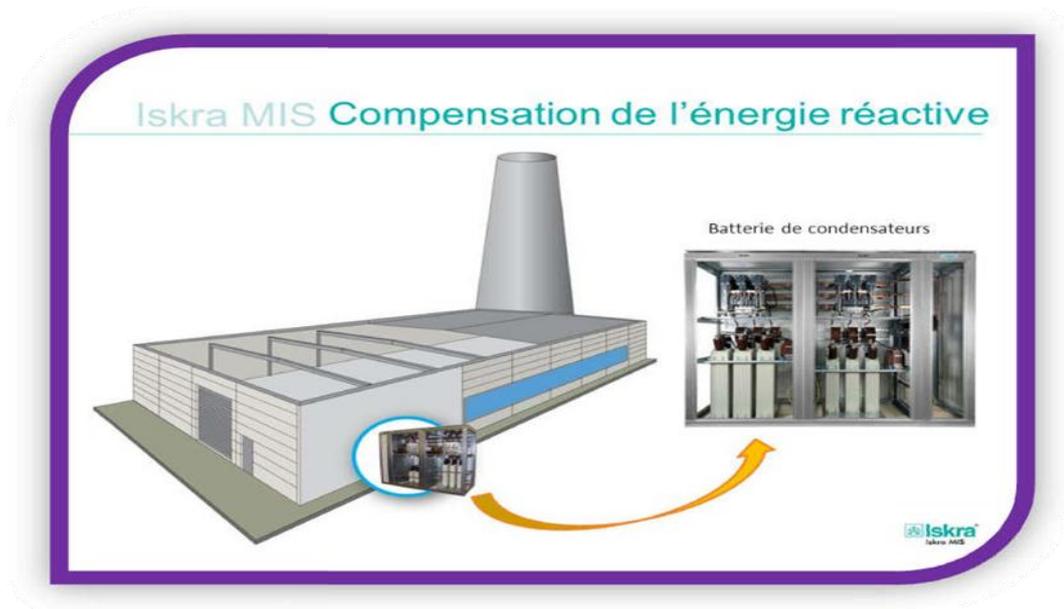
Une batterie de condensateur est un groupe de condensateurs unitaires raccordée directement aux bornes du récepteur en série ou en parallèles, groupement triangles ou étoiles. Les condensateurs sont généralement reliés aux réseaux par l'appareillage (fusible, contacteurs, interrupteurs,...) .

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

La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance de la charge et de la consommation d'énergie réactive de l'installation électrique.

Cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajusté au besoins

---



**Figure II-2:** batterie de compensation

### II -2-1-1-Types de batteries

On distingue deux types de batteries suivant leur raccordement :

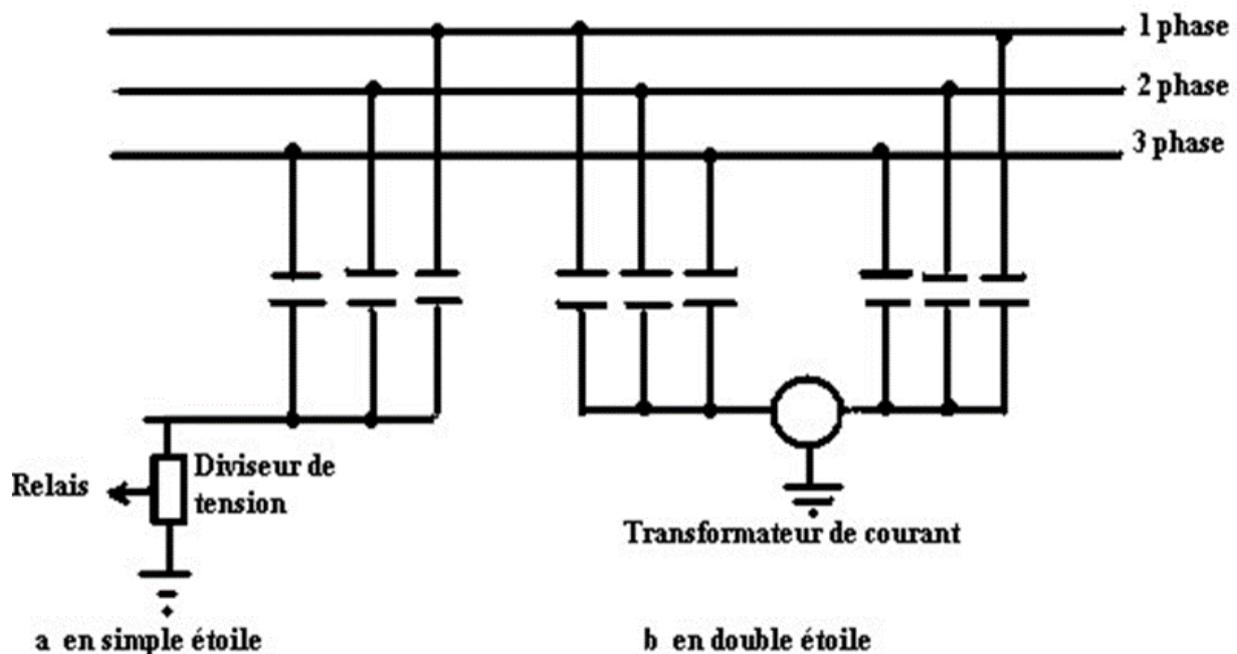
- 1- le branchement en dérivation pour les batteries shunt.
- 2- le branchement en série entre la source et la charge pour les batteries en série

#### 1-batterie shunt :[17]

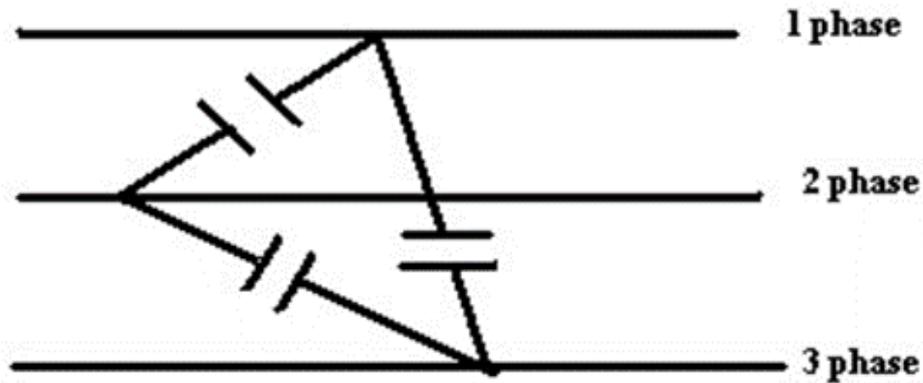
Une batterie de condensateurs shunt est une installation en dérivation du réseau. Elle est raccordée entre phases, ou entre phase et neutre. Les batteries peuvent être installées en simple étoile ou en double étoile ,quand elles sont raccordées entre phase et neutre ou terre. Elles sont installées en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



**Figure II-3:** batterie shunt en étoile



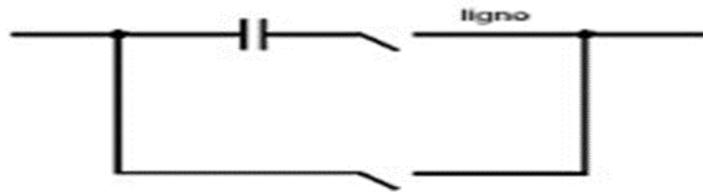
**Figure II-4** batterie shunt en triangle

### **2-batterie série :[18]**

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 :

- 1- maintien de la tension d'un réseau à facteur de puissance normal.
- 2- 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



**Figure II-5-Batterie serie**

**II -2-1-2-Les avantages des batteries : de tous les équipements statiques :**

- L'absence d'usure mécanique et un entretien réduit ;
- De faibles pertes ;
- Un faible volume et une installation facile ;
- Peuvent être fractionnés suivant les besoins ;
- Soit leur prix est moins élevé que les compensateurs rotatifs, qu'elle que soit la puissance ;

**II -2-1-3-Les inconvénients des batteries :**

- La puissance réactive fournie n'est pas réglable simplement ;
- La puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation ;
- La mise sous tension provoque un violent appel de courant ;
- Si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source est proche de celle d'un harmonique existant, cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux ;
- L'inconvénient le plus important c'est le régime transitoire après l'enclenchement et déclenchement parce que :

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs destinée à fonctionner en dérivation sur un réseau est accompagné d'un régime transitoire résultant de la charge de la batterie.[18]

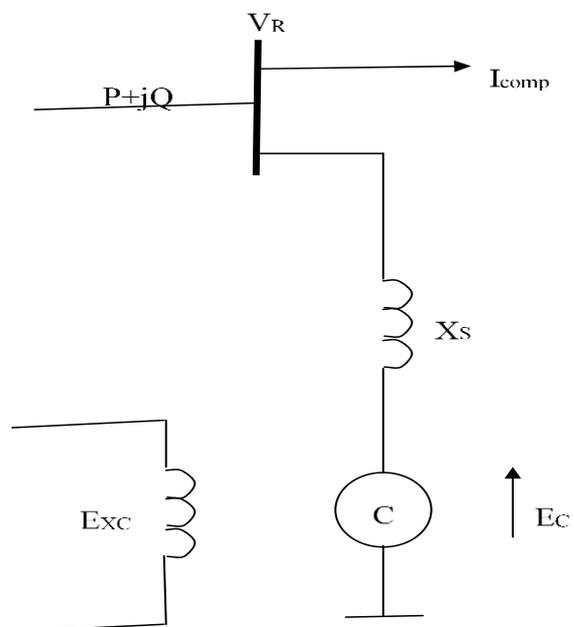
### **II-2-2-compensateur synchrone :**

Les compensateurs synchrones sont des moyens d'actions privilégiés. Très employés dans les années 1950 et 1960. On appelle compensateur synchrone, un moteur synchrone qui tourne à vide et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport ou sur un réseau. Pour régulariser la tension d'un réseau, on doit lui fournir une puissance réactive pendant les heures de pointe. Inversement, pendant les périodes creuses, on doit absorber l'excès de puissance réactive générée par les lignes. Le compensateur synchrone permet de compenser ces fluctuations de puissance réactive en ajustant l'excitation selon les besoins. Le compensateur agit alors comme une énorme capacitance ou inductance variable dont la valeur est réglable en faisant varier le courant d'excitation de son rotor. Si on augmente le courant d'excitation ( $I_{ex}$ ), la tension ( $V$ ) augmente et un courant ( $I$ ) s'établit dans le circuit déphasé de  $90^\circ$  en arrière de la tension du réseau ( $V_r$ ) de sorte que le compensateur voit le réseau

comme une inductance. Donc, lorsque l'on surexcite un compensateur, il fournit au réseau une puissance réactive d'autant plus grande que le courant d'excitation est plus élevé. Enfin si l'on diminue le courant d'excitation de façon que ( $V$ ) devienne plus petite que ( $V_r$ ), un courant s'établit dans le circuit déphasé de  $90^\circ$  mais cette fois-ci en avant de la tension du réseau ( $V_r$ ) de sorte que le compensateur voit le réseau comme une capacitance. Donc, lorsque l'on sous-excite un compensateur, il reçoit de la puissance réactive. Cette puissance réactive produit une partie du champ magnétique nécessaire à la machine et l'autre partie étant fournie par le courant d'excitation ( $I_{ex}$ ) [19] [20]



**Figure II.6** Compensateur synchrone



**Figure II -7 :** Schéma simplifié d'un compensateur synchrone

Le compensateur synchrone c'est un moteur synchrone fonctionnant à vide c'est-à-dire il n'entraîne aucune charge, donc il n'absorbe aucune puissance active aux pertes près et dont l'excitation est réglable. Le C génère de la puissance réactive lors du régime de surexcitation (il se comporte comme une capacité) et absorbe de l'énergie réactive quand il est sous-excité (il se comporte comme une bobine). Donc, le C fonctionne dans l'un ou l'autre des régimes en fonction du régime de charge et de la ligne. Au régime de charge de la ligne, il est surexcité et au régime de sous-charge, il est excité par la puissance. Le C consomme une faible puissance active. Ec sera en phase avec la tension en jeu de barres VR

### **II-2-2-1-Les avantages de compensation synchrone**

Ce moyen de compensation est avantageux :

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

### **II-2-2-2-Les inconvénients de compensation synchrone :**

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

- Coût initial élevé.
- Machine tournante qui demande des entretiens.
- Pertes actives relativement importantes.
- La force motrice, n'est pas toujours compatible avec la demande instantanée de puissance réactive.
- Il peut décrocher dans le cas d'une surcharge brusque ou d'une chute de tension importante du réseau. Ceci nécessite une surveillance particulière avec l'utilisation de dispositifs de sécurité, encombrants.
- Il a besoin d'un générateur à courant continu pour assurer son excitation. Cet organe supplémentaire augmente le prix du moteur.

### **II-2-3-Etapes à suivre pour déterminer le compensateur adapté à un réseau électrique :**

Dans une installation électrique, la détermination de la solution de compensation de l'énergie réactive nécessite plusieurs étapes :

Etape1 : Détermination de la puissance des condensateurs (kVAr) pour compenser l'énergie réactive nécessaire à l'installation. La détermination de la puissance des condensateurs (kVAr) pour compenser l'énergie réactive nécessaire à l'installation se fait avec l'analyse des factures du fournisseur d'électricité suivant le type d'abonnement (puissance souscrite, l'énergie réactive facturées kVArh et  $\text{tg } \phi$  ). Le but est de supprimer l'énergie réactive qui est facturée et de ne pas la payer si elle dépasse 40 % de l'énergie active absorbée et dimensionner correctement les transformateurs, câbles, appareils de commande et de protection.

Les mesures sont relevées en aval du transformateur.

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_c = P (\text{Tg } \phi_1 - \text{Tg } \phi_2)$$

$Q_c$  représentant la puissance réactive de compensation

$P$  : Puissance active de l'installation.

$\text{tan } \phi_1$  : Tangente du déphasage  $\phi$  avant compensation.

$\text{tan } \phi_2$  : Tangente du déphasage  $\phi$  après compensation.

Etape2 : Détermination de la zone d'implantation. Suivant l'architecture de l'installation, la localisation et la puissance des récepteurs consommant du réactif, on peut réaliser

#### **1- COMPENSATION GLOBALE :**

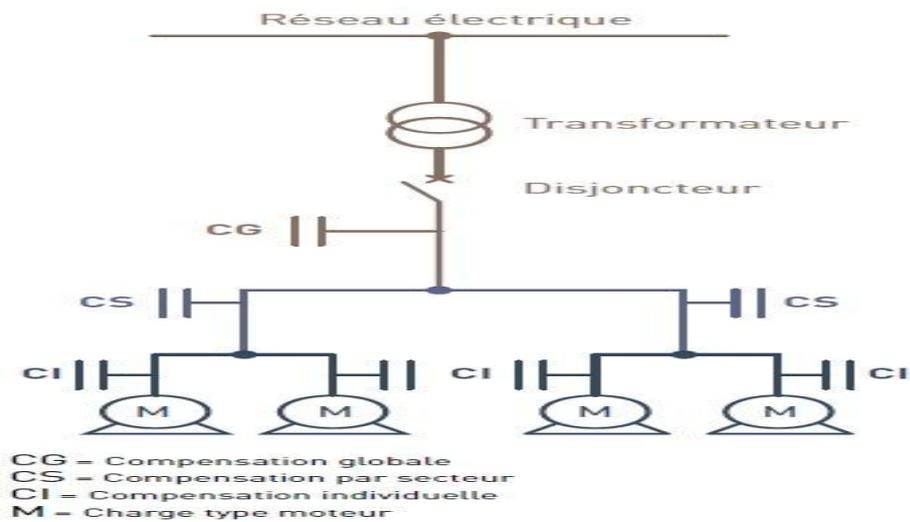
Au niveau du TGBT, privilégier une batterie automatique ou dynamique.

#### **2-COMPENSATION PAR SECTEUR :**

Au niveau des tableaux divisionnaires, privilégier une batterie automatique ou dynamique.

#### **3-COMPENSATION INDIVIDUELLE :**

Au plus près de la charge consommatrice de l'énergie réactive (suivant la variation des charges, une batterie fixe peut être suffisante).



**FigureII-8:** Différentes zones d'implantation des batteries de condensateurs

|                  | COMPENSATION GLOBALE   | COMPENSATION PAR SECTEUR   | COMPENSATION INDIVIDUELLE  |
|------------------|--|--|--|
| <b>AVANTAGES</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Suppression de la facturation d'énergie réactive</li> <li>Augmentation de la puissance disponible au secondaire du transformateur</li> <li>Solution la plus économique</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Suppression de la facturation d'énergie réactive</li> <li>Réduction des pertes en ligne entre le transformateur et les TD secteur</li> <li>Solution économique</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Suppression de la facturation d'énergie réactive</li> <li>Réduction des pertes sur toute la ligne entre le transformateur et la charge</li> <li>Compensation d'énergie réactive au plus près des appareils consommant du réactif</li> </ul> |
| <b>REMARQUES</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de réduction de pertes en ligne (chutes de tension pour les charges éloignées de la batterie de condensateurs)</li> <li>Pas d'économies sur le dimensionnement des équipements électriques</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Solution généralement utilisée pour réseau usine très étendu</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Solution la plus onéreuse compte tenu de la multiplicité des installations</li> </ul>   |

**FigureII-9 :** Avantages et inconvénients des différentes zones d'implantation

## **II-2-4- Compensation de technologie FACT :**

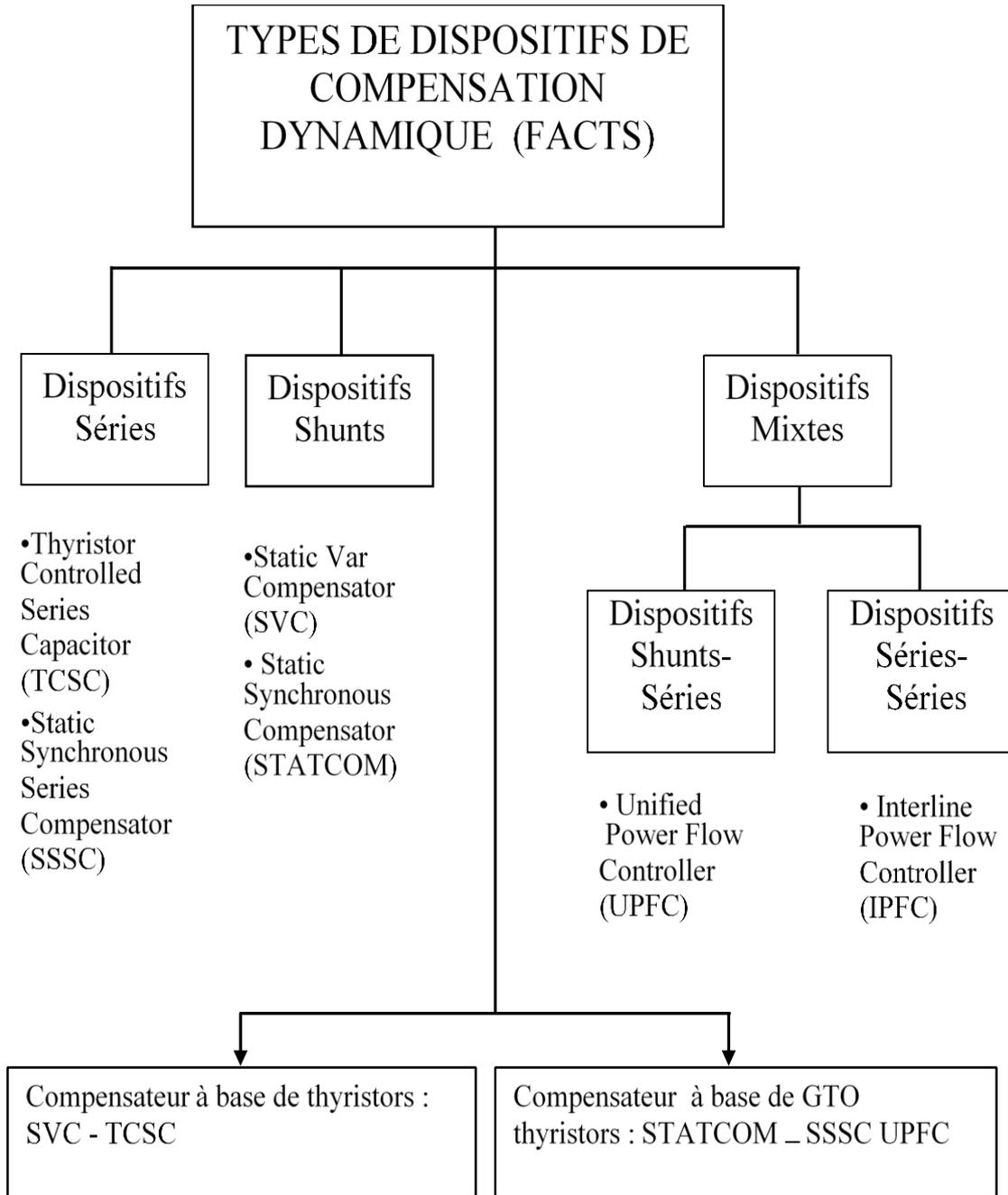
### **II-2-4-1- Introduction :**

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance (diode thyristor .IGBT....) qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (Interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux.

### **II-2-4-2- Nécessité des dispositifs FACTS**

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée, quelque soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou les bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé. Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT et GTO, le temps de réaction de ces dispositifs a diminué à quelques milli secondes. Il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [21]

**II-2-4-3- Les types de compensation FACTS:**



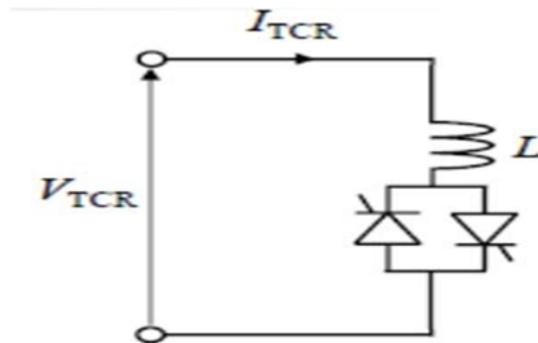
**1 -Compensateurs shunts :**

Les compensateurs shunts injectent du courant au réseau via le point de leur raccordement. Leur principe est basé sur une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, qui consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs shunts les plus utilisés sont les SVC et les STATCOM

- **Compensateur statique (SVC) :**

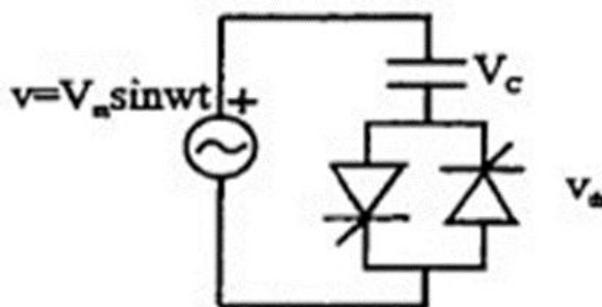
Les sous-ensembles du SVC sont:

- ❖ Inductance Contrôlée par Thyristors (Thyristor Controlled Reactor TCR) Une inductance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.



**Figure II-10:** Représentation du TCR.

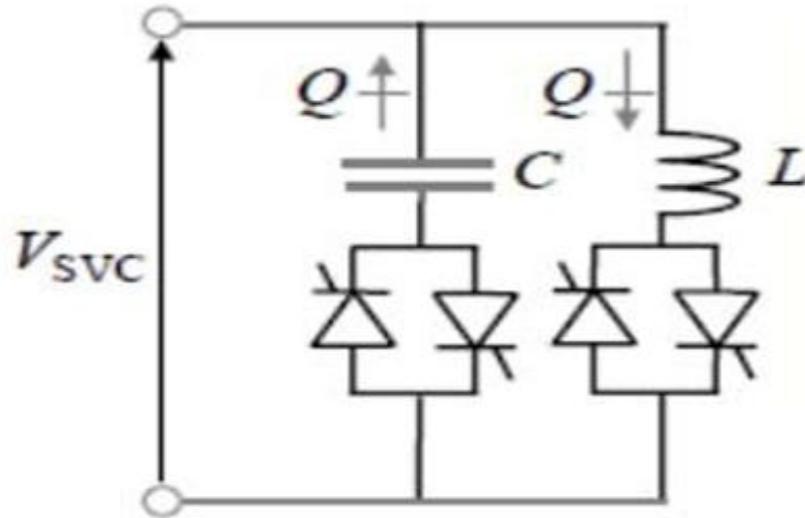
- ❖ Condensateur Commuté par Thyristors (Thyristor-Switched Capacitor- TSC) Un condensateur placé en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. Les thyristors fonctionnent en pleine conduction.



**Figure II-11:** Représentation du TSC

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

des thyristors et en faisant varier l'angle de conduction de ces derniers, nous pouvons faire face aux fluctuations de tensions engendrées par les variations de charge. En effet, le SVC peut accomplir cette double tâche en fonctionnant différemment, soit en absorbeur ou en générateur de puissance réactive. En ce qui suit, nous allons exposer ces deux types de fonctionnement séparément [22]



**Figure II-12:** Représentation du SVC



**Figure II-13** Exemple d'un SVC\*

- **Compensateur STATCOM :**

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage . Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone ; car il n'a pas d'inertie mécanique présente alors des meilleures caractéristiques telles que sa dynamique rapide, son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones.

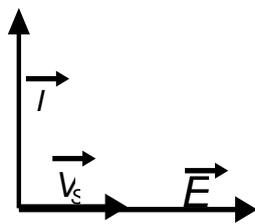
Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension au jeu de barres (nœud de connexion) est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

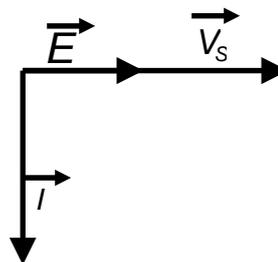
Si  $V_S < E$  , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $2\pi +$  par rapport à la tension  $E$  et le courant est capacitif (Figure 2.14).

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 (Figure 2.15).

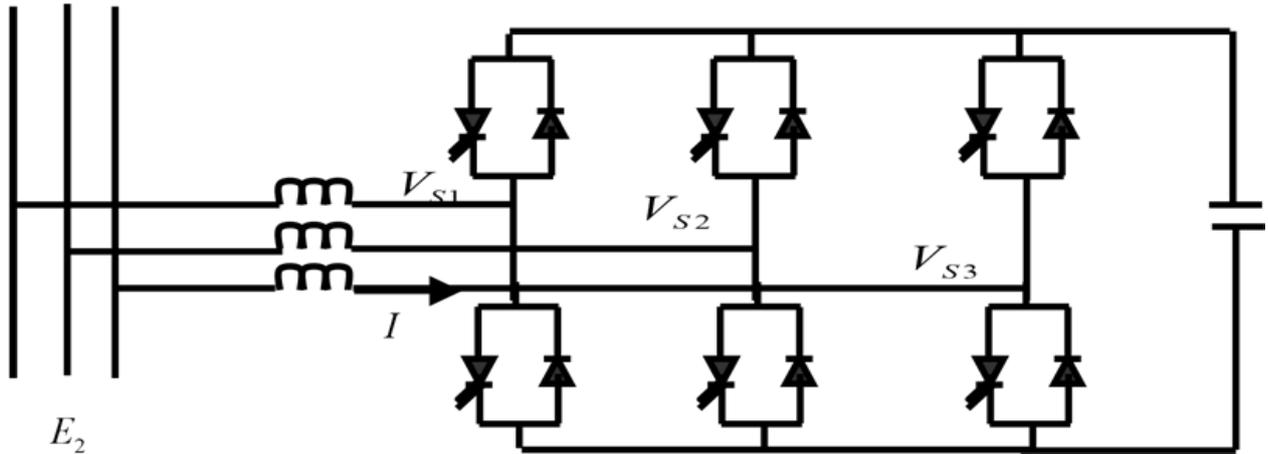
Si  $V_S = E$  , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie. [23]



**FigureII-14** Courant capacitif



**FigureII-15** : Courant inductif



**FigureII-16 : Structure de STATCOM**



**FigureII-17-Exemple d'un STATCOM**

## **2- Compensateurs série :[24] [25]**

La compensation série peut être utilisée dans les systèmes énergétiques pour la commande du flux d'énergie en régime permanent. En cas de lignes de transport avec une capacité thermique suffisante, la compensation peut soulager des surcharges éventuelles sur d'autres lignes parallèles

Le principe de ces compensateurs est de modifier l'impédance de la ligne de transport en insérant des éléments en série avec la ligne. Pour modifier l'impédance d'une ligne

essentiellement inductive. On insère de éléments capacitifs. On va bien sur chercher à contrôler l'impédance de la ligne, en utilisant des condensateurs séries réglables.

Les premiers schémas de compensateurs série à thyristors ont été proposés en 1986. À l'heure actuelle, trois conceptions principales de compensateurs série à thyristors peuvent être distinguées :

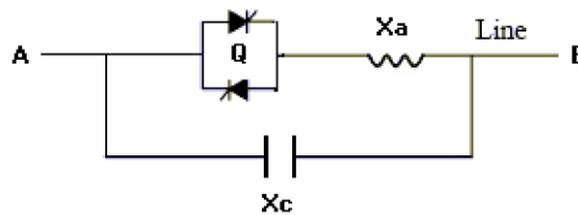
- le condensateur série commandé par thyristors TCSC.
- le condensateur série commuté par thyristors TSSC.
- le condensateur série commandé par thyristors GTO

[24] [23]

Les plus connus sont :

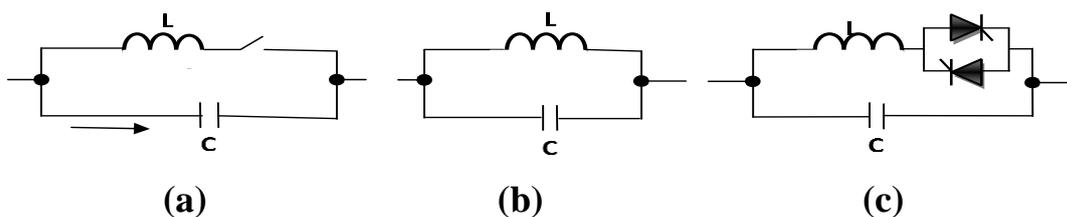
- **Compensateur TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation):**

C'est un compensateur à réactance capacitive qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive



**FigureII-18-Schéma d'un TCSC.**

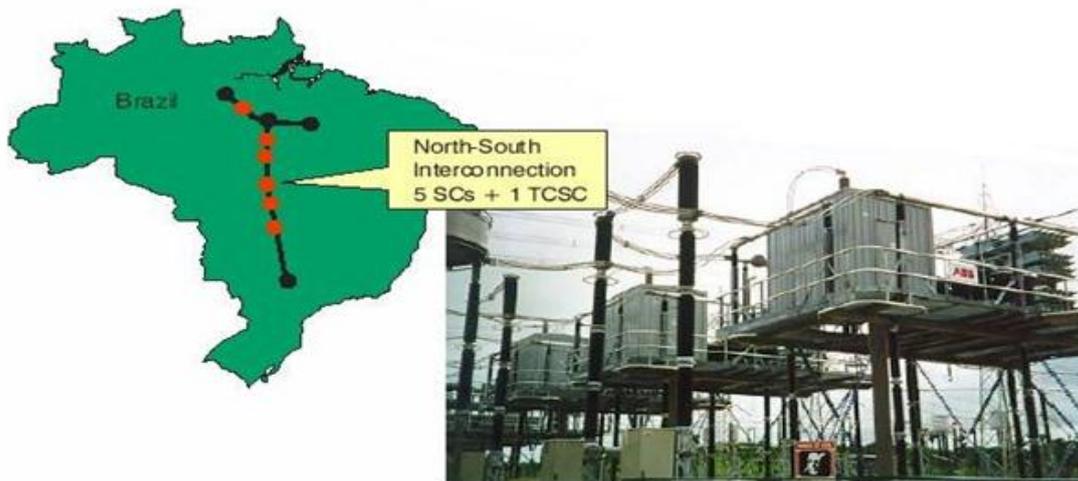
Trois régimes de fonctionnement peuvent être distingués :



**FigureII-19-Régimes de fonctionnement du TCSC.**

- a) 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.
- b) 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.
- c) 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.[24]

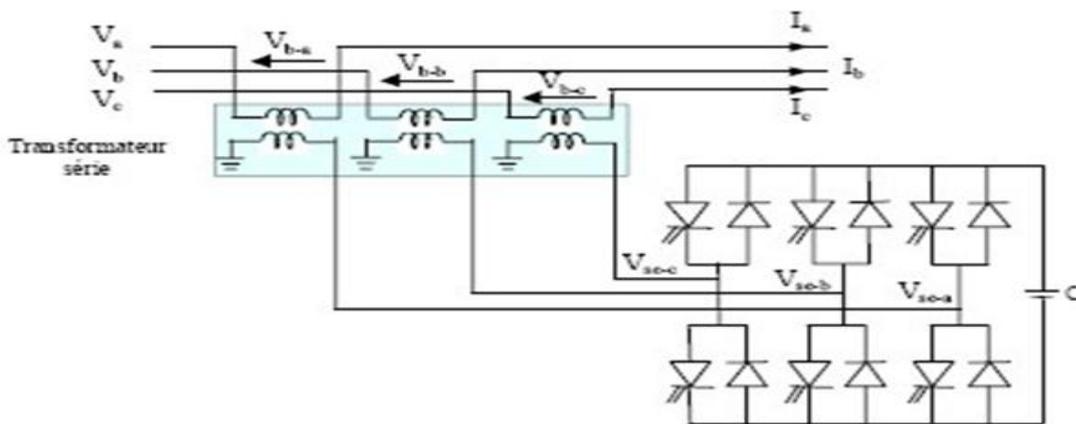
Exemple de TCSC :



- Maraba 348 Mvar SC 500 kV
- Miracena 161 Mvar SC 500 kV
- Colinas 2x161 Mvar SC 500 kV
- Imperatriz 161 Mvar SC 500 kV
- 107 Mvar TCSC 500 kV

- **Compensateur SSSC (Static Synchronous Series Compensator) :**

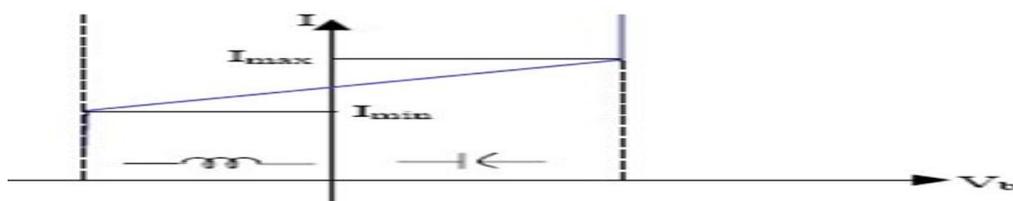
Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur



**FigureII-20-Schéma de base du SSSC**

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne.  $V_b = -KXI$

Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau. La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure suivante :



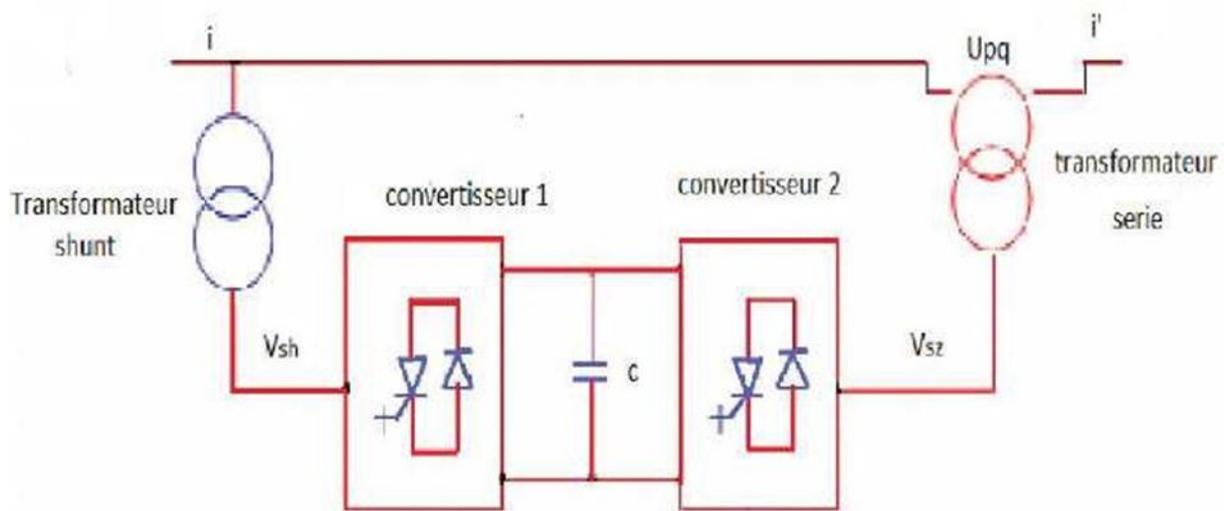
**FigureII-21-Caractéristique statique du SSSC**

**3-Dispositifs FACTS combinés série-parallel [26]**

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunt et série), il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées.

- **Contrôleur de transit de puissance unifié 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



**FigureII-22 -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

### **II -3-Conclusion :**

Dans ce 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 et nous avons présenté la compensation synchrone et la compensation avec batterie condensateur. Ainsi, nous avons donné une brève description et des définitions des divers types de dispositifs FACTS. Cette description est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique. 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, La technologie de la compensation par des FACTS s'est avéré une solution fiable et rentable aux problèmes de qualité de l'onde reliés à la puissance réactive et active

***CHAPITRE***

***III***

***SIMULATION***

***ET***

***COMPARAISON***

### **III-1-Introduction :**

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

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

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

### **III-2-Les avantages et les Inconvénients des moyens de compensation :**

#### **1-Batteries de condensateur :**

##### **1-1-les avantages :**

- Compensation parallèle ou en série pour le condensateur et diminue la réactance de la ligne
- Accroît la limite transmissible de puissance
- Améliore la stabilité du système
- Simplicité de construction (pas de complexité)
- Grande durée de vie
- Installation facile
- Absence d'usure mécanique
- Entretien réduit
- Faible volume occupé
- Pertes faibles
- Moins de consommation de la puissance active

##### **1-2-les inconvénients :**

- Lents pour les phénomènes transitoires
- Risque de surcompensation en cas de variation de charge
- Sensible aux surtensions et aux surcharges
- Capacités très coûteuses pour les grandes puissances
- Résonance avec les courants et les tensions harmoniques
- Risque de surtension.

### 2-Compensateur synchrone :

#### 2-1- les avantages :

- Fournitures ou absorption de la puissance réactive selon l'excitation
- Grande flexibilité pour toute condition de charge
- Absence de résonance par les harmoniques
- Limitation des courants et des tensions harmoniques
- Régulation locale de la tension près du besoin
- Stabilisation de la tension et alimentation de la puissance du court-circuit.

#### 2-2-inconvénients :

- Entretien trop onéreux
- Limitation de la quantité de puissance fournie en raison de l'échauffement des conducteurs
- Limitation en puissance absorbée pour un fonctionnement stable ( $\sigma < \pi/2$ )
- Coût élevé tant en investissement qu'en installation
- Utilisé seulement pour les compensations de la puissance réactive mais pas pour la régulation de la tension
- Nombre de manœuvre limité.

### 3-Compensateur FACTS:

#### 3-1-TCSC :

##### 3-1-1-les avantages :

Le TCSC permet d'avoir une impédance équivalente de la ligne variable avec une grande vitesse de commande, donc un meilleur contrôle du transit de la puissance et une augmentation de la puissance maximale transmissible.

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

**3-1-2- les inconvénients :** -le principal inconvénient de ce modèle est la discontinuité de l'impédance de TCSC au point de résonance ( $\omega = \omega_r$ ). Cette discontinuité est moyennement gênante, nous n'avons pas intérêt à faire travailler le TCSC trop près de la résonance, car cela entraîne une déformation des courants et des tensions trop importantes.

- l'implantation d'un TCSC sur une ligne de fort transit est un facteur déstabilisant.

### 3-2-STATCOM :

#### 3-2-1-les avantages :

L'avantage primordial du système STATCOM est sa réponse rapide et son niveau de sortie consistant qui présentent le plus grand intérêt pour limiter les conséquences des perturbations du réseau électrique ;

- la réduction de l'espace nécessaire pour l'installation à cause de l'absence de réactance et des batteries de condensateurs ;
- l'utilisation d'onduleurs à plusieurs niveaux permet de ne pas utiliser de filtres d'harmonique sur la partie alternative ;
- des performances dynamiques améliorées ;
- le STATCOM peut continuer, pendant un court temps, de produire une certaine énergie électrique comme un compensateur synchrone qui stocke l'énergie dans sa masse de rotation.

#### 3-2-2- les inconvénients :

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

### 3-3 SVC :

#### 3-3-1-Les avantages

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

#### 3-3-2 les inconvénients :

- les systèmes qui fonctionnent à leurs limites d'exploitation sont fortement dépendants de la compensation par SVC, donc peuvent souffrir facilement d'un effondrement de la tension.
- la puissance réactive générée est en fonction du carré de la tension, alors le SVC ne peut maintenir le niveau de tension requis par le réseau.
- le SVC ne peut contrôler qu'un seul paramètre important qui est la tension, pour le contrôle de l'angle et de l'impédance, d'autres dispositifs seront indispensables.
- enfin le SVC est très cher et demande beaucoup de place au sol pour son installation.

### **3-4- SSSC :**

#### **3-4-1-Les avantages :**

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

#### **3-4-2-Les inconvénients :**

-sa commande est très complexe que le TCSC

### **3-5-UPFC :**

#### **3-5-1-les avantages :**

- l'énorme avantage de ces compensateurs est bien sur la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne en un seul dispositif FACTS comprenant seulement deux onduleurs de tensions triphasées

- il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande des onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à de modifications du réseau en privilégiant une des fonctions temporairement

- Il pourra être utilisé afin d'amortir les oscillations de puissance. De plus il pourra alterner différentes fonctions : Par exemple, la fonction shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que les fonctions séries et déphaseurs pourront être utilisées afin d'amortir les oscillations de puissance

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

#### **3-5-2 Les inconvénients**

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

### **III-3-Les contraintes des dispositifs FACTS**

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent des inconvénients, en plus qu'ils ne sont pas une solution universelle,

ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables :[27]

- Le choix du FACTS ;
- Le choix du modèle du FACTS ;
- Choix de la localisation des FACTS ;
- Protection pour les FACTS et pour le réseau ;
- Interactions entre les dispositifs FACTS et les autres éléments.

### **III-4-Coût des dispositifs FACTS [28]**

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que :

- Les performances requises.
- La puissance de l'installation.
- Le niveau de tension du système.

| <b>Contrôleurs FACTS</b> | <b>Coût (US/\$)</b> |
|--------------------------|---------------------|
| Condensateur Shunt       | 8\$/Kvar            |
| Condensateur Série       | 20\$ /Kvar          |
| SVC                      | 40\$/Kvar           |
| TCSC                     | 40\$/Kvar           |
| STATCOM                  | 50\$/Kvar           |
| UPFC Partie Série        | 50\$/Kvar           |
| UPFC Partie Shunt        | 50\$/Kvar           |

**Tableau III-1:** Comparaison des coûts des contrôleurs FACTS

**III-6- Synthèse des dispositifs FACTS :**

Les différents dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des considérations économiques entreront également dans le choix du type d'installation à utiliser. Le tableau (II.2) synthétise les principaux bénéfices techniques des nouvelles technologies de FACTS. Le nombre "+" est proportionnel à l'efficacité du dispositif.

|         | Contrôle de débit de charge | Contrôle de la tension | Stabilité transitoire | Stabilité dynamique |
|---------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| SVC     | o                           | o o o                  | o                     | o o                 |
| STATCOM | o                           | o o o                  | o o                   | o o                 |
| TCSC    | o o                         | o                      | o o o                 | o o                 |
| UPFC    | o o o                       | o o o                  | o o                   | o o                 |
| SSSC    | o o                         | o                      | o o o                 | o o                 |

o : Performance moyenne.

o o : Bonne performance.

o o o Excellente performance

**Tableau III -2** : Performances des principaux FACTS [29]

### III-7-EXEMPLE DE SIMULATION

#### III-7-1-Introduction :

L'étude de la puissance réactive signifie que le réseau est apte à subir toute action qui fait baisser le niveau de tension dans tous points de réseau électriques, néanmoins côté charges. Ceci inclut l'intervention éventuelle des protections et automatismes divers fonction des perturbations envisagées.

Nous étudierons le comportement des réseaux électriques avec et sans intégrations des dispositifs FACTS tels que : SVC et STATCOM. Les simulations numériques, les résultats, les tableaux ainsi que les représentations graphiques ont été obtenus par le logiciel Matlab/PSAT (Power System Analysis Toolbox).

#### III-7-2-Description générale :

Dans tous les réseaux de transport, il est nécessaire de maintenir la tension aux différents jeux de barres dans des limites acceptables. Les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) sont des moyens de contrôle rapides et flexibles capables de faciliter le transit des puissances et d'améliorer la stabilité des réseaux électriques. Les contrôleurs dynamiques shunts SVC et STATCOM sont des dispositifs FACTS permettant de régler la tension et d'amortir les oscillations dues à des perturbations dans les réseaux électriques.

#### III-7-3- Logiciel de simulation :

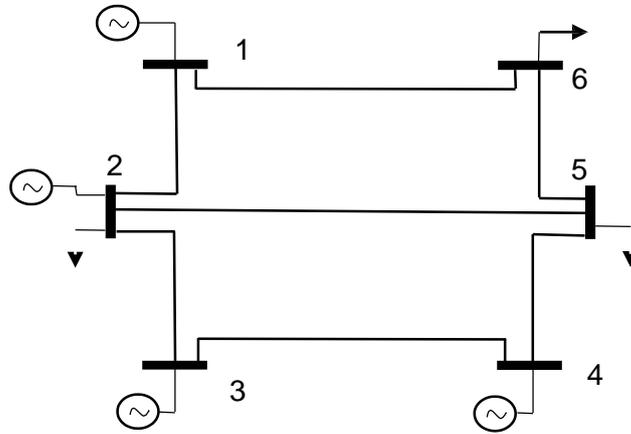
Avant d'entamer la phase de simulation, il est préférable de donner un bref aperçu sur le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox), utilisé dans ce travail. PSAT est un logiciel didactique, développé sous Matlab par Dr. Federico Milano [24] pour l'analyse des réseaux électriques. Il peut effectuer les fonctions statiques et dynamiques suivantes :

- Calcul d'écoulement de puissance PF (Power Flow).
- Calcul d'écoulement de puissance Optimal OPF (Optimal Power Flow).
- Calcul d'écoulement de puissance en continu CPF (Continuation Power Flow).
- Analyse de la stabilité de petites perturbations SSSA (Small Signal Stability Analysis).
- Simulation temporelle TDS (Time Domain Simulation).

Ces caractéristiques rendent PSAT très utilisé par les chercheurs et les laboratoires des réseaux électriques. Malgré la disponibilité de plusieurs logiciels spécialisés dans l'analyse et l'étude des réseaux électriques, développés sous Matlab, PSAT reste un outil performant et très prisé.

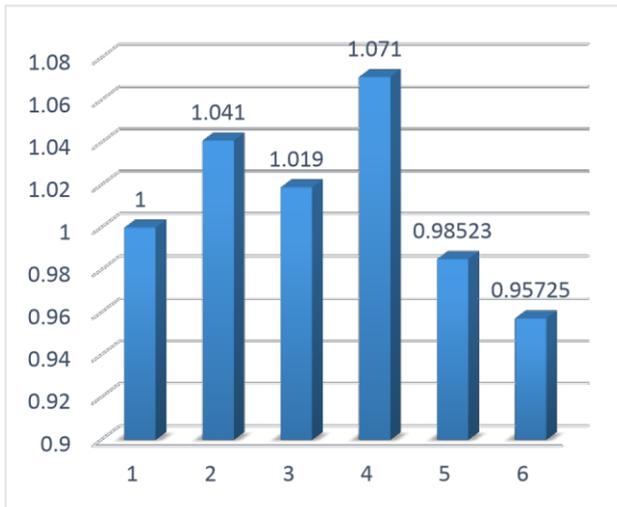
**III-7-4-Application du système étudié de 6 J.B :**

On va appliquer un réseau électrique de 6 jeux de barres IEEE. Constitué de 7 lignes électriques, 4 générateurs et 3 charges.

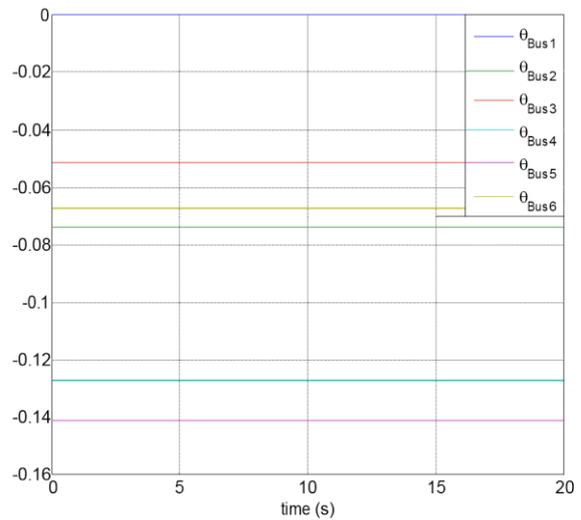


**Figure III-1** réseau 6 j.b

D'après les résultats de simulation cités aux figures (3.3) et (3.4), on remarque que le système est entièrement stable soit de l'amplitude ou de  $\theta$  de tension aux jeux de barres de réseau.



**Figure III-2** :Amplitude des tensions



**Figure III-3** :.angles de tension

|             | V (pu)         | Thêta (rad)     |
|-------------|----------------|-----------------|
| <b>J.B1</b> | <b>1.00000</b> | <b>0.00000</b>  |
| <b>J.B2</b> | <b>1.04100</b> | <b>-0.07428</b> |
| <b>J.B3</b> | <b>1.01900</b> | <b>-0.05168</b> |
| <b>J.B4</b> | <b>1.07100</b> | <b>-0.12737</b> |
| <b>J.B5</b> | <b>0.98523</b> | <b>-0.14247</b> |
| <b>J.B6</b> | <b>0.95725</b> | <b>-0.06749</b> |

**Tableau III -3 : Amplitude de tensions et thêta pour 6 J.B**

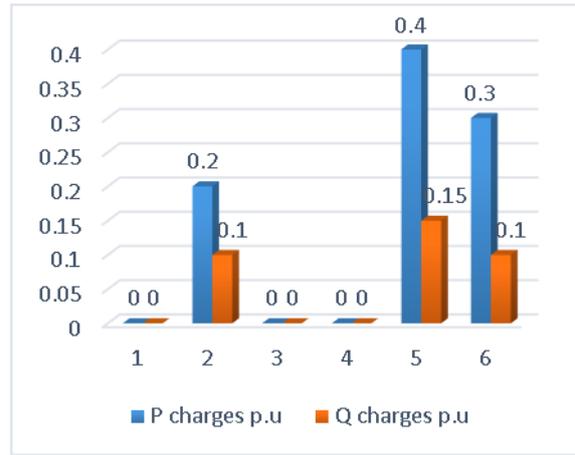
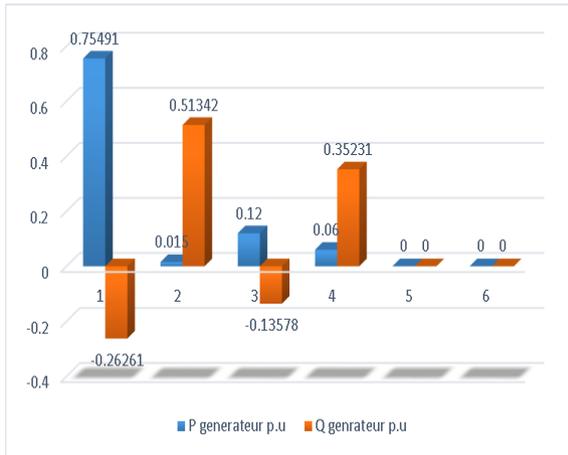
Les résultats de simulation cités aux figures ci-dessous, montrent :

Les puissances fournies par les générateur et consommée par les charges, représenté sur les graphique de la figure (8) et la figure (9).

La figure (7) montre la puissance active et réactive aux différents jeux de barres de réseau. On remarque que la puissance réactive aux JB 01et JB03 est négative, donc les génératrices consomment de l'énergie réactive via le réseau

|             | <b>P générateur,<br/>[pu]</b> | <b>Q générateur,<br/>[pu]</b> | <b>P charges [pu]</b> | <b>Q charges [pu]</b> |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>J.B1</b> | <b>0.75491</b>                | <b>-0.26261</b>               | <b>0</b>              | <b>0</b>              |
| <b>J.B2</b> | <b>0.015</b>                  | <b>0.51342</b>                | <b>0.2</b>            | <b>0.1</b>            |
| <b>J.B3</b> | <b>0.12</b>                   | <b>-0.13578</b>               | <b>0</b>              | <b>0</b>              |
| <b>J.B4</b> | <b>0.06</b>                   | <b>0.35231</b>                | <b>0</b>              | <b>0</b>              |
| <b>J.B5</b> | <b>0</b>                      | <b>0</b>                      | <b>0.4</b>            | <b>0.15</b>           |
| <b>J.B6</b> | <b>0</b>                      | <b>0</b>                      | <b>0.3</b>            | <b>0.1</b>            |

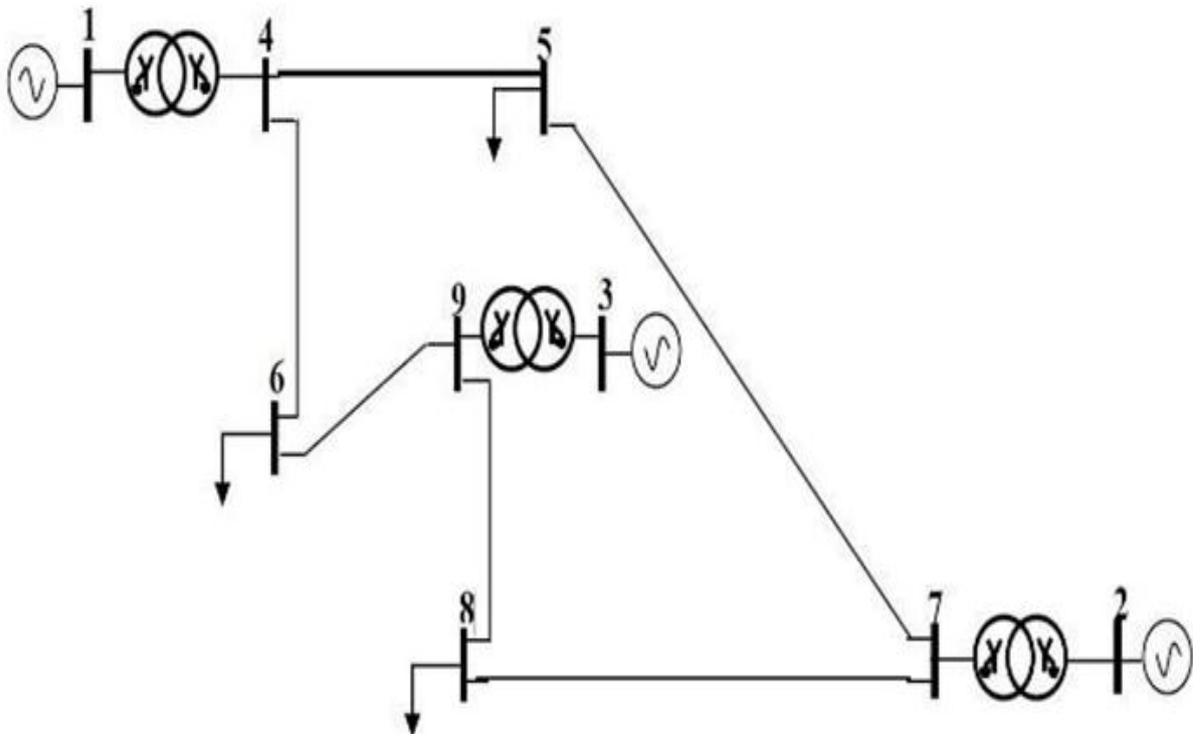
**Tableau III -4 : Puissances actives et réactives**



**Figure III-4 :** la puissance de générateur **Figure III-5:**la puissance de charge

**III-7-5- Application du système étudié de 9 J.B :**

On va appliquer un réseau électrique de 9 jeux de barres IEEE. Constitué de 6 lignes électriques, 3 générateur ,3transformateur et 3chargescomme



**Figure III-6 :** Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres

1-sans compensation :

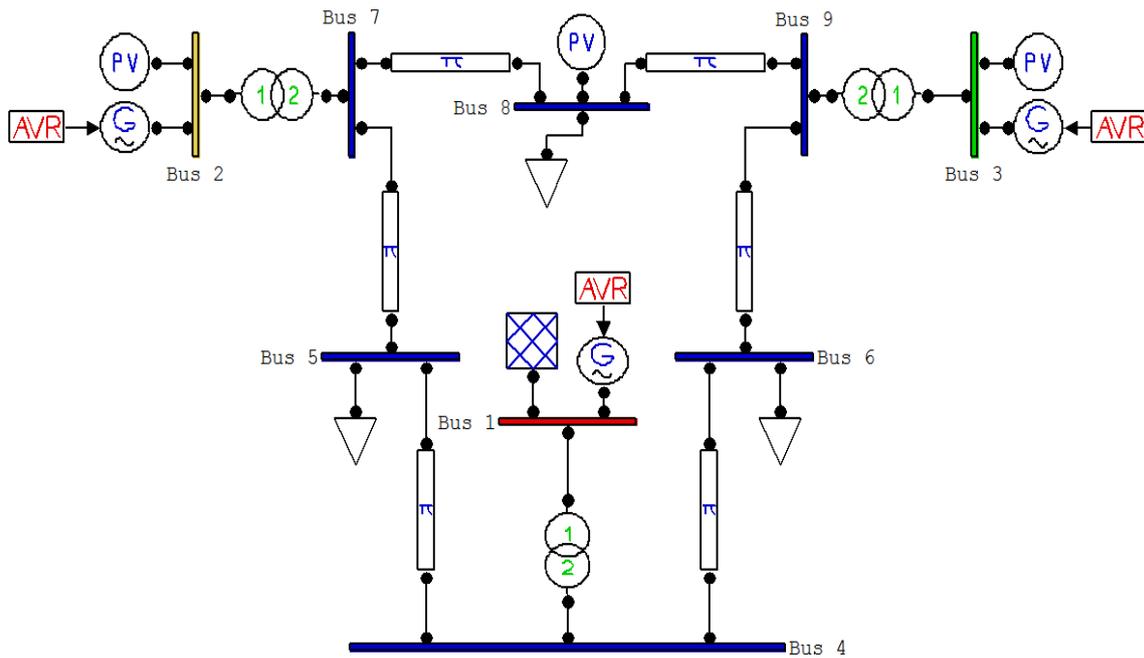


Figure III-7 : Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres sans compensation

D'après les résultats de simulation cités aux figures on remarque que le système est entièrement stable de tension

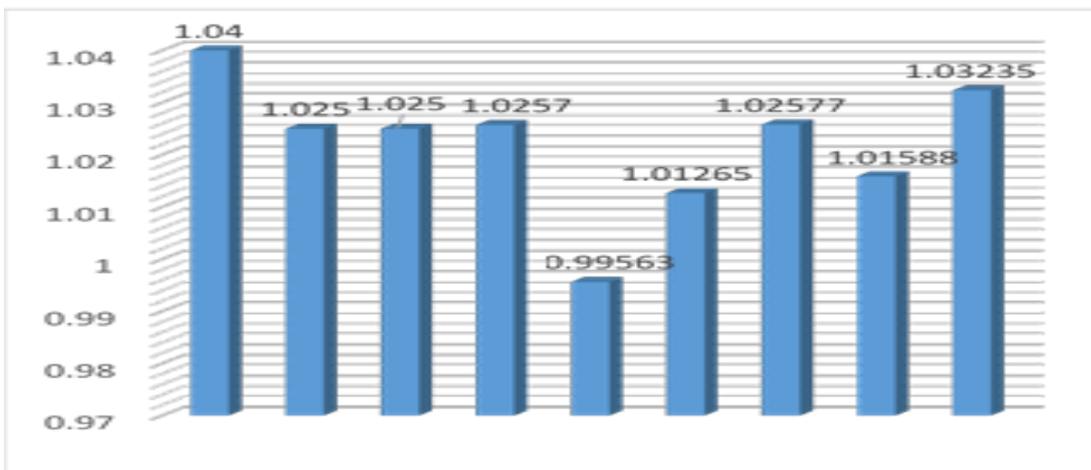


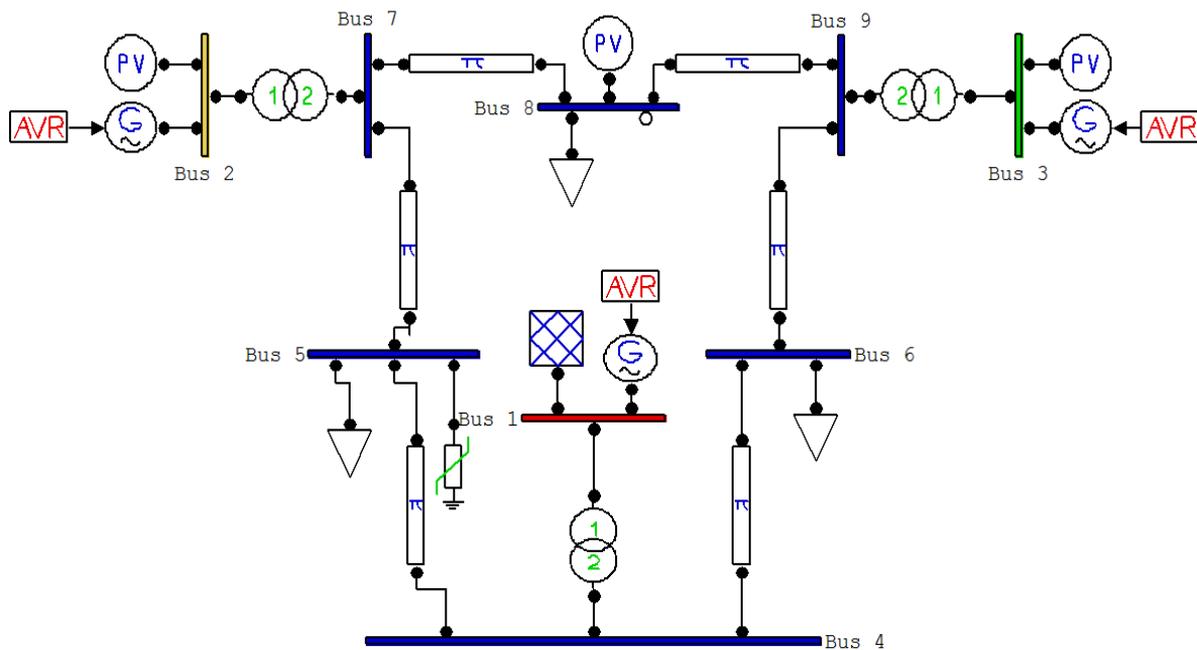
Figure III-8 : amplitude des tensions Figure III-13 : amplitudes des tensions

Le tableau III -5 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau étudié qui montre l'amplitude des tensions dans les limites requises.

|       | <b>V (pu)</b> |
|-------|---------------|
| J.B 1 | 1.04000       |
| J.B 2 | 1.02500       |
| J.B 3 | 1.02500       |
| J.B 4 | 1.02579       |
| J.B 5 | 0.99563       |
| J.B 6 | 1.01265       |
| J.B 7 | 1.02577       |
| J.B 8 | 1.01588       |
| J.B 9 | 1.03235       |

**Tableau III -5** Amplitude de tensions pour 9 J.B

**2-compensation avec SVC**

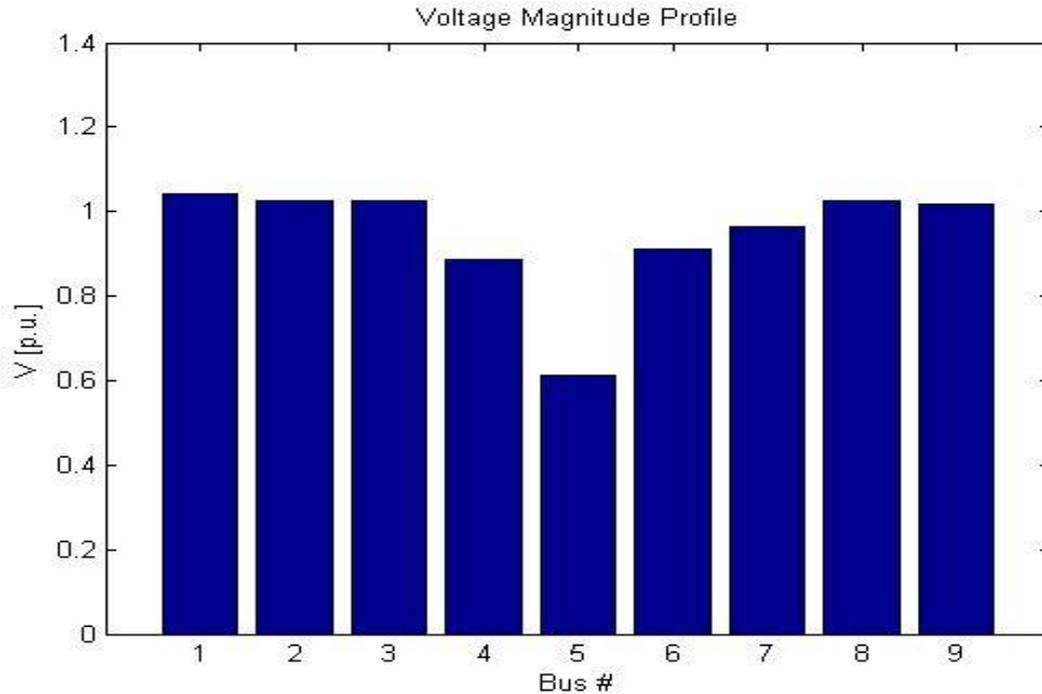


**Figure III-9 :** Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres avec compensation

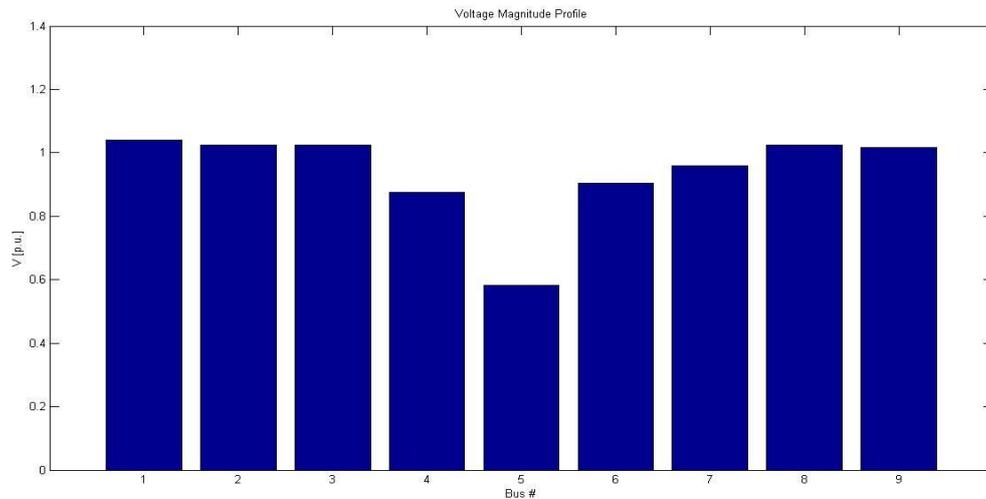
SVC

**2-1 Variation de la charge réactive au JB (05) :**

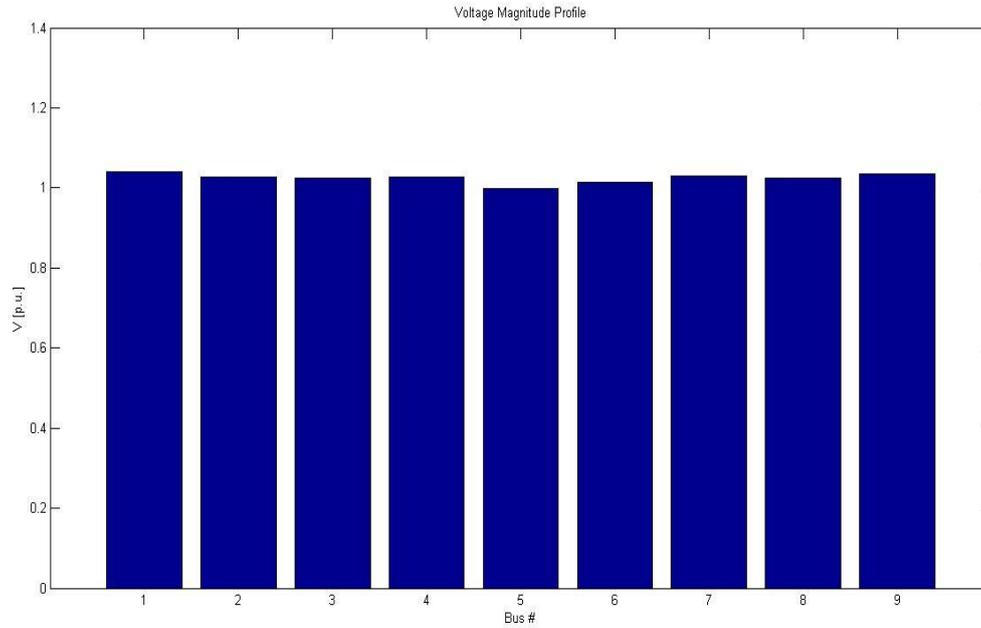
- On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 5, les résultats de simulation montrent que une fois que le réseau est raccordé à un système de compensation, tel que (SVC) de même charge de la réactive cité auparavant, on voit d'après la figure en présence de compensateur SVC. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges et améliore les tensions



**Figure III-10:** amplitudes des tensions ( $Q=3.05$ ) sans compensation



**Figure III-11:** amplitudes des tensions ( $Q=3.07$ ) sans compensation



**Figure III-12:** amplitudes des tensions ( $Q=3.07$ ) avec compensation svc

De même que les tensions des jeux de barres adjacentes et la tension de jeux de barres sur lequel la en absence de compensation, mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système améliorent. La figure montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

|       | Sans Compensation |            | SVC        |
|-------|-------------------|------------|------------|
|       | $Q=3.05pu$        | $Q=3.07pu$ | $Q=3.07pu$ |
| Vbus4 | 0.86609           | 0.86149    | 1.03682    |
| Vbus5 | 0.57016           | 0.55789    | 1.02500    |
| Vbus7 | 0.91972           | 0.91666    | 1.03307    |

**Tableau III -6:** Amplitude des tensions

**2-2 Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06 :**

On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 4. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges. en présence de compensateur SVC .ce dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges

De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur

lequel la charge réactive est changée de 2.26 à 2.27 (pu) se baissent comme montrés au figure en absence de compensation. mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore

|       | Sans Compensation |          | SVC      |
|-------|-------------------|----------|----------|
|       | Q=2.26pu          | Q=2.27pu | Q=2.27pu |
| Vbus4 | 0.83021           | 0.82761  | 1.02500  |
| Vbus5 | 0.66197           | 0.65750  | 0.85858  |
| Vbus6 | 0.65320           | 0.64846  | 0.85243  |
| Vbus7 | 0.93044           | 0.92916  | 0.98610  |
| Vbus9 | 0.93860           | 0.93736  | 0.99118  |

**Tableau III -7:** Amplitude des tensions

**2-3 : Variation de la charge réactive aux JBs (05,06 et 08) :**

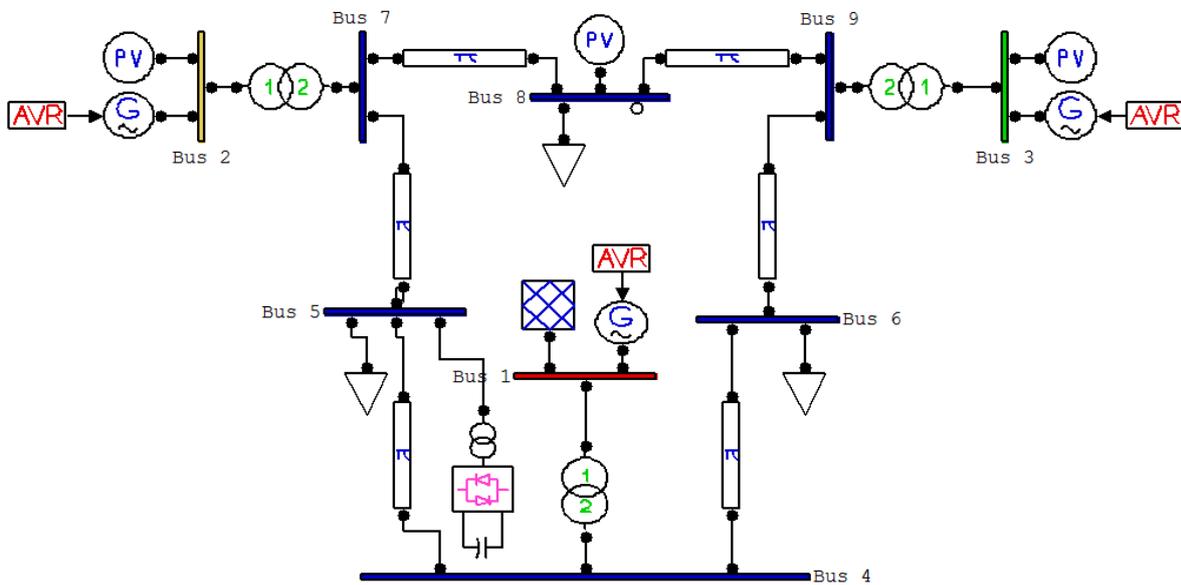
On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 4, En présence et en absence de compensation via le SVC. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charge, en présence de compensateur SVC. Ce dernier va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges

De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 1.68 à 1.69 (pu) se baissent comme montrés au figure en absence de compensation. mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore. Figure montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

|       | Sans Compensation |          | SVC      |
|-------|-------------------|----------|----------|
|       | Q=1.68pu          | Q=1.69pu | Q=1.69pu |
| Vbus4 | 0.89774           | 0.89630  | 1.02500  |
| Vbus5 | 0.77611           | 0.77356  | 0.88947  |
| Vbus6 | 0.77884           | 0.77627  | 0.89140  |
| Vbus7 | 0.92131           | 0.92017  | 0.95483  |
| Vbus8 | 0.84425           | 0.84247  | 0.88033  |
| Vbus9 | 0.93846           | 0.93746  | 0.96947  |

**Tableau III -8:** amplitudes des tensions

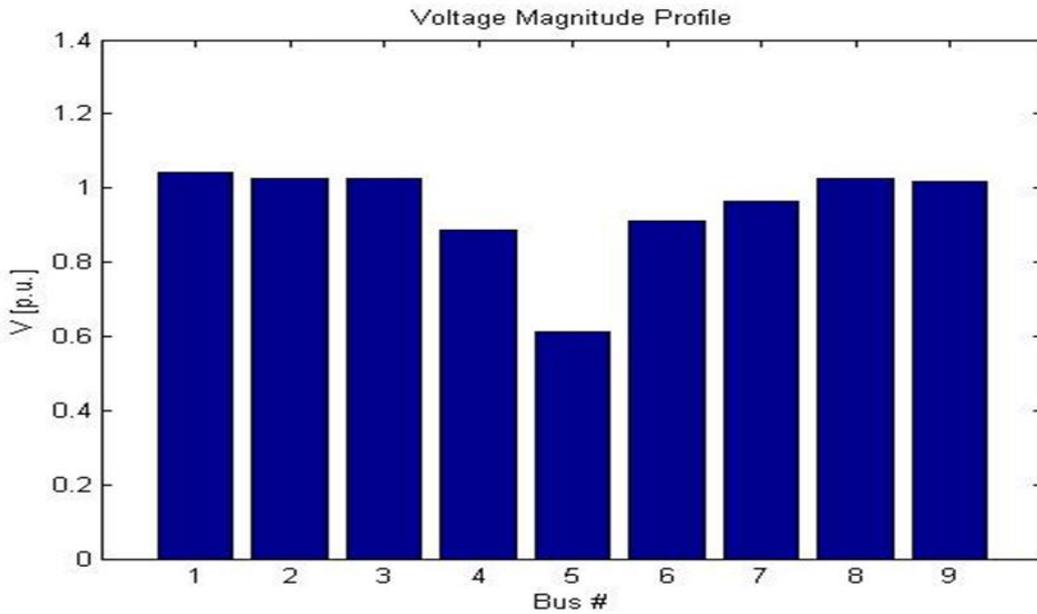
### 3-compensation avec STATCOM



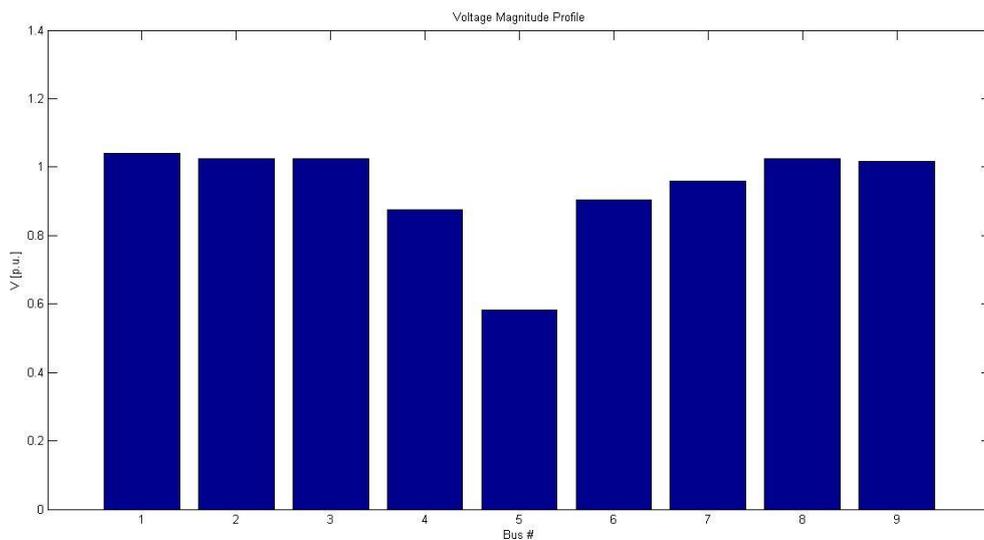
**Figure III-13 :** Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres avec compensation statcom

**3-1 :Variation de la charge réactive au JB (05) :**

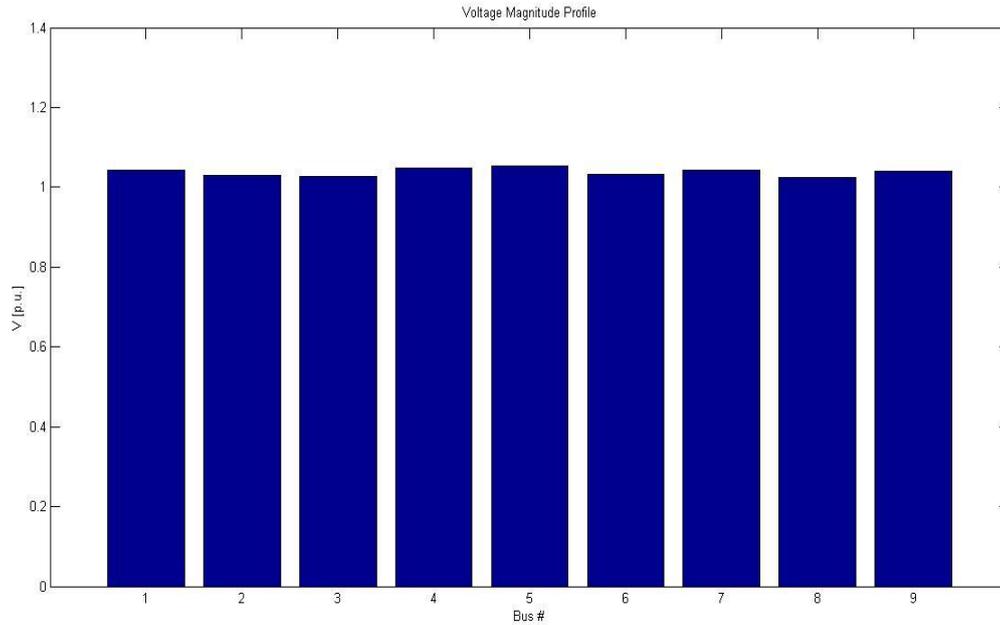
On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 5, les résultats de simulation montrent que les tensions du système se perturbent comme montrés dans les figures une fois que le réseau est raccordé à un système de compensation, tel que (STATCOM) de même charge de la réactive cité auparavant, on voit que le système revient à son état de stabilité. en présence de compensateur STATCOM. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges



**Figure III-14:**amplitude des tensions sans compensation(Q=3.05)



**Figure III-15 :**amplitude des tensions sans compensation(Q=3.07)



**Figure III-16** : amplitude des tensions avec compensation statcom (Q=3.07)

De même que les tensions des jeux de barres adjacentes et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 3.05 à 3.07 (pu) se baissent comme montrés au figure en absence de compensation, mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système améliorent. La figure montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

|       | Sans Compensation |          | Avec STATCOM |
|-------|-------------------|----------|--------------|
|       | Q=3.05pu          | Q=3.07pu | Q=3.07pu     |
| Vbus4 | 0.86609           | 0.86149  | 1.04246      |
| Vbus5 | 0.57016           | 0.55789  | 1.04000      |
| Vbus7 | 0.91972           | 0.91666  | 1.03680      |

**Tableau III -9** amplitude des tensions

**3-2 : Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06 :**

On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentée. En présence et en absence de compensation via le SVC. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des en présence de compensateur SVC. ce dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges

De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 2.26 à 2.27 (pu) se baissent comme montrés au figure 24 en absence de compensation. Mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque

que les tensions de système s'améliore. La figure montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

|       | Sans Compensation |          | STATCOM  |
|-------|-------------------|----------|----------|
|       | Q=2.26pu          | Q=2.27pu | Q=2.27pu |
| Vbus4 | 0.83021           | 0.82761  | 0.98733  |
| Vbus5 | 0.66197           | 0.65750  | 1.04000  |
| Vbus6 | 0.65320           | 0.64846  | 0.82235  |
| Vbus7 | 0.93044           | 0.92916  | 1.02732  |
| Vbus9 | 0.93860           | 0.93736  | 0.99371  |

**Tableau III -10:**Amplitude des tensions

**3-3 :Variation de la charge réactive aux JBs (05,06 et 08) :**

On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 4, . En présence et en absence de compensation via va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges

les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 1.68 à 1.69 (pu) se baissent comme montrés au figure ,en absence de compensation. mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

Figure montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

|       | Sans Compensation |          | STATCOM  |
|-------|-------------------|----------|----------|
|       | Q=1.68pu          | Q=1.69pu | Q=1.69pu |
| Vbus4 | 0.89774           | 0.89630  | 1.00182  |
| Vbus5 | 0.77611           | 0.77356  | 1.04000  |
| Vbus6 | 0.77884           | 0.77627  | 0.87589  |
| Vbus7 | 0.92131           | 0.92017  | 0.99073  |
| Vbus8 | 0.84425           | 0.84247  | 0.90618  |
| Vbus9 | 0.93846           | 0.93746  | 0.97458  |

**Tableau III -11:** Amplitude des tensions

**Comparaisons entre SVC et STATCOM) :**

les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 1.69 (pu) se baissent comme montrés au figure , en absence de compensation. Mais dans le cas où le SVC et STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliorent.

Le tableau montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

|       | <b>Sans Compensation</b> | <b>SVC</b>      | <b>STATCOM</b>  |
|-------|--------------------------|-----------------|-----------------|
|       | <b>Q=1.68pu</b>          | <b>Q=1.69pu</b> | <b>Q=1.69pu</b> |
| Vbus4 | 0.89774                  | 1.02500         | 1.00182         |
| Vbus5 | 0.77611                  | 0.88947         | 1.04000         |
| Vbus6 | 0.77884                  | 0.89140         | 0.87589         |
| Vbus7 | 0.92131                  | 0.95483         | 0.99073         |
| Vbus8 | 0.84425                  | 0.88033         | 0.90618         |
| Vbus9 | 0.93846                  | 0.96947         | 0.97458         |

**Tableau III -12:** Amplitude des tensions

On remarque, d'après les résultats de simulation pour les cas de compensation, le STATCOM donne un rendement efficace par rapport à l'SVC.

### **III-8-CONCLUSION :**

La technologie de la compensation par des FACTS s'est avéré une solution fiable et rentable aux problèmes de qualité de l'onde reliés à la puissance réactive et active. Ainsi, de nombreux travaux de recherche sont publiés dans ce domaine. Les gestionnaires de réseau sont en train d'exploiter le système de transport aux près de ses limites thermiques et dynamiques, alors que les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et à la continuité de service. Les équipements à base d'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème. Grâce aux avancées récentes dans la technologie GTO/IGBT, le temps de réaction des dispositifs FACTS a diminué de quelques millisecondes. Dans ce chapitre nous avons présenté les types de compensation shunt, série et hybride appliquées au contrôle des réseaux électriques.

Les modèles de SVC et STATCOM les plus courants sont des modèles statiques, car conçus pour des logiciels de répartition de charges. Lesquels sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, susceptance, noeuds, etc...

***CONCLUSION  
GENERALE***

## ***CONCLUSION GENERALE***

### **CONCLUSION GENERALE :**

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par le système de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible appelée FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge des lignes, sont atteints et performés par l'injection de tension (ou courant) des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes commandés en ouverture et en fermeture tels que les GTO, IGBT concernant la nouvelle génération de ces systèmes FACTS.

L'augmentation des capacités de transport de l'énergie électrique aux limites thermiques des lignes par les dispositifs FACTS représente une solution précieuse au problème de construction de nouvelles lignes électriques confronté par des contraintes environnementales, écologiques et économiques.

Dans certaines applications, la tension ou le courant dans la ligne de transport sont déformés et contiennent des harmoniques de hautes fréquences, par conséquent un filtrage approprié de la tension et du courant sera nécessaire pour mener à bien le fonctionnement de ces dispositifs, une telle étude peut être un autre champ de recherche qui complétera au futur ce travail.

Le SVC et statcom, sert à maintenir la tension dans les réseaux électriques mais aussi à augmenter la capacité de transport des lignes de transport. Grâce à la simulation que nous avons effectuée nous avons démontré qu'il peut maintenir la tension sur son point de connexion à des niveaux acceptables à travers une réaction dynamique.

## **ANEXE :**

### **Les données des jeux de barres du réseau IEEE 6-JB**

#### **a). Détails du système :**

-Les données de réseau IEEE 6 JB

-MVA Base=100 MVA

- Fréquence = 50 Hz

-Tension nominale =11KV

Tableau (A-1) Les données de charge

| J.B   | Puissance active, MW | Puissance réactive, MVAR |
|-------|----------------------|--------------------------|
| J.B 5 | 20                   | 10                       |
| J.B 6 | 40                   | 15                       |
| J.B 8 | 30                   | 10                       |

Tableau (A-2) Les données de ligne

| Line No. | Bus<br>Code p-q | Résistance, pu | réactance, pu |
|----------|-----------------|----------------|---------------|
| 1        | 1-2             | 0.05           | 0.20          |
| 2        | 2-3             | 0.10           | 0.50          |
| 3        | 3-4             | 0.20           | 0.80          |
| 4        | 4-5             | 0.10           | 0.30          |
| 5        | 5-6             | 0.20           | 0.40          |
| 6        | 6-1             | 0.10           | 0.15          |
| 7        | 2-5             | 0.20           | 0.50          |

## B- Les données des jeux de barres du réseau IEEE 9-JB

### Détails du système :

- MVA Base=100 MVA
- Fréquence = 60 Hz
- Tension nominale =16.5KV

### Tableau (B-1) Les données de charge

| J.B   | Puissance active, MW | Puissance réactive, MVAR |
|-------|----------------------|--------------------------|
| J.B 5 | 125                  | 50                       |
| J.B 6 | 90                   | 30                       |
| J.B 8 | 100                  | 35                       |

### Tableau (B-2) Les données de ligne

| Line No. | Bus<br>Code p-q | Résistance, pu | réactance, pu |
|----------|-----------------|----------------|---------------|
| 1        | 4-5             | 0.01           | 0.085         |
| 2        | 5-7             | 0.032          | 0.161         |
| 3        | 7-8             | 0.0085         | 0.072         |
| 4        | 8-9             | 0.0119         | 0.1008        |
| 5        | 9-6             | 0.039          | 0.170         |
| 6        | 6-4             | 0.017          | 0.092         |

## ***Référence :***

- [1] Slaven kincic, "Onduleur à niveaux multiples et son application en compensation de la puissance réactive ", Maitrise en génie électrique Montréal mai 2000.
- [2] A.Herbig « On load Flow Control in Electric Power Systems » Thesis of the Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.2 000.
- [3] PIERE MEYNAUD « Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension sur les réseaux de transport THT et HT » Technique de l'ingénieur, D4315 ,1986.
- [4] A.SI KADIR et, S.FEKIK « Compensation de l'énergie réactive par les systèmes FACTS Application d'un SVC » Mémoire de fin d'étude ingénieur année 2007, UMMTO.
- [5] GUY SEGUIER « Electronique de puissance » DUNOD, 7ème édition
- [6] Eléctrotéchnique theodore wildi parte1-23 puissance active,réactive et apparente.
- [7] PREVE CHRISTOPHE « Réseau électrique 2 » LAVOISIER, 3 ème éditions
- [8] [Hoffman, Schlabbach et Just 2012], Reactive power compensation:a practical guide, Chichester, Wiley, 2012.
- [9] « Encyclopédie des sciences industrielles (Electricité, électronique générale) ».Année 1977, édition QUIETT.
- [10] P. Kundur and a. al., "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19 No.2, Mai 2004. 65
- [11] M. EREMIA, J. TRECAT, and A. GERMOND, Reseaux Electriques Aspects actuels: Editura Tehnica, 2000.
- [12] Yanfeng Gong, "Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index Using Synchronized Phasor Measurement." PHD thesis, Mississippi State University, Mississippi, USA, December2005.
- [13] A. Laifa, ""Evaluation de la Stabilité de Tension d'un Réseau d'énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité," thèse de

Magister, Ecole National polytechnique, 27juin1995"

[14] Michel Crappe : « Commande et régulation des réseaux électriques »

Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.

[15] De Vre R, Jacquet B : « Perturbations dans les installations électriques et électroniques : Problèmes et solutions» Note d'information.

[16] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet : « Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l'ingénieur D 43

[17] Chantouche ( Condensateurs de puissance ).juin 1996.

[18] D ROCK ( Manœuvre et protection des batteries de condensateur MT).2003

[19] HADDAD Salim, « Compensation d'énergie réactive par convertisseur statique», Mémoire de magister département d'électromécanique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2006.

[20] Reacrive Power Control in Electric Sysfems, T- J- E\* John Wile~ 1982.

[21] Hamadou Zakaria.M, « Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour

l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique», Mémoire de Magister, Université Sétif 1, 20 Juin 2012

[22] Kassou Amina, Merzougui Meriem, « Impact d'un dispositif FACTS (Flexible AC Transmission Systems) sur l'écoulement de puissance» Mémoire de Master, Université de Saida, 28 octobre 2013.

[23] Boudjella Houari, « Contrôles des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) », thèse de magister, département électrotechnique, Université de Sidi Bel-Abbes, 23janvier 2008.

- [24] Stéphane Gerbex, « Métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique », thèse de doctorat, Université de Lausanne, EPLF.2003.
- [25] Theodore Wildi, « électrotechnique », 3ème édition, Québec, Canada ; 1978.
- [26] Daiboun Sahel Salah Sabry, « Renforcement de stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS (UPFC) », thèse de magister, Université 20 Aout 1955 Skikda 09-2005
- [27] Site [https://fr.wikipedia.org/wiki/compensation\\_de\\_puissance\\_réactive](https://fr.wikipedia.org/wiki/compensation_de_puissance_réactive), «Compensation de puissance réactive».
- [28] Kerbaa Amel, « Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique», Mémoire de Master, 02 Juin 2013.
- [29] Haimour Rachida, «Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Électrique», Mémoire de Magister ENSET ORAN -2009.