



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Djebbar Med Elhachemi

Le : dimanche 24 juin 2018

Compensation de l'énergie réactive par système FACTS

Jury :

Mr	Khan Med Lotfi	MCA	Université Mohamed khider Biskra	Président
Mr	Aloui Lotfi	PR	Université Mohamed khider Biskra	Encadreur
Mm	Rahoua Naima	MAA	Université Mohamed khider Biskra	Examineur

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

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

MASTER

Thème

**Compensation de l'énergie réactive par système
FACTS**

Présenté par :

Djebbar Med Elhachemi

Avis favorable de l'encadreur :

Pr .Aloui Lotfi

signature

Avis favorable du Président du Jury

MCA. Khan Med Lotfi

Signature

Cachet et signature

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Thème :

Compensation de l'énergie réactive par système FACTS

Proposé par : Djebbar Med Elhachemi

Dirigé par : Pr .Aloui Lotfi

RESUMES (Français et Arabe)

Le transport de la puissance réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, de la compensation de puissance réactive, série ou shunt selon les cas, est utilisé pour limiter ce transport de puissance réactive. Différents appareils électriques peuvent servir à réaliser cette compensation : machines synchrones, batteries de condensateurs, inductance ou FACTS.

Cette fonction objective est construite autour des réductions des pertes actives et réactives de puissance et de l'investissement consenti pour l'installation de system FACTS.

Pour résoudre ce problème non-linéaire avec contraintes, une technique heuristique de solution basée sur les facteurs de sensibilité des pertes de puissance a été proposée. Notre solution a été appliqué à de nombreuse lignes et les résultats obtenus ont été comparés à ceux des auteurs ayant traité le problème de l'optimisation de la compensation de l'énergie.

Mots-clés : Ecoulement de puissance, Réseau électrique, Stabilité statique, Pertes de puissance, FACTS (TCSC, STATCOM, UPFC, SVC)

ملخص

يؤدي نقل الطاقة التفاعلية بواسطة خطوط الطاقة إلى حدوث خسائر ، وانخفاض في استقرار الشبكة وانخفاض الجهد في نهايتها. ولتفادي ذلك، يتم استخدام تعويض الطاقة التفاعلية المتسلسلة أو المتفرعة وفقاً للحالة، للتحكم في نقل الطاقة التفاعلية. ويمكن استخدام الأجهزة الكهربائية المختلفة لتحقيق هذا التعويض: آلات متزامنة ، مكثفات ، محاثات او FACTS

استخدمت هذه الوظيفة للتقليل من خسائر الطاقة النشطة والتفاعلية والاستثمار في تركيب نظام FACTS. لحل هذه المشكلة غير الخطية مع القيود، تم اقتراح تقنية الكشف عن مجريات الأمور على أساس عوامل حساسية فقدان الطاقة. تم تطبيق حلنا على العديد من الخطوط ، وتمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع ماتوصل اليه باحثون من قبل الذين عالجوا مشكلة تعويض الطاقة و ايجاد الحلول المثلى.

الكلمات المفتاحية : سريان القدرة، شبكة كهربائية، الاستقرار الساكن، ضياعات الطاقة، الوسائل المرنة، التعويض الرجعي

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Je remercie, en deuxième position, ma mère et mon père, ma grand-mère, mes frères Achraf, Noredine et Hamza. Mes sœurs, Rabiaa, ma tante fadila et toute la famille **DJEBBAR** et **SAADALLAH**.*

Mes amis Abdou, Walid, Ishak et Ramzi.

*Egalement, je remercie l'encadreur de ce mémoire Mr **Aloui Lotfi** son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

Je veux remercier aussi les membres de jury qui ont bien voulu examiné ce travail.

*Mes remerciements s'étendent également à tous mes enseignants de **Mohamed khider biskra** durant les années des études.*

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

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma Mère,

A mon Père,

A mes frères

A mes soeurs

Et à tous mes Amis

Merci à tous.

MOHAMED

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITER II

Tableau II.1 : Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau	14
---	----

CHAPITER III

Tableau 3.1.Amplitude de tensions pour 9 J.B	28
Tableau.3.2.Amplitude des tensions	30
Tableau.3.3.Amplitude des tensions	32
Tableau.3.4.Amplitude des tensions	35
Tableau.3.5.Amplitude des tensions	37
Tableau 3.6. Amplitude des tensions	40
Tableau 3.7.Amplitude des tensions	42
Tableau 3.7.Amplitude des tensions	45

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1.1. Principe de la puissance active et réactive	03
Figure 1.2. Représentations graphiques	04
Figure I.3.Exemple de fluctuation de la fréquence.	07
Figure I.3.Exemple de variation rapide de la tension.	08
Figure I.4.Creux de tension.	09
Figure I.5.Exemple de cas de surtensions transitoires.	10
Figure I.6.Déséquilibre de tension	11
Figure I.7.Distorsion provoquée par un seul harmonique ($h=5$)	11

CHAPITRE II

Figure 2.1.différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.	14
Figure 2.2.Puissance transitée entre deux réseaux.	16
Figure 2.3.présentation d'un Compensateur SVC	17
Figure 2.4.Fonctionnement du Compensateur SVC	18
Figure 2.5.STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.	19
Figure 2.6.(a) structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent.	20
Figure 2.7. SSSC (a) structure de base, (b) schéma équivalent.	20
Figure 2.8.Caractéristiques statique du SSSC.	20
Figure 2.9. Schéma de base d'un UPFC.	22

CHAPITRE III

Figure 3.1.Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres	26
Figure 3.2.angles rotoriques des générateurs	27
Figure 3.3.amplitude tensions	27
Figure 3.4.angle s rotoriques des générateurs	29
Figure 3.5.angles rotoriques des générateurs	32
Figure 3.6.angles rotoriques des générateurs	34
Figure 3.7.angles rotoriques des générateurs	37
Figure 3.8.angles rotoriques des générateurs	39
Figure 3.9.angles rotoriques des générateurs	42
Figure 3.10.angles rotoriques des générateurs	44

LISTES DES SYMBOLES

FACTS	Flexible alternatif curant transmission systèmes.
TSR	Thyristor Switched Reactor.
RCT	Réactances commandés par thyristor.
CSPR	Compensateur Statique de Puissance Réactive
TSC	Thyristor Switched Capacitor
SVC	Static Var Compensator.
STATCOM	Static Synchronous Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Séries Capacitor.
UPFC	Unified Power Flow Controller
CCT	condensateur commandé par thyristor
VSC	Voltage Source Converter
GTO	Gate Turn Off
J.B	Jeux de barres
V_{sh}	Tension (shunt) injectée par le STATCOM
Q_{sh}	Puissance réactive délivrée par le STATCOM.
P_{sh}	Puissance active délivrée par le STATCOM.
X_{sh}	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.
V_i	la tension du convertisseur
P_{ij}	Puissance active transportée par la ligne.
P_{sh}	Puissance active délivrée par le STATCOM.
I_{sh}	Courant (shunt) injecté par le STATCOM
P_l	Puissance active demandée par la charge.
Q_l	Puissance réactive demandée par la charge
R_l	Résistance de la ligne de transport.
X_l	réactance de la ligne de transport.

SOMMAIRE

Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Liste des Symboles et abréviations	
Introduction générale.....	01
Chapitre I Généralité sur la puissance réactive et la tension	
I.1 Introduction.....	02
I.2 La puissance réactive.....	02
I.2.1 Importance de la puissance réactive.....	03
I.2.2 Facteur de puissance.....	03
I.2.3 Tangente	04
I.2.4 Moyens de compensation de la puissance réactive.....	04
I.2.4.1 Les dispositifs conventionnels.....	05
I.2.4.2 Les groupes de production (générateurs).....	05
I.2.4.3 Les condensateurs.....	05
I.2.4.4 Les inductances.....	05
I.2.4.5 Les compensateurs synchrones.....	06
I.2.4.6 Les compensateurs statiques.....	06
I.3 La tension	06
I.3.1 La qualité de tension.....	06
I.3.2 Dégradation de la qualité de tension.....	07
I.3.3 Variation ou fluctuation de la fréquence.....	07
I.3.4 Composante lente des variations de tension.....	07
I.3.5 Fluctuation de tension.....	08
I.3.6 Creux de tension.....	08
I.3.7 Interruption courte ou coupure brève.....	09
I.3.8 Bosses de tension.....	09
I.3.9 Baisses de tension.....	09
I.3.10 Chutes de tension.....	09
I.3.11 Tension et/ou courant transitoire.....	10
I.3.12 Déséquilibre de tension.....	10
I.3.13 Perturbations harmonique.....	11

I.4	Conclusion.....	12
Chapitre II : Modélisation des éléments du réseau et dispositifs FACTS		
II.1	Introduction.....	13
II.2	Concept générale et définition	14
II.3	Flexibilité de Transmission de l'énergie.....	14
II.4	Différentes catégories des FACTS.....	15
II.5	Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.....	15
II.6	Fonctionnement des FACTS	15
II.6.1	Réseau de transport.....	15
II.6.2	Réseaux Industriels.....	15
II.6.3	Classification des dispositifs FACTS.....	16
II.6.3.1	Génération I.....	16
II.6.3.2	Génération II.....	16
II.6.3.3	Génération III.....	16
II.7	Compensateurs shunts.....	16
II.7.1	Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	17
II.7.1.1	Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR).....	17
II.7.1.2	STATCOM	18
II.7.1.3	Avantages du STATCOM.....	19
II.7.2	Condensateur série commande par thyristor (TCSC).....	19
II.7.3	Static Synchronous Series Compensator (SSSC).....	20
II.8	Dispositifs FACTS combinés (série-parallèle).....	21
II.8.1	Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC.....	21
II.9	Avantages de la technologie des dispositifs FACTS.....	22
II.10	Applications Principales des FACTS.....	23
II.11	conclusion.....	24
Chapitre III : Résultats de simulation et leurs interprétations		
III.1	Introduction	25
III.2	Description générale	25
III.2.2	Logiciel de simulation	25
III.3	Application du système étudié de 9 J.B	25
III.4	Comparaisons entre SVC et STATCOM)	43
III.5	Conclusion	45

Introduction générale

Aujourd'hui la consommation de l'énergie électrique et le scénario des systèmes d'alimentation est hautement complexe et interconnecté, il y a un grand besoin d'améliorer l'utilisation d'énergie électrique tout en conservant sa fiabilité et sa sécurité [1].

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement: malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée.

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS « Flexible Alternating Current Transmission System ». Les dispositifs FACTS font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils Limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau électrique [1].

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs FACTS (SVC et STATCOM). Pour atteindre ces objectifs de recherche, Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques. Ainsi que les différentes techniques de contrôle des tensions/puissances réactives.

Le second chapitre est consacré à l'étude profonde une description des moyens de compensation et généralité sur les systèmes FACTS.

Le troisième chapitre ; on a exposé en détails les résultats de simulation développé sous l'environnement PSAT MATLAB (une application du SVC et STATCOM dans les réseaux électriques).

I.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons la généralité sur la puissance réactive et la tension ces vingt dernières années, on parle beaucoup de la qualité de l'énergie électrique (QEE). Cette dernière est supposée excellente a la sortie des centrales, le système de transmission de cette énergie contribue a consolider cette qualité (stabilité d'amplitude et de fréquence, puissance de court-circuit...), alors qu'en pratique elle subit nombreuse altérations au cours de son transport, principalement sous l'influence des installations perturbatrice, de la clientèle ou des incidents fortuits

La tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- Les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électrique, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibres réactifs.
- Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension [2].

Ces perturbations ont des conséquences néfastes sur le réseau, allons parfois à l'effondrement de ce dernier et mettre en nocturne toute une population. Ce qui oblige tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs ou intervenants. Parmi tous ces acteurs le gestionnaire à une responsabilité de mettre en œuvre les moyens pour maîtriser ces contraintes qui s'imposent. Pour ce faire plusieurs solutions d'amélioration de sont a distinguées.

I.2. Puissance réactive :

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent de la puissance apparente. Cette puissance se décompose en deux formes:

La puissance active: est la puissance utilisée et transformée en énergie mécanique (travail), chimique, radiante, etc. plus la puissance abandonnée en chaleur (pertes).

La puissance réactive: se transforme en champs magnétiques .Les consommateurs de la puissance réactive sont : les moteurs asynchrones, les transformateurs, les inductances (ballasts de tubes fluorescents) et les convertisseurs statiques (redresseurs) [3].

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active [4].

À l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, et le phénomène *flicker*.

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants [4].

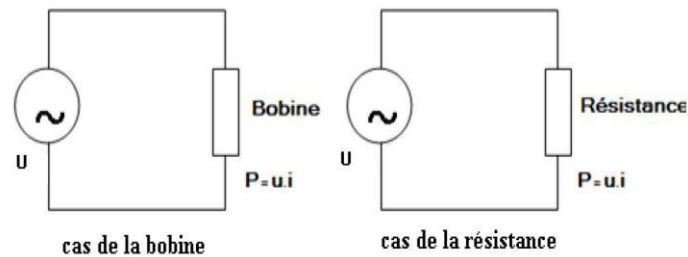


Figure 1.1. Principe de la puissance active et réactive [5].

I .2.1 Importance de la puissance réactive :

L'énergie réactive est un facteur très important qui influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur résument dans les points suivants :

- a) La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- b) Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- c) Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production [6].

I .2.2 Facteur de puissance :[6]

La puissance active : $P=U.I. \cos \varphi$

La puissance réactive : $Q=U.I. \sin \varphi$

La puissance apparente : $S=U.I$

C'est le quotient de la puissance active consommée et de la puissance apparente fournie.

$$F = \frac{p(w)}{s(va)} = \cos \varphi$$

Le $\cos \varphi$ est le facteur de puissance qui est fondamental et ne prend pas en compte la puissance véhiculée par les harmoniques.

- Un facteur de puissance proche de un (1) indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation. Il permet d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateur de puissance réactive.

-Un facteur de puissance égale à un (1) ne conduira à aucune consommation de la puissance réactive (résistive pure).

-Un facteur de puissance inférieur à un (1) conduira à consommation de la puissance réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de (0) (inductive pure).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre, selon les appareils installés et la manière dont ils sont utilisés (fonctionnement à vide, pleine charge...).

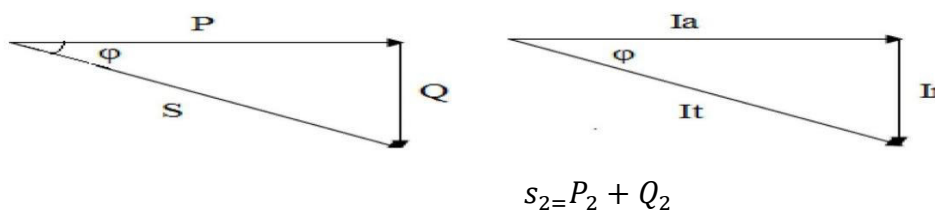


Figure 1.2. Représentations graphiques [6].

I. 2.3 Tangente :[6]

Certains facteurs d'électricité (abonnés tarif vert) indiquent la valeur de $\tan \varphi$ qui correspond à l'énergie réactive que le distributeur doit fournir une puissance active donnée.

$$\tan \varphi = \frac{\text{énergie réactive}}{\text{énergie active}} = \frac{Q(\text{VAR})}{P(\text{W})}$$

I.2.4 Moyens de compensation de la puissance réactive : [4]

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel. Il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée.

Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension. L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi des dispositifs aux caractéristiques très différentes :

- le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont connues, tout au moins pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande part de l'ajustement

peut donc être réalisée à l'aide de moyen dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux.

- le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en œuvre de moyens dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques.

I.2.4.1 Dispositifs conventionnels :

Le réseau en lui-même est une source non négligeable de puissance réactive. Ainsi, en dehors de la production de l'énergie réactive par les générateurs, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou plutôt d'autres moyens de compensation, qui finalement sont au moins aussi souvent consommateurs que fournisseurs d'énergie réactive [4].

I.2.4.2 Groupes de production (générateurs) :

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances leurs dynamiques permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux [4].

I.2.4.3 Condensateurs : [4]

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

1. Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT,/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
2. Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport.

I.2.4.4 Inductances :

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau [4].

I.2.4.5 Compensateurs synchrones :

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive [4].

I.2.4.6 Compensateurs statiques :

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. Chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi-période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des Thyristors [4].

I.3 Tension : [7]**I.3.1 Qualité de tension :**

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement.

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- *La fréquence.
- *L'amplitude.
- *La forme d'onde.
- *La symétrie.

Pour le réseau algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$.

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.

Le gestionnaire du réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de $\pm 10 \%$ 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 les coupures brèves.
- *les variations rapides de la tension (Flicker).
- *les surtensions temporaires ou transitoires.
- *Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté de s'en protéger).

I.3.2 Dégradation de la qualité de tension :[7]

Les perturbations dégradants la qualité de tension peuvent résulter de :

*Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :

- court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
- causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
- matérielles (vieillesse des isolants...).
- humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

*Installations perturbatrices :

- fours à arc.
- Soudeuses.
- variateurs de vitesse.
- toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc.

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

I.3.3 Variation ou fluctuation de la fréquence :

Les fluctuations de la fréquence sont observées le plus souvent sur les réseaux non interconnectés ou les réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. La figure (I.1) présente un exemple qui illustre cette fluctuation de la fréquence [4].

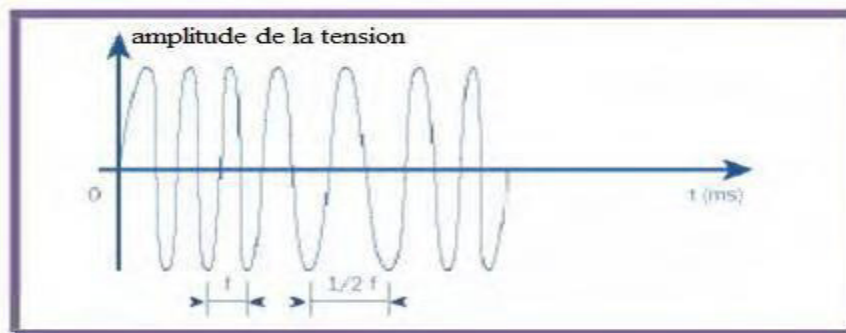


Figure I.1 Exemple de fluctuation de la fréquence [4].

I. 3.4 Composante lente des variations de tension :

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison des modifications des charges alimentées par le réseau. Les gestionnaires du réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les limites

contractuelles. On parle de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession des variations rapides dont les amplitudes sont très petites. Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénient des variations lentes de tension dans une plage d'au moins $\pm 10\%$ de la tension nominale [4].

I.3.5 Fluctuation de tension (flicker) : [7]

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure I.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les Soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

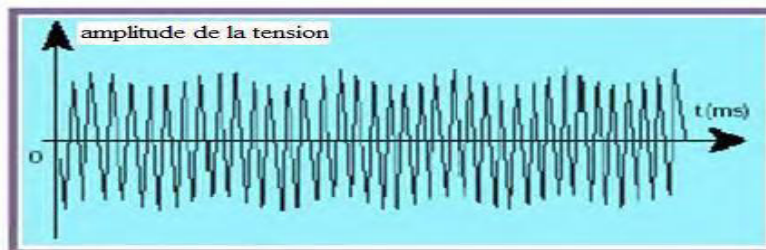


Figure I.2 Exemple de variation rapide de la tension [7].

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 quelque 10 %.

I.3.6 Creux de tension :

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture U_f . Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 min [1]. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [4].

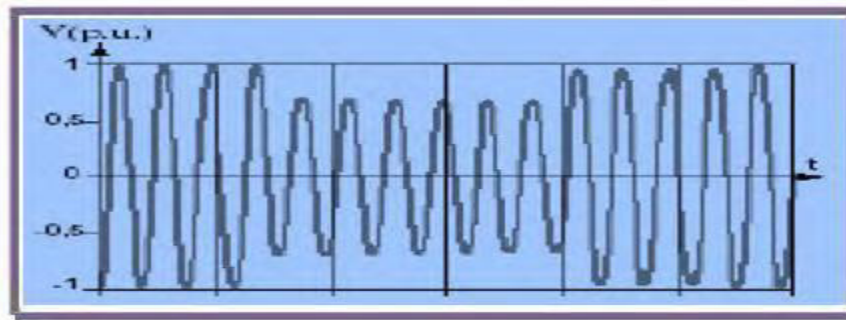


Figure I.3 Creux de tension [4].

I.3.7 Interruption courte ou coupure brève : [8]

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de $1/2$ cycle jusqu'à 3 s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 pu . Le dégagement du défaut de tension et les coupures brèves sont principalement produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau.

I.3.8 Bosses de tension :

La bosse de tension est une augmentation de la tension au-dessus de la tension nominale pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants.

I.3.9 Baisses de tension : [9]

Les baisses de tension (sags) sont une réduction de la tension d'une durée plus longue et sont dans la plupart du temps dues à une diminution volontaire de la tension par le fournisseur afin de réduire la puissance aux moments où la demande est maximale. Lorsque la puissance est anormalement faible par rapport à celle requise par la charge on parle également de sags.

I.3.10 Chutes de tension :

Une chute de tension (dips) est une brève diminution ou bien une disparition complète de la tension. Elle se caractérise par sa durée et par la tension résiduelle, généralement exprimée en pourcentage de la valeur RMS de la tension, au point le plus bas pendant la chute de tension. Lors d'une chute de tension la charge ne reçoit pas toute l'énergie nécessaire à son fonctionnement, ce qui peut bien évidemment avoir de graves conséquences selon le type d'appareil concerné [9].

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante[4].

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel la production et la consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée [4].

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. À la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

I.3.11 Tension et/ou courant transitoire :

Les surtensions les plus fortes, mais heureusement peu fréquente sont du généralement aux conditions atmosphérique (Foudre). Leur amplitude peut atteindre plusieurs KV dans les réseaux aériens BT. Et elles peuvent se propager même dans les réseaux BT souterrains. Les surtensions transitoires se produisent aussi dans les installations des utilisateurs (clients) lors du déclenchement d'appareils BT. Leur contenu énergétique est moindre que pour les surtensions de foudre, mais leur amplitude peut dépasser 1 KV en BT [1], ce qui présente un danger pour les circuits électroniques [7].

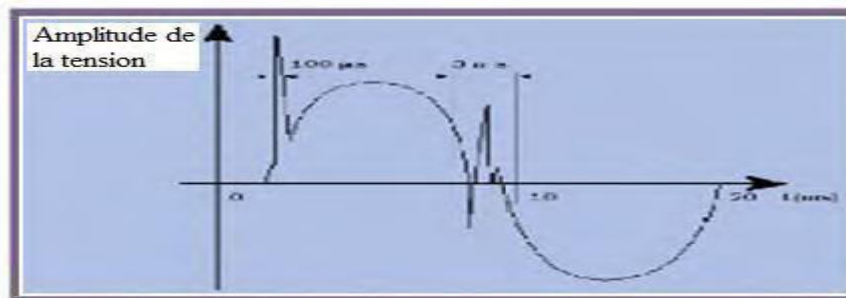


Figure I.4 Exemple de cas de surtensions transitoires [7].

I.3.12 Déséquilibre de tension :

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau figure (I.5). Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° [7].

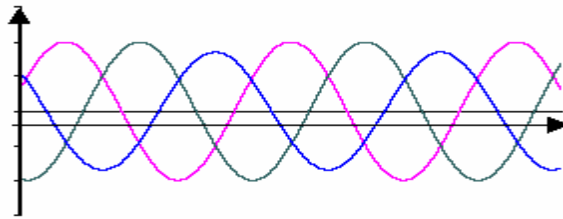


Figure I.5 Déséquilibre de tension [10].

I.3.13 Perturbations harmonique :

On entend par harmonique, toute perturbation non transitoire affectant la forme d'onde de tension du réseau électrique.

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale et l'amplitude est divisée par le rang d'harmonique (h) (l'amplitude de l'harmonique est inférieure de h fois de l'amplitude fondamentale) figure (I.6), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, etc.

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements [7].

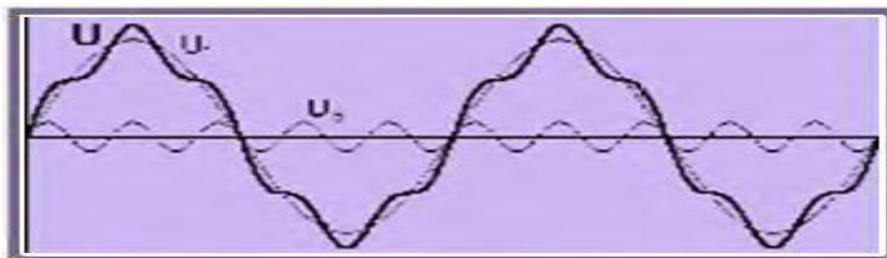


Figure I.6 Distorsion provoquée par un seul harmonique ($h=5$) [7].

I.4 Conclusion :

Ce chapitre a traité les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de tension, ainsi les différents moyens de compensation conventionnelle de la puissance réactive.

Cela nous persuade que le contrôle de tension et l'optimisation de la puissance réactive est un objectif important pour maintenir un profil adéquat dans les réseaux électriques. D'autre part il doit maintenir des réserves de puissance réactive dans les différentes zones du système pour faire face aux incidents de tension.

S'actuellement il existe une méthode moderne et sophistiqué pour le contrôle de tension et pour optimiser la puissance réactive dans les réseaux électriques. Cette méthode utilise les Dispositifs FACTS (basées sur l'électronique de puissance) qu'ils seront traités en détail dans le prochain chapitre.

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous étudions Les systèmes FACTS (Flexible AC Transmission System) sont présentés pour l'amélioration des performances des réseaux de transport et d'interconnexion. De nombreuses études ont été faites récemment sur ces systèmes concernant l'augmentation de la vitesse de contrôle des paramètres des lignes (tension, impédance et déphasage).

Les compensations shunt et série utilisant des systèmes d'électronique de puissance sont des concepts FACTS et permettent aux réseaux d'être plus flexibles. La compensation shunt réalise de préférence le support de la tension alors que la compensation série est employée pour réduire l'impédance des lignes et donc pour augmenter la capacité de transfert de puissance ainsi qu'améliorer la répartition des transits de puissance dans le réseau, aussi bien que les stabilités statiques et dynamiques. Plusieurs systèmes ont été présentés ces dernières années. Ce rapport décrit une étude comparative concernant le comportement statique et dynamique de trois systèmes FACTS dans les réseaux de transport: le SVC (Static Var Compensator), le STATCOM (STATIC CONDenser) et le TCSC (Thyristors Controlled Series Compensator). Ce travail est axé sur la stabilité de tension et les capacités de transfert de puissance et indu l'étude de l'action des LTC (LoadTapChangers). Les effets des PSS (Power System Stabilizers) sont également analysés dans le but de les comparer ultérieurement aux systèmes FACTS [12].

II.2 Concept générale et définition :

Les FACTS «Flexible Alternative Currents Transmission Systems» sont des systèmes flexibles de transmission à courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes [12].

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie [12].

II.3 Flexibilité de Transmission de l'énergie:

L'aptitude d'accommoder aux changements du Système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire. [12][13][14].

II.4 Différentes catégories des FACTS :

La figure (II.1)[1],représente les grandes catégories des dispositifs FACTS de contrôle des réseaux électriques ;La colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base (R L C) et transformateurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance[15][16][12]13].

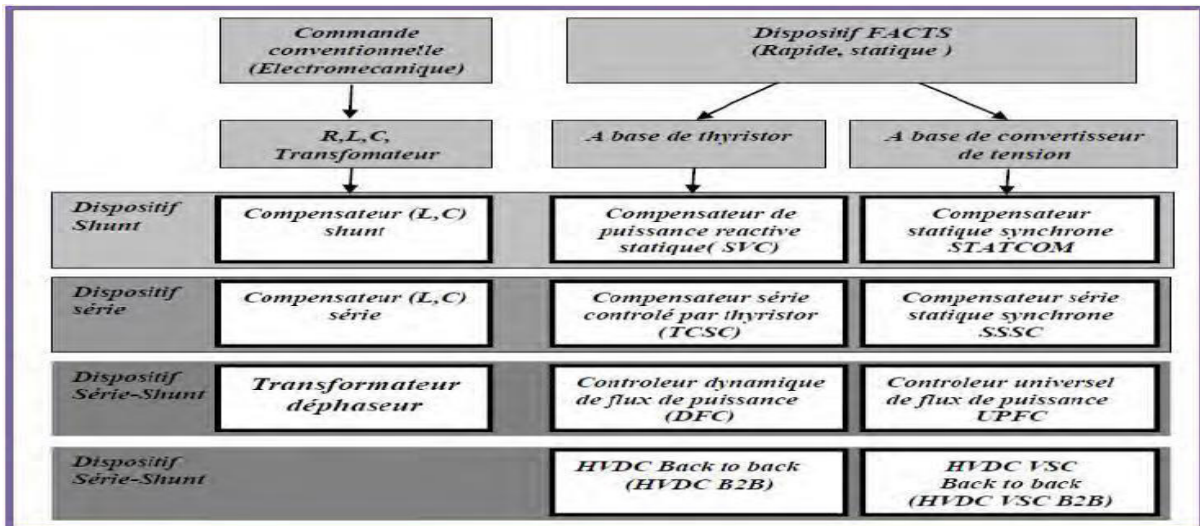


Figure II.1 différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques [12].

	Contrôle d'écoulement de puissance	Contrôle De la tension	Stabilité Transitoire	Stabilité dynamique
SVC	*	***	*	**
STATCOM	*	***	**	**
TCSC	**	*	***	**
UPFC	***	***	**	**

Tableau II.1Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau [17].

Influence:

Petite */ Moyenne**./Forte***.

La colonne gauche présente les contrôleurs FACTS à base des thyristors ou bien des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne droite, sont des FACTS les plus avancés avec des convertisseurs de source de tension VSC (voltage source converter) à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, SSSC et l'UPFC. Ces VSC fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau. Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau [15][16][12].

II.5 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :

Ces FACTS ont été intégrés depuis des années dans des réseaux où ils ont prouvé leur efficacité. Les tableaux (II.1) résument le rôle de chacun de ces dispositifs, ainsi que leur capacité de contribution pour différentes applications dans les réseaux électriques [18].

II.6 Fonctionnement des FACTS : [19]

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive (courant réactif) sur le réseau. Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques (c'est faux, car ils des sources d'harmoniques à cause des composants EP) et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelque MVA à quelques centaines de MVA. Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux :

- * Réseau de transport
- * Réseaux Industriels

II.6.1 Réseau de transport : [19]

Pour améliorer le contrôle, augmenter la capacité des puissances transmises et assister à la récupération du réseau suite à un défaut.

II.6.2 Réseaux Industriels : [19]

Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuations de charge, compensation du flicker pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission.

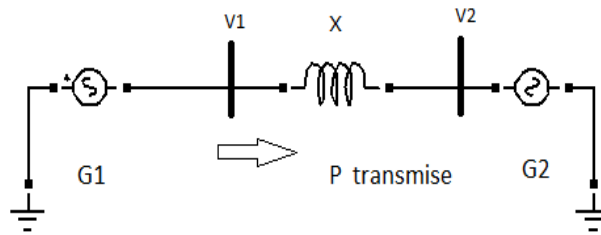


Figure II.2 Puissance transmise entre deux réseaux [19].

II. 6.3 Classification des dispositifs FACTS : [19]

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés.

II. 6.3.1 Génération I : [19]

Basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

II. 6.3.2 Génération II : [19]

Dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commander à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'absorber ou d'injecter des courants (tensions) contrôlables dans le réseau.

II. 6.3.3 Génération III : [19]

FACTS utilisant des composants hybrides et qui sont adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilisent pas des dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

II.7 Compensateurs shunts :

Plusieurs modèles de dispositifs FACTS shunt ont été développés, tant pour des régimes de fonctionnement statique (qui est notre cas) que dynamique. Certains modèles sont spécifiques à un type de dispositif alors que d'autres, plus généraux, sont utilisés pour présenter plusieurs FACTS. Nombreux modèles mathématiques du SVC et du STATCOM en régime permanent ont été proposés dans la littérature. Dans [20],[21]et [22], la méthode de la puissance injectée est proposée. Les caractéristiques électriques des équipements sont traduites et remplacées par des puissances injectées. Cette modélisation est appliquée dans notre étude pour le STATCOM.

Une autre méthode consiste à modéliser le SVC comme des réactances variables dont valeurs dépendent de l'angle d'amorçage des thyristors [23].

II.7.1 Compensateurs parallèles à base de thyristors :

II.7.1.1 Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) :

Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) (acronyme anglais de Stat Var Compensator SVC) est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau. Il permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de production et la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de charges.

Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (CF) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (Thyristor Switched Capacitor TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (Thyristor controlled Reactor) (RCT) et par des réactances commutables (Thyristor Switched Reactor TSR), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques. Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques les RCT (Réactances commandés par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin de années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristor tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif Figure (II.2) [24].

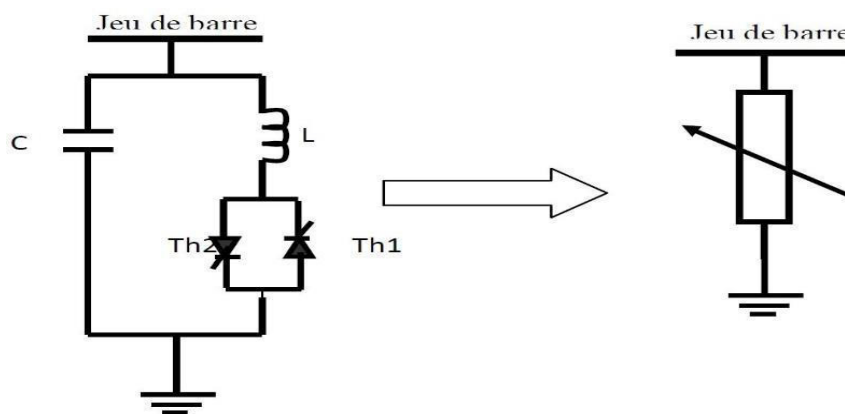


Figure II.2 présentation d'un Compensateur SVC [25].

Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'élément Inductif. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau).

Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies. Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés sur les harmoniques à éliminer l'association de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif a été installé en 1979 en Afrique de Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (II.3) trois zone sont distinctes :

*Pour $V_{MIN} \leq V \leq V_{MAX}$: est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.

*Pour $V > V_{MAX}$: est une zone où le RCT donne son énergie maximale (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.

*Pour $V < V_{MIN}$: est une zone où seule les capacités sont connectées au réseau. [25]

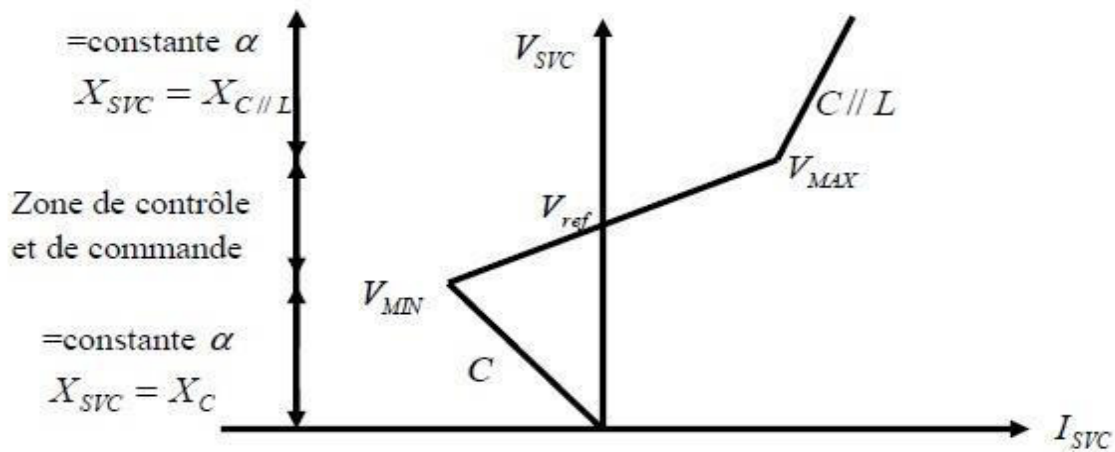


Figure II.3 Fonctionnement du Compensateur SVC [25].

II.7.1.2 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 (Figure (II.4-a)). 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.

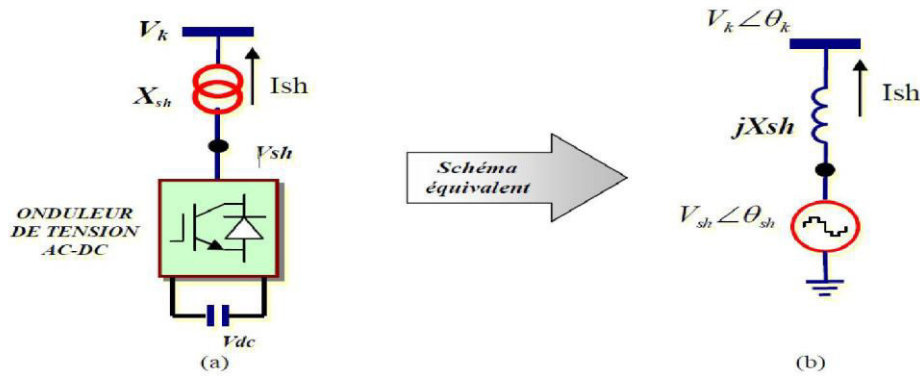


Figure II.4 : STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent [20].

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.

Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation (II.1) décrit le transfert de Puissance réactive dans le réseau électrique [12][26].

Si $|V_k| > |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne positive et le STATCOM absorbe la puissance réactive.

Si $|V_k| < |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne négative et le STATCOM fournies la puissance réactive.

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{x_{sh}} - \frac{|V_k| |V_{sh}|}{x_{sh}} \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k| |V_{sh}| \cos(\theta_k - \theta_{sh})}{x_{sh}} \quad (II.1)$$

II.7.1.3 Avantages du STATCOM :[6]

- Bonne réponse à faible tension :

Il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.

- Bonne réponse dynamique :

Le système répond instantanément, l'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique. Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système. Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

II.7.2 .Condensateur série commande par thyristor (TCSC) :

TCSC (Thyristors Controlled Série Condensateur) est un dispositif de compensation série à base d'électronique de puissance. Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur, l'ensemble monté en parallèle avec une capacité comme montre la figure (II.5). Connecte en série avec le réseau pour contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance X_{TCSC} qui varie selon l'angle de retard à

l'amorçage des thyristors α donné par l'équation (II.2). Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80[3].

$$X_{TCSC} = \frac{jLW}{\frac{2}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) - LCW^2}$$

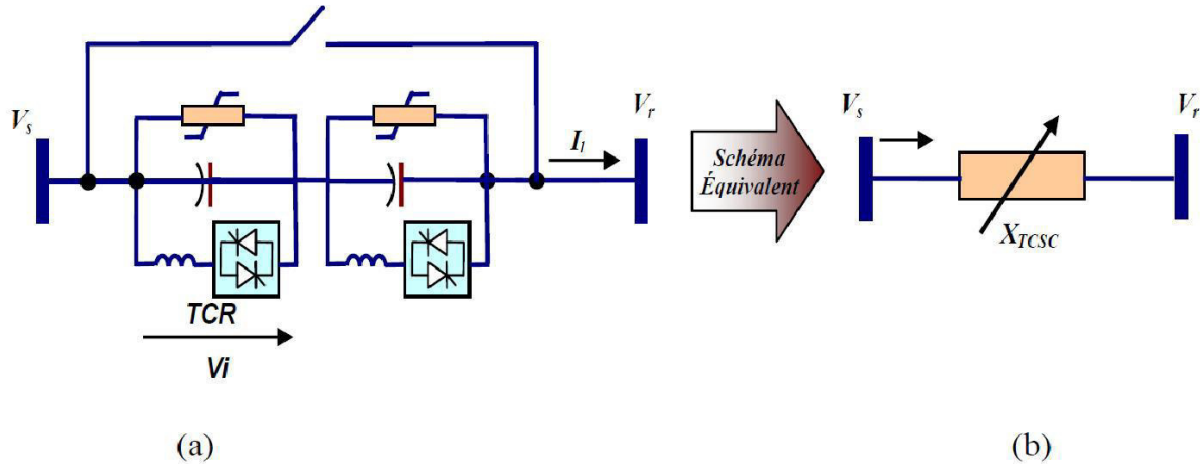


Figure II.5 : (a) structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent [3].

$$P_{sr} = \frac{|V_s||V_r|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r)$$

II .7.3 Static Synchronous Series Compensator (SSSC):[19]

C'est l'un des plus important dispositifs FACTS; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure(II.6). Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants.

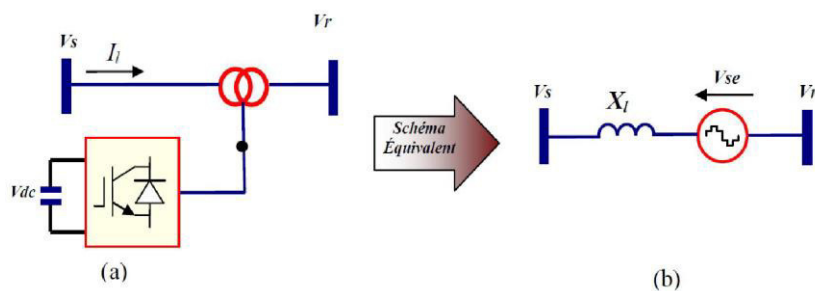


Figure II.6 : SSSC (a) structure de base, (b) schéma équivalent [19].

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (static phase shifter) ou d'une impédance série variable de compensation : il injecte une tension en quadrature avec une tension des extrémités de la ligne pour contrôler le flux de

puissance active. Et comme ce système ne consomme pas de la puissance réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockée dans les batteries de condensateur, il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive. Ces caractéristiques statique tension/courant est donnée par la figure (II.7).

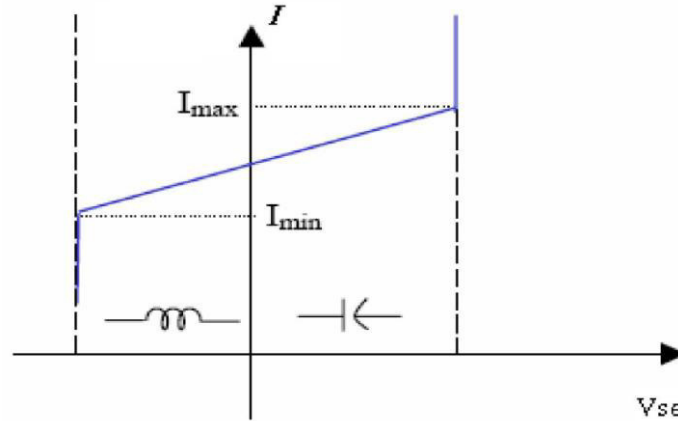


Figure II.7 Caractéristiques statique du SSSC [19].

Dans le modèle adopté pour ce dispositif la valeur de la source de tension connectée en série et donnée par la formule (II.4) : $V_{se} = |V_{se}|(\cos \delta_{se} - j \sin \delta_{se})$

L'amplitude et la phase de ce modèle V_{se} et δ_{se} sont ajustés en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire les puissances active et réactive spécifique qui transitent ce dispositif.

II.8 Dispositifs FACTS combinés (série-parallèle) : [19]

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.

II.8.1 Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC :

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux convertisseurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur [27].

Le principe de l'UPFC consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne pour le réinjecter avec une. Le convertisseur (1), connecté en parallèle, a pour fonction de prélever la phase appropriée 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 [27].

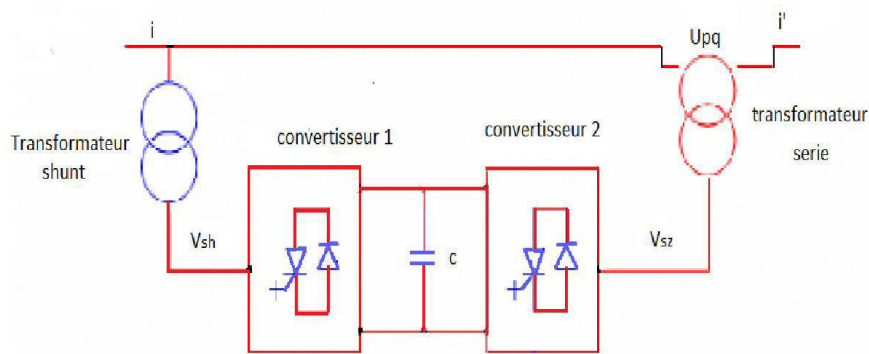


Figure II.8 Schéma de base d'un UPFC [6].

Le convertisseur shunt peut également générer de la puissance réactive indépendamment du transfert de puissance active et ainsi contrôler la tension U_i (figure II.8). 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 [27].

II.9 Avantages de la technologie des dispositifs FACTS :

Les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée [27].
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire voire supprimé les surcharges dans les lignes ou les transformateurs. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages [27].

Par cette action les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un sinon plusieurs des bénéfices suivants: [12]

- contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. Ce contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- Améliorer la stabilité dynamique du système: entre autre des fonctions des FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.

- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquent réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité d'énergie.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.

II.10 Applications Principales des FACTS : [1]

type	Application
SVC	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stabilisation dynamique de tension, la capacité de transfert accrue de puissance, variation réduite de tension ➤ Améliorations de stabilité d'angle et de tension ➤ Équilibrage de charge dynamique Appui équilibré de tension
TCSC	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Améliorer la stabilité de coupure et de tension ➤ Commander la ligne flux de puissance ➤ Augmenter la capacité de transfert d'énergie ➤ Atténuation de l'oscillation électromécanique Faciliter des oscillations de subsynchroneus d'atténuation
STATCOM	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stabilisation dynamique de tension ➤ Système d'alimentation amélioré atténuant, atténuation de SSR ➤ Équilibrage de charge dynamique Amélioration de la qualité de puissance

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue globale (overview) sur les dispositifs FACTS (leurs classification et différentes catégories) avec des schémas qui structurent chaque dispositifs .de plus nous avons présenté quelques installations FACTS en exploitation dans le monde tel que UPFC ; le STATCOM aux états unis, le TCSC etc....et à la fin une petite discussion sur le plan économique des installations FACTS.

Dans les chapitres suivants nous avons choisi d'étudier le STATCOM (static compensator) et le SVC (Static Var Compensator) comme dispositifs FACTS pour contrôler la tension et optimiser la puissance réactive dans un réseau de transport de l'énergie électrique.

III.1.Introduction

Dans le présent chapitre, nous étudierons le comportement des réseaux électriques avec et sans intégrations des dispositifs FACTS tels que : SVC et STATCOM.

Le SVC : Ce dispositif est utilisé pour le contrôle de la tension, la compensation de l'énergie réactive et des pertes de système ainsi que pour améliorer les limites de stabilité.

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 du jeu de connexion est très faible.

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.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 [24].

III.2.2.1 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*).

III.3.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 3charges comme montrés dans la figure.

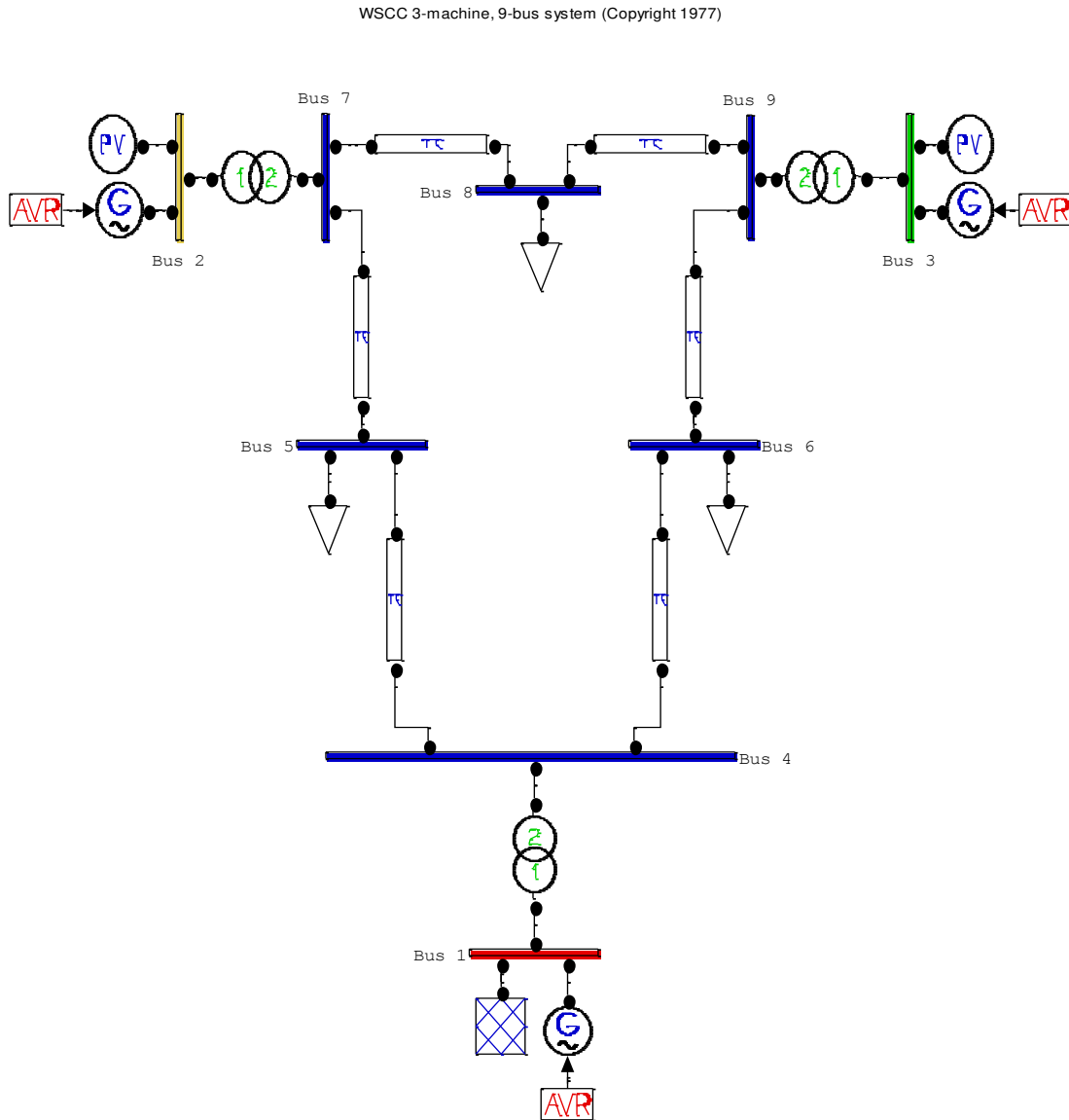


Figure 3.1. Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres

1er scenarios

***sans compensation**

D'après les résultats de simulation cités aux figures (3.2 et 3.3), on remarque que le système est entièrement stable soit de tension ou de vitesse des générateurs raccordés à ce réseau.

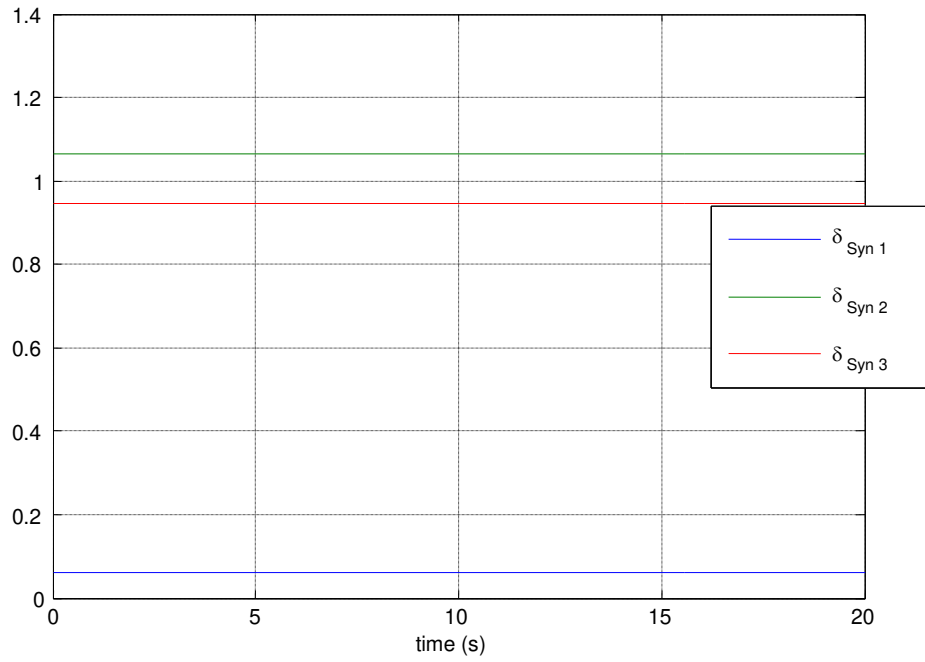


Figure 3.2.angles rotoriques des Générateurs

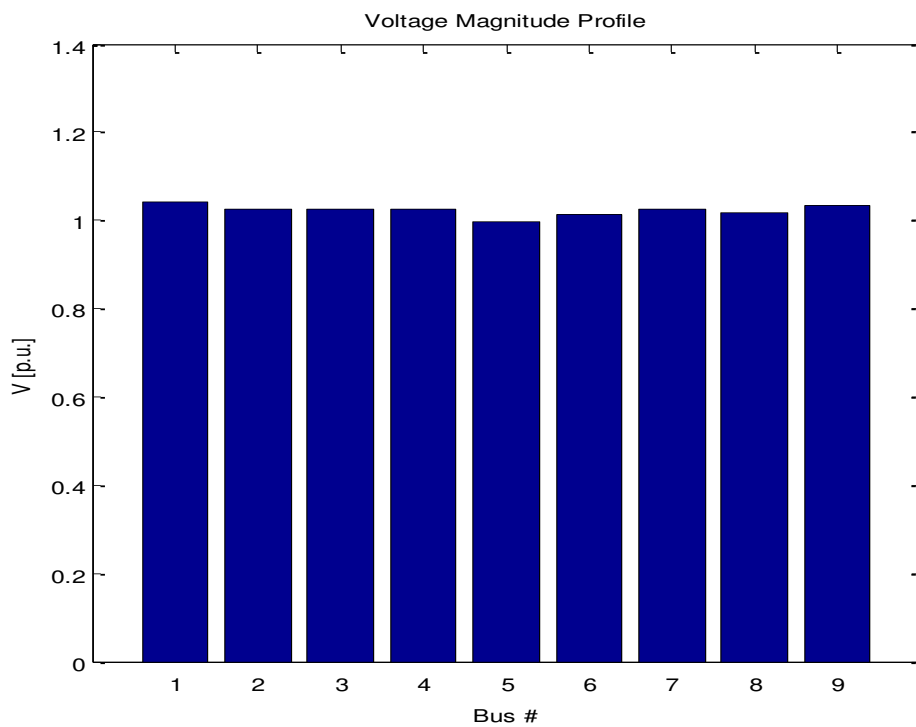


Figure 3.3.Amplitude tensions

Le tableau 3.1 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau étudié qui montre l'amplitude des tensions dans les limites requises.

Tableau 3.1. Amplitude de tensions pour 9 J.B

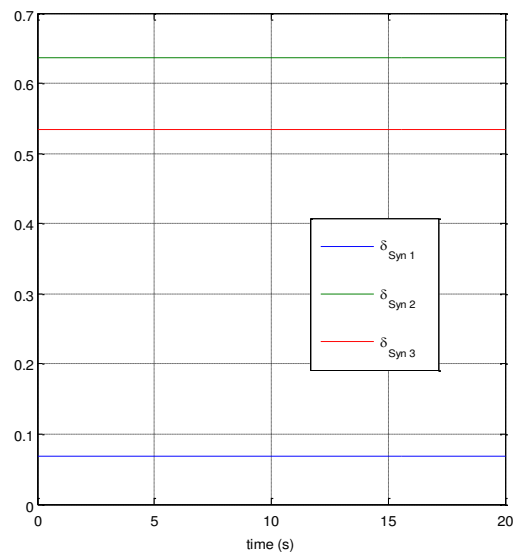
	V (pu)
J.B 1	1.04000
J.B 2	1.02500
J.B 3	1.02500
J.B 4	1.02579
J.B 5	0.99563
J.B 6	1.01265
J.B 7	1.02577
J.B 8	1.01588
J.B 9	1.03235

2eme scenarios (compensation avec SVC)

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

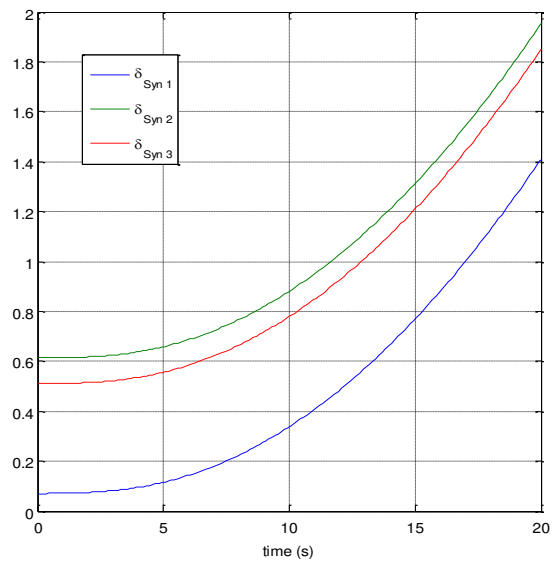
On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 5, les résultats de simulation montrent que les générateurs du système se perturbent comme montrés dans les figures.3.4 (A et B), une fois que le réseau est raccordé à un système de compensation, tel que (SVC) de même charge de la réactive cité auparavant, on voit d'après la figure .3.4(C) que le système revient à son état de stabilité.

Sans compensation

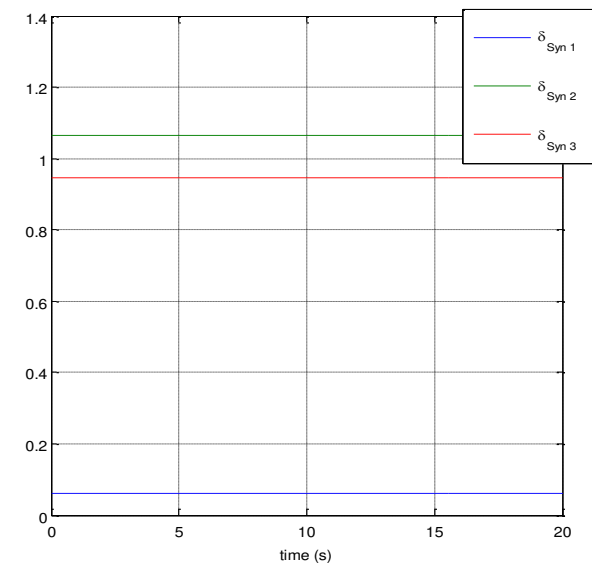


A (Q=3.05)

avec SVC



B (Q=3.07)



C (Q=3.07)

Figure.3.4 .angles rotoriques des générateurs

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 tableau 3.2 en absence de compensation, mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système améliorent.

Le tableau 3.2 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

Tableau.3.2.Amplitude des tensions

	Sans compensation		SVC
	Q=3.05pu	Q=3.07pu	Q=3.07pu
Vbus4	0.86609	0.87395	1.03679
Vbus5	0.57016	0.58681	1.02496
Vbus7	0.91972	0.93089	1.03301

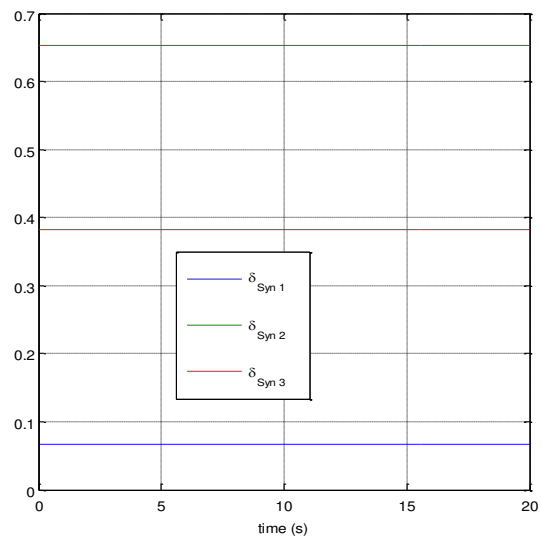
Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06 :

On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la figure (3.5).En présence et en absence de compensation via le SVC.

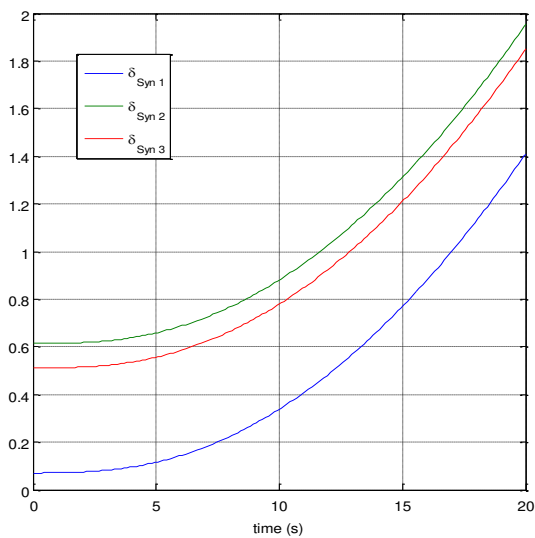
Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les figures (3.5 (A et B)) en absence du SVC, les vitesses rotoriques des générateurs s'accélèrent. La figure (3.5(C)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur SVC .ce dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.

Sans compensation

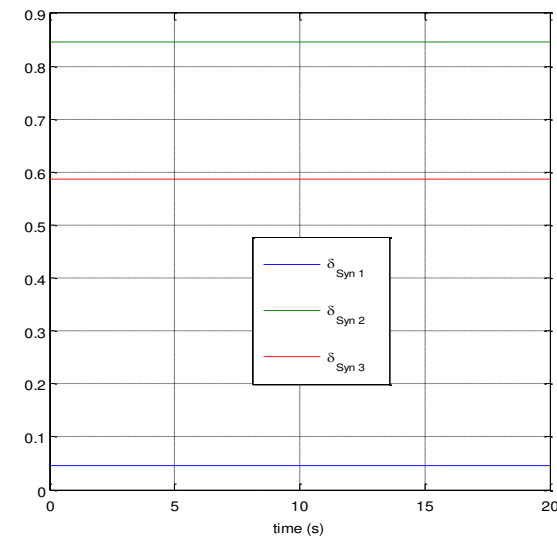
avec SVC



A (Q=2.26)



B (Q=2.27)



C (Q=2.27)

Figure3.5.angles rotoriques des générateurs

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 tableau 3.3 en absence de compensation. Mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

Le tableau 3.3 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

Tableau 3.3.Amplitude des tensions

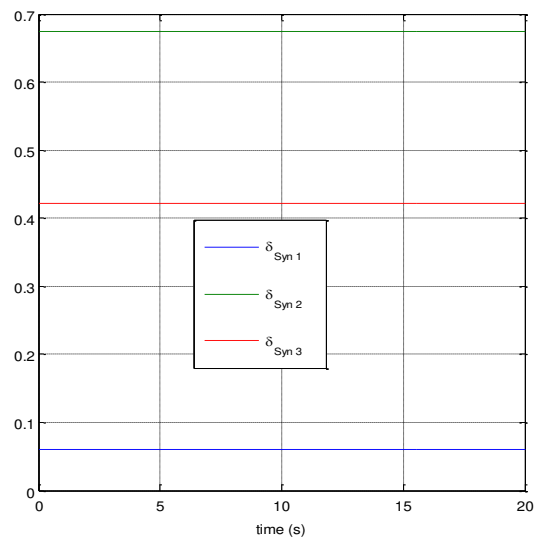
	Sans Compensation		SVC
	Q=2.26	Q=2.27	Q=2.27
Vbus4	0.83021	0.85971	0.99693
Vbus5	0.66197	0.70424	0.83216
Vbus6	0.6532	0.69753	0.82584
Vbus7	0.93044	0.95975	0.97864
Vbus9	0.9386	0.9698	0.98416

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

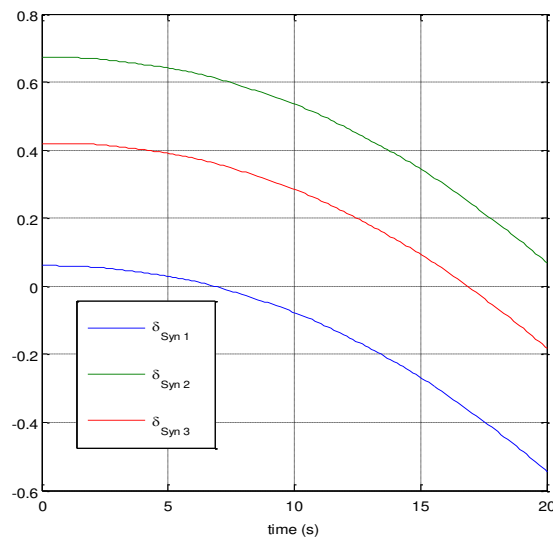
On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la figure 3.6. En présence et en absence de compensation via le SVC. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les figures. (3.6 (A et B)) en absence du SVC, les vitesses rotoriques des générateurs est diminuer. La figure (3.6 (C)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur SVC. Ce dernier va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.

Sans Compensation

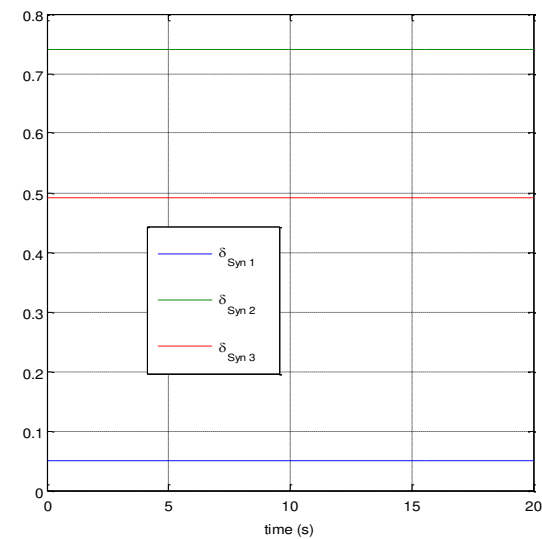
Avec SVC



A (Q=1.68)



B (Q=1.69)



C (Q=1.69)

Figure 3.6. angle rotoriques des générateurs

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 tableau 3.4 en absence de compensation. Mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système diminuer.

Le tableau 3.4 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

Tableau 3.4.Amplitude des tensions

	Sans compensation		SVC
	Q=1.68	Q=1.69	Q=1.69
Vbus4	0.89774	0.89483	0.97712
Vbus5	0.77611	0.77138	0.84718
Vbus6	0.77884	0.77372	0.8494
Vbus7	0.92131	0.91798	0.94222
Vbus8	0.84425	0.8396	0.8666
Vbus9	0.93846	0.93446	0.95782

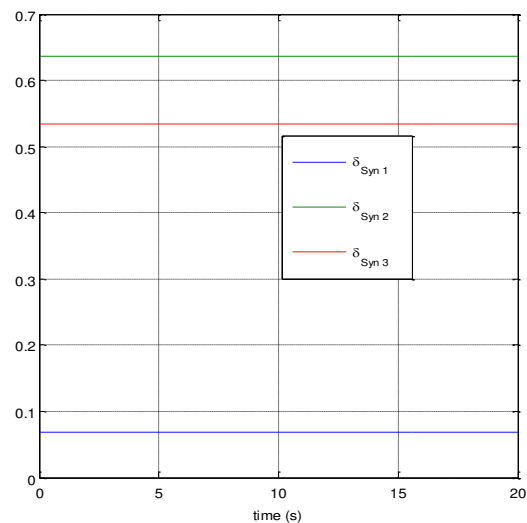
3eme scenarios (compensation avec STATCOM)

Variation de la charge réactive au JB (05) :

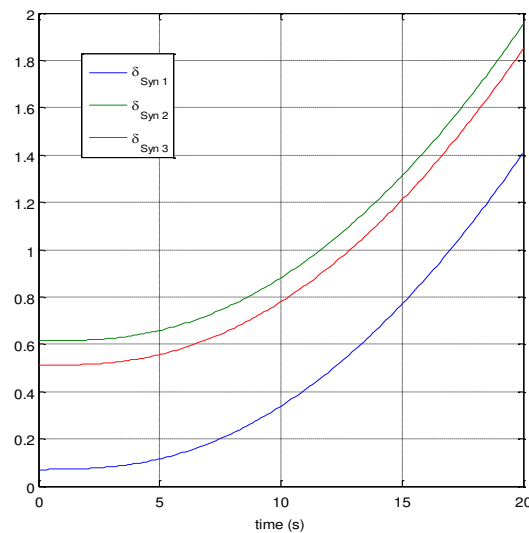
On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 5, les résultats de simulation montrent que les générateurs du système se perturbent comme montrés dans les figures (3.7 (A et B)), une fois que le réseau est raccordé à un système de compensation, tel que (STATCOM) de même charge de la réactive cité auparavant, on voit d'après la figure (3.7(C)) que le système revient à son état de stabilité. La figure (3.7(C)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur STATCOM. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.

Sans compensation

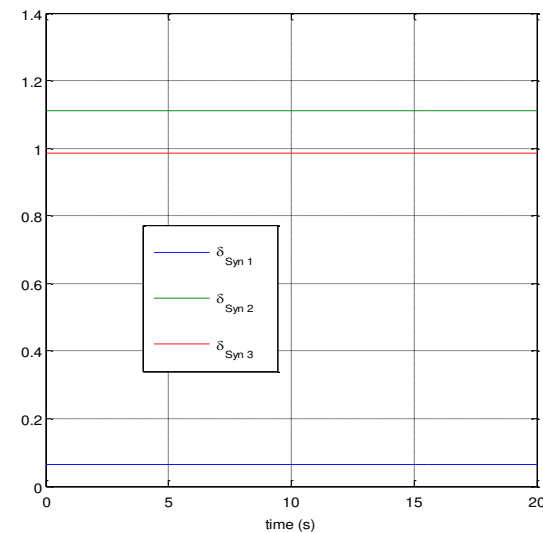
Avec STATCOM



A (Q=3.05)



B (Q=3.07)



C (Q=3.07)

Figure .3.7. angle rotoriques des générateurs

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 3.05 à 3.07 (pu) se baissent comme montrés au tableau 3.5 en absence de compensation. Mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore. Le tableau 3.5 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

Tableau.3.5. Amplitude des tensions

	Sans compensation		STATCOM
	Q=3.05pu	Q=3.07pu	Q=3.07pu
Vbus4	0.86609	0.87395	1.0368
Vbus5	0.57016	0.58681	1.025
Vbus7	0.91972	0.93089	1.0331

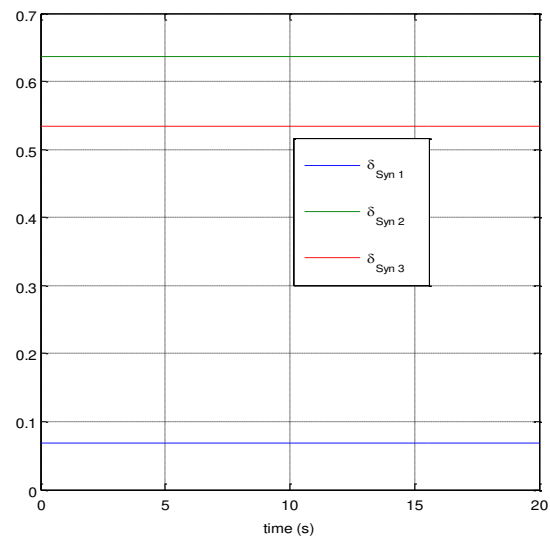
Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06 :

On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la figure (3.8). En présence et en absence de compensation via le STATCOM. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les figures. (3.8 (A et B)) en absence du STATCOM, les vitesses rotoriques des générateurs s'accélèrent.

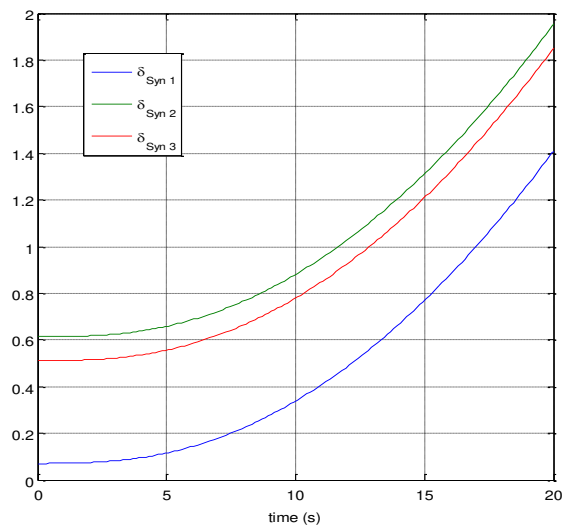
La figure 3.8 (C), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur STATCOM. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.

Sans compensation

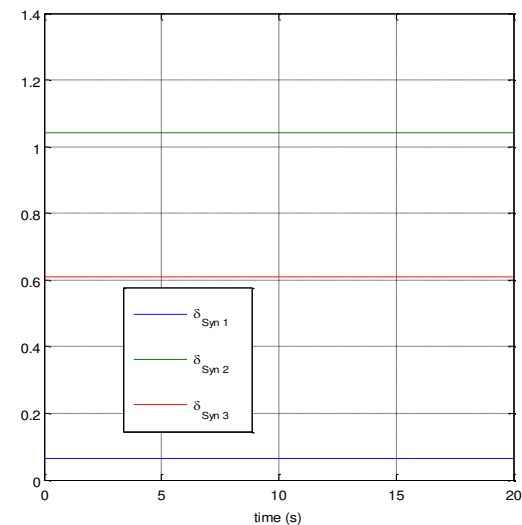
Avec STATCOM



A (Q=2.26)



B (Q=2.27)



C (Q=2.27)

Figure 3.8. angle rotorique des générateurs

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 tableau 3.6 en absence de compensation. Mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore. Le tableau 3.6 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

Tableau 3.6. Amplitude des tensions

	Sans Compensation		STATCOM
	Q=2.26	Q=2.27	Q=2.27
Vbus4	0.83021	0.85971	0.98126
Vbus5	0.66197	0.70424	1.025
Vbus6	0.6532	0.69753	0.81627
Vbus7	0.93044	0.95975	1.0235
Vbus9	0.9386	0.9698	0.99167

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

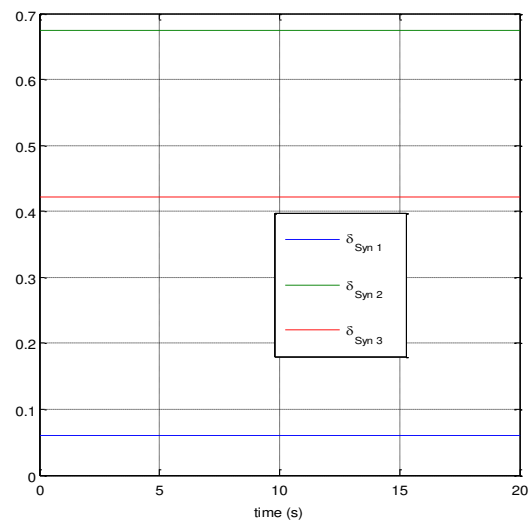
On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la figure 3.9. En présence et en absence de compensation via le STATCOM.

Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les figures. (3.9 (A et B)) en absence du STATCOM, les vitesses rotoriques des générateurs diminuer.

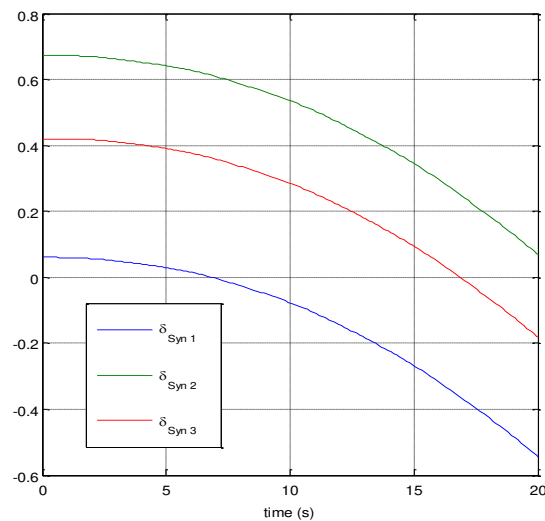
La figure (3.9 (C)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur STATCOM. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.

Sans compensation

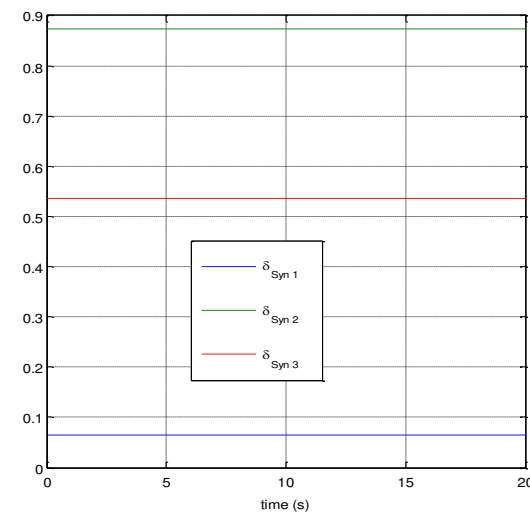
Avec STATCOM



A (Q=1.68)



B (Q=1.69)



C (Q=1.69)

Figure 3.9. angle rotoriques des générateurs

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 tableau 3.7 en absence de compensation. Mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

Le tableau 3.7 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

Tableau 3.7. Amplitude des tensions

	Sans compensation		STATCOM
	Q=1.68	Q=1.69	Q=1.69
Vbus4	0.89774	0.89483	0.99592
Vbus5	0.77611	0.77138	1.025
Vbus6	0.77884	0.77372	0.87045
Vbus7	0.92131	0.91798	0.98679
Vbus8	0.84425	0.8396	0.90267
Vbus9	0.93846	0.93446	0.97254

III.4. Comparaisons entre SVC et STATCOM) :

Les puissances réactives des charges sont présentées dans la figure 3.10. En présence et en absence de compensation via le SVC et STATCOM.

Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les figures. (3.10(A)) en absence du SVC et STATCOM, les vitesses rotoriques des générateurs diminuer.

La figure (3.10 (B et C)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de SVC ou STATCOM. Ces compensateurs reviennent la vitesse des générateurs stable.

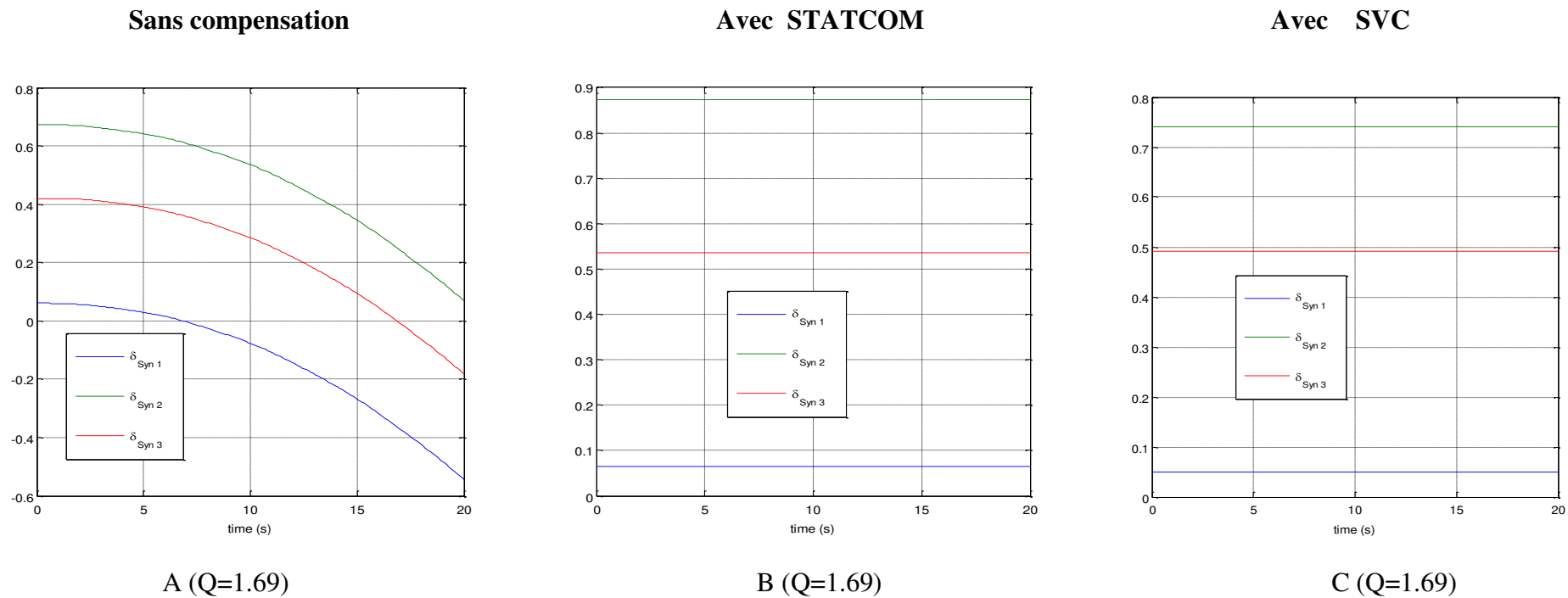


Figure 3.10. angle rotoriques des générateurs

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 1.69 (pu) se baissent comme montrés au tableau (3.8) en absence de compensation. Mais dans le cas où le SVC et STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

Le tableau 3.8 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau

Tableau 3.8. Amplitude des tensions

	Sans compensation	SVC	STATCOM
	Q=1.69	Q=1.69	Q=1.69
Vbus4	0.89483	0.97712	0.99592
Vbus5	0.77138	0.84718	1.025
Vbus6	0.77372	0.8494	0.87045
Vbus7	0.91798	0.94222	0.98679
Vbus8	0.8396	0.8666	0.90267
Vbus9	0.93446	0.95782	0.97254

D'après les résultats pour les cas de la compensation on remarque le STATCOM donne un rendement efficace par rapport SVC

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le réseau dans lequel nous avons introduit les Contrôleurs FACTS « SVC et STATCOM » afin de compenser la puissance réactive et maintenir la tension du jeu de barre où il est connecté.

Les modèles les plus courants d'équilibrage la charge sont SVC et STATCOM car sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, nœuds, etc.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Nous avons traité le problème de la puissance réactive et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs SVC et STATCOM. Une étude sur les dispositifs FACTS a été réalisée et en plus une étude détaillée sur les dispositifs SVC et STATCOM (définition, modélisation, incorporation dans le load flow)[25].

Dans la dernière étape, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau étudié détaillé à savoir (IEEE.9.JB) où nous avons intégré un STATCOM et un SVC aux différents jeux de barres, à fin de voir le comportement du STATCOM et SVC connecté au réseau pour le contrôle de la puissance réactive et par la suite son influence sur le profile de la tension.

Le choix de l'emplacement efficace du dispositif shunt, permet d'améliorer considérablement les indices de qualité d'énergie. Il faut noter que le des rôles principal est le contrôle dynamique de la tension dispositif shunt.

Enfin si les systèmes SVC et STATCOM sont surtout destinés au réseau de transport, des applications en réseau à moindre tension sont envisageables pour résoudre des problèmes liés notamment aux nouvelles contraintes nées de la production décentralisée [25].

Comme perspectives, nous avons proposé de faire surveiller en permanence les tensions des jeux de barres par faire installer des dispositifs de compensations modernes ainsi que de stocker l'énergie sous autres moyens de stockage tel que les stockages inertiels, volant d'inertie, supraconductrices.... etc. en cas d'abaissement de la charge [25].

Références bibliographiques :

- [1] Kerbaa Amel « Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique », mémoire master, Université Mohamed kheidher, Biskra.
- [2] M.A.E A Alali « Contribution à l'étude des compoteurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 12-09-2002.
- [3] Mammeri Oussama, « différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un noeud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », mémoire de magistère, option: réseaux électriques, université de Batna, année universitaire 2011/2012.
- [4] Haimour Rachida, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, option identification modélisation et commande numérique des processus, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, année universitaire 2008-2009.
- [5] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques », Traité EGEM série génie électrique, Lavoisier 2003.
- [6] Abdelaziz Chaghi « Documents pédagogiques et didactiques », Université Lhadj Lakhdar, Batna 2000/2001.
- [7] Boudjella Houari « Contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositif FACTS (SVC) », mémoire de magistère, option : conversion d'énergie et commande, université de Sidi Belabbas, soutenu le 23-01-2008.
- [8] Hanene Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », mémoire de magistère, Université Lhadj Lakhdar, Batna, soutenu le 28-02-2006.
- [9] David Chapman « Variation de tension », european Copper Institute, juillet 2002.
- [10] K.Kahle « Static var compensation for the sps electrical network », 3rd ST Workshop Chamonix, France, January 25-28-2000.

- [11] Sekhane Hocine « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de la tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS », mémoire magistère, Université de Constantine1, soutenu 2013.
- [12] Alibi Abdelaali « Contrôle des réseaux Electriques par les Systèmes FACTS : (Flexible AC transmission système) », mémoire de magistère, Université Lhadj Lakhdar, Batna, 2009.
- [13] Xiao-Pins Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal « Flexible AC transmission systems: Modelling and Control », Springer 2005.
- [14] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho « FACTS Modelling and Simulation in Power Networks», John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [15] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « La planification des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [16] Mezaache Mohamed, «analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de stabilité de la tension », mémoire de magister, option réseaux électriques, université de Batna, soutenu le24/11/2011.
- [17] Kartobi Lamia «Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques », mémoire de magistère, option réseaux électriques et haute tension, école nationale polytechnique Alger, Soutenu le 29 Novembre 2006.
- [18] BARAR ; LADJICI «Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission en Courant Alternatif « FACTS »" projet de fin d'études école nationale polytechnique 2002.
- [19] Benras Med Amine, Laroui Souleymane, «Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif », mémoire master académique de Ouargla soutenu Le : 09/06/2015.
- [20] Alireza Seifi, Ph.D. Sasan Gholami, M.S.; and Amin Shabanpour, M.S,«Power Flow Study and Comparison of FACTS Series (SSSC) », Shunt (STATCOM), and Shunt-Series (UPFC).

The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 11. Number 1. May 2010
(Spring)

[21] P. L. So.Y.C.Chu, T. Yu, «Coordinated control of TCSC and SVC for system damping enhancement», International Journal of Control, Automation, and Systems, June 2005.

[22] R.Benabid, M.Boudour, M.A Abido, «Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swaem optimization », Elect Power and energy.

[23] Rabah Benabid « Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Université Amar Telidji, Laghouat 2007.

[24] MAMMERI Oussama, «différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un noeud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », mémoire de magistère université de Batna 2012.

[25]BEN HAKKOUM Med Abdalilah, LEGOUGUI Ali « compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par système FACTS », mémoire master académique de Ouargla soutenu Le 31/05/2016.

[26] BELGUIDOUM Hocine, « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandes», mémoire de magistère université Setif ,2012.

[27]Mezaache Mohamed, «analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de stabilité de la tension », mémoire de magister, option réseaux électriques, université de Batna, soutenu le 24/11/2011.

ANNEXE

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

Détails du système :

-Les données de réseau IEEE 9 J.B

-MVA Base=100 MVA

- Fréquence = 60 Hz

-Tension nominale =16.5KV

Tableau (1) Les données de charge

J.B Puissance active	Puissance active, MW	Puissance réactive, MVAR
J.B5	125	50
J.B 6	90	30
J.B 8	100	35

Tableau (2) Les données de ligne

Line No	Bus 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

Tableau (3) Les données de Générateur

Générateur No	P+jQ	V pu	MVA	Type de J.b
G1	0.4+j0.3	1.04	100	Slack
G2	0.1+j0.3	1.025	100	PV
G3	0.2 +j0.25	1.025	100	PV