



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

DEPARTEMENT D'AUTOMATISATION ET ELECTRIFICATION DES PROCEDES

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme :

Master

Présentée par

Djebir Thamer Mahmoud Djallil

Filière : hydrocarbures.

Option : Electricité industrielle.

Thème

**Etude de la Compensation de la puissance réactive par un
compensateur statique dans un réseau électrique**

Devant le jury:

Mr. KIFOUCHE Rezki

Prof

Président

Mr. KHELEFI Fateh

MAA

Examineur

Mr. BENDJEGHABA Omar

MAA

Encadreur

2021/2022



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

DEPARTEMENT D'AUTOMATISATION ET ELECTRIFICATION DES PROCEDES

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme :

Master

Présentée par

Djebir Thamer Mahmoud Djallil

Filière : hydrocarbures.

Option : Electricité industrielle.

Thème

**Etude de la Compensation de la puissance réactive par un
compensateur statique dans un réseau électrique**

Encadré par:

- Mr. BENDJEGHABA Omar

Signature

Avis favorable du Président du jury

Nom Prénom

Mr. KIFOUCHE Rezki

Cachet et signature

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu tout puissant qui je a donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

J'exprime toutes ma profonde reconnaissance à mon encadreur Mr. Bendjghaba Omar pour le temps consacré à mon écouter, je orienter et je corriger tout au long de mon projet.

J'adresse mon remerciement à tous les membres du jury d'accepter de juger ce modeste travail et je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous les enseignants qui m'ont formé dès la 1ere année jusqu'à la 5ème année à l'Université M'hamed Bougara – Boumerdes (Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie).

Je ne saurais terminer mes remerciements sans mentionner les membres de ma famille et spécialement ma mère et mon père Nacereddine , qui, sur le plan humain, m'ont soutenu par leurs encouragements tout au long de mes études.

Enfin, je remercie toute personne de près ou de loin participant pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Dédicaces

*En signe de respect et de reconnaissances, Je tiens
dédier ce modeste travail :*

*Qui a été resté toujours leurs orientations et consignes
mon chemin optimal vers le succès.*

*À mon très cher père et A ma chère mère , mes chères
sœurs, en témoignage et en gratitude de leurs
dévouement, de leurs soutien permanent durant ma
vie, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moral,
eux qui ont consenti tant d'effort pour mon
éducation, mon instruction et pour me voir atteindre
ce but,*

*Pour ce qui est la source de mon inspiration et mon
courage, à qui je dois de la reconnaissance,*

*Et à tous ceux qui m'ont encouragé à terminer ce
travail notamment mes amis de stage au niveau du complexe GP2Z
Sonatrach*

Djebir Thamer Mahmoud Djallil

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

SOMMAIRE

Liste des figures..... Pg.1

Liste des tableaux..... Pg.4

Liste des indices..... Pg.5

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : Le concept de puissance réactive.

I .1. INTRODUCTION3

I .2. Les Puissances Actives , Réactives , Apparents3

I.2.1. Composantes active et réactive du courant4

I.2.2. Composantes active et réactive de la puissance4

I.2.3. Le Facteur De Puissance5

I.3. Les Consommateurs De La Puissance Réactive6

I.3.1. Machine à excitation (générateur et moteurs)6

I.3.2. Système de la technologie des semi-conducteurs7

I.4. Les producteurs de la puissance réactive7

I.4.1. L'Alternateur7

I.4.2. Câble sous-terrain.....7

I.4.3. Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs.....7

I.5. L'effet de la puissance réactive dans le réseau électrique8

I.5.1. Chute de tension8

I.5.2. Inconvénients d'un faible facteur de puissance.....10

I.5.3. Surdimensionnement général du réseau11

I.5.4. Rendement des appareils électriques.....12

I.5.5. Tarification de l'énergie réactive12

I.6. Le Concept De Compensation12

I.6.1. Objectif de la compensation12

I.7. Conclusion13

Chapitre II : Techniques de compensation de la puissance réactive.

II.1.INTRODUCTION	14
II.2. Compensations traditionnelles.....	14
II.2.1.Compensateurs synchrones	14
II.2.2. Batterie de condensateur	15
II.2.3. Inductances.....	19
II.2.4. Les transformateurs déphaseurs PST	20
II.3. Compensation moderne (FACTS)	21
II.3.1. Concepts de base et définitions.....	21
II.3.2. Nécessité des dispositifs FACTS	21
II.3.3. Classification des systèmes FACTS	22
II.3.4. Apports et avantages des dispositifs FACTS.....	29
II.3.5. Coût des dispositifs FACTS.....	30
II.4. Dispositifs FACTS en exploitation	30
II.4.1. Condensateur Série Avancé (ASC)(de Kayenta).....	30
II.4.2. TCSC(d'Imperatriz)	31
II.4.3. STATCOM(de Sullivan).....	31
II.4.4. UPFC(d'Inez).....	31
II.5. Conclusion	32

Chapitre III : Modélisation d'un SVC.

III.1. INTRODUCTION.....	33
III.2. Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC)	33
III.2.1. Définition du SVC	33
III.2.2. Schéma électrique SVC	35
III.2.3. Principe de fonctionnement	35
III.3. Caractéristique d'un Compensateur Statique (SVC).....	36
III.3.1. Caractéristique en V d'un Compensateur Statique.....	36
III.3.2. Caractéristique QSVC (I) d'un SVC	37
III.4. Modélisation des compensateurs statiques.....	38
III.4.1. Modèle dynamique du SVC	38
III.4.2. Modèle du Compensateur Shunt SVC.....	41

III.5. Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance ...	43
III.5.1. Les avantages du SVC	45
III.5.2. Les inconvénients du SVC	46
III.6. Conclusion.....	46

Chapitre IV : Compensation par SVC sous PSAT /MATLAB.

IV.1. INTRODUCTION	47
IV.2. Description Générale.....	47
IV.2.1. Logiciel de simulation	47
IV.2.2. Organigramme de calcul de puissance avec PSAT	49
IV.2.3. Simulation.....	50
IV.3. Réseau test de 14 jeux de barres	50
IV.3.1. Présentation du réseau	51
IV.3.2. Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE14.....	52
IV.3.3. Intégration du SVC dans un réseau test de 14 jeux de barres	59
IV.3.4. Comparaison entre les résultats du transit de puissance sans et avec SVC.....	64
IV.3.5. Interprétation	65
IV.4. Réseau test de 9 jeux de barres	65
IV.4.1. Présentation du réseau	65
IV.4.2. Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE09.....	66
IV.4.3. Intégration du SVC dans un réseau test de 09 jeux de barres	72
IV.4.4. Comparaison entre les résultats du transit de puissance sans et avec SVC.....	76
IV.4.5. Interprétation	77
IV.5. Conclusion	77
CONCLUSION GENERALE	78

Références bibliographiques

Annexe

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Composante vectorielle des courants	4
Figure I.2: Composition vectorielle des puissances	5
Figure I.3: Schéma équivalent d'une ligne de transport d'énergie fonctionnant à vide.....	7
Figure I.4 : circuit équivalent du réseau électrique.	8
Figure I.5 : Diagramme vectoriel des tensions.....	9
Figure I.6 : Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur du courant apparent.....	10
Figure I.7 : Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur de la puissance apparente.....	11

Chapitre II :

Figure II.1 : Schéma équivalent de la machine synchrone.....	14
Figure II.2 : Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau.	15
Figure II.3 : Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série.	16
Figure II.4 : Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre.	17
Figure II.5 : Diagramme vectoriel du schéma de la figure II.4.b.	18
Figure II.6 : Schéma de montage d'un absorbeur sur jeu de barres HT	19
Figure II.7 : Effet du fonctionnement d'un transformateur déphaseur.	20
Figure II.8: Structure du TCSC.....	22
Figure II.9: Structure du TCSR.....	23
Figure II.10 : Compensateur synchrone statique série.	24
Figure II.11 :Structure du SVC.....	25
Figure II.12 : La caractéristique V-I du SVC.....	26
Figure II.13 : Structure du STATCOM.....	26
Figure II.14 : Structure du TCPAR.....	28
Figure II.15: Structure de l'UPFC.....	29

Chapitre III :

Figure III.1 : Schéma d'un SVC de type TCR-FC.....	33
Figure III.2 : Schéma de base d'un SVC.....	34
Figure III.3 : Caractéristique d'un SVC.....	35

Figure III.4 : Compensateur statique de puissance réactive SVC.	35
Figure III.5 : Schéma d'un SVC de type TCR-TSC-FC.	36
Figure III.6 : la caractéristique en V d'un SVC.	37
Figure III.7 : Variation de la puissance réactive en fonction du courant.	38
Figure III.8 : Schéma général du circuit de commande du SVC.	38
Figure III.9 : Modèle dynamique du SVC.	39
Figure III.10 : Système en boucle fermée avec le contrôleur du SVC.	39
Figure III.11 : Réponse fréquentielle d'un contrôleur conventionnel du SVC.	40
Figure III.12 : Présentation d'un compensateur SVC.	41
Figure III.13 : Représentation du circuit de base pour le compensateur SVC.	42
Figure III.14 : la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage.	42
Figure III.15 : Variation de la susceptance en fonction de l'angle α	43

Chapitre IV:

Figure IV.1 : Interface graphique du PSAT	48
Figure IV.2 : Interface graphique (GUI) du PSAT.	48
Figure IV.3 : Organigramme de calcul de flux de puissance sous PSAT	49
Figure IV.4 : Etapes de simulation.	50
Figure IV.5 : Topologie du réseau étudié IEEE14.	51
Figure IV.6 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE14.	53
Figure IV.7 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE14.	54
Figure IV.8 : La puissance active dans chaque jeu de barre.	54
Figure IV.9 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre.	55
Figure IV.10 : Les pertes actives et réactives dans les lignes.	55
Figure IV.11 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE14(l'état perturbé).	57
Figure IV.12 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE14 (l'état perturbé).	58
Figure IV.13 : La puissance active dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).	58
Figure IV.14 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).	59
Figure IV.15 : Les pertes actives et réactives dans les lignes (l'état perturbé).	59
Figure IV.16 : Topologie du réseau IEEE14 avec SVC.	60
Figure IV.17 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE14 en présence du SVC.	62
Figure IV.18 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE14 en présence du SVC.	62
Figure IV.19 : La puissance active dans chaque jeu de barre en présence du SVC.	63

Figure IV.20 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre en présence du SVC.....	63
Figure IV.21 : Les pertes actives et réactives dans les lignes en présence du SVC.....	64
Figure IV.22 : Topologie du réseau étudié IEEE09.	65
Figure IV.23 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE09.	67
Figure IV.24 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE09.	67
Figure IV.25 : La puissance active dans chaque jeu de barre.	68
Figure IV.26 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre.	68
Figure IV.27 : Les pertes actives et réactives dans les lignes.	69
Figure IV.28 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE09(l'état perturbé).....	70
Figure IV.29 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE09 (l'état perturbé).....	71
Figure IV.30 : La puissance active dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).	71
Figure IV.31 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).	72
Figure IV.32 : Les pertes actives et réactives dans les lignes (l'état perturbé).	72
Figure IV.33 : Topologie du réseau IEEE09 avec SVC.....	73
Figure IV.34 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE09 en présence du SVC.	74
Figure IV.35 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE09 en présence du SVC.	75
Figure IV.36 : La puissance active dans chaque jeu de barre en présence du SVC.....	75
Figure IV.37 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre en présence du SVC.....	76
Figure IV.38 : Les pertes actives et réactives dans les lignes en présence du SVC.....	76

Liste des tableaux

Tableau 01 : Comparaison entre des logiciels d'analyse des réseaux électriques.....	49
Tableau 02 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE14.....	52
Tableau 03 : Les données des lignes étudié de IEEE14.....	53
Tableau 04 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE14(l'état perturbé).....	56
Tableau 05 : Les données des lignes étudié de IEEE14(l'état perturbé).....	57
Tableau 06 : Les tensions et les angles au niveau de 14 jeux de barres en présence du SVC.	61
Tableau 07 : Les données des lignes étudié de IEEE14 en présence du SVC.	61
Tableau 08 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 14JB sans et avec SVC	64
Tableau 09 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE09.....	66
Tableau 10 : Les données des lignes étudié de IEEE09.....	66
Tableau 11 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE09(l'état perturbé).....	69
Tableau 12 : Les données des lignes étudié de IEEE09(l'état perturbé).....	70
Tableau 13 : Les tensions et les angles au niveau de 09 jeux de barres en présence du SVC.	73
Tableau 14 : Les données des lignes étudié de IEEE09 en présence du SVC.	74
Tableau 15 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 09JB sans et avec SVC	77

Liste des indices

Chapitre I :

S : puissance apparente(kVA) (kilo Volt-Ampère).

P : puissance active(kW)(kilo Watt).

Q : puissance réactive(kVAR) (kilo Volt-Ampère Réactif) .

ϕ : déphasage entre la puissance apparente et la puissance active égal au déphasage entre le courant et la tension. (°)

U : Tension Composée (V) $U = \sqrt{3}V$

V : Tension Simple (V)

I : Intensité (A)

Fp : Facteur De Puissance

Fd : Facteur De Déformation

HT : haute tension.

THT : très haute tension.

ΔU : la chute de tension (V)

R : résistance de la ligne (Ω)

X : la réactance de la ligne (Ω)

P_u : puissance utile (W)

P_{abs} : puissance absorbé (W)

ΔP : perte de puissance (W)

Chapitre II :

E : f e m due à l'excitation du compensateur synchrone.

V : tension du réseau .

X_d : réactance de fuite de compensateur synchrone .

I : courant échangé avec le réseau .

X_L : la réactance de la ligne.

X_C : la réactance capacitive effective offerte par le TCSC.

V: tension au niveau de jeu de barres .

V_{réf} : tension de référence .

I : courant du SVC .

X_S : la pente de réactance.
$$X_S = \frac{\Delta V_{C \max}}{\Delta I_{C \max}} = \frac{\Delta V_{L \max}}{\Delta I_{L \max}}$$

B_{C max} : susceptance capacitive maximale.

B_{L max} : susceptance inductive maximale.

Chapitre III :

K_{SVC} : le gain du SVC.

T_{SVC} : la constante de temps du SVC

X_L : la réactance inductive.

X_C : la réactance capacitive.

B_{SVC} : Susceptance équivalente du SVC.

V_{SVC} : Tension aux bornes du SVC.

V_{ref-svc} : Référence de la tension du SVC.

V_K : la tension du réseau où est connecté le SVC.

B_e : la susceptance.

V_{ref} : la tension de référence dans le SVC.

I_{SVC} : le courant dans le SVC.

B_P : La susceptance du SVC vue du primaire du transformateur.

H(s) : fonction de transfert du contrôleur du SVC.

G(s) : fonction de transfert du réseau électrique.

T_m : le retard lié à la mesure de tension.

T_d : le délai dû à la conduction des thyristors.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est principalement générée et distribuée sous forme de tension sinusoïdale triphasée, qui peut fournir l'énergie requise pour divers consommateurs de cette énergie électrique. Idéalement, cette énergie devrait être fournie sous la forme d'un ensemble des tensions pour former un système alternatif triphasé équilibré avec quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

À l'heure actuelle, les problèmes qui existent dans le fonctionnement de la production d'énergie électrique du réseau de transmission sont d'une grande importance confrontée à des conditions environnementales très difficiles et l'augmentation de la consommation de l'électricité, le réseau électrique a tendance à s'étendre et à devenir de plus en plus proche et interconnecté, également l'expédition est longue distance, utilisez des lignes de grande capacité...etc. Cette complexité structurelle a plusieurs conséquences: La difficulté de maintenir un profil de tension. La stabilité de la tension du réseau est également se caractérise par la capacité de maintenir la tension dans les stations de chargement dans les limites spécifiées en fonctionnement normal.

Recherche sur le comportement en tension et la compensation énergétique est devenu une préoccupation majeure pour les opérateurs et les aménageurs ces systèmes. En fait, plusieurs incidents généralisés se sont produits dans le monde (Instabilité de tension). Ce mode instable n'est pas bien maîtrisé. En effet, le mécanisme qui cause l'instabilité de la tension semble être l'une des questions les plus importantes à aborder. Même aujourd'hui il n'y a pas de théorie disponible et largement acceptée Analyse de stabilité de tension. Les problèmes liés à ce type d'instabilité constituent, Une direction de recherche très importante dans plusieurs pays.

Le bilan des événements des dernières décennies montre que, L'effondrement de la tension se produit généralement lorsqu'une perturbation majeure ou la charge du réseau fortement contrainte augmente de manière significative et le réseau s'affaiblit et sa consommation de puissance réactive augmente. Le phénomène est alors caractérisé par une diminution progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommateurs.

Quelques minutes plus tard, la dégénérescence de la tension sur la charge peut provoquer une interruption de service. La cause directe peut être : une tension insuffisante, une perte de puissance réactive accrue. Dans ce cas, les moyens traditionnels de commande et de compensation du réseau (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) peuvent s'avérer trop lents et insuffisants pour faire face efficacement à l'instabilité du réseau, surtout compte tenu des nouvelles contraintes. Il est donc nécessaire de compléter leurs actions par la mise en œuvre d'une électronique de puissance à temps de réponse court.

INTRODUCTION GENERALE

Les compensateurs statiques FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) sont utilisés pour le contrôle du réseau. Il agit rapidement sur divers paramètres (déphasage, tension, impédance). Ainsi, la puissance délivrée sera mieux maîtrisée et la tension sera également mieux maîtrisée régulation, ce qui augmentera probablement la marge de stabilité de la tension ou aura tendance à limite thermique de la ligne. Maintenir la production en équilibre consommation nécessite une surveillance permanente du système pour assurer qualité de service (problèmes de conduite), garantissant sa sécurité (problèmes de protection) et sa stabilité (problèmes de réglages).

Le premier chapitre est consacré au concept de la puissance réactive, ensuite le deuxième chapitre est dédié aux techniques de compensation de la puissance réactive. Dans le troisième chapitre nous avons traité en détaille le modèle mathématique de la SVC. Le quatrième chapitre est entièrement consacré à l'étude par simulation de l'effet d'un SVC sur deux réseau standard IEEE. Nous terminons notre mémoire par une conclusion général.

Chapitre I

Le concept de puissance réactive

I.1. INTRODUCTION

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme d'un courant et d'une tension alternative via des réseaux en haute, moyenne et basse tension.

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

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie active, la partie réactive ne peut pas être éliminée, mais compensée par des dispositifs appropriés. Ces dispositifs de compensation sont très utiles car il faut disposer à chaque instant de la puissance active nécessaire pour diminuer les pertes engendrées par son transport. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite.

Les économies d'énergie réalisées sont d'une grande importance vue les efforts humains et matériels qui sont investis quotidiennement pour garantir la continuité et la qualité de service.

I.2. Les Puissances Actives , Réactives , Apparents

- **La puissances Actives P** : Est la puissance qui va provoquer un mouvement, on pourrait la qualifier d'"utile". Elle est souvent confondue avec la puissance apparente. Elle représente, en particulier dans les habitations, la majorité de l'énergie consommée.(kW).

En réseau monophasé : $P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$ (I.1)

En réseau triphasé : $P = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (I.2)

- **La puissance réactive Q** : La puissance réactive correspond à la puissance « non utile », « invisible » de l'électricité, dans le sens où elle ne produit pas de travail thermique. Elle n'est pas transformée en énergie utile. Elle n'est pas directement convertie en chaleur, en mouvement ou en lumière .(kVAR).

En réseau monophasé : $Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi$ (I.3)

En réseau triphasé : $Q = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \sin \varphi$ (I.4)

- **La puissance apparent S** : A partir des deux puissances précédentes on définit cette troisième comme suit : correspond à la somme vectorielle de la puissance active et réactive. (kVA).

En réseau monophasé : $S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = V \cdot I$ (I.5)

En réseau triphasé : $S = \sqrt{3} \sqrt{(P^2 + Q^2)} = \sqrt{3}U \cdot I$ (I.6)

I.2.1. Composantes active et réactive du courant

À chacune de ces énergies actives et réactives correspond un courant électrique. Courant actif (I_a) En phase avec la tension du réseau. Courant réactif (I_r) déphasé à 90° Retard (récepteur inductif) ou avance (récepteur capacitif) par rapport au courant actif.

Le courant apparent (I_t) est le courant résultant circulant dans la ligne de la source au courant destinataire. Si le courant est complètement sinusoïdal, alors la représentation de Fresnel peut être utilisée.

Ces courants se composent alors vectoriellement comme représenté à la figure I.1 :

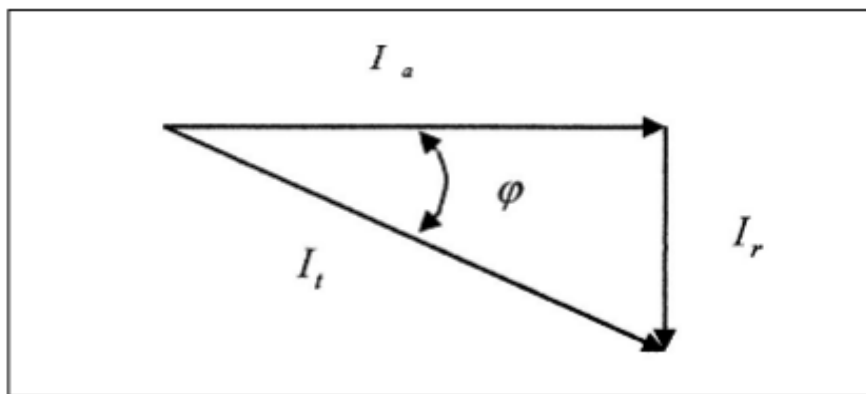


Figure I.1 : Composante vectorielle des courants.[1]

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

$$I_a = I_t \cdot \cos \varphi \quad (I.8)$$

$$I_r = I_t \cdot \sin \varphi \quad (I.9)$$

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

I.2.2. Composantes active et réactive de la puissance

Le diagramme précédent (Figure I.1) établi pour les courants est aussi valable pour les puissances, en multipliant chacun des courants par la tension commune U . On définit ainsi la figure I.2 où :

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

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

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

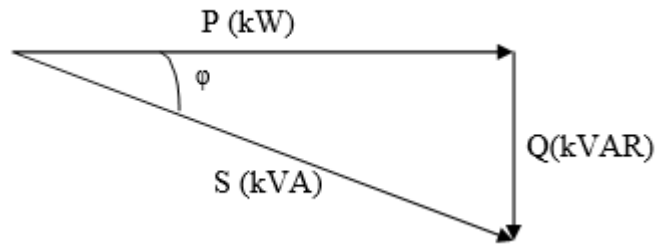


Figure I.2: Composition vectorielle des puissances.[1]

P, Q, S et φ sont reliés par ces relations :

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

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

$$Q = P \cdot \tan \varphi \quad (\text{I.12})$$

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

I.2.3. Le Facteur De Puissance

Définition : Par définition le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente ; c'est un nombre abstrait compris entre 0 et 1, on l'appelle également $\cos \varphi$. [1]

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

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

Si les courants de tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal à $\cos \varphi$, c'est-à-dire :

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

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

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

On utilise également la variable $\tan \varphi$. Dans les mêmes conditions (des signaux parfaitement sinusoïdaux), nous avons également la relation :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q(\text{kVAR})}{P(\text{kW})} \quad (\text{I},18)$$

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

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

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

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

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

- La suppression de la facturation d'énergie réactive.
- Réduction de la puissance consommée par kVA.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.

I.3. Les Consommateurs De La Puissance Réactive

I.3.1. Machine à excitation (générateur et moteurs)

Les machines fonctionnant avec l'électricité ont toujours besoin d'un courant magnétisant pour que le fonctionnement soit possible. Le courant magnétisant n'est autre que la partie réactive du courant ($I_r = I \cdot \sin \varphi$), il met en évidence la quantité d'énergie réactive demandée.

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

I.3.2. Système de la technologie des semi-conducteurs

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

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

I.4. Les producteurs de la puissance réactive

I.4.1. L'Alternateur

L'alternateur fournit simultanément de la puissance active et réactive et est réglé en conséquence. Chacun affecte le courant d'excitation avec la sortie mécanique de la turbine rotor.

En fait, la puissance réactive est réglée.

I.4.2. Câble sous-terrain

La capacité des lignes électriques formées par des câbles va bien au-delà de son importance sa résistance et son inductance. Ces lignes agissent généralement comme des inducteurs, cette caractéristique du câble (grande capacité) limite son utilisation. Surtout pour le transport d'énergie à longue distance.

I.4.3. Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs

Pour les lignes de transmission aériennes pour la transmission d'énergie électrique dans la plage de HT et THT qui sont caractérisées par une longueur considérable, il faut tenir compte de la capacité. Devant les réactances de ces lignes, les valeurs ne sont pas négligeables, surtout pour les régimes à vide ou surchargées. Ces lignes de transmission fictives sont capacitatives. C'est-à-dire qu'il produit de l'électricité de puissance réactive.

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

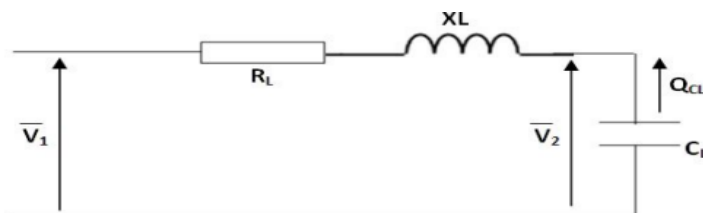


Figure I.3: Schéma équivalent d'une ligne de transport d'énergie fonctionnant à vide.[2]

I.5. L'effet de la puissance réactive dans le réseau électrique

I.5.1. Chute de tension

Si la continuité de la ligne électrique est suffisamment importante, le courant circulant dans la ligne électrique 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. Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production aura un profil de tension différent d'un réseau dans lequel la production et la consommation sont également réparties. Chaque poste de production de tension applique une tension à sa sortie, et la tension augmentée dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où se trouve le consommateur.

À la pointe de consommation, la tension est forte au nœud du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.[1][3]

Considérant maintenant sur la figure I.4 le schéma équivalent d'une ligne de transmission, d'impédance complexe $Z = R + jX$, et destinée à alimenter la charge Z_c . La tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance :

$$S_2 = P_2 + j Q_2 \quad (I,19)$$

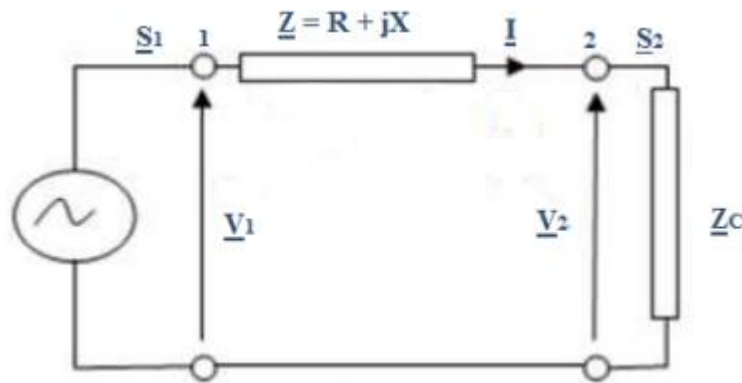


Figure I.4 : circuit équivalent du réseau électrique.

$$\text{Les puissances apparentes : } S_1 = P_1 + j Q_1 \quad (I,20)$$

$$S_2 = P_2 + j Q_2 \quad (I,21)$$

La relation qui relie les tensions est donnée par :

$$V_1 = V_2 + R \cdot I + jX \cdot I \quad (I,22)$$

Le diagramme vectoriel des tensions est représenté sur la Figure I.5 :

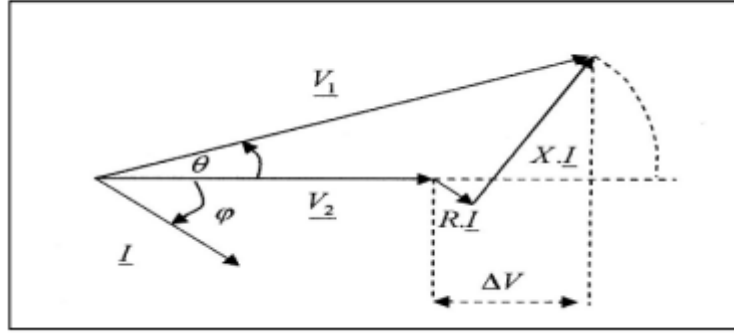


Figure I.5 : Diagramme vectoriel des tensions.

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme des tensions conduit à assimiler la chute de tension ΔV à :

$$\Delta V = V_1 \cdot \cos \varphi - V_2 \quad (I,23)$$

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

$$\Delta V = R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi \quad (I,24)$$

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

$$\Delta V = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V_2} \quad (I,26)$$

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

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

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

$$\Delta U = \frac{X \cdot Q}{U} \quad (I,28)$$

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

I.5.2. Inconvénients d'un faible facteur de puissance

Un faible facteur de puissance dans une installation peut entraîner de nombreux inconvénients, tels que :

- a) Intensité de courant en ligne trop élevée ce qui engendre l'augmentation des pertes d'énergie active dans les câbles :

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

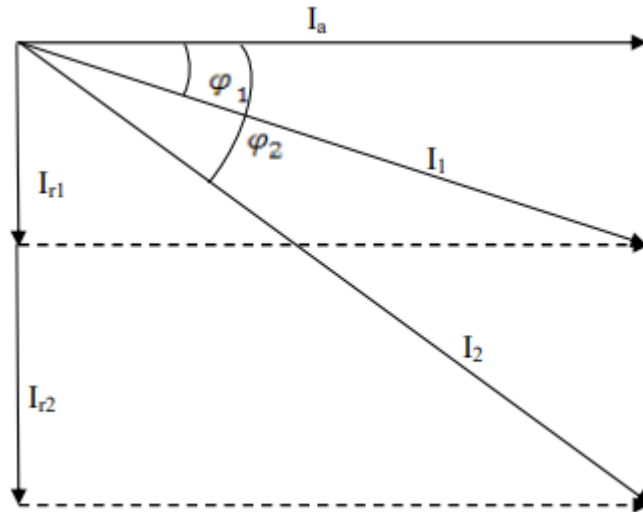


Figure I.6 : Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur du courant apparent.[4]

Par conséquent, la circulation d'énergie réactive due à l'augmentation du courant provoque ce qui suit :

- Une surcharge et une surchauffe supplémentaires des transformateurs et des câbles entraînent une perte d'énergie active.
- Des chutes de tension.

- b) Augmentation de la puissance apparente en kVA :

pour une même puissance active P utilisée, la figure I.6 montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente ($S_2 > S_1$) que le $\cos \varphi$ est faible, c'est-à-dire, que l'angle est élevé.

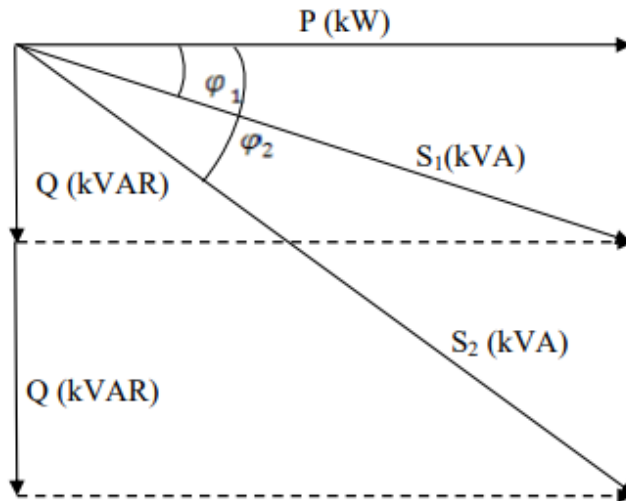


Figure I.7 : Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur de la puissance apparente.[4]

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

I.5.3. Surdimensionnement général du réseau

Les centrales de production d'énergie électrique sont souvent éloignées des consommateurs, Nécessite de très longues lignes à HT , des postes de transformation, des postes d'interconnexion et des appareils de protection.

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

I.5.3.1. Alternateur

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

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

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

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

I.5.3.2. Transformateur

Lorsque le réseau consomme beaucoup de puissance réactive, la puissance apparente augmente. Compte tenu des mêmes contraintes que précédemment, le transformateur doit être surdimensionné.

I.5.3.3. Les lignes de transport d'énergie

À vide les lignes électriques fournissent de l'énergie réactive, grâce aux réactances capacitives des lignes. En service, le réseau est traversé par un courant plus important. Par conséquent, la chute de tension de la ligne devient importante.

Pour améliorer cela, il est nécessaire de réduire la résistance de ces lignes, ce qui entraîne une augmentation de la section transversale du conducteur d'où le surdimensionnement des lignes de transport d'énergie électrique.

I.5.3.4. Jeux de barres :

L'augmentation du courant dû à l'excès de l'énergie réactive induit une augmentation des courants de Foucault dans les barres, par conséquent, cela provoque un échauffement de ces derniers, ce qui provoque leur dilatation. Pour contrecarrer ce problème, Les jeux de barres doit être surdimensionné.

I.5.4. Rendement des appareils électriques

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

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (I,30)$$

$$\text{or: } P_u = P_{abs} - \Delta P \quad (I,31)$$

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

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

I.5.5. Tarification de l'énergie réactive

Pour un faible facteur de puissance, les augmentations de courant, les pertes et les chutes de tension vont augmenter, ce qui conduit à des réseaux généralement surdimensionnés, donc les coûts d'investissement seront élevés, et le prix du kilowattheure va augmenter, donc les consommateurs organismes de protection (SONELGAZ, EDF, etc.) exigent des utilisateurs (usines) qu'ils augmentent leur facteur de puissance. Sinon ils ont de bonnes raisons pour les pénaliser.

I.6. Le Concept De Compensation

I.6.1. Objectif de la compensation

Nous avons déjà vu (titre I.5) que le transfert d'énergie réactive est à l'origine de chutes de tension et de surdimensionnement du réseau. Donc pour pallier (remédier) à ces problèmes, il faut recourir à la compensation d'énergie réactive, qui consiste à produire de l'énergie réactive au plus près de la demande.

Par conséquent, la compensation de l'énergie réactive permet :

- Éliminer les factures et la consommation d'énergie excessive réactif.
- la réduction des pertes dans les conducteurs à puissance active constant.
- la diminution de la chute de tension.
- Augmentation de la puissance active transportée avec un courant apparent constant.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons voulu mettre en évidence d'une part à travers les notions de puissances : la puissance réactive et l'importance du facteur de puissance (qui définit la consommation de puissance réactive) en exploitation des réseaux électriques ; d'autre part de faire paraître les raisons de compenser l'énergie réactive.

Le transport de puissance réactive à travers les réseaux de transports entraîne des chutes de tension ainsi que les pertes actives et réactives et l'augmentation des investissements. Donc, l'exploitant est contraint de réduire le transport de puissance réactive. Par ailleurs le besoin d'énergie réactive est marqué par la consommation des charges ou du réseau : un point du réseau qui a un mauvais facteur de puissance présente des inconvénients mais cela peut être corrigé par l'apport de puissance réactive en ce point. Ainsi pour satisfaire à ce besoin de puissance réactive en évitant en même temps le transport de la puissance réactive on la compense.

Chapitre II

Techniques de compensation de la puissance réactive

II.1.INTRODUCTION

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

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

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

II.2. Compensations traditionnelles

II.2.1.Compensateurs synchrones

Le compensateur synchrone est une machine synchrone fonctionnant en moteur à vide. Ses fonctionnements en régime surexcité ou sous-excité lui permettent respectivement de fournir ou d'absorber l'énergie réactive. Comme il n'entraîne aucune charge, le compensateur synchrone n'absorbe pratiquement aucune puissance active. Cette méthode permet de contribuer au contrôle et à la stabilité de la tension.[5]

D'après la théorie de Potier, le modèle simplifié d'une machine synchrone est représenté sur la figure II.1 par une source de tension E en série avec une inductance. $X_d = (R << X_d)$

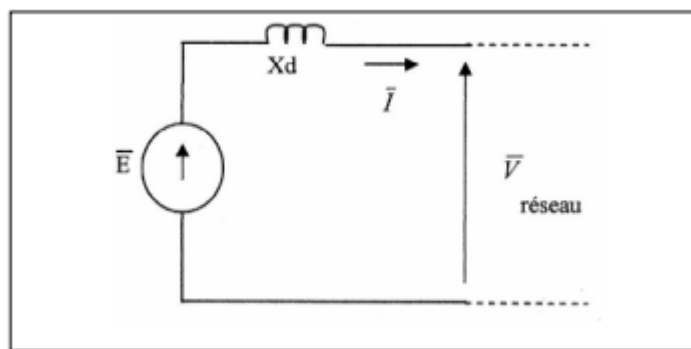


Figure II.1 : Schéma équivalent de la machine synchrone.[5]

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

$$\bar{E} = \bar{V} + jX_d \bar{I} \quad (\text{II.1})$$

La puissance active consommée par le condensateur est :

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

La puissance réactive aussi est :

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

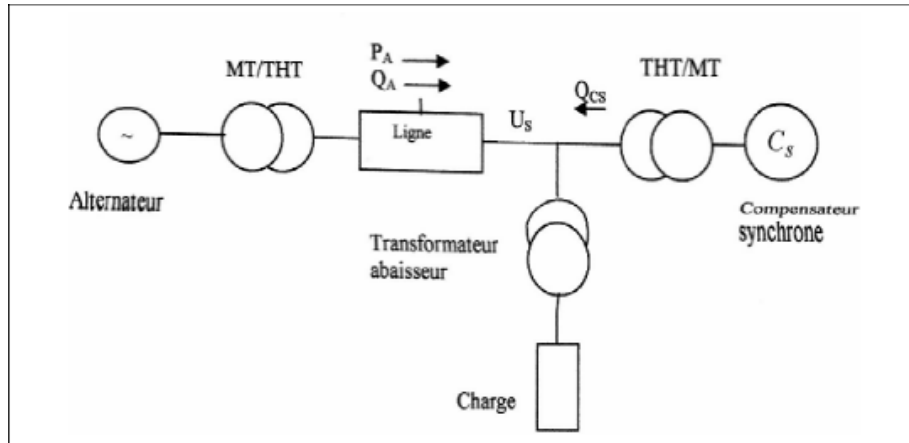


Figure II.2 : Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau.[5]

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

II.2.2. Batterie de condensateur

Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles et les réseaux publics. Les moteurs synchrones peuvent également fournir de l'énergie réactive mais leur fonction principale, la force motrice, n'est pas toujours liée à demande de puissance réactive instantanée.

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

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

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

fait de manière à limiter environ 5% de la variation de tension maximale sur le jeu de barres MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

II.2.2.1. Installation série : L'installation des batteries de condensateurs en série permet de compenser les chutes de tension sur les longues lignes de transport d'énergie réactive (THT et HT). En diminuant la réactance effective de la ligne, la capacité de transit de la puissance active peut être augmentée en diminuant les chutes de tension.

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

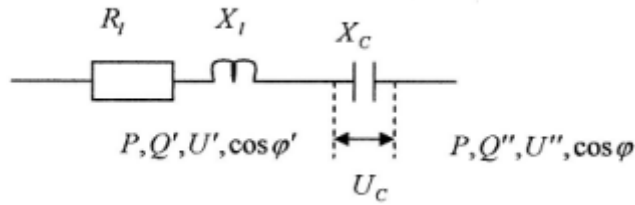


Figure II.3 : Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série.[7]

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

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

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

$$\frac{P}{P} = \frac{U' \cdot \cos \varphi'}{U'' \cdot \cos \varphi} = 1 \quad \Longrightarrow \quad \cos \varphi' = \frac{U''}{U'} \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.6})$$

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

$$\text{sachant que : } \operatorname{tg} a = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 a}}{\cos a} \quad a : \text{angle quelconque}$$

La puissance compensée est de:

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

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

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

II.2.2.2. Installation shunt : Considérons maintenant le schéma de la figure II.4, qui montre le bus de puissance ($P+jQ$) alimentant la charge à travers la ligne, tous deux représentés par une seule impédance ($R+jL\omega$). En supposant que la charge a un faible facteur de puissance, une batterie de condensateurs shunt de puissance(jQ_c) est installée.[6]

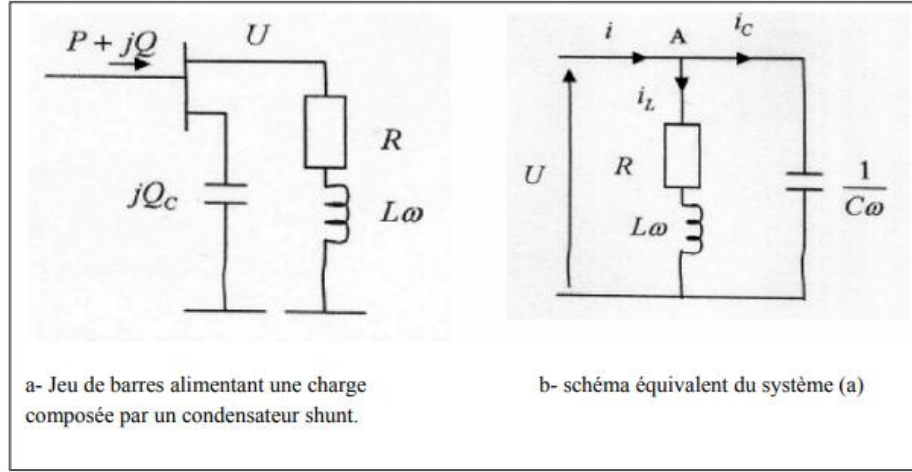


Figure II.4 : Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre. [7]

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

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

$$i = i_c + i_L \quad (\text{II.11})$$

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

$$i_c = 0 \quad (\text{II.12})$$

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

$$\dot{i} = I_m \cdot \cos \varphi_1 + j I_m \cdot \sin \varphi_1 \quad (\text{II.14})$$

D'où

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

Le facteur de puissance d'avant compensation vaut alors :

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

- **Après compensation :**

$$i = i_c + i_L \quad (\text{II.17})$$

$$\text{avec: } i = I_m^{\angle \varphi_2} ; \quad i_m = I_m^{\angle \varphi_1} \text{ et } i_c = I_m^{\angle +\frac{\pi}{2}}. \quad (\text{II.18})$$

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

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

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

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

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

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

Le facteur de puissance après compensation vaut alors:

$$\cos \varphi_2 = \cos\left[\arctg\left(\frac{\sin \varphi_1 + \frac{I_{mC}}{I_{mL}}}{\cos \varphi_1}\right)\right] \quad (\text{II.25})$$

On voit bien que:

$$\varphi_2(\text{après comp}) < \varphi_1(\text{avant comp}) \implies \cos \varphi_2(\text{après comp}) > \cos \varphi_1(\text{avant comp}) \quad (\text{II.26})$$

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

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

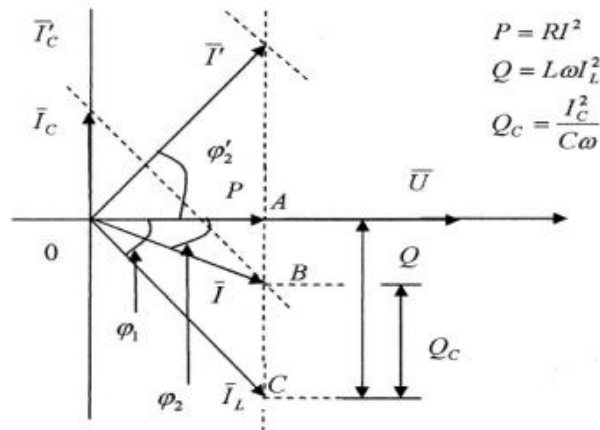


Figure II.5 : Diagramme vectoriel du schéma de la figure II.4.b. [7]

$$\text{Nous avons : } \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q}{P} \quad (\text{II.27})$$

$$\text{Du triangle (AOC) on déduit : } \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{AC}{OA} \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Du triangle (OAB) on déduit : } \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{AC-AB}{OA} = \frac{Q-QC}{P} = \frac{Q}{P} - \frac{QC}{P} = \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{QC}{P} \quad (\text{II.29})$$

Finalement, la puissance du condensateur est :

$$Q_c = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (\text{II.30})$$

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

II.2.3. Inductances

Les inductances ont un rôle complémentaire au rôle des batteries de condensateurs pour réaliser la stabilité de la tension. En effet, lors des heures creuses, la puissance réactive produite n'est pas entièrement absorbée par les charges. C'est pour cette raison que des inducteurs sont installés dans les lignes THT ou HT, pour stocker l'énergie réactive excédentaire et l'empêcher de transiter à travers les lignes. La surtension sera donc atténuée et si nécessaire cette énergie sera retournée au réseau. Pour comprendre cette technique, nous avons choisi l'exemple pris du réseau EDF (figure II.6).[5]

supposons qu'on dispose d'éléments de 100 MVAR raccordés au réseau de 400 kV et d'éléments de 64 kV raccordés à 20 kV.

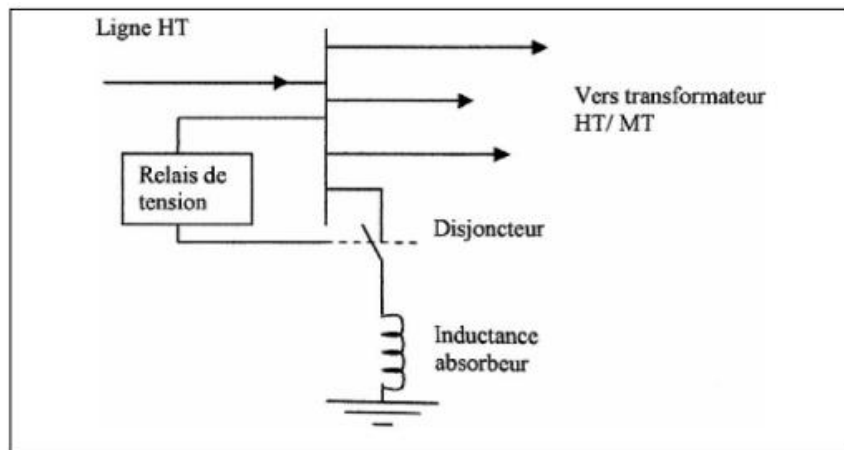


Figure II.6 : Schéma de montage d'un absorbeur sur jeu de barres HT. [7]

le relais de tension connecte l'inductance au réseau lorsque : Si la tension est supérieure à la tension de service maximale sur le jeu de barres, alors le relais est réglé sur cette valeur exacte, détectant cette surtension, immédiatement une fois le disjoncteur fermé, il est absorbé par l'inductance. courant traversant l'inductance crée une chute de tension, ce qui fait chuter la tension du jeu. bar à la tension réglée. Le disjoncteur ne s'ouvrira que lorsque la tension sera rétablie valeur de service.[5]

II.2.4. Les transformateurs déphaseurs PST

Un transformateur déphaseur (transformateur de régulation d'angle de phase) est une forme spéciale de transformateur électrique, ou plus exactement de transformateur de puissance, utilisée pour réguler le flux de l'énergie électrique à travers des lignes de transport. Tant l'amplitude que la direction du flux de puissance peuvent être réglées en variant le déphasage par le biais de transformateurs série.

En effet dans une ligne de transmission de courant alternatif, la puissance active transmise est proportionnelle au sinus de l'angle de transport. Quand deux lignes sont en parallèle, un réglage de cet angle permet de régler la répartition du courant entre les deux lignes et d'optimiser la capacité de transmission tout en évitant les surcharges.

Le coût des transformateurs déphaseurs est assez élevé, leur usage est donc limité à certains nœuds assez critiques du réseau. Cependant le gain en flexibilité, en vitesse d'opération, mais aussi en perte en ligne (un meilleur équilibrage entre les lignes limite les pertes par effet Joule) permet de justifier et d'amortir l'investissement.

Le rôle de transformateur déphaseur : de manière générale le rôle d'un transformateur déphaseur est de soulager un réseau surchargé. Le réseau de transport d'électricité est maillé, l'électricité emprunte naturellement et préférentiellement les lignes de moindre résistance électrique.

La figure II.7 ci-dessous montre l'effet d'un transformateur déphaseur sur un système électrique composé d'un générateur de 100 MW et de deux lignes parallèles. L'un est équipé d'un transformateur déphaseur dont les prises sont numérotées de 1 à 19, 10 étant la prise principale. Sur la photo de gauche, le changeur de prise du transformateur déphaseur est sur sa prise principale, il ne fournit pas de déphasage et son effet est nul. Les deux lignes sont traversées par 50 mégawatts de puissance. Dans le schéma de droite, le transformateur déphaseur fournit un déphasage qui renvoie 73 MW vers l'autre ligne.

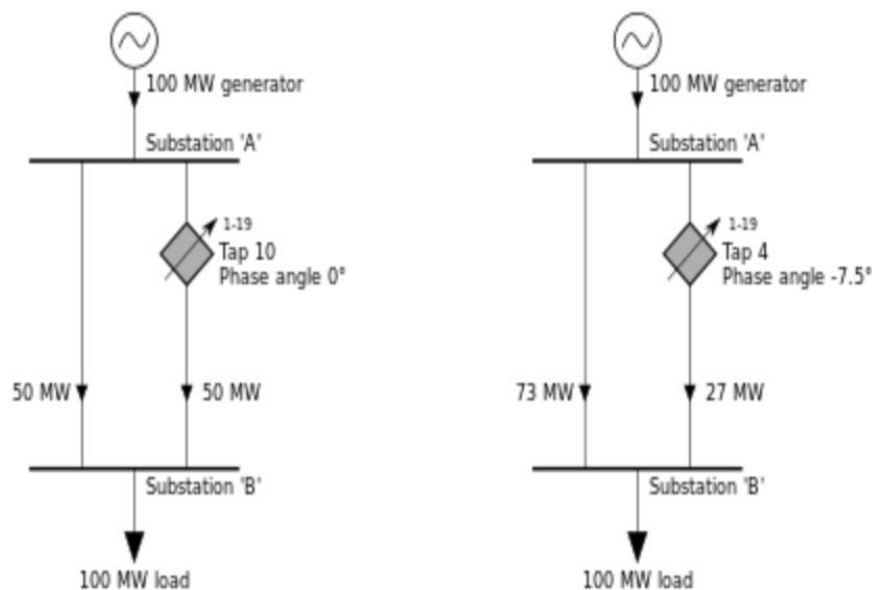


Figure II.7 : Effet du fonctionnement d'un transformateur déphaseur.

II.3. Compensation moderne (FACTS)

II.3.1. Concepts de base et définitions

FACTS «Flexible Alternative Currents Transmission Systems», systèmes flexibles de transmission à courant alternatif. C'est un projet lancé en 1988 par EPRI (Electric Power Research Institute), qui est un consortium dédié à la recherche dans le domaine de l'exploitation et du développement de l'énergie, et qui regroupe un certain nombre d'entreprises. Ces systèmes comprennent des contrôleurs basés sur l'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour améliorer la contrôlabilité des réseaux et la capacité de transmission des lignes.

La technologie FACTS ne se limite pas à un seul appareil, elle regroupe une série d'appareils implantés dans le réseau pour 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 des marges de stabilité améliorées et assurent une meilleure flexibilité dans le transfert d'énergie.

Quelques dispositifs de type FACTS : les plus connus sont :

- Les compensateurs série contrôlés par thyristors (TCSC : Thyristors Controlled Series Compensators).
- les déphaseurs statiques (SPS : Static Phase Shifter).
- Les compensateurs statiques d'énergie réactive (SVC: Static VAR Compensator).
- Les compensateurs statiques d'énergie réactive de type avancé (STATCOM: Static Synchronous Compensator).
- L'UPFC (Unified Power Flow Controller).

II.3.2. Nécessité des dispositifs FACTS

Le développement des dispositifs FACTS est principalement dû aux avancées dans le domaine des semi-conducteurs de puissance, en particulier des composants commandables tels que les thyristors et les thyristors GTO.

Dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électroniques ont des vitesses de commande très élevées et ne souffrent pas des problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. Par conséquent, FACTS a une fiabilité très élevée et une flexibilité presque illimitée. Dans le réseau, FACTS peut implémenter à la fois des fonctions en régime permanent et transitoires. Ils fonctionnent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance du gène ou en modifiant l'angle de la tension. En régime permanent, FACTS est principalement utilisé dans les deux situations suivantes :

- Lorsque la charge est élevée et que la tension est trop faible, ils maintiennent la tension à un niveau acceptable en fournissant une puissance réactive, à l'inverse, si la tension est trop élevée, ils l'absorbent.
- Contrôler la livraison de puissance pour réduire voire éliminer la surcharge des lignes ou des transformateurs et éviter des boucles traversent le réseau. Ils fonctionnent alors en contrôlant la réactance de la ligne et en ajustant le déphasage.

Du fait de leur grande vitesse de contrôle, les FACTS présentent de nombreuses qualités en mode dynamique. Ils permettent notamment :

- ✓ D'accroître la réserve de stabilité transitoire .
- ✓ D'amortir les oscillations de puissance .
- ✓ De supporter de manière dynamique, la tension.

II.3.3. Classification des systèmes FACTS

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories :

II.3.3.1. Compensateurs séries :

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.[3][8]

A. Condensateurs séries contrôlés par thyristors TCSC :

Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) est l'un des principaux dispositifs FACTS utilisés depuis plusieurs années pour augmenter la puissance transmise par la ligne afin d'améliorer la stabilité du réseau. Il se compose d'une inductance L en série avec un gradateur (inductance de la série de thyristors TCR) et l'ensemble en parallèle avec une capacité C comme l'illustre la figure II.8.

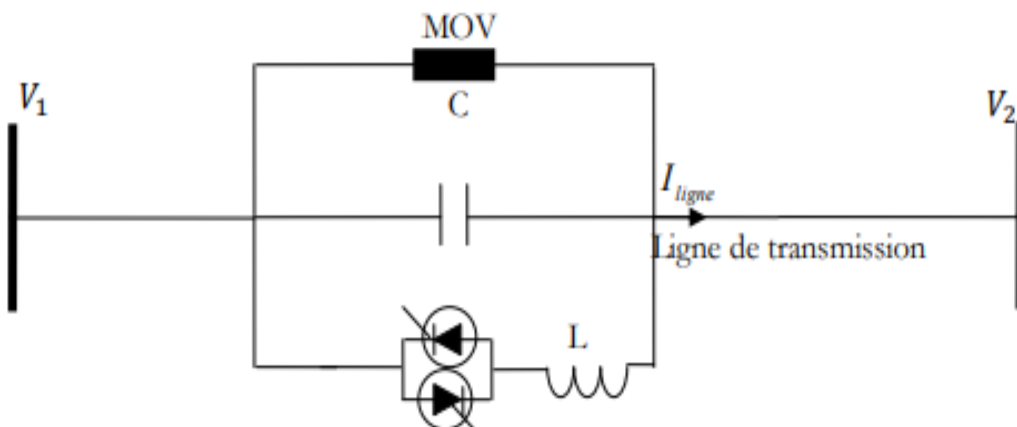


Figure II.8: Structure du TCSC.

Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissances et d'augmenter la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné par la formule :

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - LC\omega^2} \quad (II.31)$$

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

$$k_c = \frac{x_c}{x_L} \cdot 100\% \quad (II.32)$$

Suivant la valeur de α , on distingue trois modes de fonctionnement :

- ☞ $\alpha = 180^\circ$ la bobine est complètement déconnectée, le TCSC est considéré comme un condensateur série fixe.
- ☞ $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ X_{TCSC} est la combinaison parallèle de X_L et X_C .
- ☞ $\alpha = 90^\circ$ les thyristors sont en pleine conduction, le TCSC peut servir à limiter le courant de défaut.

La puissance transmise dans une ligne équipée d'un TCSC est donnée par la formule :

$$P_{12} = \frac{|\bar{V}_1| \cdot |\bar{V}_2|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (II.33)$$

Généralement, chaque ensemble possède en parallèle un élément de protection contre les surtensions, appelé MOV (Métal Oxide Varistor).

B. Compensateur réactif contrôlé par thyristor TCSR :

Le TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable.[9]

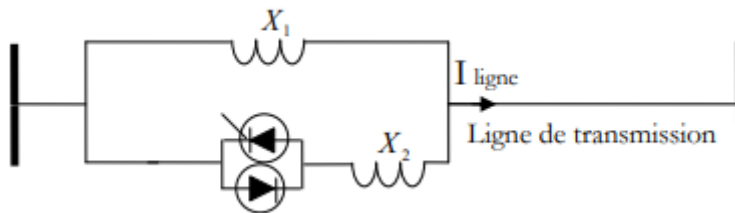


Figure II.9: Structure du TCSR.

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor atteint 180 degrés, elle cesse de conduire, la réactance incontrôlable agit comme un limiteur de courant de défaut. Lorsque l'angle d'amorçage est réduit à moins de 180 degrés, la réactance équivalente est réduite à un angle de 90 degrés, où il s'agit d'une combinaison parallèle de deux réactances.

C. Compensateur synchrone statique série SSSC :

Ce type de compensateur série (en anglais, Static Synchronous Series Compensator) est le plus équipement important pour cette famille. Il se compose d'un onduleur triphasé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Cet appareil présente des avantages par rapport aux autres appareils TCSC :[10]

- Élimination des composants passifs (inductance et capacités).
- Une aptitude symétrique dans les deux modes (inductif et capacitif).

Son rôle est d'introduire une tension triphasée en série avec la ligne de transport à la fréquence du réseau. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Dans ce cas, on peut régler en continu la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance introduite dans la ligne. La figure II.10 montre le schéma de base du SSSC et ses caractéristiques V-I.

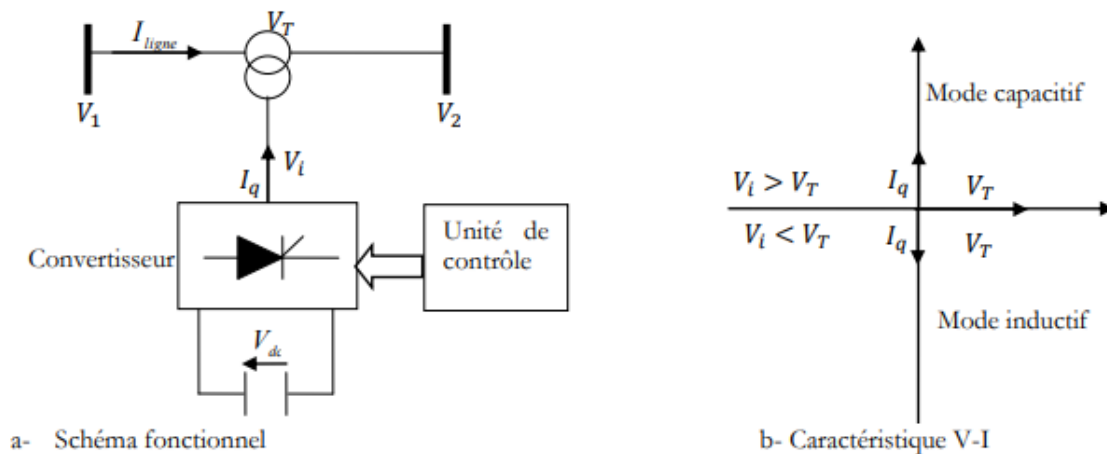


Figure II.10 : Compensateur synchrone statique série.

Si injecté à un angle de 90° par rapport au courant actuel ligne on obtient une compensation série. Cette compensation équivaut à un condensateur série à la fréquence fondamentale. En revanche, si la tension est injectée à 90° avant le courant de ligne, la compensation aura le même effet que d'augmenter l'impédance réactive de la ligne.

Par rapport aux compensateurs série traditionnels, la tension série fournie par SSSC sont des courants de ligne indépendants. De plus, SSSC est capable de fournir une compensation à tension constante et en phase avec le courant variable de la ligne. L'amplitude de la tension injectée peut être contrôlée indépendamment de l'amplitude du courant de ligne.

II.3.3.2. Compensateurs shunts :

À la fin des années 1960, il existait plusieurs appareils utilisant l'électronique de puissance. Ce dernier présente l'avantage de supprimer les pièces mécaniques et d'avoir des temps de réponse très courts. Le dispositif se compose principalement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard de déclenchement des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par l'appareil. Pratiquement tous les compensateurs shunt injectent du courant dans le réseau à travers la jonction.

Lorsqu'une impédance variable est connectée en parallèle sur le réseau, elle consomme (ou injecte) du courant variable. Cette injection de courant modifie la puissance active et réactive franchir cette ligne.

A. Compensateur statique de l'énergie réactive SVC :

Le SVC (Static Var Compensator) est la première génération de FACTS introduite sur le marché. Il se compose d'un ensemble de condensateurs commutés à thyristors (TSC Thyristor Switched Capacitors) et d'un ensemble des bobines contrôlées à thyristors (TCR Thyristor Controlled Reactors), comme le montre la figure II.11 , dont le premier exemple a été installé en Afrique du Sud en 1979 . Avec une bonne coordination de la commutation des condensateurs et du contrôle de la bobine, la puissance réactive de sortie peut varier en continu entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement.[9]

Peut-être que le SVC idéal ne contient pas un composant de résistance $G_{SVC} = 0$, de sorte qu'il ne consomme pas de puissance active du réseau. Sa puissance réactive est une fonction de la tension au jeu de barres de connexion et de la susceptance B_{SVC} .

$$P_{SVC} = 0 \quad (II.34)$$

$$Q_{SVC} = |\bar{V}_{BUS}|^2 \cdot B_{SVC} \quad (II.35)$$

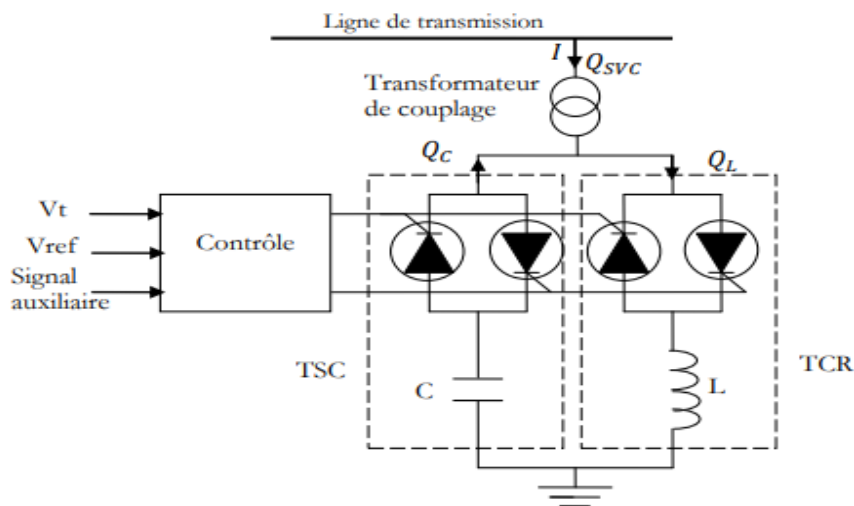


Figure II.11 :Structure du SVC.

Les éléments contrôlables sont les thyristors du TCR et TSC (le courant du TCR est en arrière de 90° degrés par rapport à la tension). A l'état stable, la loi de commande du SVC obéit à la caractéristique V-I du compensateur. Cette dernière peut être écrite sous forme d'équations:

En mode de régulation selon la valeur de :

$$V = V_{réf} + X_S I_{SVC} \quad (II.36)$$

Sachant que: $-B_{C \max} < B < B_{L \max}$

$$- \quad V = \frac{I}{-B_{C \max}} \quad \text{le SVC est totalement capacitif, } B = B_{C \max}$$

$$- \quad V = \frac{I}{B_{L \max}} \quad \text{le SVC est totalement inductif, } B = B_{L \max}$$

Les valeurs typiques sont de 0,02 à 0,05 pu. A tension nominale, le SVC se comporte comme une réactance fixe. Les caractéristiques V-I du SVC sont présentées dans la Figure II.12

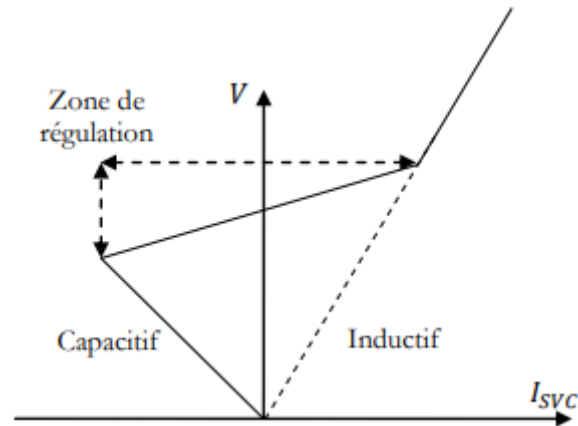


Figure II.12 : La caractéristique V-I du SVC.

B. Compensateur synchrone statique STATCOM :

le premier STATCOM a été conçu en 1990. Il s'agit d'un convertisseur de tension à base de thyristors GTO ou IGBT alimenté par une batterie de condensateurs. Le composant est connecté en parallèle avec le réseau par l'intermédiaire d'un transformateur de couplage. Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 1970, mais il a fallu attendre les années 1990 pour que de tels compensateurs connaissent un essor important du fait du développement des commutateurs GTO de forte puissance.[9]

La figure II.13 représente le schéma de base d'un STATCOM. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de thyristors GTO et de diode en antiparallèle.

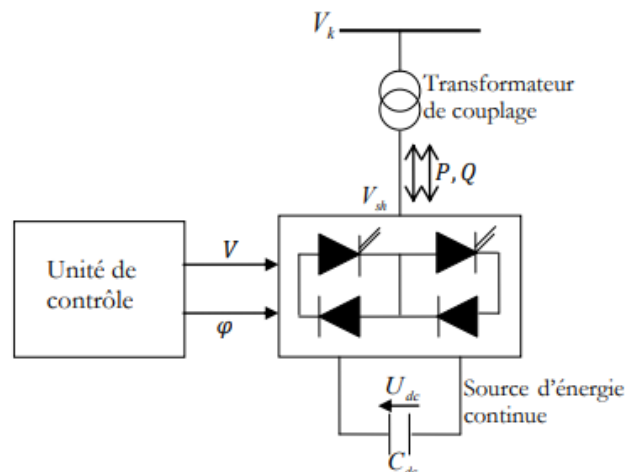


Figure II.13 : Structure du STATCOM.

L'unité fournit une puissance réactive variable et régule la tension du bus où est-il connecté . Il est similaire à un compensateur synchrone. Il fait la même chose que SVC, mais il est plus robuste. Le dispositif est capable de fournir de la puissance réactive même si la tension du bus de liaison est très faible. Selon ses caractéristiques, on peut voir que le courant maximum de STATCOM est indépendant de la tension du nœud .

Pour un STATCOM idéal n'ayant pas de pertes actives, l'équation de la puissance réactive suivante décrit le transfert de cette dernière avec le réseau :

$$Q_{Sh} = \frac{|\bar{V}_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|\bar{V}_k| \cdot |\bar{V}_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\varphi_k - \varphi_{sh}) = \frac{|\bar{V}_k|^2 - |\bar{V}_k| \cdot |\bar{V}_{sh}|}{X_{sh}} \quad (II.37)$$

- ✓ Si $|\bar{V}_k| > |\bar{V}_{sh}|$ alors Q_{sh} devient positive, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V_k donc le STATCOM absorbe de la puissance réactive.
- ✓ Si $|\bar{V}_k| < |\bar{V}_{sh}|$ alors Q_{sh} devient négative, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V_k donc le STATCOM absorbe de la puissance réactive.
- ✓ Si $|\bar{V}_k| = |\bar{V}_{sh}|$ alors $Q_{sh}=0$, le courant circulant dans l'inductance est nul, et par conséquent pas d'échange d'énergie.

II.3.3.3. Compensateurs série-shunt (hybrides) :

Ces dispositifs sont une combinaison de dispositifs série et shunt qui sont contrôlés de manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ces dispositifs permettent un contrôle multi-variable, ils sont utilisés pour contrôler le flux de puissance active et réactive , la tension et l'angle de transfert.

A. Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristors TCPAR :

TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) ou bien déphaseur statique, est un transformateur déphaseur à base de thyristors. L'appareil est destiné à remplacer le déphaseur par un changeur de prises en charge à commande mécanique (LTC ; Load Tap Changer). Il se compose de deux transformateurs, l'un en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier a plusieurs rapports et les deux transformateurs sont reliés par un agencement de thyristors de commutation, comme le montre la figure II.14

Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension en quadrature avec celle de la ligne. Cette tension injectée peut modifier l'angle de phase de la tension de ligne et également contrôler le flux de puissance.

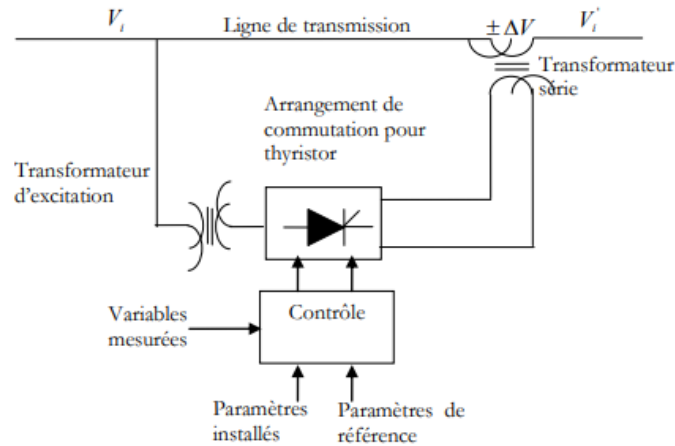


Figure II.14 : Structure du TCPAR.

L'arrangement de thyristor sont combinées pour fournir une tension variable au côté secondaire transformateur série ΔV et angle de $\pm 90^\circ$ par rapport à la tension de ligne.

Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé.

B. Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance UPFC :

Gyugyi a proposé le concept d'UPFC en 1990. L'ingéniosité de ce compensateur est la capacité de contrôler trois paramètres liés à la transmission de puissance dans les lignes électriques :[9]

- ✓ Tension.
- ✓ l'impédance de la ligne.
- ✓ Le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

Comme TCPAR, UPFC se compose de deux transformateurs, l'un est connecté en série et l'autre en shunt avec la ligne de transmission. Chaque transformateur est connecté à un onduleur à base de thyristors GTO. Ces derniers sont couplés à travers une liaison continue DC. En d'autres termes, l'UPFC est une combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC couplés via une liaison CC commune pour permettre un flux bidirectionnel de puissance active. En effet, l'énergie active peut circuler librement dans les deux sens entre les extrémités CA des deux convertisseurs, et chaque convertisseur peut indépendamment générer ou absorber de l'énergie réactive. La figure II.15 montre le schéma de base de l'UPFC :

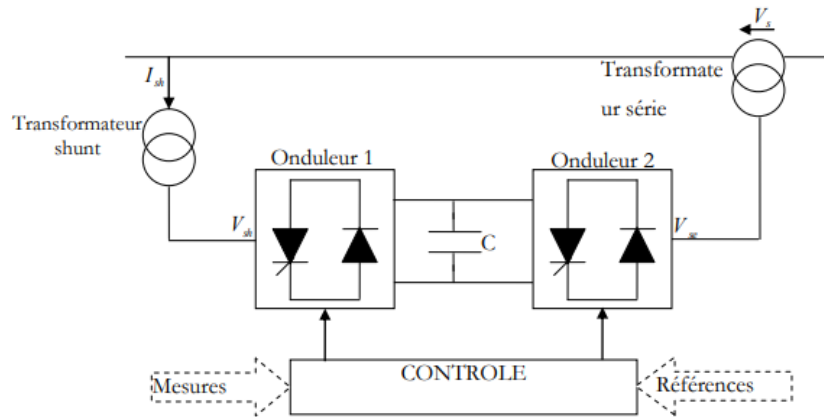


Figure II.15: Structure de l'UPFC.

Onduleur 2 - injecte la tension, dont l'amplitude et la phase sont contrôlables. Afin de réaliser la fonction de compensation série active et réactive. D'autre part, l'onduleur 1 est utilisé pour fournir la puissance active requise par l'onduleur 2 à travers la liaison continue. Il est également utilisé pour compenser la puissance réactive, car il peut générer ou absorber de la puissance réactive, quelle que soit la puissance active, qui peut être mise en ligne. En fait, l'UPFC permet le contrôle de la puissance active et réactive ainsi que le contrôle de la tension de ligne. En principe, l'UPFC est capable d'exécuter les fonctions d'autres dispositifs FACTS, à savoir la régulation de tension, la distribution du flux de puissance, l'amélioration de la stabilité et l'amortissement des oscillations de puissance.

Le grand avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qui permet de contrôler tension, angle de transmission et impédance de ligne dans un seul appareil, comprenant uniquement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut passer de l'une de ces fonctions à l'autre instantanément, en changeant la commande de son onduleur, ce qui permet de faire face à une panne ou une modification du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions.

II.3.4. Apports et avantages des dispositifs FACTS

Le principal intérêt des opérateurs électriques dans la technologie FACTS est d'ouvrir davantage de possibilités de contrôle de la puissance et d'augmenter la capacité disponible des lignes existantes dans des conditions normales. Ces possibilités découlent de la capacité du contrôleur FACTS à contrôler les fonctions suivantes : de transfert d'énergie dans la ligne, l'impédance série, l'impédance shunt, le courant, la tension, l'angle de phase. Par cette action, le contrôleur FACTS permet au système énergétique d'obtenir :

- ✓ Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS.(Ce contrôle doit être réalisé selon un cahier des charges prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs).
- ✓ Améliorer la stabilité dynamique et transitoire du système et atténuer les oscillations de puissances.
- ✓ Contrôler des tensions aux jeux de barres.
- ✓ Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- ✓ Contrôler la puissance réactive donc augmenter la puissance active transportée et minimiser les pertes.

- ✓ Améliorer de la qualité de l'énergie.
- ✓ Augmenter la capacité de transport de la puissance active.

II.3.5. Coût des dispositifs FACTS

En plus des avantages techniques offerts par l'équipement FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris considération dans la décision d'installer un dispositif. D'un point de vue économique, la norme couramment utilisée pour évaluer les avantages tirés des équipements FACTS est que l'augmentation des revenus doit être supérieure aux coûts d'exploitation, de maintenance et d'amortissement de l'installation. Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs suivants :

- ✓ Les performances requises.
- ✓ La puissance de l'installation.
- ✓ Le niveau de tension du système.
- ✓ La technologie du semi-conducteur utilisé.

II.4. Dispositifs FACTS en exploitation

À ce jour, plusieurs centaines d'installations du FACTS sont en service ou en construction dans le monde. Quelques fabricants se partagent le marché. La plupart des appareils sont des compensateurs de puissance réactive du type SVC utilisés pour maintenir la tension du réseau, la grande majorité de ces appareils sont placés dans le réseau pour faire des tâches très précises et très locales. Il est rare que plusieurs appareils puissent interagir entre eux et nécessitent un contrôle coordonné. Dans cette section, quatre installations d'exploitation sont présentées.[11]

II.4.1. Condensateur Série Avancé (ASC)(de Kayenta)

Le condensateur série avancé ASC (Advanced Series Capacitor) est le nom commercial donné par le fabricant SIEMENS pour un appareil série mixte composé de condensateurs TCSC et conventionnels, composé de deux ensembles de condensateurs d'une capacité série de 55 Ω (165 MVar et 1000 A). Ce type de FACTS a été mis en service en 1992 à Kayenta(Arizona, USA) sur le réseau de Western Area Power Administration (WAPA). L'objectif est d'utiliser des lignes 230 kV, longues de 230 km, avec une capacité de transport maximale 300 MW. Les nouvelles lignes 345 kV et 500 kV situées sur des trajets parallèles n'étaient pas pleinement utilisées. Avec l'augmentation des échanges, certaines lignes étaient proches de leurs limites alors que la ligne 230 kV était sous-exploitée. L'installation d'un ASC au milieu de la ligne peut augmenter la transmission de puissance dans la ligne de 100 MW et en tirer parti près de sa limite thermique. L'ASC permet une compensation de puissance réactive jusqu'à 330 MVar.[11][12][13]

II.4.2. TCSC(d'Imperatriz)

Depuis 1999, TCSC est utilisé pour interconnecter le nord et le sud du Brésil. Ce pays possède deux grands systèmes électriques qui ne sont pas interconnectés. La puissance transportée est à 95% d'origine hydraulique. Afin de bénéficier de la diversité hydrologique, une liaison constituée d'un corridor de transmission 500 kV a été construite sur 1000 km de long. La ligne a été compensée par des compensateurs en série à plusieurs endroits. Un TCSC a été implanté au poste d'Imperatriz. Il permet une compensation comprise entre 5% et 15% de la ligne. ce qu'il fait est principalement utilisé pour supprimer les oscillations de puissance entre les régions à basse fréquence (0,2 Hz) qui pourraient présenter un risque pour la stabilité du système. De plus, la réactance apparente inductive du TCSC aux fréquences hypo synchrones est bénéfique en cas de résonance introduite par la compensation. [11][12][13]

II.4.3. STATCOM(de Sullivan)

En 1995, STATCOM a été installé à la sous-station de Sullivan sur le réseau de la Tennessee Valley Authority (TVA). Le poste est alimenté par un réseau 500 kV, des transformateurs 1200 MVA avec régulateurs de charge et 4 lignes 161 kV. Situé en bordure du réseau 500 kV de la TVA a subi des surtensions en période creuse et des sous-tensions au nœud 161 kV lors des fortes charges. De plus, TVA dispose d'une interconnexion avec la société American Power Electric (AEP) par laquelle des oscillations de puissance peuvent se produire. Un STATCOM avec une puissance initiale de 100MVar peut contrôler la tension d'une sous-station 161 kV lorsque la charge augmente pour éviter les changements de prise d'un transformateur 500/161 kV. L'utilisation de STATCOM pour la régulation de la tension à ce nœud a réduit le nombre d'appels de transformateur d'environ 250 par mois à (2-5). [11][12][13]

II.4.4. UPFC(d'Inez)

Il s'agissait du premier UPFC au monde, mis en service en 1998 à la sous-station Inez d'American Electric Power (AEP) dans le Kentucky pour le maintien de la tension et le contrôle de l'écoulement de puissance. Il est dimensionné pour fournir une rapide compensation réactive shunt avec un rang de 320 MVar, et pour contrôler le flux de puissance dans les lignes 138 kV. De plus, il peut être utilisé pour forcer une puissance supérieure à 950 MVA dans toutes les circonstances imprévues. Cette application démontre l'excellente capacité de l'UPFC à contrôler le flux d'énergie active et réactive dans les lignes, ainsi que, la régulation de la tension au nœud. De plus, il a une structure flexible qui peut être reconfigurée pour fournir une compensation parallèle et série indépendante. [11][12][13]

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue globale sur les dispositifs FACTS (quelques types des systèmes FACTS, leurs classifications et différentes catégories) avec des schémas qui structurent chaque dispositifs. De plus, nous présentons certaines des installations FACTS opérant dans le monde, tel que UPFC, SVC, le STATCOM aux états unis, le TCSC etc....

Concernant la modélisation et l'intégration de ces dispositifs de compensation dynamique dans les réseaux électriques, nous pouvons conclure que l'intégration de cette nouvelle technologie (FACTS) dans la structure des réseaux électriques, peut ajuster la tension, contrôler la transmission de puissance active et réactive, et ainsi permettre une meilleure gestion de l'énergie et des indicateurs de qualité de l'alimentation.

Les dispositifs basés sur l'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent une solution efficace à ce problème. Grâce aux dernières avancées de la technologie IGBT/GTO, le temps de réponse des dispositifs FACTS est réduit à quelques millisecondes.

Chapitre III

Modélisation d'un SVC

III.1. INTRODUCTION

Les dispositifs FACTS aident à résoudre les problèmes rencontrés dans l'exploitation du réseau électrique, tant du côté distribution que du côté transmission. Le concept FACTS rassemble tous les dispositifs basés sur l'électronique de puissance pour améliorer le fonctionnement du réseau. De plus, ils peuvent contrôler la transmission de l'électricité dans le réseau et augmentant la capacité de transmission effective tout en maintenant la stabilité des réseaux électriques .

Ce chapitre décrit le FACTS le plus couramment utilisé qu'il s'agit de la compensateur parallèle connu sous le nom de SVC (Static Var Compensator).

Le compensateur statique de puissance réactive SVC a été le premier dispositif FACTS à apparaître dans les années 1970 pour répondre aux besoins de stabilisation de tension très variables résultant de charges industrielles très fluctuantes telles que les laminoirs et les fours à arc électrique. SVC est la première génération de FACTS. Ils utilisent des thyristors classiques, qui ne sont contrôlables qu'au démarrage .

Alors, nous allons essayer d'illustrer la modélisation du SVC, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions et de la puissance réactive d'un contrôleur SVC.

III.2. Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC)

III.2.1. Définition du SVC

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), un SVC (Static Var Compensator) est défini comme un générateur statique (ou absorbeur) d'énergie réactive, un shunt dont la sortie est ajustée en un courant capacitif ou inductif pour contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, généralement la tension du nœud. [14]

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est un dispositif utilisé pour maintenir l'état stable et les tensions transitoires de limites désirées. Le SVC injecte de la puissance réactive dans la barre où il est branché pour satisfaire la demande de puissance réactive de la charge.

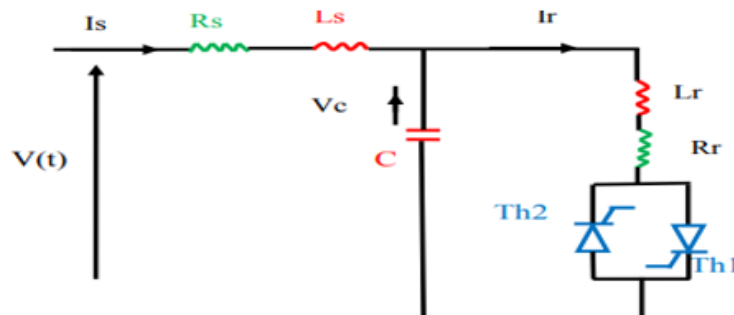


Figure III.1 : Schéma d'un SVC de type TCR-FC.

Il est également considéré comme la première génération de FACTS introduite sur le marché. Il se compose d'un ensemble de condensateurs commutés à thyristors (TSC Thyristor Switched Capacitors) et d'un ensemble des bobines contrôlées à thyristors (TCR Thyristor Controlled Reactors), comme le montre la Figure III.1 , dont le premier exemple a été installé en Afrique du Sud en 1979 . [15]

Avec une bonne coordination de la commutation des condensateurs et du contrôle de la bobine, la puissance réactive de sortie peut varier en continu entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement.

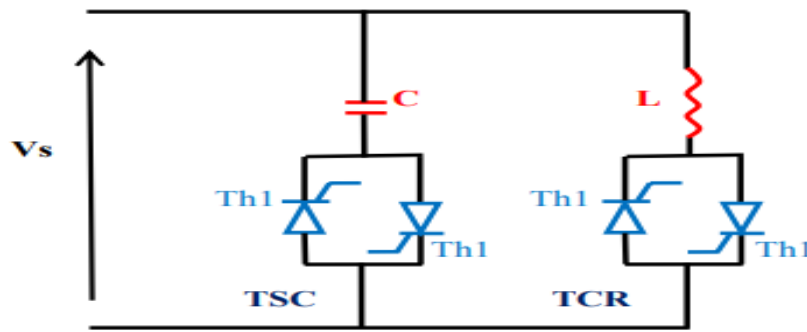


Figure III.2 : Schéma de base d'un SVC.

À partir des caractéristiques statiques du compensateur SVC, trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées, comme le montre la Figure III.2 : [16]

- ✓ Une zone (capacitive) où le TSC fournit le maximum d'énergie (condensateurs), seuls les condensateurs sont connectés au réseau.
- ✓ Une zone (Mixte) ou de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
- ✓ Une zone (induction) où le TCR fournit le maximum d'énergie (le réglage s'arrête), le condensateur est déconnecté.

Les SVC sont basés sur des éléments inductifs et capacitifs communs, contrôlés par des éléments basés sur l'électronique de puissance (thyristors communs). Les principales fonctions de SVC :

- ✓ Prise en charge de la tension.
- ✓ Supprime les oscillations de puissance.
- ✓ Amélioration des marges de stabilité statique et transitoire.

Malgré ces propriétés, le SVC présente également certains inconvénients, tels que son comportement en dehors de la zone de régulation et sa capacité est limitée par des composants inductifs et capacitifs.

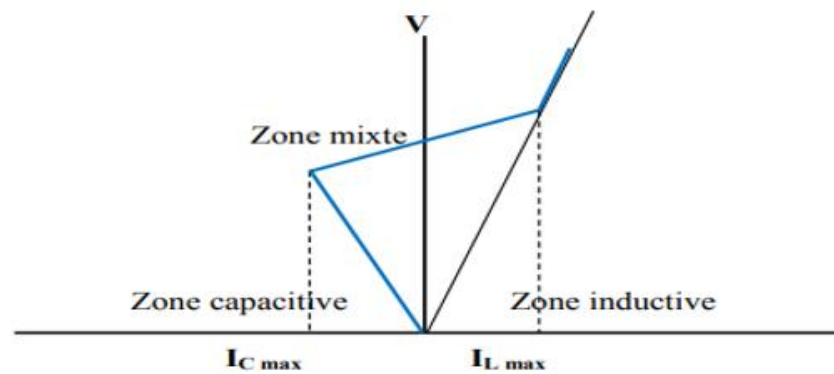


Figure III.3 : Caractéristique d'un SVC.

III.2.2. Schéma électrique SVC

La figure III.3 montre les différentes configurations SVC possibles. Ajout d'un filtre qui réduit les harmoniques lorsque l'appareil comprend une anche du type TCR. La zone de fonctionnement équivalent du SVC est obtenue par la combinaison des zones de toutes les branches. Comme le montre la figure III.4 :

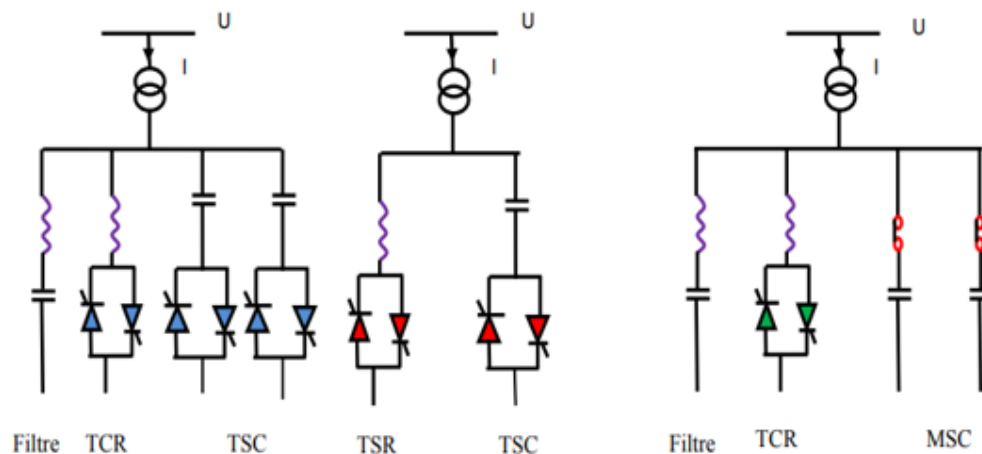


Figure III.4 : Compensateur statique de puissance réactive SVC.

III.2.3. Principe de fonctionnement

Le SVC est principalement utilisé pour contrôler la tension à la barre où il est connecté au réseau électrique, de manière à obtenir une courbe de tension plate. Pour cela, il doit générer ou absorber de la puissance réactive à ses bornes .

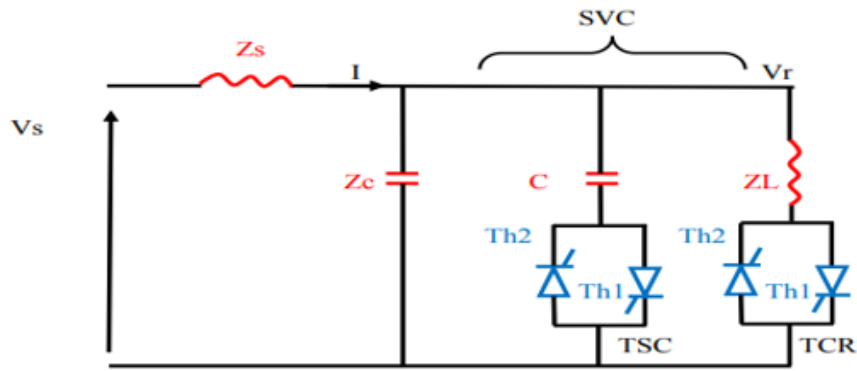


Figure III.5 : Schéma d'un SVC de type TCR-TSC-FC.

Dans le cas d'un TCR, une inductance fixe (généralement avec un noyau sans fer) est placée en série avec la valve à thyristor. Le courant de fréquence fondamentale est régulé par le contrôle de phase des thyristors.

Le TSC comprend un condensateur en série avec une valve à thyristors et une inductance d'atténuation. Le rôle de l'interrupteur à thyristor est d'allumer et d'éteindre le condensateur pendant un nombre entier de demi-cycles de la tension appliquée.

Le condensateur n'est pas commandé en phase, mais simplement enclenché et déclenché. L'inductance du circuit TSC est utilisée pour limiter le courant dans des conditions anormales et pour régler le circuit sur la fréquence souhaitée. Les impédances des inductances, des condensateurs et des transformateurs définissent la gamme de fonctionnement du SVC.

Le MSC est une branche d'accord composée d'un banc de condensateurs et une inductance. Il est conçu pour n'être commuté qu'un petit nombre de fois par jour, car la commutation est effectuée par le disjoncteur. Le but du MSC est de fournir une puissance réactive en régime permanent.

Le but du SVC est de maintenir fixe la tension V_C aux bornes du SVC. Lorsque la tension V_S diminue, la commande SVC doit connecter un condensateur fixe (FC), et si la tension diminue davantage, le TSC doit également être connecté. Cependant, lorsque la tension V_S augmente, le TCR doit commencer à fonctionner.

III.3. Caractéristique d'un Compensateur Statique (SVC)

III.3.1. Caractéristique en V d'un Compensateur Statique

Obtenons une conduction complète en ajustant l'angle α du thyristor qui contrôle la branche de détection à 90° . Le courant est alors à sa valeur maximale, la droite L/C , la Figure III.6 montre la relation entre la tension U et le courant I_{SVC} .

$$I_{svc} = \frac{U}{X_L // X_C} \quad (III.1)$$

$$Q = \frac{U^2}{X_L} - \frac{U^2}{X_C} \quad (III.2)$$

Lorsque l'inductance est déconnectée, l'angle du thyristor est de 180° et le condensateur fonctionne, le courant total de chaque phase sous la tension U est égal à $\frac{U}{X_C}$

Il est d'usage d'ajouter un signe (-) à ce courant capacitif pour le distinguer du courant inductif. La relation entre le courant et la tension est une nouvelle ligne droite C, Figure III.6.

$$I_{svc} = \frac{U}{X_C} \quad (III.3)$$

$$Q = -\frac{U^2}{X_C} \quad (III.4)$$

Les droites L//C et C forment ensemble une « courbe en V » qui correspond aux limites inductive et capacitive du compensateur statique. Cette figure est pour :

$$X_C = 2 * X_L \quad (III.5)$$

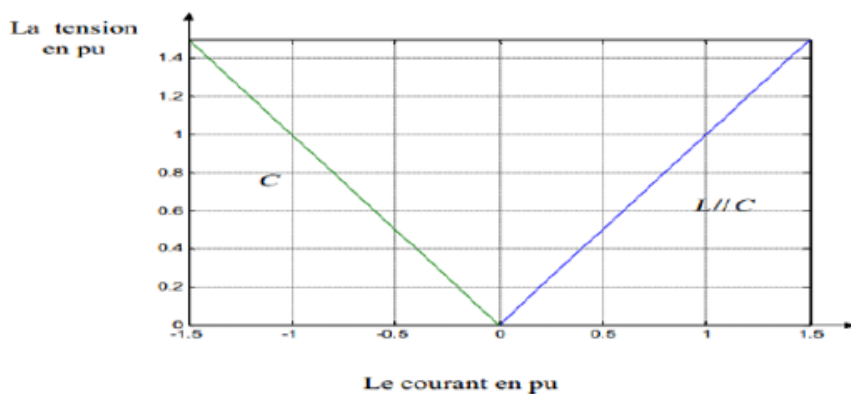


Figure III.6 : la caractéristique en V d'un SVC.

Selon cette courbe, il y a un courant capacitif lorsque le condensateur est en service et que l'inductance est déconnectée. le montage génère donc une puissance réactive et cette puissance dépend de la capacité et de la tension du condensateur.

Lorsque les deux sont en service, le montage génère ou consomme de la puissance réactive.[18]

III.3.2. Caractéristique QSVC (I) d'un SVC

Fixer le signe de la puissance réactive Q . Le compensateur est considéré comme un consommateur. La puissance réactive Q est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Par contre, si le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), cette dernière est considérée comme négative, ainsi que le courant I . La Figure III.7 tient compte de ces relations.

Ainsi, la puissance réactive Q doit varier entre une certaine valeur d'inductance Q_L et une certaine valeur de capacité Q_C en fonction des besoins des utilisateurs et des lignes de transmission dans le sous-station sachant que :

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \quad (\text{III.6})$$

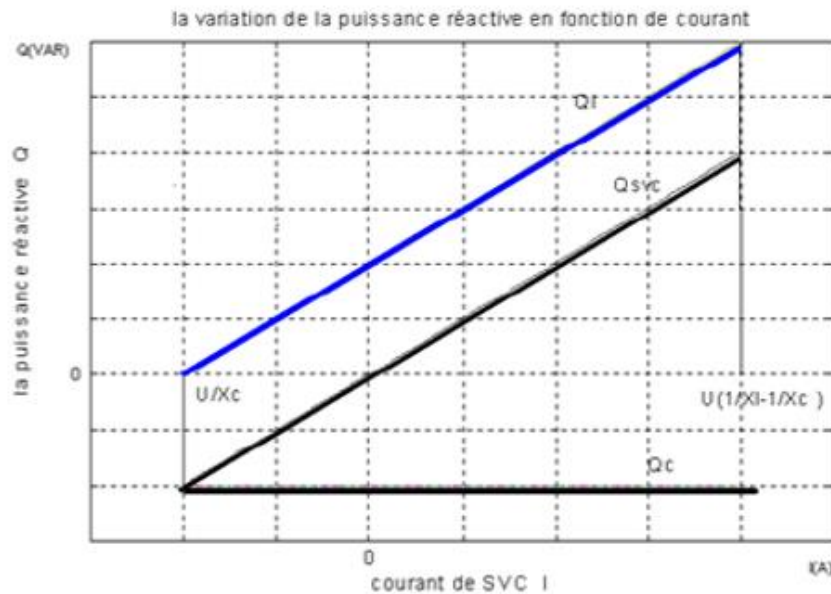


Figure III.7 : Variation de la puissance réactive en fonction du courant.

III.4. Modélisation des compensateurs statiques

III.4.1. Modèle dynamique du SVC

La tâche principale d'un compensateur statique est de réguler la tension à ses bornes. Le SVC est généralement modélisé par le schéma fonctionnel illustré à la Figure III.8 .

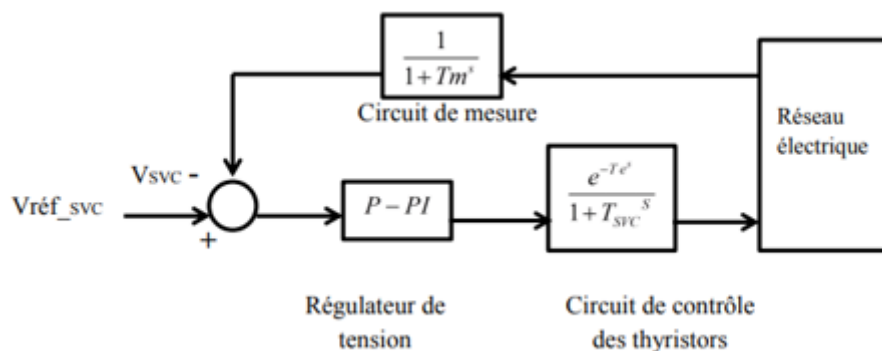


Figure III.8 : Schéma général du circuit de commande du SVC.

Le contrôleur de tension principal peut être proportionnel, intégral ou une combinaison des deux actions. Prend en compte le retard lié à la mesure de tension (T_m) et le délai dû à la conduction (T_d) des thyristors sont pris en considération. [17]

Le modèle dynamique simplifié du compensateur statique Figure III.9 est un système de premier ordre $\frac{K_{svc}}{1+T_{svc}s}$ avec T_{svc} la constante de temps et K_{svc} le gain du SVC.

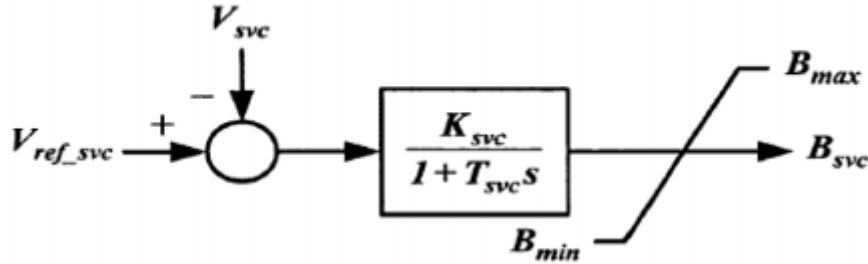


Figure III.9 : Modèle dynamique du SVC.

La dynamique du compensateur est représentée par l'équation suivante:

$$B = \frac{-1}{T_{svc}} B_{svc} + \frac{K_{svc}}{T_{svc}} (V_{ref-svc} - V_{svc}) \quad (III.7)$$

B_{svc} : Susceptance équivalente du SVC.

V_{svc} : Tension aux bornes du SVC.

$V_{ref-svc}$: Référence de la tension du SVC.

La Figure III.10 illustre un système en boucle fermée composé du réseau et du contrôleur SVC, où :

- $H(s)$: fonction de transfert du contrôleur du SVC.
- $G(s)$: fonction de transfert du réseau électrique.

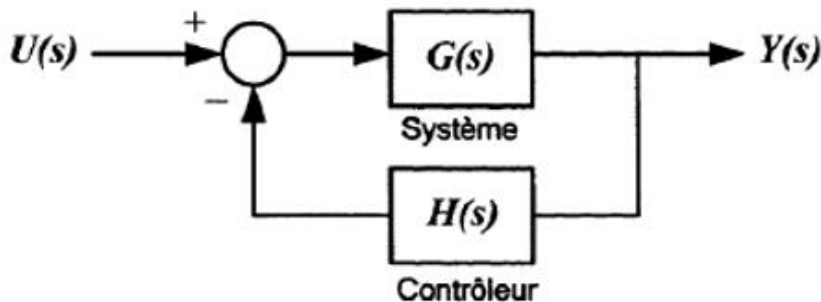


Figure III.10 : Système en boucle fermée avec le contrôleur du SVC.

En boucle fermée la fonction de transfert est décrite par l'équation suivante :

$$G_{BF}(S) = \frac{G(S)}{1+G(S)H(S)} \quad (III.8)$$

L'équation caractéristique de cette fonction permet de faire une imposition de pôles pour calculer les paramètres du contrôleur du SVC. Cependant, la fonction de transfert peut être utilisée pour appliquer la méthode des résidus.

Un contrôleur SVC traditionnel, désigné par $H(s)$, est composé d'un:

- gain d'amortissement.
- filtre passe haut (washout filter).
- compensateur de phase (lead-lag).

$$H(S) = \frac{T_W S}{1+T_W S} \left(\frac{1+T_1 S}{1+T_2 S} \right) \quad (III. 9)$$

l'angle maximum que peut fournir chaque bloc de compensateur de phase est de 60 degrés et le nombre de ces blocs est généralement égal à deux ($n = 2$). L'angle φ_{com} qui représente l'angle φ comme compenser par le contrôleur doit satisfaire les conditions suivantes : [17]

$$\alpha = \frac{1 - \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{n}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{n}\right)} : \text{angle.}$$

$$T_1 = \frac{1}{W_n \sqrt{\alpha}} ; T_2 = \alpha T_1 : \text{les constantes de temps.}$$

Pour le filtre passe, haut on utilise généralement une constante de temps T_W large (entre 1s et 10 s) pour laisser passer les signaux associés aux oscillations étudiées.

La Figure III.11 nous montre la réponse fréquentielle d'un contrôleur conventionnel du SVC.

On constate que dans l'intervalle des oscillations interzones 0.1 Hz – 1Hz et jusqu'aux fréquences des oscillations locales, le contrôleur ne présente pas de retard de phase. Ce qui présente un avantage, aussi dans cet intervalle d'intérêt le gain du contrôleur augmente et il a une valeur suffisamment grande.

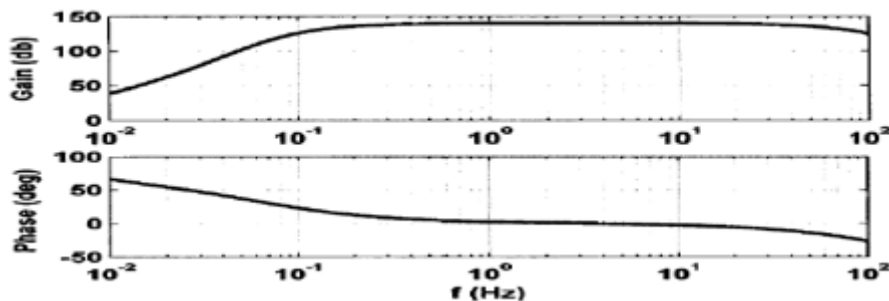


Figure III.11 : Réponse fréquentielle d'un contrôleur conventionnel du SVC.

III.4.2. Modèle du Compensateur Shunt SVC

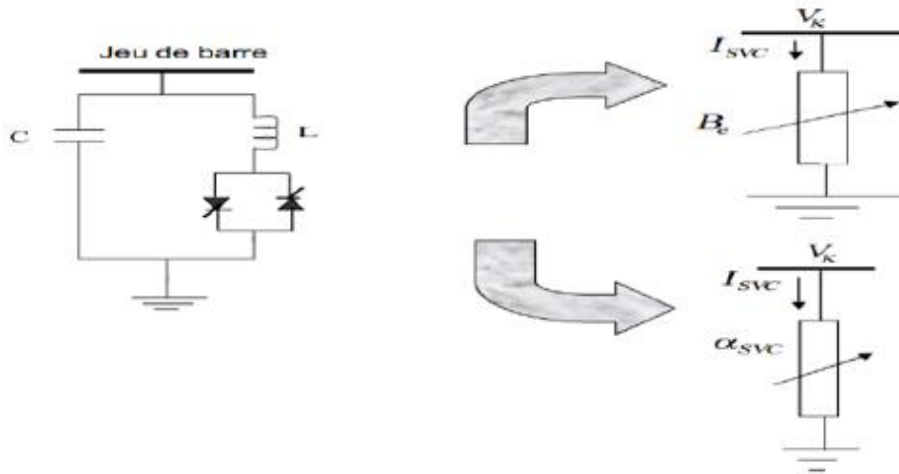


Figure III.12 : Présentation d'un compensateur SVC.

V_K : la tension du réseau où est connecté le SVC.

B_e : la susceptance de SVC $B_e = \frac{1}{X_e}$.

V_{ref} : la tension de référence dans le SVC.

I_{SVC} : le courant dans le SVC.

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C}\right)}{\pi X_L} \quad \longrightarrow \quad X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C}\right)} \quad (\text{III. 10})$$

$$\text{Avec : } V = V_{ref} + X_{SL} I \quad (\text{III. 11})$$

Et $X_{SL} = \{\pm 5\% \text{ où } \pm 2\%\}$ de la valeur de V_{ref} [20]

III.4.2.1. Les équations de SVC

Les équations qui décrivent le comportement du SVC dans le réseau sont :

$$V_I - V_{ref} + X_{SL} V_K B_e = 0 \quad (\text{III. 12})$$

$$Q_{SVC} - V_K^2 B_e = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C}\right) = 0 \quad (\text{III. 14})$$

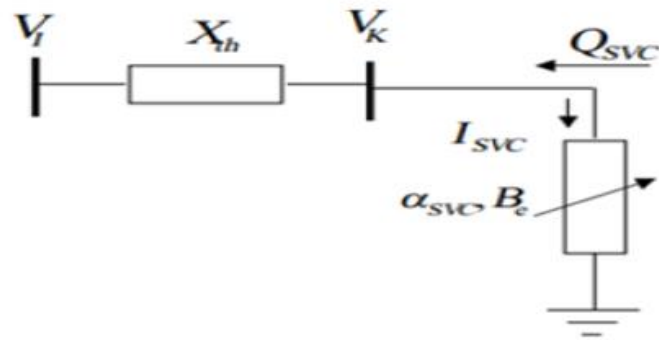


Figure III.13 : Représentation du circuit de base pour le compensateur SVC.

Avec :

α : variation de l'angle d'amorçage des thyristors (90° et 180°) .

La réactance contrôlée par les thyristors est en fonction de $X_L X_C, \alpha$. On peut tracer la courbe de $B_e = f(\alpha)$.

si $X_C = 1(\text{pu})$, $X_L = 0.5(\text{pu})$.

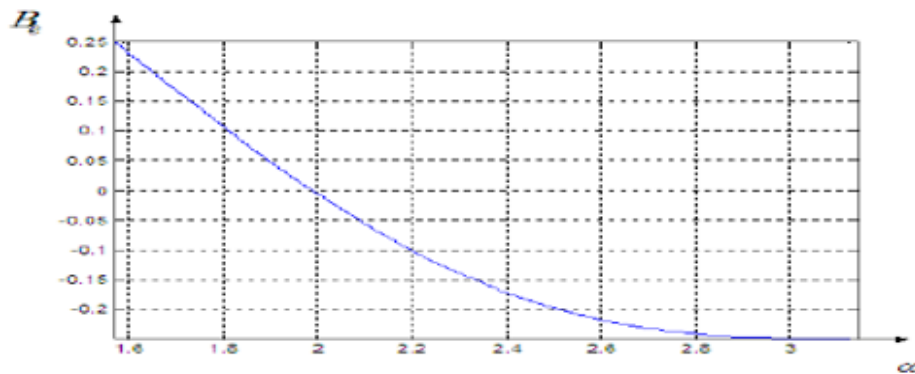


Figure III.14 : la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage.

Notez que B_e change de signe lorsque α change :

- Pour une certaine valeur, $B_e > 0$, donc le montage fonctionné en mode inductif.
- Pour les autres valeurs, $B_e < 0$, donc le montage fonctionné en mode capacitif.
- Pour $\alpha = \alpha_0$, $B_e = 0$, donc le montage est représenté par une charge infinie.

Pour chaque valeur de X_L (X_C fixe) les caractéristiques de B_e sont obtenues, la nature de la charge à compenser et le type de ligne doivent être pris en compte lors du choix de la première valeur.

Nous supposons:

Pour $X_L=1(\text{pu}) = B_e \leq 0$, donc le SVC est toujours en mode capacitive.

Par contre $X_L \leq 1(\text{pu})$, le SVC fonctionne en mode capacitive ou inductive, d'après l'angle α [20]

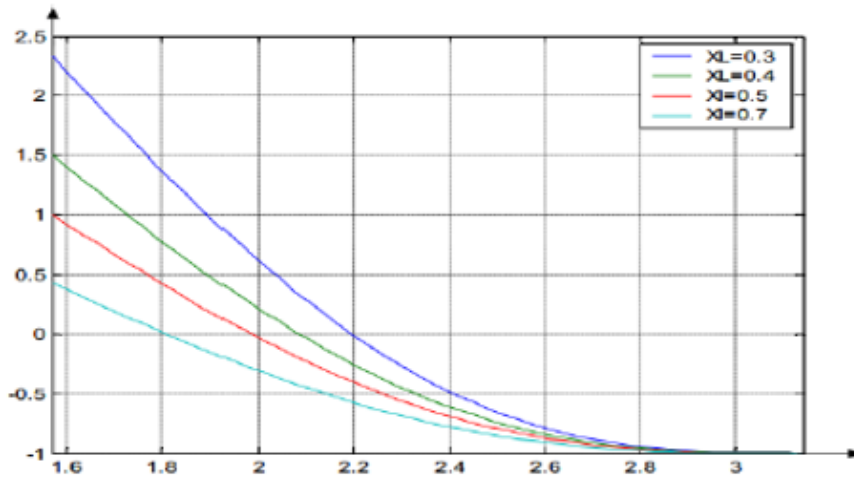


Figure III.15 : Variation de la susceptance en fonction de l'angle α .

III.5. Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance

Les études de l'écoulement de puissance coordonnent le développement de toutes les ressources énergétiques et la répartition de la production entre les différents utilisateurs, dans le but d'obtenir le développement le plus économique et donc l'utilisation optimale de toutes les ressources, des prévisions concernant la consommation et la production ont été faits par études approfondies, utilisant les méthodes numérique appliqués dans ce domaine.

On peut démontrer les propriétés des études de l'écoulement de puissance par la discussion d'un système de n jeux de barres.

Chaque jeu de barres est alimenté d'un générateur. Les générateurs fournissent les énergies, $S_{G1}, S_{G2}, \dots, S_{Gn}$ les jeux de barres. Les charges demandées sont prises de chaque jeu de barres à des quantités $S_{D1}, S_{D2}, \dots, S_{Dn}$, les jeux de barres sont liés par des lignes qui sont caractérisés par Y_{bus} .

Les tensions des jeux de barres sont symbolisées par $V_1, V_2, \dots, V_n$.

respectivement. Pour ce réseau la puissance de chaque jeu de barres est donnée par :

$$P_i + jQ_i = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (\text{III. 15})$$

La puissance apparente S_i injectée au jeu de barres i est donnée par l'équation suivante

$$S_i = V_i \cdot I_i^* \rightarrow I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K \quad (\text{III. 16})$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = \left(\sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) V_i^* \quad (\text{III. 17})$$

I_i : le courant qui entre dans le jeu de barres i.

$$V_i = \frac{1}{Y_{i,i}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \left(\sum_{K=1, K \neq i}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) \right) \quad (\text{III. 18})$$

Pour le jeu de barres de contrôle :

$$Q_i = Q_{\text{SVC}} - Q_D \rightarrow Q_{\text{SVC}} = Q_i + Q_D \quad (\text{III. 19})$$

Afin d'ajuster de manière flexible la tension au niveau des jeux de barres, on calcule la valeur de l'énergie réactive Q_i nécessaire pour ramener la tension V_i à la tension désiré V_{ref} puis on calcule la susceptance en aboutissant enfin à la valeur de l'angle α . Cette tension varie en fonction de la pente de régulation du compensateur statique.

Un organigramme décrivant les étapes de fonctionnement du SVC dans réseau électrique peut être donné.

Le système de commande est basé sur les équations de tension, de susceptance et d'énergie réactive fournies par le compensateur.

Le compensateur statique SVC peut stabiliser rapidement la tension du réseau à la valeur définie. Le système de contrôle lit en permanence la tension mesurée au primaire du transformateur de couplage. Cette tension est comparée avec la valeur de consigne. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau.

L'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, et l'angle de l'inductance.

La susceptance du SVC vue du primaire du transformateur :

$$B_P = \frac{1}{X_T + X_e} \quad (\text{III. 20})$$

Les limites de B_P sont déterminées à partir $B_e(\min)$ et $B_e(\max)$.

La tension est réglée suivant la caractéristique représentée par l'équation (III. 20).[19]

III.5.1. Les avantages du SVC[21]

a) Améliorer les niveaux de tension sur un jeu de barres ou une région.

Le contrôle de la tension est la fonction principale du SVC.

Le SVC contrôle la tension du nœud en absorbant ou en fournissant la puissance réactive que le SVC exécute sur le réseau.

Dans les systèmes à faible puissance de court-circuit, y compris les lignes de transmission sont longues, la tension est affectée de manière significative par la variation de la charge et par la déconnexion d'éléments du réseau. Pour les charges importantes, la tension chute considérablement et peut pallier conduire à l'instabilité du réseau en tension. SVC est principalement utilisé pour corriger ce problème.

b) Augmenter la capacité de transport de puissance active du réseau.

c) Augmenter la marge de la stabilité transitoire.

Du fait du SVC, l'augmentation de la capacité de transmission du réseau entraîne également une augmentation de la marge de stabilité transitoire quand le système est perturbé.

d) Augmenter l'amortissement des oscillations électromécaniques.

Des perturbations importantes du réseau peuvent provoquer des oscillations électromécaniques, qui sont généralement amorties par le circuit d'amortissement du rotor du générateur et le stabilisateur de puissance (PSS) associé aux commandes d'excitation du générateur. Cependant, des oscillations non amorties peuvent être causées par des oscillations de tension qui être générées continuellement par une compensation de puissance réactive rapide, telle que la commande de SVC.

e) Réduire les surtensions temporelles.

Les surtensions temporelles sont produites pour la connexion et déconnexion d'éléments de réseau. Le SVC permet l'absorption de la puissance réactive, ce qui contribue à réduire les surtensions. En plus des avantages mentionnés ci-dessus, SVC offre également un avantage important, qui est sa rapidité de réponse. Comme le SVC n'a pas d'éléments tournant, c'est-à-dire pas d'inertie, son temps de réponse est plus rapide que celui d'un moteur.

Une action rapide sur la commande de tension évite l'augmentation de la génération de puissance réactive pour les générateurs en évitant l'arrivée en butée de fourniture d'absorption de puissance réactive de ces derniers. Pour les charges, la réponse rapide du SVC évite que les charges dynamiques (moteurs à induction) n'augmentent la charge globale du système. Il permet également à certaines charges de ne pas s'arrêter à la valeur de tension minimale (ex. lampes fluorescentes).

III.5.2. Les inconvénients du SVC [21]

a) le SVC permet de contrôler uniquement un des trois paramètres importants, la tension. Pour les deux autres paramètres, l'impédance et l'angle, d'autres systèmes sont nécessaires pour en assurer le contrôle.

b) Bien que les SVC aient la vitesse nécessaire pour réaliser le contrôle en temps réel, ils nécessitent beaucoup de travail pour l'installation et beaucoup d'espace au sol. De plus, ils sont très chers.

c) Les systèmes fonctionnant à leurs limites de fonctionnement et s'appuyant fortement sur la compensation SVC sont susceptibles d'un effondrement de tension. Ceci est dû au fait que la génération de puissance réactive en dehors de la zone de régulation dépend du carré de la tension et le SVC ne peut plus maintenir le niveau requis par le réseau.

Le SVC, hors de la zone de contrôle, fonctionne comme une susceptance connectée en parallèle sur le nœud.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail le principe de fonctionnement et les caractéristiques de base du compensateur de puissance réactive SVC. Nous avons aussi réservé également des parties importantes pour l'étude, l'analyse et le développement de toutes les équations qui régissent la fonction du système concerné.

Nous avons opté pour le SVC en raison de sa simplicité et de son utilisation dans tous les systèmes qui nécessitent une compensation d'énergie réactive que soit pour les systèmes interconnectés ou isolés. Aussi On a présenté l'état de l'art de la modélisation des SVC en montrant les applications, avantages et inconvénients de l'utilisation de la compensation statique de puissance réactive. Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à l'étude par simulation de la SVC quand elle est appliquée sur un réseau électrique de puissance.

Chapitre IV

Compensation par SVC sous PSAT/MATLAB

IV.1. INTRODUCTION

Dans tous les réseaux de transport, il est nécessaire de maintenir les tensions des jeux de barres individuels dans des limites acceptables. Un système de transmission AC flexible (FACTS) est un moyen de contrôle rapide et flexible qui facilite la transmission de puissance et améliore la stabilité du réseau électrique. Le contrôleur shunt dynamique SVC est un dispositif FACTS qui permet la régulation de la tension et l'amortissement des oscillations dues aux perturbations du réseau.

L'importance d'étudier le flux de puissance est primordiale pour obtenir tous les paramètres du réseau, pour chaque nœud dont ils : La puissance (active et réactive) La tension (modules et angles).

Dans ce chapitre, nous étudierons l'influence du compensateur statique de type SVC sur le réseau électrique standard IEEE14, IEEE09, pour lequel nous utilisons le logiciel libre (PSAT) sous Matlab.

IV.2. Description Générale

FACTS (Les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif) : sont des moyens de contrôle rapides et flexibles capables :

- Faciliter le transit des puissances.
- Améliorer la stabilité des réseaux électriques.

SVC (Static Var Compensator) : est un dispositif FACTS permettant de régler la tension et d'amortir les oscillations dues à des perturbations dans les réseaux électriques.[22]

IV.2.1. Logiciel de simulation

Avant de commencer la phase d'application (simulation), le logiciel utilisé dans ce travail doit être défini. Ce programme est connu sous le nom de PSAT.

PSAT est un logiciel librement distribués conçu par Federico Milano basé sur MATLAB pour l'analyse et l'optimisation des réseaux électriques. L'interface graphique interactive du PSAT peut exécuter les fonctions statiques et dynamiques suivantes [22]

- 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).[23][22]

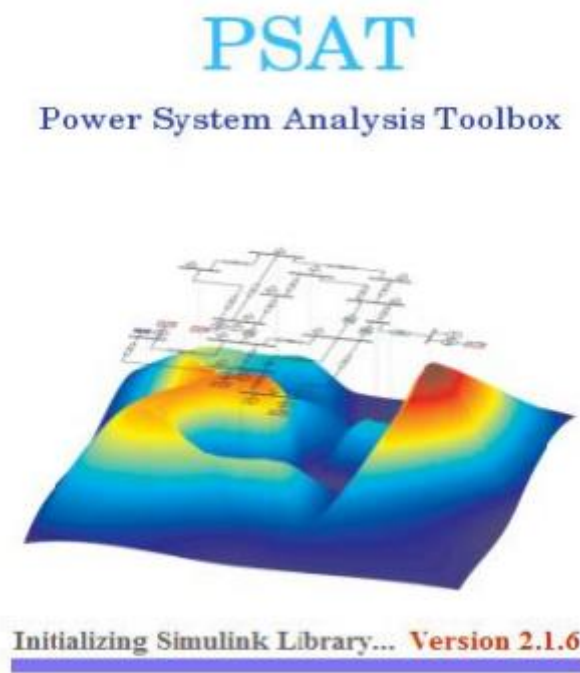


Figure IV.1 : Interface graphique du PSAT.[22]

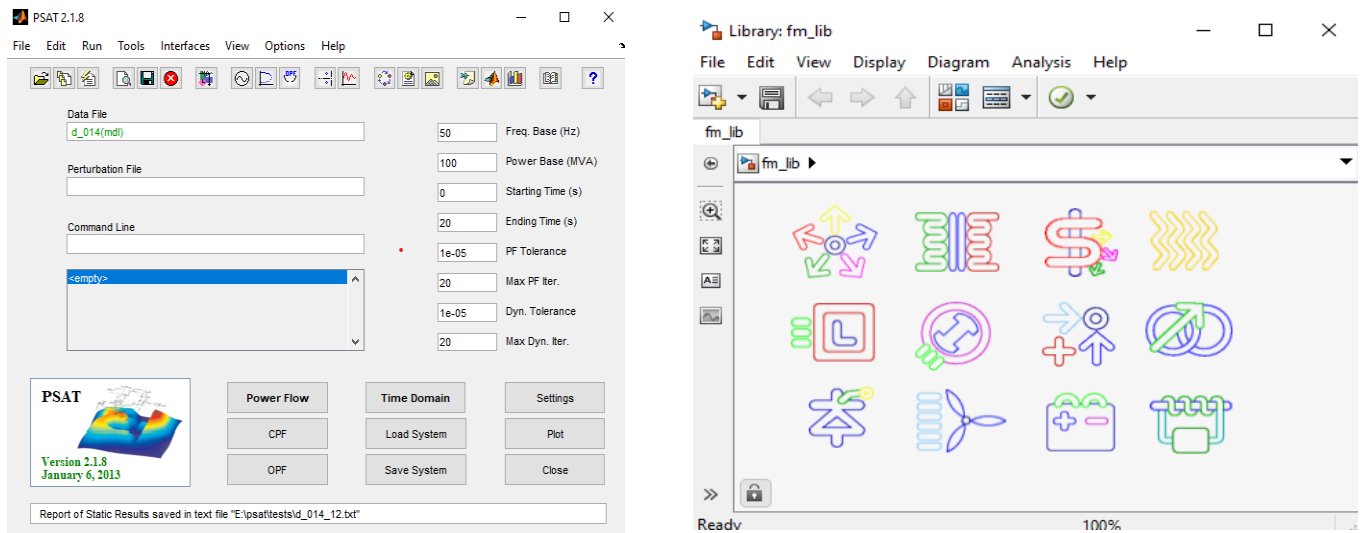


Figure IV.2 : Interface graphique (GUI) du PSAT.[22]

Ces propriétés rendent le PSAT largement utilisé par les chercheurs et les laboratoires des réseaux électriques. Bien que plusieurs logiciels aient été développés sous Matlab spécifiquement pour l'analyse et l'étude des réseaux électriques, PSAT reste un outil performant et très prisé.

Le tableau 01 présente une comparaison entre certains logiciels d'analyse des réseaux électriques.

Fonction	PF	CPF	OPF	SSA	TD	EMT	GUI	GNE
EST	+			+	+			+
MatEMTP					+	+	+	+
MatPower	+		+					
PAT	+			+	+			+
PSAT	+	+	+	+	+		+	+
PST	+	+		+	+			
SPS	+			+	+	+	+	+
VST	+	+		+	+		+	

Tableau 01 : Comparaison entre des logiciels d'analyse des réseaux électriques.[22]

IV.2.2. Organigramme de calcul de puissance avec PSAT

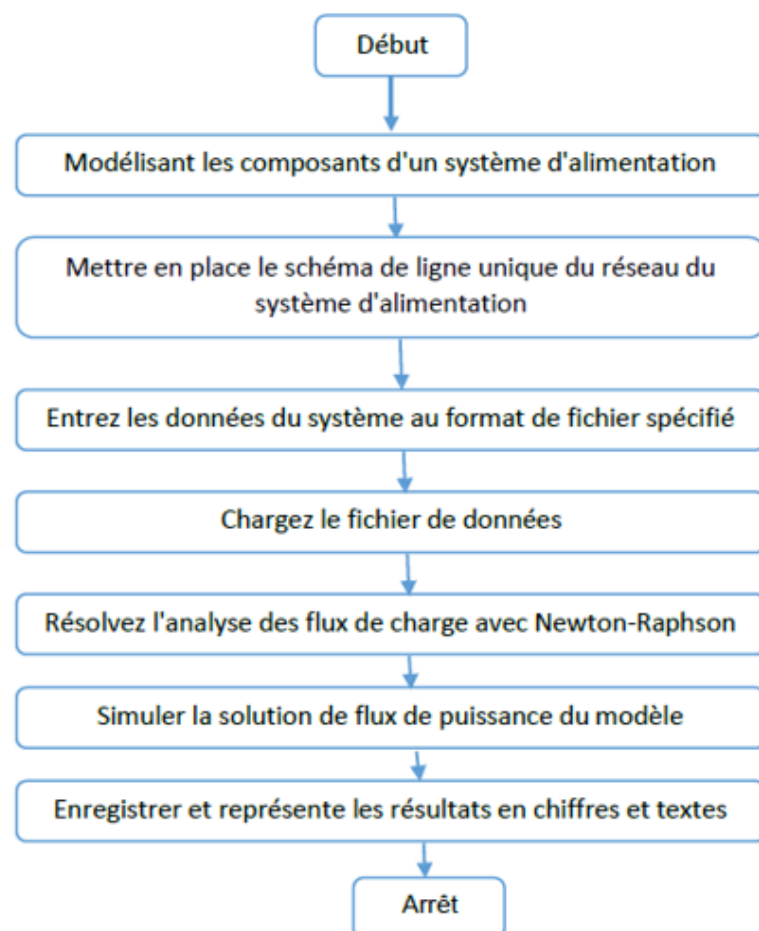


Figure IV.3 : Organigramme de calcul de flux de puissance sous PSAT .

Cette section décrit les capacités de PSAT pour l'analyse d'état des deux réseaux IEEE14 et IEEE09 à l'aide de la bibliothèque PSAT Simulink (voire le figure IV.2)

Une fois que vous avez sélectionné Figure IV.2 dans le modèle Simulink, on peut charger le réseau PSAT et résoudre le flux d'énergie. L'outil de simulation permet également d'afficher la tension du bus et le flux d'énergie dans la bibliothèque Simulink pour différents niveaux de charge au sein de modèle Simulink chargées dans le système.

IV.2.3. Simulation

Cette partie est consacrée à la simulation de l'intégration du compensateur SVC dans deux réseaux tests, le modèle d'injection du SVC proposé dans le chapitre 3 est utilisé par PSAT. L'objectif principal est de stabiliser les tension au niveaux des jeux de barres (proches de l'unité) et de minimiser les pertes totales par l'installation de la compensation shunt, l'outil de calcul utilisé et l'écoulement de puissance basé sur la méthode de Newton-Raphson, il faut noter que les contraintes de sécurités ne sont pris en considération, notre but dans cette étude est de voir l'effet de l'intégration de la compensation shunt sur les pertes active totales. La Figure IV.3 montre les étapes de base de simulation basé sur PSAT.[24]

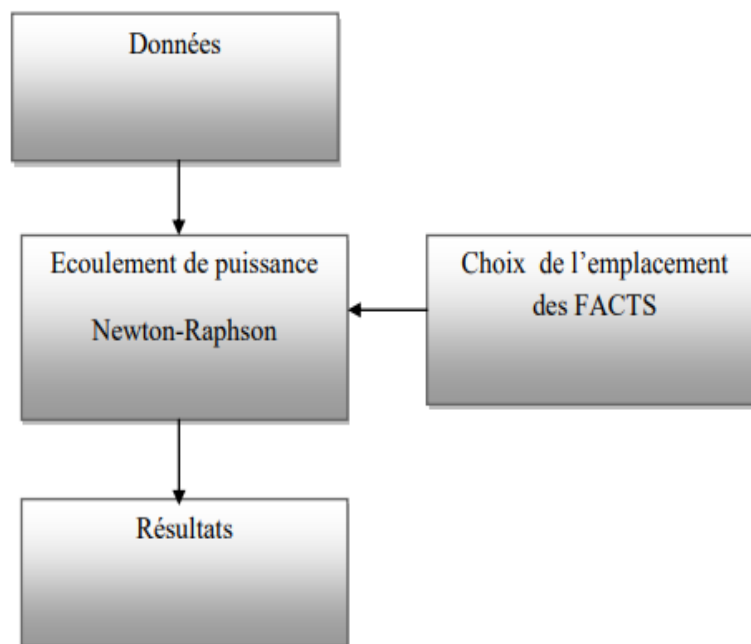


Figure IV.4 : Etapes de simulation.[24]

IV.3. Réseau test de 14 jeux de barres

Les tableaux 02 et 03 donnent les caractéristiques du réseau et les valeurs prévues de puissance générée et consommée. Les données relatives au réseau sont exprimées en P.U par rapport à la puissance de base de 100MVA et le fréquence 50Hz. (Les paramètres complets du réseau test IEEE14 sont présentés en Annexe)

IV.3.1. Présentation du réseau

On va considérer le réseau de quatorze jeux de barres représenté sur la Figure IV.5 il possède :

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

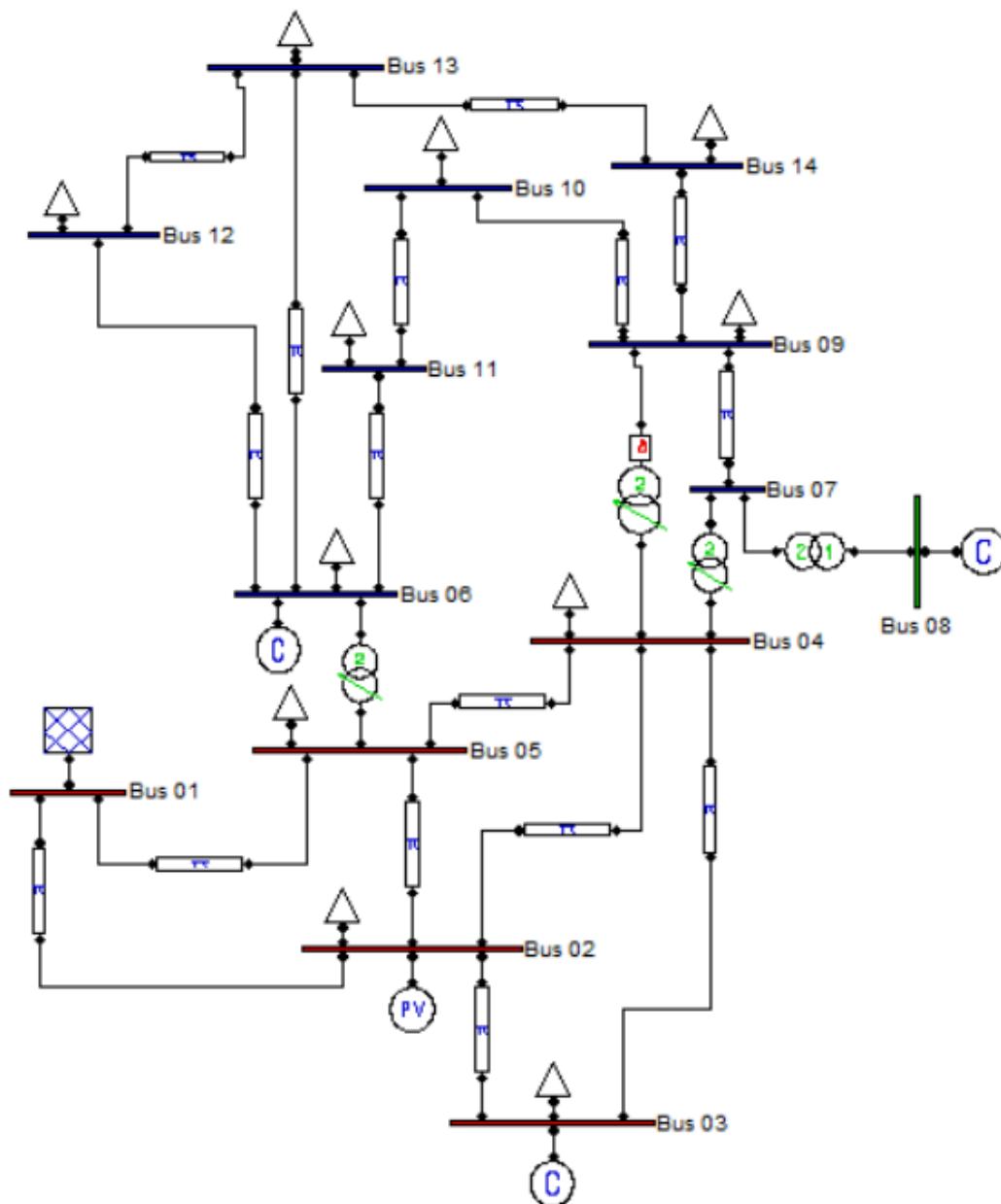


Figure IV.5 : Topologie du réseau étudié IEEE14.

IV.3.2. Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE14

Le calcul de l'écoulement de puissance est une étape nécessaire dans l'étude de la stabilité du réseau. Il détermine d'abord les conditions initiales du système avant la position des compensateurs.

En fait, il permet de trouver les tensions aux différents nœuds et par la suite les puissances transmises et injectées. Les résultats du calcul de l'écoulement de puissance à partir d'un programme (PSAT) utilisant la méthode de Newton-Raphson.

IV.3.2.1. Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état de l'équilibre :

Les résultats de calcul de l'écoulement de puissance conventionnel sont obtenus par PSAT. Ils sont indiqués sur le tableau ci-après :

Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P _{gén} (p.u)	Q _{gén} (p.u)	P _{cons} (p.u)	Q _{cons} (p.u)
Bus 01	1.06	0	3.711	-0.25171	0	0
Bus 02	1.045	-0.14285	0.4	1.1342	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	-0.34459	0	0.6837	1.3188	0.266
Bus 04	0.98358	-0.27513	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	0.99144	-0.24104	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	-0.42575	0	1.8184	0.1568	0.105
Bus 07	0.99741	-0.37196	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.37196	0	0.57295	0	0
Bus 09	0.93909	-0.42645	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	0.95065	-0.43364	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.004	-0.43196	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	0.98428	-0.43651	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	0.92084	-0.39838	0	0	0.189	0.812
Bus 14	0.77316	-0.38763	0	0	0.2086	0.7

Tableau 02 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE14.

De	A	Ligne	$P_{trans}(p.u)$	$Q_{trans}(p.u)$	$P_{perd}(p.u)$	$Q_{per}(p.u)$
Bus 02	Bus 05	1	0.63121	0.12528	0.02186	0.03146
Bus 06	Bus 12	2	0.17606	0.27422	0.00114	0.02373
Bus 12	Bus 13	3	0.07926	0.22809	0.0133	0.01203
Bus 06	Bus 13	4	0.03122	1.0598	0.07124	0.14029
Bus 06	Bus 11	5	0.16542	0.2761	0.00859	0.018
Bus 11	Bus 10	6	0.10782	0.2329	0.00536	0.01255
Bus 09	Bus 10	7	0.02424	-0.13729	0.0007	0.00186
Bus 09	Bus 14	8	0.13731	0.51379	0.04077	0.08671
Bus 14	Bus 13	9	-0.11205	-0.27292	0.02489	0.05068
Bus 07	Bus 09	10	0.46374	0.54136	0	0.05619
Bus 01	Bus 02	11	2.5429	-0.40313	0.11394	0.28938
Bus 03	Bus 02	12	-1.0271	0.151	0.04998	0.1643
Bus 03	Bus 04	13	-0.29171	0.2667	0.0109	-0.00656
Bus 01	Bus 05	14	0.11682	0.15142	0.06716	0.22542
Bus 05	Bus 04	15	0.77445	-0.05314	0.00818	0.01331
Bus 02	Bus 04	16	0.81688	0.12533	0.03664	0.07266
Bus 04	Bus 09	17	0.11097	0.14113	0.00016	0.0174
Bus 05	Bus 06	18	0.82949	0.05057	0	0.1538
Bus 04	Bus 07	19	0.46374	0.06235	0	0.04527
Bus 08	Bus 07	20	0	0.57295	0	0.04867

Tableau 03 : Les données des lignes étudié de IEEE14.

Notons bien que la tension au niveau du jeu de barre 14 était de l'ordre de 0.77316 ceci est dû à l'éloignement du jeu de barre des sources énergétiques. De plus, les pertes en puissance active et réactive du ce réseau à l'état de l'équilibre sont de l'ordre de:

$$P = 0.48505 \text{ p.u}$$

$$Q = 1.4571 \text{ p.u}$$

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

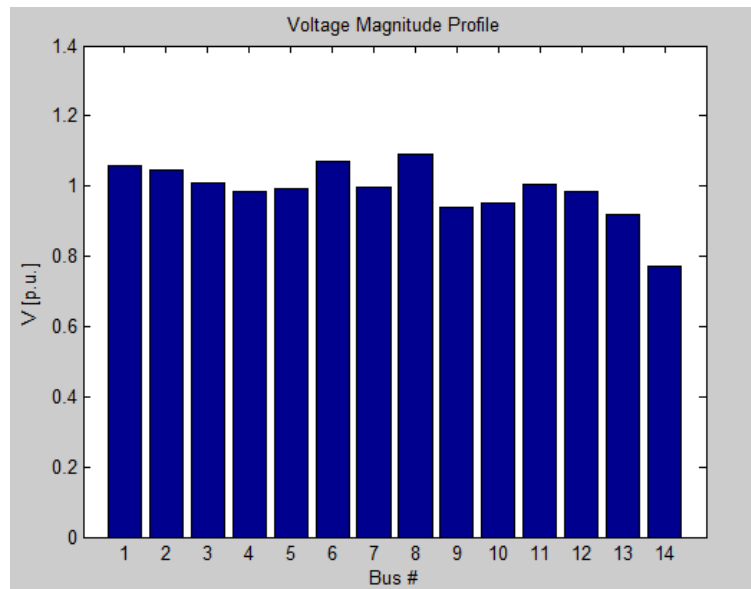


Figure IV.6 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE14.

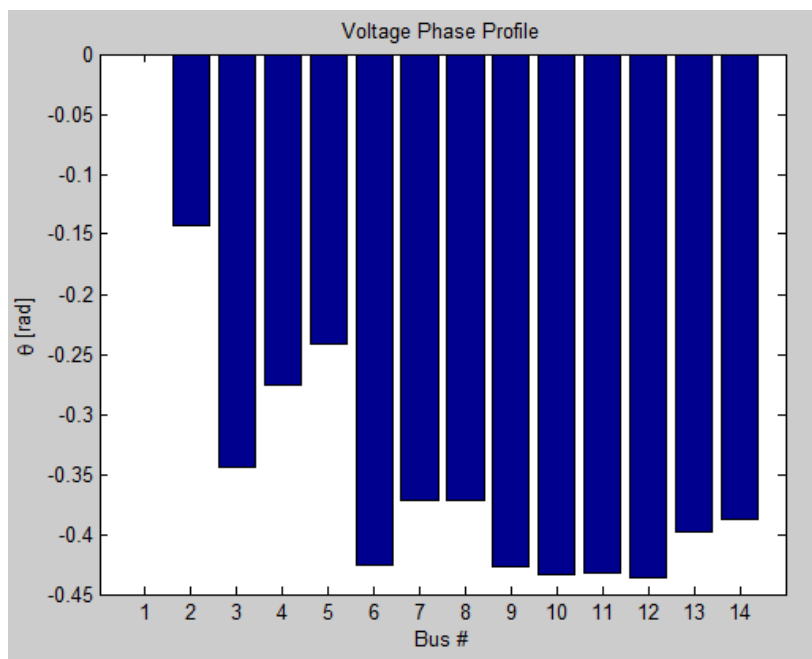


Figure IV.7 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE14.

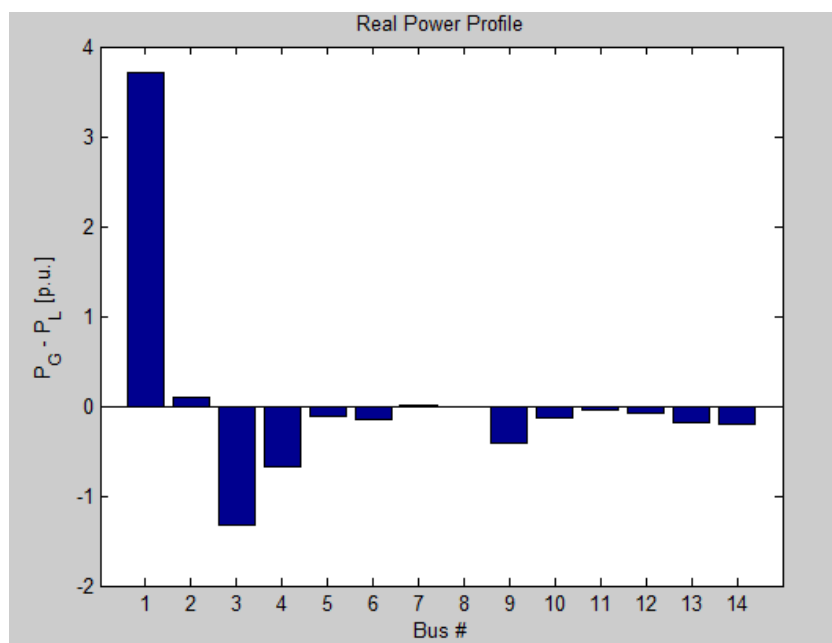


Figure IV.8 : La puissance active dans chaque jeu de barre.

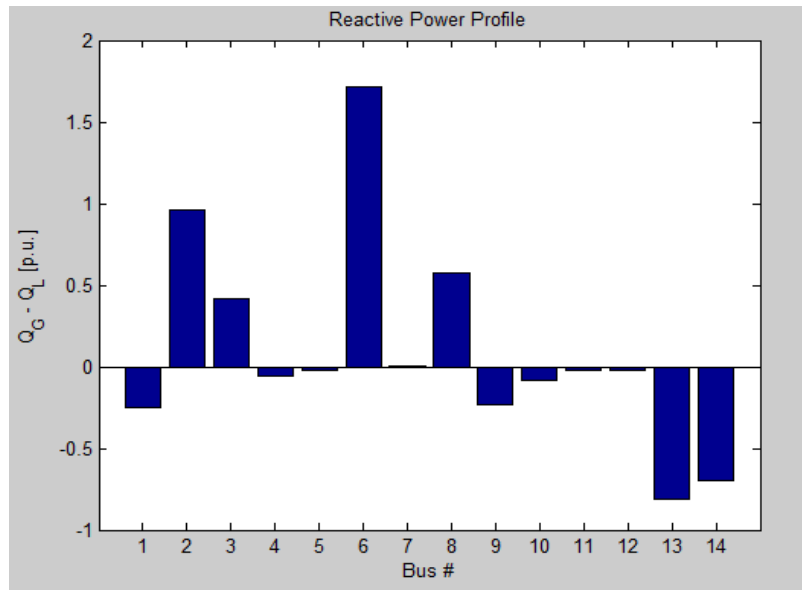


Figure IV.9 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre.

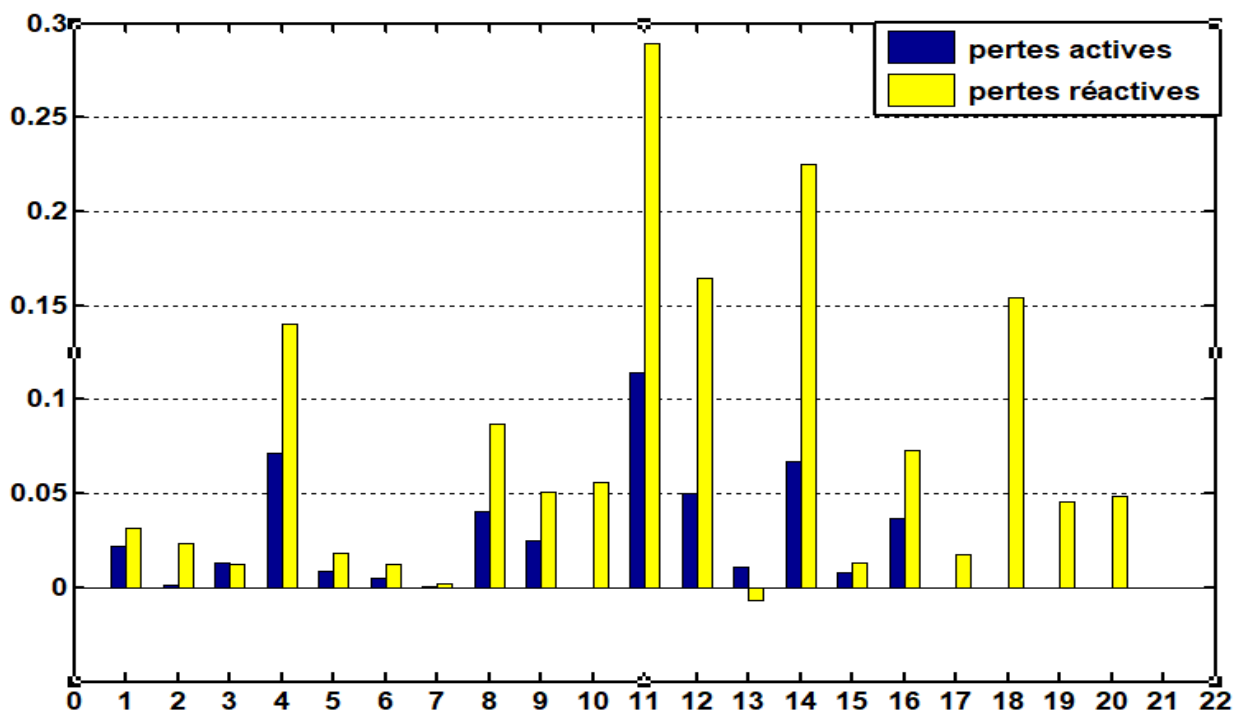


Figure IV.10 : Les pertes actives et réactives dans les lignes.

IV.3.2.2. Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état perturbé :

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

Jeux de barres	Avant	Après
JB13	$Q=1.4*0.58$ (p.u)	$Q=3.4*0.58$ (p.u)
JB14	$Q=1.4*0.5$ (p.u)	$Q=1.7*0.5$ (p.u)

Les tableaux 04 et 05 et les figures ci- dessous donnent les résultats dans cet état :

Bus	V (p.u)	Phase (rad)	$P_{\text{gén}}$ (p.u)	$Q_{\text{gén}}$ (p.u)	P_{cons} (p.u)	Q_{cons} (p.u)
Bus 01	1.06	0	4.7901	-0.18224	0	0
Bus 02	1.045	-0.18392	0.39948	1.7946	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	-0.41424	-5 ^e -05	0.90869	1.3188	0.266
Bus 04	0.94682	-0.35473	-0.00203	0.00066	0.6692	0.056
Bus 05	0.95568	-0.32215	-0.00043	0.00367	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	-0.66092	0.0044	4.7796	0.1568	0.105
Bus 07	0.93432	-0.49959	-0.00171	0.00039	0	0
Bus 08	1.09	-0.49959	0	0.9633	0	0
Bus 09	0.82787	-0.58827	0.00061	-0.0016	0.413	0.2324
Bus 10	0.85791	-0.61147	0.00069	-7 ^e -05	0.126	0.0812
Bus 11	0.95647	-0.63988	0.0006	-0.00015	0.049	0.0252
Bus 12	0.85038	-0.66758	0.0007	-0.00075	0.0854	0.0224
Bus 13	0.66823	-0.52633	0.00395	0.00303	0.189	1.972
Bus 14	0.42838	-0.47729	0.00304	0.0293	0.2086	0.85

Tableau 04 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE14(l'état perturbé).

De	A	Ligne	P_{trans} (p.u)	Q_{trans} (p.u)	P_{perd} (p.u)	Q_{perd} (p.u)
Bus 02	Bus 05	1	0.88972	0.28163	0.04598	0.1063
Bus 06	Bus 12	2	0.37785	0.73715	0.07366	0.15331
Bus 12	Bus 13	3	0.21949	0.56068	0.11075	0.10021
Bus 06	Bus 13	4	0.76675	2.9603	0.5403	1.064
Bus 06	Bus 11	5	0.1498	0.54035	0.02608	0.05462
Bus 11	Bus 10	6	0.07531	0.46038	0.01952	0.04569
Bus 09	Bus 10	7	0.07452	-0.3201	0.00501	0.01332
Bus 09	Bus 14	8	0.35509	1.0643	0.23347	0.49663
Bus 14	Bus 13	9	-0.08394	-0.25302	0.06619	0.13477
Bus 07	Bus 09	10	0.62269	0.9318	0	0.15828
Bus 01	Bus 02	11	3.2649	-0.54157	0.18791	0.51524
Bus 03	Bus 02	12	-1.1607	0.21537	0.06466	0.22614
Bus 03	Bus 04	13	-0.15819	0.42733	0.01465	0.00424
Bus 01	Bus 05	14	1.5252	0.33233	0.11809	0.43738
Bus 05	Bus 04	15	1.0577	-0.01445	0.00711	0.01083
Bus 02	Bus 04	16	0.51773	0.29455	0.0648	0.15945
Bus 04	Bus 09	17	0.21446	0.2758	0.00064	0.07111
Bus 05	Bus 06	18	1.4468	0.066	0	0.50277
Bus 04	Bus 07	19	0.6244	0.20176	0	0.09607
Bus 08	Bus 07	20	0	0.9633	0	0.13758

Tableau 05 : Les données des lignes étudié de IEEE14(l'état perturbé).

De même pour les tensions au niveau des jeux de barres 9, 10, 11, 12, 13 et fortement au niveau du jeu de barre 14 (en raison de la distance entre les jeux de barres et les sources énergétiques).

Il est clair qu'il y a une influence directe sur l'augmentation des pertes en puissance active et réactive du ce réseau dans cet état :

$$P = 1.5788 \text{ p.u}$$

$$Q = 4.488 \text{ p.u}$$

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

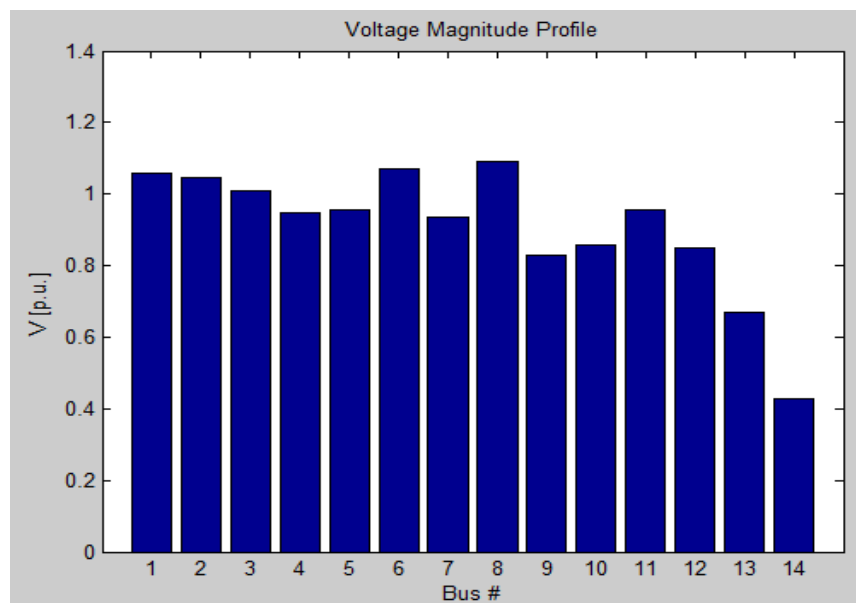


Figure IV.11 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE14(l'état perturbé).

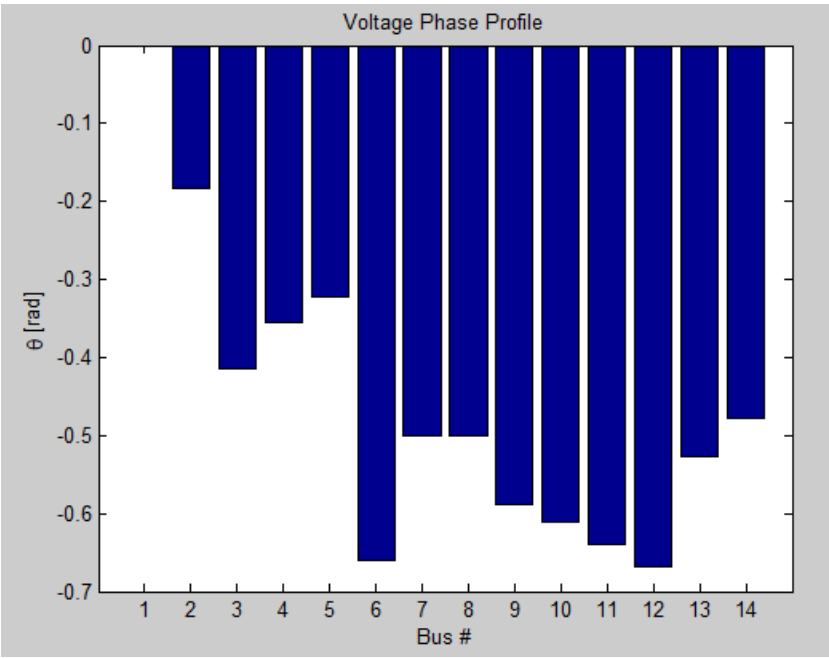


Figure IV.12 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE14 (l'état perturbé).

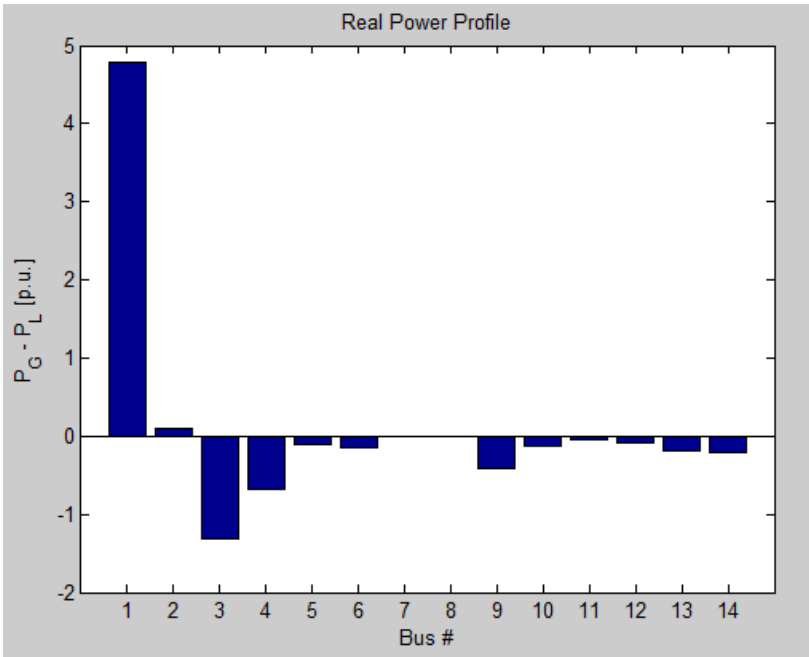


Figure IV.13 : La puissance active dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).

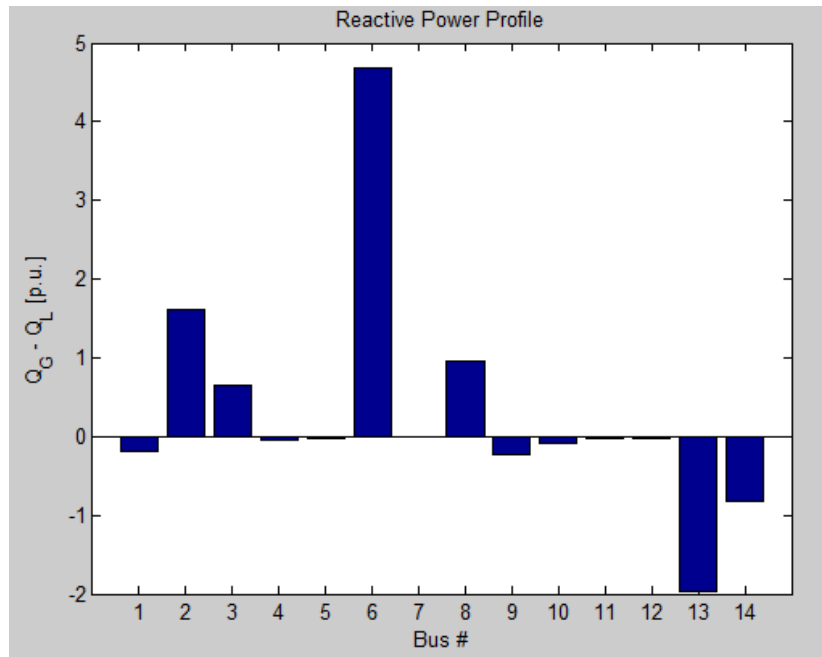


Figure IV.14 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).

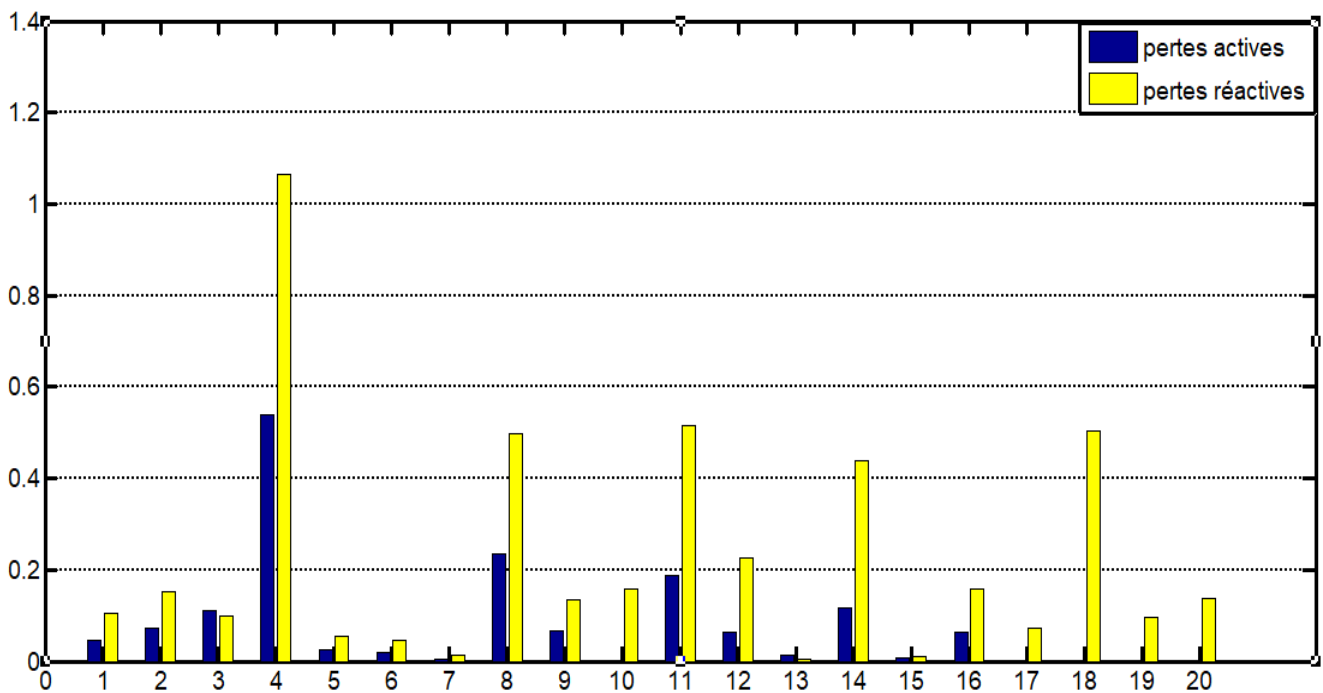


Figure IV.15 : Les pertes actives et réactives dans les lignes (l'état perturbé).

IV.3.3. Intégration du SVC dans un réseau test de 14 jeux de barres

Les jeux de barres 13 et 14 (Bus 13 et Bus 14) sont connectés au SVC comme indiqué sur la Figure IV.16, car ce sont les jeux de barres les plus affectés par l'augmentation de la charge réactive.

Sachant que

$$V(\text{JB13}) = 0.66823 \text{ p.u}$$

$$V(\text{JB14}) = 0.42838 \text{ p.u}$$

Comme on l'a vu précédemment, Les résultats de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson après l'insertion du SVC sont obtenus par PSAT.

Les tableaux ci- dessous illustres ces résultats :

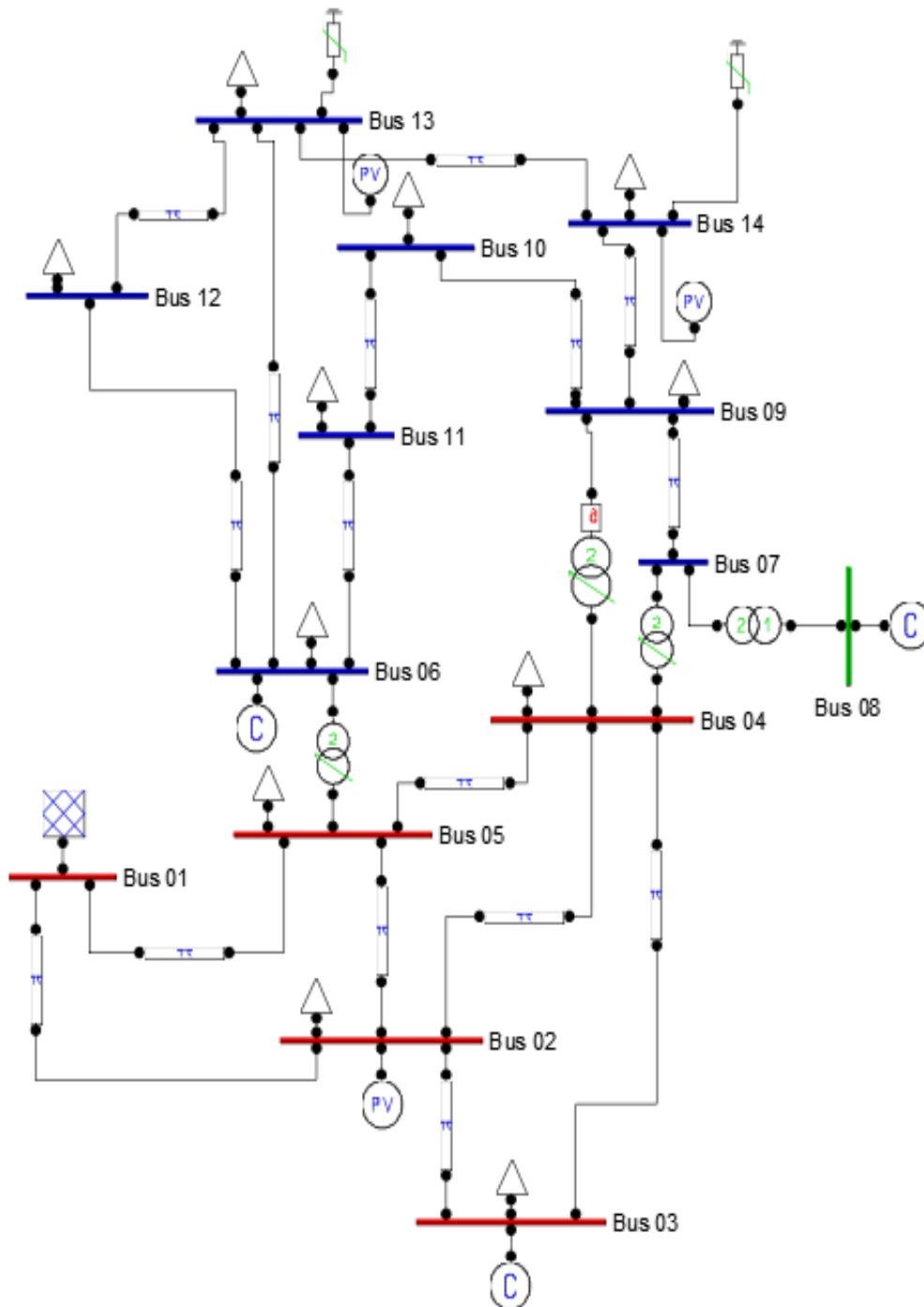


Figure IV.16 : Topologie du réseau IEEE14 avec SVC.

Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P _{gén} (p.u)	Q _{gén} (p.u)	P _{cons} (p.u)	Q _{cons} (p.u)
Bus 01	1.06	0	2.6166	-0.21489	0	0
Bus 02	1.045	-0.10184	0.4	0.63869	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	-0.27561	0	0.51996	1.3188	0.266
Bus 04	1.0112	-0.19269	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	1.017	-0.16027	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	-0.2158	0	0.46904	0.1568	0.105
Bus 07	1.0425	-0.23667	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.23667	0	0.29367	0	0
Bus 09	1.0183	-0.26017	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	1.0162	-0.25928	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.0372	-0.24043	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.045	-0.21198	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.045	-0.1876	0.4	1.634	0.189	1.972
Bus 14	1.045	-0.20235	0.4	0.87109	0.2086	0.85

Tableau 06 : Les tensions et les angles au niveau de 14 jeux de barres en présence du SVC.

De	A	Ligne	P _{trans} (p.u)	Q _{trans} (p.u)	P _{perd} (p.u)	Q _{perd} (p.u)
Bus 02	Bus 05	1	0.37521	0.03733	0.0075	-0.01323
Bus 06	Bus 12	2	0.02726	0.09146	0.00098	0.00204
Bus 12	Bus 13	3	-0.05912	0.06703	0.00162	0.00146
Bus 06	Bus 13	4	-0.10814	0.26367	0.00469	0.00924
Bus 06	Bus 11	5	0.18121	0.09172	0.00342	0.00717
Bus 11	Bus 10	6	0.12879	0.05936	0.00153	0.00359
Bus 09	Bus 10	7	-0.00124	0.02549	2 ^e -05	5 ^e -05
Bus 09	Bus 14	8	-0.22248	0.01044	0.00608	0.01294
Bus 14	Bus 13	9	-0.03716	0.01859	0.00027	0.00055
Bus 07	Bus 09	10	0.22666	0.23283	0	0.01069
Bus 01	Bus 02	11	1.827	-0.26236	0.05851	0.12015
Bus 03	Bus 02	12	-0.89468	0.09175	0.03747	0.11161
Bus 03	Bus 04	13	-0.42412	0.16222	0.001394	0.00025
Bus 01	Bus 05	14	0.78951	0.04747	0.03024	0.07177
Bus 05	Bus 04	15	0.76344	-0.09501	0.00762	0.01089
Bus 02	Bus 04	16	0.55737	0.02118	0.01662	0.0109
Bus 04	Bus 09	17	-0.03737	0.04808	2 ^e -05	0.00189
Bus 05	Bus 06	18	0.25713	0.09888	0	0.01606
Bus 04	Bus 07	19	0.22666	-0.03733	0	0.01033
Bus 08	Bus 07	20	0	0.29367	0	0.01279

Tableau 07 : Les données des lignes étudié de IEEE14 en présence du SVC.

A noter qu'après intégration du SVC au niveau des jeux de barres 13 et 14, les tensions aux jeux de barres 09, 10, 11, 12 et surtout les jeux de barres 13, 14 ont subi une évolution remarquable .

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

$$P = 0.19055 \text{ p.u}$$

$$Q = 0.40112 \text{ p.u}$$

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

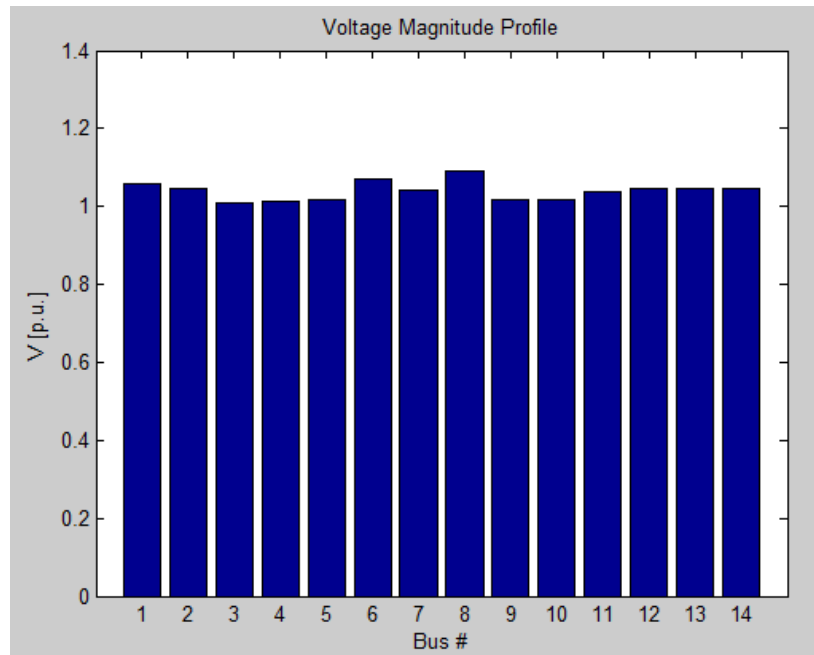


Figure IV.17 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE14 en présence du SVC.

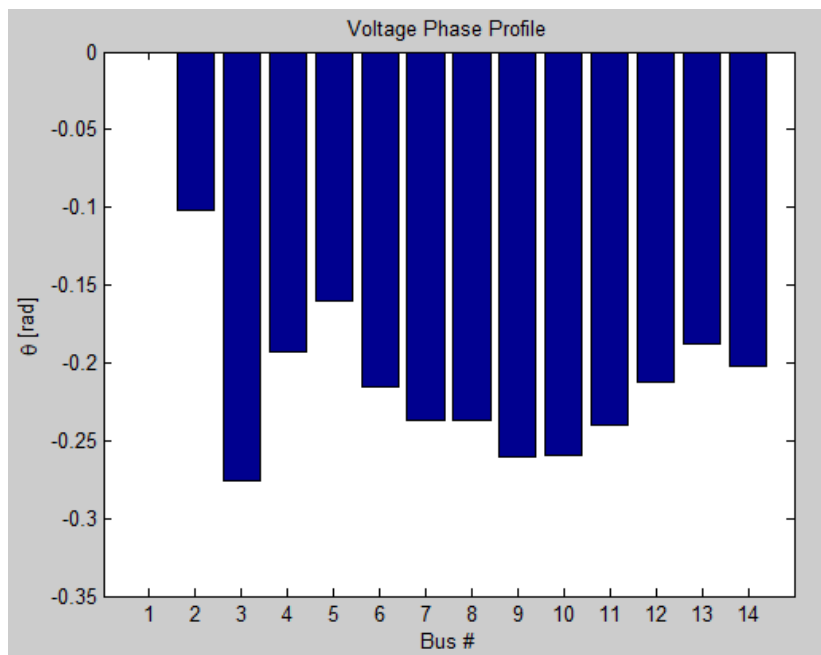


Figure IV.18 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE14 en présence du SVC.

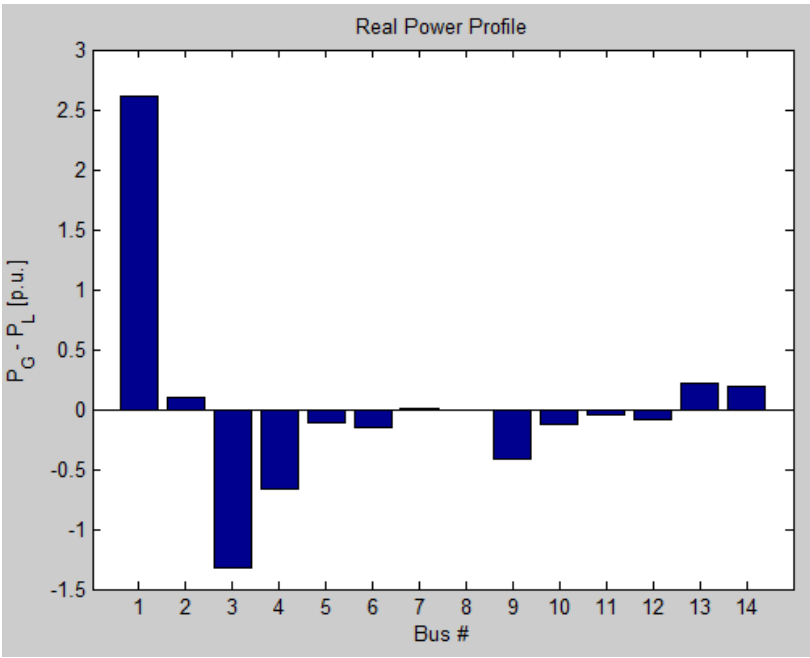


Figure IV.19 : La puissance active dans chaque jeu de barre en présence du SVC.

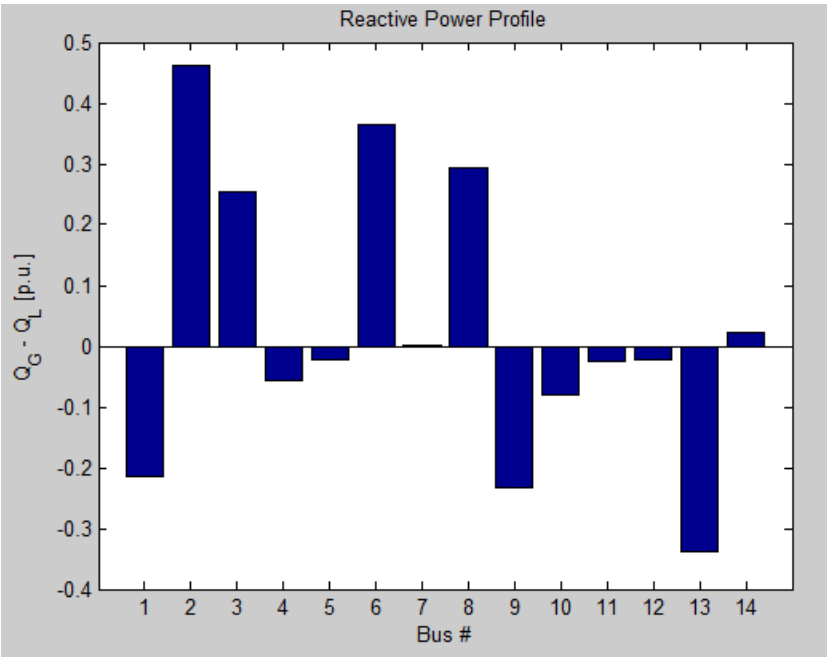


Figure IV.20 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre en présence du SVC.

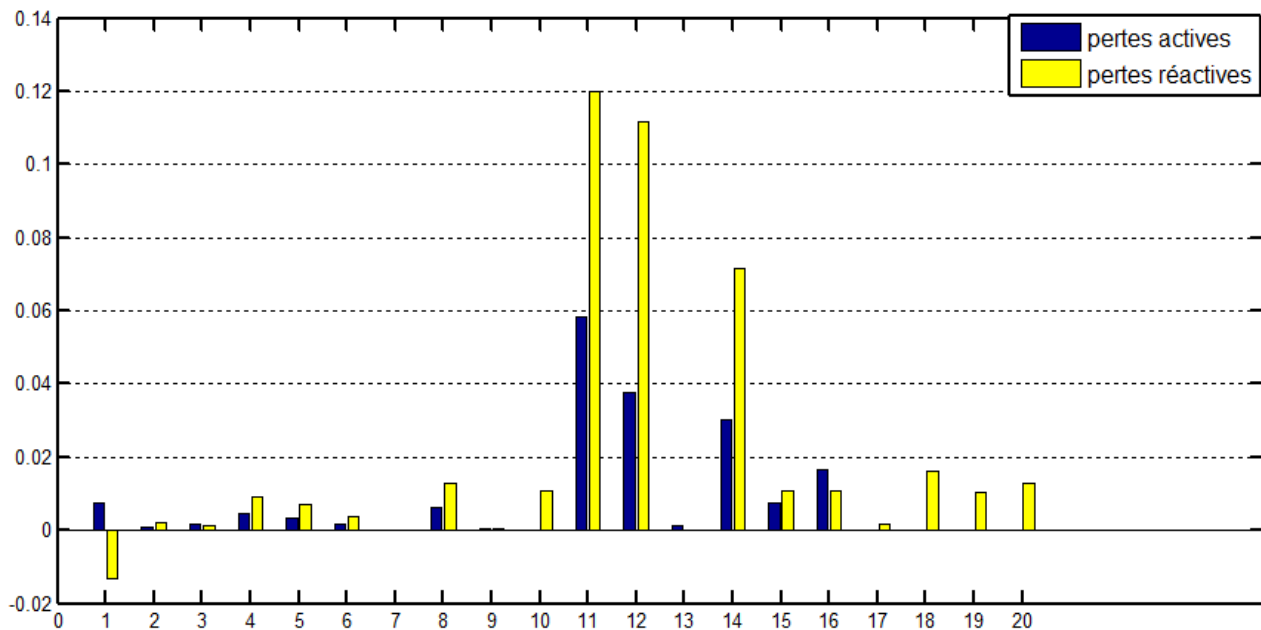


Figure IV.21 : Les pertes actives et réactives dans les lignes en présence du SVC.

IV.3.4. Comparaison entre les résultats du transit de puissance sans et avec SVC

Le tableau 08 ci-dessous montre les résultats de l'écoulement de puissance, pour les deux cas (sans et avec SVC) dans le réseau de 14 jeux de barres qui sont obtenus par PSAT :

Bus	Sans SVC			Avec SVC		
	V (p.u)	P _{gén} (p.u)	Q _{gén} (p.u)	V (p.u)	P _{gén} (p.u)	Q _{gén} (p.u)
Bus 01	1.06	4.7901	-0.18224	1.06	2.6166	-0.21489
Bus 02	1.045	0.39948	1.7946	1.045	0.4	0.63869
Bus 03	1.01	--5 ^e -05	0.90869	1.01	0	0.51996
Bus 04	0.94682	-0.00203	0.00066	1.0112	0	0
Bus 05	0.95568	-0.00043	0.00367	1.017	0	0
Bus 06	1.07	0.0044	4.7796	1.07	0	0.46904
Bus 07	0.93432	-0.00171	0.00039	1.0425	0	0
Bus 08	1.09	0	0.9633	1.09	0	0.29367
Bus 09	0.82787	0.00061	-0.0016	1.0183	0	0
Bus 10	0.85791	0.00069	-7 ^e -05	1.0162	0	0
Bus 11	0.95647	0.0006	-0.00015	1.0372	0	0
Bus 12	0.85038	0.0007	-0.00075	1.045	0	0
Bus 13	0.66823	0.00395	0.00303	1.045	0.4	1.634
Bus 14	0.42838	0.00304	0.0293	1.045	0.4	0.87109

Tableau 08 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 14 jeux de barres sans et avec SVC

IV.3.5. Interprétation

On remarque que l'emplacement du SVC au niveau deux jeux de barres 14 et 13 apporte une amélioration significative de la tension par rapport aux résultats obtenues sans SVC. De plus, avec l'intégration du SVC, les résultats varient avec une bonne amélioration de la tension et des transits des puissances réactives au niveau des lignes connectées aux jeux de barres 13 et 14. Cela montre que SVC a joué un grand rôle dans le contrôle de la tension pour maintenir le système dans un état équilibré ainsi que de la minimisation des pertes actives et réactives totales.

IV.4. Réseau test de 9 jeux de barres

Les tableaux 09 et 10 donnent les caractéristiques du réseau et les valeurs prévues de puissance générée et consommée. Les données relatives au réseau sont exprimées en P.U par rapport à la puissance de base de 100MVA et le fréquence 50Hz. (Les paramètres complets du réseau test IEEE09 sont présentés en Annexe)

IV.4.1. Présentation du réseau

On va considérer le réseau de neuf jeux de barres représenté sur la Figure IV.22 il possède :

- 09 jeux de barres.
- 03 transformateurs.
- 03 générateurs.
- 03 charges.
- 09 lignes de transmissions.

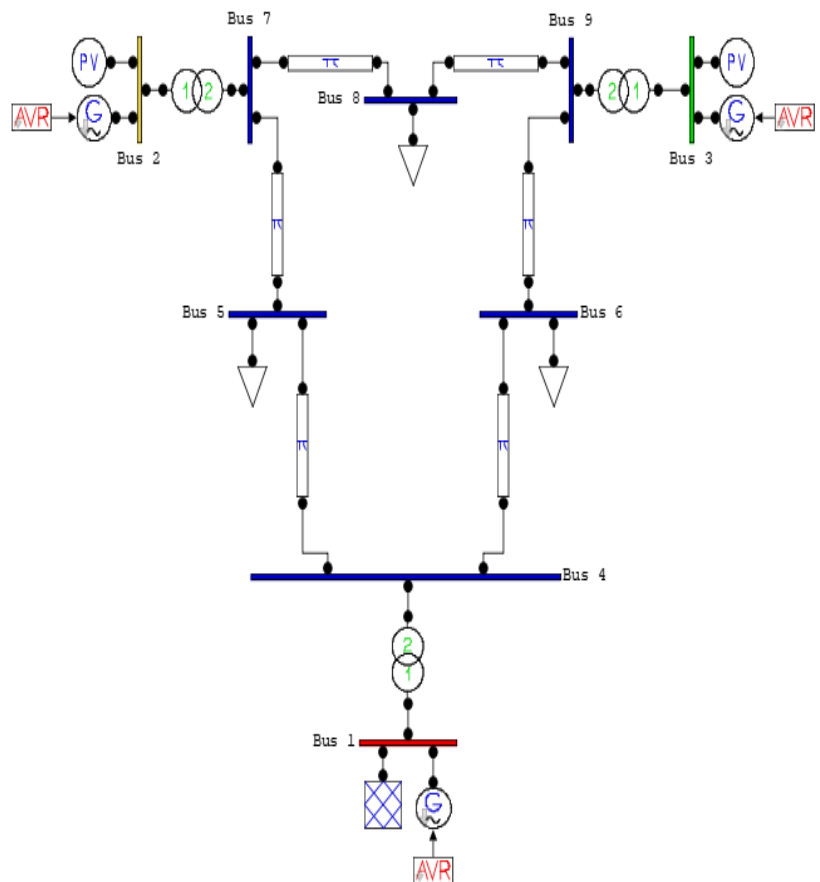


Figure IV.22 : Topologie du réseau étudié IEEE09.

IV.4.2. Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE09

IV.4.2.1. Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE09 à l'état de l'équilibre :

Les résultats de calcul de l'écoulement de puissance conventionnelle sont obtenus par PSAT. Ils sont indiqués sur le tableau ci-après :

Bus	V (p.u.)	Phase (rad)	P _{gén} (p.u.)	Q _{gén} (p.u.)	P _{cons} (p.u.)	Q _{cons} (p.u.)
Bus 01	1.04	0	0.71641	0.27046	0	0
Bus 02	1.025	0.16197	1.63	0.06654	0	0
Bus 03	1.025	0.08142	0.85	-0.1086	0	0
Bus 04	1.0258	-0.03896	0	0	0	0
Bus 05	0.99563	-0.06962	0	0	1.25	0.5
Bus 06	1.0127	-0.06436	0	0	0.9	0.3
Bus 07	1.0258	0.06492	0	0	0	0
Bus 08	1.0159	0.0127	0	0	1	0.35
Bus 09	1.0324	0.03433	0	0	0	0

Tableau 09 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE09.

De	A	Ligne	P _{trans} (p.u.)	Q _{trans} (p.u.)	P _{perd} (p.u.)	Q _{per} (p.u.)
Bus 09	Bus 08	1	0.24183	0.0312	0.00088	-0.21176
Bus 07	Bus 08	2	0.7638	-0.00797	0.00475	-0.11502
Bus 09	Bus 06	3	0.60817	-0.18075	0.01354	-0.31531
Bus 07	Bus 05	4	0.8662	-0.08381	0.023	-0.19694
Bus 05	Bus 04	5	-0.4068	-0.38687	0.00258	-0.15794
Bus 06	Bus 04	6	-0.30537	-0.16543	0.00166	-0.15513
Bus 02	Bus 07	7	1.63	0.06654	0	0.15832
Bus 03	Bus 09	8	0.85	-0.1086	0	0.04096
Bus 01	Bus 04	9	0.71641	0.27046	0	0.03123

Tableau 10 : Les données des lignes étudié de IEEE09.

Dans ce réseau et dans l'état équilibré les tensions des jeux de barres sont broches et stables, en plus, les pertes en puissance active et réactive du ce réseau à l'état de l'équilibre sont de l'ordre de:

$$P = 0.04641 \text{ p.u}$$

$$Q = - 0.9216 \text{ p.u}$$

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

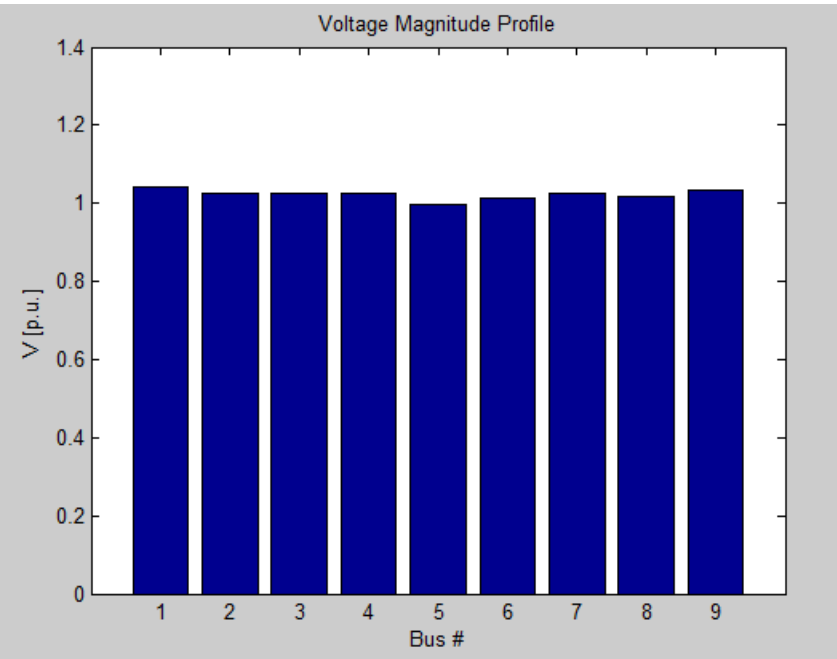


Figure IV.23 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE09.

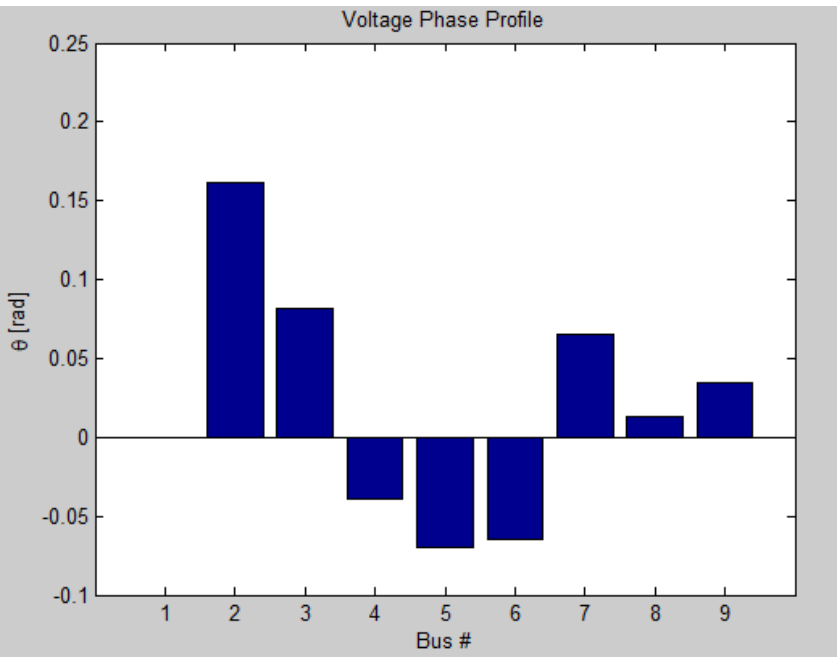


Figure IV.24 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE09.

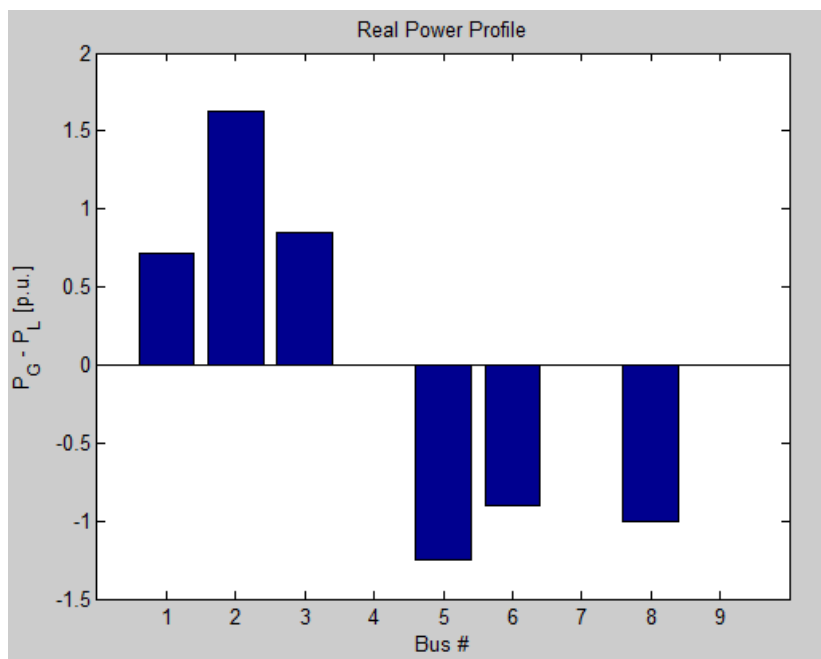


Figure IV.25 : La puissance active dans chaque jeu de barre.

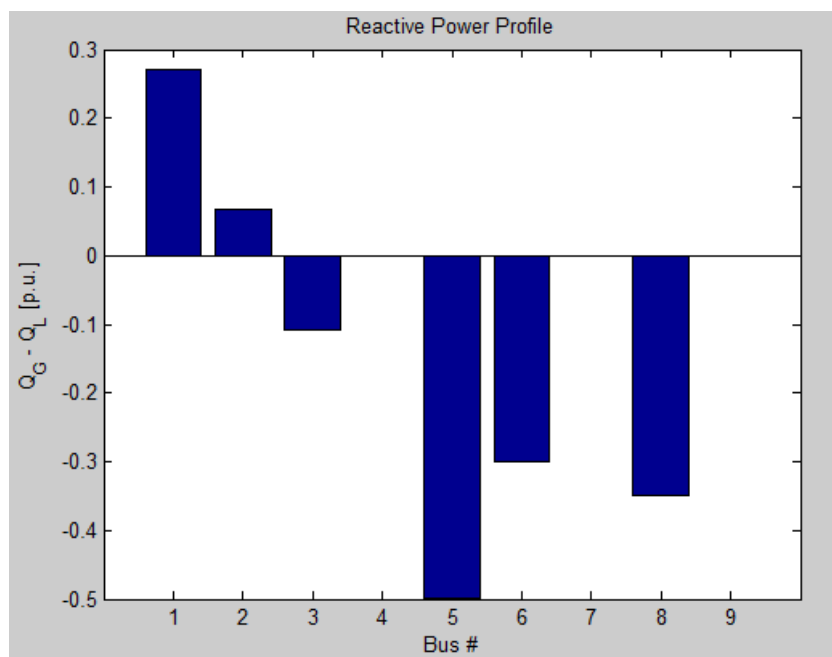


Figure IV.26 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre.

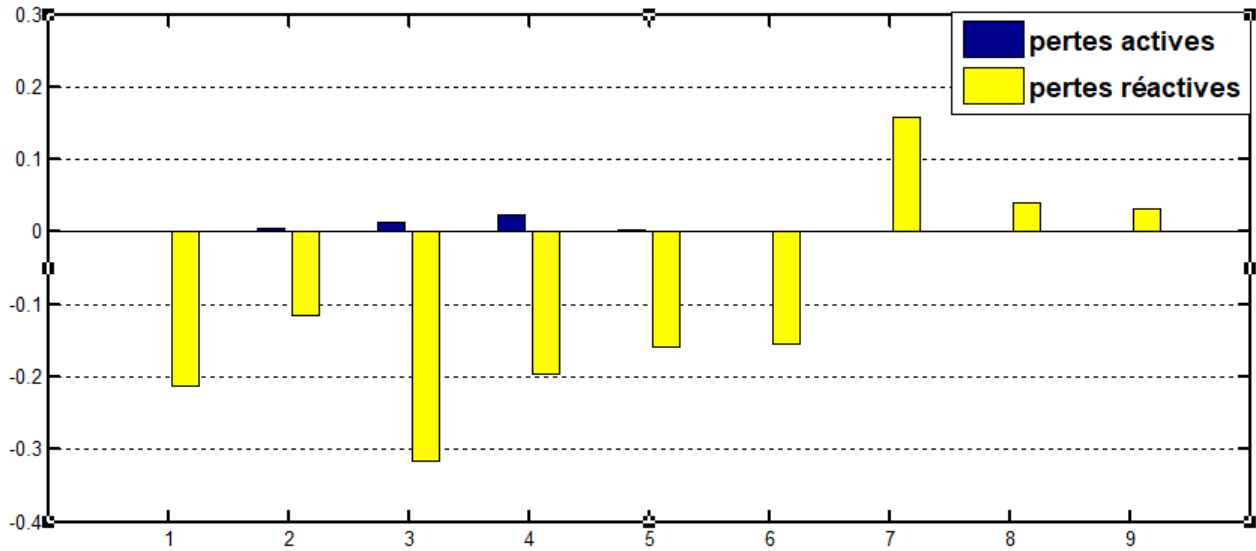


Figure IV.27 : Les pertes actives et réactives dans les lignes.

IV.4.2.2. Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE09 à l'état perturbé :

Dans cette partie, nous allons procéder à une autre simulation (État perturbé) de même réseau IEEE09, cette simulation correspond à une augmentation de charge réactive au niveau de jeu de barre 08.

Jeu de barre	Avant	Après
JB08	Q=0.35 (p.u)	Q=3.5 (p.u)

Les tableaux 11 et 12 et les figures ci- dessous donnent les résultats dans cet état :

Bus	V (p.u.)	Phase (rad)	P _{gén} (p.u.)	Q _{gén} (p.u.)	P _{cons} (p.u.)	Q _{cons} (p.u.)
Bus 01	1.04	0	0.87493	1.1262	0	0
Bus 02	1.025	0.2029	1.63	2.5743	0	0
Bus 03	1.025	0.08676	0.85	2.0055	0	0
Bus 04	0.97882	-0.04953	0	0	0	0
Bus 05	0.90595	-0.08678	0	0	1.25	0.5
Bus 06	0.936	-0.08184	0	0	0.9	0.3
Bus 07	0.8737	0.0889	0	0	0	0
Bus 08	0.6648	0.02285	0	0	1	3.5
Bus 09	0.91164	0.03343	0	0	0	0

Tableau 11 : Niveau des tensions, puissances injectées et consommées de IEEE09(l'état perturbé).

De	A	Ligne	$P_{trans}(p.u.)$	$Q_{trans}(p.u.)$	$P_{perd}(p.u.)$	$Q_{per}(p.u.)$
Bus 09	Bus 08	1	0.32275	2.1079	0.07046	0.46381
Bus 07	Bus 08	2	0.82238	2.3987	0.07467	0.54271
Bus 09	Bus 06	3	0.52725	-0.36701	0.01528	-0.23898
Bus 07	Bus 05	4	0.80762	-0.37665	0.03017	-0.09056
Bus 05	Bus 04	5	-0.47255	-0.78609	0.00893	-0.08064
Bus 06	Bus 04	6	-0.38803	-0.42804	0.00542	-0.11557
Bus 02	Bus 07	7	1.63	2.5743	0	0.55228
Bus 03	Bus 09	8	0.85	2.0055	0	0.26463
Bus 01	Bus 04	9	0.87493	1.1262	0	0.10831

Tableau 12 : Les données des lignes étudié de IEEE09(l'état perturbé).

Après l'augmentation de la charge réactive au niveau du jeu de barres 08, on constate une diminution de la tension au niveau des jeux de barres suivants : 04,05,06,07,08,09.

Les pertes en puissance active et réactive du ce réseau à l'état perturbé sont :

$$P = 0.20493 \text{ p.u}$$

$$Q = 1.406 \text{ p.u}$$

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

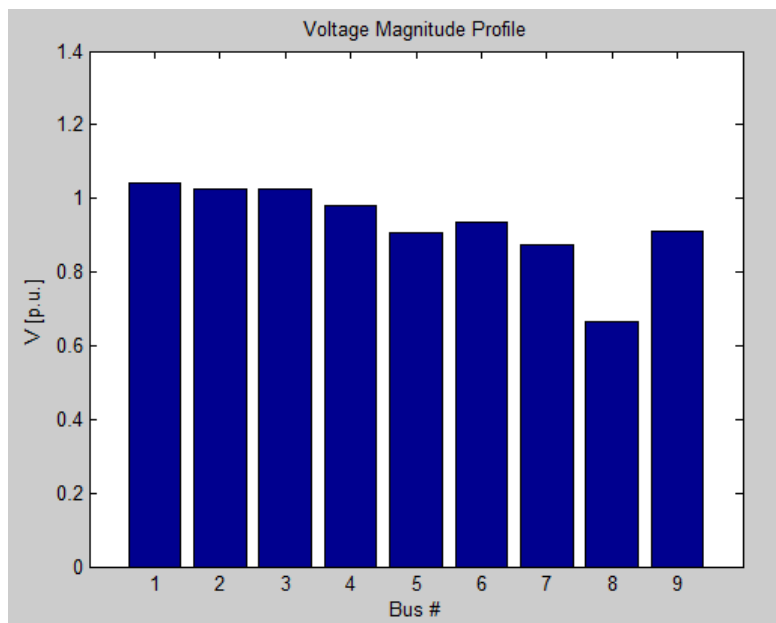


Figure IV.28 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE09(l'état perturbé).

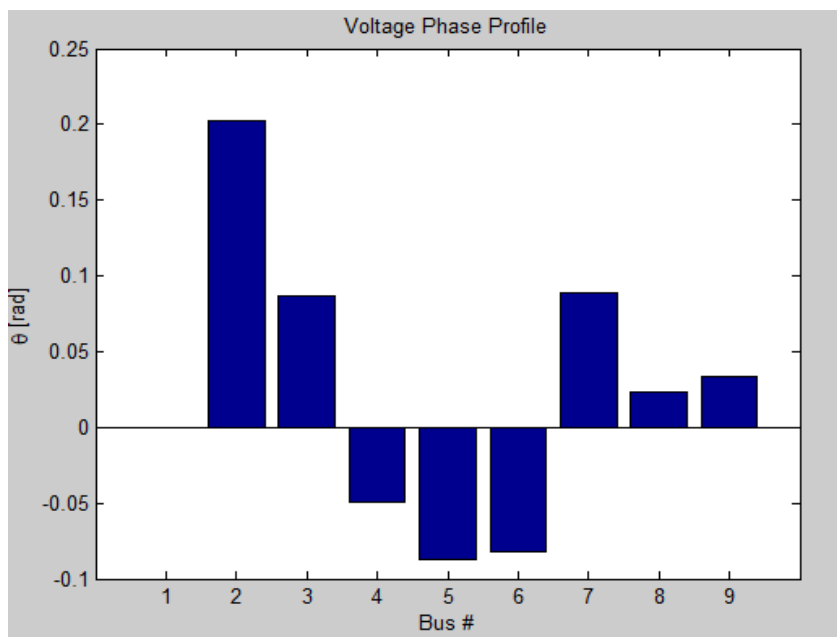


Figure IV.29 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE09 (l'état perturbé).

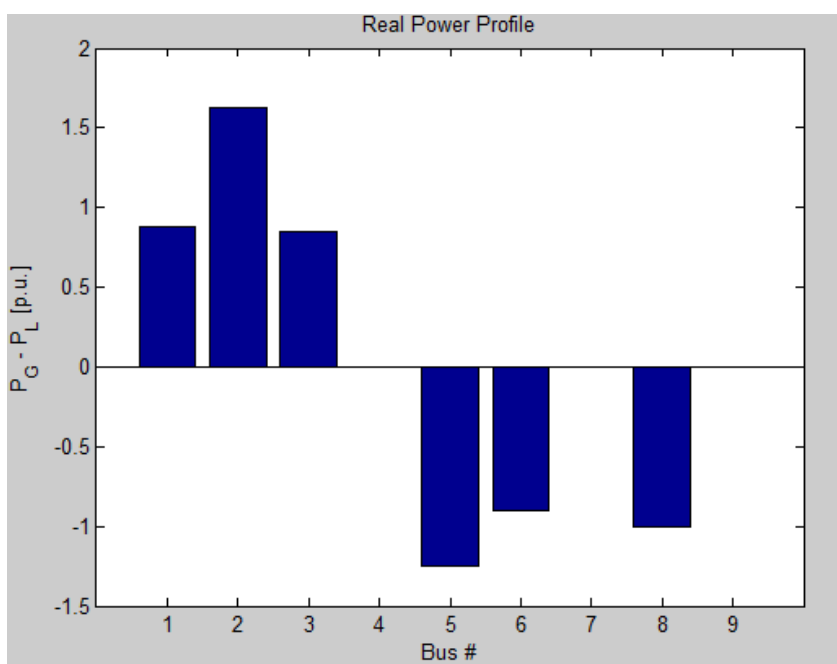


Figure IV.30 : La puissance active dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).

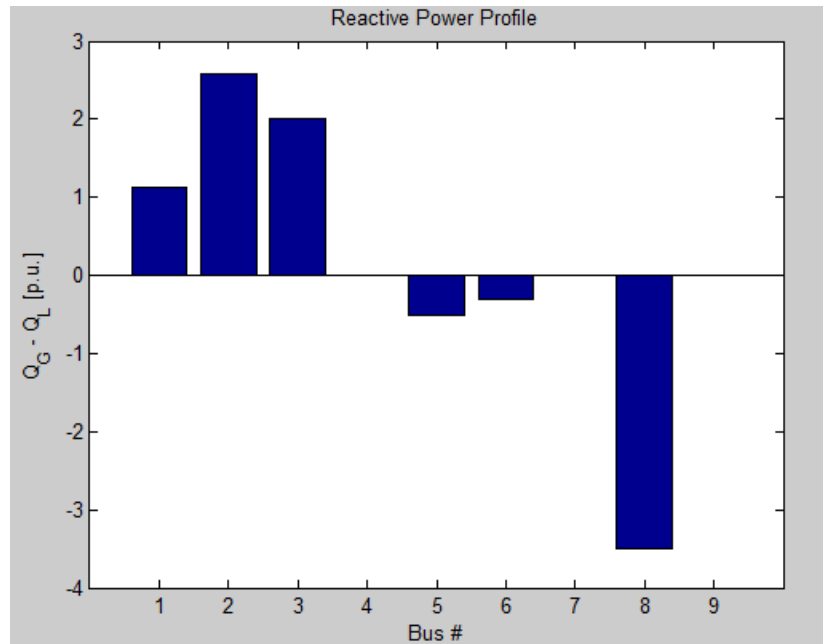


Figure IV.31 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre (l'état perturbé).

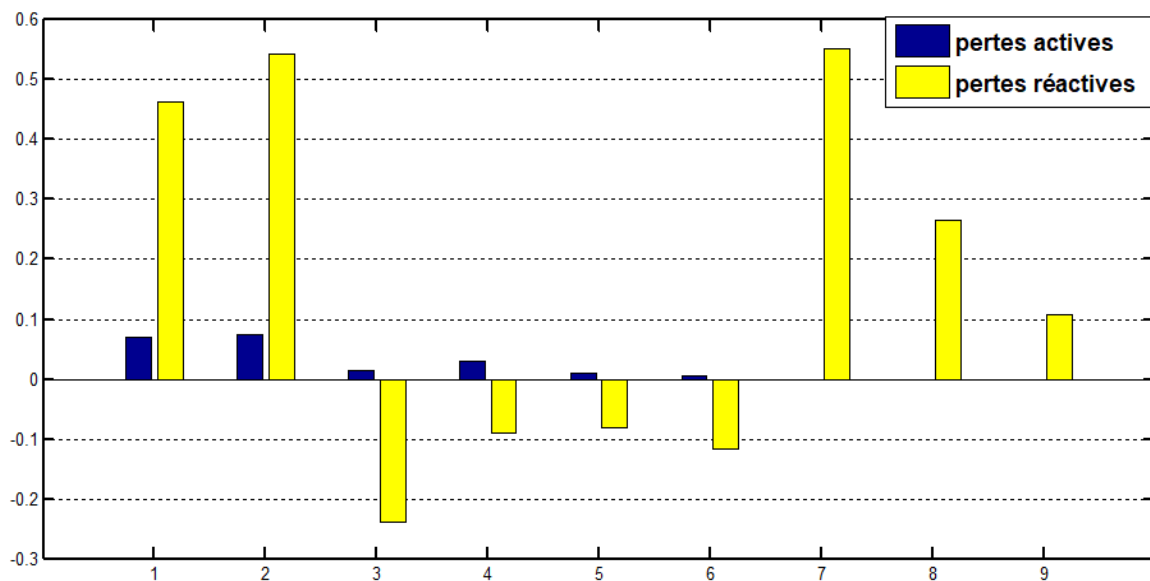


Figure IV.32 : Les pertes actives et réactives dans les lignes (l'état perturbé).

IV.4.3. Intégration du SVC dans un réseau test de 09 jeux de barres

Le jeu de barre 08 (Bus 08) est connecté au SVC comme indiqué sur la Figure IV.33, car il est le plus affecté par l'augmentation de la charge réactive.

Sachant que

$$V(JB08) = 0.6648 \text{ p.u}$$

Les résultats de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson après l'insertion du SVC sont obtenus par PSAT. Dans les tableaux ci-dessous illustres ces résultats :

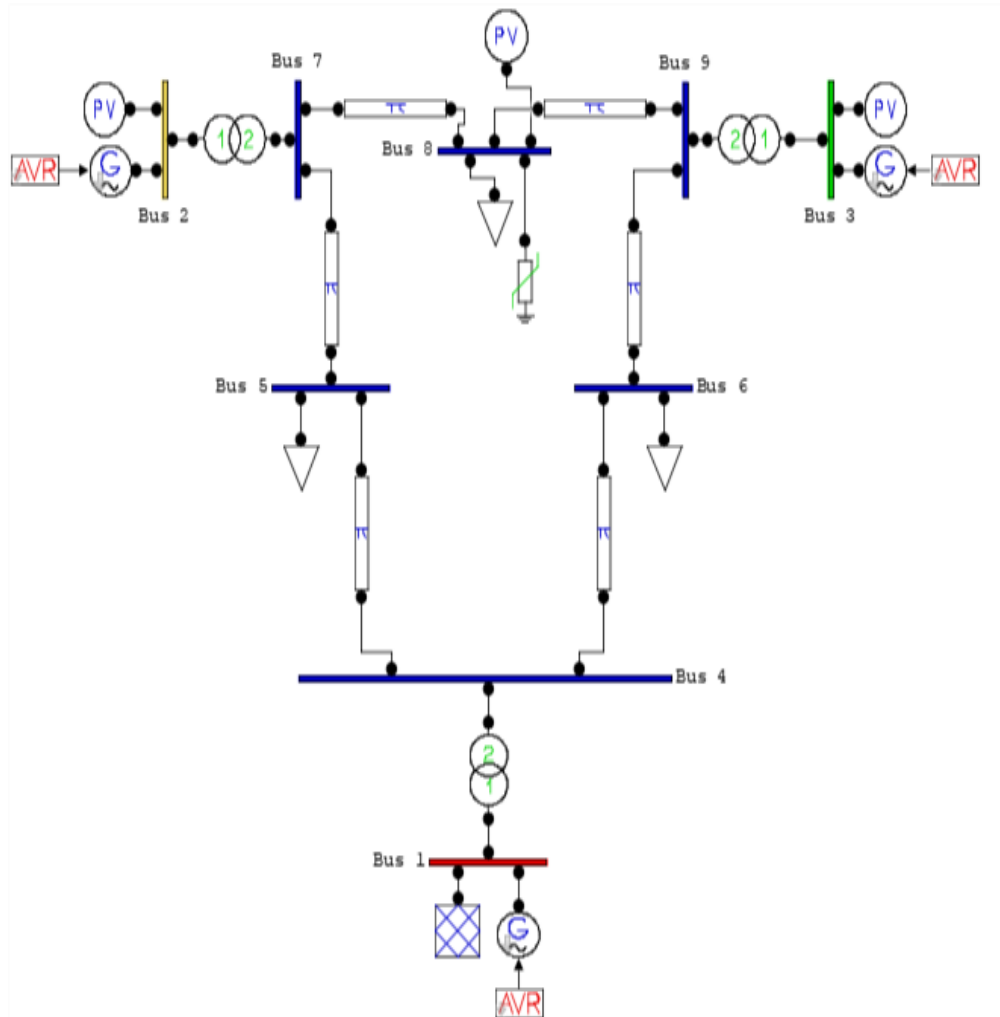


Figure IV.33 : Topologie du réseau IEEE09 avec SVC.

Bus	V (p.u.)	Phase (rad)	P _{gén} (p.u.)	Q _{gén} (p.u.)	P _{cons} (p.u.)	Q _{cons} (p.u.)
Bus 01	1.04	0	-0.78428	0.68883	0	0
Bus 02	1.025	0.45778	1.63	0.14115	0	0
Bus 03	1.025	0.36219	0.85	-0.04354	0	0
Bus 04	1.0028	0.04333	0	0	0	0
Bus 05	0.96299	0.08225	0	0	1.25	0.5
Bus 06	0.98522	0.08569	0	0	0.9	0.3
Bus 07	1.0212	0.3603	0	0	0	0
Bus 08	1.025	0.36673	1.63	3.2684	1	3.5
Bus 09	1.0286	0.31493	0	0	0	0

Tableau 13 : Les tensions et les angles au niveau de 09 jeux de barres en présence du SVC.

De	A	Ligne	$P_{trans}(p.u.)$	$Q_{trans}(p.u.)$	$P_{perd}(p.u.)$	$Q_{per}(p.u.)$
Bus 09	Bus 08	1	-0.5282	0.00294	0.00328	-0.19256
Bus 07	Bus 08	2	-0.09843	-0.1191	9 ^e -05	-0.15518
Bus 09	Bus 06	3	1.3782	-0.08688	0.0704	-0.05628
Bus 07	Bus 05	4	1.7284	0.10101	0.09375	0.17021
Bus 05	Bus 04	5	0.38468	-0.5692	0.00416	-0.13474
Bus 06	Bus 04	6	0.4078	-0.3306	0.00404	-0.13425
Bus 02	Bus 07	7	1.63	0.14115	0	0.15924
Bus 03	Bus 09	8	0.85	-0.04354	0	0.0404
Bus 01	Bus 04	9	-0.78428	0.68883	0	0.05803

Tableau 14 : Les données des lignes étudié de IEEE09 en présence du SVC.

On observe une petite amélioration de tension au niveau des jeux de barres suivantes 04,05,06,07,08 et 09, et c'est grâce à SVC, qui a bien joué son rôle.

Les pertes en puissance active et réactive du ce réseau devient :

$$P = 0.17572 \text{ p.u}$$

$$Q = - 0.24513 \text{ p.u}$$

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

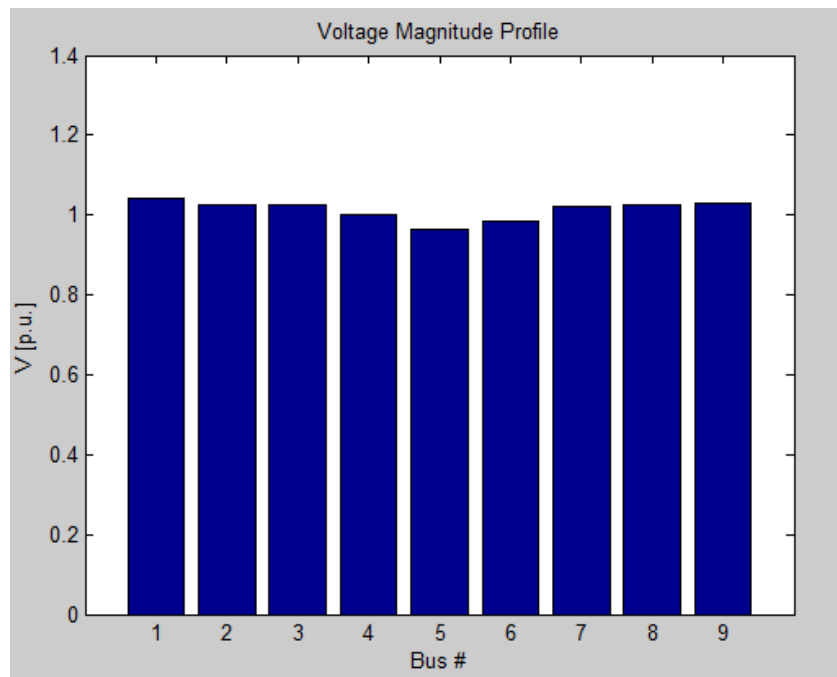


Figure IV.34 : La tension de chaque jeu de barre de IEEE09 en présence du SVC.

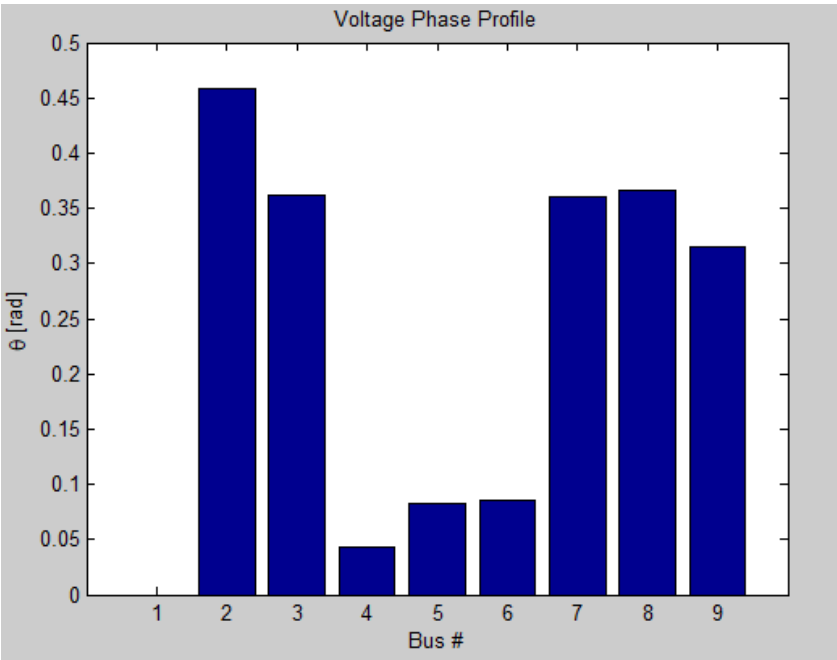


Figure IV.35 : Le déphasage de chaque jeu de barre de IEEE09 en présence du SVC.

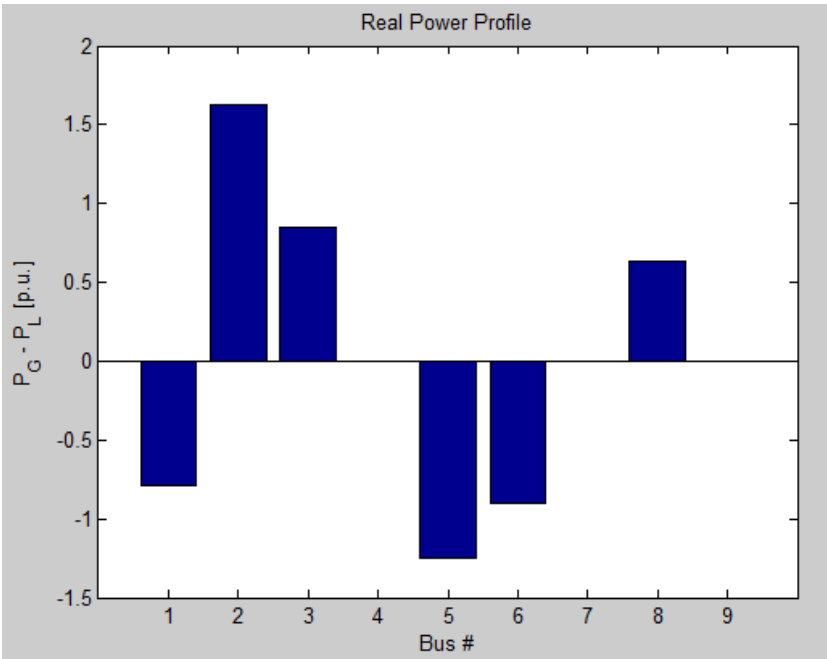


Figure IV.36 : La puissance active dans chaque jeu de barre en présence du SVC.

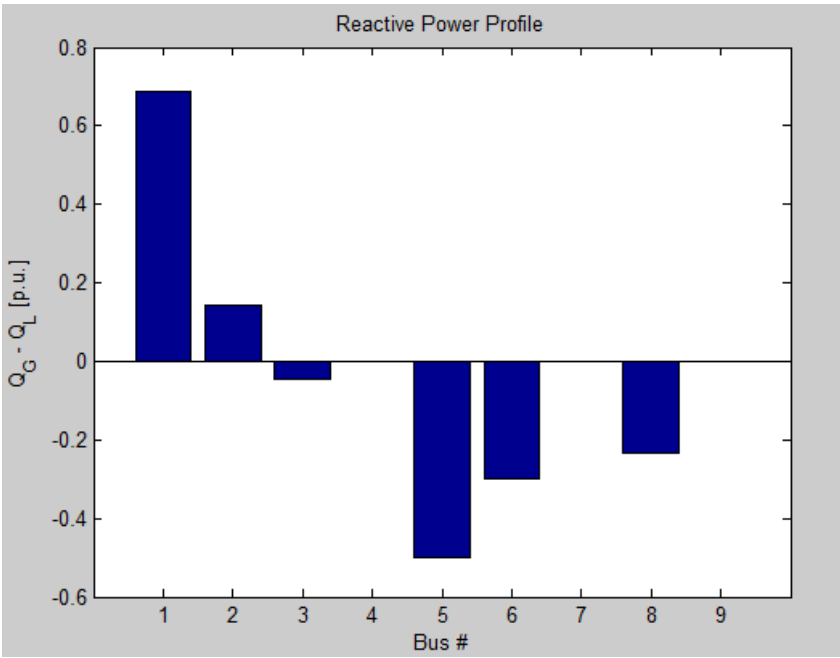


Figure IV.37 : La puissance réactive dans chaque jeu de barre en présence du SVC.

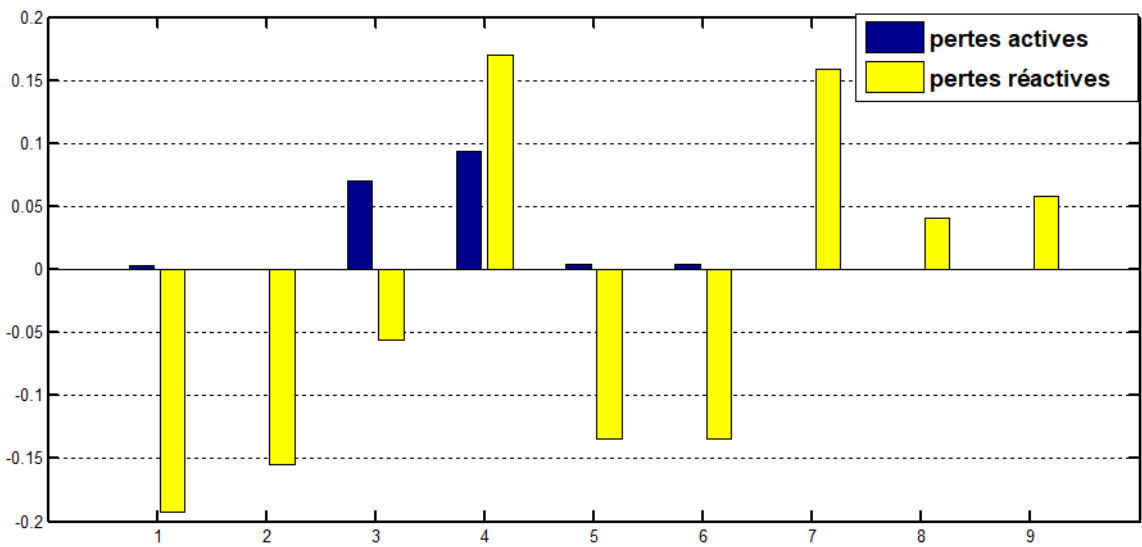


Figure IV.38 : Les pertes actives et réactives dans les lignes en présence du SVC.

IV.4.4. Comparaison entre les résultats du transit de puissance sans et avec SVC

Le tableau 15 ci-dessous montre les résultats de l'écoulement de puissance, pour les deux cas (sans et avec SVC) dans le réseau de 09 jeux de barres qui sont obtenus par PSAT :

Bus	Sans SVC			Avec SVC		
	V (p.u)	P _{gén} (p.u)	Q _{gén} (p.u)	V (p.u)	P _{gén} (p.u)	Q _{gén} (p.u)
Bus 01	1.04	0.87493	1.1262	1.04	-0.78428	0.68883
Bus 02	1.025	1.63	2.5743	1.025	1.63	0.14115
Bus 03	1.025	0.85	2.0055	1.025	0.85	-0.04354
Bus 04	0.97882	0	0	1.0028	0	0
Bus 05	0.90595	0	0	0.96299	0	0
Bus 06	0.936	0	0	0.98522	0	0
Bus 07	0.8737	0	0	1.0212	0	0
Bus 08	0.6648	0	0	1.025	1.63	3.2684
Bus 09	0.91164	0	0	1.0286	0	0

Tableau 15 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 09 jeux de barres sans et avec SVC

IV.4.5. Interprétation

Une illustration des résultats avant l'intégration de l'appareil a montré que les niveaux de tension n'étaient pas dans les limites tolérables, mais avec l'intégration du SVC, les résultats ont changé avec une bonne amélioration de la tension et de la puissance réactive du jeu de barre 08 où le l'appareil a été intégré. Donc pour les autres jeux de barres, cela montre que le dispositif a une influence très importante sur le contrôle de la tension, rendant ainsi le système stable.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité l'importance de l'étude de la répartition des charges est capitale pour l'obtention de tous les paramètres du réseau électrique. Parmi les méthodes de résolution, on a choisi la méthode de Newton-Raphson.

Aussi nous avons montré le problème de la stabilité de la charge réactive et son effet qui engendre des chutes de tension au niveau des jeux de barres ainsi que des pertes supplémentaires sur les lignes de transmission. Pour cela nous avons montré l'efficacité des dispositifs FACTS du type SVC pour l'amélioration de la stabilité statique de tension (améliorer les performances du réseau électrique) réalisée sur des réseaux IEEE 14 et IEEE09.

D'après nos résultats de simulation et plus particulièrement l'analyse des plans de tension des réseaux étudiés et de leurs écoulements de puissance, nous avons abouti à conclure que le dispositif de contrôle SVC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation de puissance réactive et du contrôle de tension de chaque nœud.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

De nos jours, les problèmes liés à l'exploitation des réseaux de transport et à la production d'énergie électrique sont devenus assez importants. Face à une consommation électrique toujours augmentée et à des conditions environnementales très contraignantes, les réseaux d'énergie électrique tendent à se développer et à devenir de plus en plus maillés et interconnectés. Les lignes de transport à grande capacité sont également utilisées pour le transport longue distance. Cette complexité structurelle est à l'origine de nombreuses conséquences, notamment : Difficulté à maintenir un profil de tension acceptable.

La stabilité de la tension d'alimentation est également caractérisée par la capacité à maintenir la tension aux bornes de la charge dans une plage spécifiée pendant le fonctionnement normal. est l'optimisation du transit de puissance dans les systèmes actuels.

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude de la stabilité des réseaux électriques et particulièrement la stabilité statique de la tension. Dans ce travail, une solution a été expliquée pour maintenir la stabilité de la tension et cette solution est : Compensation de l'énergie réactive dans un réseau de transmission d'énergie, comme nous avons également abordé l'effet d'un dispositif FACTS shunt (SVC) sur la stabilité de la tension dans deux réseaux électriques standards IEEE .

Premièrement nous avons commencé par une description générale sur l'énergie électrique et leurs différentes puissances (active, réactive, apparent), ainsi que nous avons expliqué l'importance de bon facteur de puissance, ses avantages et inconvénients. Et nous avons également mis l'accent particulièrement sur le côté de puissance réactive (les consommateurs et L'effet de la puissance réactive). À la fin de ce chapitre, nous avons conclu l'objectif principal de la compensation est : la diminution de la chute de tension.

Dans la deuxième partie, nous trouvons deux chapitres, dans le premier chapitre (chapitre II , nous avons donné un aperçu des appareils FACTS. sachant que les dispositifs FACTS sont prédominants dans le domaine de la compensation de l'énergie réactive grâce à leurs performances dynamiques avancées et leurs flexibilités. En fait le choix optimale des dispositifs FACTS assure une meilleure amélioration de la stabilité de tension, dans ce présent travail une étude détaillée sur les systèmes FACTS a été faite, la classification de ces dispositifs, la constitution des dispositifs les plus connus, leurs multiples applications et leurs énormes avantages apportés aux réseaux électriques. En ce qui concerne la deuxième chapitre (chapitre III), nous avons parlé en particulier sur le compensateur statique d'énergie réactive du type SVC, sa caractéristique et sa modélisation .

Le dispositif SVC est un moyen moderne qui peut faciliter l'exploitation de l'énergie électrique en contribuant au contrôle de la tension. Il comprend également plusieurs avantages, notamment :

- rapidité d'action.
- Réduire les surtensions temporelles.
- Augmenter la marge de la stabilité transitoire.

En plus, il a des inconvénients dans les réseaux :

- Cout élevé.
- Complexité technologique, ce qui domage de personnel très qualifié.

Le compensateur statique SVC n'est utilisé que pour compenser l'énergie réactive et possède tous les avantages d'un équipement de compensation traditionnel tout en assurant la même fonction. C'est donc un moyen indéniable d'améliorer la qualité de service.

Après tout cela vient la partie application dans le chapitre quatre, dans un premier temps, nous avons présenté le logiciel PSAT utilisé dans la partie de la simulation, en plus nous avons expliqué la méthode de Newton-Raphson utiliser pour trouver les résultats de l'écoulement de puissance et de tension. Après nous avons analysé la stabilité statique de la tension de deux réseaux électriques IEEE 14 et IEEE 09 avec et sans l'utilisation du compensateur SVC. dans le premier cas (sans SVC) nous avons trouvé les résultats de l'écoulement de puissance et de tension on état normal et état perturbé, et le même travail dans le deuxième cas, mais un seul état (après intégration du SVC dans les deux réseaux). Comme nous avons constaté un bon amélioration dans les résultats de l'écoulement de puissance et de tension après l'intégration

D'après cette étude plusieurs résultats ont été dégagés :

- L'intégration des dispositifs FACTS pour répondre au besoin d'énergie réactive demandé par la charge .
- Les dispositifs FACTS notamment l'SVC amélioré la marge de stabilité, minimisé les pertes actives totales et la déviation de la tension .
- Les FACTS sont utilisés pour augmenter la capacité de transfert de puissance dans le réseau.
- L'utilisation de l'SVC pour l'amélioration de la stabilité du réseau électrique ainsi que la sécurité de réseau électrique.
- Le choix de l'emplacement de l'SVC dans les nœuds critique très essentiel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Gérard GAY “ La compensation de l’énergie réactive ” Intersections : Le magasin Schneider Electronic de l’enseignement technologique et professionnel. No :16-novembre 2006.
- [2] Mémoire de Fin d’Etudes : ETUDE DE LA COMPENSATION DE LA PUISSANCE REACTIVE LORS D’UNE CHARGE NON LINEAIRE. Naima LARDJANI
- [3] Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE ‘ ‘Electrotechnique’’ 3eme edition Edition de Boeck Université 2000
- [4] PREVE CHRISTOPHE « Réseau électrique 2 » LAVOISIER, 3 ème éditions. [5
- [5] Philippe SERRAND et Jean VERSEILLE “ Compensation de la puissance réactive et tenue en tension dans les réseaux publics” Technique de l’ingénieur. No : D4 305 –Juin 1986.
- [6] Charles HANTOUCHE ‘ ‘Condensateur de puissance’’ Technique de l’ingénieur. No : D4 710 .
- [7] A. CISSOUMA “ Etude de la compensation de la puissance réactive des réseaux électriques (application d’un SVC)”. Mémoire d’ingénieur à l’UMMTO , année 2006.
- [8] Gabriela, Glanzmann, " Flexible Alternating Current Transmission Systems ", EEH – Power Systems Laboratory, 14. January 2005
- [9] ESKANDAR GHOLIPOUR SHAHRAKI « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Université Henri Poincaré Nancy-I, Thèse de Doctorat 2003
- [10] K.R. PADIYAR. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution. New age international (P) Ltd., Publishers 2007
- [11] K.SEBA «Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique » Thèse de Doctorat, Département d'électrotechnique, Université de Université des Sciences & des Technologies Houari Boumediene (USTHB) 2008
- [12] BENABID.R « Optimisation multi objectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques » Mémoire de Magistère, Département de génie électrique Université, Amar Telidji, Laghouat 2007
- [13] L. CAI, «Robust Coordinated Control of FACTS Devices in Large Power Systems » These de Doctorat, Université de Duisburg-Essen, 2004.
- [14] Abdelali. Alibi. « Contrôle des réseaux électrique par les systèmes FACTS : Flexible AC Transmission Systems», mémoire magister, université de Batna 2009.
- [15] A. Edris et al Proposed. « Terms and Definition of FACTS », IEEE trans. on power delivery, 12(4):1884-1853, October 1997.
-

Références bibliographiques

- [16] Belguidoum Hocine. «Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandes » , mémoire de magistère de l'université de Setif, 2012.
 - [17] Gaboussaseddik et Dob Med lakhdar. « L'impact des dispositifs de compensation dynamique – FACTS- sur les réseaux de transport », mémoire de magister de université Biskra, 2006.
 - [18] S. Maram. « UPEC and SVC modeling and control».
 - [19] M. Geidl. « I m plementation of FACTS in an interactive power flow simulation».
 - [20] L. Belkacem et K. Saber. «Compensation dynamique de l'énergie réactive dans les réseaux électriques», université de Biskra promotion juin 2005.
 - [21] Blal Souleyman et Bahamou Abdessamed. «Compensateur statique de la puissance réactive SVC dans un réseau de transport d'énergie «électrique», université Ahmed Draia Adrar ,24 Mai 2017.
 - [22] Psat Version 2.1.8. «Software and Documentation», copyright ©2002-2014 Federico Milano, September 6, 2014. <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~fmilano>
 - [23] BEN HAKKOUM Med Abdelilah, LEGOUGUI Ali "compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par system FACTS", Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, May2016
 - [24] NOUI Issam (Réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC), Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie.promo2012.
-

ANNEXE

Annexe

A.1. PSAT :

PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un logiciel destiné à l'analyse et l'étude des réseaux électriques, voir figure A.1. Il est développé sous MATLAB par Mr. Federico Milano ; Professeur, Docteur à l'université de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain. PSAT bénéficie largement des remarques et observations des chercheurs spécialisés dans le réseau électrique via leurs contributions dans le forum de ce dernier. <http://groups.yahoo.com/groups/psatforum>. Pour cela, il a connu des améliorations remarquables d'une version à une autre.

PSAT est un logiciel, simple, intéressant, qui englobe plusieurs domaines de recherche dans l'étude et l'analyse des réseaux électriques. La manipulation de PSAT peut être effectuée, soit par l'interface graphique, soit par la programmation en ligne en utilisant leurs fonctions prédéfinies.

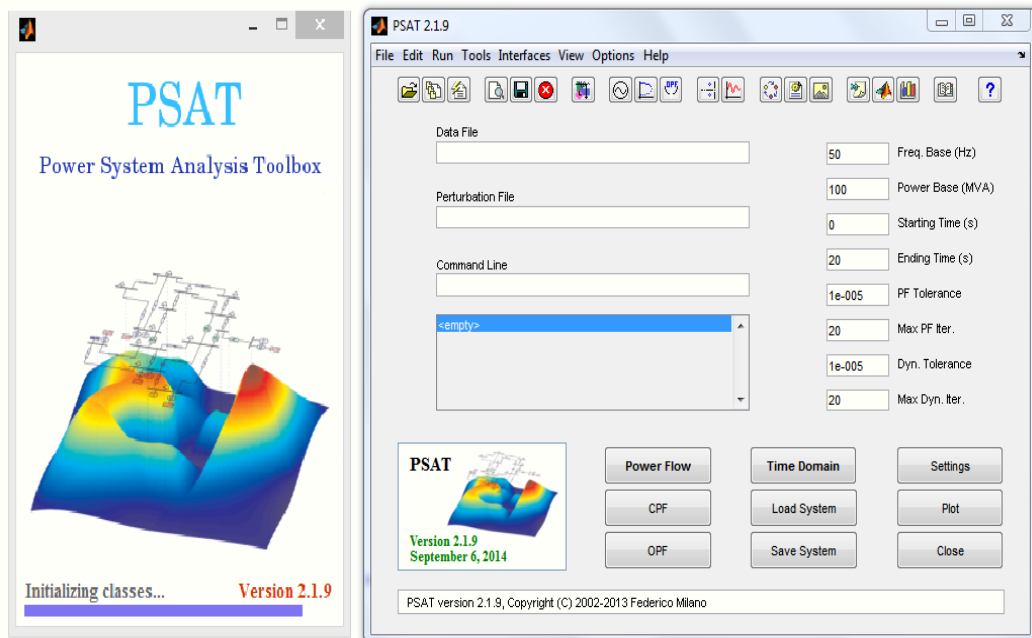


Figure A.1 : Interface graphique (GUI) du PSAT 2.1.9

A.2. Format des structures du PSAT :

PSAT est basé sur le concept des structures afin d'enregistrer les paramètres du réseau ainsi que les résultats de simulations. Chaque structure, englobe plusieurs champs des informations qui assurent une description détaillée du système. Les principales structures du PSAT sont présentées dans ce qui suit :

A.2.1. Bus :

PSAT définit la topologie du réseau par la structure « Bus ». Cette dernière contient plusieurs champs présentés comme suit :

- ✓ Con: données des nœuds.
- ✓ n : nombre total de nœuds.
- ✓ int : indices des nœuds.
- ✓ Pg : puissance active injectée par le générateur.
- ✓ Qg : puissance réactive injectée par le générateur.
- ✓ Pl : puissance active absorbée par la charge.
- ✓ Ql : puissance réactive absorbée par la charge.
- ✓ island : indice des nœuds dans les régions.

Les principales données des nœuds sont stockées dans le champ « Bus.con » présenté par le tableau ci-dessous :

Colonnes	Description	Unité
1	Nœud	int
2	Tension nominale	kV
3	Tension initiale	pu
4	Phase initiale de tension	rad
5	Numéro de secteur(n'a pas encore utilisé)	int
6	Numéro de région(n'a pas encore utilisé)	int

Tableau A.1 Format de la structure Bus.con

A.2.2. Line :

La structure « Line » définit les données des lignes ainsi que les transformateurs. Cette dernière contient plusieurs champs présentés comme suit :

- ✓ con : données des lignes du réseau.
- ✓ n : nombre total des lignes AC.
- ✓ bus1 : noeuds de départ des lignes.
- ✓ bus2 : noeuds d'arrivé des lignes.

Les principaux paramètres des lignes sont stockés dans le champ « Line.con » présenté par le tableau ci-dessous :

ANNEXE

Colonnes	Description	Unité
1	Nœud de départ	int
2	Nœud d'arrivée	int
3	Puissance de base	MVA
4	Tension nominale	kV
5	Fréquence	hZ
6	Longueur de ligne	km
7	N° a pas utilisée	-
8	Resistance de la ligne	pu
9	Réactance de la ligne	pu
10	Susceptance de la ligne	pu
11	N°a pas utilisée	-
12	N°a pas utilisée	-
13	Limite du courant	pu
14	Limite de la puissance apparente	pu
15	Limite de la puissance active	pu

Tableau A.2 : Format de la structure Line.con.

A.2.3. PQ :

La structure « PQ » englobe tous les paramètres de la charge. Cette dernière contient plusieurs champs présentés comme suit :

- ✓ con : données des charges PQ.
- ✓ n : nombre total de charges PQ.
- ✓ bus: numéro des nœuds charges.
- ✓ P₀: puissance active initiale (utilisé pour les charges non standard).
- ✓ Q₀: puissance réactive initiale (utilisé pour les charges non standard).
- ✓ store: copie des données des nœuds charge (ce champ est utilisé dans le cas de programmation sous PSAT).

Le format des données de la charge est présenté par le tableau ci-dessous :

Colonnes	Description	Unité
1	Numéro du Nœud de charge	int
2	Puissance de base	MVA
3	Tension nominale	kV
4	Puissance active	pu
5	Puissance réactive	pu
6	Tension minimale	pu
7	Tension maximale	pu
8	Permettre la conversion en impédance	booléen

Tableau A.3 : Format de la structure PQ.con.

A.2.4. SW :

La structure SW présente les données du nœud bilan (slack bus). Elle contient plusieurs champs définis comme suit :

- ✓ con: données de nœud bilan.
- ✓ n: nombre total des nœuds bilan.
- ✓ bus: numéro des nœuds bilan.
- ✓ store: copie des données de nœud bilan (ce champs est utilisé dans le cas de programmation sous PSAT).

Le format des données de nœud bilan est présenté dans le tableau ci-dessous :

Colonnes	Description	Unité
1	Nœud bilan	int
2	Puissance de base	MVA
3	Tension nominale	kV
4	Amplitude de tension	pu
5	Angle de référence	pu
6	Puissance réactive maximale	pu
7	Puissance réactive minimale	pu
8	Tension maximale	pu
9	Tension minimale	pu
10	Puissance active	pu
11	Coefficient de participation	int

Tableau A.4 : Format de la structure SW.con.

A.2.5. PV :

La structure « PV » englobe tous les paramètres des nœuds générateurs présentés dans les champs suivants :

- ✓ con : données de nœud générateur.
- ✓ n : nombre total des nœuds générateurs.
- ✓ bus : numéro des nœuds générateurs.
- ✓ pq : ce champ est utilisé lorsque la limite d'énergie réactive des générateurs est considérée
- ✓ con : donnée de nœuds de charge.
- ✓ n : nombre totale des nœuds de charge.
- ✓ bus : numéro des nœuds PQ.
- ✓ store : copie des données des nœuds générateurs. (ce champ est utilisé dans le cas de programmation sous PSAT).

ANNEXE

Les paramètres des nœuds générateurs sont présentés par le champ « PV.con » avec le format illustré dans le tableau suivant :

Colonnes	Description	Unité
1	Nœud générateur	int
2	Puissance de base	MVA
3	Tension nominale	kV
4	Puissance active	pu
5	Amplitude de tension	pu
6	Puissance réactive maximale	pu
7	Puissance réactive minimale	pu
8	Tension maximale	pu
9	Tension minimale	pu
10	Coefficient de participation de perte	int

Tableau A.5 : Format de la structure PV.con.

A.2.6. Shunt :

La structure Shunt présente les éléments shunt du réseau. Elle est constituée de plusieurs champs définis comme suit :

- ✓ con: données des impédances shunt.
- ✓ g: vecteur colonne des conductances à chaque nœud du réseau.
- ✓ b : vecteur colonne des susceptances à chaque nœud du réseau.

Les principaux paramètres des éléments shunt sont présentés dans la structure Shunt.con avec le format illustré dans le tableau A.6 :

Colonnes	Description	Unité
1	Numéro de nœud	int
2	Puissance de base	MVA
3	Tension de base	kV
4	Fréquence	Hz
5	Conductance	pu
6	Susceptance	pu

Tableau A.6 : Format de la structure Shunt.con.

A.2.7. SVC :

La structure « Svc » est allouée aux paramètres du SVC. Elle englobe plusieurs champs définis comme suit :

- ✓ con : données du SVC.
- ✓ n : nombre total des SVC.
- ✓ bus : numéro des nœuds qui contiennent des SVC.
- ✓ bcv : indice de variable d'état bSVC.
- ✓ alpha: indice de variable d'état α .
- ✓ Vm: indice de variable d'état vm .
- ✓ Be : admittance équivalente bSVC .
- ✓ Vref: référence de tension Vref.

Les principaux paramètres du SVC sont présentés dans la structure « Shunt.con » avec le format illustré dans le tableau ci-dessous :

Colonnes	Description	Unité
1	Nœud	int
2	Puissance de base	MVA
3	Tension nominale	kV
4	Fréquence	Hz
5	Type du SVC	int
6	Constat de temps de régulation Tr	second
7	Gain Kr	pu/pu
8	Tension de référence Vréf	pu
9	Susceptance maximale bmax	pu
10	Susceptance minimale bmin	pu

Tableau A.7 : Format de la structure Svc.con.

A.3. Les paramètres de réseau de 14 jeux de barres :

A.3.1 Les données pour chaque jeu de barres :

PV : Jeu de barres générateur.

PQ : Jeu de barres de charge.

ANNEXE

Jeu de barres	Type de jeu de barres	La tension VM(p.u)	Angle VA (deg)
1	PV	1.00	0
2	PV	1.00	0
3	PV	1.00	0
4	PQ	1.00	0
5	PQ	1.00	0
6	PV	1.00	0
7	PQ	1.00	0
8	PV	1.00	0
9	PQ	1.00	0
10	PQ	1.00	0
11	PQ	1.00	0
12	PQ	1.00	0
13	PQ	1.00	0
14	PQ	1.00	0

Tableau A.8 : Données des jeux de barres du réseau de 14JB.

A.3.2. Les données des 05 générateur :

Nombre de générateur	Type de jeu de barres	P _{gen} (p.u)	Q _{gen} (p.u)	Q _{max} (p.u)	Q _{min} (p.u)
1	01	2.324	0	9.9	-9.9
2	02	0.4	0	0.5	-0.4
3	03	0	0	0.4	0
4	06	0	0	0.24	-0.06
5	08	0	0	0.24	-0.06

Tableau A.9 : Données des générateur du réseau test de 14JB.

A.3.3. Les données des lignes de transmission :

Il existe 20 lignes de transmissions qui sont représentées dans le tableau suivant :

ANNEXE

Ligne emetteur	Ligne récepteur	Résistance (p.u)	Réactance (p.u)	Conductance (p.u)	Susceptance (p.u)
1	2	0.01938	0.05917	0	0.0528
1	5	0.05403	0.22304	0	0.0492
2	3	0.04699	0.19797	0	0.0438
2	4	0.05811	0.17632	0	0.0374
2	5	0.05695	0.173888	0	0.034
3	4	0.06701	0.17103	0	0.0346
4	5	0.01335	0.04211	0	0.0128
4	7	0	0.20912	0	0
6	11	0.09498	0.1989	0	0
6	12	0.12291	0.25581	0	0
6	13	0.06615	0.13027	0	0
9	10	0.03181	0.0845	0	0
9	14	0.12711	0.27038	0	0
10	11	0.08205	0.19207	0	0
12	13	0.22092	0.19988	0	0
13	14	0.17093	0.34802	0	0
4	9	0.005	0.55618	0	0
5	6	0	0.25202	0	0
7	9	0	0.11001	0	0
7	8	0	0.17615	0	0

Tableau A.10 : Les données des lignes de transmission du réseau de 14JB.

A.3.4. Les données des 11 charges :

Nombre de charge	Type de jeu de barres	P _{load} (p.u)	Q _{load} (p.u)
1	02	0.217	0.127
2	03	0.942	0.19
3	04	0.478	0.04
4	05	0.076	0.016
5	06	0.112	0.075
6	09	0.295	0.166
7	10	0.09	0.058
8	11	0.035	0.018
9	12	0.061	0.016

ANNEXE

10	13	0.135	0.58
11	14	0.149	0.5

Tableau A.11 : Les données des 11 charges.

A.4. Les paramètres de réseau de 09 jeux de barres :

A.4.1 Les données pour chaque jeu de barres :

PV : Jeu de barres générateur.

PQ : Jeu de barres de charge.

Jeu de barres	Type de jeu de barres	La tension VM(p.u)	Angle VA (deg)
1	PV	1.00	0
2	PV	1.00	0
3	PV	1.00	0
4	PQ	1.00	0
5	PQ	1.00	0
6	PQ	1.00	0
7	PQ	1.00	0
8	PQ	1.00	0
9	PQ	1.00	0

Tableau A.12 : Données des jeux de barres du réseau de 09JB.

A.4.2. Les données des 03 générateur :

Nombre de générateur	Type de jeu de barres	$P_{gen}(p.u)$	$Q_{gen}(p.u)$	$Q_{max}(p.u)$	$Q_{min}(p.u)$
1	01	0	0	99	-99
2	02	1.63	0	99	-99
3	03	0.85	0	99	-99

Tableau A.13 : Données des générateur du réseau test de 09JB.

A.4.3. Les données des lignes de transmission :

Il existe 20 lignes de transmissions qui sont représentées dans le tableau suivant :

Ligne emetteur	Ligne récepteur	Résistance (p.u)	Réactance (p.u)	Conductance (p.u)	Susceptance (p.u)
1	4	0	0.0576	0	0
4	6	0.017	0.092	0	0.158
6	9	0.039	0.170	0	0.358
3	9	0	0.0586	0	0
8	9	0.0119	0.1008	0	0.209
7	8	0.0085	0.072	0	0.149
7	2	0	0.0625	0	0
5	7	0.032	0.161	0	0.306
4	5	0.01	0.085	0	0.176

Tableau A.14 : Les données des lignes de transmission du réseau de 09JB.

A.4.4. Les données des 03 charges :

Nombre de charge	Type de jeu de barres	P _{load} (p.u)	Q _{load} (p.u)
1	05	1.25	0.5
2	06	0.9	0.3
3	08	1.00	0.35

Tableau A.15 : Les données des 03 charges.