

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

**Contrôle de la puissance réactive et
réglage de la tension par les dispositifs
FACTS dans les réseaux électriques**

Réalisé par :

- DERDEGA Abdelhak
- DJEDID Zakaria
- KARMIA Mostapha

Encadré par :

- Dr: KHECHEKHOUCHE Ali

2022-2023

Remerciement

Nous remercions en premier lieu « Allah » pour nous

Avoir donné la force, le courage et la volonté

Nécessaire pour réaliser ce travail.

Nous exprimons nos profonds remerciements et tous nos respects pour nos très chers parents, qui nous ont éduqués ,

encadré et soutenu par tous les moyens, jours après jours

depuis notre naissance jusqu'à ce jour – là

*Nos sincères remerciements pour notre promoteur **Mr***

***A.Khechekhouché** pour ses précieux conseils et ses aides duran*

toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury

pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant

d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leurs

Recommandations.

Nos remerciements vont également à tous les

Personnes qui de loin ou de près ont contribué

A la réalisation de ce modeste travail

Derdega Abdelhak

Djedid Zakaria

Karmia Mostapha

DEDICACES

*Avec l'aide de dieu tout puissant est enfin achevé ce
travail, lequel je dédie à toutes les personnes qui me sont
chères :*

*A ma mère et l'âme pure de mon père pour leurs encouragements et conseils
et leurs soutien permanent durant toutes mes années*

A mes frères, mes cousins, mes oncle

A toute ma grande famille DERDEGA

*A mes chers amis(es) Tous ceux qui ont contribué de près et de loin a
l'aboutissement de ce travail*

*A la fin je dédier très chaleureusement ce mémoire à mon
binômes*

Derdega Abdelhak

DEDICACES

Avec l'aide de dieu tout puissant est enfin achevé ce travail, lequel je dédie à toutes les personnes qui me sont chères :

A ma mère et l'âme pure de mon père pour leurs encouragements et conseils et leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voire atteindre ce but

A mes frères, mes soeurs,

A toute ma grande famille DJEDID

A mes chers amis(es)

A la fin je dédier très chaleureusement ce mémoire à mon binômes

Djedid Zakaria

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents,

A mes frères, mes soeurs,

A toute ma grande famille KARMIA

A toute mes amies

*A la fin je dédier très chaleureusement ce mémoire à mon
binômes*

Karmia Mostapha

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des symboles et abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I	
Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques	
I-1- Introduction	4
I-2 Qualité de la tension	5
I-2-1- Dégradation de la qualité de la tension	5
I-2-2- Variation ou fluctuation de la fréquence	6
I-2-3- Composante lente des variations de tension	6
I-2-4- Fluctuation de tension (flicker)	7
I-2-5- Creux de tension	7
I-2-6- Chutes de tension	8
I-2-7- Tension et / ou courant transitoire	9
I-2-8- Déséquilibre de tension	9
I-3- Puissance Réactive	10
I-3-1- Importance de la puissance réactive	10
I-3-2- Facteur de puissance	11
I-3-3- Représentations graphiques	11
I-3-4- Tangente	11
I-3- 5 Bilan de la puissance réactive	12
I-3-6- Transport de la puissance active et réactive	12
I-3- 7- Contrôles dans le problème tension / puissance réactive	14
I-3-8 -Compensation de la puissance réactive	16
I-3-8-1- Dispositifs conventionnels	17
I-3-8-2- Groupes de production (générateurs)	17
I-3-8-3- Condensateurs	17
I-3-8-4- Inductances	17
I-3-8-5- Compensateurs synchrones	18
I-3-8-6- Compensateurs statiques	18
I-4- Conclusion	19
Chapitre II	
Etude de la compensation de la puissance réactive	
II -1-Introduction	21
II -2- Exploitation d'un réseau électrique	22
II -3- Compensation Traditionnelle	22
II -3-1- Compensation traditionnelle shunt	22
II -3-2- Compensation traditionnelle série	25
II - 4- Dispositifs FACTS	26
II -4.1 Classification des dispositifs FACTS	26

II -4-2Compensateurs shunts	27
II -4-2.1.Compensateurs parallèles à base de thyristors	27
a-SVC (Static Var Compensator)	27
b-Principe de fonctionnement	28
II -4-2.2.Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors	29
a- Compensateur synchrone statique (STATCOM)	29
b-Principe du fonctionnement	30
II -4-3Compensation série	31
II -4-3.1. Principe de fonctionnement	31
II -5- Avantages de la technologie des dispositifs FACTS	32
II -6- Conclusion	32
Chapitre III Modélisation et Simulation du système FACT « SVC »	
III -1-Introduction	34
III.2 Eléments du SVC	34
III.2.1 Condensateur fixe (FC)	34
III.2.2 Réactance commandée par thyristors (TCR)	34
III.2.3 Condensateur commuté par thyristors (TSC)	35
III.3 Modélisation du dispositif SVC	35
III.3.1 Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC	36
III.3.2 Valeurs de consigne du dispositif SVC	37
III.4 Utilisation et Inconvénients de SVC	37
III.4.1 Utilisation de SVC	37
III.4.2 Inconvénients des SVC	38
III.5 Calcule et Modélisation du SVC	38
III.5.1 Réactance contrôlé par thyristor-condensateur fixe (TCR-FC)	39
III.5.2 Calcul des limites de marge de fonctionnement	41
III.5.3 Calcul des paramètres du TSC	42
III.5.4 Calcul des paramètres du TCR	43
III.6 Commande du SVC	44
III.7 Simulation du SVC	45
III.7.1 Description de l'exemple du réseau étudié	46
III.7.2 Résultats de Simulation	47
III.7.3 Interprétation des résultats obtenus	50
III.8 Conclusion	52
conclusion générale	53
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure I.1. Exemple de fluctuation de la fréquence
Figure I.2. Exemple de variations rapide de la tension
Figure I.3. Creux de tension et coupure brèves
Figure I.4. Exemple de cas de surtensions transitoires
Figure I.5. Déséquilibre de tension
Figure I.6. Représentations graphiques
Figure I.7. Circuit équivalent en π d'une ligne électrique
Figure I.8. Impédance série d'une ligne électrique
Figure I.9. Susceptance shunt d'une ligne électrique
Figure I.10. Circuit équivalent du réseau électrique.
Figure I.11. Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.
Figure II.1. Puissance transitée entre deux réseaux
Figure II.2. Représentation d'une ligne HT
Figure II.3. Principe de compensation shunt dans un réseau radial
Figure II.4. Principe de compensation série dans un réseau radia
Figure II.5. Structure d'un SVC, schéma équivalent.
Figure II.6. Présentation d'un Compensateur SVC
Figure II.7. Fonctionnement du Compensateur SVC
Figure II.8. Structure d'un STATCOM (a) schéma équivalent (b) caractéristique tension/courant .
Figure II.9. Structure de STATCOM
Figure II.10. Principe de la compensation série
Figure III-1: Représentation du TCR .
Figure III-2 : Représentation du TSC.
Fig. III. 3 : Modélisation du SVC
Fig. III. 4: Variation de la puissance réactive par un SVC en fonction de la tension nodale
Figure III.5: Cas général de n bancs de TSC et un TCR.
Figure III.6: Configuration du compensateur TCR-FC.
Figure III.7: SVC comporte 3 TSC et un TCR.
Figure III.8: Constitution principale d'un seul TSC.
Figure III.9: Constitution principale du TCR.
Figure III.10: Schéma du circuit de commande du SVC (1TCR+3TSC).
Figure III. 11: Schéma du circuit de commande du SVC (1TCR+3TSC) sur MATLAB.
Figure III.12: Formes d'onde illustrant la réponse dynamique du SVC aux étapes de tension du système (scope SVC).
Figure III.13: Les formes d'onde affichées sur scope TCRrab
Figure III.14: Les formes d'onde affichées sur scope TSC2ab1
Figure III.15: Les formes d'onde affichées sur scope TSC2ab.
Figure III.16: Les formes d'onde affichées sur scope TSC3ab.
Figure III.17: Les formes d'onde affichées sur scope Controller Signal.
Figure III.18: Les formes d'onde affichées sur scope TSC1 Raté.

Symboles et abréviations

Symboles :

S	Puissance apparent
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
QGL	Puissance réactive absorbée
QCO	Puissance réactive consommée
Qc	Puissance réactive produit par condensateur (à compensée)
Qc	totale Puissance à compensée totale
Q	totale L'énergie Réactive Totale
U	Tension composé (entre ligne
Uref	Tension de référence
U1	Tension d'alimentation
U2	Tension à la borne de la charge
I	Courant de ligne
Ia	Courant actif
Ir	Courant réactive
It	Courant apparent (total)
In	Intensité nominale du condensateur
FP	Facteur de puissance
ϕ	Déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension
α	l'angle de la tension au niveau de jeux de barres
U	Chute de tension
f	Fréquence
ω	Pulsation du réseau
T	Temps
R	Résistance série de la ligne
L	Inductance
C	Capacité du condensateur
X	Réactance série de la ligne
Z	L'impédance Série Par Phase
Y	L'admittance Shunt Par Phase En (Siemens)
G	Conductance shunts de la ligne
B	Susceptance shunts de la ligne
PG	Puissance active généré
QG	Puissance réactive généré
Qi	la puissance réactive consommée au nœud
Qgi	la puissance réactive produite par les générateurs de nœud
Qsi	la puissance réactive générée par les sources reliées au nœud
ΔQj	Les pertes réactive dans l'élément « j » du réseau
Qsvc	Puissance réactive du SVC

Abréviations :

HTA	Haute Tension class A
BTB	Basse Tension class B
THT	Très Haute Tension
HT	Haute Tension
MT	Moyenne Tension
BT	Basse Tension
FACTS	Système de Transmission en Courant Alternatif Flexible
SVC	Compensateur Statique
STATCOM	Compensateur Synchrone Statique
TCR	Inductance commutée par thyristors
TSC	Condensateur commuté par thyristors
BTCR	Susceptance totale de TCR
BSVC	Susceptance totale de SVC
ITCR	Le courant de Thyristor
GTO	Gate Turn Off
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
FC	Condensateur fixe
RLC	Circuit résistance bobine condensateur
TSR	Thyristor Switched Reactor
SDO	Simulink Design Optimization

INTRODUCTION GENERALE

A notre époque sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'énergie électrique en grande quantité. Dans ce cas, le fait d'exploiter ces grandes usines d'énergie électrique devient de plus en plus difficile du fait de l'augmentation de leur taille, de la présence de ligne d'interconnexion de grande distance. Déjà ces facteurs nous obligent d'exploiter les réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité [1].

Mais durant les dernières années, les usines de l'énergie électrique sont confrontées à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les systèmes actuels, la cogénération de l'énergie, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité [2].

Jusqu'à la fin des années 1980, les seuls moyens permettant de contrôler les puissances réactives, les tensions et les transits de puissances dans les lignes étaient des dispositifs électromécaniques, à savoir les transformateurs avec régulateur en charge, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permettent pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour ; ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance. Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves.

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle des systèmes sont les dispositifs FACTS << Flexible Alternating Current Transmission System >>.

Les dispositifs FACTS font en général appel à l'électronique de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide et ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmenter la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement,

et stabilisent le comportement du réseau [3] [4].

La recherche rapportée dans ce mémoire est motivée par le souci de perfectionner le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de d'énergie électrique au moyen de dispositifs FACTS , comme celle comportant une branche de réactance commandée par thyristor, tel que le compensateur statique de puissance réactive SVC <<Static Var Compensator>>.

Pour parvenir à cette amélioration, il serait nécessaire de laisser plus de place au contrôle dans les réseaux électriques de sorte à profiter dans la modélisation de ceux-ci. Il est nécessaire aussi de profiter des progrès dans les domaines des télécommunications, du contrôle en temps réel et du traitement des données, dans le but de réduire les temps de réponse de ces dispositifs.

Le compensateur statique SVC est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieure de limites désirées. Le SVC injecte ou absorbe de la puissance réactive dans le nœud où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge [5] .

Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques.

- Dans le deuxième chapitre l'Etude de la compensation de la puissance réactive.

- Le troisième chapitre consacré à l'étude à la modélisation et simulation Compensateur shunt : SVC en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink approprié pour ces tâches. Puis on termine le chapitre avec des discussions comparatives des résultats trouvés. Enfin, présentera les conclusions et perspectives de cette mémoire.

Chapitre I

Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques

I.1. Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents consommateurs d'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie doit être fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Cependant, cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus perturbateur.

Le regain d'acuité de cette perturbation provient de la prolifération récente d'emploi des charges non linéaires, notamment les convertisseurs statiques. En effet, ces dispositifs consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. La circulation de ces courants à travers les diverses impédances du réseau jusqu'à l'utilisateur final fait apparaître des tensions harmoniques superposées à l'onde fondamentale. Les conséquences sont néfastes tant pour le distributeur de l'électricité que pour l'utilisateur.

Pour faire face à ce problème, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations des réseaux électriques et de chercher les solutions appropriées permettant l'atténuation des effets les plus nuisibles [18].

Dans ce chapitre on va classer les différentes perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique et exposer leurs causes et leurs conséquences. Ainsi les solutions de dépollution existantes.

I.2 Qualité de la tension

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- Fréquence.
- Amplitude.
- Forme d'onde.
- Symétrie. [2].

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

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence.

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

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

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté de s'en protéger).

I.2.1. Dégradation de la qualité de la tension

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

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

1. court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
2. causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
3. matérielles (vieillessement d'isolants...).
4. humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

✓ Installations perturbatrices :

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

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension - lorsque celle-ci est présente - sont brièvement décrits ci-après. [3].

I .2.2. Variation ou fluctuation de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ comme illustré sur la figure (1.1).

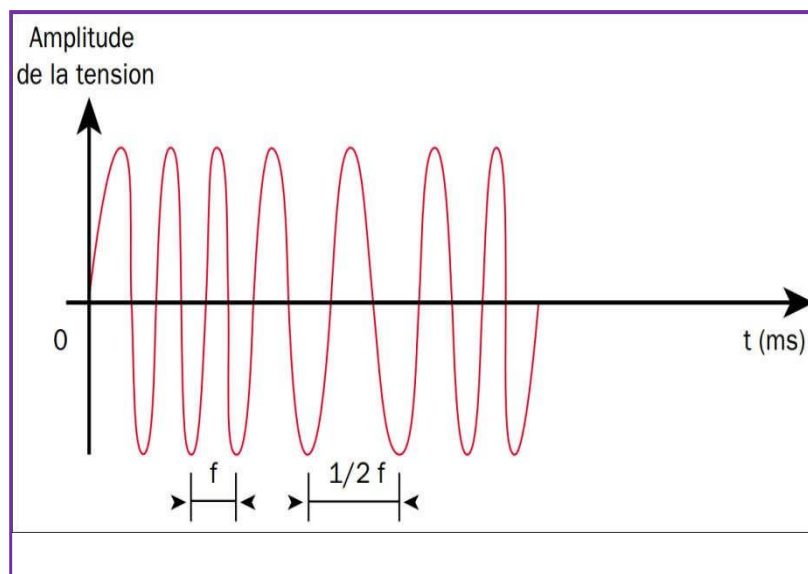


Figure I.1. Exemple de fluctuation de la fréquence

I. 2.3. Composante lente des variations de tension

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les limites contractuelles. On parle de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession de variations rapides dont les amplitudes sont très petites.

Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénient des variations lentes de tension dans une plage d'au moins $\pm 10 \%$ de la tension nominale. [2] [3]

I .2.4. Fluctuation de tension (flicker)

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure1.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que lessoudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

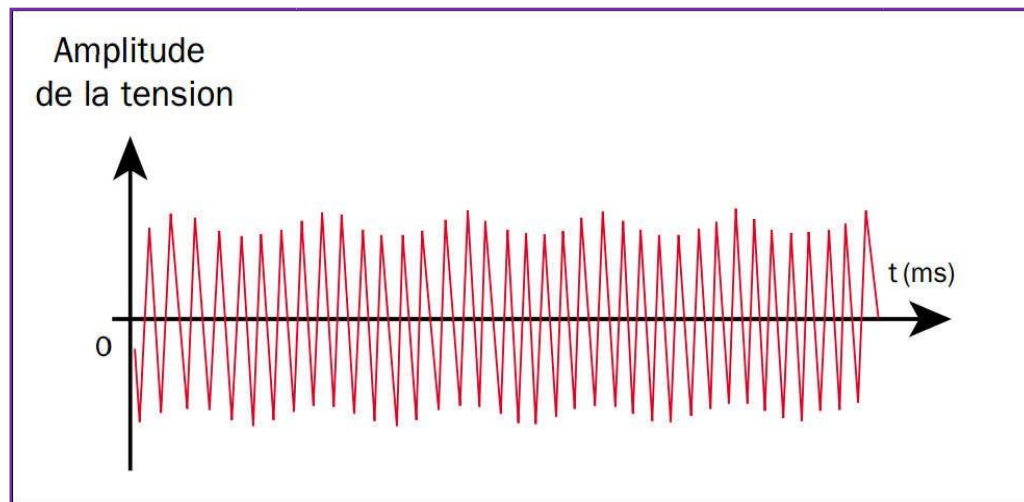


Figure I.2. Exemple de variations rapide de la tension

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 %. [2] [7].

I .2.5. Creux de tension

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure 1.3). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1 - 0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT).

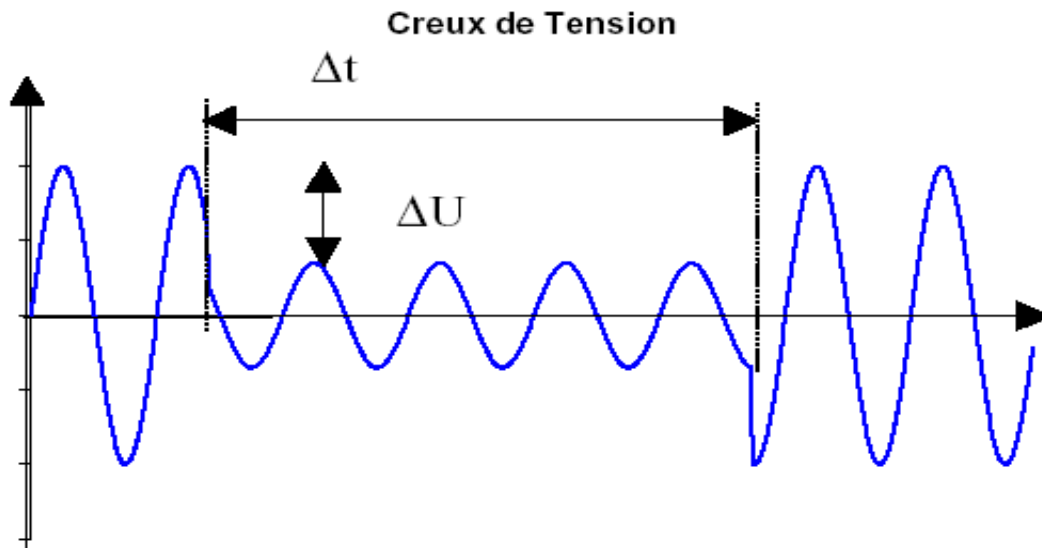


Figure I.3. *Creux de tension et coupure brèves*

Ils sont caractérisés par leurs : amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné. Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures; voire en jours; pertes de données informatiques; dégâts aux produits ...)[5].

I .2.6. Chutes de tension

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est 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, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A l'apogée de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales. [5]

I .2.7. Tension et / ou courant transitoire

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure (1.4) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde [7].

Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants/tensions transitoires.

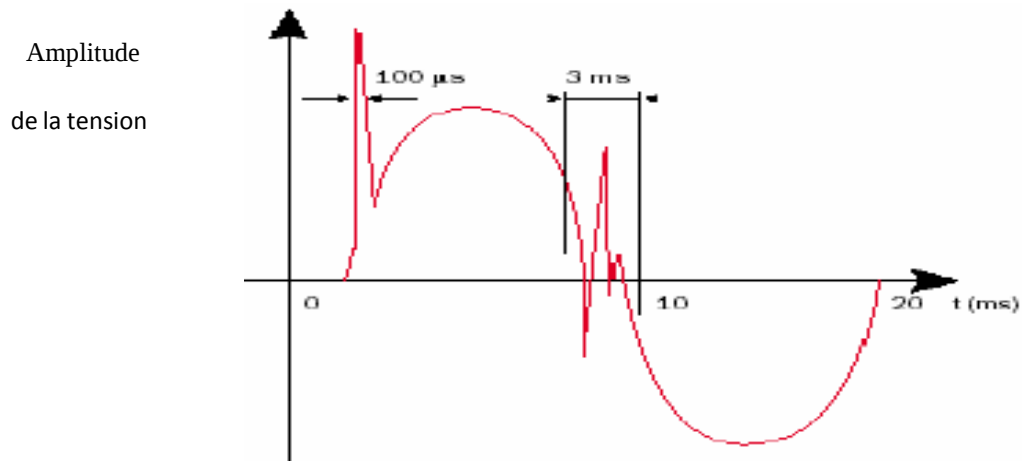


Figure I.4. Exemple de cas de surtensions transitoires

I .2.8. Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° (figure 1.5).

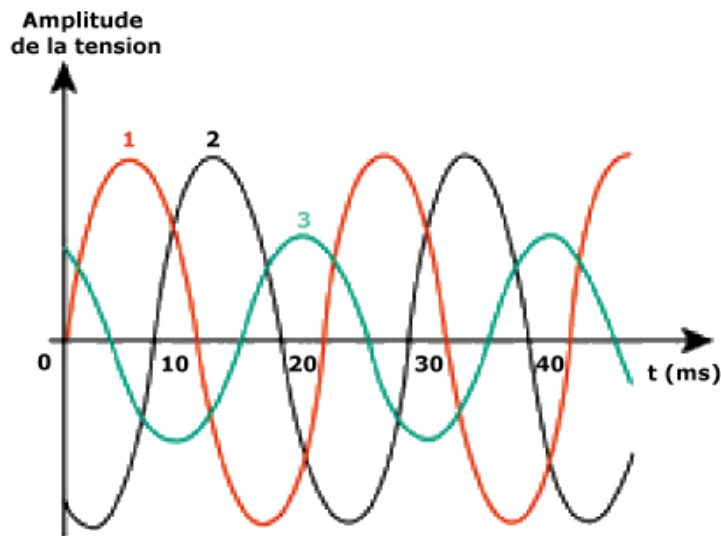


Figure I.5. Déséquilibre de tension

I. 3. Puissance Réactive

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent l'énergie apparente qui correspond à la puissance (ou puissance appelée). Cette énergie se décompose en deux formes d'énergie :

- L'énergie active : transformée en énergie mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- L'énergie réactive : utilisée pour créer des champs magnétiques.

Les consommateurs de puissance réactive sont les moteurs asynchrones, les transformateurs, les inductances (ballasts de tubes fluorescents) et les convertisseurs statiques (redresseurs).

I .3.1. Importance de la puissance réactive

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

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

I.3.2. Facteur de puissance

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

$$FP = \cos \phi = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} \quad (\text{I-1})$$

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

- Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation. Il permet d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateur de puissance réactive.
- Un facteur de puissance égale à 1 ne conduira à aucune consommation de la puissance réactive (résistive pure).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à consommation de la puissance réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductive pure).

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

I.3.3. Représentations graphiques

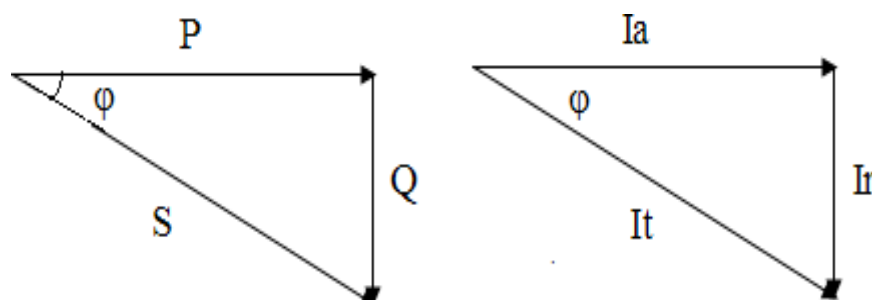


Figure I.6. Représentations graphiques

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

I.3.4. Tangente

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

$$tg\varphi = \frac{\text{énergie réactive}}{\text{énergie active}} = \frac{Q(VAR)}{P(W)} \quad (I-3)$$

I .3.5. Bilan de la puissance réactive

L'expression suivante nous donne le bilan énergétique :

$$\sum_{i=1}^n Qi(t) = \sum_{i=1}^n Qgi(t) + \sum_{i=1}^n Qsi(t) - \sum_{j=1}^m \Delta Qj(t) \quad (I-4)$$

Avec :

N : le nombre des nœuds du réseau M : le nombre des éléments du réseau

$Qi(t)$: la puissance réactive consommée au nœud « i »

$Qgi(t)$: la puissance réactive produite par les générateurs de nœud « i »

$Qsi(t)$: la puissance réactive générée par les sources reliées au nœud « i »

$\Delta Qj(t)$: Les pertes réactive dans l'élément « j » du réseau

I .3.6. Transport de la puissance active et réactive:

Quand un régime permanent de circulation d'énergie est établi dans un réseau électrique .on peut écrire les équations reliant les puissances actives **Pi** et réactives **Qi** injectées ou soutirées en chaque sommet i et les tensions en modules **|V|** et phases **θ**. La détermination des tensions et courants sur une ligne électrique peut être effectuée en utilisant la notation complexe. [6]. En schématisant chaque liaison (du sommet i au sommet k) par un π symétrique tel que (i=1, k=2)

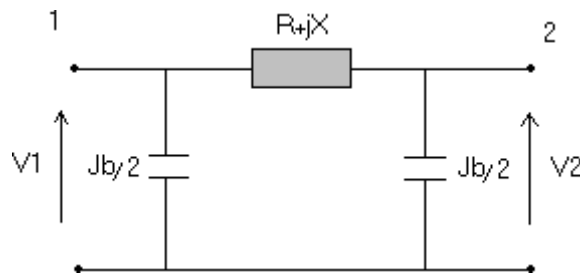


Figure I.7. Circuit équivalent en π d'une ligne électrique

Les lignes sont normalement spécifiées par :

- Une impédance série : $Z = R + jX \text{ } \Omega/\text{Km}$

- Une admittance shunt : $Y = G + jB$ $\mu\text{mhos/Km}$

En pratique G est extrêmement petit ($G=0$) et par conséquent $j B=j \omega C$ ou B représente la susceptance shunt $\mu\text{mhos /Km}$.

Il y a de plus un bilan de conservation, aux pertes près, sur $\sum P_i$ et $\sum Q_i$ ce bilan peut être assuré par un sommet quelconque (ou l'on peut aussi fixer $\theta = 0$). [6]

a) Impédances séries

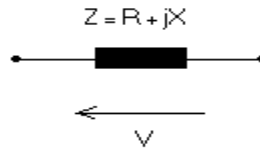


Figure I.8. Impédance série d'une ligne électrique

Les pertes dans les impédances série sont données par:

$$S = V \cdot I^* \quad (I - 5)$$

$$V = Z \cdot I \text{ c'est-à-dire que } S = Z I I^* = Z (I_r + j I_i) (I_r - j I_i) \quad (I - 6)$$

$$S = P + j Q = Z (I_r^2 + I_i^2) = Z |I|^2 \quad (I - 7)$$

Avec :

$$P = R |I|^2 \quad \text{et} \quad Q = X |I|^2$$

Si $R = 0$ alors $P = 0$,

$X = 0$ alors $Q = 0$,

b) Susceptance shunt

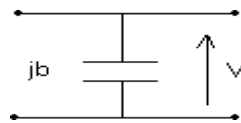


Figure I.9. Susceptance shunt d'une ligne électrique

En complexe la tension peut s'écrire :

$$V = V_r + j V_i \quad (I - 8)$$

$$I = j B V = j B (V_r + j V_i) = -B V_i + j B V_r \quad (I - 9)$$

$$I^* = -B V_i - j B V_r = -B (V_i + j V_r) \quad (I - 10)$$

La puissance S dans la Susceptance est donnée par $S = V I^* = P + j Q$ c'est-à-dire que :

$$S = V I^* = (V_r + j V_i) (-B (V_i + j V_r)) = -B (V_r + j V_i) (V_i + j V_r) \quad (I - 11)$$

$$S = -jB (V_r^2 + V_i^2) = -jB|V|^2 \quad (I - 12)$$

Comme $S = P + jQ$, donc $P = 0$ et $Q = -jB|V|^2$

en d'autre termes la puissance réactive Q est délivrée par la Susceptance de la ligne.

I.3.7. Contrôles dans le problème tension / puissance réactive

Un système est dit bien conçu s'il peut délivrer une énergie d'alimentation fiable et de bonne qualité par bonne qualité on entend un niveau de tension dans des limites acceptables. Chaque fois que le niveau de tension en un point du système est soumis à des variations cela est dû à un déséquilibre entre la puissance fournie et consommée.

En effet quand une charge est alimentée à travers une ligne de transmission dont la tension de départ est constante, la tension de la charge dépend de l'amplitude de la charge et du facteur de puissance de la charge. La variation de tension en un nœud est un indicateur de déséquilibre entre la puissance réactive délivrée et celle consommée cependant une importation de la puissance réactive donne une augmentation des pertes de puissances et de la chute de tension à travers l'impédance d'alimentation.

a) Chute de tension sur une ligne

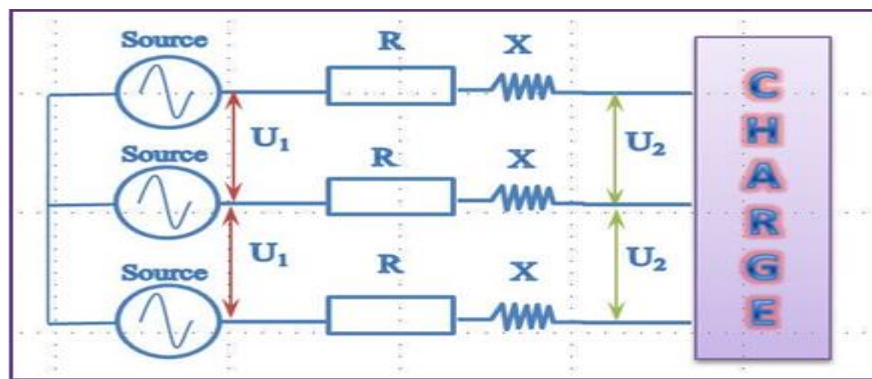


Figure I.10. Circuit équivalent du réseau électrique.

Afin d'illustrer les relations entre la puissance réactive et la chute de tension, considérons le circuit équivalent ci-dessous. La chute de tension due au courant I dans l'impédance.

$$Z = R + j X \text{ est } \Delta V = ZI = V_1 - V_2 \quad (I - 13)$$

Si nous traçons le diagramme vectoriel de ce circuit.

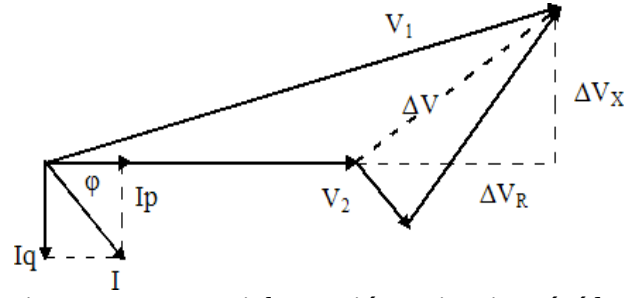


Figure I.11. Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.

V2 étant pris comme référence

$$S_D = V_2 \cdot I = P_D + j Q_D \quad (I-14)$$

$$I = (P_D - j Q_D) / V_2 \quad (I-15)$$

$$\Delta V = ZI = (R + j X) (P_D - j Q_D) / V_2 \quad (I-16)$$

$$\Delta V = (R \cdot P_D + X \cdot Q_D) / V_2 + j (X \cdot P_D - R \cdot Q_D) / V_2 \quad (I-17)$$

$$\Delta V = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (I-18)$$

C'est-à-dire que la chute de tension a une composante ΔV_R en phase avec V_2 et une composante ΔV_X en quadrature avec V_2 .

Il est clair que la chute de tension dépend simultanément de la puissance active et réactive de la charge.

Comme $\Delta V = V_1 - V_2$ donc $V_1 = V_2 + \Delta V$ et en considérant de V_1 .

$$|V_1|^2 = (V_2 + \Delta V_R)^2 + (\Delta V_X)^2 \quad (I-19)$$

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{R P_D + X Q_D}{V_2} \right)^2 + \left(\frac{X P_D - R Q_D}{V_2} \right)^2 \quad (I-20)$$

Comme $\Delta V_X < (V_2 + \Delta V_R)$ on peut approximer

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{R P_D + X Q_D}{V_2} \right)^2 \quad (I-21)$$

$$V_1 - V_2 = \left(\frac{R P_D + X Q_D}{V_2} \right) \quad (I-22)$$

Puisque la réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance du réseau c'est-à-dire $R \ll X$, on peut écrire que :

$$\Delta V = V_1 - V_2 \approx \frac{X Q_D}{V_2} \quad (I-23)$$

Donc la cause de la chute de tension à travers une impédance est due principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est due à la variation de la puissance réactive.

Pour maintenir V_2 constante si la courant I change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

b) Contrôle de la tension

La chute de tension sur un élément de réseau s'exprime par :

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2} \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (I.24)$$

L'examen de cette équation montre que pour maintenir V_2 constante au niveau du consommateur. On dispose de plusieurs solutions à savoir :

- Augmentation de la tension de départ V_1 .
- Diminution de la réactance de la ligne par insertion de réactance capacitive.
- Fourniture de la puissance réactive au niveau des usagers (compensation de la puissance réactive). Cette compensation peut être obtenue soit par :
 - la connexion de capacité shunts
 - la connexion de compensateur synchrone
 - la connexion de réactance shunt (pour les faibles charges, ou charges capacitatives) [6]

I .3.8. Compensation de la puissance réactive

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

Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension. L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs aux caractéristiques très différentes [8]

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

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

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

I .3.8.1. Dispositifs conventionnels

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

I .3.8.2. Groupes de production (générateurs)

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

I .3.8.3. Condensateurs

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

- a) Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
- b) Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.

I .3.8.4. Inductances

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

I .3.8.5. Compensateurs synchrones

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

I .3.8.6. Compensateurs statiques

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. Chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi- période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. [8].

Tableau I.1. Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive.

Contrôles par génération de la puissance réactive					
	Ajustable en Continu	Capacitive	Inductive	Réponse rapide	Control Local
Générateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui, dépend du système d'excitation	Oui
Condensateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Batteries de condensateurs	Non, plusieurs gradins. (discret)	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Oui
Réactances	Non, (discret) Généralement une ou deux unités par ligne	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	-

I .4. Conclusion

Le contrôle de la tension/puissance réactive a pour objectif de maintenir un profil adéquat dans le réseau de transport d'énergie électrique. En plus, il doit maintenir des réserves de puissance réactive dans les différentes zones du système pour faire face aux incidents de tension. On doit tenir en compte que les problèmes de tension doivent être corrigés localement étant donné, que la majorité des moyens qu'on peut prendre pour résoudre ces problèmes ont une étendue fondamentalement locale.

La complexité du contrôle des tensions et de la puissance réactive en temps réel, oblige la décomposition géographique et temporaire du problème, en définissant une structure hiérarchique du contrôle tension/puissance réactive. La décomposition géographique peut être ajustée localement du problème réactif et la propre topologie du système électrique. D'autre part la décomposition temporaire, est imposée par les temps caractéristiques associés par rapport aux contrôles rencontrés dans chaque niveau hiérarchique. [7]

Chapitre II

Etude de la compensation de la puissance réactive

II.1. Introduction

La dérégulation du marché de l'électricité, qui concerne progressivement tous les pays, modifie profondément l'approche technico-économique dans l'exploitation et l'optimisation des réseaux électriques. C'est dans ce nouveau contexte que les spécialistes des réseaux électriques se voient de plus en plus confrontés à de nombreux défis. Le développement des dispositifs FACTS (*Flexible AC Transmission System*) ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure exploitation des réseaux par leur action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau.

Les dispositifs FACTS, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnement. Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Réduire des pertes actives totales.
- Compenser l'énergie réactive.
- Amortir les oscillations de puissance.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.
- Maîtriser la répartition et les transits des puissances.
- Améliorer des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production.
- Permettre un meilleur contrôle et une meilleure gestion de l'écoulement de puissance.
- Augmenter la capacité de transmission de puissance des lignes en s'approchant des limites thermiques de celle-ci.

Les dispositifs FACTS en générale permettent donc un contrôle amélioré des systèmes électriques déjà en place. Ces dispositifs font en général appel à de l'électronique de puissance. Ces éléments agissent en fait comme des impédances dont la valeur change en fonction de l'angle d'amorçage. Cet angle d'amorçage constitue donc une variable de commande du système. Pour les différentes raisons évoquées dans l'introduction générale,

les dispositifs FACTS ont un rôle important à jouer dans le contrôle des transits de puissance et dans le maintien de conditions d'exploitation sûres du réseau de transport. Ce chapitre a pour but de mettre en évidence les caractéristiques et le potentiel des différents FACTS développés à ce jour. Il commence par un bref rappel sur les différentes techniques de compensation (shunt, série et shunt-série). Le concept FACTS est ensuite présenté de manière générale et une classification des dispositifs est proposée.

II.2. Exploitation d'un réseau électrique

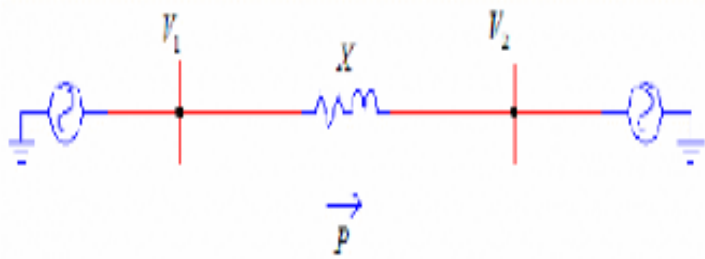


Figure II.1. Puissance transitée entre deux réseaux

La puissance active P transitée entre deux réseaux de tensions V_1 et V_2 présentant un angle de transport δ (déphasage entre V_1 et V_2) et connectés par une liaison d'impédance X est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \cdot \sin \delta \quad (\text{II.1})$$

Il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements. [09]

II.3. Compensation Traditionnelle

II.3.1. Compensation traditionnelle shunt

La compensation parallèle (*shunt*) consiste à enclencher des condensateurs shunt et/ou des disjoncteurs à différents endroits sur le réseau pour modifier l'impédance des lignes, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau.

Ces éléments permettent de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites contractuelles. Cette technique de compensation est dite passive car elle fonctionne en tout ou rien. C'est-à-dire qu'elle est soit en service, par exemple lorsqu'une inductance shunt est enclenchée, soit complètement hors service lorsque l'inductance est retirée. Lorsqu'elle est en service, aucune modification des inductances ou des condensateurs n'est effectuée pour essayer de contrôler la tension ou l'écoulement de puissance.

D'après la figure 2.2, on voit que ces équipements permettent aussi d'augmenter la puissance active transitée. La puissance transitée peut être augmentée de 50% pour une compensation au niveau de la charge et de 100% pour une compensation au point milieu.

Une ligne HT peut être modélisée par un schéma en Π représentée par la figure 2.2

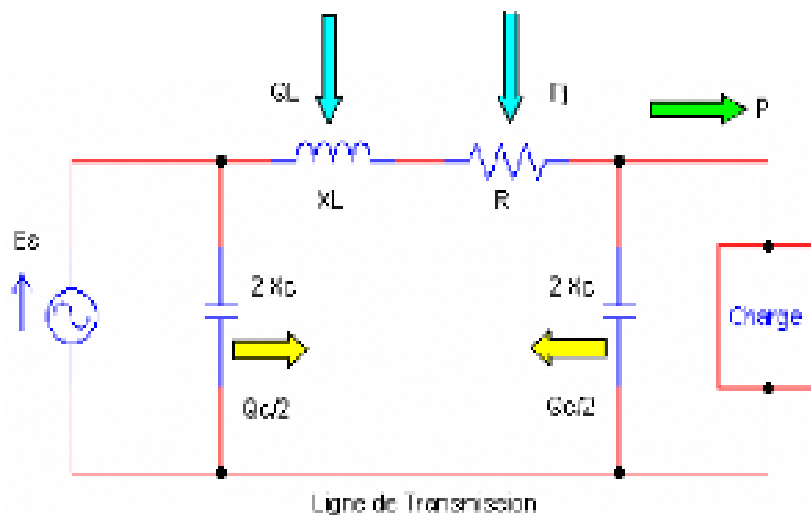


Figure II.2. Représentation d'une ligne HT

Lorsque le réseau n'est pas ou peu chargé, c'est-à-dire que l'impédance de la charge est très élevée, la tension sur la ligne a tendance à monter considérablement (effet FERRANTI), cette augmentation de tension est d'autant plus importante que le réseau est exploité à tension élevée et que les lignes sont longues. Pour réduire la tension en bout de ligne, il faut augmenter artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne en diminuant sa capacité shunt. Des inductances shunt sont enclenchées à différents postes sur le réseau. Cependant, lorsque le réseau est fortement chargé, dans ce cas l'impédance de la charge est très faible et la tension a tendance à diminuer sur le réseau. Pour compenser cet effet, il s'agit

de diminuer artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne pour la rendre égale, ou la plus près possible, de l'impédance de la charge. Les réactances shunt deviennent inutiles. Pour maintenir la tension dans les limites contractuelles, le gestionnaire du réseau doit donc augmenter la capacité shunt de la Ligne et connecter des condensateurs shunt dans différents postes du réseau selon la charge

Les batteries de condensateurs vont compenser la puissance réactive absorbée par la charge et ainsi éviter la transmission de puissance réactive sur de longues distances. De même que les réactances, ces batteries de condensateurs doivent être connectées/déconnectées par des disjoncteurs.

Dans le cas théorique où la compensation est répartie sur toute la longueur de la ligne, le degré de compensation shunt d'une ligne est défini comme étant le rapport de la valeur absolue de la Susceptance du compensateur par unité de longueur (B_{sh}) sur la Susceptance de capacité de ligne par unité de longueur.

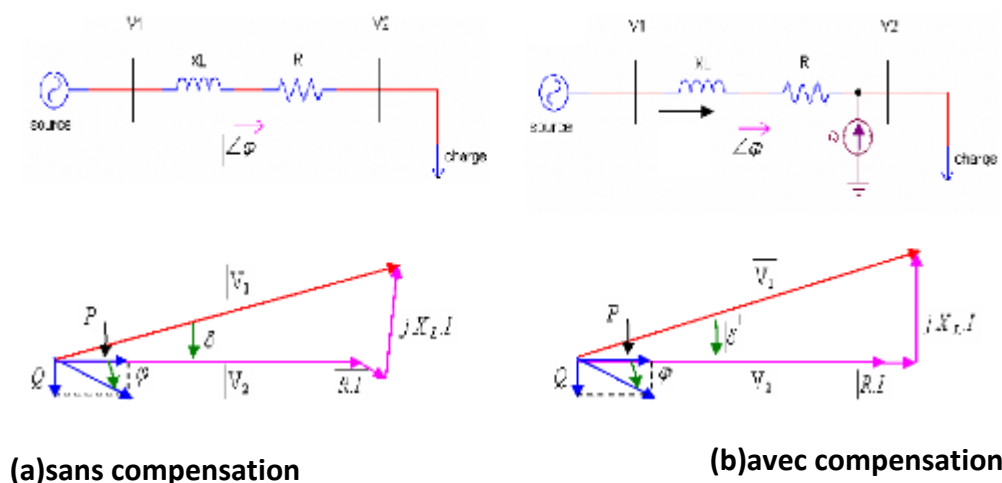


Figure II.3. Principe de compensation shunt dans un réseau radial

On constate aussi que la longueur électrique de la ligne est également modifiée avec la compensation shunt. La compensation réactive shunt est un bon moyen pour contrôler l'impédance caractéristique, dans le but de maintenir un niveau de tension acceptable sur les lignes de transport d'électricité. Par contre, elle ne constitue pas un bon moyen pour augmenter la puissance maximale transportable. En pratique, la compensation shunt passive est utilisée principalement pour maintenir la tension à toutes les barres du réseau à un niveau proche de la tension nominale, et ce pour les différents niveaux de charge du réseau. Il est clair que les équipements de compensation ne sont pas distribués de façon uniforme le long de la ligne comme le sont les inductances et les condensateurs du circuit équivalent d'une ligne.

La compensation est localisée dans des postes qui sont répartis à des endroits stratégiques sur la ligne. Puisque la compensation n'est pas répartie d'une façon uniforme, il est impossible de maintenir la tension à sa valeur nominale en tout point de la ligne. Il est donc important de bien sélectionner les endroits où la compensation shunt est installée pour éviter que la tension s'écarte trop de sa valeur nominale. [07] [09]

II.3.2. Compensation traditionnelle série

L'équation (II.1) montre que la puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction d'une batterie de condensateurs d'impédance X_c en série avec la ligne. Les condensateurs ajoutés ont une capacité fixe qui ne varie pas dans le temps. Cette compensation permet d'une part de diminuer Z_o et d'autre part de diminuer la longueur électrique de la ligne.

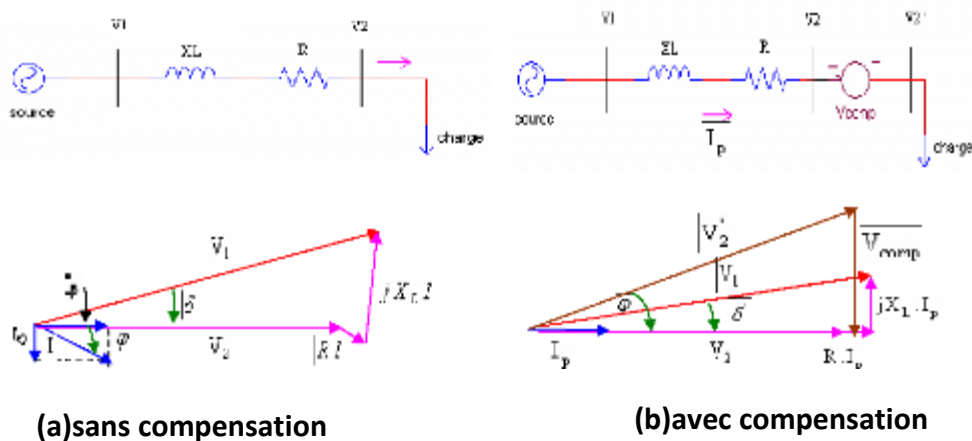


Figure II.4. Principe de compensation série dans un réseau radial

Artificiellement l'impédance de la ligne est donc réduite de X_L à $(X_L - X_c)$ et le transit de puissance est augmenté. De plus, comme le montre le diagramme de Fresnel illustré sur la figure 2.4. En pratique, la compensation série est localisée dans des postes situés à des endroits stratégiques sur les lignes. Pour mieux comprendre son influence il est utile de considérer qu'elle est répartie uniformément sur toute la longueur de la ligne. Dans ce cas, le degré de compensation série se définit comme étant la valeur absolue du rapport de la Susceptance inductive série de la ligne par unité de longueur sur la Susceptance par unité de longueur de lacapacité série qui est ajoutée. Plus le degré de compensation est élevé plus l'impédance virtuelle est faible, ce qui contribue à augmenter la puissance maximale transportable par la ligne. D'autre part, la longueur électrique virtuelle de la ligne s'écrit.

Pour transporter la puissance de façon stable il est nécessaire que l'angle de transmission α soit inférieur à 90 degrés, et idéalement assez faible pour prévoir les cas d'un appel de puissance à la suite d'une perturbation sur le réseau. Si le profil de la tension sur la ligne compensée est pratiquement plat, ce qui est le cas lorsque la ligne est bien compensée, la puissance absorbée par la charge est pratiquement égale à la puissance virtuelle de la ligne. La compensation série augmente la puissance maximale transportable, en diminue l'angle de transmission de la ligne. Ces deux effets font en sorte qu'elle est un moyen très efficace d'augmenter la limite de stabilité en régime permanent du réseau et par conséquent la stabilité dynamique et transitoire. Cependant du fait du nombre limité d'opérations et des délais d'ouverture/fermeture des disjoncteurs, ces réactances et condensateurs connectés en parallèles ou en séries ne doivent pas être commutés trop souvent et ne peuvent pas être utilisés pour une compensation dynamique des réseaux. Dans le cas où le contrôle du réseau nécessite des commutations nombreuses et/ou rapides, on fera appel à des dispositifs FACTS.

II.4. Dispositifs FACTS

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante : Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant. [03]

II.4.1. Classification des dispositifs FACTS

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

✓ Génération I

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

✓ Génération II

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

✓ Génération III

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

II.4.2. Compensateurs shunts

Les compensateurs shunts injectent du courant au réseau via le point de leur raccordement. Leur principe est basé sur une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, qui consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs shunts les plus utilisés sont les SVC et les STATCOM. [10]

II.4.2.1-Compensateurs parallèles à base de thyristors

a – SVC (static Var Compensator) :

- Le SVC (static Var Compensator) est une association des dispositifs TCR (Thyristor Controlled Reactor), TSC (Thyristor Switched Capacitor), batterie de condensateurs fixes et des filtres d'harmoniques. Ces dispositifs constituent le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du sud. Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut [18].

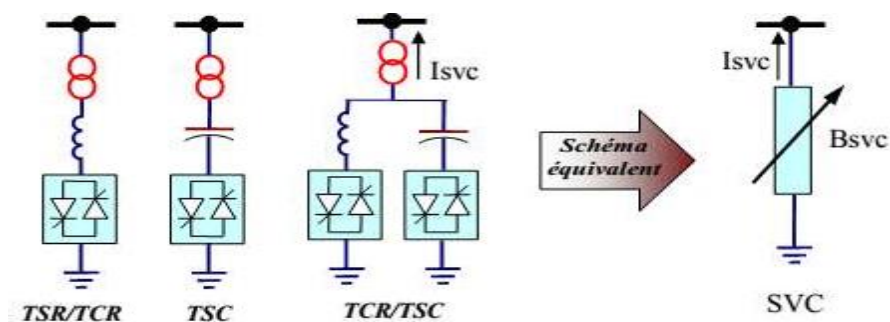


Figure. II.5. Structure d'un SVC, schéma équivalent.

Un SVC supposé idéal ne contient pas de composant résistif $G_{svc} = 0$, donc il ne

consomme pas d'énergie active du réseau. Sa puissance réactive est fonction de la tension au jeu de barre de connexion et de la susceptance B_{svc} , [11].

$$P_l = 0 ;$$

$$Q_l = -|V_l|^2 \cdot B_{svc}$$

b- Principe de fonctionnement

La figure (2.6) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive X_C et d'une bobine d'inductance avec la réactance X_L . Ce système utilise l'angle d'amorçage α des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu [12]

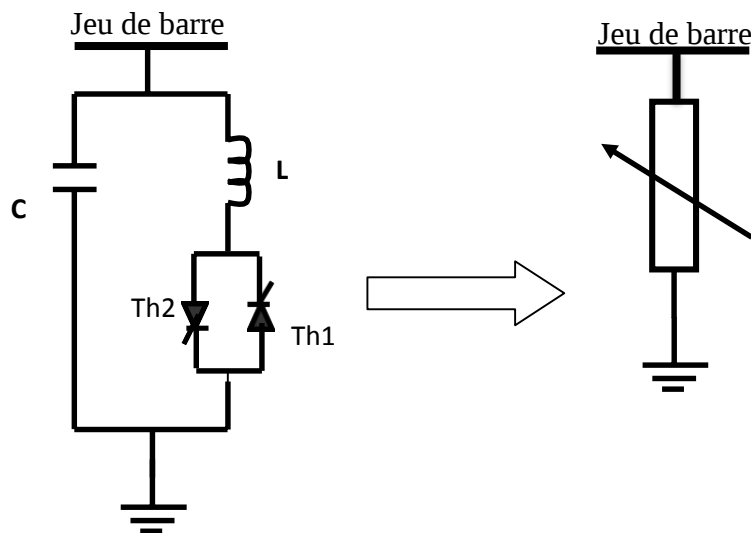


Figure II.6. Présentation d'un Compensateur SVC

Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisqu'il est constitué d'éléments inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateurs commandés par thyristor (CCT) qui fournissent de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies. Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés sur les harmoniques à éliminer. L'association de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif a été installé en 1979 en Afrique du Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (2.7) trois zones sont distinctes :

- Pour $V_{MIN} \leq V \leq V_{MAX}$: est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.
- Pour $V > V_{MAX}$: est une zone où le RCT donne son énergie maximale (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V < V_{MIN}$: est une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.

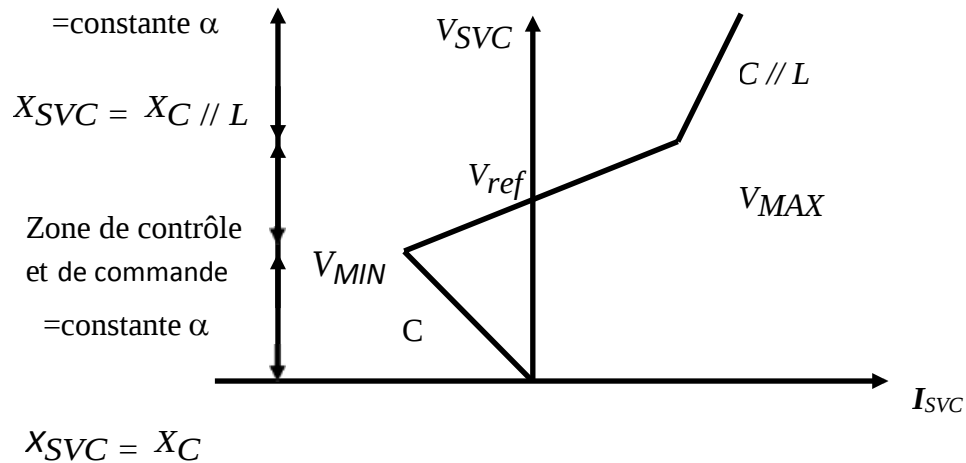


Figure II.7. Fonctionnement du Compensateur SVC

II.4.2.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

a- Compensateur synchrone statique (STATCOM)

Est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage (Figure 2.8.a), Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone, et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques tel que sa dynamique rapide et son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones. Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud. [13]

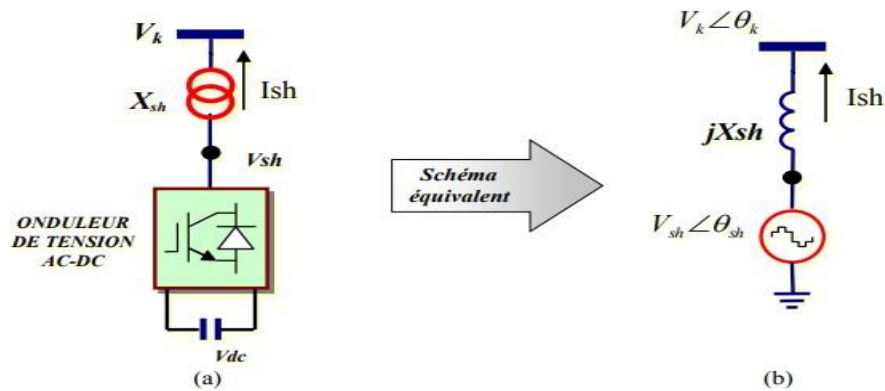


Figure II.8. Structure d'un STATCOM (a) schéma équivalent (b) caractéristique tension/courant .

b- Principe du fonctionnement

STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur. Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est à dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec les réseaux électriques. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur (V_s), laquelle est en phase avec la tension du réseau (E). Les avantages sur le compensateur synchrone sont nombreux :

- Bonne réponse dynamique : le temps de réponse est presque instantané,
- Il n'y a pas d'inertie,
- Le coût d'entretien est minimal et il n'y a pas de possibilité d'instabilité rotationnelle.

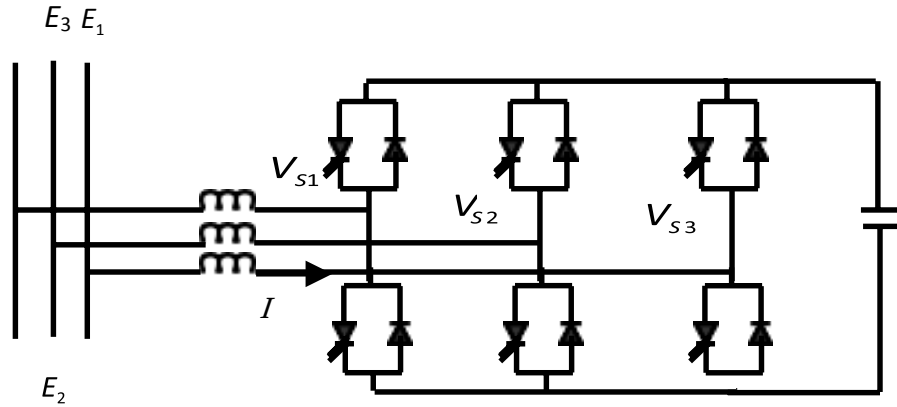


Figure II.9. Structure de STATCOM

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

L'échange d'énergie réactive se fait par le control de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau E .

II.4.3. compensation série

Des condensateurs série ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années pour améliorer la stabilité et les aptitudes de charge de réseaux de transport haute tension. Ils travaillent par l'insertion de tension capacitive pour compenser la chute de tension inductive sur les lignes, c'est-à-dire qu'ils réduisent la réactance effective des lignes de transport.

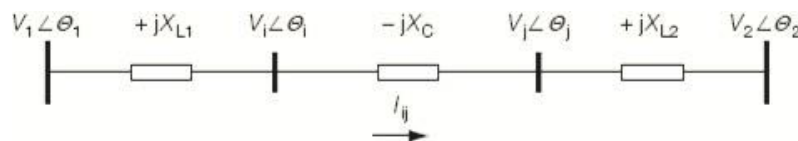


Figure II.10. Principe de la compensation série

II.4.3.1. Principe de fonctionnement

Les effets de la compensation série sur un système énergétique peuvent se résumer comme suit. La tension insérée par un condensateur série est proportionnelle et perpendiculaire au courant de la ligne. Ce faisant, la puissance réactive fournie par le

condensateur est proportionnelle au carré du courant. Il en résulte que le condensateur série a un effet d'autorégulation. Lorsque la charge du système croît, la puissance réactive produite par le condensateur série augmente également. Régulation de la tension en régime permanent et prévention des chutes de tension.

Un condensateur série est en mesure de compenser la chute de tension sur une ligne de transport due à l'inductance série. A faible charge, la chute de tension est plus faible et la tension de compensation série est plus basse. Lorsque la charge augmente et que la chute de tension devient plus importante, la contribution par le compensateur série augmente et la tension du système est réglée de manière correspondante. La compensation série élargit aussi la zone de stabilité de la tension en réduisant la réactance de la ligne. [12]

II.5. Avantages de la technologie des dispositifs FACTS

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Amélioration de la qualité de l'énergie
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

II.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), ainsi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le SVC, STATCOM. Cette classification est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique. Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux.

Nous avons choisi d'étudier le SVC (Static Var Compensator) comme dispositifs FACTS pour contrôler et améliorer la tension et la puissance réactive dans un réseau d'énergie électrique. Une étude et concerne la modélisation et simulation du contrôleur SVC dans l'écoulement de puissance sera détaillée dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Modélisation et simulation de système FACT « SVC »

III.1 Introduction

Le compensateur statique de l'énergie réactive est apparu dans les années 70, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes. Plusieurs conceptions différentes ont été proposées. Toutefois, la plupart des SVC sont construits à partir des mêmes éléments de base permettant de fournir ou d'absorber de la puissance réactive.

Dans ce chapitre, on présente le principe de fonctionnement du SVC, sa constitution et son modèle, puis nous allons discuter quelques applications du SVC, ses avantages et inconvénients. Est consacré à la simulation du SVC introduits dans un réseau électrique a deux nœuds électriques et voir leurs influences sur la stabilité de tension, Cette simulation a été performée dans l'environnement « MATLAB/SIMULINK ». Le fonctionnement du SVC dans un réseau électrique a était bien défini dans le chapitre II ; Les résultats de simulations avec SVC sont bien présentés et interprétés

III.2 Eléments du SVC

Le compensateur statique SVC est composé de plusieurs éléments tel que le condensateur fixe (FC), qui est commandé par des éléments mécaniques; d'une réactance commandée par thyristors (TCR), et de condensateurs commutés par thyristors (TSC), et parfois de réactance commutée par thyristors (TSR), et des filtres d'harmoniques.

III.2.1 Condensateur fixe (FC)

Le condensateur fixe fournit au jeu de barre une puissance réactive fixe, il est connecté au réseau mécaniquement et comporte un contrôle pour l'ouverture du disjoncteur qui le relie au jeu de barre.

III.2.2 Réactance commandée par thyristors (TCR)

Principe de fonctionnement

La réactance commandée par thyristors TCR (Thyristor-Controlled Reactor) possède une bobine d'inductance fixe "L" branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle montré dans la figure (III-1), La réactance contrôlée par thyristors permet un contrôle plus fin de la puissance réactive car elle permet un contrôle continu du courant de compensation.[4][5]

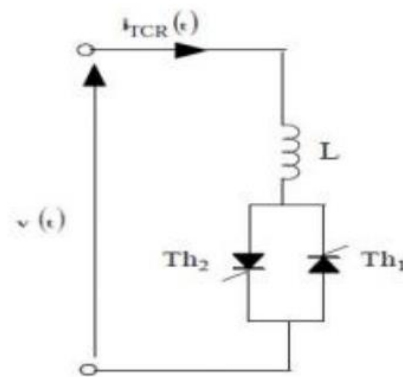


Figure III-1: Représentation du TCR .

III.2.3 Condensateur commuté par thyristors (TSC)

Le condensateur commuté par thyristors TSC (Thyristor-Switched Capacitor) est composé d'un condensateur fixe "C" branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle et une bobine d'inductance d'atténuation "L". figure (III-2). [8]

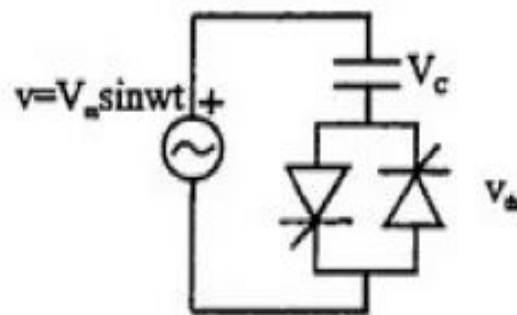


Figure III-2 : Représentation du TSC.

III.3 Modélisation du dispositif SVC

Les dispositifs FACTS shunt modélisés sont des compensateurs statiques de puissances réactives tels que le SVC et autres dérivés (TCR, TSC). Bien qu'ils présentent des performances moins bonnes que le compensateur statique synchrone, elles ne sont guère importantes en régime permanent. De plus, les simulations sont réalisées pour des cas où les tensions sont proches de la valeur nominale. Dans cette situation, le SVC présente des caractéristiques semblables. [4] [10]

III.3.1 Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC

Le dispositif SVC est modélisé par une admittance shunt Y_{SVC} variable (figure III.3.a). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire:

$$Y_{SVC} = j b_{SVC} \quad (III.1)$$

La susceptance b_{SVC} peut être de nature capacitive ou inductive afin respectivement de fournir ou d'absorber, de la puissance réactive Q_{SVC} (figure III. 3.b).

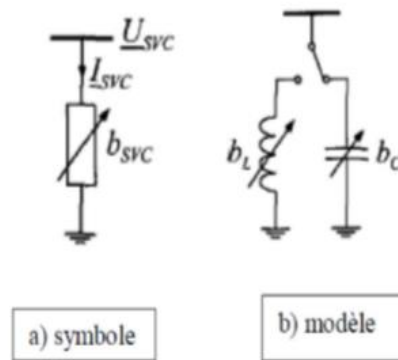


Fig. III. 3 : Modélisation du SVC [7]

Les valeurs des SVC sont exprimées sous forme de puissance réactive Q_{SVC} absorbée à la tension nominale U_n . La correspondance avec la susceptance b_{SVC} est donnée par la relation

$$Q_{SAV} = -U_n^2 \cdot b_{SVC} = -U_n^2 \frac{X_C[2(\pi-\alpha)+\sin(2\alpha)]-\pi X_L}{\pi X_C X_L} \quad (III.2)$$

La puissance réactive réellement absorbée par le SVC est donnée par:

$$Q_{SVC} = -\frac{U^2}{U_n} \cdot B_{SVC} \quad (III.3)$$

Le signe « moins » indique que le SVC fournit de la puissance réactive au système lorsqu'il est capacitif alors qu'il en consomme lorsqu'il est inductif. La variation de la puissance réactive injectée en fonction de la tension est représentée à la figure (III. 4) pour plusieurs valeurs de compensation .[10]

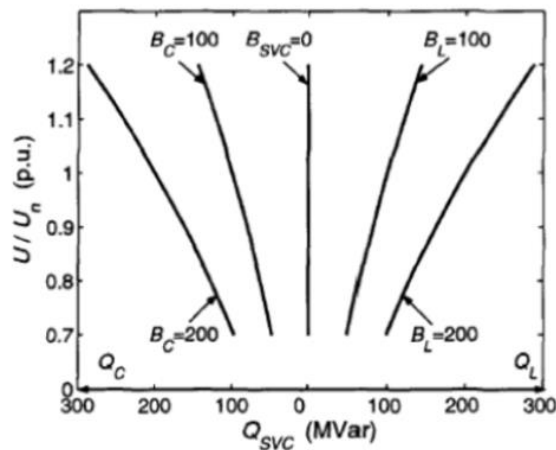


Figure. III. 4: Variation de la puissance réactive par un SVC en fonction de la tension nodale.

III.3.2 Valeurs de consigne du dispositif SVC

Les valeurs du compensateur statique de puissance réactive sont exprimées sous forme de puissances réactive injectées à une tension de 1p.u.

Une valeur positive indique que le dispositif fournit de la puissance réactive au système alors qu'il en absorbe, lorsque Q_{SVC} est négative. Un SVC peut prendre n valeurs discrètes compris dans l'intervalle : $-Q_{L \max} \leq Q_{SVC} \leq Q_{C \max}$

Si le compensateur statique est de type condensateur commuté par thyristor (TSC), seule une injection de puissance réactive est possible et

$Q_{L \max} = 0$. La puissance réactive au réseau est limitée par : $0 \leq Q_{TSC} \leq Q_{C \max}$

Dans le cas d'une inductance contrôlé par thyristor (TCR ou TSR), la puissance réactive peut uniquement être absorbée et $Q_{C \max} = 0$. Exprimée sous forme d'injection, la puissance réactive du TCR peut être prendre des valeurs entre : $0 \geq Q_{TSC} \geq Q_{C \max}$

À l'heure actuelle, il existe des dispositifs shunt dont la puissance réactive maximale peut atteindre 500 MVar. Pour l'optimisation, les valeurs limites des SVC ne sont pas fixées, mais sont adaptées en fonction du réseau dans lequel les FACTS sont à placer.

III.4 Utilisation et Inconvénients de SVC

III.4.1 Utilisation de SVC

Les compensateurs statiques de puissance réactive ont été utilisés dans les réseaux électriques pour résoudre une variété de problèmes, à savoir:

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

- Augmenter la capacité de transport de puissance active du réseau.
- Réduire les surtensions temporelles.

III.4.2 Inconvénients des SVC

Un système qui fonctionne à ses limites d'exploitation et fortement dépendant de la compensation par SVC peut souffrir facilement d'un effondrement de tension. Ceci est dû au fait que la génération de puissance réactive hors de la zone de régulation est dépendante du carré de la tension et que 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.

D'autre part, 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. Bien que les SVC aient la rapidité nécessaire pour réaliser le contrôle en temps réel, ils requièrent beaucoup de travail pour l'installation et beaucoup de place au sol. Par ailleurs, ils sont très chers.

III.5 Calcul et Modélisation du SVC

Durant les dernières années, l'utilisation du compensateur statique de puissance réactive (SVC) demeure indispensable dans le système électrique. Elle est destinée à la compensation de l'énergie réactive et l'amélioration de la stabilité de tension. Le rôle principale du SVC est de maintenir essentiellement la tension constante au jeu de barre où il est raccordé, et bénéficie à l'équilibre de la puissance réactive du système électrique. [14]

Comme il est mentionné précédemment au chapitre III, dans la pratique il y a différents types de compensateur statique SVC sur les lignes de transmission, dont lesquelles on a choisi le « TSC-TCR » (condensateur commuté par thyristors et réactance contrôlée par thyristors) pour notre travail.

Le compensateur TSC-TCR montré dans la figure (III.5) comporte n bancs de TSC et un simple TCR qui sont reliés en parallèle. Les condensateurs peuvent être branchés dans des étapes discrètes. Le TSC est raccordé en série avec une inductance pour éliminer les différents harmoniques.

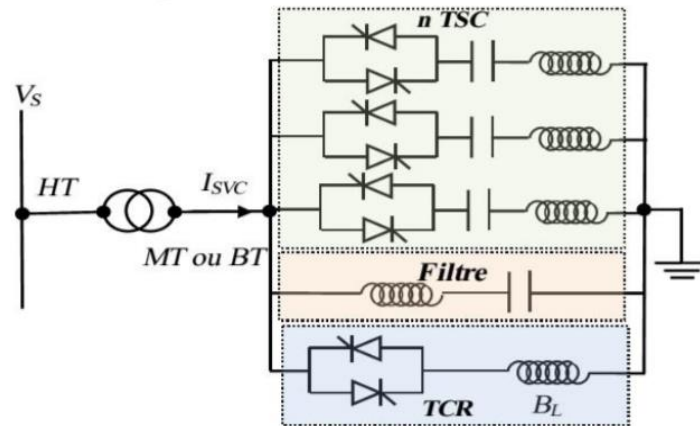


Figure III.5: Cas général de n bancs de TSC et un TCR.

III.5.1 Réactance contrôlé par thyristor-condensateur fixe (TCR-FC)

Le TCR est conçu par une inductance L connecté en série avec deux thyristors connectés en tête bêche qui conduit en demi-période d'une façon alternative. Le courant du TCR est principalement réactif, en retard de 90° par rapport à la tension entre ces bornes (effet inductive). Les thyristors sont amorcés symétriquement, de ce fait l'angle d'amorçage maximal possible est de 180° . Une conduction complète est obtenue pour un angle d'amorçage de 90° . Une conduction partielle est obtenue pour des angles compris entre 90° et 180° , et un courant nul à 180° . Les angles d'amorçage inférieurs de 90° ne sont pas autorisés. [15][16][17]

La configuration du compensateur TCR-FC est illustrée dans la Figure (III.6)

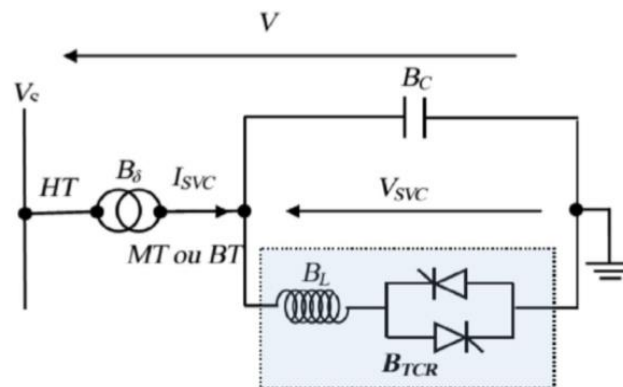


Figure III.6: Configuration du compensateur TCR-FC.

B_{SVCp} : susceptance du SVC au primaire du transformateur.

B_{SVCs} : Susceptance du SVC au secondaire du transformateur où on prend en considération la susceptance de fuite de transformateur B_δ .

Par l'utilisation des paramètres de la figure (III.15), B_{SVC} est donnée par :

$$B_{SVC} = (B_a(B_c + B_{TCR})) / (B_a + B_c + B_{TCR}) \quad (III.4)$$

Ou $B_C = \omega C$

La susceptance B_L fonction de l'angle est donnée par l'équation suivante :

$$B_L(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (III.5)$$

Avec : $L = \omega L$ Si l'angle d'amorçage α varie entre 90° et 180° , la valeur de B_{TCR} varie entre B_L et 0, si $\alpha = 180^\circ$ $B_{TCR} = 0$, et la valeur maximale de la susceptance B_{SVC} devient:

$$B_{SVC \max} = (B_\delta * B_c) / (B_\delta + B_c) \quad (III.6)$$

Et aussi, si $\alpha = 90^\circ$, $B_{TCR} = B_L$, et la valeur minimale de la susceptance B_{SVC} devient :

$$B_{SVC \min} = (B_\delta + B_c + B_L) / (B_\delta + B_c + B_L) \quad (III.7)$$

On peut tirer la variation du B_{SVC} en fonction de B_{TCR} comme suit :

$$B_{SVC} = \left(1 - \left(\frac{B_c}{B_\delta}\right)\right) B_c + \left(1 + \left(\frac{2B_c + B_L}{B_\delta}\right)\right) B_{TCR} \quad (III.8)$$

De l'équation ci-dessus, les valeurs limites de la susceptance du SVC peuvent être données comme suit:

$$B_{SVC \max} = (1 - (B_c/B_\delta)) B_c \quad SI \quad B_{TCR} = 0 \quad (III.9)$$

$$B_{SVC \min} = (1 - (B_c/B_L)) B_\delta \quad SI \quad B_{TCR} = B_L \quad (III.10)$$

La tension secondaire du transformateur est :

$$B_{SVC} = I_{SVC} (1/j(B_c + B_{TCR})) \quad (III.11)$$

En peut écrire aussi :

$$B_{SVC} = V(B_\delta / (B_\delta + B_c + B_{TCR})) \quad (III.12)$$

A partir des valeurs limites de la susceptance du compensateur, la valeur maximale et minimale de la tension au secondaire du transformateur devraient être :

$$V_{SVC \max} = V_m(B_\delta/B_\delta + B_C) \approx V_m(1 - (B_\delta/B_C)) \quad (\text{III.13})$$

Ou $B_{TCR}=0$ et $B_C \ll B_\delta$

$$V_{SVC \min} = V_m(B_\delta/B_\delta + B_C + B_L) \approx V_m(1 - (B_C/B_L)/B_\delta) \quad (\text{III.14})$$

Ou $B_{TCR}=B_L$ et $B_L \ll B_\delta$

III.5.2 Calcul des limites de marge de fonctionnement

Pour notre étude on prend $n=3$, c.-à-d. 3 TSC et 1TCR, la figure (III.7) présente le schéma simplifié de ce modèle choisi:

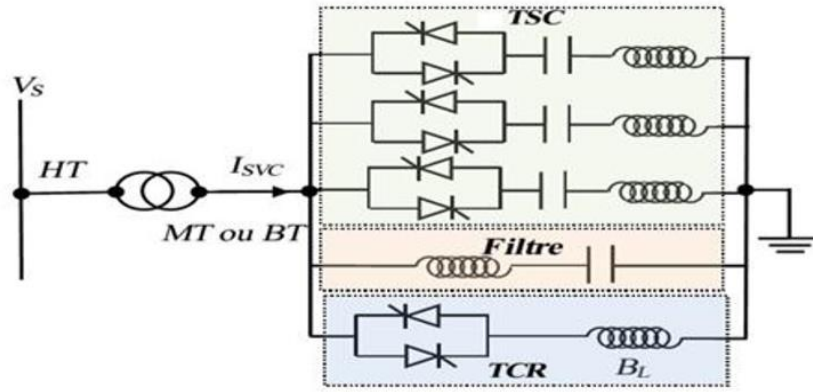


Figure III.7: SVC comporte 3 TSC et un TCR.

Les équations (III.4) et (III.5) peuvent être utilisées pour déterminer la marge des limites de fonctionnement de la susceptance du SVC.

Dans l'équation (III.4), B_C est remplacée par B_{3C} du TSC pour obtenir la susceptance à la limite maximum de production de l'énergie réactive.

Avec les données précédentes, la susceptance maximale est donnée comme suit:

$$B_{SVC \max} = \frac{B_\delta * B_{3C}}{B_\delta + B_{3C}} \quad (\text{III.15})$$

Et la susceptance minimale :

$$B_{SVC \min} = \frac{B_\delta(B_{3C} + B_{TCR})}{B_\delta + B_{3C} + B_{TCR}} \quad (\text{III.16})$$

Pour le cas général :

$$B_{SVC\ min} = \frac{B_{\delta}(B_{nc} + B_{TCR})}{B_{\delta} + B_{nc} + B_{TCR}} \quad (III.17)$$

Où $n = 1, 2, \dots$ le nombre de Banc du TSC en fonction et B_{nc} est la susceptance totale des TSC de n bancs.

Avec :

$$B_{3C} = 3 * B_C \quad (III.18)$$

$$B_C = \frac{B_C B_{LC}}{B_C + B_{LC}} \quad (III.19)$$

Le courant total du compensateur est donné comme suit :

$$I_{SVC} = \frac{V_m B_{\delta}(B_{3V} + B_{TCR})}{B_{\delta} + B_{3V} + B_{TCR}} \quad (III.20)$$

Le signe négatif indique que le courant est capacitif. Les courants des trois modes capacitifs peuvent être donnés par l'équation suivante :

$$I_{SVC} = - \frac{V(B_{\delta} B_C)}{B_{\delta} + B_{3V}} \quad (III.21)$$

Et pour le mode inductif, le courant est donnée par :

$$I_{SVC} = \frac{V(B_{\delta} B_L)}{B_{\delta} + B_L} \quad (III.22)$$

III.5.3 Calcul des paramètres du TSC

La figure (III.8) montre la constitution principale d'un seule TSC :

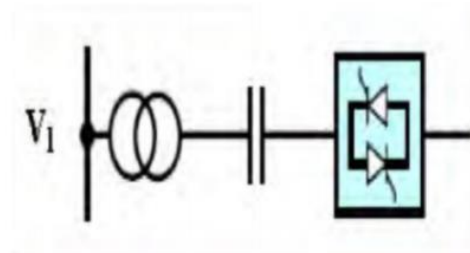
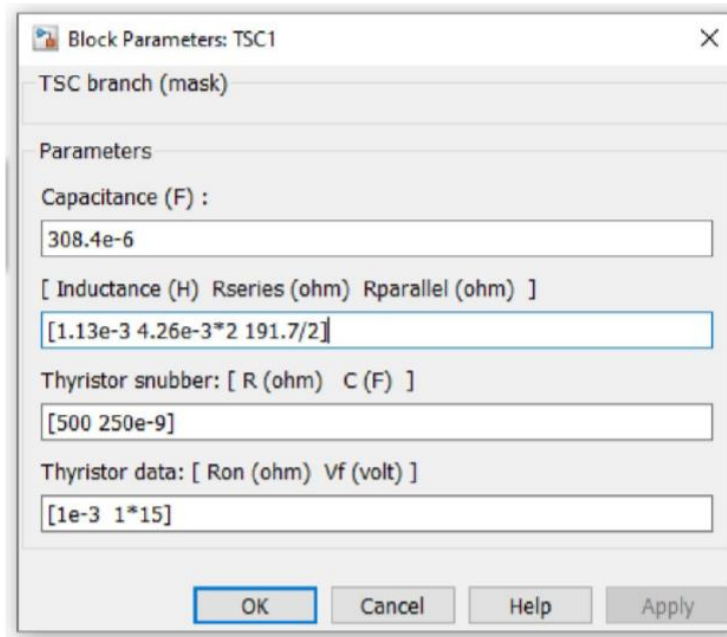


Figure III.8: Constitution principale d'un seul TSC.



Pour calculer la puissance de chaque banc du TSC, on considère que le TCR est totalement déconnecté.

Selon la figure (III.8), l'impédance d'une seule phase du TSC est :

$$Z_{TSC} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{jL_s\omega}} + R_s + \frac{1}{jC\omega} \quad (III.23)$$

$$Z_{TSC} = R_s + R_p(L_s\omega)^2 / (R_p^2 + L_s^2\omega^2) + j((R_p^2 + \frac{R_p(L_s\omega)^2}{R_p^2 + L_s^2\omega^2}) - \frac{1}{C\omega}) \quad (III.24)$$

III.5.4 Calcul des paramètres du TCR

La figure (III.9) montre la constitution principale du TCR :

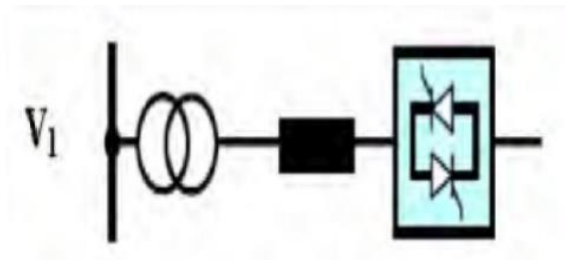
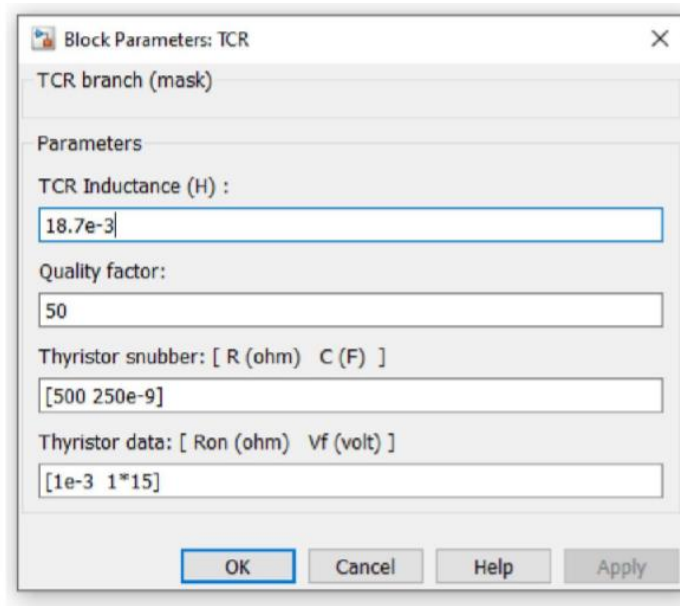


Figure III.9: Constitution principale du TCR.

Les caractéristiques du TCR utilisé sont les suivantes :



Pour calculer la puissance du TCR, on considère que les trois bancs du TSC sont totalement déconnectés, et le TCR est en pleine conduction ($\alpha=90^\circ$). L'impédance d'une seule phase du TCR est :

$$Z=R+jL\omega \quad (\text{III.25})$$

III.6 Commande du SVC

L'implémentation pratique de la commande du SVC constitué d'un TCR et de trois bancs de TSC est résumée dans le schéma présenté dans la figure (III.10) :

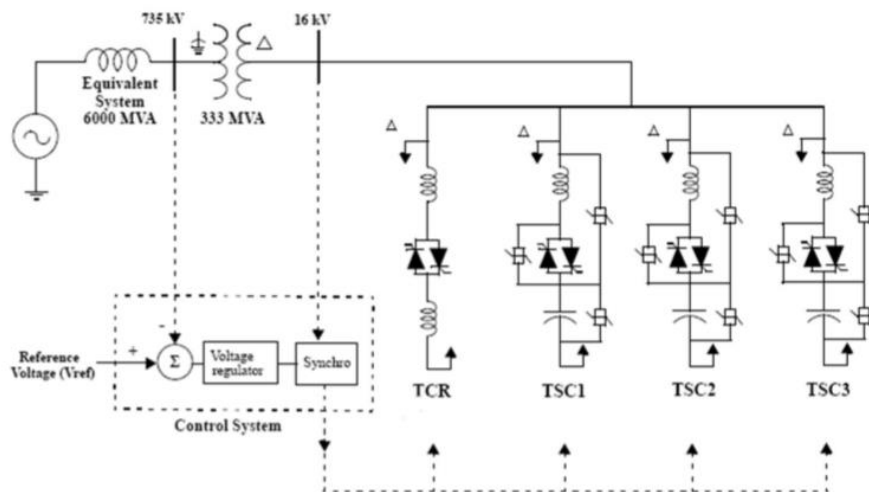


Figure III.10: Schéma du circuit de commande du SVC (1TCR+3TSC).

III.7 Simulation du SVC

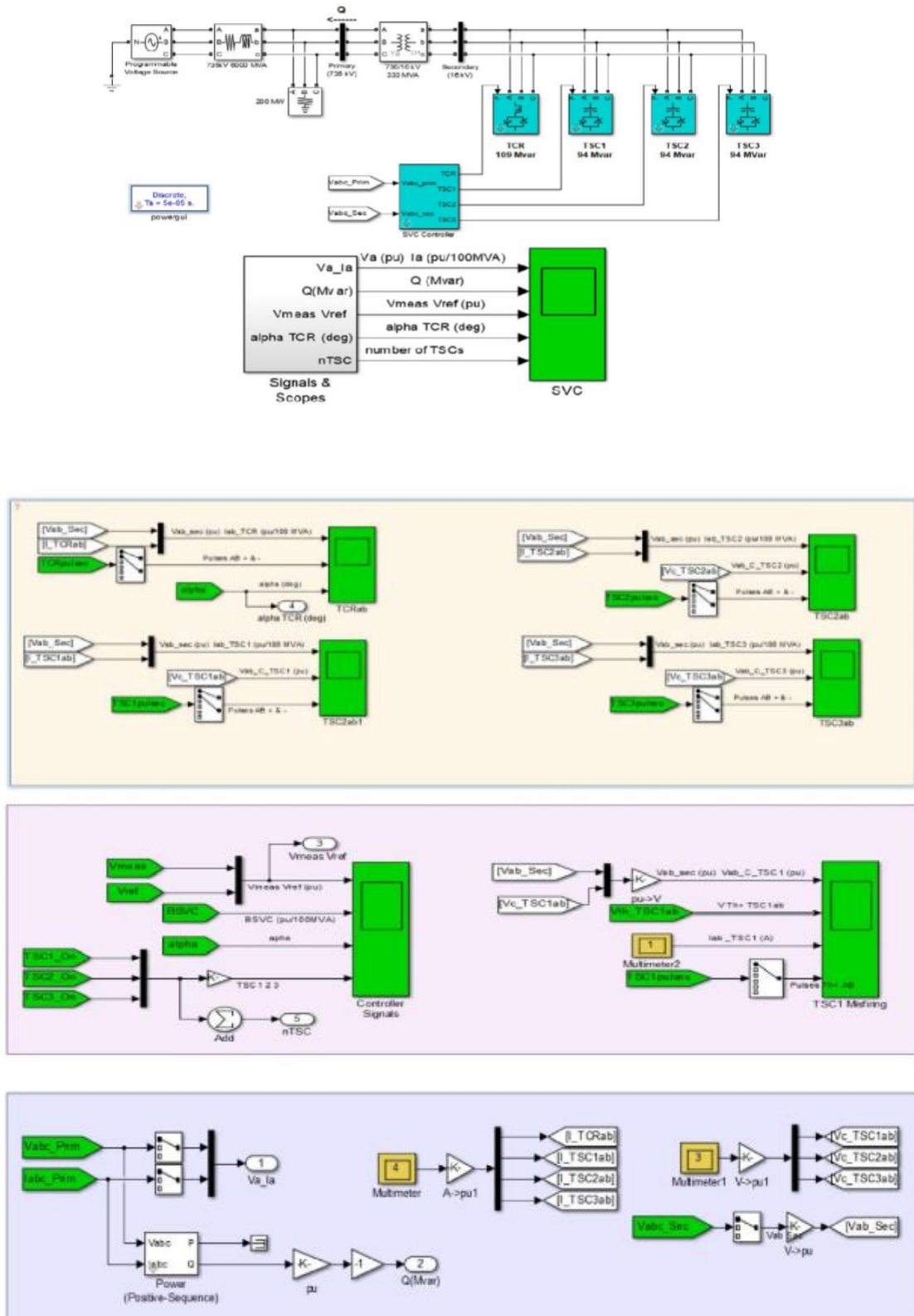


Figure III. 11: Schéma du circuit de commande du SVC (1TCR+3TSC) sur MATLAB.

III.7.1 Description de l'exemple du réseau étudié

Le SVC se compose d'un transformateur de couplage de 735 kV / 16 kV, 333 MVA, d'un banc de TCR de 109 Mvar et de trois bancs de 94 Mvar TSC (TSC1 TSC2 TSC3) connectés sur le côté secondaire du transformateur.

La commutation des TSC en entrée et en sortie permet une variation discrète de la puissance réactive secondaire de zéro à 282 Mvar capacitif (à 16 kV) par pas de 94 Mvar, alors que le contrôle de phase du TCR permet une variation continue de zéro à 109 Mvar inductif. En tenant compte de la réactance de fuite du transformateur (0,15 pu), la susceptance équivalente SVC vue du côté primaire peut varier en continu de -1,04 pu / 100 MVA (entièrement inductif) à +3,23 pu / 100 Mvar (entièrement capacitif).

Le contrôleur SVC surveille la tension primaire et envoie les impulsions appropriées aux 24 thyristors (6 thyristors par banc triphasé) pour obtenir la susceptance requise par le régulateur de tension. Chaque banque triphasée est connectée en triangle de sorte que, lors d'un fonctionnement équilibré normal, les harmoniques triplent homopolaires (3e, 9e, ...) restent piégées à l'intérieur du delta, réduisant ainsi l'injection d'harmoniques dans le système d'alimentation.

III.7.2 Résultats de Simulation

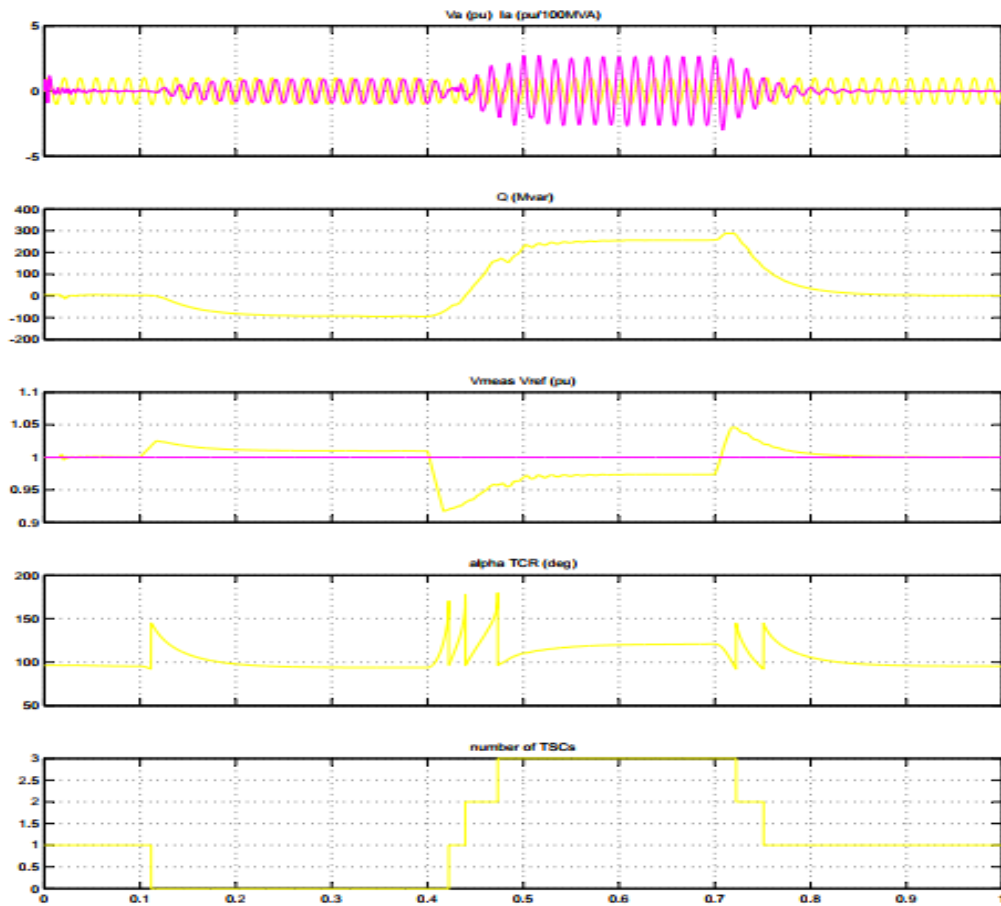


Figure III.12: Formes d'onde illustrant la réponse dynamique du SVC aux étapes de tension du système (scope SVC).

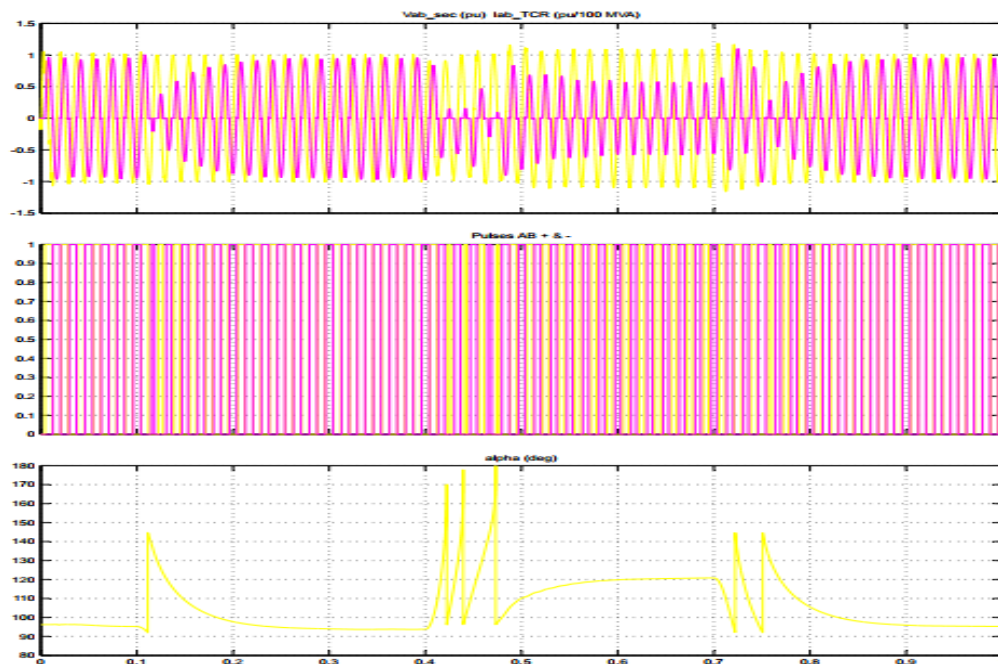


Figure III.13: Les formes d'onde affichées sur scope TCRrab.

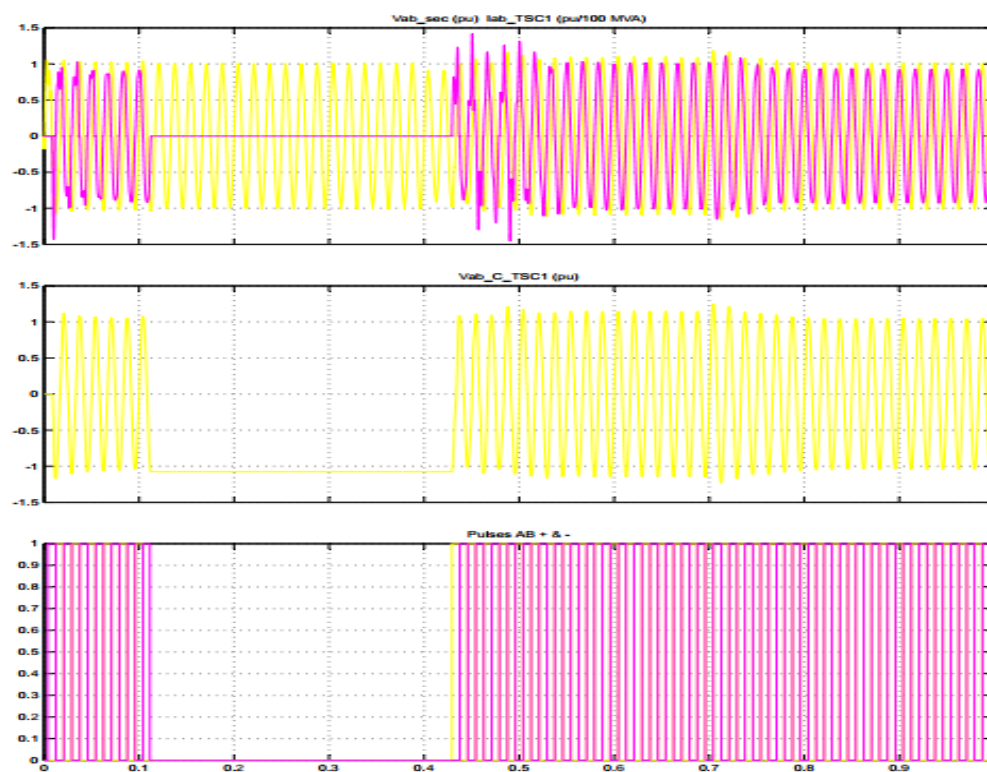


Figure III.14: Les formes d'onde affichées sur scope TSC2ab1

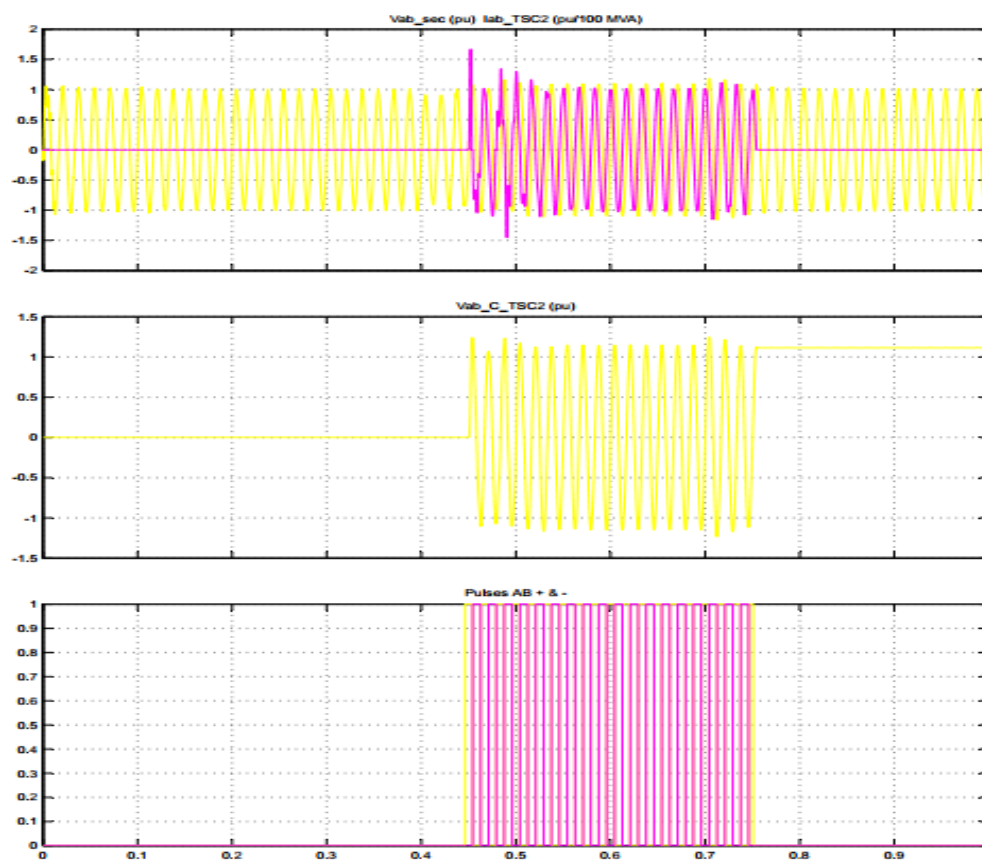


Figure III.15: Les formes d'onde affichées sur scope TSC2ab.

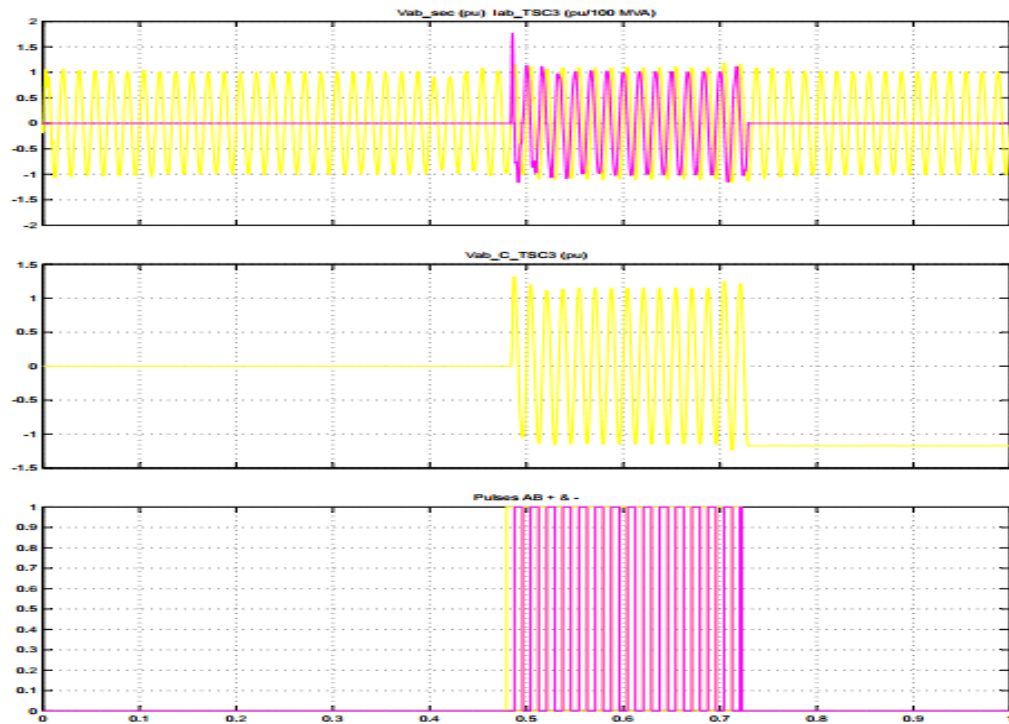


Figure III.16: Les formes d'onde affichées sur scope TSC3ab.

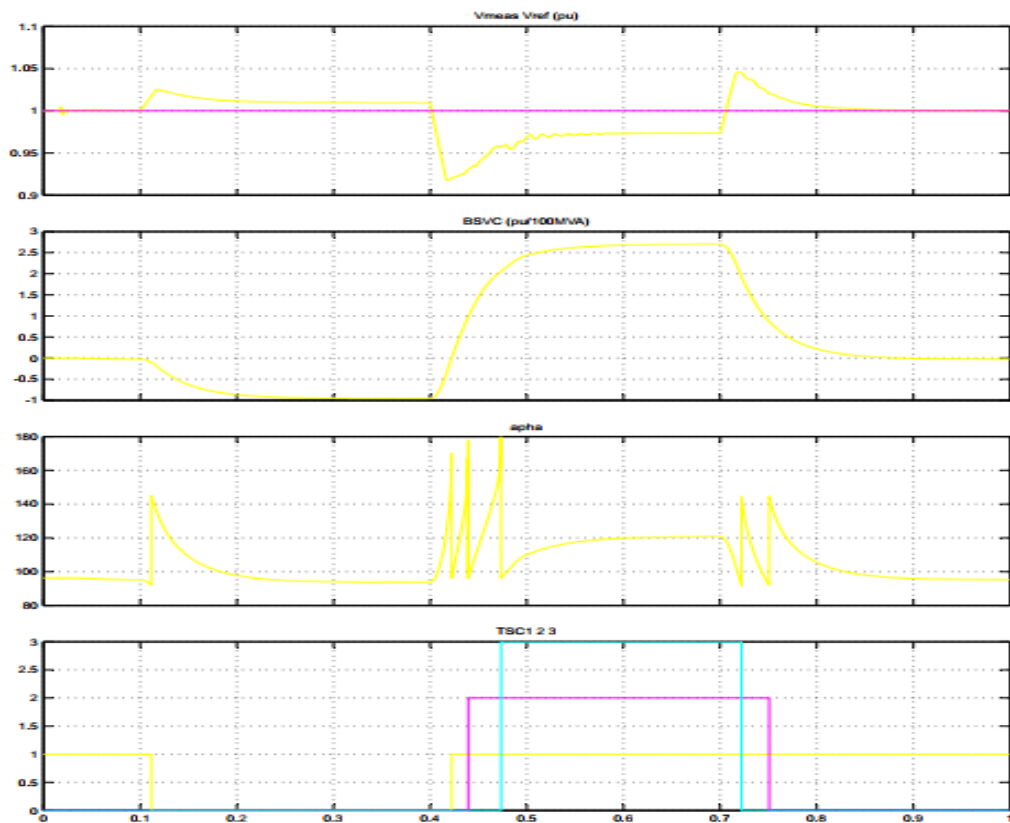


Figure III.17: Les formes d'onde affichées sur scope Controller Signal.

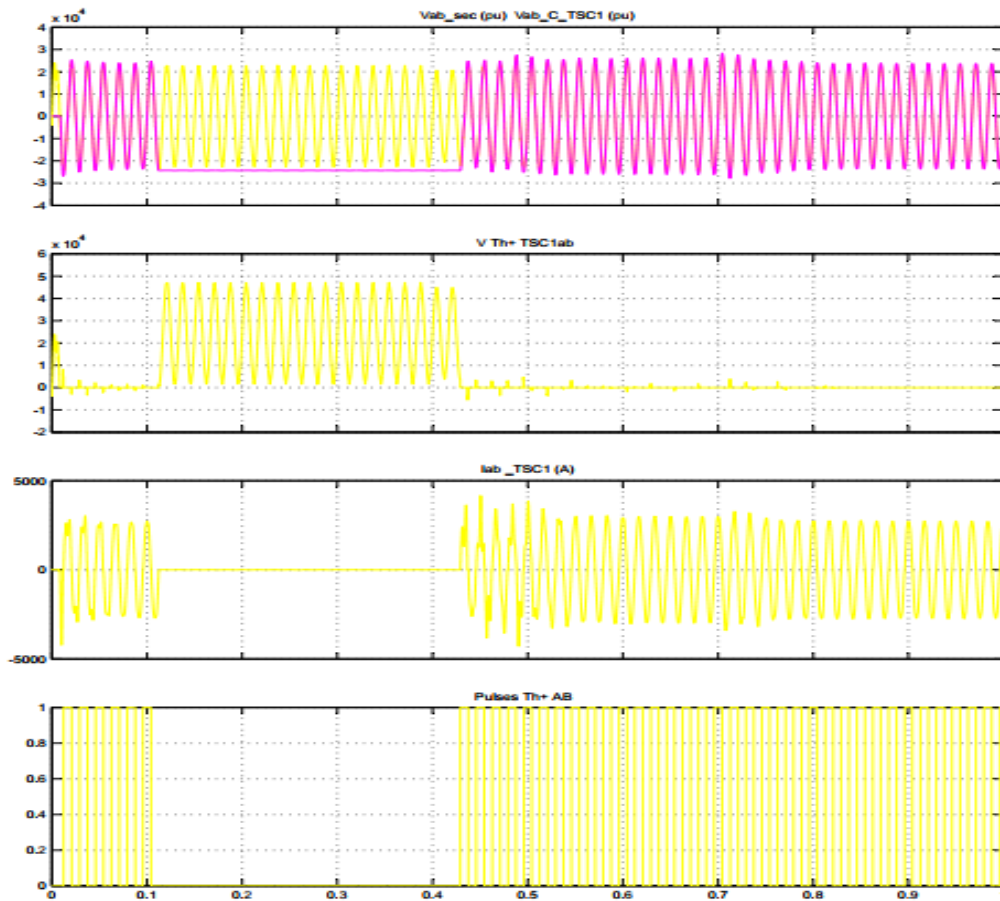


Figure III.18: Les formes d'onde affichées sur scope TSC1 Raté.

III.7.3 Interprétation des résultats obtenus:

Observez maintenant les formes d'onde en régime permanent et la réponse dynamique SVC lorsque la tension du système varie. Exécutez la simulation et observez les formes d'onde sur le bloc SVC Scope. Figure (III.12).

Initialement, la tension de source est réglée à 1,004 pu, ce qui entraîne une tension de 1,0 pu aux bornes SVC lorsque le SVC est hors service.

Comme la tension de référence V_{ref} est fixée à 1,0 pu, le SVC est initialement flottant (courant nul). Ce point de fonctionnement est obtenu avec TSC1 en service et TCR presque à pleine conduction ($\alpha = 96$ degrés). À $t = 0,1$ s, la tension est soudainement augmentée à 1,025 pu. Le SVC réagit en absorbant de la puissance réactive ($Q = -95$ Mvar) pour ramener la tension à 1,01 pu. Le temps de stabilisation de 95% est d'environ 135 ms. À ce stade, tous les TSC sont hors service et le TCR est presque à pleine conduction ($\alpha = 94$ degrés).

À $t = 0,4$ s, la tension source est abaissée brusquement à 0,93 pu. Le SVC réagit en générant 256 Mvar de puissance réactive, augmentant ainsi la tension à 0,974 pu. À ce stade,

les trois TSC sont en service et le TCR absorbe environ 40% de sa puissance réactive nominale ($\alpha = 120$ degrés).

Observez sur la dernière trace de l'oscilloscope comment les TSC sont séquentiellement allumés et éteints. Chaque fois qu'un TSC est activé, l'angle du TCR α passe de 180 degrés (sans conduction) à 90 degrés (conduction complète).

Enfin, à $t = 0,7$ s, la tension est augmentée à 1,0 pu et la puissance réactive SVC est réduite à zéro. Vous pouvez ouvrir le sous-système Signal & Scopes pour observer des formes d'onde supplémentaires. La tension et le courant TCR dans la branche AB ainsi que les impulsions des thyristors sont affichés sur l'oscilloscope TCR AB.

La figure ci-dessous fait un zoom sur trois cycles lorsque l'angle de tir α est de 120 degrés. L'étude de cas finale simule un raté TSC. Figure (III.18)

Chaque fois qu'un TSC est éteint, une tension reste piégée à travers les condensateurs TSC.

Si vous regardez l'oscilloscope TSC1 Misfiring dans le sous-système Signals & Scope, vous pouvez observer la tension TSC1 (première trace) et le courant TSC1 (deuxième trace) pour la branche AB. La tension aux bornes du thyristor positif (thyristor passant le courant positif) est indiquée sur la troisième trace et les impulsions envoyées à ce thyristor sont indiquées sur la quatrième trace. Notez que le thyristor positif est déclenché à la tension TSC négative maximale, lorsque la tension de la vanne est minimale.

Si par erreur l'impulsion d'amorçage n'est pas envoyée au bon moment, de très fortes surintensités peuvent être observées dans les vannes TSC. Regardez à l'intérieur du bloc SVC Controller pour savoir comment un raté d'allumage peut être simulé sur TSC1.

Un bloc de minuterie et un bloc OU sont utilisés pour ajouter des impulsions aux impulsions normales provenant de l'unité de tir. Ouvrez le menu du bloc Minuterie et supprimez le facteur de multiplication 100. La minuterie est maintenant programmée pour envoyer une impulsion de raté pendant un temps d'échantillonnage au temps $t = 0,121$ s.

Observez que l'impulsion de raté d'allumage est envoyée lorsque la tension de la vanne est positive au maximum immédiatement après le blocage du TSC. Ce raté d'allumage du thyristor produit une surintensité de thyristor importante (18 kA ou 6,5 fois le courant de crête nominal).

De plus, immédiatement après le blocage du thyristor, la tension du thyristor atteint 85 kV (3,8 fois la tension de crête nominale). Pour éviter de telles surintensités et surtensions, les vannes à thyristors sont normalement protégées par des parafoudres à oxyde métallique (non simulés ici).

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit notre réel réseau test souvent étudié dans la recherche, ensuite nous avons fait des essais de simulation pour le SVC dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus sont bien illustrés et interprétés, et ils ont prouvés que la puissance réactive du réseau est optimisée et la tension au jeu de barre de réception est bien régulier, ils ont prouvés aussi la flexibilité, la sensibilité et la rapidité de dispositif FACTS utilisé (SVC).

Conclusion Générale

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

Les résultats obtenus par notre programme développé dans ce travail sous l'environnement (MATLAB), montre clairement l'avantage d'intégrer des dispositifs, un contrôle flexible de l'énergie réactive est réalisé par un emplacement efficace du dispositif shunt (SVC).

Dans notre travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du contrôleur SVC. Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle SVC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions de différents nœuds.

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

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants :

- Etude de l'impact des autres dispositifs FACTS sur les réseaux d'énergie électriques.
- L'optimisation des puissances réactives et le contrôle des tensions avec l'incorporation des dispositifs FACTS.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Henri Persoz , Gé[1] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « La planification des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [2] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [3] Hanane Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [4] De Vre R, Jacquet B « Perturbations dans les installations électriques et électroniques Problèmes et solutions» Note d'information.
- [5] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet « Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l'ingénieur D 4 315.
- [6] Abdelaziz Chaghi « documents pédagogiques et didactiques»université de Batna 2000/2001.
- [7] Boudjella Houari « contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) »mémoire de magister ,université de Sidi Bel-Abbes23 Janvier 2008.
- [8] Haimour Rachida« Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique» mémoire de magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran 2008-2009
- [9] Rolf Grünbaum, Åke. Petersson, Björn Thorvaldsson, « FACTS-Pour des réseaux électriques Plus Performants », ABB Utilities AB Power System SE-721 64 Västerås, Suède, - 2002
- [10] T. Gönen « Electric Power System Engineering: Analysis and Design» John Wiley & Sons, 1988
- [11] Eskandar Gholipour Shahraki "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy 2003.

- [12] Salhi Abd Alfattah et Mehellou Yuocef «Contrôle de la puissance réactive du système électrique par SVC », université Batna, 2008
- [13] Lakdja Fatiha « Contrôle des transits de puissance par dispositif facts» Mémoire de magister en Commande des processus Oran 2005.
- [14] John Wiley & sons from, www.knovel.com “Thyristor-based FACTS controllers and electrical transmission systems”, party n° 01, copyrighted materials, 2002.
- [15] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [16] T.J.E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley, New York, 1982.
- [17] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, understanding FACTS; concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, New York, 2000.
- [18] ZERROUKI Youcef, « Amélioration de la qualité d’énergie électrique en utilisant un onduleur de tension multi-niveaux», Mémoire de Master Option : ISE, MOHAMED BOUDIAF DE M’SILA, 2014/2015.

RESUME

Les dispositifs FACTS peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Ils regroupent l'ensemble des dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux Progress réalisés dans les demains de semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et thyristor GTO. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteur très rapide, ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques.

Ils se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissances utilisés, Les points mis à exergue sont l'efficacité de SVC, Améliorer les niveaux de tension sur un jeu de barre ou une région, Augmenter la capacité de transport de puissance active du réseau, Réduire les surtensions temporelles .

ملخص

يمكن أن تساعد أجهزة FACTS في معالجة المشكلات التي تتم مواجهتها في تشغيل الشبكات الكهربائية. إنها تجمع محتويات الأجهزة ، استنادًا إلى إلكترونيات الطاقة ، والتي تعمل على تحسين تشغيل الشبكة الكهربائية. يرتبط تطورها ارتباطًا وثيقًا بالتقدم المحرز في مستقبل أشباه موصلات الطاقة وبشكل أكثر تحديدًا للعناصر التي يمكن التحكم فيها مثل الثايرستور و GTO الثايرستور. تعمل هذه العناصر كمفتاح سريع للغاية ، مما يمنح أجهزة FACTS سرعة وموثوقية أعلى بكثير من تلك الموجودة في الأنظمة الكهروميكانيكية التقليدية. تتميز بتكنولوجيا أشباه الموصلات وعناصر الطاقة المستخدمة، النقاط التي تم إبرازها هي فعالية SVC ، وتحسين مستويات الجهد على (jeu de barre) أو المنطقة، وزيادة قدرة نقل الطاقة النشطة للشبكة، تقليل الزيادات الزمنية.

SAMMARY

FACTS devices can help address problems encountered in the operation of electrical networks. They bring together all the devices, based on power electronics, which improve the operation of an electrical network. Its development is closely linked to the progress made in the future of power semiconductors and more particularly of

controllable elements such as the thyristor and GTO thyristor. These elements act as a very fast switch, which gives FACTS devices a speed and reliability far superior to that of conventional electromechanical systems.

They are distinguished by the technology of the semiconductors and the power elements used, The points highlighted are the effectiveness of SVC: Improve voltage levels on a (jeu de barre) or region, Increase the active power transmission capacity of the network, Reduce time surges.