

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° : ...../2022

## **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Électrotechnique**

**SPECIALITE: Réseaux électriques**

### **Thème**

**Étude des systèmes FACTS (SVC) et de leur  
comportement sur le contrôle des puissances et des  
tensions dans les réseaux de transport.**

**Présenté Par : Mohamed Vall Mohamed Ahmed**

**Encadré Par : Chouki Makhoulf**

**Date de soutenance: 07/07/2022**

#### **Jury de Soutenance**

**Président : M. Melit**

**Grade Pr**

**UnivMSB jijel**

**Encadreur : M. Chouki**

**Grade Dr**

**Univ MSB jijel**

**Examineur : B. Khelifi**

**Grade Dr**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2021 /2022**

## *Remerciements*

*Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée durant toute ces longues années*

*A ma famille, qui a toujours été une source inépuisable d'encouragements.*

*Je remercie particulièrement mon grand frère **Taleb Amou** pour son appui durant toute ces années.*

*Je tiens à remercier sincèrement mon encadrant **Dr. Makhlouf Chouki** qui est un potentiel infini pour les conseils avisés et l'encouragement constant.*

*Je tiens aussi à présenter mes remerciements aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter le jugement de mon travail.*

*Enfin, je remercie tous les professeurs qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*A mon père qui nous a quittés aussi tôt, aucune dédicace ne saurait exprimer*

*l'amour et le respect que j'ai toujours eu pour vous,*

*A ma chère mère,*

*A mon grand frère Imad,*

*A toute ma famille,*

*A mes amis proches.*

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les réseaux électriques</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Fonctionnement du réseau électrique.....	3
I.2.1 Introduction .....	3
I.2.2 Problème de conduite .....	3
I.2.3 Problème de réglage .....	4
I.2.4 Problème de stabilité .....	4
I.2.5 Problème de protection.....	4
I.3 La tension.....	5
I.3.1 Qualité de la tension .....	5
I.3.2 Dégradation de la qualité de la tension .....	5
I.4 La fréquence.....	6
I.4.1 Cause des variations de fréquence .....	6
I.4.2 Besoin de tenue de la fréquence .....	7
I.5 Organisation des réglages .....	8
I.6 Transport de la puissance active et réactive.....	8
I.7 Puissance réactive .....	8
I.7.1 Chute de tension sur une ligne .....	8
I.7.2 Contrôle de la tension.....	10
I.8 Compensation de la Puissance Réactive .....	11
I.8.1 Introduction .....	11
I.8.2 Moyens de compensation de la puissance réactive .....	11
I.8.2.1 Les condensateurs.....	12
I.8.2.2 Les inductances.....	12

---

I.8.2.3 Les groupes de production (générateurs).....	12
I.8.2.4 Les compensateurs synchrones.....	12
I.8.2.5 Transformateurs avec prises réglables en charge .....	12
I.9 Conclusion .....	13
Références bibliographiques .....	14

## **Chapitre II : Modélisation du compensateur statique SVC**

II.1 Introduction .....	15
II.2 Historique du SVC.....	15
II.3 Définition du SVC .....	16
II.4 Constitution du SVC.....	17
II.4.1 Condensateur fixe (FC).....	18
II.4.2 TCR (Thyristor Controlled Reactor) ou TSR (Thyristor Switched Reactor) .....	18
II.4.3 TSC (Thyristor Switched Capacitor) .....	18
II.5 Schémas de SVC .....	18
II.6 Principes de fonctionnement du SVC.....	19
II.7 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.....	19
II.8 Modélisation de dispositif SVC.....	20
II.8.1 Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC .....	20
II.8.2 Emplacement du SVC .....	21
II.8.2.1 SVC placé en un nœud du réseau.....	22
II.8.2.2 SVC placé au milieu d'une ligne .....	22
II.8.3 Modélisation d'un SVC de type susceptance shunt variable .....	23
II.8.4 Modélisation d'un SVC de type susceptance shunt variable et angle d'amorçage variable .....	24
II.9 Avantage du SVC .....	24
II.10 Conclusion .....	24
Références bibliographiques .....	25

## Chapitre III : Écoulement de puissance

III.1 Introduction .....	27
III.2 Modélisation des composants du réseau électrique .....	27
III.3 Différents types d'analyse des réseaux électriques .....	28
III.3.1 L'analyse de l'écoulement de puissance : .....	29
III.4 Formulation de la matrice admittance .....	30
III.4.1 Formulation du problème de l'écoulement de puissance (réseau à deux nœuds) .....	31
III.5 Différents types de variables et leurs limites .....	33
III.6 Problème de solvabilité .....	33
III.7 Méthodes numérique de résolution d'un problème d'écoulement de puissance.....	34
III.7.1 Méthode de Gauss Seidel .....	34
III.7.2 Méthode de Gauss-Seidel avec accélération .....	35
III.7.3 Méthode de Newton-Raphson .....	35
III.7.4 Méthode Découplée Rapide.....	37
III.8 Conclusion.....	39
Références bibliographiques .....	40

## Chapitre IV : Applications

IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Applications et résultats de simulation .....	41
IV.3 Répartition de puissance sur un réseau suite à un défaut sans systèmes FACTS .....	45
IV.3.1 Cas d'un court-circuit triphasé .....	45
IV.3.1.1 Discussion des résultats .....	46
IV.3.2 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau électrique .....	46
IV.3.2.1 Perte des lignes électriques.....	46
IV.3.2.2 Perte des transformateurs.....	47
IV.3.2.3 Répartition de puissance suite à une augmentation brutale de la charge.....	48

---

IV.4 Effet de système FACTS (SVC) sur un réseau en défaut .....	49
IV.4.1 Cas d'un court-circuit triphasé .....	50
IV.4.2 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau électrique .....	52
IV.4.2.1 Perte des lignes électriques .....	52
IV.4.2.2 Perte des transformateurs.....	54
IV.4.2.3 Répartition de puissance suite à une augmentation brutale de la charge.....	55
IV.4.3 Discussions des résultats .....	57
IV.5 Optimisation de points de raccordement des FACTS (SVC) .....	57
IV.5.1 Cas d'un réseau à 9 jeux de barre.....	58
IV.6 Simulation sous l'environnement Matlab m.file.....	60
IV.6.1 Structure du réseau simulé .....	60
IV.6.2 Données du réseau de 5 nœuds IEEE.....	60
IV.6.2.1 Données des nœuds du réseau .....	60
IV.6.2.2 Données des branches du réseau.....	60
IV.6.3 Résultats et interprétations .....	61
IV.6.3.1 Le réseau à l'état normal.....	61
IV.6.3.2 Insertion du SVC dans le réseau .....	62
IV.6.3.2.1 Insertion d'un SVC au début d'une ligne .....	62
IV.6.3.2.2 Réseau en chute de tension.....	63
IV.6.3.2.3 Insertion d'un SVC dans le nœud 4.....	64
IV.6.3.3 Interprétation.....	66
IV.7 Conclusion .....	66
Références bibliographiques .....	67
<b>Conclusion générale</b> .....	68
Annexe A.....	70
Annexe B.....	72

# *Introduction générale*



## Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructure permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les lieux de consommation d'électricité.

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel, cela provoque la dégradation du comportement d'un réseau électrique.

En admettant que l'équilibre de puissance est garanti par les générateurs d'énergie centraux sous la demande de puissance variable, les composants du réseau seront exposés à une certaine quantité de contraintes de courant et de tension et généreront des pertes dans le réseau.

L'étude de l'écoulement de puissance joue ici un rôle important en tant qu'outil pour évaluer ces contraintes dans le domaine de l'état stationnaire.

Avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production et le contrôle de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Ainsi, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou plutôt d'autres moyens de compensation tels-que les dispositifs conventionnels (les batteries de condensateurs, les selfs des compensateurs statiques) et les dispositifs FACTS qui finalement sont au moins aussi souvent consommateurs que fournisseurs d'énergie réactive.

L'objectif de ce travail est d'améliorer la stabilité de la tension d'un réseau électrique par des systèmes FACTS « SVC ».

Dans le cadre de notre travail de mémoire de fin d'études, nous nous intéressons à quelques types de perturbations :

- L'apparition d'un court-circuit ;
- La perte d'un ou plusieurs ouvrages ;
- Et l'augmentation brutale de la charge.

Pour atteindre notre objectif, ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le réseau électrique, le fonctionnement de ce réseau ainsi que le transport de la puissance active et réactive et les moyens de compensations de cette dernière.

Le deuxième chapitre traite l'étude et la modélisation du compensateur statique SVC.

Dans ce chapitre, on étudie le fonctionnement du SVC, ainsi on présente les éléments qui constitue ce dispositif. Différentes configurations du SVC sont présentées, enfin on termine par l'emplacement du SVC dans les réseaux.

Le troisième chapitre sera consacré à l'écoulement de puissance en contenant, la modélisation des composants du réseau électrique, la formulation des équations de l'écoulement de puissance, et les méthodes numériques de résolutions.

Les applications seront illustrées dans le quatrième chapitre où des simulations numériques seront réalisées à l'aide du logiciel PSAT sur des réseaux IEEE de 14 et 9 jeux de barres permettant ainsi d'analyser le comportement de ce réseau avec ou sans défaut et avec l'intégration des systèmes FACTS (SVC) pour pallier les conséquences des défauts, puis on a exposé en détails les résultats d'une simulation développé sous l'environnement MATLAB (une application du SVC dans les réseaux électriques).

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on récapitule les principaux résultats obtenus et les perspectives.

*Chapitre I :*  
*Généralités sur les réseaux*  
*électriques*

## I.1 Introduction

Le rôle primordial de toute entreprise de production et de distribution d'énergie électrique est d'assurer en tout temps et en tout lieu la couverture des puissances actives et réactives demandées par les utilisateurs, d'offrir une sécurité d'alimentation et de garantir une qualité acceptable de l'énergie, assurant la fiabilité du système.

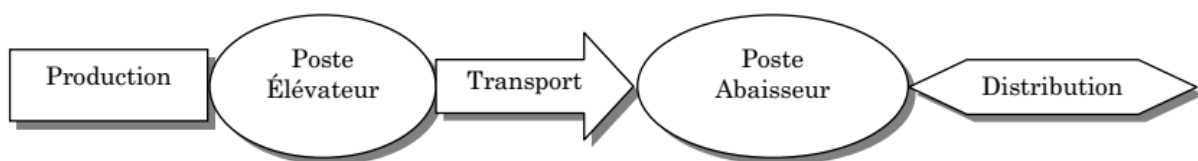
Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

## I.2 Fonctionnement du réseau électrique

### I.2.1 Introduction

Le stockage massif de l'énergie électrique sous une forme immédiatement disponible n'est actuellement, pas possible dans des conditions économiques satisfaisantes.

Le problème majeur de l'exploitant est donc de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle, étant entendue que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production-transport-consommation (que nous appellerons aussi système électrique).



**Figure I.1** Structure générale d'un réseau électrique.

L'étude du fonctionnement du système production-transport-consommation est dominée par quatre préoccupations [I.1] :

- Maintenir en permanence les conditions nécessaires d'un équilibre entre la production et la consommation : (**problème de conduite**) ;
- Maintenir les caractéristiques de la tension et de la fréquence dans les plages contractuelles : (**problème de réglage**) ;
- Tenir compte du fort couplage dynamique entre production et consommation via le réseau (**problème de stabilité**) ;
- Assurer l'intégrité des ouvrages : (**problème de protection**).

### I.2.2 Problème de conduite

Les réseaux de transport et d'interconnexion à très haute tension (THT) assurent la liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation. Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée, l'énergie la moins chère possible à un instant donné.

Par ailleurs, le maillage du réseau contribue à la sécurité d'alimentation et permet de faire face, dans des conditions économiques satisfaisantes, aux aléas locaux ou conjoncturels qui peuvent affecter l'exploitation (indisponibilité d'ouvrage, aléas de consommation, incidents...).

Les réseaux THT contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre, ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation.

### **I.2.3 Problème de réglage**

Par ailleurs, la qualité du service est également un souci majeur de l'exploitant. Sur le plan pratique, cette qualité :

- De maintenir les caractéristiques du produit (tension, fréquence) dans les limites très précises des cahiers des charges.
- De limiter, autant que faire se peut, des interruptions de service. Les réseaux THT jouent aussi un rôle très important pour respecter ces contraintes car :
  - Les références de tension qui vont conditionner l'ensemble du plan de tension dans le réseau sont fixées, pour l'essentiel, par les groupes de production raccordés aux réseaux THT.
  - La fréquence est, de même, fixe par les groupes de production qui doivent rester synchrone en régime permanent.
  - La sécurité d'alimentation des grands centres de consommation dépend très fortement de la structure des réseaux de transport.

### **I.2.4 Problème de stabilité**

Il faut savoir que, en compte tenu de l'inertie mécanique relativement faible de certains composants des systèmes électriques (groupes de production et moteurs) et de la grande vitesse de propagation des phénomènes, les réseaux THT créent un couplage dynamique très fort entre les moyens de production, d'une part, et les charges (consommation), d'autre part.

Au-delà de l'examen du problème de la répartition économique et en sécurité de la puissance, l'étude du fonctionnement de ces vastes systèmes interconnectés et fortement couplés est donc absolument nécessaire. Elle portera sur leur réglage et leur stabilité.

### **I.2.5 Problème de protection**

Enfin, il va de soi qu'il est nécessaire de protéger les systèmes électriques qui peuvent être affectés par de nombreux types d'incidents. Il convient de distinguer la protection des ouvrages du réseau proprement dit (lignes...) et celle du système production-transport.

La protection du système production-transport est essentielle, car certains incidents (pertes de lignes en cascade, pertes brutales de moyens de production importants...) peuvent induire des conséquences catastrophiques (effondrement du système électrique).

## I.3 La tension

### I.3.1 Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie [II.2].

Le maintien de la qualité d'énergie à un bon niveau est la responsabilité de tous les gestionnaires du réseau concerné (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence.

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

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

### I.3.2 Dégradation de la qualité de la tension

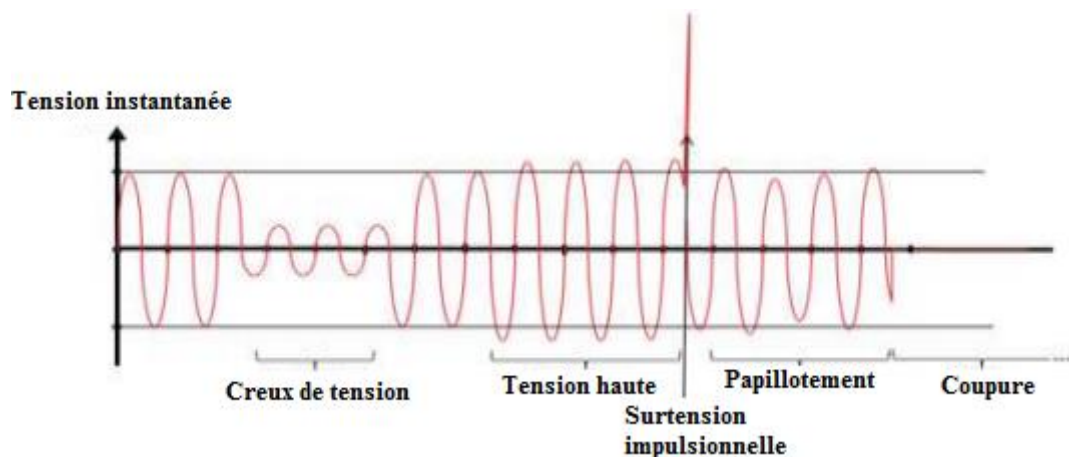
Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain, etc...., ces défauts peuvent résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillessement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).
- Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....Le tableau suivant présente une classification possible des différents types de perturbations.

<b>Perturbation</b>	<b>Définition</b>
<b>Creux de tension</b>	Brève chute de la valeur efficace de la tension - de quelques dizaines de millisecondes à quelques seconde(s)
<b>Surtension Impulsionnelle</b>	Pic bref ou très bref de la valeur efficace de la tension, ou de la valeur instantanée de la tension
<b>Papillotement</b>	Fluctuations rapides et relativement faibles de la valeur efficace de la tension
<b>Tension basse</b>	Valeur efficace de la tension (moyennée sur plusieurs secondes à quelques minutes) durablement inférieure au(x) seuil(s) admis -

	typiquement 90 % de la tension nominale
<b>Tension haute</b>	Valeur efficace de la tension durablement supérieure au(x) seuil(s) admis -typiquement 110 % de la tension nominale
<b>Fluctuations de la fréquence</b>	Ecart de la fréquence par rapport à sa valeur de référence - 50 Hz en France
<b>Harmoniques et Inter harmoniques</b>	Signaux parasites de fréquence multiple de 50 Hz (harmoniques) ou de fréquence quelconque (inter-harmoniques)
<b>Déséquilibre</b>	Différences entre les valeurs efficaces des trois phases

**Tableau I.1** classification possible des différents types de perturbations.



**Figure I.2** Exemple des différents types de perturbations

## I.4 La fréquence

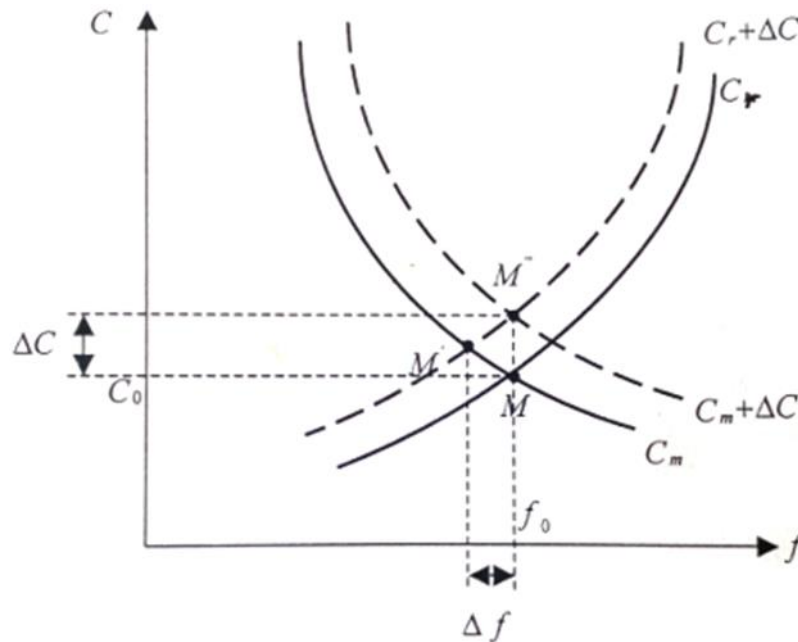
La fréquence est directement liée à la vitesse de rotation des alternateurs. En régime établi, il y a égalité entre le couple moteur  $C_m$ , fourni par la turbine, et le couple résistant  $C_r$ , autrement dit égalité entre la production et la consommation de puissance active. Tout déséquilibre de ce bilan entraîne une variation de vitesse, donc de fréquence. Contrairement à ce qui se passe pour la tension, la tenue de la fréquence est un problème intéressant dans l'ensemble d'un système électrique interconnecté.

### I.4.1 Cause des variations de fréquence

En pratique toutefois, l'équilibre n'est jamais exactement réalisé. Il existe toujours des erreurs inévitables dans la prévision de la consommation et la réalisation du programme de production par les centrales. Par ailleurs, il y a des variations aléatoires de charge et des pertes fortuites de groupes de production. On observe donc un écart global entre la production et la demande qui se traduit par une variation de fréquence.

Sans action complémentaire sur les organes d'admission du fluide moteur des turbines, on arrive à un nouvel état d'équilibre. En effet le couple résistant globale imposé par la charge

augmente avec la fréquence, tandis que le couple moteur global des turbines diminue (figure I.3). Un nouvel état d'équilibre peut donc s'établir.



**Figure I.3** Variations du couple moteur  $C_m$  et du couple résistant  $C_r$  sous l'effet de l'auto-régulation, en fonction de la fréquence.

Une variation  $\Delta C$  du couple résistant vas nous amener de la caractéristique  $C_r$  à la caractéristique  $C_r + \Delta C$ . Le nouveau point de fonctionnement  $M'$ , d'ou un décalage de la fréquence de  $\Delta f$ , est obtenu par linéarisation en utilisant :  $\frac{\Delta C}{C_0} = \alpha \frac{\Delta f}{f_0}$

$\alpha$ : Coefficient global d'auto-régulation de l'ensemble production-consommation.

Pour rétablir l'équilibre en retrouvant la fréquence nominale, il est donc nécessaire de déplacer la courbe correspondant au couple moteur en agissant sur les organes d'admission du fluide moteur des turbine pour ramener le point de fonctionnement en  $M''$ . C'est le rôle du régulateur primaire de vitesse.

#### I.4.2 Besoin de tenue de la fréquence

Les variations de fréquence ont des répercussions sur le fonctionnement des appareils d'utilisation et sur le réseau :

- appareils d'utilisation (moteur d'entraînement, horloge synchrone...),
- matériels de réseaux : les appareils à circuits magnétiques bobinés comme les transformateurs pour lesquels une variation de fréquence, à tension constante, se traduit par une variation du flux magnétique, puisque :

$$\Phi \approx k \frac{U}{\omega}$$



Une baisse de fréquence augmente la saturation, donc les pertes fer et la production d'harmoniques. Du point de vue contractuel la fréquence doit être tenue à  $\pm 1\text{Hz}$ , ce qui est acceptable pour la grande majorité des applications.

### I.5 Organisation des réglages

Les considérations précédentes permettent de dégager quelques conclusions importantes :

- les réglages de la puissance réactive et de la tension sont également étroitement liés (couplage  $Q, V$ ) ;
- le réglage de la tension est local (la valeur de la tension de consigne peut être légèrement différente selon les points d'un réseau exploité à un même niveau de tension nominale) ;
- le réglage ( $Q, V$ ), doit être coordonné dans le temps et dans l'espace.

### I.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  $P_i$  et réactives  $Q_i$  injectées ou soutirées en chaque sommet  $i$  et les tensions en modules  $|V|$  et phases  $\theta$ .

La détermination des tensions et des courants sur une ligne électrique peut être effectuée en utilisant la notation complexe [I.3]. En schématisant chaque liaison (du sommet  $i$  au sommet  $k$ ) par un  $\pi$  symétrique tel que ( $i=1, k=2$ ) comme le montre la Figure I.4.

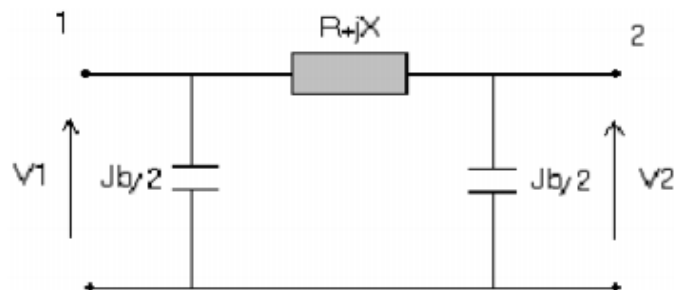


Figure I.4 Circuit équivalent en  $\pi$  d'une ligne électrique.

### I.7 Puissance réactive

Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport. Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre-demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

#### I.7.1 Chute de tension sur une ligne

Afin d'illustrer les relations entre la puissance réactive et la chute de tension, considérons le

circuit équivalent de la Figure I.5. La chute de tension due au courant I dans l'impédance est :

$$Z = R + jX \quad \text{et} \quad \Delta V = ZI = V_s - V_r \quad (I.1)$$

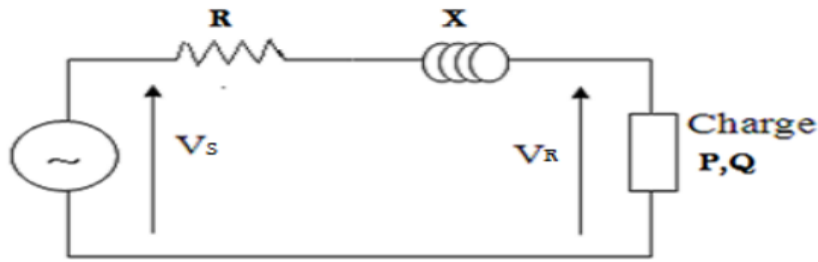


Figure I.5 Circuit équivalent du réseau électrique.

Si nous traçons le diagramme vectoriel de ce circuit (Figure I.6).

$$S = V_r I^* = P + jQ \quad (I.2)$$

$$I = \frac{(P - jQ)}{V_r} \quad (I.3)$$

$$\Delta V = ZI = \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_r} \quad (I.4)$$

$$\Delta V = \frac{(RP + XQ)}{V_r} + \frac{j(XP - RQ)}{V_r} = \Delta V_R + j\Delta V_X \quad (I.5)$$

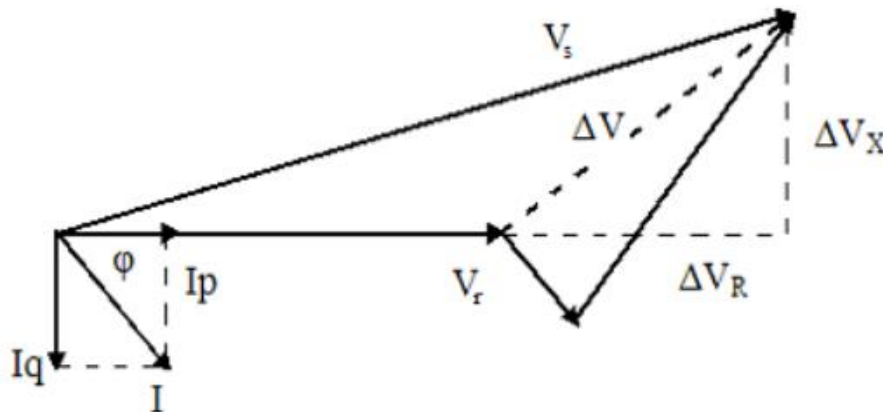


Figure I.6 Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.

C'est-à-dire que la chute de tension a une composante  $\Delta V_R$  en phase avec  $V_r$  et une composante  $\Delta V_X$  en quadrature avec  $V_r$ . Il est clair que la chute de tension dépend simultanément de la puissance active et réactive de la charge.

Comme  $\Delta V = V_s - V_r$  donc  $V_s = V_r + \Delta V$

$$|V_s|^2 = |V_r + \Delta V_R|^2 + |\Delta V_X|^2 \quad (I.6)$$

$$|V_s|^2 = \left| V_r + \frac{PR + XQ}{V_r} \right|^2 + \left| \frac{XR - XQ}{V_r} \right|^2 \quad (I.7)$$

Comme  $\Delta V_X < V_r + \Delta V$  on peut approximer :

$$|V_s|^2 = \left| V_r + \frac{PR + XQ}{V_r} \right|^2 \quad (\text{I.8})$$

$$V_s - V_r = \frac{PR + XQ}{V_r} \quad (\text{I.9})$$

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

$$\Delta V = V_s - V_r = \frac{XQ}{V_r} \quad (\text{I.10})$$

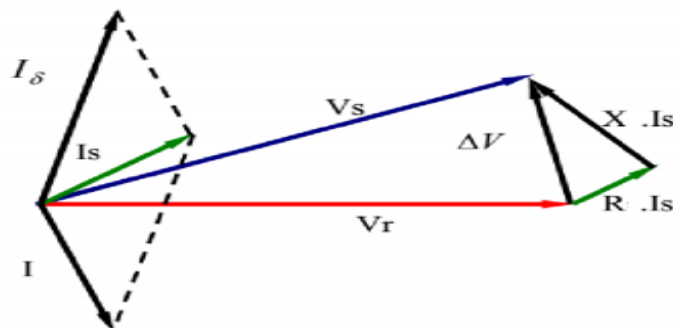
Donc la cause de la chute de tension à travers une impédance est due principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est due à la variation de la puissance réactive [I.4]. Pour maintenir  $V_r$  constante si la courant  $I$  change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

### I.7.2 Contrôle de la tension

La chute de tension sur un élément de réseau s'exprime par l'équation (I.10). L'examen de cette équation montre que pour maintenir  $V_r$  constante au niveau du consommateur. On dispose de plusieurs solutions à savoir :

- Augmentation de la tension de départ  $V_s$ .
- 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 obtenu par :

- La connexion des capacités shunts ;
  - La connexion des compensateurs synchrones ;
  - La connexion des réactances shunts (pour les faibles charges, ou charges capacitatives)
- [I.5].



**Figure I.7** Diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante).

En connectant un compensateur de puissance réactive en parallèle avec la charge, il sera possible de maintenir la tension  $V_r$  égale en module à la tension  $V_s$ . La puissance réactive totale

connectée au jeu de barre de charge qui sera remplacée par  $Q_s = Q_\delta + Q$  ou  $Q_\delta$  est la puissance réactive injectée par le compensateur et sera ajustée pour faire tourner le vecteur  $\Delta V$  jusqu'à ce que la tension  $V_r$  sera égale à la tension  $V_s$  comme le montre la Figure I.7.

## **I.8 Compensation de la Puissance Réactive**

### **I.8.1 Introduction**

Le développement industriel a contribué à une augmentation de la consommation de l'énergie électrique. Ceci a eu pour conséquences, un croissement des puissances à générer et à transporter, une évolution importante et rapide des systèmes énergétiques et des réseaux de plus en plus grands et compliqués.

Le rôle primordial de toute entreprise de production et de distribution d'énergie électrique est d'assurer en tout temps et en tout lieu la couverture des puissances actives et réactives demandées par les utilisateurs, d'offrir une sécurité d'alimentation et de garantir une qualité acceptable de l'énergie, assurant la fiabilité du système.

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

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

### **I.8.2 Moyens de compensation de la puissance réactive [I.6] [I.7]**

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.

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 :

- 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 est relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux [I.7].

- 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.8.2.1 Les condensateurs**

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

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

### **I.8.2.2 Les 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.8.2.3 Les 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.8.2.4 Les 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.8.2.5 Transformateurs avec prises réglables en charge**

Un régleur en charge modifie le rapport de transformation à l'intérieur d'une plage déterminée en augmentant ou diminuant le nombre de spires de l'enroulement haute tension. Il faut prendre garde de ne pas interrompre le courant ni mettre des spires en court-circuit lors de la commutation. Cela est réalisé par l'insertion temporaire d'une inductance ou d'une

résistance. La plage de réglage est typiquement de  $\pm 15\%$  avec une vingtaine de prises (échelon entre 1 et 2 %). Par rapport au réglage nominal, un changement de prises correspond à une injection d'une tension additionnelle au point d'insertion du transformateur, ce qui implique une modification de la répartition de la puissance réactive dans la zone concernée [I.8].

## **I.9 Conclusion**

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

Cela nous persuade que le contrôle de tension et l'optimisation de la puissance réactive est un objectif important pour maintenir un profil adéquat dans les réseaux électriques.

Actuellement il existe une méthode moderne et sophistiquée pour le contrôle de tension et pour optimiser la puissance réactive dans les réseaux électriques. Cette méthode utilise les dispositifs FACTS qu'ils seront traités dans le prochain chapitre.

### Références bibliographiques

- [I.1] Pierre BORNARD, Michel PAVARD, Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, Vol. D 4 090.
- [I.2] V. Ignatova, "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique," Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2006.
- [I.3] Yahiaoui Merzoug, Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS, U.S.T.O. Oran, 2014.
- [I.4] Sekhane Hocine, L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACT, mémoire de magister, Université de Constantine1, 2013.
- [I.5] LU Wei, Le délestage optimal pour la prévention des grandes pannes d'électricité, thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble, Juillet 2009.
- [I.6] Khiat Mounir « Répartition optimale des puissances réactives dans un réseau d'énergie électrique sous certaines contraintes de sécurité » Thèse de doctorat d'état. Oran 2003
- [I.7] Yahiaoui M. « Control des tensions et des puissances réactive dans un réseau d'énergie de grand taille » Thèse de magister, soutenue à l'ENSET Oran, 2001.
- [I.8] Théodore Wildi, Gilber Sybille, Electrotechnique, De Boeck Université, 4eme Edition 2005.

*Chapitre II :*  
*Modélisation du*  
*compensateur statique*  
*SVC*



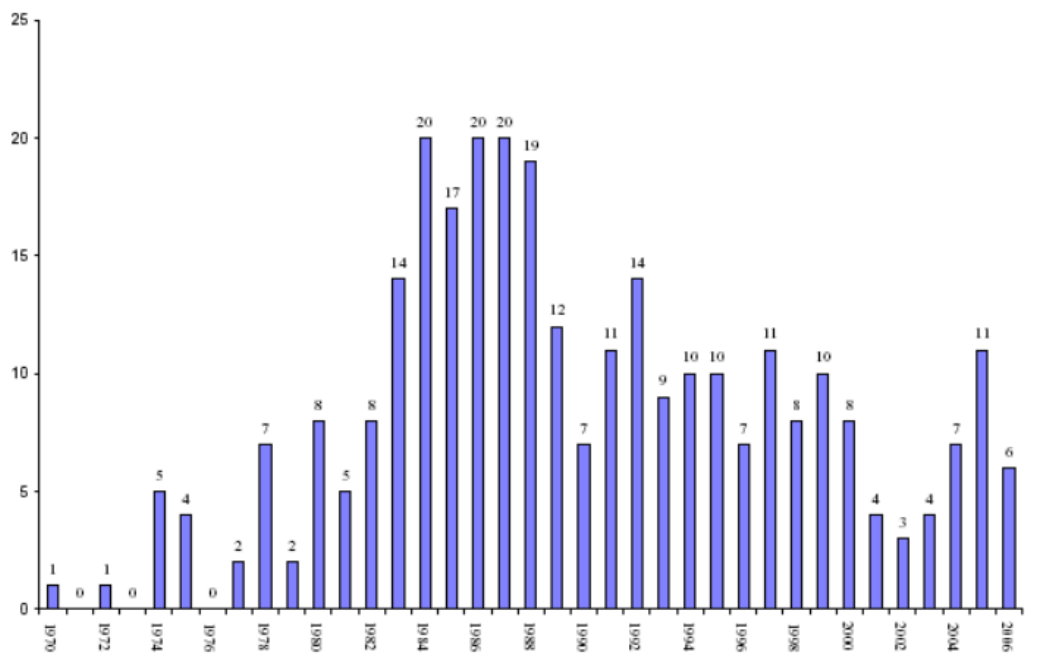
## II.1 Introduction

L'amélioration de la qualité de l'énergie, l'augmentation de la capacité transitée et le contrôle des réseaux existants peuvent être obtenus grâce à la mise en place de nouvelles technologies [II.1]. Pour les différentes raisons évoquées dans l'introduction générale, les dispositifs SVCs ont un rôle important à jouer dans le contrôle des transits de puissance et dans le maintien de conditions d'exploitations sûres du réseau de transport.

Ce chapitre a pour but de mettre en évidence les caractéristiques et le potentiel de différents SVCs développés à ce jour. Des notions générales sur les SVCs sont données ainsi que leur modélisation dans les réseaux électriques.

## II.2 Historique du SVC

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est apparu dans les années soixante-dix, le premier SVC est installé dans l'ouest de Nebraska, en Amérique du Nord, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles que les laminoirs ou les fours à arc. Les SVCs sont des FACTS de la première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage.



**Figure II.1** Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006 [II.2]

(Basé sur une liste compilée en 2006 par le Groupe IEEE I4 travaillé sur SVC et autres données des fabricants)

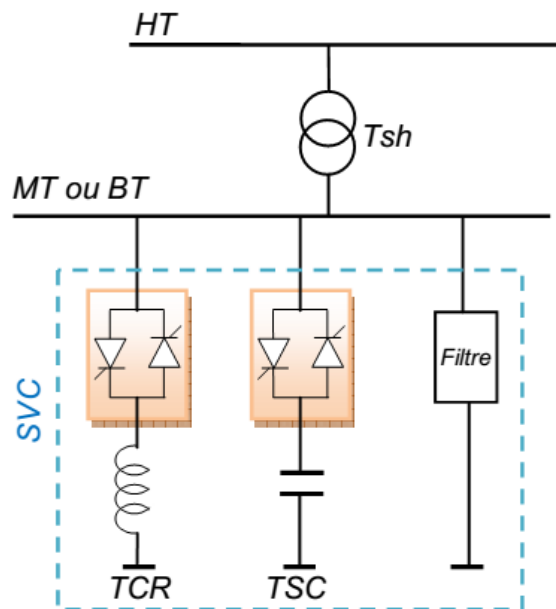
Plusieurs conceptions différentes ont été proposées. Toutefois, la plupart des SVCs sont construits à partir des mêmes éléments de base permettant de fournir ou d'absorber de la

puissance réactive. Depuis 1970 plus de 300 SVC sont installés autour du monde, plus de 90 installés à l'Amérique du Nord. La figure II.1 montre l'évolution d'installation du SVC dans le monde jusqu'à l'année 2006 [II.2].

### II.3 Définition du SVC

La IEEE, définit le SVC (Static Var Compensator) comme un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds [II.3], [II.4]. Il sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur de limites désirées. Il injecte de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de la charge [II.4].

Une représentation schématique de la structure d'un compensateur SVC est montrée sur la figure II.2.



**Figure II.2** Structure du compensateur SVC.

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 en fonction de la tension au jeu de barre de connexion et de l'admittance  $Y_{SVC} = 0$  [II.4], [II.5].

$$\begin{cases} P_{SVC} = 0 \\ Q_{SVC} = -Y_{SVC} \cdot V_k^2 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

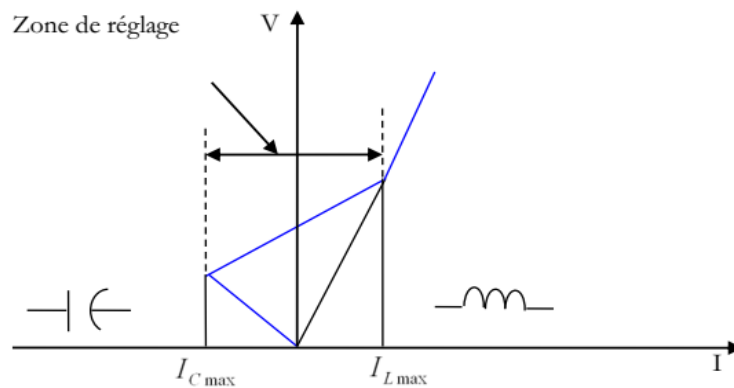
Telle que :

$$Y_{SVC} = Y_{TCR} + Y_{TSC} + Y_{CF} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} Y_{TCR}(\alpha) = -j \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi \cdot X_L} \\ Y_{TSC}(\alpha) = jX_C \cdot \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi} \\ Y_{CF} = jX_{CF} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

$\alpha$  (rad) : étant l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.

Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive(-V), qui peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contre balancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut [II.6].



**Figure II.3** Caractéristique d'un SVC [II.7].

La caractéristique statique est donnée sur la Figure II.3, trois zones de fonctionnement sont distinctes :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison de TCR et de TSC.
- Une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés.

Les principales applications du compensateur statique de puissance réactive sont [II.8] :

- Soutien de la tension en régime permanent ;
- Compensation rapide de la puissance réactive ;
- Réduction des risques de résonance hypo synchrone ;
- Amortissement des oscillations de puissance.

## II.4 Constitution du SVC

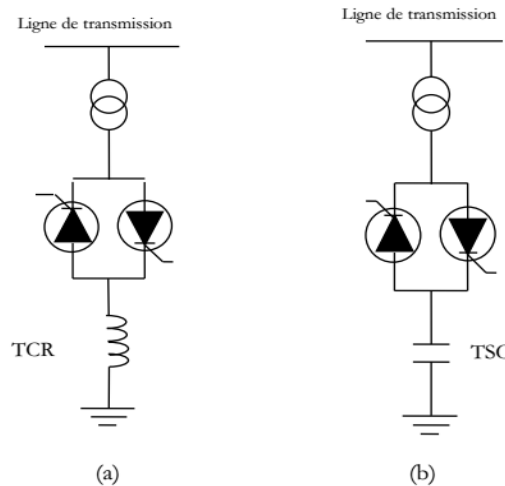
Le compensateur statique SVC est composé de plusieurs éléments tel que le condensateur fixe (FC), qui est commandé par des éléments mécaniques ; d'une réactance commandée par thyristors (TCR), et de condensateurs commutés par des thyristors (TSC), et parfois de réactance commutée par thyristors (TSR), et des filtres d'harmoniques [II.9].

**II.4.1 Condensateur fixe (FC)**

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

**II.4.2 TCR (Thyristor Controlled Reactor) ou TSR (Thyristor Switched Reactor)**

Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la Figure II.4.a, la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.



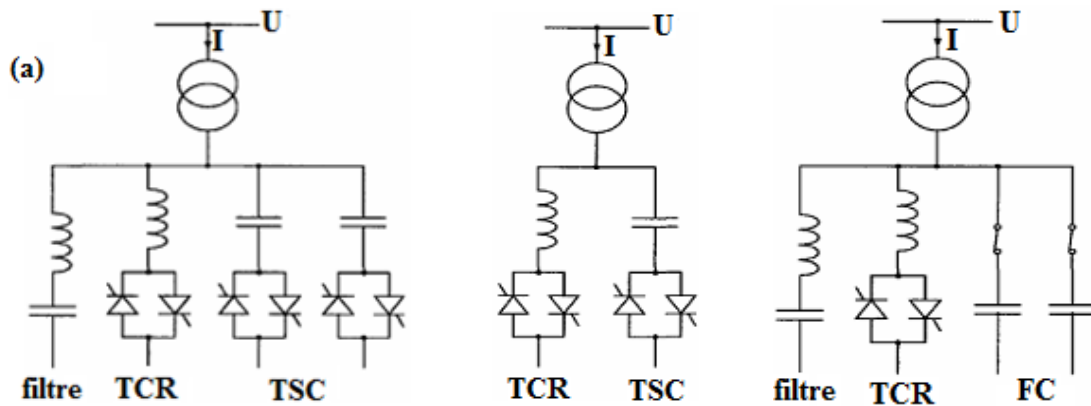
**Figure II.4** Schéma de TCR et TSC.

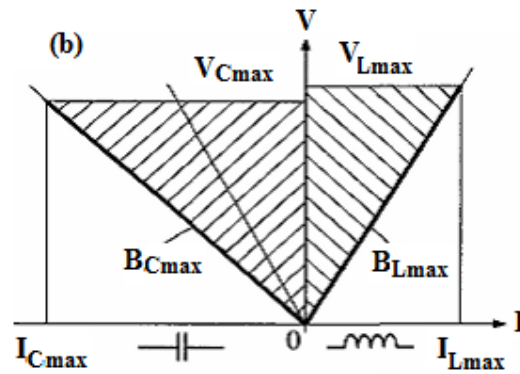
**II.4.3 TSC (Thyristor Switched Capacitor)**

Le circuit TSC est composé d'une réactance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la Figure II.4.b, pour un TSC les thyristors fonctionnent en pleine conduction.

**II.5 Schémas de SVC**

La figure (II.5.a) présente différentes configurations possibles de SVC. Lorsque le dispositif comporte une anche de type TCR, un filtre permettant de réduire les harmoniques est rajouté. La zone de fonctionnement équivalente du SVC est obtenue par la combinaison des zones de toutes les branches. Un exemple est donné à la figure (II.5.b).



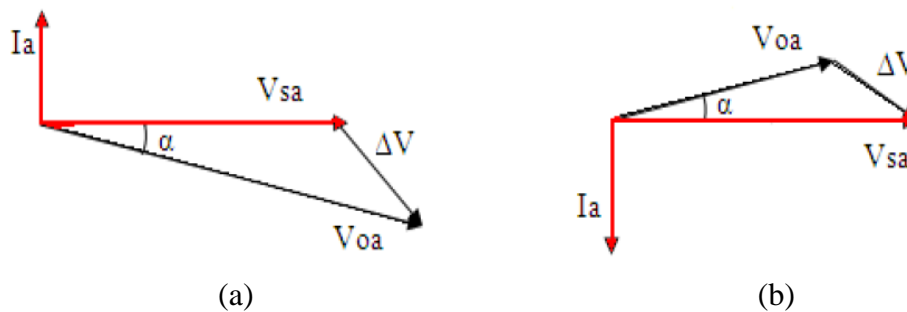


**Figure II.5** Compensateur statique de puissance réactive, a) schémas, b) zone de fonctionnement

## II.6 Principes de fonctionnement du SVC

Le principe de fonctionnement du SVC est simple. En faisant varier la grandeur des tensions de sortie produites, l'échange de puissance entre le SVC et le réseau peut être réglé. Autrement dit, si l'amplitude de la tension de sortie est augmentée au-delà de celle du réseau figure II.6.a, le courant circule à travers la réactance en provenance du SVC vers le réseau alors le SVC produit de la puissance réactive (capacitif) pour le réseau [II.10] [II.11].

Si l'amplitude de la tension de sortie est réduite à une valeur inférieure par rapport à celle du réseau figure II.6.b, alors un courant réactif circule depuis le réseau vers le SVC et dans ce cas le compensateur SVC absorbe de la puissance réactive (inductif). Si la tension de sortie est égale à celle du réseau l'échange de puissance réactive est égal à zéro.



**Figure II.6** Diagramme de Phase pour les modes de fonctionnement : capacitif ( $\alpha < 0$ ) et (b) inductif ( $\alpha > 0$ ).

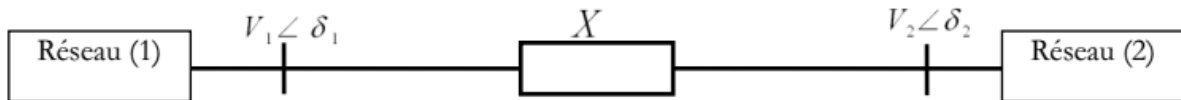
## II.7 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques [II.12]

Les FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissances moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance [II.13]. L'idée principale des FACTS peut être expliquée par l'équation de base (II.4) de la puissance transmise à travers une ligne de transport à courant alternatif :

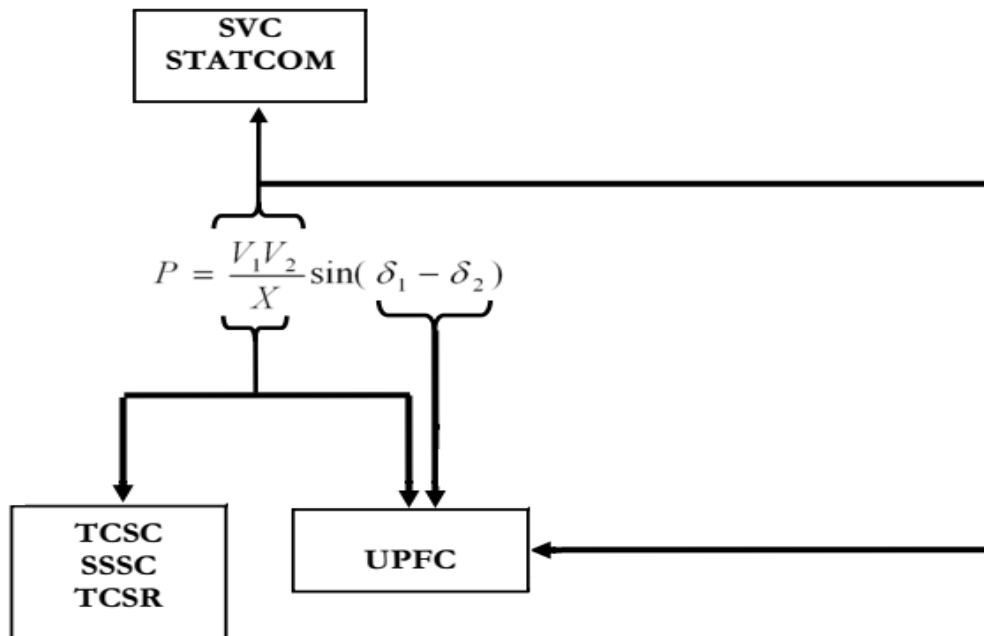
$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (\text{II.4})$$

$V_1$  et  $V_2$  sont les tensions aux extrémités de la ligne,  $X$  représente l'impédance série de la ligne,  $(\delta_1 - \delta_2)$  est l'angle de phase entre les deux systèmes. Il est clair que les trois paramètres tension, impédance, et angle de phase influencent la puissance transmise entre les deux systèmes.

Les possibilités du contrôle grâce à l'application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques sont résumées dans la Figure II.8. La Figure II.7 montre un diagramme schématique de deux réseaux électriques connectés par une ligne de transmission en courant alternatif.



**Figure II.7** Schéma de deux réseaux connectés [II.12].



**Figure II.8** Diagramme schématique pour l'application des FACTS [II.12].

## II.8 Modélisation de dispositif SVC

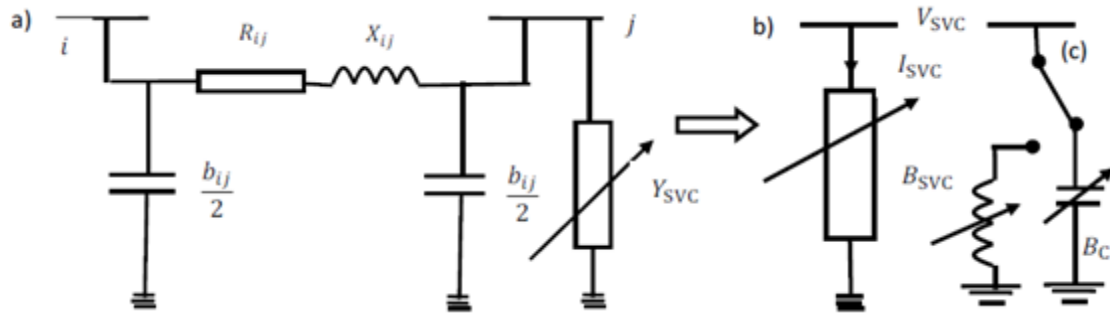
Les dispositifs FACTS shunt modélisés sont des compensateurs statiques de puissances réactives tels que le SVC et autres dérivés (TCR, TSC). Bien qu'ils présentent des performances moins bonnes que le compensateur statique synchrone, elles ne sont guère importantes en régime permanent. De plus, les simulations sont réalisées pour des cas où les tensions sont proches de la valeur nominale. Dans cette situation, le SVC et le STATCOM présentent des caractéristiques semblables [II.14] [II.15].

### II.8.1 Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC

Le dispositif SVC est modélisé par une admittance shunt  $y$  SVC variable (figure II.9.a). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire :

$$y_{SVC} = j b_{SVC} \tag{II. 5}$$

La susceptance  $b_{SVC}$  peut être de nature capacitive ou inductive afin de fournir, d'absorber, respectivement de la puissance réactive  $Q_{SVC}$  (figure II.9.c).



**Figure II.9** Modélisation d'un SVC : a) SVC placé en un nœud j, b) symbole, c) modèle du SVC.

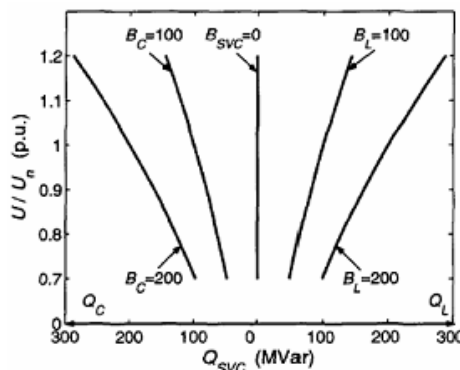
Les valeurs des SVC sont exprimées sous forme de puissance réactive  $Q_{SVC}$  absorbée à la tension nominale  $U_n$ . La correspondance avec la susceptance  $b_{SVC}$  est donnée par la relation suivante [II.14] :

$$B_{SVC} = -U_n^2 \cdot b_{SVC} = -U_n^2 \cdot \frac{X_C [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] - \pi X_L}{\pi X_C X_L} \tag{II. 6}$$

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

$$Q_{SVC} = -\frac{B^2}{U_n} \cdot B_{SVC} \tag{II. 7}$$

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 II.10 pour plusieurs valeurs de compensation [II.14].



**Figure II.10** Variation de la puissance réactive par un SVC en fonction de la tension nodale.

### II.8.2 Emplacement du SVC [II.16]

Les installations FACTS sont généralement situées à des postes déjà existants. Toutefois, les

deux cas sont en considérations ; à savoir lorsque le SVC est placé en un nœud et lorsqu'il est situé au milieu de la ligne.

### II.8.2.1 SVC placé en un nœud du réseau

Lorsqu'ils sont connectés aux nœuds du réseau, les SVC sont généralement placés aux endroits où se trouvent des charges importantes ou variant fortement. Ils peuvent également être positionnés à des nœuds où le générateur n'arrive pas à fournir ou absorber suffisamment de puissance réactive pour maintenir le niveau de tension désiré. Lorsqu'un SVC est présent au nœud  $i$ , seul l'élément  $Y_{ii}$  de la matrice d'admittance nodale est modifié.

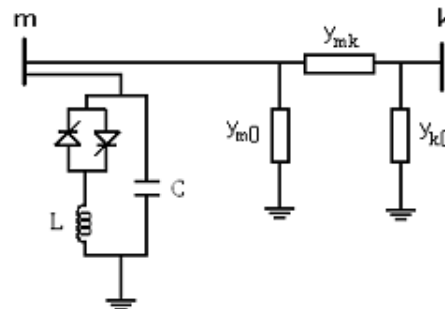


Figure II.11 SVC placé en un nœud.

Pour un SVC connecté à une barre omnibus  $m$  d'une section de ligne représentée par le quadripôle  $(y_{m0}, y_{mk}, y_{k0})$  comme représenté sur la figure II.11, la contribution du SVC à la nouvelle matrice d'admittance concerne l'élément shunter. Il en résulte la matrice d'admittance de la ligne.

$$Y_{\text{new}}^{\text{line}} = \begin{pmatrix} Y_{mk} + Y_{m0} + Y_{\text{sVC}} & -Y_{mk} \\ -Y_{mk} & Y_{mk} + Y_{k0} \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$Y_{\text{SVC}} = j \frac{1}{X_L X_C} \left[ X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \right] \quad (\text{II.9})$$

La réactance SVC est donnée comme l'expression suivante :

$$X_{\text{sVC}}(\alpha) = j \frac{\pi X_L}{(2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - \pi \frac{X_L}{X_C}} \quad (\text{II.10})$$

### II.8.2.2 SVC placé au milieu d'une ligne

Lorsque le compensateur statique est inséré au milieu d'une ligne, celle-ci est divisée en deux sections identiques. Le SVC est connecté au bus supplémentaire "t" comme illustré par la figure II.12. Afin de prendre en compte ce nouveau bus, une ligne supplémentaire et une colonne doivent être ajoutées à la matrice d'admittance nodale. Pour éviter de devoir changer le nombre de bus du réseau et donc la taille de la matrice d'admittance, une étoile-delta de transformation permet de réduire le système en supprimant le bus "t" et en calculant les paramètres d'une ligne



équivalente. La figure II.12 illustre les étapes pour obtenir cette ligne équivalente

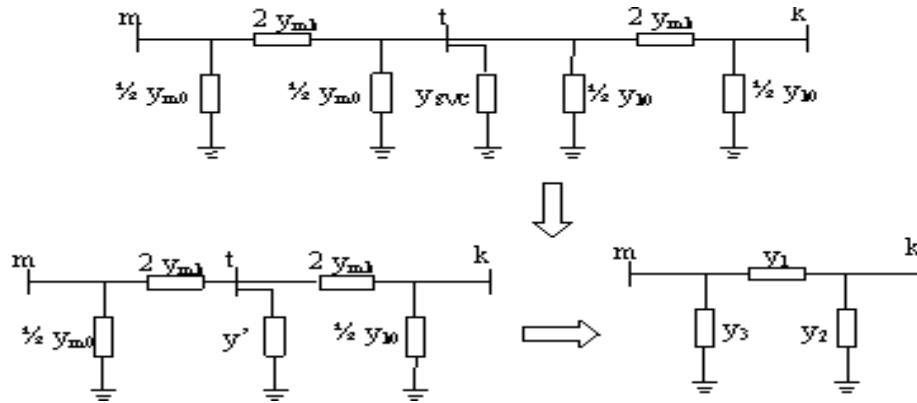


Figure II.12 Y-Δ transformation.

Tels que :

$$\left\{ \begin{aligned} Y_1 &= \frac{4Y_{mk}^2}{4Y_{mk} + Y_{svc} + \frac{1}{2}Y_{m0} + \frac{1}{2}Y_{k0}} \\ Y_2 &= \frac{Y_{mk}(2Y_{svc} + Y_{m0} + Y_{k0})}{4Y_{mk} + Y_{svc} + \frac{1}{2}Y_{m0} + \frac{1}{2}Y_{k0}} + \frac{1}{2}Y_{m0} \\ Y_3 &= \frac{Y_{mk}(2Y_{svc} + Y_{m0} + Y_{k0})}{4Y_{mk} + Y_{svc} + \frac{1}{2}Y_{m0} + \frac{1}{2}Y_{k0}} + \frac{1}{2}Y_{k0} \end{aligned} \right. \quad (II.11)$$

Tous les éléments de la matrice d'admittance d'une ligne avec un SVC en son milieu sont modifiés, tels que  $Y_{new}^{line} = \begin{pmatrix} Y_{mm} & Y_{mk} \\ Y_{km} & Y_{kk} \end{pmatrix}$  (II.12)

$$\left\{ \begin{aligned} Y_{mm} &= \frac{4Y_{mk}^2 + Y_{mk}(2Y_{svc} + Y_{m0} + Y_{k0})}{4Y_{mk} + Y_{svc} + \frac{1}{2}Y_{m0} + \frac{1}{2}Y_{k0}} + \frac{1}{2}Y_{m0} \\ Y_{kk} &= \frac{4Y_{mk}^2 + Y_{mk}(2Y_{svc} + Y_{m0} + Y_{k0})}{4Y_{mk} + Y_{svc} + \frac{1}{2}Y_{m0} + \frac{1}{2}Y_{k0}} + \frac{1}{2}Y_{k0} \\ Y_{km} &= \frac{-4Y_{mk}^2}{4Y_{mk} + Y_{svc} + \frac{1}{2}Y_{m0} + \frac{1}{2}Y_{k0}} \end{aligned} \right. \quad (II.13)$$

### II.8.3 Modélisation d'un SVC de type susceptance shunt variable [II.17]

Le courant absorbé par le SVC est donné par l'équation suivante :

$$I_{svc} = -jB_{svc}V_k \quad (II.14)$$

La puissance réactive absorbée par le SVC et aussi injecté dans le nœud k est donnée par

l'équation :

$$Q_{svc} = Q_k = -V_k^2 B_{svc} \quad (\text{II. 15})$$

La linéarisation de l'équation est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_k \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta B_{svc}/B_{svc} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (\text{II. 16})$$

Le calcul itératif de la nouvelle susceptance shunt variable est donné par :

$$B_{svc}^{(i)} = B_{svc}^{(i-1)} + \left( \frac{\Delta B_{svc}}{B_{svc}} \right)^{(i)} B_{svc}^{(i-1)} \quad (\text{II. 17})$$

Cette valeur représente la valeur totale nécessaire pour maintenir les tensions dans tous les nœuds du réseau à une valeur spécifiée.

#### II.8.4 Modélisation d'un SVC de type susceptance shunt variable et angle d'amorçage variable

$$Q_k = \frac{-V_k^2}{X_c X_L} \left\{ X_L - \frac{X_c}{\pi} [2(\pi - \alpha_{svc}) + \sin(2\alpha_{svc})] \right\} \quad (\text{II. 18})$$

De l'équation précédente, la linéarisation du SVC est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2V_k^2}{\pi X_L} [\cos(2\alpha_{svc}) - 1] \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \alpha_{svc} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (\text{II. 19})$$

La nouvelle valeur de l'angle d'amorçage est déterminée par :

$$\alpha_{svc}^{(i)} = \alpha_{svc}^{(i-1)} + \Delta \alpha_{svc}^{(i)} \quad (\text{II. 20})$$

### II.9 Avantage du SVC

Il existe des avantages à utiliser un SVC dans le réseau, y compris : une réponse rapide, une plus grande flexibilité, une bonne sécurité, des phases d'équilibrage, l'élimination de la tension supplémentaire, un fonctionnement rapide, un faible coût de maintenance, un contrôle simple, une augmentation de la stabilité transitoire, la prévention de l'effondrement de la tension, l'amélioration du facteur de puissance, l'amélioration de la qualité de puissance et l'élimination des harmoniques, [II .18].

### II.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en première partie une vue globale sur les dispositifs SVCs (définition et le rôle, leurs classifications et différentes catégories, structure et principe de fonctionnement) avec des schémas qui structurent chaque dispositif.

En deuxième partie nous avons présenté la modélisation de SVC insérés dans le réseau électrique afin d'intégrer ces modèles dans le problème de l'écoulement de puissance qui sera présenté dans le chapitre 3.

## Références bibliographiques

- [II.1] Emmanuelle. Catz « Evolutions techniques du système de transport et de distribution d'électricité ». Supélec 1999, France.
- [II.2] Daniel J. Sullivan « Improvements in voltage control and dynamic performance of power transmission systems using StaticVar Compensators (SVC) » mémoire de Master, université de Pittsburgh, Pennsylvania, USA 5 Avril 2006.
- [II.3] H. Persoz, “La planification des réseaux électriques,” in Eyrolles, Paris, 1984.
- [II.4] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez and C. Angeles-Camacho, “FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks,” in John Wiley & Son Inc, 2004, p.420.
- [II.5] N. Yorino, E. E. El-Araby, H. Sasaki, and S. Harada, “A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltagecollapse,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, no. 1, pp. 3–10, 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2002.804921.
- [II.6] L. THOMAS, Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique FACTS, 10ème entretien, Physique – industrie, Paris, 19 Octobre 2006.
- [II.7] Sekhane Hocine, L’optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l’incorporation des dispositifs FACT, mémoire de magister, Université de Constantine1, 2013.
- [II.8] S. DUPUIS, FPMS, " L'électronique de puissance dans les réseaux de transport, FACTS," Journée d'étude du groupe de contact FNRS-GREPES Electronique de puissance, 22 mars 2006.
- [II.9] H. Tupia. Ernesto « Modélisation et analyse de stabilité du circuit compensateur statique variable » diplôme de maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Canada 2002.
- [II.10] K. Lamia « Optimisation de la synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaim Particulaires pour le contrôle des réseaux électrique » Mémoire de Magister de l'Université Alger (Ecole Nationale Polytechnique El-Harrach), 2006.
- [II.11] A. Tahri, A. Draou « modeling of a nonlinear control method applied to an advanced static VAR compensator » received 20.10.2004, published 07.02.2005, USTO Oran Algeria
- [II.12] MokhnacheMadiha, Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS, mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2012.
- [II.13] Ouali A., Boussahoua B. et Boudour M., Evaluation de la Stabilité Transitoire d'un Réseau Electrique par Réseau de Neurones Artificiel Optimisé par les Plans d'Expériences, 3rd

Internationale Conférence on Electrical Engineered, Alger, 2009.

**[II.14]** S. Gerbex « Métaheuristique appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique » Faculté des sciences et Techniques de l'ingénieur, EPFL-Lausanne 2003, Suisse.

**[II.15]** Y. Besanger « Étude des FACTS et de leur Comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, laboratoire d'électronique, 1996.

**[II.16]** M. Crappe and S. Dupuis : « Les systèmes flexibles de transport de l'énergie électriques », Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques, Chapitre 4, pp 149-204, Paris, Hermes, 2003.

**[II.17]** Sayah Samir, Application de l'intelligence artificielle pour le fonctionnement optimal des systèmes électriques, Thèse Doctorat en sciences, Université de Sétif.

**[II.18]** M. Shahrazad, "Optimal Allocation of FACTS Devices in Power Networks Using Imperialist Competitive Algorithm (ICA)," thèse de doctorat, Brunel University London, 2015.

*Chapitre III :*  
*Écoulement de puissance*

### III.1 Introduction

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à rechercher un point de fonctionnement stable à un moment donné à travers une information complète du courant et de la puissance.

En d'autres termes, l'étude de l'écoulement de puissance (Load Flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent.

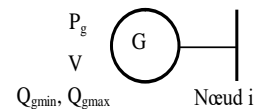
Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux [III.1].

### III.2 Modélisation des composants du réseau électrique [III.2]

Un réseau de transport ou de distribution électrique contient un ensemble de composants qu'on doit modéliser afin d'établir les équations qui gouvernent le système électrique. Dans les sections qui suivent, on va exposer quelques modèles algébriques de base relatifs aux composants du réseau qui sont nécessaires pour le calcul de l'écoulement de puissance.

#### ➤ Les générateurs

Un générateur est représenté par une source de tension constante qui injecte au niveau du nœud auquel il est connecté une puissance active  $P_g$  et une puissance réactive  $Q_g$ .  $P_g$  est constante durant tout le calcul, par contre  $Q_g$  varie entre  $Q_{gmin}$  et  $Q_{gmax}$  afin de maintenir une tension constante aux bornes de l'alternateur.



#### ➤ Les lignes

Les lignes sont représentées par leurs schémas équivalents en  $\pi$ , les grandeurs associées sont :

- L'impédance série  $Z=R+jX$ ,
- L'admittance shunt au niveau de chaque bras  $y_g=(G+jB)/2$ ,
- La puissance maximale de transit.

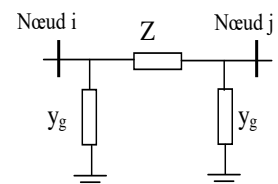


Schéma en  $\pi$  d'une ligne de transmission

#### ➤ Les transformateurs de puissance

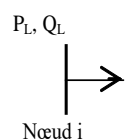
Le transformateur est représenté par sa matrice admittance, les grandeurs caractéristiques sont le rapport de transformation  $ae^{j\phi}$  qui peut être complexe ou non (selon son indice horaire) et l'impédance de fuites  $Z=R+Jx$



Schéma équivalent d'un transformateur

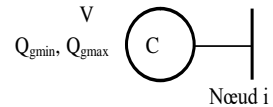
#### ➤ Les charges

Une charge est modélisée par une impédance qui consomme une puissance active constante  $P_L$  et une puissance réactive constante  $Q_L$ .



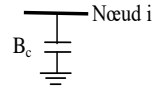
➤ **Les compensateurs synchrones**

Un compensateur synchrone est un générateur de puissance réactive, il est représenté par un générateur avec  $P_g=0$ .



➤ **Les compensateurs statiques**

Le compensateur statique simple est modélisé par un condensateur shunt dont l'admittance est égale à  $jB_c=jC\omega$ .



### III.3 Différents types d'analyse des réseaux électriques

#### 1. Analyse de l'écoulement de puissance

Les phénomènes qui régissent le fonctionnement des réseaux électriques sont relativement lents, donc ces phénomènes peuvent être étudiés par les lois utilisées généralement dans l'étude des régimes permanents. Les lignes de transmission opèrent généralement sous des régimes équilibrés ou quasi-équilibrés ce qui permet l'utilisation des schémas par phase « monophasés » pour l'étude de ces réseaux avec une très bonne approximation. L'analyse de l'écoulement de puissance fournit un point de départ pour plusieurs d'autres types d'analyses.

#### 2. Analyse des défauts

L'analyse des défauts concerne en général l'étude des réseaux électriques sous des conditions sévères de déséquilibre (ouverture ou court-circuit d'une ligne). Les résultats de cette analyse sont utilisés dans le dimensionnement des appareils de protection (relais, disjoncteurs...).

#### 3. Analyse de la stabilité transitoire

Au contraire des deux types précédents, l'analyse de la stabilité transitoire concerne l'analyse de la performance du réseau durant une certaine période de temps. Le modèle du système utilisé pour l'analyse de la stabilité transitoire ne contient pas uniquement les paramètres du réseau électrique, mais il contient également les données dynamiques des différents générateurs. L'analyse de la stabilité transitoire a pour but de déterminer si chaque générateur pris d'une manière individuelle sera capable de maintenir le synchronisme avec le reste du réseau suite à l'intervention d'un défaut donné.

#### 4. Analyse d'une stabilité transitoire étendue

Cette analyse a un rapport avec les points de génération uniquement, en plus des données dynamiques des différents générateurs nécessaires à l'étude de la stabilité transitoire, les données du système d'excitation, la vitesse d'entraînement, les données dynamiques des différentes turbines sont également nécessaires. Généralement cette analyse requiert également les données dynamiques des appareils de contrôle tels que les relais, les disjoncteurs... toutes ces données compliquent d'avantage l'analyse du système mais elles fournissent des résultats

proches de ceux de la réalité.

### **5. Analyse de la stabilité en petits signaux**

Cette analyse est très utile dans le cas où le réseau est sollicité par des faibles perturbations. La stabilité en petits signaux utilise un modèle linéarisé du réseau qui inclut les données dynamiques des générateurs, des turbines et les appareils de contrôle. Le système ainsi obtenu constitué des équations non linéaires est linéarisé autour d'un point spécifique de fonctionnement. Les valeurs propres et les vecteurs propres du système linéarisé peuvent être utilisés pour étudier la stabilité du réseau : la partie imaginaire de chaque valeur propre indique la fréquence d'oscillations associée à cette valeur propre, la partie réelle de sa part donne l'amortissement des oscillations. Généralement, l'analyse de la stabilité en petits signaux vise à trouver les perturbations et les conditions qui provoquent des oscillations. Cette méthode ne donne pas des informations sur l'amplitude des oscillations.

### **6. L'analyse transitoire**

L'analyse transitoire signifie l'analyse du système et ses différentes composantes lorsqu'un phénomène transitoire rapide est survenu. Cette méthode requiert des informations détaillées sur les composantes du système qui ne sont pas disponibles dans la majorité des cas. D'une manière typique, seulement les composantes du système de région la plus proche de l'incident sont traitées par l'analyse transitoire.

#### **III.3.1 L'analyse de l'écoulement de puissance :**

Le but principal de cette analyse est que la transition de la puissance des lieux de génération vers les lieux de consommation à travers le réseau de distribution soit stable, fiable et économique. L'analyse de l'écoulement de puissance forme le noyau de l'analyse des réseaux électriques. Cette analyse est indispensable pour plusieurs raisons : elle joue un rôle clé dans la planification des extensions du réseau existant ainsi que les conditions d'avoir des générations faciles et sans problèmes. La solution de l'analyse de l'écoulement de puissance représente un point de départ pour plusieurs d'autres méthodes d'analyse des réseaux électriques. La solution de l'écoulement de puissance constitue également la solution initiale pour l'étude du comportement du réseau en régime transitoire.

Dans les conditions du régime établi (permanent), le modèle du réseau est constitué d'un ensemble d'équations algébriques non linéaires. En réalité, les puissances consommées et celles générées varient d'une manière continue; mais afin de pouvoir effectuer un calcul d'écoulement de puissance, ces puissances seront considérées comme constantes durant l'intervalle de temps objet de l'étude (une demi-heure, une semaine, un mois...).

**Le problème de l'écoulement de puissance** (connu souvent sous l'appellation du problème



de répartition de puissance) peut être formulé comme suit :

*Pour un réseau électrique donné, avec des puissances complexes de charge connues (au niveau des points de charge ou de consommation) et un ensemble de restrictions et de spécifications sur les puissances au niveau des points de génération et les valeurs des tensions, trouver pour chacun des nœuds du réseau la tension correspondante et la puissance complexe.*

L'objectif de tout logiciel de calcul de l'écoulement de puissance est de fournir les informations suivantes :

- Le module et la phase de la tension au niveau de chaque nœud.
- Les puissances actives et réactives transitées dans chaque élément.
- La puissance réactive fournie par chaque générateur.

Donc logiciel de calcul de l'écoulement de puissance a besoin des données suivantes :

- La liste des branches (connections) c-à-d les impédances des éléments entre les différents nœuds, les lignes et les transformateurs sont représentés par leurs schémas équivalents en  $\pi$ .
- La magnitude et la phase de la tension au niveau d'un nœud qui est la référence pour le reste du réseau.
- La puissance active et la magnitude de la tension au niveau de chaque nœud de génération.
- Les puissances actives et réactives au niveau de chaque nœud de consommation (de charge).

**Le fonctionnement en régime équilibré** est supposé pour la plupart des cas des problèmes de l'écoulement de puissance (PEP), par conséquent, les composantes directes seront suffisantes pour mener une telle étude. Dans la formulation des problèmes de l'écoulement de puissance, toutes les grandeurs sont exprimées en per unit (pu).

### III.4 Formulation de la matrice admittance

La première étape pour traiter un problème de l'écoulement de puissance (PEP) est la formulation de la matrice admittance  $Y_{bus}$ ,  $Y_{bus}$  est une matrice  $n \times n$  ( $n$  est le nombre de nœuds du réseau) obtenue à partir des admittances des éléments des circuits équivalents constituant le réseau. La plupart des éléments des réseaux sont représentés par la combinaison des éléments shunt (connectés entre le nœud considéré et le nœud de référence qui est la terre) et des éléments en série (connectés entre deux nœuds différents). La formulation de la matrice admittance respecte les trois règles suivantes :

- Chaque élément diagonal  $y_{ii}$  de  $Y_{bus}$  est égale à la somme algébrique de toutes les admittances connectées à ce nœud  $i$ .

- La mutuelle admittance entre les nœuds  $i$  et  $k$   $y_{ik}$  est égale à la somme algébrique de toutes les admittances connectées entre le nœud  $i$  et le nœud  $k$  précédée par un signe moins (-).

-  $y_{ik}=y_{ki}$

### III.4.1 Formulation du problème de l'écoulement de puissance (réseau à deux nœuds)

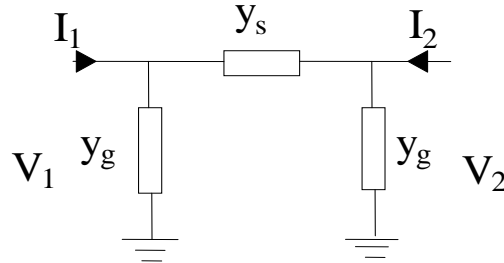


Schéma en  $\pi$  d'une ligne de transmission

#### - Détermination de la matrice admittance $Y_{bus}$ :

En utilisant les lois de Kirchhoff :

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \bar{V}_1 \bar{y}_g + (\bar{V}_1 - \bar{V}_2) \bar{y}_s \\ \bar{I}_2 &= \bar{V}_2 \bar{y}_g + (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \bar{y}_s\end{aligned}\quad (III.1)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_g + \bar{y}_s & -\bar{y}_s \\ -\bar{y}_s & \bar{y}_g + \bar{y}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{11} & \bar{y}_{12} \\ \bar{y}_{21} & \bar{y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix}\quad (III.2)$$

Où :

$$\bar{I}_{bus} = Y_{bus} \bar{V}_{bus}\quad (III.3)$$

#### - Écriture des équations de l'écoulement de puissance :

Les puissances apparentes injectées dans chaque nœud :

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= \bar{S}_{G1} - \bar{S}_{D1} = P_1 + jQ_1 = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* \\ \bar{S}_2 &= \bar{S}_{G2} - \bar{S}_{D2} = P_2 + jQ_2 = \bar{V}_2 \bar{I}_2^*\end{aligned}\quad (III.4)$$

En tenant compte de (III.2) :

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= \bar{V}_1 \bar{I}_1^* = \bar{V}_1 (\bar{y}_{11}^* \bar{V}_1^* + \bar{y}_{12}^* \bar{V}_2^*) = \bar{V}_1 \sum_{k=1}^2 \bar{y}_{1k}^* \bar{V}_k^* \\ \bar{S}_2 &= \bar{V}_2 \bar{I}_2^* = \bar{V}_2 (\bar{y}_{21}^* \bar{V}_1^* + \bar{y}_{22}^* \bar{V}_2^*) = \bar{V}_2 \sum_{k=1}^2 \bar{y}_{2k}^* \bar{V}_k^*\end{aligned}\quad (III.5)$$

Si on adopte la représentation polaire pour les admittances et les tensions :

$$\bar{y}_{ik} = y_{ik} e^{j\theta_{ik}} \quad \text{et} \quad \bar{V}_i = V_i e^{j\delta_i}\quad (III.6)$$

L'équation (III.5) devient donc :

$$\begin{aligned}
P_1 + jQ_1 &= V_1 \sum_{k=1}^2 y_{1k} V_k e^{j(\delta_1 - \delta_k - \theta_{1k})} \\
P_2 + jQ_2 &= V_2 \sum_{k=1}^2 y_{2k} V_k e^{j(\delta_2 - \delta_k - \theta_{2k})}
\end{aligned} \tag{III.7}$$

Donc les équations non linéaires qui décrivent un réseau à deux nœuds sont :

$$\begin{aligned}
P_i &= V_i \sum_{k=1}^2 y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \\
Q_i &= V_i \sum_{k=1}^2 y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})
\end{aligned} \quad i=1,2 \tag{III.8}$$

**Généralisation pour le cas d'un réseau à n nœuds (2n équations) :**

$$\begin{aligned}
P_i &= V_i \sum_{k=1}^n y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \\
Q_i &= V_i \sum_{k=1}^n y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})
\end{aligned} \quad i=1, n \tag{III.9}$$

Si on adopte la représentation polaire pour les tensions et la représentation cartésienne pour les admittances :

$$\begin{aligned}
P_i &= V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \\
Q_i &= V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik})
\end{aligned} \quad i=1, n \tag{III.10}$$

Tel que  $\bar{y}_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$  et  $\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k$ .

**Le problème de l'écoulement de puissance se résume comme suit :**

- Chaque nœud  $i$  du réseau est caractérisé par 4 variables :  $|\bar{V}_i|, \theta_i, P_i, Q_i$ , donc pour un réseau à  $n$  nœuds nous aurons  $4n$  inconnues à déterminer. Si parmi ces  $4n$  variables  $2n$  sont spécifiées, les  $2n$  variables inconnues qui restent seront déterminées par la résolution du système non linéaire à  $2n$  équations donnés par l'équation (III.9).
- Pour un nœud  $i$  donné, deux des quatre variables précédentes doivent être spécifiées, les deux autres variables seront calculées par l'analyse de l'écoulement de puissance.
- Pour les nœuds de charge (de consommation) les puissances actives et réactives doivent être estimées (connues) d'une manière précise. Ce type de nœuds est appelé **nœuds PQ** (PQ buses). Pour ces nœuds les inconnues sont le module et l'argument de la tension.
- Pour les nœuds de génération, la puissance active est contrôlée par la vitesse de la turbine et la puissance réactive est contrôlée par le courant d'excitation ces deux grandeurs sont donc connues pour les nœuds de génération, l'analyse de l'écoulement de puissance doit donc

calculer l'argument de la tension et la puissance réactive concernant ces nœuds qui sont appelés **nœuds PV** (PV buses).

- Comme les pertes actives dans la globalité du réseau électrique ne peuvent pas être estimées avant l'achèvement de calcul de l'écoulement de puissance, il est nécessaire de désigner un nœud du réseau qui doit compenser ces pertes et assurer l'équilibre entre la puissance active demandée et celle générée. Ce nœud est appelé **nœud de référence** –nœud balancier- (Slack, floating ou swing bus). Pour le slack bus, le module et l'argument de la tension sont spécifiés (l'argument est généralement pris égale à 0), tandis que les puissances active et réactive sont des inconnues.

**Donc en résumé :**

**1- Les nœuds PQ :**  $P_i$  connue ( $P_{Di}$  connue,  $P_{Gi}=0$ ),  $Q_i$  connue ( $Q_{Di}$  connue,  $Q_{Gi}=0$ ),  $|\bar{V}_i|$  inconnue et  $\delta_i$  inconnu.

**2- Les nœuds PV :**  $P_i$  connue ( $P_{Gi}$  connue,  $P_{Di}=0$ ),  $Q_i$  inconnue ( $Q_{Di}$  connue,  $Q_{Gi}$  inconnue),  $|\bar{V}_i|$  connue (spécifié) et  $\delta_i$  inconnu.

**3- Le Slack bus :**  $P_i$  inconnue ( $P_{Di}$  inconnue,  $P_{Gi}$  inconnue),  $Q_i$  inconnue ( $Q_{Di}$  inconnue,  $Q_{Gi}$  inconnue),  $|\bar{V}_i|$  connu (spécifié) et  $\delta_i$  connu (=0).

Pour le bilan des puissances :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_{Gi} &= \sum_{i=1}^n P_{Di} + P_{pertes} \\ \sum_{i=1}^n Q_{Gi} &= \sum_{i=1}^n Q_{Di} + Q_{pertes} \end{aligned} \quad (III.11)$$

### III.5 Différents types de variables et leurs limites

**Types de variables :**

- Variables de contrôle (de commande) :  $P_{Gi}$  (à l'exception de slack bus),  $Q_{Gi}$  ou  $|\bar{V}_i|$ .
- Variables de perturbations :  $P_i$ ,  $Q_i$ .
- Variables d'état :  $|\bar{V}_i|$  et  $\delta_i$ .

**Limites des variables :**

- Limites imposées sur les modules des tensions :  $|\bar{V}_i|_{\min} \leq |\bar{V}_i| \leq |\bar{V}_i|_{\max}$
- Limites imposées sur les puissances :  $(P_{Gi})_{\min} \leq P_{Gi} \leq (P_{Gi})_{\max}$  et  $(Q_{Gi})_{\min} \leq Q_{Gi} \leq (Q_{Gi})_{\max}$

### III.6 Problème de solvabilité

Le problème fondamental dans la résolution des systèmes d'équations est d'avoir un nombre

d'équations qui est égale au nombre d'inconnus. Cependant ceci n'est pas toujours suffisant dans le calcul de l'écoulement de puissance. Considérons un réseau électrique à  $n$  nœuds, avec  $n_{PV}$  est le nombre des nœuds PV,  $n_{PQ}$  est le nombre des nœuds PQ et un seul nœud de type  $V\delta$  (slack bus). Pour définir entièrement l'état du système qui est défini par l'équation (III.9), il est nécessaire de déterminer pour chacun des  $n$  nœuds le module et l'argument de la tension c.-à-d.  $2n$  inconnues, mais le l'argument et le module de la tension du slack bus sont spécifiés ainsi que les modules des tensions concernant les  $n_{PV}$  nœuds PV. Les grandeurs inconnues sont donc les modules des tensions concernant les  $n_{PQ}$  nœuds PQ, et les arguments des tensions des  $n_{PV}$  nœuds PV et des  $n_{PQ}$  nœuds PQ. Ceci donne au total  $n_{PV}+2n_{PQ}$  variables inconnues. A partir des nœuds PV, nous pourrions avoir  $n_{PV}$  équations relativement aux injections de la puissance active et  $2n_{PQ}$  équations relativement aux injections des puissances actives et réactives ce qui constitue  $n_{PV}+2n_{PQ}$  équations et qui correspond bien au nombre d'inconnus et la résolution est donc possible.

### III.7 Méthodes numérique de résolution d'un problème d'écoulement de puissance [III.3]

#### III.7.1 Méthode de Gauss Seidel

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une des plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance ou généralement pour la résolution d'un ensemble très large d'équations algébriques non linéaires. Cette méthode consiste à enlever séquentiellement chaque nœud et actualiser sa tension en fonction des valeurs disponibles de toutes les tensions des autres nœuds. Pour le cas de l'étude de l'écoulement de puissance, les solutions recherchées sont déduites de la résolution de l'équation nodale suivante :

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 \dots + Y_{in}V_n = \sum_{m=1}^n Y_{im}V_m \quad (\text{III.12})$$

En général, on calcule le vecteur  $V$  qui satisfait le système non linéaire et qui est donné par :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{(V_i^*)^k} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n Y_{im}V_m^k \right] \quad (\text{III.13})$$

Pour les expressions des puissances actives et réactives, elles sont calculées à partir des deux expressions ci-après respectivement.

$$P_i^{(k+1)} = \mathcal{R} \left[ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n Y_{im}V_m^{(k)} \right] \right] \quad (\text{III.14})$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\mathcal{I} \left[ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n Y_{im}V_m^{(k)} \right] \right] \quad (\text{III.15})$$

La convergence du système est atteinte lorsque la condition suivante est satisfaite :

$$\max |V^{k+1} - V^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III.16})$$

Dans le cas pratique, la condition d'arrêt est choisie par rapport aux puissances actives et réactives.

$$\max |P^{k+1} - P^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III.17})$$

$$\max |Q^{k+1} - Q^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III.18})$$

### III.7.2 Méthode de Gauss-Seidel avec accélération

La méthode de Gauss-Seidel avec accélération utilise le même processus que celle de Gauss-Seidel sans accélération sauf que la valeur calculée sera accélérée avant d'être introduite dans le calcul de la prochaine valeur (nouvelle itération). La valeur accélérée est calculée à partir de l'expression suivante :

$$V_i^{k+1} = V_i^{(k)} + \alpha \Delta V_i^{(k+1)} \quad (\text{III.19})$$

On calcule  $V_i^{k+1}$  après chaque itération en utilisant l'expression suivante :

$$\Delta V_i^{(k+1)} = V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)} \quad (\text{III.20})$$

Les calculs s'arrêtent lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$|\Delta V_i^{(k+1)}| \leq \varepsilon \quad (\text{III.21})$$

Le coefficient  $\alpha$  est dit « coefficient d'accélération de convergence ». Chaque réseau possède son propre facteur optimal qui permet de réduire considérablement le nombre d'itérations, par conséquent le temps de calcul. Ce facteur est compris généralement entre 1.4 et 1.8 [III.4].

### III.7.3 Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Par conséquent, cette méthode permet de réduire fortement le temps d'exécution du calcul de l'écoulement de puissance surtout pour les grands réseaux. Par contre, elle nécessite une très grande mémoire de stockage.

Les expressions des puissances actives et réactives de chaque nœud  $i$  du réseau peuvent se mettre sous la forme ci-dessous :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \\ Q_i &= - \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow i=1, 2, \dots, n \quad (\text{III.22})$$

Après développement de  $P_i$  et  $Q_i$  en série de TAYLOR autour de la première approximation :

$$\begin{aligned} P_i &= P_i^{(0)} + \left( \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left( \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left( \frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} \right)^{(0)} \Delta |V_2|^{(0)} + \dots + \left( \frac{\partial P_i}{\partial |V_n|} \right)^{(0)} \Delta |V_n|^{(0)} \\ Q_i &= Q_i^{(0)} + \left( \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left( \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left( \frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|} \right)^{(0)} \Delta |V_2|^{(0)} + \dots + \left( \frac{\partial Q_i}{\partial |V_n|} \right)^{(0)} \Delta |V_n|^{(0)} \end{aligned} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{à partir de la relation de } \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \text{ avec } \Delta P^{(0)}_i = P_i - P_i^{(0)}, \Delta Q^{(0)} = Q_i - Q_i^{(0)} \quad (\text{III.24})$$

Les deux systèmes d'équation (III.23) et (III.24) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

On rappelle que

$$\Delta \delta^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad (\text{III.28})$$

$$\Delta |V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad (\text{III.29})$$

L'adaptation (III.27) avec (III.28) et (III.29) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

En remplaçant l'expression de l'équation (III.26) dans l'équation ci-dessus on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

$J_1, J_2, J_3$  et  $J_4$  sont les sous-matrices de jacobienne.

### Détermination des sous-matrices jacobienne $J_i$

A partir du système (III.21), on peut déterminer les éléments de J.

#### Sous matrice $J_1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i \neq m \quad (\text{III.34})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i=m \quad (\text{III.35})$$

**Sous matrice  $J_2$** 

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{im}| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_i) \quad (\text{III.36})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{im}| |V_m| \cos(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i=m \quad (\text{III.37})$$

**Sous matrice  $J_3$** 

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}| |V_m| |V_i| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i \neq m \quad (\text{III.38})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_m| |V_i| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i=m \quad (\text{III.39})$$

**Sous matrice  $J_4$** 

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -|Y_{im}| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), i \neq m \quad (\text{III.40})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}| |V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) - 2|Y_{im}| |V_i| \sin(\theta_{im}), i=m \quad (\text{III.41})$$

Les étapes de calcul sont les suivantes :

- 1-A partir des données du système, on prend la matrice d'admittance bus  $Y_{\text{bus}}$ .
- 2-On estime les valeurs initiales  $|V_i^{(0)}|$  et  $\delta_i^{(0)}$  pour les nœuds de charge et  $\delta_i^{(0)}$  pour les nœuds de contrôle.
- 3-On calcule  $P_i, Q_i$  qui nous donnent  $\Delta P, \Delta Q$ .
- 4-Formation de la matrice jacobienne  $J$ .
- 5-On trouve l'inverse de jacobienne.
- 6-On calcule

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (\text{III.42})$$

On obtient :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} - \Delta \delta_i^{(k)} \quad (\text{III.43})$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + |\Delta V_i^{(k)}| \quad (\text{III.44})$$

- 7- Le processus se répète jusqu'à ce que la tolérance suivante se vérifie.

$$\max |\Delta P_i^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III.45})$$

$$\max |\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III.46})$$

**III.7.4 Méthode Découplée Rapide**

En observant la valeur numérique des éléments du jacobienne utilisés dans plusieurs systèmes, on découvre que les éléments de  $J_1$  et  $J_2$  sont invariablement beaucoup plus grands que ceux de  $J_2$  et  $J_3$  et en se basant sur les découplés (P  $\delta$ ) et (Q V), on peut supposer que  $J_2$  et  $J_3$  à partir de cela, on peut avoir deux systèmes d'équations linéaires indépendantes pour chaque



itération.

Calcul des éléments du Jacobien  $J_2$  :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} = |V_m| |Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad (\text{III.47})$$

$$\theta_{im} \approx 90^\circ \quad \delta_i \approx \delta_m$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} = |V_i| |Y_{im}| \cos(90^\circ) = 0 \quad (\text{III.48})$$

Calcul des éléments du Jacobien  $J_3$ :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} = -|V_i| |V_m| |Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad (\text{III.49})$$

$$\theta_{im} \approx 90^\circ \quad \delta_i \approx \delta_m$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} = -|V_i| |V_m| |Y_{im}| \cos(90^\circ) = 0 \quad (\text{III.50})$$

Par conséquent, les sous matrices du Jacobien  $J_2$  et  $J_3$  sont nulles et l'équation s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{III.51})$$

$$\begin{cases} \Delta P = J_1 \Delta \delta = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \\ \Delta Q = J_4 \Delta |V| = \left[ \frac{\partial P}{\partial |V|} \right] \Delta |V| \end{cases} \quad (\text{III.52})$$

Il nous reste à calculer les éléments du Jacobien  $J_1$  et  $J_4$ .

### Calcul du Jacobien $J_1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad (\text{III.53})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i|^2 |Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) - Q_i \quad (\text{III.54})$$

$$\text{avec: } Q_i = \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad (\text{III.55})$$

$$B_{ii} = |Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) B_{ii} \gg Q_i \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i|^2 B_{ii} \quad (\text{III.56})$$

$$|V_i|^2 \approx |V_i| \Rightarrow \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| B_{ii} \quad (\text{III.57})$$

Sous conditions normales  $\delta_m - \delta_i \approx 0$  :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = -|V_i| |V_m| B_{im} \quad (\text{III.58})$$

Une autre simplification est obtenue en assumant  $|V_m| \approx 1$  :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = -|V_i| \cdot B_{im} \quad (\text{III.59})$$

### Calcul des éléments du Jacobien $J_4$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) + \sum_{m=1}^n |V_i| |V_m| |Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad (\text{III.60})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |Y_{im}| \sin(\theta_{im}) + Q_i \quad (\text{III.61})$$

$$B_{ii} = |Y_{ii}| \cdot \sin(\theta_{ii}) B_{ii} \gg Q_i \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i|^2 \cdot B_{ii} \quad (\text{III.62})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| \cdot B_{ii} \quad (\text{III.63})$$

De façon pareil, assumant  $\delta_m - \delta_i \approx 0$  et  $|V_m| \approx 1$  :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} = -|V_i| \cdot B_{im} \quad (\text{III.64})$$

Les équations (III.60) prennent la forme suivante

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -[B'] \Delta \delta \Rightarrow \Delta \delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V_i|} \quad (\text{III.65})$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -[B''] \Delta |V| \Rightarrow \Delta |V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V_i|} \quad (\text{III.66})$$

### III.8 Conclusion

L'élaboration d'un modèle mathématique d'un réseau électrique pour calculer les différentes caractéristiques du réseau (puissances générées, puissances transmises, pertes, tensions et courants) est nécessaire pour résoudre le problème de répartition des charges (ou écoulement de puissance). Parmi les méthodes de résolution du problème de répartition des puissances, on a choisi la méthode de *Newton-Raphson*. Cette dernière a été appliquées pour différents réseaux, avec et sans incorporation des dispositifs FACTS.

### Références bibliographiques

**[III.1]** D Bruno, "Simulation En Temps Réel D'un Convertisseur HTCC ", Diplôme De Maîtrise Es Sciences Appliquées, Février 1998.

**[III.2]** C.A. Gross, Power system analysis, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1986.

**[III.3]** H. Saadat, Power system analysis, Second edition, McGraw-Hill International Editions, 2004.

**[III.4]** O. Alsac, J. Bright, M. Prais, B. Scott, Further developments in LP-based optimal power flow, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 5, No. 3, August 1990, pp. 697-711.

# *Chapitre IV :* *Applications*

## IV.1 Introduction

Afin de compléter le travail théorique que nous avons présenté aux chapitres I, II et III, nous proposons dans celui-ci quelques applications. Pour cela, nous avons choisi le logiciel PSAT (power system analysis toolbox)[IV-1] écrit en langage Matlab pour le calcul de la répartition de puissance ou nous donnerons un aperçu général sur ce logiciel au Annexe A.

Pour la validation de notre travail, nous allons procéder à l'implantation des dispositifs FACTS dans un réseau électrique et voir leurs influences sur l'amélioration du profil de tension et sur les pertes réactives dans le régime normal.

De ce fait nous allons, en premier temps, effectué nos applications sur le réseau standard IEEE14 nœuds, constitué des lignes de transmission, des générateurs des charges des compensateurs synchrones...etc.

Nous calculons les transits de puissances, ainsi que les tensions aux différents points du réseau dans sa situation normale puis en défauts de différents types. En deuxième partie de ce chapitre, nous allons aussi procéder à l'implantation du modèle du SVC intégré dans le programme standard de Newton-Raphson(N-R).

## IV.2 Applications et résultats de simulation

Cette étude nous permettra à partir des données topologiques du réseau (nœuds, lignes et impédances des lignes), des données des charges (puissances actives et réactives) et des données des générateurs (puissances actives, tensions et limites en puissances réactives) d'avoir le module et la phase de la tension en chaque nœud, les pertes et les transits de puissances actives et réactives dans chaque ligne.

Il correspond à un réseau aérien triphasé équilibré de 14 nœuds où les bases de puissance et de fréquence du réseau sont 100 MVA et 50 Hz, il contient deux générateurs, seize lignes de transmission, onze charges, trois compensateurs synchrones et un condensateur statique.

Le diagramme du réseau sous étude est montré dans la (Figure IV.1). Dont les données des paramètres du réseau sont reportées dans le Tableau IV.1.

Nous appliquons et comparons les deux méthodes, présentées au chapitre IV, utilisées pour le calcul de la répartition de puissance (Newton Raphson et Fast Decoupled Load Flow). On suppose que la valeur typique de l'erreur des itérations ' $\varepsilon$ ' est  $10^{-5}$ .

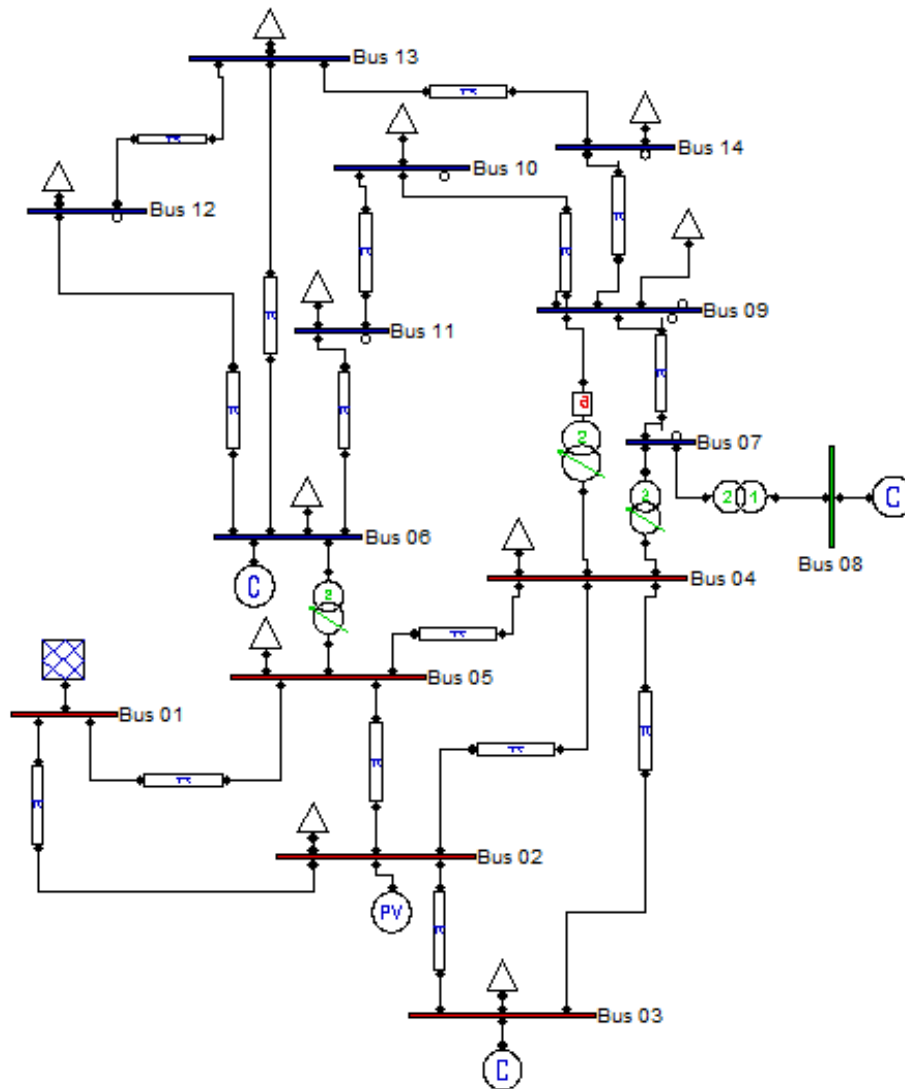


Figure IV.1 Schéma du système d'application IEEE à 14 nœuds.

Nœuds	Tensions [p.u.]	P. Générée [p.u.]	Q. Générée [p.u.]	P. Consommée [p.u.]	Q. Consommée [p.u.]
1	1.060	2.3254	-0.15825	0.000	0.000
2	1.045	0.4000	0.4573	0.217	0.127
3	1.010	0.0000	0.25462	0.942	0.190
4	1.0152	0.0000	0.000	0.478	-0.039
5	1.018	0.0000	0.000	0.076	0.016
6	1,070	0.0000	0.22427	0.112	0.075
7	1.0499	0.0000	0.000	0.000	0.000
8	1,090	0.0000	0.24844	0.000	0.000
9	1.0328	0.0000	0.000	0.295	0.166
10	1.0317	0.0000	0.000	0.090	0.058
11	1.047	0.0000	0.000	0.035	0.018
12	1.0535	0.0000	0.000	0.061	0.016
13	1.0469	0.0000	0.000	0.135	0.058
14	1.0207	0.0000	0.000	0.149	0.050

Tableau IV.1 Données des nœuds producteurs et consommateurs.

De	A	Résistance [p.u.]	Réactance [p.u.]	Susceptance [p.u.]
2	5	0.05695	0.17388	0.0340
6	12	0.12291	0.25581	0.0000
12	13	0.22092	0.19988	0.0000
6	13	0.06615	0.13027	0.0000
6	11	0.09498	0.19890	0.0000
11	10	0.08205	0.19207	0.0000
9	10	0.03181	0.08450	0.0000
9	14	0.12711	0.27038	0.0000
14	13	0.17093	0.34802	0.0000
7	9	0.00000	0.11001	0.0000
1	2	0.01938	0.05917	0.0528
3	2	0.04699	0.19797	0.0438
3	4	0.06701	0.17103	0.0346
1	5	0.05403	0.22304	0.0492
5	4	0.01335	0.04211	0.0128
2	4	0.05811	0.17632	0.0374

Tableau IV.2 Paramètres des lignes.

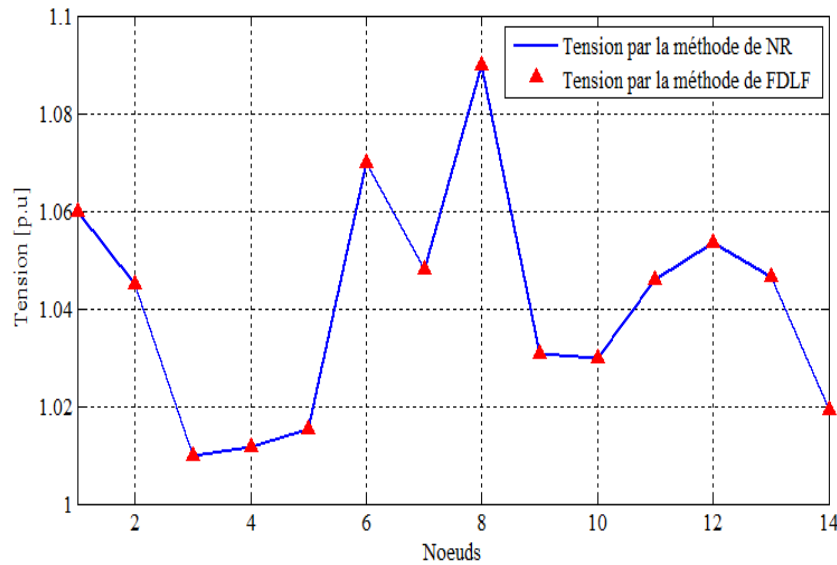
De	A	Réactance [p.u.]	Rapport de transformation
4	9	0.55618	0.969
5	6	0.25202	0.932
4	7	0.20912	0.978
8	7	0.17615	0.954

Tableau IV.3 Paramètres des transformateurs.

Nœuds	$Q_{\max}$	$Q_{\min}$
2	0.50	-0.40
3	0.40	0.00
6	0.24	-0.06
8	0.24	-0.06

Tableau IV.4 Données des nœuds de régulation.

Les résultats des tensions des nœuds du réseau obtenus sont représentés sur la figure suivante:



**Figure IV.2** Plan de tension du réseau dans l'état normal par les deux méthodes de calcul.

Les résultats sont obtenus après la quatrième itération pour la méthode de Newton\_Raphson, et après la huitième itération pour la méthode de Fast Decoupled Load Flow mais avec un temps de calcul plus rapide et surtout lorsqu'il s'agit des grands réseaux. On remarque bien que les deux méthodes ont donné les mêmes résultats. A cause de la convergence quadratique de la méthode de Newton\_Raphson, une solution de haute précision peut être obtenue en quelques itérations seulement. Ces caractéristiques font le succès de la méthode de Newton\_Raphson. Dans ce qui va suivre, nous utiliserons la méthode de NR. Les puissances actives et réactives qui transitent dans chaque ouvrage du réseau sont comme suit :

Lignes	$P_{ik}$ [p.u.]	$Q_{ik}$ [p.u.]
2-5	0.41963	0.03211
6-12	0.08228	0.03044
12-13	0.02045	0.01272
6-13	0.19062	0.09580
6-11	0.09718	0.08086
11-10	0.06085	0.06008
9-10	0.02972	-0.00073
9-14	0.07757	0.00867
14-13	-0.07216	-0.04287
7-9	0.36137	0.16832
1-2	1.56960	-0.20423
3-2	-0.71004	0.01637
3-4	-0.23196	0.06769
1-5	0.75621	0.05514
5-4	0.58063	-0.08721
2-4	0.55665	0.01683
4-9	0.04093	0.02272



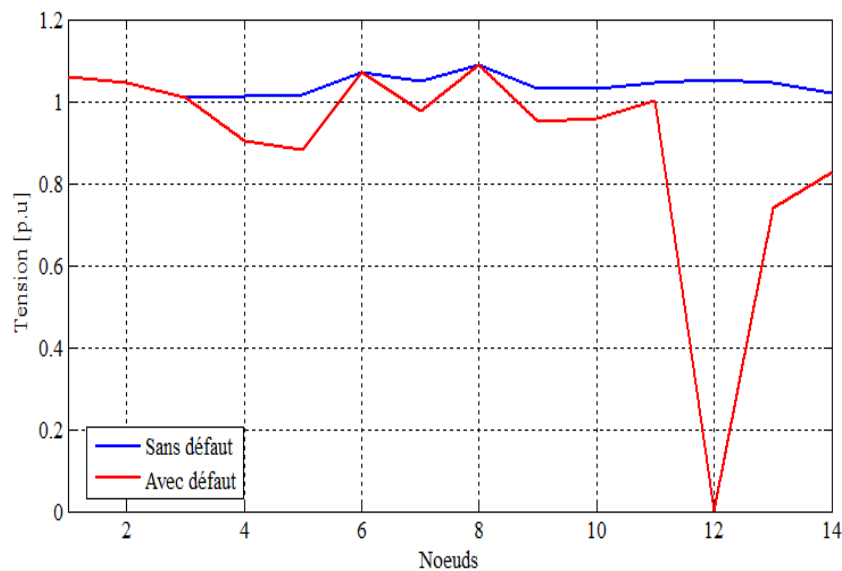
5-6	0.48207	0.10429
4-7	0.36137	-0.05184
8-7	0.00000	0.25718

**Tableau IV.5** Puissance actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

### IV.3 Répartition de puissance sur un réseau suite à un défaut sans systèmes FACTS

#### IV.3.1 Cas d'un court-circuit monophasé

Comme deuxième application, nous avons simulé le réseau IEEE à 14 nœuds en introduisant un court circuit triphasé au bus 12, les résultats obtenus des tensions du réseau sont représentés sur la Figure IV.3, les puissances actives et réactives transitant dans les lignes sont regroupées dans le Tableau IV.6.



**Figure IV.3** Tensions dans chaque jeu de barre après création d'un défaut.

De	A	Ligne	P <sub>ij</sub> [p.u.]	Q <sub>ij</sub> [p.u.]
Bus 02	Bus 05	1	1,564525268	0,817902098
Bus 06	Bus 12	2	1,747060312	3,636149076
Bus 12	Bus 13	3	0.00000	0.00000
Bus 06	Bus 13	4	1,42271392	2,056545908
Bus 06	Bus 11	5	-0,41602108	0,707803985
Bus 11	Bus 10	6	-0,516386952	0,567843444
Bus 09	Bus 10	7	0,69483561	-0,32402212
Bus 09	Bus 14	8	0,61311733	0,175701189
Bus 14	Bus 13	9	0,417510758	0,00080057
Bus 07	Bus 09	10	1,14772636	0,338822803
Bus 01	Bus 02	11	5,328363013	-0,66839729
Bus 03	Bus 02	12	-1,521800668	0,414124384
Bus 03	Bus 04	13	0,203000668	0,695899383
Bus 01	Bus 05	14	2,379828173	1,010215839

<b>Bus 05</b>	<b>Bus 04</b>	15	0,469334919	-0,69606041
<b>Bus 02</b>	<b>Bus 04</b>	16	1,726046566	0,63776416
<b>Bus 04</b>	<b>Bus 09</b>	17	0,504321278	0,055273439
<b>Bus 05</b>	<b>Bus 06</b>	18	2,910553152	0,745051184
<b>Bus 04</b>	<b>Bus 07</b>	19	1,14772636	-0,06975523
<b>Bus 08</b>	<b>Bus 07</b>	20	8,32667E-16	0,864048506

**Tableau IV.6** Puissances transitées entre les bus.

### IV.3.1.1 Discussion des résultats

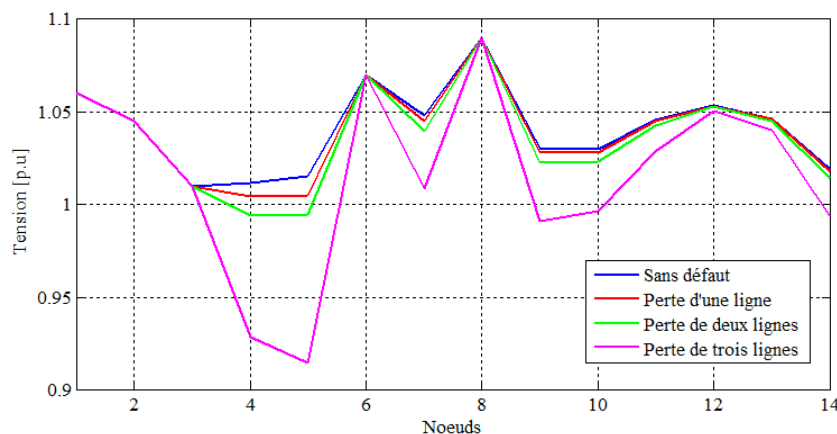
Lors de l'apparition du court circuit au bus 12, les grandeurs électriques, tension et puissance sortent des plages admissibles, dans ce cas les protections qui contrôlent en permanence l'état électrique du réseau et surveillent ces grandeurs vont élaborer un ordre de déclenchement aux disjoncteurs pour mettre hors tension l'ouvrage atteint c'est-à-dire 12-13 et l'isoler du reste du réseau.

Alors on peut dire que cette action corrective de surcharges par coupure de lignes est appréciable et fonctionne bien.

### IV.3.2 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau électrique

#### IV.3.2.1 Perte des lignes électriques

Le calcul de la répartition de puissance du réseau IEEE 14 nœuds lors de la perte d'une ligne électrique (2-5), ainsi que des deux autres lignes (2-5 et 2-3), puis des trois lignes (2-5, 2-3 et 1-5) est effectué dans cette application. Les résultats obtenus des tensions des nœuds du réseau sont représentés sur la figure suivante:



**Figure IV.4** Plan de tension avant et lors de la perte d'une ou plusieurs lignes.

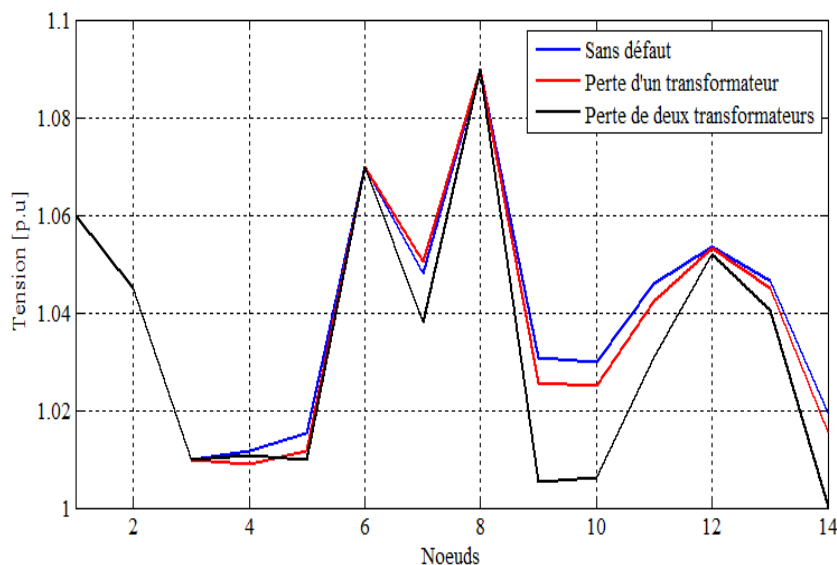
Les résultats des puissances actives et réactives qui transitent dans chaque ouvrage du réseau suite à la perte d'une ou plusieurs lignes sont représentés dans le Tableau IV.7:

	1 Ligne	1 ligne	2 ligne	2 ligne	3 ligne	3 ligne
Lignes	$P_{ik}$ [p.u.]	$Q_{ik}$ [p.u.]	$P_{ik}$ [p.u.]	$Q_{ik}$ [p.u.]	$P_{ik}$ [p.u.]	$Q_{ik}$ [p.u.]
2-5	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00
6-12	0.08153	0.03171	0.08346	0.03228	0.09351	0.03714
12-13	0.01970	0.01400	0.02160	0.01449	0.03142	0.01888
6-13	0.18680	0.10021	0.19386	0.10366	0.22907	0.12888
6-11	0.08948	0.08959	0.10286	0.09596	0.16904	0.14322
11-10	0.05315	0.06881	0.06621	0.07452	0.12997	0.1167
9-10	0.03746	-0.00936	0.02456	-0.0147	-0.03747	-0.05280
9-14	0.08216	0.00306	0.07353	-0.00028	0.03135	-0.02435
14-13	-0.06765	-0.04867	-0.07613	-0.05167	-0.11785	-0.07478
7-9	0.36855	0.16345	0.35338	0.16419	0.27793	0.16372
1-2	1.42101	-0.16886	1.19900	-0.11343	-0.18056	0.30042
3-2	-0.79688	0.05079	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3-4	-0.14512	0.07320	-0.94200	0.56558	-0.94200	1.03420
1-5	0.91482	0.09424	1.29020	0.13939	3.10510	1.01660
5-4	0.32805	-0.09768	0.64063	-0.18064	1.90940	-0.81283
2-4	0.74259	0.01851	1.35710	-0.00628	0.00000	0.00000
4-9	0.04609	0.01389	0.03972	0.00316	0.01098	-0.06109
5-6	0.46981	0.05934	0.49217	0.02004	0.60361	-0.26899
4-7	0.36855	-0.07155	0.35338	-0.10019	0.27793	-0.26796
8-7	0.00000	0.27545	0.00000	0.30692	0.00000	0.50625

**Tableau IV.7** Les puissances actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau lors de la perte d'une ou plusieurs lignes.

**IV.3.2.2 Perte des transformateurs**

Les résultats de simulation de réseau IEEE 14 nœuds, lors de la perte du transformateur (4-7) et suite à la perte d'une autre transformateur (4-9), sont représentés sur la (Figure IV.5) et le Tableau IV.8:



**Figure IV.5** Plan de tension avant et lors de la perte d'un ou plusieurs transformateurs.

	1 transfo	1 transfo	2 transfos	2 transfos
Lignes	$P_{ik}$ [p.u.]	$Q_{ik}$ [p.u.]	$P_{ik}$ [p.u.]	$Q_{ik}$ [p.u.]
2-5	0.43896	0.05078	0.46935	0.05781
6-12	0.09573	0.02450	0.11585	0.02115
12-13	0.03368	0.00632	0.05336	0.00205
6-13	0.24672	0.08181	0.32665	0.08211
6-11	0.20679	0.05117	0.36166	0.04802
11-10	0.16803	0.02529	0.31561	0.00689
9-10	-0.07563	0.03839	-0.21628	0.00689
9-14	0.01109	0.03462	-0.07872	0.05806
14-13	-0.13807	-0.01572	-0.22893	0.0055
7-9	0.00000	0.23496	0.00000	0.30718
1-2	1.56450	-0.20304	1.56540	-0.20324
3-2	-0.70377	0.01395	-0.69424	0.0103
3-4	-0.23823	0.08835	-0.24776	0.08273
1-5	0.76776	0.07272	0.79130	0.08236
5-4	0.43035	-0.06805	0.22600	-0.10522
2-4	0.53919	0.03807	0.51978	0.03318
4-9	0.23073	0.03950	0.00000	0.00000
5-6	0.66124	0.11389	0.91616	0.15529
4-7	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8-7	0.00000	0.24377	0.00000	0.32261

**Tableau IV.8** Les puissances actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau lors de la perte d'un ou plusieurs transformateurs.

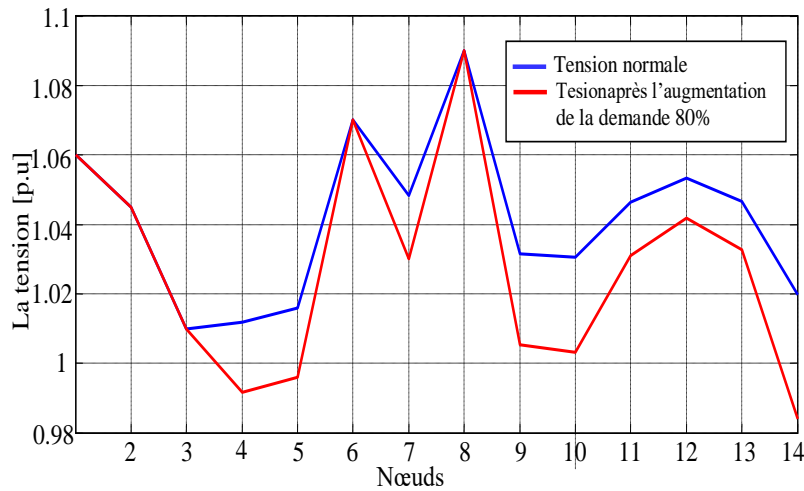
La perte d'un ou plusieurs ouvrages provoque des chutes de tension dans le réseau - jusqu'à 0.95 dans le cas de la perte de trois lignes et de deux transformateurs – (Voir Figure IV.4, et Figure IV.5).

La perte de ces ouvrages peut également provoquer une augmentation des puissances actives transitées dans quelques lignes (Tableau IV.7 : ligne 2-4 par un rapport de surcharge de 2.4380 dans le cas de la perte de deux lignes, et la ligne 5-4 par un rapport de surcharge de 3.2885 dans le cas de la perte de trois lignes).

Ainsi, l'intervention des compensateurs synchrones avec une marge de tension admissible  $\pm 10\%$ , permet d'avoir des tensions dans les plages admissibles.

### IV.3.2.3 Répartition de puissance suite à une augmentation brutale de la charge

Les résultats de simulation obtenus des tensions des nœuds et des puissances actives et réactives du réseau IEEE 14 nœuds, lors de l'augmentation brutale de 80% aux bus 2-3-6-10-12-14 sont les suivants:



**Figure IV.6** Plan de tension avant et après l'augmentation de la demande de 80%.

Lignes	$P_{ik}$ [p.u.]	$Q_{ik}$ [p.u.]
2-5	0.64668	0.09481
6-12	0.13535	0.05454
12-13	0.02326	0.02099
6-13	0.29350	0.15935
6-11	0.13529	0.14576
11-10	0.08301	0.11369
9-10	0.08072	-0.00516
9-14	0.15360	0.00993
14-13	-0.11758	-0.07905
7-9	0.51573	0.24644
1-2	2.985 00	-0.47496
3-2	-1.2339	0.25270
3-4	-0.46168	0.30077
1-5	1.30160	0.13243
5-4	0.97094	-0.18815
2-4	0.88305	0.06688
4-9	0.13169	0.03510
5-6	0.76574	0.07047
4-7	0.51573	-0.04677
8-7	0.00000	0.37060

**Tableau IV.9** Les puissances actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau après l'augmentation de la charge 80%.

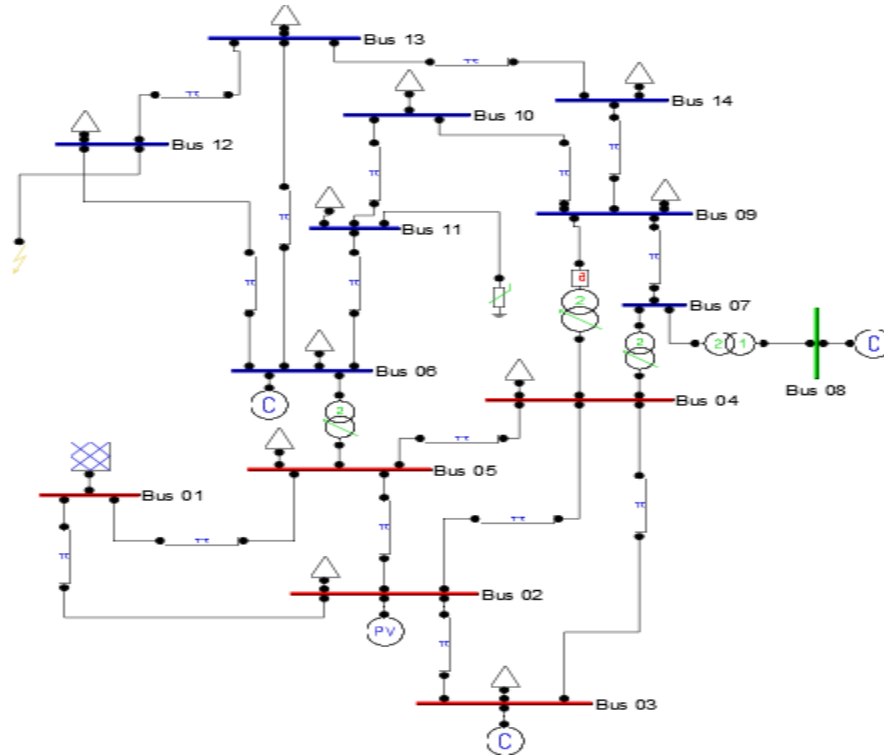
D'après la figure IV.6, on remarque bien que l'augmentation de la demande dans quelques nœuds du réseau, a provoqué une évolution des transits de puissances actives dans les ouvrages du réseau (ligne 1-2, 3-2 et 1-5) ainsi qu'une diminution des tensions dans les nœuds.

#### IV.4 Effet de système FACTS (SVC) sur un réseau en défaut

Dans le cadre de cette étude, nous allons visualiser l'effet que peut apporter l'installation de système FACTS (SVC) sur l'écoulement de puissance et sur le profil de la tension.

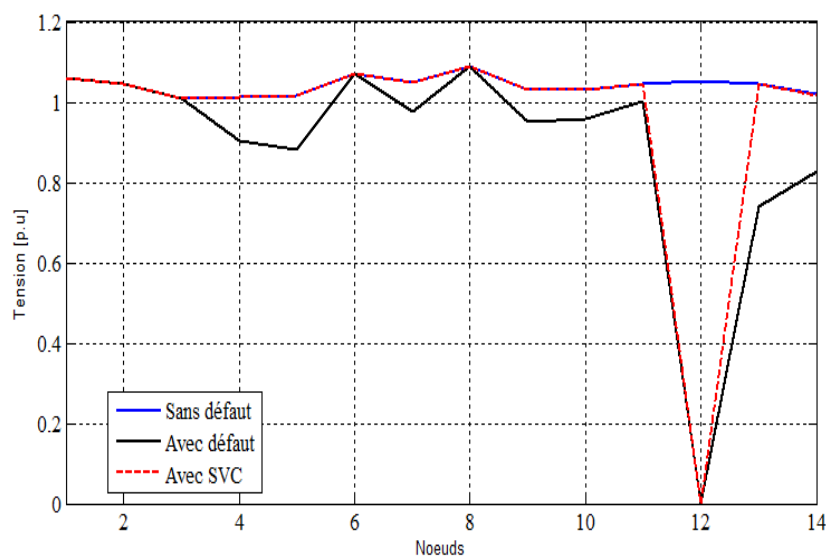
#### IV.4.1 Cas d'un court-circuit triphasé

Dans ce cas, le SVC est connecté au nœud 11 (Figure IV.7), le défaut au nœud 12 est éliminé par l'ouverture de la ligne 12-13 et la ligne 12-06 par des dispositifs de protections pour l'isoler du réseau.



**Figure IV.7** Réseau en défaut étudié avec installation d'un SVC au bus 11.

À cet effet, les données du SVC sont prises par défaut et on obtient un nouvel écoulement de puissance dont les résultats sont consignés dans les (Figure IV.9) et (Figure IV.10) et les tensions de chaque bus sont montrées en (Figure IV.8). Les données du SVC sont prises par défaut.



**Figure IV.8** Tensions dans chaque jeu de barre après installation du SVC.

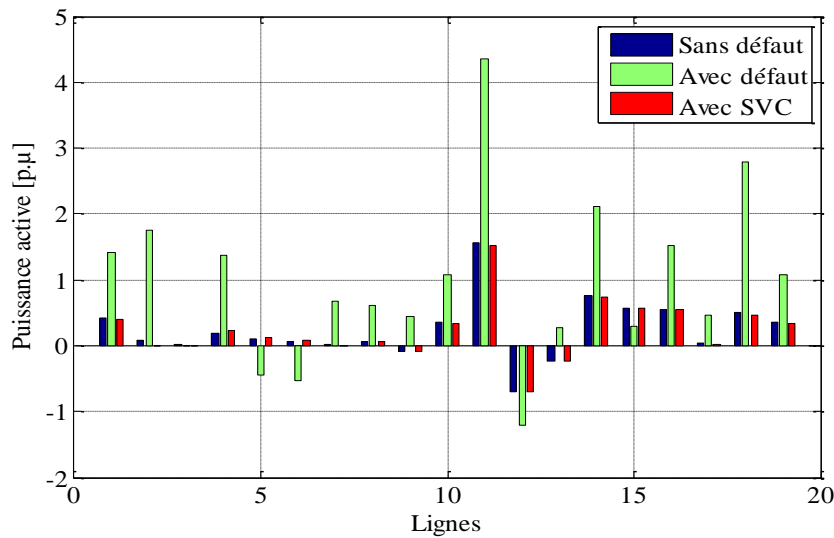


Figure IV.9 Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.

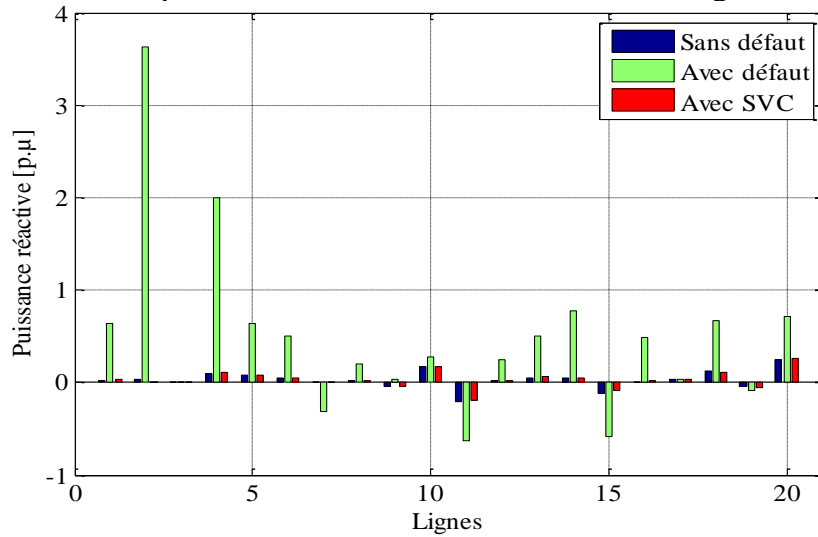


Figure IV.10 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

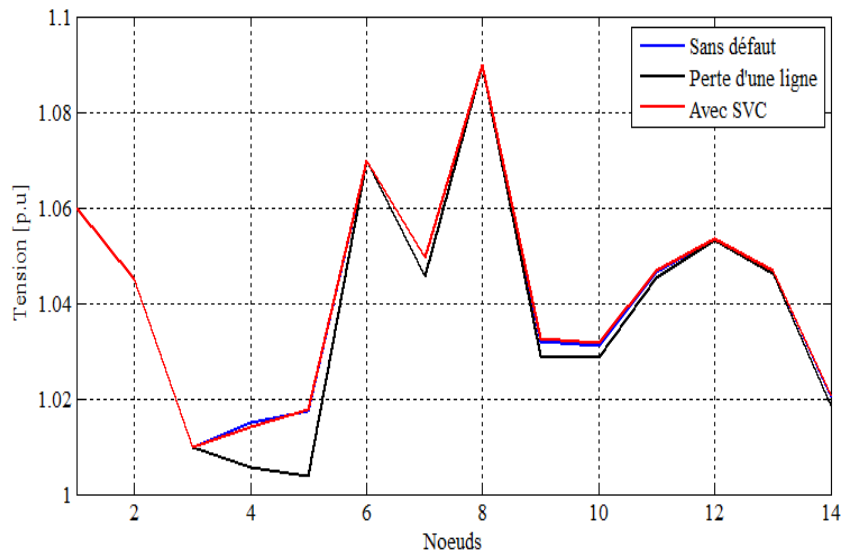
		Sans défaut		Avec défaut		Avec SVC	
De	A	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes Actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives
2	5	0,00925561	-0,00792088	0,13223078	0,37236367	0,00853882	-0,01014485
6	12	0,00082174	0,00171027	1,74706905	3,63613811	0	0
12	13	0,00011274	0,000102	1,35618417	1,22702378	0	0
6	13	0,00260918	0,0051383	0,34745057	0,68423863	0,00331241	0,00652317
6	11	0,00128391	0,00268867	0,06759087	0,14154373	0,00148035	0,00310005
11	10	0,00052098	0,00121956	0,05996853	0,14037971	0,00062815	0,00147042
9	10	2,6752E-05	7,1063E-05	0,02566879	0,06818651	8,8614E-06	2,3539E-05
9	14	0,00073436	0,00156207	0,06468913	0,13760244	0,00066276	0,00140979
14	13	0,00112633	0,00229325	0,06044508	0,12306849	0,00118149	0,00240556
7	9	0	0,01594029	0	0,17212906	-5,5511E-17	0,01529001
1	2	0,04293563	0,07259631	0,34339477	0,98994242	0,0406106	0,06549764
3	2	0,02318979	0,05144359	0,07358563	0,26376249	0,02269979	0,04937921

3	4	0,00387201	-0,02559454	0,02719269	0,03794166	0,00409231	-0,02505833
1	5	0,02783451	0,06177146	0,2474664	0,97539816	0,02606383	0,05441062
5	4	0,00452182	0,00103558	0,010142	0,0220617	0,00454977	0,00110073
2	4	0,01652612	0,01045123	0,14350705	0,40008214	0,0156062	0,0076318
5	2	1,141E-05	0,00126923	0,00159926	0,17789509	9,7099E-06	0,00108009
12	6	-5,5511E-17	0,05947793	0	2,65225497	0	0,04992294
13	12	-5,5511E-17	0,02696423	0	0,3589574	0	0,02511031
13	6	6,9389E-18	0,00915092	0	0,08982744	-6,9389E-18	0,00922042

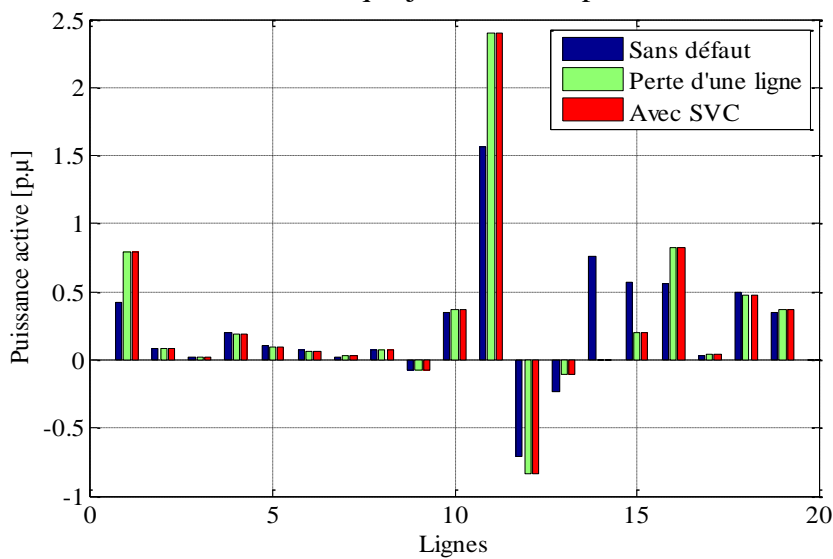
**Tableau IV.10** Les Pertes actives et réactives dans les ouvrages du réseau lors d'un court-circuit triphasé.

### IV.4.2 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau électrique

#### IV.4.2.1 Perte des lignes électriques



**Figure IV.11** Tensions dans chaque jeu de barre après installation du SVC.



**Figure IV.12** Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.



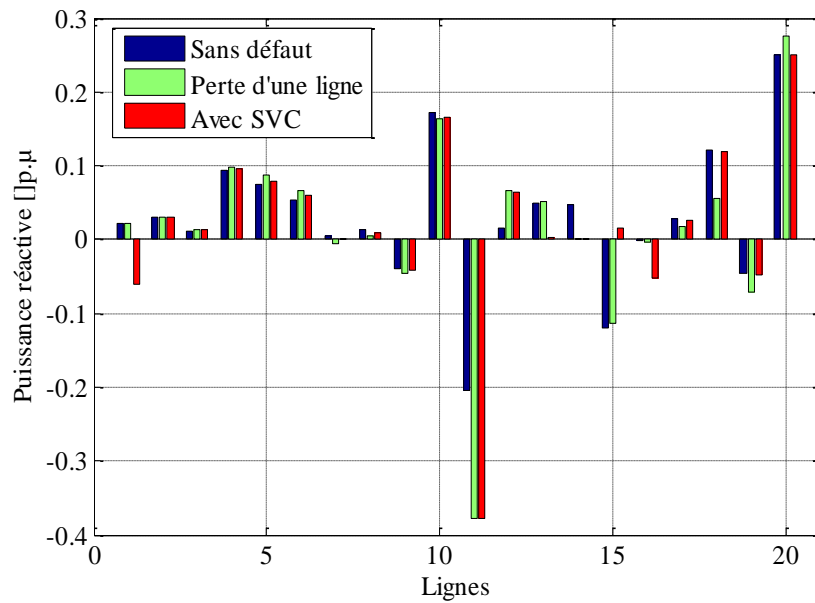


Figure IV.13 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

De	A	Sans défaut		Perte d'une ligne		Avec SVC	
		Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes Actives	Pertes réactives
2	5	0,00925561	-0,00792088	0,032462	0,063419	0,032767	0,063874
6	12	0,00082174	0,00171027	0,000832	0,001732	0,000817	0,001701
12	13	0,00011274	0,000102	0,00012	0,000108	0,000111	0,000101
6	13	0,00260918	0,0051383	0,002654	0,005226	0,002584	0,005089
6	11	0,00128391	0,00268867	0,001392	0,002915	0,001257	0,002633
11	10	0,00052098	0,00121956	0,000595	0,001392	0,000509	0,001192
9	10	2,6752E-05	7,1063E-05	3,03E-05	8,05E-05	3,23E-05	8,58E-05
9	14	0,00073436	0,00156207	0,000736	0,001566	0,000767	0,001632
14	13	0,00112633	0,00229325	0,001205	0,002453	0,0011	0,00224
7	9	0	0,01594029	5,55E-17	0,016064	0	0,016248
1	2	0,04293563	0,07259631	0,101643	0,251839	0,101579	0,251643
3	2	0,02318979	0,05144359	0,032449	0,090452	0,032082	0,088906
3	4	0,00387201	-0,02559454	0,001071	-0,03241	0,000852	-0,03327
1	5	0,02783451	0,06177146	0	0	0	0
5	4	0,00452182	0,00103558	0,000678	-0,01078	0,000554	-0,01146
2	4	0,01652612	0,01045123	0,036565	0,071614	0,036663	0,07159
5	2	1,141E-05	0,00126923	8,78E-06	0,000976	1,06E-05	0,00118
12	6	-5,5511E-17	0,05947793	-2,2E-16	0,050796	-5,6E-17	0,051033
13	12	-5,5511E-17	0,02696423	2,22E-16	0,027234	-1,7E-16	0,026688
13	6	6,9389E-18	0,00915092	2,91E-16	0,011209	1,67E-16	0,009367

Tableau IV.11 Pertes actives et réactives lors de la perte d'une ligne.

IV.4.2.2 Perte des transformateurs

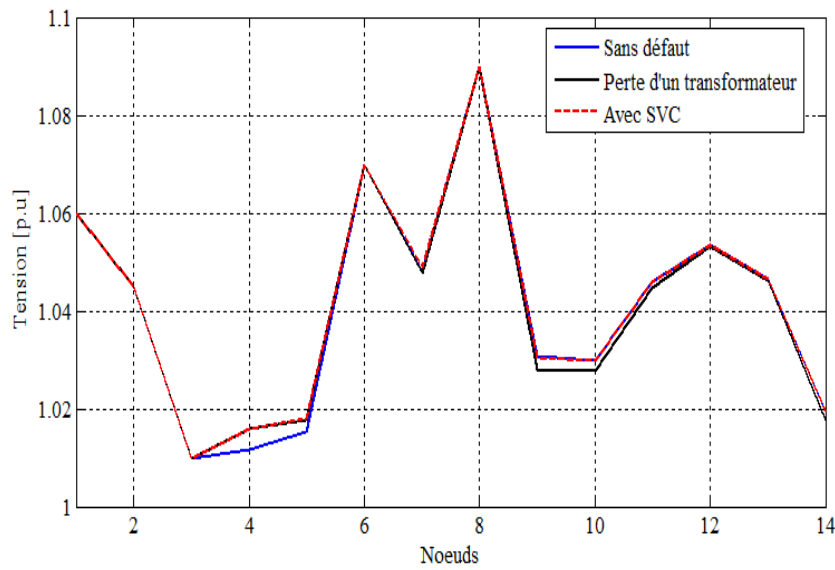


Figure IV.14 Tensions dans chaque jeu de barre après installation du SVC.

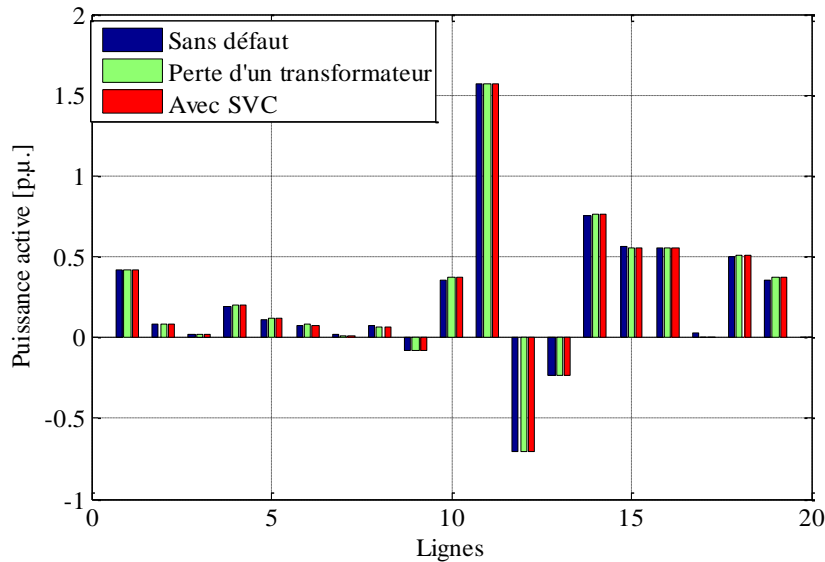


Figure IV.15 Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.

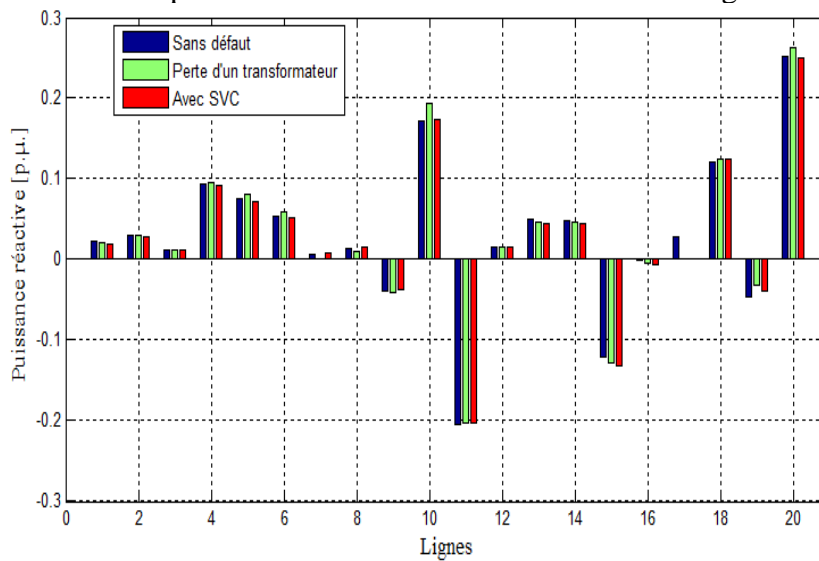


Figure IV.16 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

		Sans défaut		Perte d'un transformateur		Avec SVC	
De	A	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives
2	5	0,00925561	-0,00792088	0,00932349	-0,00772151	0,009383	-0,00753
6	12	0,00082174	0,00171027	0,00084998	0,00176904	0,000854	0,001777
12	13	0,00011274	0,000102	0,00012644	0,0001144	0,000126	0,000114
6	13	0,00260918	0,0051383	0,00275355	0,00542259	0,002787	0,005488
6	11	0,00128391	0,00268867	0,0015148	0,00317219	0,001528	0,003199
11	10	0,00052098	0,00121956	0,00065629	0,0015363	0,000655	0,001533
9	10	2,6752E-05	7,1063E-05	1,2746E-05	3,3858E-05	6,69E-06	1,78E-05
9	14	0,00073436	0,00156207	0,00062129	0,00132156	0,000557	0,001185
14	13	0,00112633	0,00229325	0,00131847	0,00268445	0,001345	0,002738
7	9	0	0,01594029	0	0,01862678	5,55E-17	0,016984
1	2	0,04293563	0,07259631	0,04288163	0,07243143	0,042833	0,072284
3	2	0,02318979	0,05144359	0,0231215	0,05115591	0,023072	0,050949
3	4	0,00387201	-0,02559454	0,00387372	-0,02561332	0,003885	-0,02559
1	5	0,02783451	0,06177146	0,02792379	0,06212858	0,02798	0,062368
5	4	0,00452182	0,00103558	0,00433943	0,00044873	0,004204	2,04E-05
2	4	0,01652612	0,01045123	0,01642919	0,01013213	0,016349	0,009879
4	9	1,141E-05	0,00126923	0	0	0	0
5	6	-5,5511E-17	0,05947793	-1,1E-16	0,058981	3,33E-16	0,058426
4	7	-5,5511E-17	0,02696423	0	0,026974	-1,7E-16	0,027389
8	7	6,9389E-18	0,00915092	-4,9E-17	0,010196	8,33E-17	0,00926

Tableau IV.12 Les Pertes actives et réactives dans les ouvrages du réseau lors de la perte d'un transformateur.

IV.4.2.3 Répartition de puissance suite à une augmentation brutale de la charge

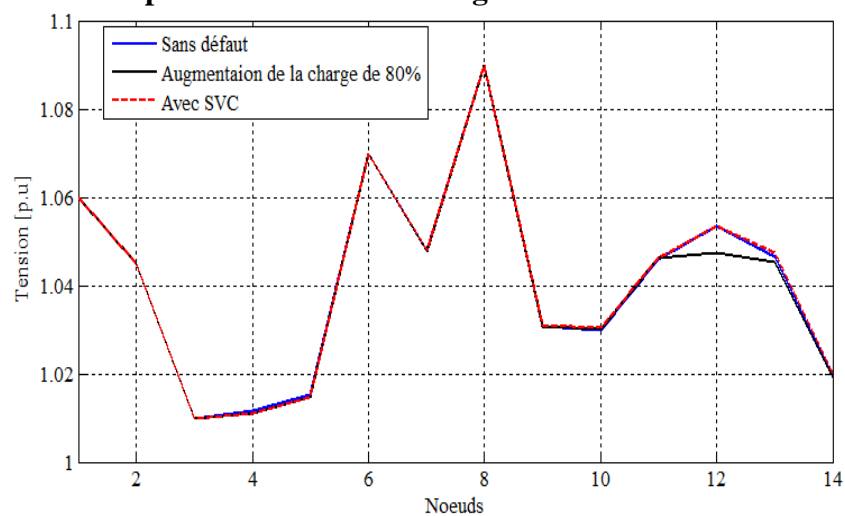


Figure IV.17 Tensions dans chaque jeu de barre après installation du SVC.

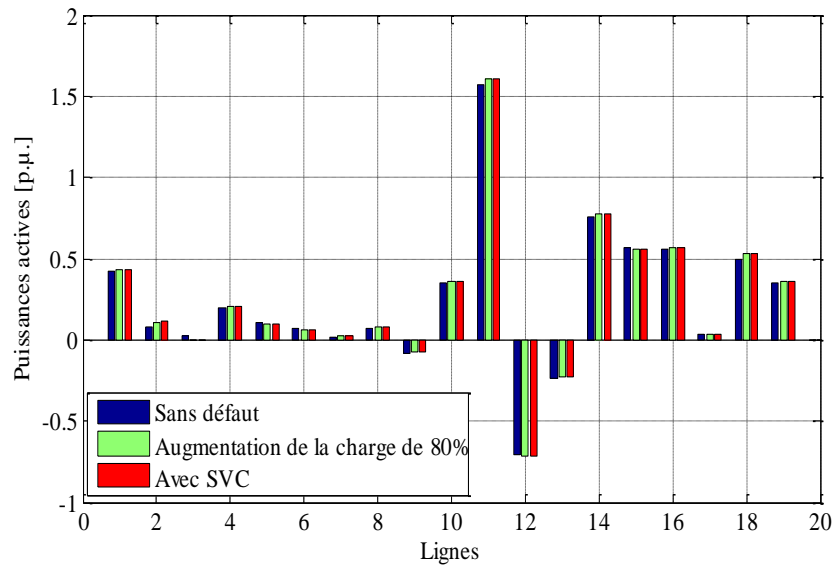


Figure IV.18 Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.

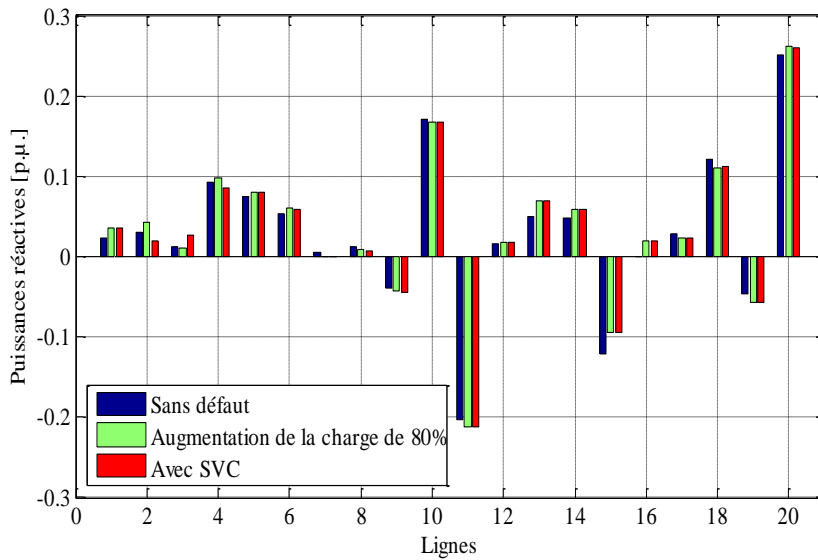


Figure IV.19 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

		Sans défaut		Avec défaut		Avec SVC	
De	A	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives
2	5	0,00925561	-0,00792088	0,010019	-0,00547	0,010016	-0,00548
6	12	0,00082174	0,00171027	0,001524	0,003173	0,001436	0,002989
12	13	0,00011274	0,000102	2,24E-05	2,02E-05	0,000138	0,000125
6	13	0,00260918	0,0051383	0,003098	0,006102	0,002895	0,005701
6	11	0,00128391	0,00268867	0,001377	0,002883	0,001364	0,002857
11	10	0,00052098	0,00121956	0,000576	0,001348	0,000568	0,00133
9	10	2,6752E-05	7,1063E-05	2,14E-05	5,69E-05	2,18E-05	5,79E-05
9	14	0,00073436	0,00156207	0,000762	0,00162	0,00075	0,001595
14	13	0,00112633	0,00229325	0,001113	0,002266	0,001152	0,002346
7	9	0	0,01594029	-5,6E-17	0,016007	-5,6E-17	0,015953

1	2	0,04293563	0,07259631	0,04493	0,078685	0,044922	0,07866
3	2	0,02318979	0,05144359	0,023653	0,053397	0,02365	0,053384
3	4	0,00387201	-0,02559454	0,00388	-0,02543	0,003878	-0,02544
1	5	0,02783451	0,06177146	0,029398	0,068393	0,029393	0,068371
5	4	0,00452182	0,00103558	0,004213	0,000159	0,004214	0,00016
2	4	0,01652612	0,01045123	0,017234	0,012755	0,017231	0,012741
2	5	1,141E-05	0,00126923	9,32E-06	0,001037	9,2E-06	0,001023
6	12	-5,5511E-17	0,05947793	2,22E-16	0,063118	-2,2E-16	0,063103
12	13	-5,5511E-17	0,02696423	0	0,026348	0	0,026353
6	13	6,9389E-18	0,00915092	2,29E-16	0,010094	4,16E-17	0,010019

**Tableau IV.13** Les Pertes actives et réactives dans les ouvrages du réseau d'après l'augmentation de la charge 80%.

#### IV.4.3 Discussions des résultats

D'après les Figures (IV.8, IV.11, IV.14 et IV.17), les nœuds présentent un profil de tension similaire à celui des tensions du réseau d'avant défaut lorsque le SVC est connecté. Le cas de la figure IV.8 (bus 12) est différent : objet du défaut triphasé et isolé du réseau par les disjoncteurs de protection. Les systèmes FACTS shunt ont un apport correctif sur la tension d'un réseau en défaut vu les valeurs qui sont proche la valeur plate 1p.u affichés lors de l'installation de ces dispositifs. Les figures (IV.9, IV.12, IV.15 et IV.18) montrent le transit de puissance entre les bus (lignes) dans le cas du réseau sans défaut, avec défaut, et avec SVC. On peut remarquer aussi d'après ces figures que l'installation de SVC a pour effet de soulager quelques lignes en surcharge lorsque le réseau est soumis au défaut et les rendre presque à leurs états initiaux d'avant défaut comme le montre les puissances dans les lignes 1, 11, et 14, ...etc. (Figure IV.9). Ainsi, l'amélioration du profil de la tension due à l'intégration du SVC influence la réduction des pertes actives et réactives totale (Tableaux IV.10, IV.11, IV.12 et IV.13).

#### IV.5 Optimisation de points de raccordement des FACTS (SVC)

Dans cette phase le compensateur shunt SVC est installé dans le réseau afin de résoudre le problème de variation de tension due aux chutes de tensions et aussi aux problèmes liés aux surtensions. Au début nous avons intégré le SVC au jeu de barre les plus sensibles puis le comportement du réseau est évalué par son intégration dans différents points.

D'après la figure IV.20, nous constatons que l'installation du SVC ne permet pas l'amélioration des tensions après défaut et ceci est prédictible, car ce réseau ne contient pas des alternateurs. Par conséquent pour bien illustrer l'effet des emplacements des FACTS sur l'amélioration des tensions, nous considérons un réseau avec 3 alternateurs.

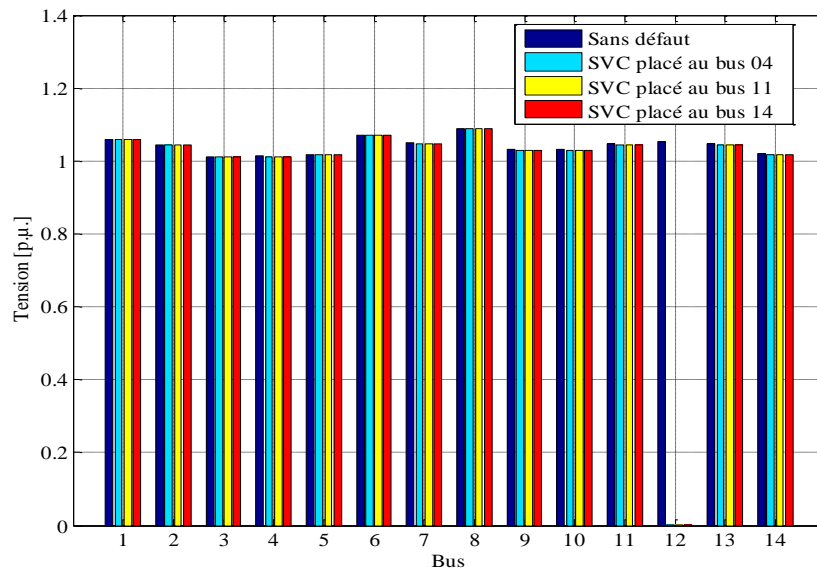


Figure IV.20 Tensions pour un SVC installé en différents jeux de barre.

IV.5.1 Cas d’un réseau à 9 jeux de barre

Le réseau étudié est constitué de 9 Bus (nœuds), 6 Lignes, 3 Transformateurs, 3 Alternateurs, et 3 Charges. Les tensions de base sont, 13.8 kV, et 16.5 kV, et 18 kV, 230 kV pour, respectivement, les bus en verts, rouges, jaunes, et bleus.

Les paramètres de ce réseau sont détaillés dans le Tableau IV.14 qui suit :

Nœud 1	Nœud 2	R	X	B/2
1	8	0	0.0576	0
2	7	0	0.0625	0
3	9	0	0.0856	0
4	7	0.032	0.161	0.153
4	8	0.01	0.085	0.088
5	8	0.017	0.092	0.079
5	9	0.039	0.170	0.179
6	7	0.0085	0.072	0.0745
6	9	0.0119	0.1008	0.1045

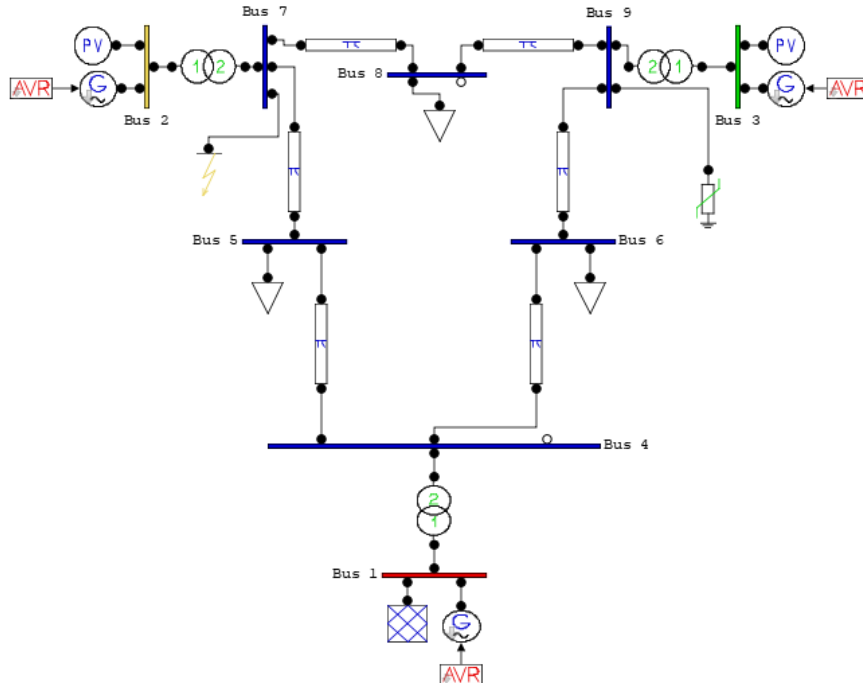
Tableau IV.14 Caractéristiques des lignes.

Les données des nœuds slacks du réseau sont regroupées dans le Tableau IV.15 suivant :

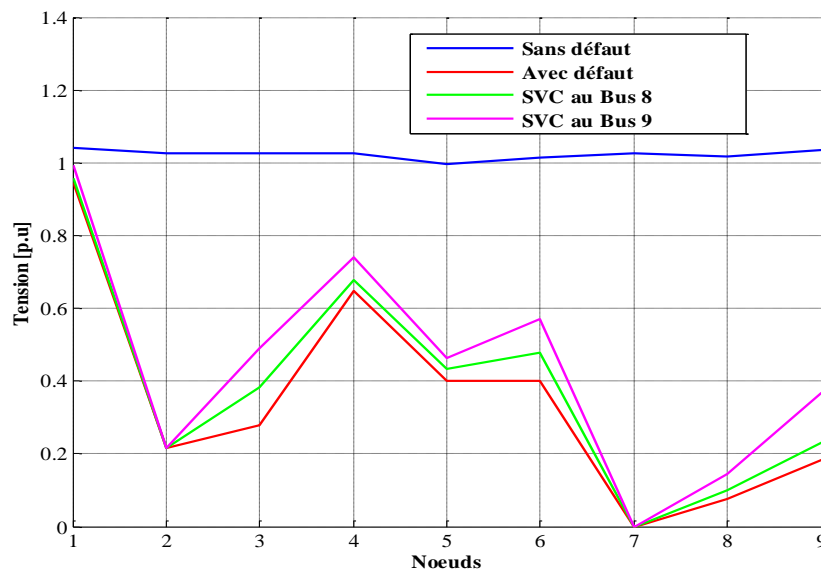
Nœuds	Tension initiale		Puissance active [p.u]	Tension		Puissance réactive	
	Amplitude [p.u]	Phase [p.u]		Min [p.u]	Max [p.u]	Min [p.u]	Max [p.u]
01	1.04	0.00	0.80	0.9	1.1	-99	99

Tableau IV.15 Données du nœud slack (nœud bilan).

En introduisant un court-circuit franc ( $R_d=0$  Ohm) au bus 7 comme montré en figure IV.21, la variation de tension dans chaque nœud après création du défaut au nœud 7 est montrée en figure IV.22. Nous allons installer un SVC dans différents bus pour voir son effet sur le comportement du réseau.



**Figure IV.21** Installation d'un SVC dans le réseau en défaut.



**Figure IV.22** Tensions pour un SVC installé en différents jeux de barre.

L'ensemble des résultats de la figure IV.22 montre l'effet du bon choix de l'emplacement d'un système FACTS sur l'évolution des tensions. Les tensions sont augmentées pour un SVC intégré dans le bus 9 par rapport au bus 8. Les tensions ne sont pas très proches à celles de références. Ceci est dû au fait que le défaut génère des instabilités importantes sur les trois

alternateurs. D'autres études sur le nombre et les types des FACTS sont obligatoires pour remédier à ce problème.

## IV.6 Simulation sous l'environnement Matlab m.file

### IV.6.1 Structure du réseau simulé

Une application sur un réseau standard, un réseau test 05 nœud IEEE, constitué de 7 lignes électriques, 2 générateurs et 4 charges. Dans un premier temps, nous présentons les résultats de l'écoulement de puissance par les méthodes itératives de Newton Raphson sans dispositif SVC. Ensuite nous présenterons les résultats de l'écoulement de puissance après et avant insertion du dispositif SVC dans le réseau.

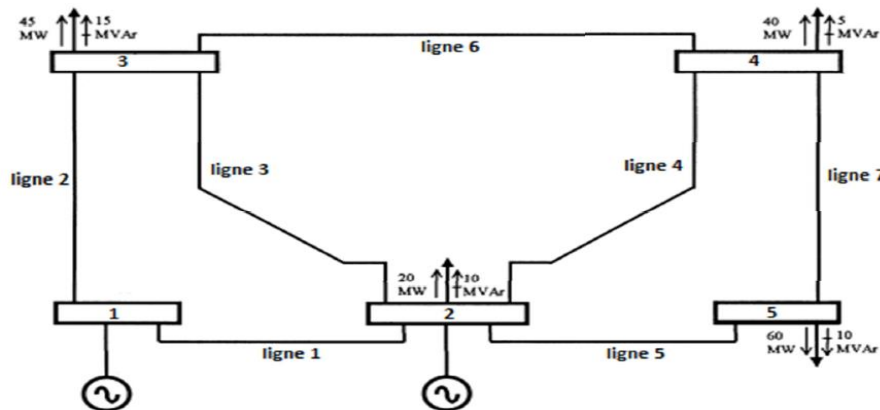


Figure IV.23 Schéma du réseau 5 nœuds.

### IV.6.2 Données du réseau de 5 nœuds IEEE

#### IV.6.2.1 Données des nœuds du réseau

Nœud	V (pu)	$\delta$ (°)	Générateur		Charge	
			P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)
1	1.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.000	0.000	0.400	0.000	-0.200	-0.100
3	1.000	0.000	0.000	0.000	-0.450	-0.150
4	1.000	0.000	0.000	0.000	-0.400	-0.050
5	1.000	0.000	0.000	0.000	-0.600	-0.100

Tableau.IV.16 Les valeurs des tensions et des puissances.

#### IV.6.2.2 Données des branches du réseau

Ligne	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1 (1-2)	0.0200	0.0600	0.0600
2 (1-3)	0.0800	0.2400	0.0500
3 (2-3)	0.0600	0.1800	0.0400
4 (2-4)	0.0600	0.1800	0.0400
5 (2-5)	0.0400	0.1200	0.0300
6 (3-4)	0.0100	0.0300	0.0200
7 (4-5)	0.0800	0.2400	0.0500

Tableau.IV.17 Caractéristiques du réseau.



### IV.6.3 Résultats et interprétations

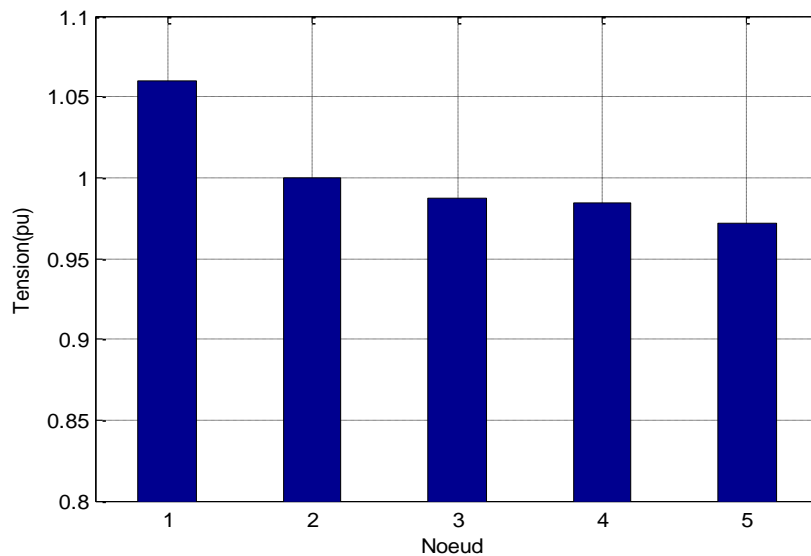
#### IV.6.3.1 Le réseau à l'état normal

Nœud	1	2	3	4	5
Tension (pu)	1.0600	1.0000	0.9872	0.9841	0.9717

**Tableau.IV.18** L'amplitude de tension dans les nœuds (pu).

Nœud	1	2	3	4	5
Angle (°)	0.0000	-2.0612	-4.6367	-4.9570	-5.7649

**Tableau.IV.19** L'angle de tension dans les nœuds (deg)



**Figure.IV.24** L'amplitude de tension dans les nœuds (pu).

L'amplitude des tensions s'affiche aux alentours de 1 pu, dans tous les nœuds PQ, avec une chute de tension  $\pm 5\%$ . Les résultats de calculs par les deux méthodes itératives sont les mêmes, avec le nombre d'itération différent, 05 itérations pour la méthode de Newton Raphson et 25 itérations pour la méthode de Gauss Seidel. Le transit de puissance et les pertes dans les lignes sont exposés aux tableaux IV.20 et IV.21 :

Ligne	P (pu)	Q (pu)
1 (1-2)	0.8933	0.7400
2 (1-3)	0.4179	0.1682
3 (2-3)	0.2447	-0.0252
4 (2-4)	0.2771	-0.0172
5 (2-5)	0.5466	0.0556
6 (3-4)	0.1939	0.0286
7 (4-5)	0.0660	0.0052

**Tableau.IV.20** Transit de puissance dans les lignes

Ligne	PL (pu)	QL (pu)
1 (1-2)	0.0249	0.0109
2 (1-3)	0.0152	-0.0069
3 (2-3)	0.0036	-0.0287
4 (2-4)	0.0046	-0.0255
5 (2-5)	0.0122	0.0073
6 (3-4)	0.0004	-0.0182
7 (4-5)	0.0004	-0.0465

**Tableau.IV.21** Les pertes dans les lignes

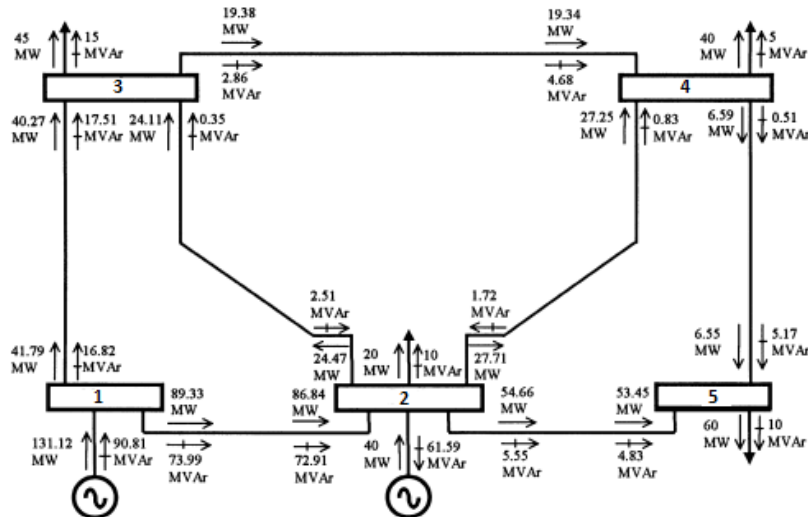


Figure.IV.25 Résultat d'écoulement de puissance dans le réseau à l'état normale

### IV.6.3.2 Insertion du SVC dans le réseau

#### IV.6.3.2.1 Insertion d'un SVC au début d'une ligne

Il résulte de ces modifications sur la matrice d'admittances nodales et sur la matrice jacobienne. Ces modifications sont détaillées au Annexe B. Les paramètres du SVC utilisés dans les calculs sont donnés dans le tableau IV.22.

$X_c$ (pu)	$X_L$ (pu)	$\alpha_{min}$ (°)	$\alpha_{max}$ (°)
1.0700	0.2880	90	180

Tableau.IV.22 Les paramètre du SVC

La figure IV.26 présente la variation de l'admittance de SVC en fonction de l'angle d'amorçage  $\alpha$ .

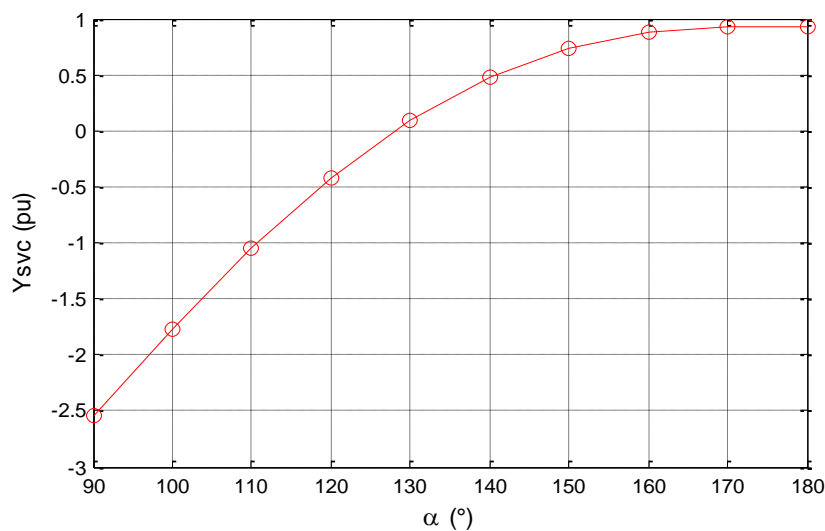


Figure. IV.26 La variation de  $Y_{svc}$  en fonction de  $\alpha$

Le SVC change de signe à partir de la valeur  $128^\circ$  de l'angle d'amorçage. C'est un changement du fonctionnement de l'inductif au capacitif.

### IV.6.3.2.2 Réseau en chute de tension

Dans ce cas, le nœud 4 est surchargé de manière à provoquer la chute de tension dans ce nœud et ceux adjacents. Les modifications vont sur les puissances actives P et réactives Q, qui prennent respectivement les valeurs 1,40 pu et 0,40 pu. Il en résulte un changement de l'état du réseau. Les résultats obtenus sont détaillés dans les tableaux IV.23, IV.24 et IV.25.

Nœud	1	2	3	4	5
Tension (pu)	1.0600	1.0000	0.9441	0.9308	0.9524

Tableau.IV.23 L'amplitude de tension dans les nœuds (pu).

Nœud	1	2	3	4	5
Angle(°)	0.0000	-4.7265	-9.3011	-10.6233	-9.4540

Tableau.IV.24 L'angle de tension dans les nœuds (deg)

Ligne	PL (pu)	QL (pu)
1 (1-2)	0.0540	0.0984
2 (1-3)	0.0497	0.0987
3 (2-3)	0.0152	0.0079
4 (2-4)	0.0244	0.0359
5 (2-5)	0.0219	0.0370
6 (3-4)	0.0065	0.0018
7 (4-5)	0.0010	-0.0412

Tableau.IV.25 Les pertes dans les lignes (pu)

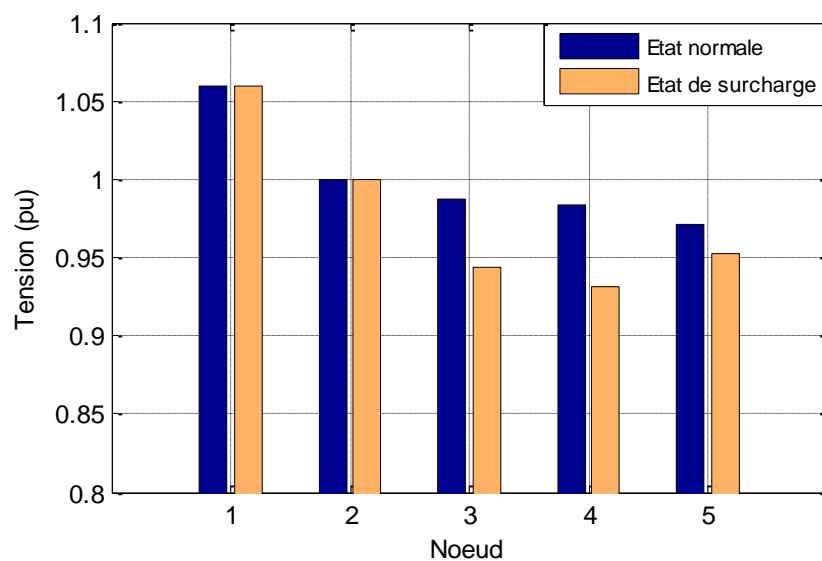
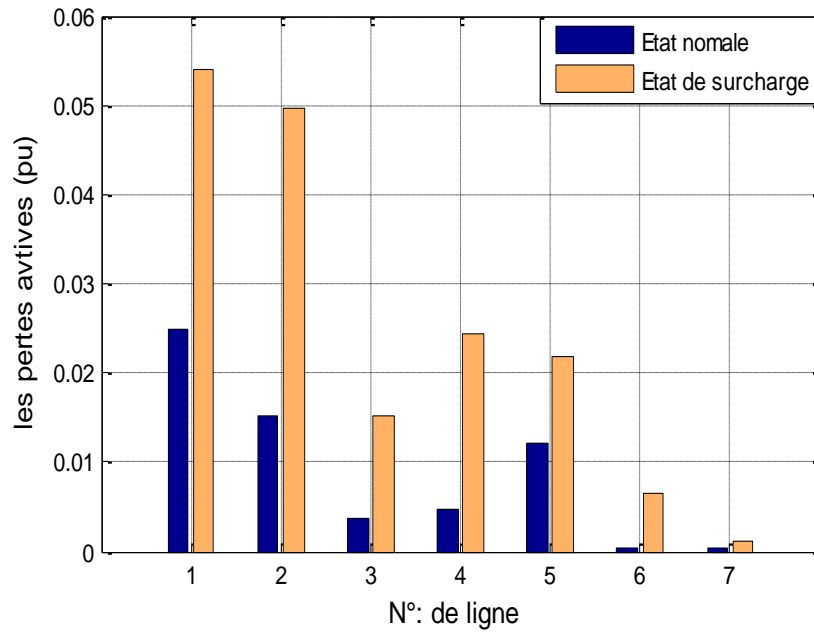
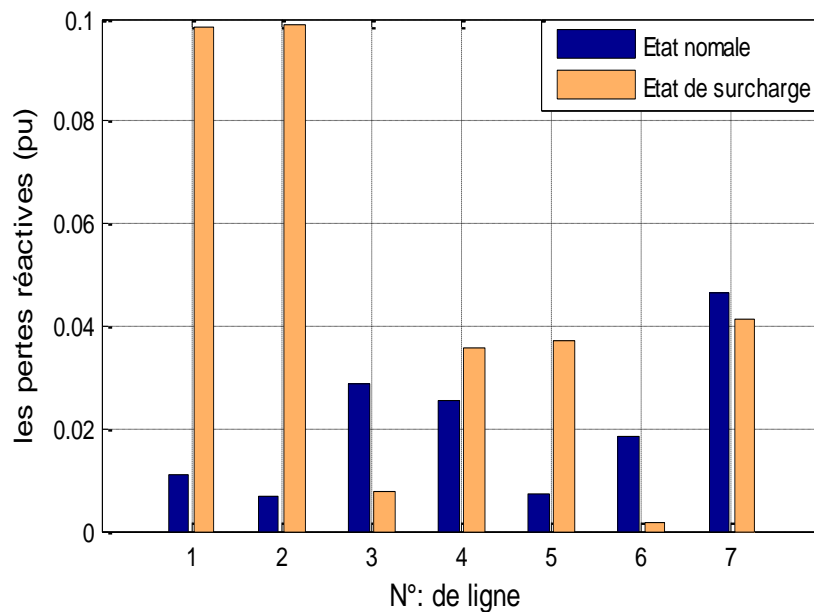


Figure.IV.27 L'amplitude de tension à état normale et à état de surcharge



**Figure.IV.28** Les pertes actives dans les lignes

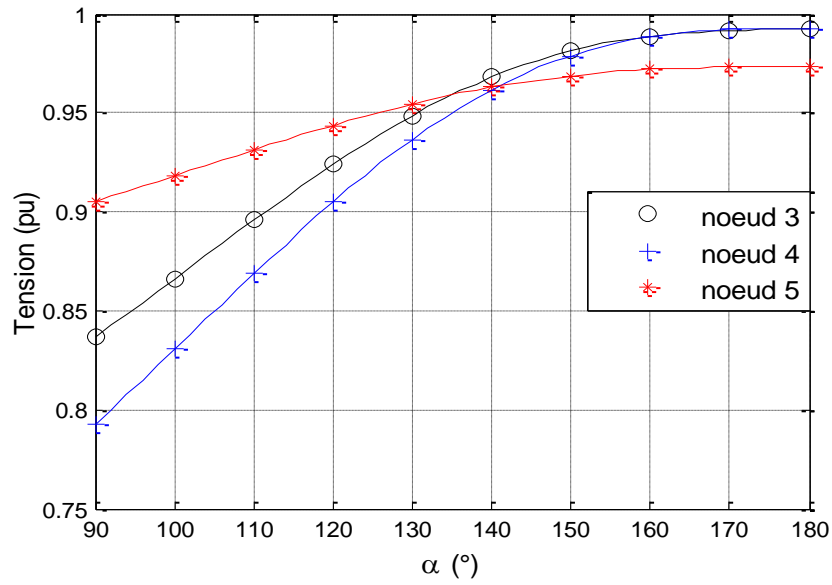


**Figure.IV.29** Les pertes réactives dans les lignes

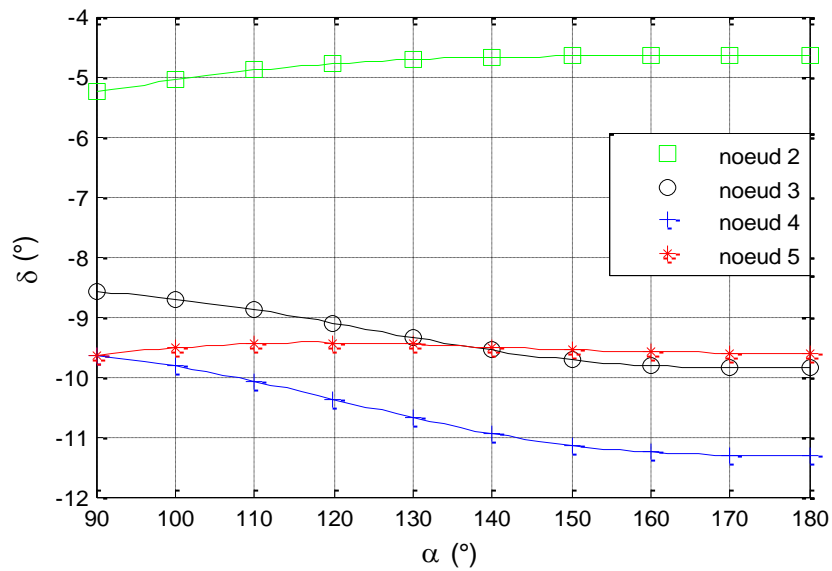
Les figures ci-dessous montrent les chutes de tension aux nœuds chargés, et l'augmentation des pertes totales actives et réactives dans le réseau électrique suite à la surcharge au nœud 4. On introduit un SVC au nœud 4 pour la résolution du problème.

#### IV.6.3.2.3 Insertion d'un SVC dans le nœud 4

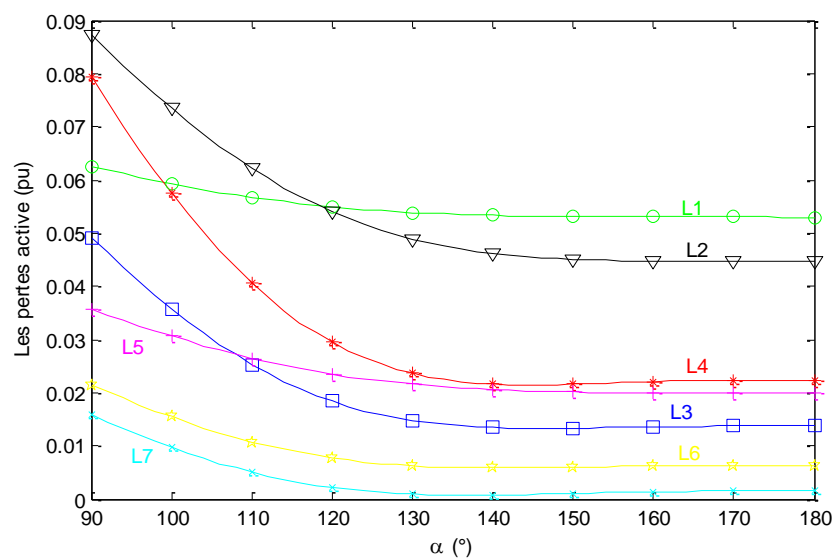
Le principe est de faire varier " $\alpha$ " de  $90^\circ$  à  $180^\circ$  pour observer l'effet du SVC sur les tensions des nœuds et les pertes de puissance dans les lignes. Les figures de IV.30 à IV.33 montrent l'influence de l'angle d'amorçage sur les amplitudes de tension et sur les puissances.



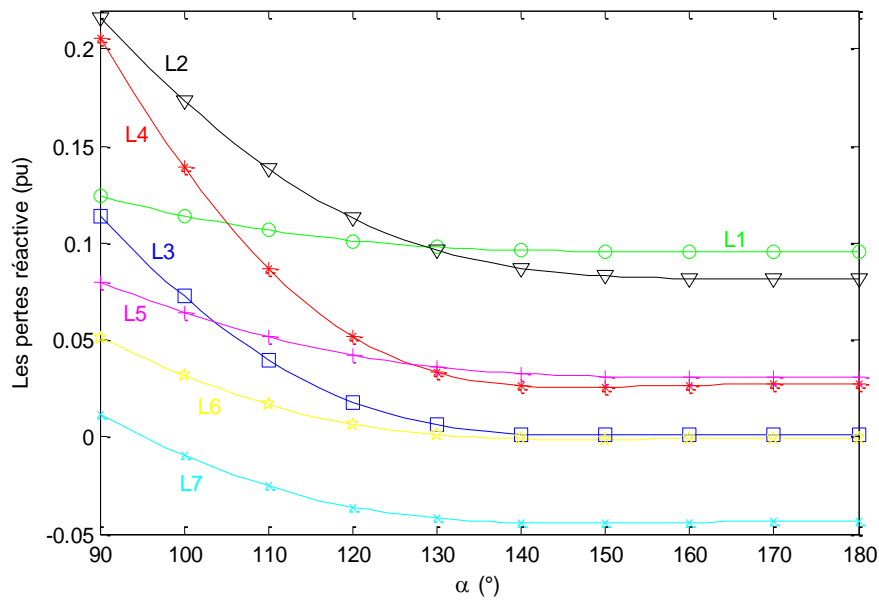
**Figure.IV.30** La variation de l'amplitude de la tension en fonction de  $\alpha$



**Figure.IV.31** La variation de l'angle de tension en fonction de  $\alpha$



**Figure.IV.32** Les pertes actives en fonction de  $\alpha$



**Figure.IV.33** Les pertes réactives en fonction de  $\alpha$

### IV.6.3.3 Interprétation

A partir d'une valeur " $\alpha$ " de 135 ° (équivalent à QSVC de 0,255 pu), les tensions peuvent être compensées (Figure IV.30). Les tensions à partir de cette valeur sont comprises dans les limites tolérées (+/- 5%). Ainsi, - comme dans les figures IV.32 et IV.33 - le SVC remplit son rôle de régulateur de tension et permet de réduire les pertes dans les lignes.

En effet, le SVC permet de combler par une contribution d'énergie réactive locale la consommation du nœud surchargé, et donc, réduire la demande d'énergie réactive du générateur et du nœud de référence. Ceci permet naturellement de réduire la puissance transmise à travers la ligne (notamment celle reliée au nœud 4) et donc de rebondir les pertes.

## IV.7 Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté des applications pour illustrer notre travail. Cet ensemble d'applications, montre qu'il est possible de quantifier par calcul les différents types de perturbations sur un réseau de transport d'énergie en utilisant le logiciel PSATet la méthode de Newton-Raphson pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance.

Nous avons, ensuite, proposé une solution pour se remédier contre les effets néfastes d'un court circuit, de la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau ainsi que de l'augmentation brutale de la charge par installation des systèmes FACTS shunt (SVC). Les résultats obtenus sont bien illustrés, et ils ont prouvés que les puissances réactives et actives transitées dans les lignes du réseau sont optimisées et que le profil des tensions aux jeux de barres de raccordement est bien réglé.

**Référence bibliographique**

[IV-1] Federico Milano, « Power System Analysis Toolbox », Quick Reference Manual for PSAT, Version 2.1.2, June 26, 2008

# *Conclusion générale*



## Conclusion Générale

Bien que l'amélioration et le renforcement du système électrique par des nouvelles stratégies de protection et de commande fussent la solution dans plusieurs cas, alors les incidents et les perturbations enregistrés sur les grands réseaux ont montrés les limites de stabilité et de transit des systèmes existants.

L'augmentation des capacités de transit par l'ajout de lignes aériennes a toujours été le premier remède au manque de capacité de transport. Or cette solution n'est plus faisable aujourd'hui. Les difficultés et la durée de l'obtention du permis de construire, les droits de passage, le taux de perte élevé, la stabilité, ont poussé les gestionnaires des réseaux de transport d'envisager des systèmes électriques flexibles qui s'avère une nécessité.

L'utilisation de la technologie FACTS est un moyen susceptible d'apporter des solutions qui semblent meilleures afin d'améliorer les performances dynamiques du système électrique.

Parmi ces outils de compensation, on a choisi le compensateur statique de puissance réactive (SVC) à cause de sa simplicité de contrôle et son coût dans le marché (moins cher par rapport aux autres FACTS).

L'étude du compensateur statique SVC, présentée dans ce travail, est constituée de trois parties, à savoir :

- Description des éléments qui constituent le dispositif SVC.
- Modélisation du compensateur statique et son principe de fonctionnement.
- Contrôle optimal de la puissance réactive compensée sur le réseau électrique par dispositif SVC.

Dans ce travail nous avons étudié, en premier lieu un défaut triphasé franc considéré se produisant dans le bus 12 du réseau électrique. En deuxième lieu l'impact de la perte d'un ou plusieurs ouvrages sur la répartition de puissance a été analysé. Pour cela on a traité un réseau de 14 nœuds en régime statique en utilisant le logiciel PSAT et le langage Matlab pour le calcul de l'écoulement de puissance par la méthode Newton-Raphson.

La deuxième partie de ce mémoire a été l'étude d'optimisation de l'installation des systèmes FACTS sur l'amélioration de l'état du réseau électrique.

Ce travail est terminé par des simulations faites sur des réseaux de transport d'énergie électrique sous environnement Matlab afin d'élaborer le réglage des tensions et le contrôle des puissances réactives d'un réseau électrique au moyen des dispositifs FACTS (SVC).

Les résultats obtenus montrent clairement le rôle primordial que peut jouer les systèmes FACTS dans la stabilité des réseaux électriques qui par compensation de l'énergie réactive, ont

permis une amélioration du plan de tension par la diminution des chutes de tension, la garantie d'un meilleur transit de puissance active et réactive et la diminution des pertes actives et réactives totales.

En perspectives de ce travail il paraît nécessaire d'élaborer des méthodes et des techniques intelligentes d'optimisation pour un emplacement idéal des systèmes FACTS dont le but est d'aboutir à une meilleure performance de ces systèmes.

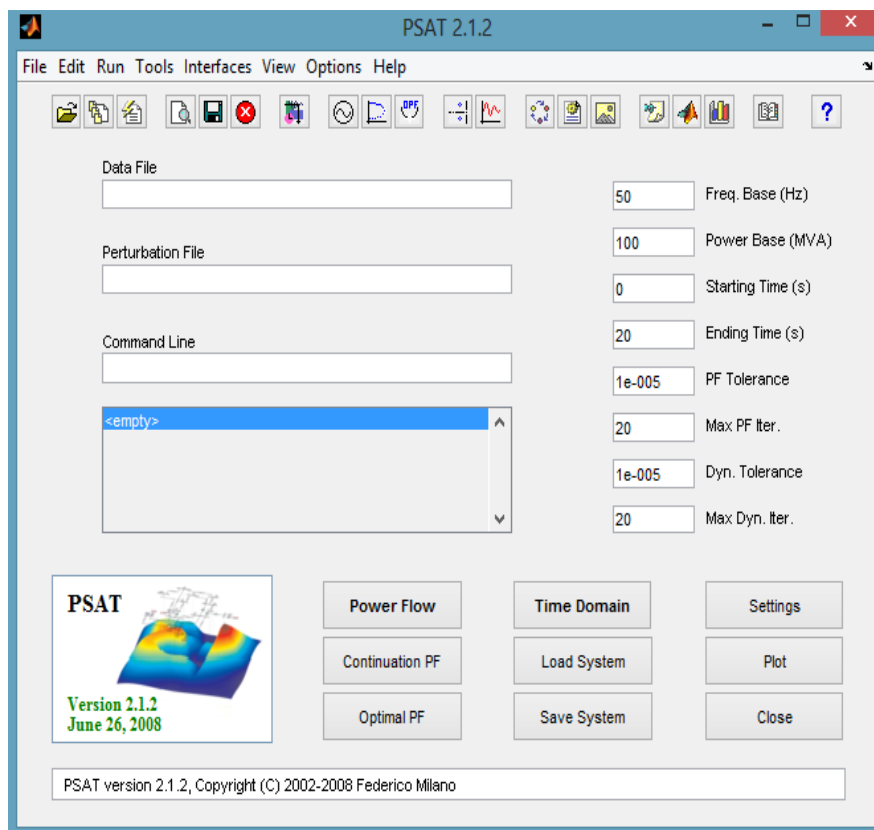
# *Annexes*

## Annexe A

### A.1 Power System Analysis Toolbox (PSAT)

#### A.1.1 PSAT ?

PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un logiciel destiné à l'analyse et l'étude des réseaux électriques, voir (Figure A.1). Il est développé sous MATLAB par Mr. Federico Milano ; Professeur, Docteur à l'université de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain. PSAT bénéficie largement des remarques et observations des chercheurs spécialisés dans le réseau électrique via leurs contributions dans le forum de ce dernier. Pour cela, il a connu des améliorations remarquables d'une version à une autre. PSAT est un logiciel, simple, intéressant, qui englobe plusieurs domaines de recherche dans l'étude et l'analyse des réseaux électriques. La manipulation de PSAT peut être effectuée, soit par l'interface graphique, soit par la programmation en ligne en utilisant leurs fonctions prédéfinies.



**Figure A.1.** Page d'accueil du PSAT.

#### A.1.2 Utilisation de PSAT

Les étapes d'utilisation de PSAT se résument comme suit :

- ✓ Ouvrir un nouveau fichier.
- ✓ Créer du réseau électrique à étudier.

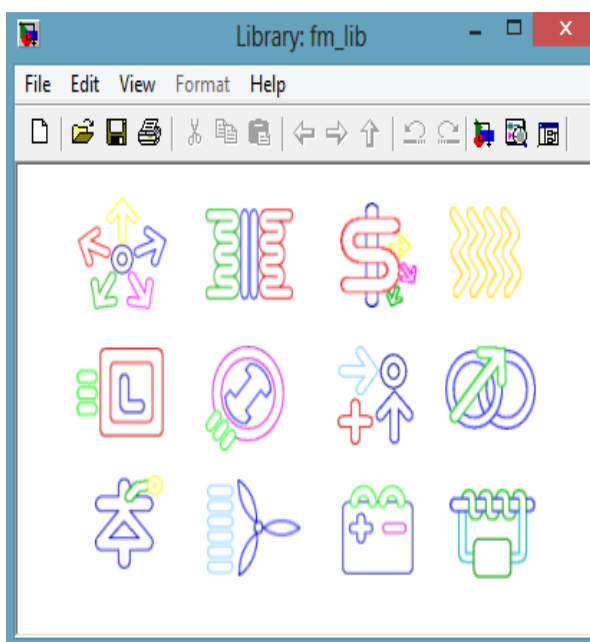
- ✓ Lancer le modèle de la bibliothèque de simulation.
- ✓ Introduire les données numériques des éléments (générateurs, lignes, transfos, FACTS...).
- ✓ Exécuter l'écoulement de puissances.
- ✓ Exécuter la simulation dans le domaine temporel.

### A.1.3 Les principales caractéristiques de PSAT

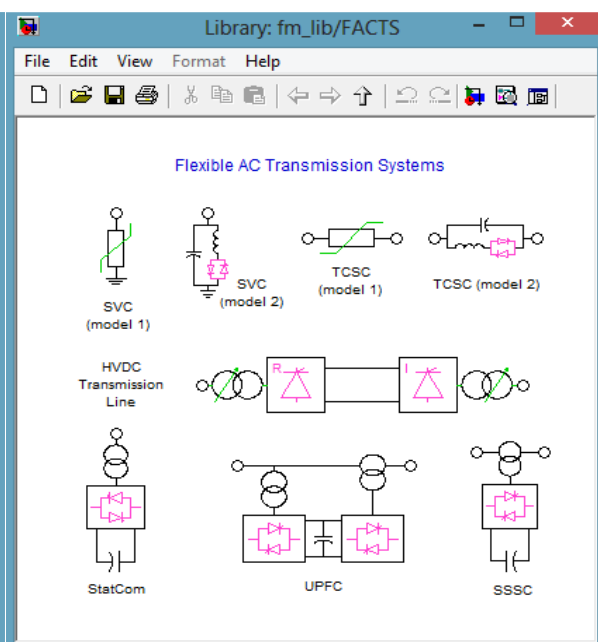
Le logiciel PSAT est conçu pour faire l'analyse de la répartition de puissance (Power Flow "PF"). Une fois ce calcul résolu, l'utilisateur peut effectuer d'autres analyses statiques et/ou dynamiques. Qui sont comme suite :

- ✓ Continuation de l'écoulement de puissance (Continuation Power Flow "CPF").
- ✓ Optimisation de la répartition de puissance (Optimal Power Flow "OPF").
- ✓ Simulation dans le domaine temporel. (Time Domain Simulation) ...etc.

Dans nos applications, nous nous intéressons à l'analyse de la répartition de puissance et à la simulation dans le domaine du temps. La boîte à outils est également fournie avec un environnement graphique (Simulink), qui est un outil convivial pour la conception du réseau. La Figure suivante représente la bibliothèque-Simulink mise en œuvre dans PSAT.



**Figure A.2.** Bibliothèque-Simulink de PSAT.



**Figure A.3.** Model de FACTS.

### A.1.4 Les méthodes de résolution

Parmi les méthodes de résolution du problème de la répartition de puissance incluses dans PSAT, on trouve la méthode de « Newton\_Raphson » et la méthode « Fast Decoupled Power Flow ».

## Annexe B

### B. Modifications sur la matrice d'admittances nodales et sur la matrice Jacobienne

#### B.1 Modification de la matrice d'admittances

Nous avons modélisé le SVC comme étant une admittance transversale variable qui est connecté à un nœud  $m$  du réseau. Ainsi, l'effet de ceci, est basé seulement sur la modification de l'élément  $Y_{mm}$  dans la matrice d'admittances. La nouvelle matrice modifiée est écrite comme suit :

Lorsque SVC placée dans le nœud  $m$

$$Y_{new} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1m} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Y_{m1} & \cdots & Y_{mm}^{old} + y_{svc} & \cdots & Y_{mn} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nm} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (B.1)$$

Et lorsque SVC placée au milieu de la ligne  $m - k$  les éléments  $Y_{mm}$ ,  $Y_{kk}$ ,  $Y_{mk}$ ,  $Y_{km}$  seront modifiés de manière à produire la nouvelle matrice d'admittances suivante :

$$Y_{new} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{km} & \cdots & Y_{1k} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{m1} & \cdots & Y_{mm}^{old} + Y_{mm}^{add} & \cdots & Y_{mk}^{old} + Y_{mk}^{add} & \cdots & Y_{mn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1} & \cdots & Y_{km}^{old} + Y_{km}^{add} & \cdots & Y_{kk}^{old} + Y_{kk}^{add} & \cdots & Y_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nm} & \cdots & Y_{nk} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (B.2)$$

Cette nouvelle matrice est utilisée pour calculer le nouveau transit de puissance. En faisant varier l'angle d'amorçage du SVC " $\alpha$ ", il est possible de tracer les courbes de variation de tension sur les nœuds. Ils permettent de localiser le meilleur point de compensation du réseau (toutes les tensions dans les limites égales  $\pm 0.05$ ).

Les courbes de variation des puissances des pertes dans les lignes peuvent être obtenues selon " $\alpha$ " ce qui permet de mesurer l'impact du dispositif SVC sur ces lignes. Ces courbes seront étudiées pour la compensation d'un réseau dans le cas de chute de tension.

## B.2 Modification de la matrice Jacobéenne

Lorsque le SVC est inséré sur un nœud, celui-ci est contrôlé, et donc sa tension est maintenue en amplitude avec une valeur fixe ; ceci permet d'éliminer le terme  $\Delta V_k = 0$  (comme k est l'indice de nœud contrôlé). Ce terme est substitué à la différence " $\alpha$ " qui permettra d'avoir, après convergence, l'angle d'amorçage de thyristor qui permet le maintien de la tension de consigne. Le système matriciel devient alors comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \vdots \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_k} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_k}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_k}{\partial V_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial V_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_k} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_k} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial V_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_k} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & 0 & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_k \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta \alpha \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$Q_K = Q_K^{old} + Q_{svc} \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} = \frac{\partial Q_K^{old}}{\partial \alpha} + \frac{\partial Q_{svc}}{\partial \alpha} \quad (\text{B.5})$$

Et on a  $Q_k$  variée par rapport l'angle d'amorçage  $\alpha$  donc

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} = \frac{\partial Q_K^{old}}{\partial \alpha} \quad (\text{B.6})$$

$$\text{Avec : } Q_{svc} = -y_{svc} V_K^2 \quad (\text{B.7})$$

$$\text{Et } Q_{svc} = \frac{-V_K^2}{X_L X_C} \left[ X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \right] \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} = \frac{2V_K^2}{\pi X_L} (\cos(2\alpha) - 1) \quad (\text{B.9})$$

Pour observer l'impact de la présence d'un SVC dans le réseau, une étude d'état du réseau a été faite, en cas de chute de tension dans un nœud. La localisation du SVC dans le réseau a été modifiée pour en déduire celle qui offre la meilleure compensation, et pour observer la variation de tension des nœuds en fonction de la puissance réactive injectée par le SVC.

## Résumé

Dans le cadre de notre travail de mémoire de fin d'études, nous nous intéressons à quelques types de perturbations : L'apparition d'un court-circuit, Les pertes d'un ou plusieurs ouvrages et l'augmentation brutale de la charge.

Aussi nous nous intéressons dans ce travail à quelques actions correctives nécessaires, que le dispatcher doit mettre en œuvre, pour faire face aux différents aléas affectant le réseau électrique, telles que l'intégration de système FACTS (SVC) pour pallier les conséquences des défauts.

Pour cela on a traité un réseau de 14 nœuds en régime statique en utilisant le logiciel PSAT et le langage Matlab pour le calcul de l'écoulement de puissance par la méthode Newton-Raphson.

**Mots-clés :** FACTS, SVC, Méthode Newton-Raphson, PSAT.

## Abstract

As part of our final thesis work, we are interested in a few types of disturbances: The appearance of a short circuit, the losses of one or more structures and the sudden increase in the load. Also in this work we are interested in some necessary corrective actions, which the dispatcher must implement, to deal with the various hazards affecting the electrical network, such as the integration of the FACTS (SVC) system to mitigate the consequences of faults. For this a network of 14 nodes was treated in static mode using the PSAT software and the Matlab language for the calculation of the power flow by the Newton-Raphson method.

**Keywords :** FACTS, SVC, Newton-Raphson method, PSAT.

## ملخص

في هذا العمل المدرج في إطار مذكرة التخرج نهتم بدراسة بعض أنواع الاضطرابات: حدوث قطع ، وفقدان واحد أو أكثر من المكونات أو الزيادة الحادة في الحمل.

في هذا العمل أيضاً ، نحن مهتمون ببعض الإجراءات التصحيحية اللازمة ، الموزع يجب أن يقوم بالتنفيذ للتعامل مع حالات الطوارئ التي تؤثر على الشبكة الكهربائية ، مثل إعادة برمجة الإنتاج ، تغيير في بنية أو طوبولوجيا النظام، وكحل أخير ذرف الحمولات مثل تكامل نظام FACTS (SVC) للتخفيف من عواقب الأعطال .لهذا، قمنا بمعالجة شبكة مكونة من 14 عقدة في الوضع الثابت باستخدام برنامج PSAT ولغة Matlab لحساب تدفق الطاقة بطريقة نيوتن رافسون.

**الكلمات المفتاحية:** طريقة نيوتن رافسون, PSAT, FACTS, SVC.