

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohammed Seddik Ben Yahia Jijel



Faculté des Sciences et de Technologie
Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Réseaux électriques

Thème

**Amélioration de la stabilité de
tension d'un réseau électrique par
système FACTS**

Présenté par :

Harrat Ahlem

Dirigé par :

M^r.M.Chouki

Promotion 2020-2021



Remerciements

Grâce à dieu le tout puissant, ce travail a pu être terminé.

Nous avons le plaisir d'adresser nos vifs remerciement a :

M'M. CHOUKI promoteur de ce projet, pour ces conseils l'intérêt et l'aide précieuse qu'il n'a pas hésité à nous offrir tout au long de notre travail.

Nous remerciment tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Que les membres de jury, soient tout spécialement remerciés pour avoir accepté de nous consacrer une partie de leur temps, afin d'examiner et de juger notre travail.

A decorative scroll with a green and yellow gradient, featuring floral patterns and a large red shell at the bottom left. The scroll is unrolled, revealing the text.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents,

A mes frères,

Hichem, Mohammed Ali, Salah eddine

A ma sœur Anissa

A toute mes amies et plus particulièrement :

Fadia.M

Et en fin, à ceux qu'ils mon connaît

De près ou de loin.



Ahlem Harrat

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralité sur les réseaux électriques et écoulement de puissance

I.1 Introduction..... 3

I.2 Fonctionnement du réseau électrique..... 3

I.2.1 Introduction..... 3

I.3 Problème de conduite..... 4

I.4 Problème de réglage..... 4

I.5 Problème de stabilité..... 5

I.6 Problème de protection..... 5

I.7 Sécurité des réseaux de transport..... 5

I.7.1 Sécurité statique..... 5

I.7.2 Sécurité dynamique..... 6

I.8 Tension..... 6

I.9 Fréquence..... 7

I.10 Remèdes..... 7

I.11 Les anomalies dans un réseau électrique..... 7

I.11.1 Les courts-circuits 7

I.11.2 Les surcharge 8

I.11.3 Les surtensions..... 8

I.12 Puissance réactive..... 8

I.13 Puissance transmissible dans une ligne..... 9

I.14 La chute de tension..... 10

I.15 Calcul de la répartition de puissance (load flow)..... 11

I.16 Techniques de calcul du problème d'écoulement de puissance..... 12

I.16.1 Méthode de Newton_Raphson..... 12

I.17 Dispositifs conventionnels de compensation 16

I.17.1 Les condensateurs..... 16

I.17.2 Les inductances..... 17

I.17.3 Les compensateurs synchrones..... 17

I.17.4 Les compensateurs statiques..... 17

I.18 Conclusion..... 17

Références Bibliographiques..... 18

Chapitre II : Les systèmes FACTS

II.1 Introduction..... 19

II.2 Qu'est-ce que le système FACTS ?.....19

II.3 Rôle des dispositifs FACTS..... 19

II.4 Fonctionnement des FACTS..... 20

II.5 Les dispositifs FACTS..... 21

II.6 Classification des dispositifs FACTS.....21

II.6.1 Classification selon la génération..... 21

II.6.1 Classification selon la catégorie..... 21

II.7 Types de FACTS..... 22

II.8 Nécessité des dispositifs FACTS..... 22

II.9 Structure des Principaux Dispositifs FACTS..... 23

II.9.1 Compensateurs parallèle..... 23

II.9.1.1 Compensateurs parallèles à base de thyristors..... 23

II.9.1.1.1 TCR (Thyristor Controlled Reactor) or TSR (Thyristor Switched Reactor)..... 23

II.9.1.1.2 TSC (Thyristor Switched Capacitor).....24

II.9.1.1.3 SVC (Static Var Compensator)..... 24

II.9.1.2 Compensateurs parallèles à base de thyristors GTO..... 25

II.9.1.2.1 STATCOM (Static Compensator).....25

II.9.2 Compensateurs séries..... 26

II.9.2.1 Compensateurs séries à base de thyristor..... 26

II.9.2.1.1 TCSC (Thyristor controlled series capacitor)..... 26

II.9.2.1.2 TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)..... 27

II.9.2.2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors.....	27
II.9.2.2.1 SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	27
II.9.2.2.1.1 Principe de fonctionnement.....	28
II.9.3 Compensateurs hybrides (série - parallèle).....	29
II.9.3.1 Compensateur séries à base de thyristors.....	29
II.9.3.1.1 SPS (Static Phase Shifter).....	29
II.9.3.2 Compensateur séries à base de GTO thyristors.....	30
II.9.3.2.1 UPFC (contrôleur de puissance unifié).....	30
II.9.3.2.2 IPFC (contrôleur de puissance interlignes).....	30
II.10 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.....	31
II.11 Modélisation des dispositifs FACTS shunt.....	32
II.11.1 Modélisation du SVC.....	32
II.11.2 Modélisation du STATCOM.....	33
II.12 Conclusion.....	34
Référence bibliographique.....	35

Chapitre III : Application et résultats de simulation

III.1 Introduction.....	37
III.2 Outils de simulation.....	37
III.3 Applications et résultats de simulation.....	38
III.3.1 Etude d'un réseau IEEE à 14 nœuds.....	38
III.4 Répartition de puissance sur un réseau suite à un défaut sans systèmes FACTS.....	42
III.4.1 Cas d'un court-circuit triphasé.....	42
III.5 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau Electrique.....	44

III.6 Répartition de puissance suite à une augmentation brutale de la charge.....	47
III.7 Effet de système FACTS (STATCOM) sur un réseau en défaut.....	48
III.7.1 Cas d'un court-circuit triphasé.....	48
III.8 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau Electrique.....	51
III.9 Répartition de puissance suite à une augmentation brutale de la charge.....	54
III.10 Discussions des résultats.....	56
III.11 Conclusion.....	56
Référence bibliographique.....	57
Conclusion générale.....	58
Annexe A	59
Annexe B	62
Résumé	

Introduction générale

Introduction générale

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement: malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée. [I-10]

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS « Flexible Alternating Current Transmission System ». Les dispositifs FACTS font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau électrique. [I-10]

Le STATCOM est largement utilisé pour la compensation de l'énergie réactive et donc pour réguler la tension au niveau de jeu de barre où il est connecté. A partir d'une source de tension continue, il génère une tension alternative triphasée, synchrone avec la tension du réseau électrique. En général, aucune puissance active n'est impliquée; seule la puissance réactive est échangée entre le STATCOM et le réseau électrique. Ce qui permet à la fois de corriger le facteur de puissance et de compenser les chutes et les surtensions, améliorant ainsi la qualité de la puissance.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que : STATCOM, SSSC, UPFC respectivement. [II-2]

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

Introduction générale

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 trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le réseau électrique, le fonctionnement de ce réseau, le transport de la puissance active et réactive ainsi que l'écoulement de puissance en contenant, la formulation des équations de l'écoulement de puissance, les méthodes numériques de résolutions et les moyens de compensations de ce dernier.

Le deuxième chapitre traite la modélisation des systèmes FACTS, à savoir la nécessité et classification de ces derniers et aussi l'application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.

Les applications seront illustrés dans le troisième chapitre où des simulations numériques seront réalisées à l'aide du logiciel PSAT sur un réseau IEEE de 14 jeux de barres permettant ainsi d'analyser le comportement de ce réseau avec ou sans défaut et l'intégration de système FACTS (STATCOM) pour pallier les conséquences des défauts.

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

*Chapitre I :
Généralités sur les
réseaux électriques et
écoulement de puissance*

I.1 Introduction

Ce premier chapitre représente une vue d'ensemble qui va nous permettre d'introduire l'objet de notre travail que nous intitulons: " **Amélioration de la stabilité de tension d'un réseau électrique par système FACTS** ".

Le rôle des systèmes d'énergie électrique, est de fournir aux utilisateurs le produit électricité au moindre cout dans des conditions de qualité et de sécurité satisfaisantes, malheureusement l'apparition de défauts tels que les courts-circuits, déséquilibre entre la production et la consommation, perte d'un ou plusieurs ouvrages..., provoque de sérieuses perturbations.

Pour cela nous introduisons la notion du fonctionnement du réseau électrique. Ensuite, nous décrivons les différents aléas qui peuvent perturber le bon fonctionnement de ces réseaux.

A la fin, nous exposerons la méthode de Newton Raphson pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance, ainsi que les différentes solutions possibles pour rétablir son fonctionnement normal.

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 économique satisfaisantes.

Le problème majeur de l'exploitant est donc le 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).

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

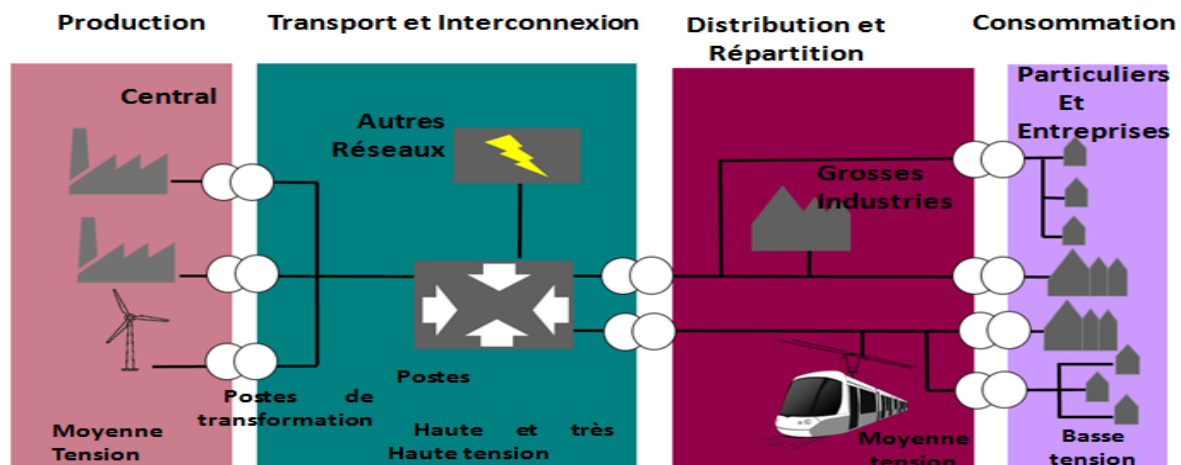


Figure I.1. Réseau électrique simplifié. [I-2]

- 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.3 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.4 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.5 Problème de stabilité

Il faut savoir que, 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.6 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.7 Sécurité des réseaux de transport

Le niveau de sécurité d'un réseau est jugé satisfaisant si, d'une part, il est apte à assurer l'équilibre production-consommation en respectant certaines limites admissibles liées aux transits de puissance dans les lignes, aux tensions en chaque nœud et aux points de fonctionnement des groupes de production et si, d'autre part, il est capable de surmonter une perturbation qu'elle soit petite ou grande d'où les notions de sécurité (ou stabilité) statique et sécurité (ou stabilité) dynamique [I-3].

I.7.1 Sécurité statique

La sécurité statique concerne le bon fonctionnement du réseau en régime permanent qui ne peut être garanti que si toutes les consommations actives et réactives sont satisfaites avec des valeurs de tension et de fréquence comprises dans les intervalles admissibles et comprises entre des limites maximales et minimales. Des tensions trop basses peuvent conduire à un écroulement généralisé du réseau et des tensions trop élevées peuvent endommager les équipements ou dégrader leur fonctionnement. Les transits dans les lignes et les transformateurs doivent être inférieurs aux limites admissibles, que ce soit pour les courants ou pour les puissances.

I.7.2 Sécurité dynamique

La sécurité dynamique concerne l'évolution temporelle du réseau après une perturbation. Pour les grandes perturbations (perte d'un ouvrage, court-circuit,...) les variations importantes des grandeurs physiques peuvent faire perdre le synchronisme aux générateurs. De telles perturbations sont susceptibles de provoquer des comportements non linéaires du système. On parlera alors de problème de stabilité transitoire, ou stabilité de première oscillation. Celle-ci dépend fortement de l'ampleur, de la durée et de la position de la perturbation, ainsi que de l'état initial du réseau. Pour les petites perturbations (variations graduelles de charges), nous parlerons de stabilité dynamique, ou stabilité en petits mouvements. En fait, les termes transitoire et dynamique caractérisent des phénomènes à échelles de temps différentes. Le régime transitoire concerne les instants immédiats après la perturbation alors que le régime dynamique désigne la période suivant le régime transitoire jusqu'à ce que le système revienne à l'état d'équilibre (quelques dizaines de secondes), ou qu'il ne devienne instable.

I.8 Tension

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller le niveau de tension électrique qui doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation. La circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La (Figure I.2) montre un exemple de profil de tension [I-4].

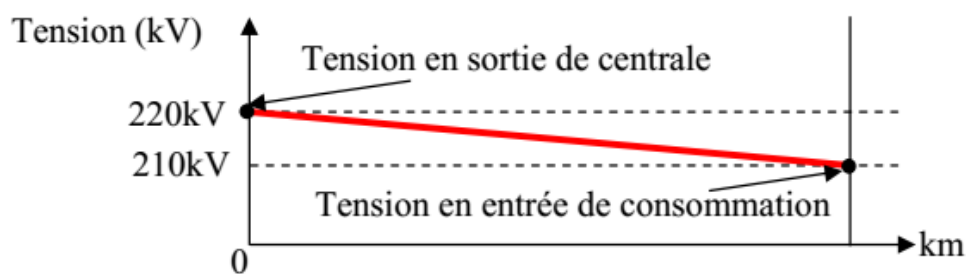


Figure I.2. Exemple de profil de tension.

Pour que la tension reste à chaque instant dans une plage acceptable pour les matériels, des dispositifs de réglage automatique de la tension sont répartis sur le réseau de transport. Ils agissent principalement sur les groupes de production, qui peuvent réguler la tension au point du réseau où ils sont raccordés. Ces dispositifs sont importants pour la sûreté de fonctionnement du système électrique, car ils évitent l'apparition de phénomènes tels que les

écroulements de tension. Pour fournir une tension supérieure à la tension minimale autorisée en tout point du réseau, même en bout de ligne, les groupes de production élèvent la tension à un niveau supérieur à la tension nominale. Le plan de tension sur le réseau 220kV en Algérie est défini en temps réel par le Gestionnaire des Réseaux de Transport d'Electricité-SONELGAZ, qui fixe les tensions à maintenir en un certain nombre de points dits « points pilotes », de manière à éviter les écroulements de tension.

I.9 Fréquence

Les centrales doivent à tout instant produire la quantité d'électricité nécessaire à l'alimentation de la consommation. Pour répondre à cet impératif, leurs alternateurs doivent tourner à la même vitesse électrique, afin de produire une tension de fréquence uniforme dans tout le réseau.

La fréquence doit être maintenue autour d'une valeur nominale 50 Hz ou 60Hz, quelles que soient les variations de consommation ou de production. Un fonctionnement correct est autorisé dans une plage déterminée de fréquence. Si la fréquence sort de cette plage autorisée, des systèmes de régulation dans les centrales interviennent pour la ramener à la valeur de synchronisme (50Hz ou 60Hz).

I.10 Remèdes

Le maintien du plan de tension dans les réseaux de transport et de répartition est un problème local contrairement au problème de maintien de la fréquence qui est un problème global impliquant l'ensemble du réseau interconnecté. Le réglage de la fréquence est étroitement lié à celui de la puissance active (couplage P/f). Le réglage de la tension est étroitement lié à celui de la puissance réactive (couplage Q/V).

I.11 Les anomalies dans un réseau électrique

I.11.1 Les courts-circuits

Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tension différente ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau. Le courant de court-circuit (triphase) est une donnée essentielle pour le dimensionnement des équipements électrique [I-5]

I.11.2 Les surcharge

La surcharge d'un appareil est caractérisée par un courant supérieur au courant admissible, les origines de surcharges sont :

- Le court-circuit.
- Les pointes de consommation.
- L'enclenchement des grandes charges.

Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes sur le réseau et accélère le vieillissement des équipements de réseau [I-5]

I.11.3 Les surtensions

Parmi les différents types de surtension, il y a :

- Les surtensions de manœuvres.
- Les surtensions lentes.
- Les surtensions de foudre.

En plus de tout cela, il existe d'autres types de Les anomalies dans un réseau électrique tels que :

- ❖ Les oscillations.
- ❖ Les déséquilibres.....etc.

I.12 Puissance réactive

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

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

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

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.

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques et écoulement de puissance

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

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

Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants [I-6]

I.13 Puissance transmissible dans une ligne

Contrairement à une idée très répandue, ce n'est pas l'échauffement maximal des conducteurs qui limite la puissance transmissible à travers une ligne.

En effet, considérons la (Figure I.3) qui représente de manière très simplifiée, par un dipôle d'impédance $Z=R + jX$, une ligne destinée à alimenter une charge. Sans nuire à la généralité de notre propose, nous supposerons, d'abord, que la résistance R de la ligne est nulle (elle est généralement très faible vis-à-vis de la réactance X) et que la puissance réactive Q_2 de la charge est nulle (ce qui est vrai en cas de bonne compensation de puissance réactive).

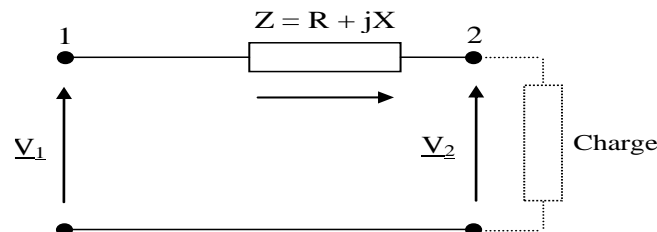


Figure I.3. Schéma d'une charge alimentée par une source de tension à travers une ligne.

Nous nous attacherons d'abord à montrer qu'il est important de réguler la tension aux bornes de la charge.

Si nous désignons par " θ " l'angle entre " V_1 " et " V_2 ", nous avons, en considérant la (figure I.4) simplifiée (avec " R "), " I " en phase avec " V_2 ", d'où :

$$X I = V_1 \sin \theta \quad (I.1)$$

Et la puissance active est :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \quad (I.2)$$

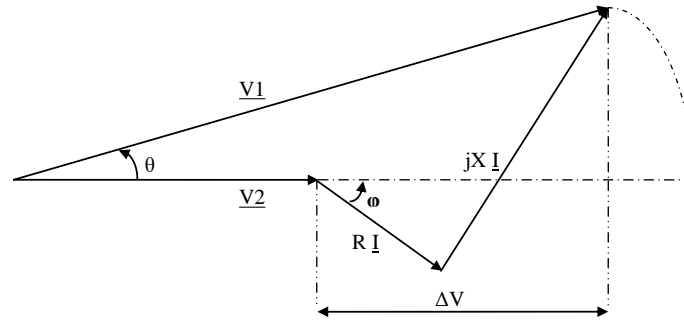


Figure I.4 Diagramme des tensions correspondant à la Figure I.3

Si aucune précaution n'est prise pour maintenir " V_2 " constante lorsque la charge varie, on

a :

$$V_2 = V_1 \cos \theta \quad (I.3)$$

Soit :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1^2}{2X} \sin 2\theta \quad (I.4)$$

Il apparait donc que, dans ce cas, on ne peut transporter qu'une puissance active maximale par phase égale à :

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{2X} \quad (I.5)$$

Si l'on maintient V_2 constante, on a, pour $V_2 = V_1$:

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{X} \quad (I.6)$$

Elle est le double de la valeur précédente.

Nous pouvons en déduire que pour améliorer la capacité de transfert des réseaux, il est essentiel disposer du plus grand nombre possible de points à tension fixée.

I.14 La chute de tension

Revenons à la (Figure I.3), en considérant que la ligne a maintenant une impédance complexe $Z = R + jX$, et que la tension n'est tenue pas qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance $S_2 = P_2 + jQ_2$.

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme de tension donné par la (Figure I.4) conduit à assimiler la chute de tension ΔV à :

$$\Delta V \approx V_1 \cos \theta - V_2 \quad (I.7)$$

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques et écoulement de puissance

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

$$\Delta V \approx R I \cos \varphi + X I \sin \varphi \quad (\text{I.8})$$

$$\Delta V \approx R I \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + X I \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi \quad (\text{I.9})$$

$$\Delta V \approx \frac{R P_2 + X Q_2}{V_2} \quad (\text{I.10})$$

On montre de même que :

$$\sin \theta \approx \frac{X P_2 - R Q_2}{V_1 V_2} \quad (\text{I.11})$$

L'hypothèse du réseau peu chargé permet d'écrire :

$$V_1 \approx V_2 = V \quad (\text{I.12})$$

Pour un réseau triphasé et en notant " U " la tension composée correspondant à " V , P et Q " les transits triphasés :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R P + X Q}{U^2} \quad (\text{I.13})$$

$$\sin \theta = \frac{X P - R Q}{U^2} \quad (\text{I.14})$$

On peut également noter que si, de plus $R \ll X \ll (R = 0)$:

$$\Delta U \approx \frac{X Q}{U} \quad (\text{I.15})$$

$$\sin \theta \approx \frac{X P}{U^2} \quad (\text{I.16})$$

Dans ces conditions, les relations (I.15) et (I.16) illustrent le fait que :

➤ La chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par l'extrémité réceptrice ;

➤ L'angle de transport " θ " dépend principalement de la puissance active transmise.

I.15 Calcul de la répartition de puissance (load flow)

Le calcul de la répartition de puissance est l'une des briques de base pour la compréhension et la prévision du comportement des systèmes électriques.

I.16 Techniques de calcul du problème d'écoulement de puissance [I-7]

I.16.1 Méthode de Newton_Raphson

La méthode de Newton_Raphson est très fiable et extrêmement rapide pour la convergence (principalement en utilisant la programmation impliquant les techniques des parasité).

Cette méthode n'est pas sensible aux causes de la mauvaise convergence des autres techniques (choix du nœud balancier, capacités séries, résistances négatives, etc.). Le taux de convergence est relativement indépendant de la dimension du système étudié. L'application de cette méthode peut se faire selon les coordonnées rectangulaires ou polaires des tensions de nœuds. Dans cette méthode, la matrice admittance et celle qui est utilisée.

Dans notre travail, nous exposons la forme (polaire). Elle est la forme la plus utilisée car elle est proche de la physique ou " V_i " et " θ_i " sont des grandeurs mesurables.

Dans ce qui va suivre, nous faisons l'hypothèse que tous les nœuds sont des nœuds consommateurs.

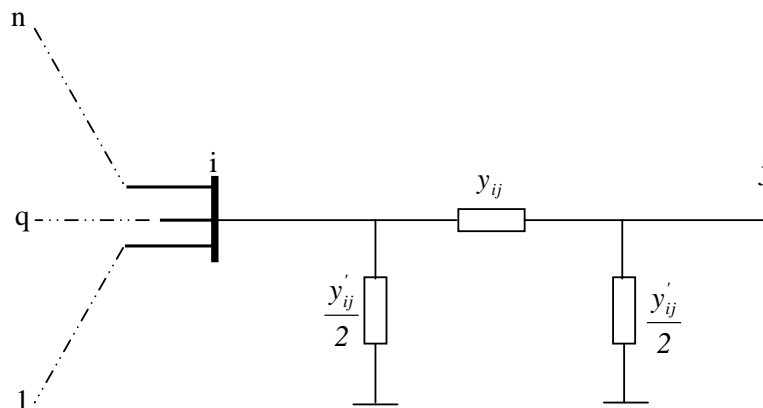


Figure I.5. Modèle pour construire la matrice Y_{bus}

Supposons à présent que les variables de base sont données en coordonnées polaires, c'est-à-dire avec module et argument.

Posons:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \tag{I.17}$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle -\theta_{ij} \tag{I.18}$$

Alors, on peut écrire:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle (-\theta_{ij} + \delta_j) \tag{I.19}$$

Avec:

$$e^{-j(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)} \equiv \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) - j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (I.20)$$

Les puissances actives et réactives déduites s'écrivent alors:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (I.21)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (I.22)$$

➤ 1^{ière} type de formulation

Il est clair qu'on peut montrer que les variations des puissances sont également liées aux variations des amplitudes et phases de tension:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (I.23)$$

Les éléments des sous-matrices du Jacobien peuvent être également déterminés. Pour la sous-matrice "J₁", à partir de (I.21), les éléments diagonaux et non diagonaux s'écrivent alors:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = -Q_i + |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} \quad (I.24)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (I.25)$$

Similairement, pour la sous-matrice "J₂" on a:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + 2 |V_j| |Y_{ij}| \cos \theta_{ii} = \frac{P_i}{|V_i|} + 2 |V_j| |Y_{ij}| \cos \theta_{ii} \quad (I.26)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (I.27)$$

Les éléments de "J₃" sont déterminés à partir de (I.21) :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = Q_i - |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} \quad (I.28)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = - |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (I.29)$$

De même, pour la sous-matrice "J₄" on obtient:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + 2 |V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} = \frac{Q_i}{|V_i|} + 2 |V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} \quad (I.30)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (I.31)$$

Dans le cas où un nœud contrôlé est présent dans le réseau, l'équation générale (I.23) doit être modifiée:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \\ J_5 & J_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (I.32)$$

Les éléments des sous-matrices pour le nœud contrôlé "i" peuvent être déterminés à partir de l'équation:

$$|V_i| = |V_i| \quad (I.33)$$

Aussi, pour "J₅", on obtient des éléments tous nuls:

$$\frac{\partial |V_i|}{\partial \delta_j} = 0 \quad \forall i, j \quad (I.34)$$

De manière similaire, pour la matrice "J₆", les éléments diagonaux ont la valeur unité alors que les éléments non diagonaux sont nuls :

$$\begin{aligned} \frac{\partial |V_i|}{\partial |V_i|} &= 1 & i = j \\ \frac{\partial |V_i|}{\partial |V_j|} &= 0 & i \neq j \end{aligned} \quad (I.35)$$

Il faut préciser que les angles "Δδ" des équations (I.23) et (I.24) doivent être en radians.

➤ **2^{ieme} type de formulation**

Il a été prouvé qu'il est plus efficace si l'équation (I.23) est modifiée de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V|/|V| \end{bmatrix} \quad (I.36)$$

Les sous-matrices "J₁" et "J₃" demeurent inchangées, alors que "J₂" et "J₄" doivent être modifiées. Par exemple, dans la multiplication de matrices, le terme "ij" de la sous-matrice "J₂" devient:

$$\left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \right) \Delta |V_j| = |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \Delta |V_j| \quad (I.37)$$

En multipliant le coté droit de (I.34) par $|V_j|/|V_j|$, on obtient:

$$\left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \right) \Delta |V_j| = |V_j| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \frac{\Delta |V_j|}{|V_j|} \quad (I.38)$$

L'organigramme que nous présenterons ci-dessous, montre les étapes à suivre pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance en utilisant la méthode de Newton_Raphson.

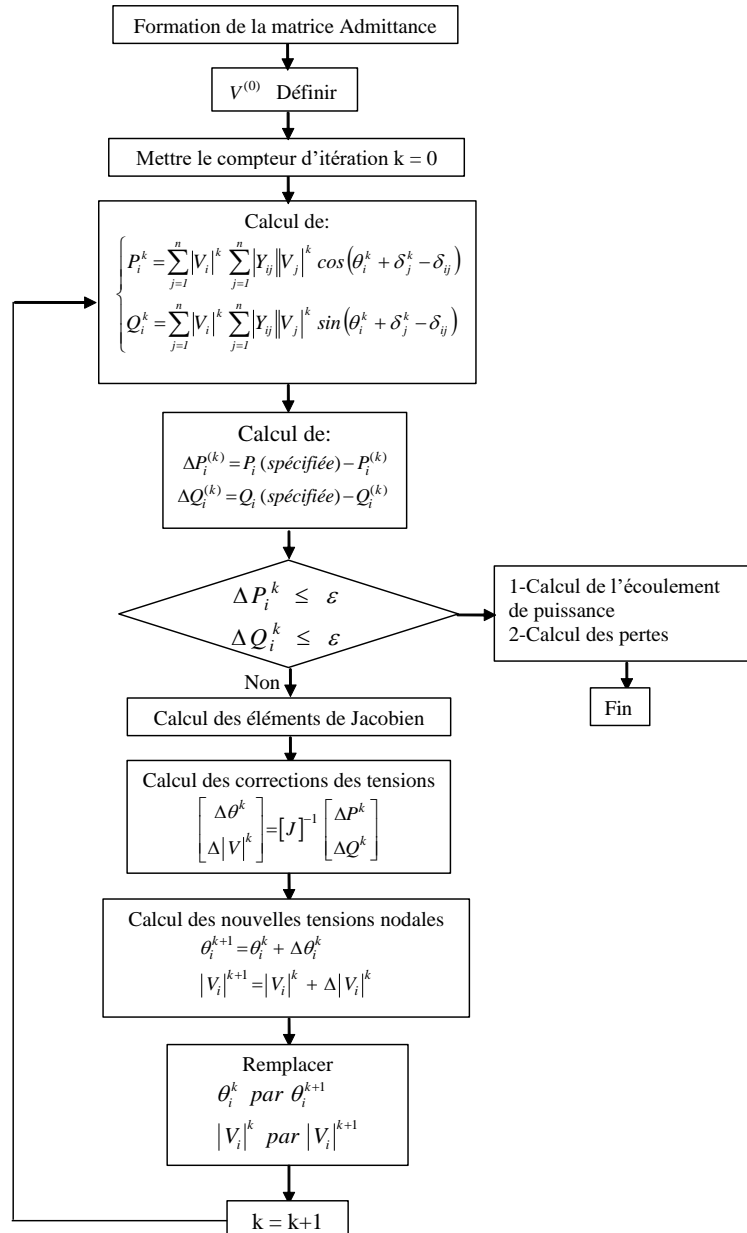


Figure I.6. Organigramme pour le calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton_Raphson.

Les études de planification et de fonctionnement des réseaux électriques peuvent exiger, dans certaine situation, des solutions d'écoulement de puissance pour des multiples. Des efforts de recherche se sont alors concentrés sur le développement de méthodes de Newton-

Raphson découplées. Ces méthodes se basent sur le fait que pour tout réseau fonctionnant en régime permanent, le couplage ou interdépendance, entre les puissances actives "P" et les amplitudes de tensions aux nœuds $|V|$ d'une part, et entre les puissances réactives "Q" et les phases de tensions aux nœuds " θ " d'autre part, sont relativement faibles, à l'inverse des forts couplages "P- θ " et "Q- $|V|$ ".

Ces méthodes résolvent ainsi le problème d'écoulement de puissance en découplant les problèmes "P- θ " et "Q- $|V|$ " permet de les résoudre séparément. Des solutions sont obtenues en appliquant des approximations à la méthode de Newton-Raphson, avec une précision adéquate et une grande vitesse de calcul, ce qui permet de les utiliser dans des applications en ligne et des évaluations de sécurité de contingences. En plus du découplage, des hypothèses intelligentes introduites par Stott et Alsac en 1974, ont mis à jour une méthode de calcul très efficace et très rapide, devenue une référence solide pour tous les travaux qui ont suivi dans le but de développer de nouvelles techniques de calcul d'écoulement de puissance, principalement pour certains réseaux complexes qui présentent des problèmes de convergence. Cette méthode est connue comme étant la première méthode d'écoulement de puissance découplée rapide (Fast Decoupled Load Flow) (Annexe B).

I.17 Dispositifs conventionnels de compensation

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

I.17.1 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 :

- 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.
- 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]

I.17.2 Les inductances

Elles sont utilisées pour consommé 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]

I.17.3 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-9]

I.17.4 Les compensateurs statiques

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. [I-9]

I.18 Conclusion

Ce chapitre a traité les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de tension, la méthode de Newton Raphson pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance ainsi les différents moyens de compensation conventionnelle de la puissance réactive en première ligne du combat pour la réduction de l'impact des perturbations dans les réseaux de transport.

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 en détail dans le prochain chapitre.

Références Bibliographiques

- [I-1] P.Bornard et M.Pavard, « Réseau de transport et d'interconnexion de l'énergie électrique: Fonctionnement et réglage », Techniques de l'ingénieur, Vol. D, 4090.1-4090.16.
- [I-2] FOGGIA. Guillaume. Spécialité : «Génie Electrique». 2009. Thèse de doctorat. Institut Polytechnique de Grenoble.
- [I-3] Sameh K. M. Kodsi, Accounting for the Effects of Power System Controllers and Stability on Power Dispatch and Electricity Market Prices, PHD thesis in Electrical and Computer Engineering, Waterloo, Ontario, Canada, 2005.
- [I-5] D Stevenson, "Elements of Power System Analysis", 4th éd. McGraw-Hill Book.
- [I-6] Djebbar Med Elhachemi, « Compensation de l'énergie réactive par système FACTS, Mémoire de fin d'Etude », Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, Année universitaire : 2017/2018.
- [I-7] M. Boudour et A. Hellal, « Génie Electrique: Réseaux Electriques Fondamentaux et Concepts de Base Cours, Exercice et TP», vol.1, Département de Génie Electrique Université de l'USTHB ALGER, 2010.
- [I-8] MERAH Taha, « Contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) ». Diplôme de Master. Université LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI. Année Universitaire 2017/2018.
- [I-9] Delendi Louardi, « Contrôle de l'écoulement de puissance active par un système FACTS ».mémoire de magister, Université Batna, 2009.
- [I-10] Kerbaa Amel, «Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique», Mémoire de Fin d'Etudes. Option Réseaux électrique. Université Mohamed Khider Biskra. Soutenu le 02 Juin 2013.

Chapitre II :
Les Systèmes FACTS

II.1 Introduction

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits de puissance soient inférieurs aux capacités de transport du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension; la tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes [II-1]. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons qui concernent l'exploitation des réseaux électriques.

Ce chapitre est organisé en deux parties suivies d'une conclusion. Des notions générales sur les systèmes FACTS sont données ainsi que leur réglage de la tension du réseau est discuté dans la première partie. Ensuite, une modélisation de quelques dispositifs FACTS insérés dans le réseau électrique est exposée dans la deuxième partie. Enfin une brève conclusion est présentée en dernière partie.

II.2 Qu'est-ce que le système FACTS ?

Le concept FACTS « Flexible Alternative Currents Transmission Systems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....).

Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique tension, impédance déphasage ...etc. [II-2].

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux [II-3].

II.3 Rôle des dispositifs FACTS

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

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

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique [II-4].

Ils permettent en particulier :

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

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo synchrone [II-5].

II.4 Fonctionnement des FACTS

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

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelques MVA (Méga Volts Ampères) à quelques centaines de MVA. Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux:

➤ Grand réseaux de transmission

Pour améliorer le contrôle, augmenter les capacités de transfert de puissance et assister la récupération du réseau consécutive à un défaut dans les systèmes de transmission AC (Alternative Current)

➤ Réseaux Industriels

Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuations de charge, e.g. compensation du flicker pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission [II-6].

II.5 Les dispositifs FACTS

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

Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant [II-7].

II.6 Classification des dispositifs FACTS

II.6.1 Classification selon la génération

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés. [II-6]

✓ Génération I

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

✓ Génération II

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

✓ Génération III

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

II.6.1 Classification selon la catégorie

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories :

- ❖ les compensateurs parallèles.

Chapitre II : Les systèmes FACTS

- ❖ les compensateurs séries.
- ❖ les compensateurs hybrides (série - parallèle).

II.7 Types de FACTS

La technologie FACTS n'est pas limitée par un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble de paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie. Le tableau II.1 représente la classification des dispositifs de compensation FACTS :

	Commande conventionnelle (électromécanique)	Dispositif FACTS (électronique de puissance)	
	RLC, transformateurs	À base de thyristors	À base de convertisseurs de tension (GTO, IGCT ou IGBT)
Dispositif shunt	Compensateur shunt (L ou C): MSC ou MSR	SVC	STATCOM
Dispositif série	FSC	TCSC, TCSR (moins courant)	SSSC
Dispositif hybride	transformateur déphaseur (PST)	IPFC	UPFC
Autres Dispositif hybride		HVDC Back-to-Back LCC	HVDC Back-to-Back VSC

Tableau II.1 : Classification des principaux types de FACTS.

II.8 Nécessité des dispositifs FACTS

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée, quelque soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou

les bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé [II-8].

Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT et GTO, le temps de réaction de ces dispositifs est diminué à quelques milli secondes. Il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [II-9].

II.9 Structure des Principaux Dispositifs FACTS

II.9.1 Compensateurs parallèle

L'objectif principal de la compensation shunt est l'accroissement de la puissance transmissible dans le réseau. Le principe consiste à fournir ou absorber de la puissance réactive de façon à modifier les caractéristiques naturelles des lignes pour les rendre plus compatibles avec la charge. En régime permanent, la compensation réactive est utilisée pour le maintien de la tension aux nœuds. [II-10]

II.9.1.1 Compensateurs parallèles à base de thyristors

II.9.1.1.1 TCR (Thyristor Controlled Reactor) or 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.1(a)), la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.

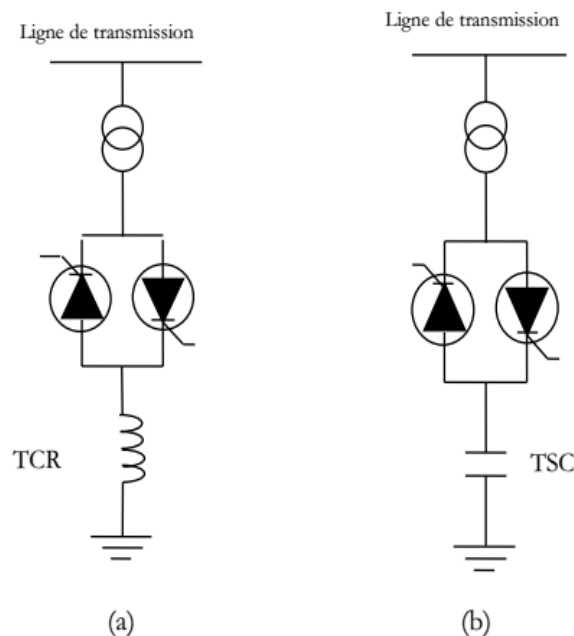


Figure II.1. Schéma de TCR et TSC.

II.9.1.1.2 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.1(b)), pour un TSC les thyristors fonctionnent en pleine conduction.

II.9.1.1.3 SVC (Static Var Compensator)

Le SVC est une association des dispositifs TCR, TSC, batterie de condensateurs fixes et des filtres d'harmoniques. Ces dispositifs constituent le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du sud. Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut [II-11].

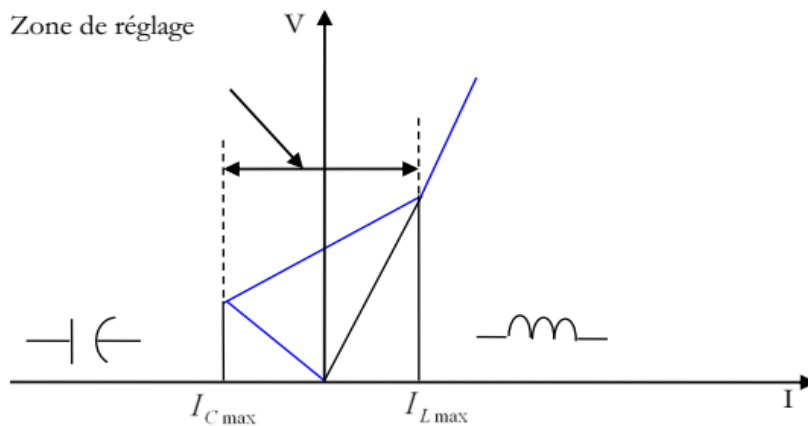


Figure II.2. Caractéristique d'un SVC [II-12].

La caractéristique statique est donnée sur la (Figure II.2), trois zones de fonctionnement sont distinctes :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- Une zone de réglage où l'énergie réactive et 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-13] :

- 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.

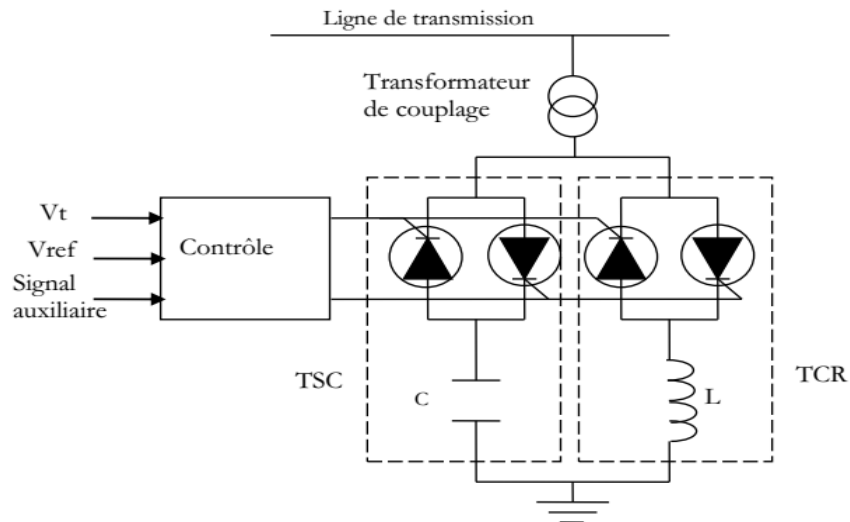


Figure II.3. Schéma de base d'un SVC.

II.9.1.2 Compensateurs parallèles à base de thyristors GTO

II.9.1.2.1 STATCOM (Static Compensator)

Est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage (Figure II.4.a), Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone, et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques tel que sa dynamique rapide et son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones. Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud [II-14].

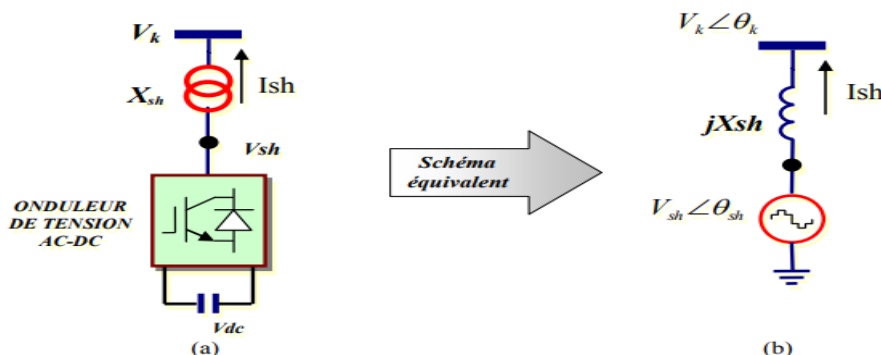


Figure II.4. Structure d'un STATCOM (a) schéma équivalent (b) caractéristique tension/courant [II-14].

Par son aptitude de contrôler la tension de sortie de l'onduleur V_{sh} , le STATCOM peut échanger l'énergie réactive avec le réseau, laquelle (V_{sh}) est en phase avec la tension du réseau V , comme suit [II-11] :

- Si $V_{sh} < V$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\pi/2$ par rapport à la tension V ou le courant est inductif.
- Si $V_{sh} > V$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $\pi/2$ par rapport à la tension V ou le courant est capacitif.
- Si $V_{sh} = V$ le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

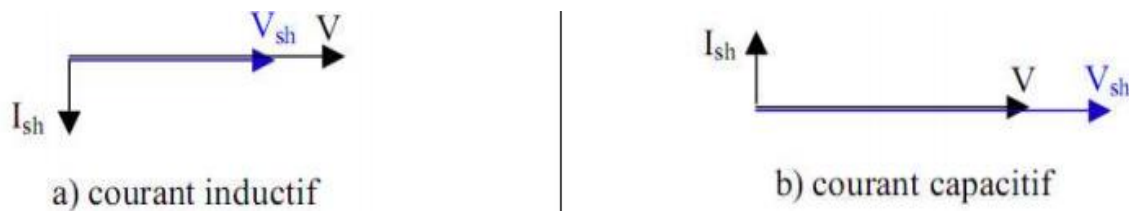


Figure II.5. Diagramme vectoriel de STATCOM.

Le STATCOM présente plusieurs avantages [II-14] :

- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique c.à.d. le système reprend instantanément.

II.9.2 Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en y insérant des éléments en série [II-15].

II.9.2.1 Compensateurs séries à base de thyristor

Les compensateurs série à base de thyristors les plus connus sont :

II.9.2.1.1 TCSC (Thyristor controlled series capacitor)

Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur. La

représentation schématique et son circuit équivalent de ce compensateur sont donnés par la (Figure II.6) [II-3].

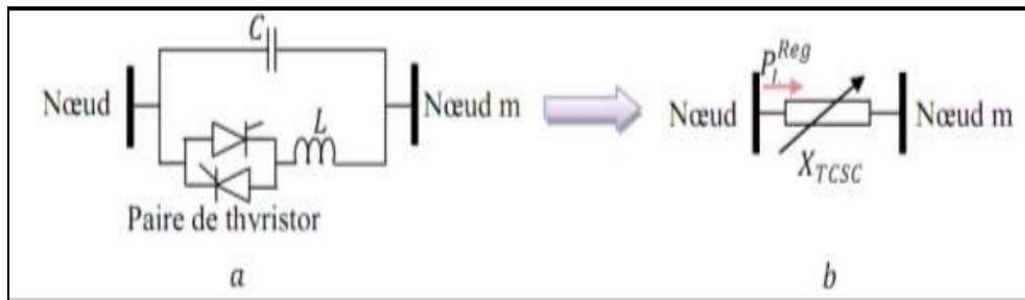


Figure II.6. Le circuit et le schéma équivalent d'un TCSC.

Du point de vue fonctionnement, le TCSC se comporte comme une réactance variable connectée en série avec la ligne de transmission (Figure II.6.b). Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si Les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance. A partir du fonctionnement de ce type de compensateur, on peut conclure que, le TCSC permet de varier la longueur électrique de la ligne de transmission en variant son impédance électrique, il peut être utilisé pour fournir une régulation du flux de puissance active[II-3].

II.9.2.1.2 TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés.

II.9.2.2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors

Le compensateur série à base de GTO thyristors le plus connu est :

II.9.2.2.1 SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

C'est l'un des plus importants dispositifs FACTS ; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la (Figure II.7). Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants [II-14].

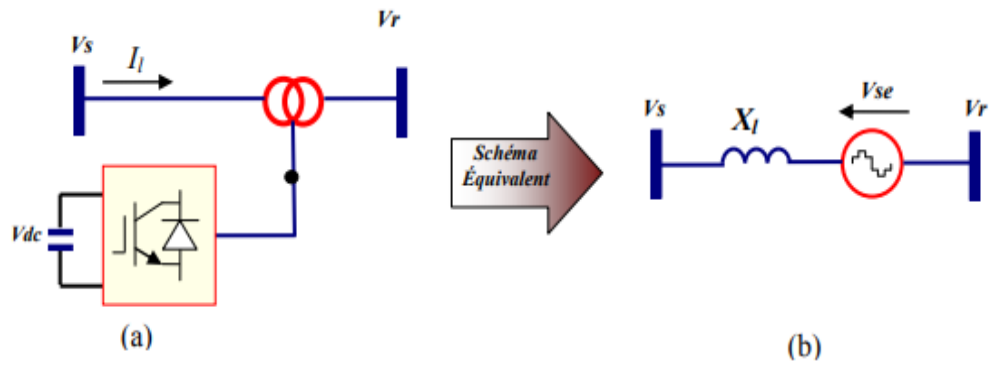


Figure II.7. (a) structure d'un SSSC, (b) schéma équivalent d'un SSSC [II-14].

II.9.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le SSSC est un générateur statique synchrone de la famille des compensateurs série fonctionnant sans source d'énergie extérieure. Son principe de fonctionnement peut être expliqué en ce référant au schéma et au phasor la (Figure II.8).

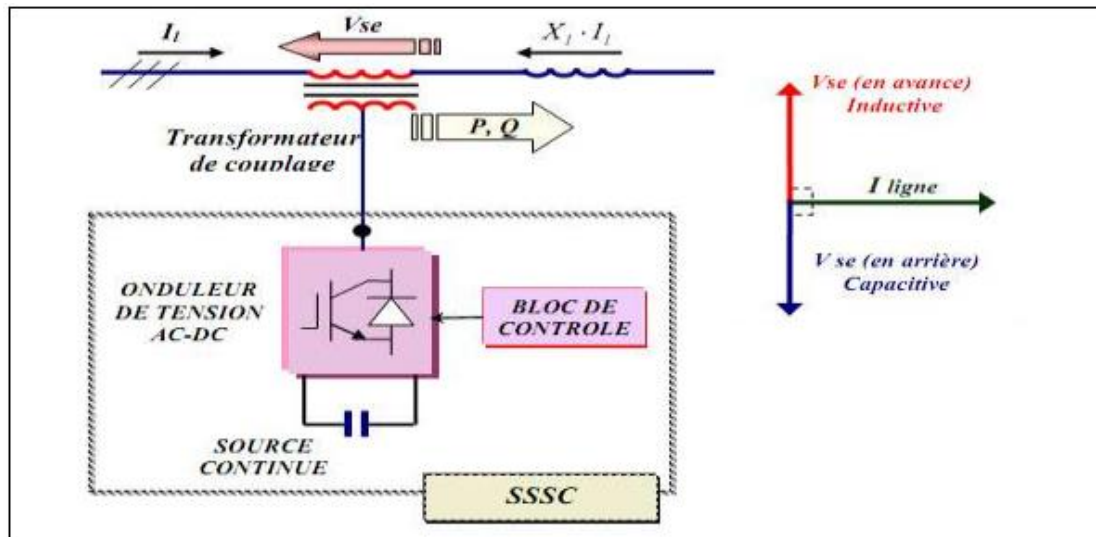


Figure II.8. SSSC (static synchronous serie compensator).

Le SSSC délivre une tension triphasée V_{se} , à la fréquence du réseau, en quadrature ($\pm 90^\circ$) avec le courant de la ligne et contrôlable afin d'augmenter ou diminuer la tension à travers la ligne représentée par sa réactance X_l selon le mode de compensation capacitif ou inductif respectivement (Figure. II.11), mais comme la réactance de la ligne ne varie pas réellement, c'est le courant dans la ligne qui sera affecter par cette variation et par conséquent les puissances correspondante [II-3][II-16]. Idéalement la tension V_{se} est à $\pm 90^\circ$ du courant de la ligne ce qui fait qu'aucun échange de la puissance active est entre le réseau et le SSSC. Pratiquement il y a toujours une petite composante de cette tension

V_{sed} en phase avec le courant I_l qui génère une petite quantité de la puissance active pour couvrir les pertes dans le convertisseur.

II.9.3 Compensateurs hybrides (série - parallèle)

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un control prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

II.9.3.1 Compensateur séries à base de thyristors

II.9.3.1.1 SPS (Static Phase Shifter)

le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les ancien transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle, la (Figure II.9) donne un schéma de principe de ce dispositif et son schéma équivalent [II-14].

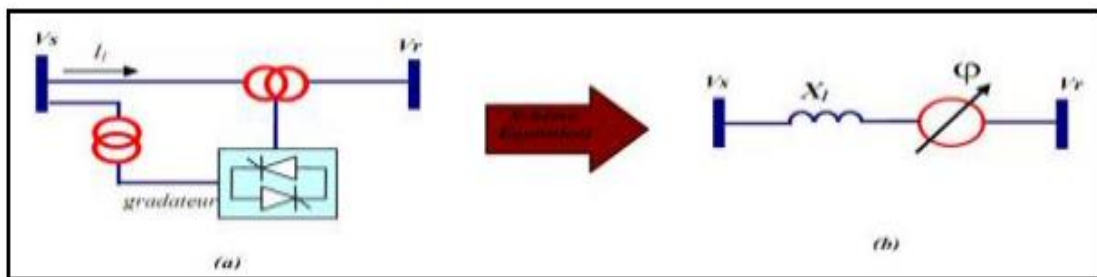


Figure II.9. (a) structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS.

Ce dispositif varie l'angle de phase de la tension aux extrémités de la ligne ; son principe est basé sur l'injection d'une tension en quadrature avec la tension de l'extrémité la ligne à déphaser. Cet équipement permet aussi un contrôle rapide du flux de la puissance active. La variable de contrôle de ce dispositif est l'angle de phase de la tension injectée " φ " qui est ajusté en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire un flux de puissance active spécifié [II-17-II-14]. La puissance active qui transite dans cette ligne à travers le SPS est donnée par la formule suivante :

$$P_{ST}^{reg} = \frac{|V_s| |V_r|}{x_l} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r - \varphi) \quad (II.1)$$

Un ajustement approprié de l'angle φ permet un contrôle précis du flux de puissance active.

II.9.3.2 Compensateur séries à base de GTO thyristors

II.9.3.2.1 UPFC (contrôleur de puissance unifié)

L'UPFC est une combinaison d'un STATCOM et un SSSC, couplés par une ligne DC commune, pour permettre un flux bidirectionnel de la puissance active entre la sortie série du SSSC et la sortie shunt du STATCOM. Il est contrôlé pour fournir une compensation série. la (Figure II.10) donne son schéma de principe et son schéma équivalent. [II-18]

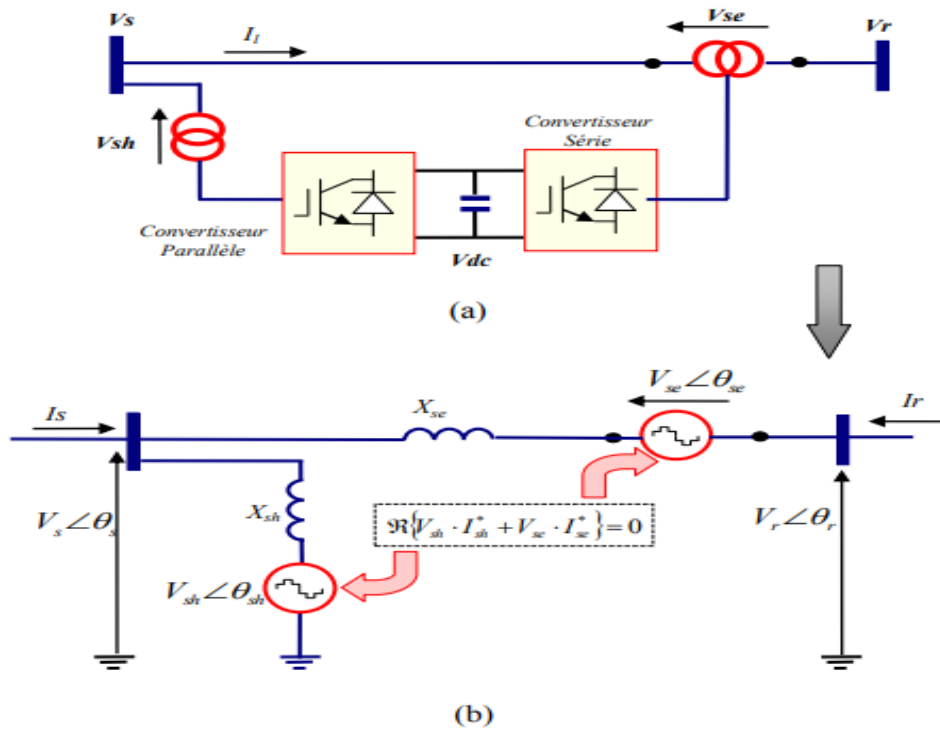


Figure II.10. (a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC [II-14].

II.9.3.2.2 IPFC (contrôleur de puissance interlignes)

La combinaison de deux ou plusieurs SSSC, couplés via un bus continu commun, permet de faciliter l'échange de puissance active entre les différentes lignes. Ils sont contrôlés pour assurer une compensation réactive des lignes pour ajuster le flux de puissance active et la distribution désirée de la puissance réactive le long des lignes [II-18]. La (Figure II.11) montre une structure générale d'un IPFC.

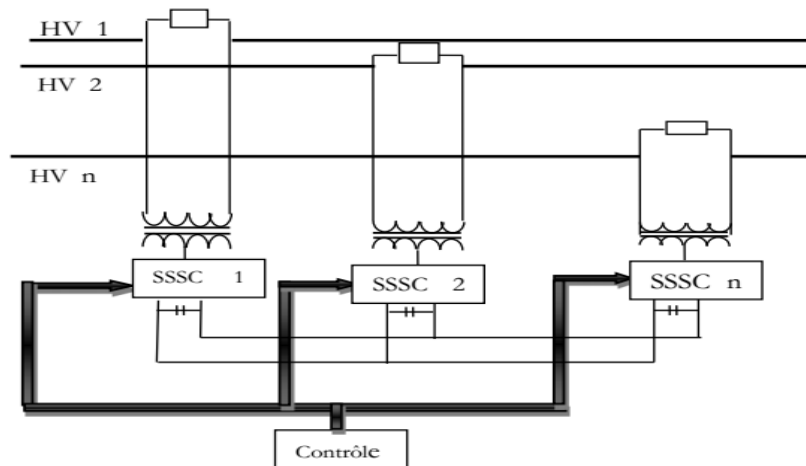


Figure II.11. Contrôleur de puissance interlignes [II-18].

L'IPFC trouve application dans les grandes stations afin d'assurer la compensation de plusieurs lignes de transport. Les SSSC sont utilisés afin de maximiser la puissance active transmissible sur une ligne. Avec l'IPFC, la puissance active peut être transférée entre les différentes lignes.

II.10 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques

Les FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissances moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance [II-14]. L'idée principale des FACTS peut être expliquée par l'équation de base (2.1) de la puissance transmise à travers une ligne de transport à courant alternatif [II-10] :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (\text{II. 2})$$

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 la (Figure II.12). 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.12). La (Figure II.13) montre un diagramme schématique de deux réseaux électriques connectés par une ligne de transmission en courant alternatif.

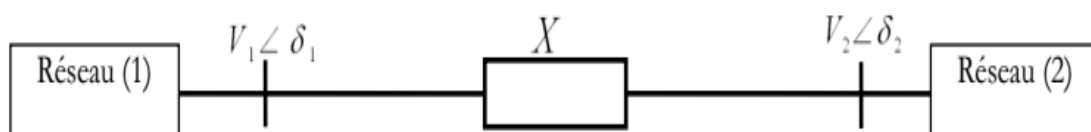


Figure II.12. Schéma de deux réseaux connectés [II-10].

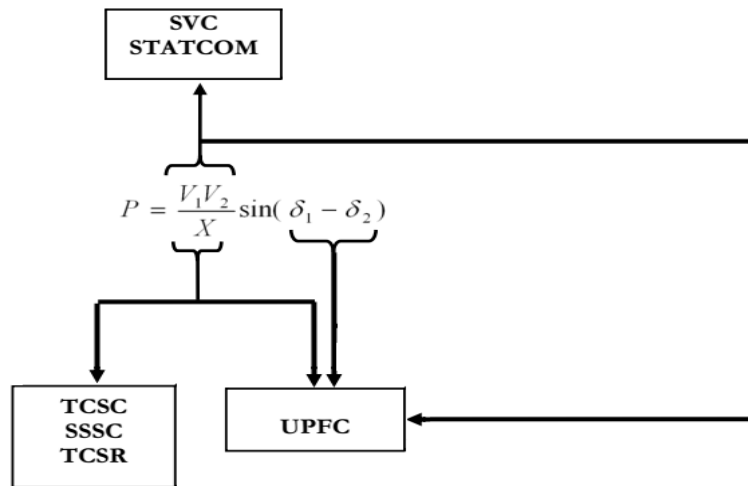


Figure II.13. Diagramme schématique pour l'application des FACTS [II-10].

II.11 Modélisation des dispositifs FACTS shunt [II-19]

II.11.1 Modélisation du SVC

Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire de nature capacitive ou inductive afin de fournir, respectivement d'absorber, de la puissance réactive. [II-20].

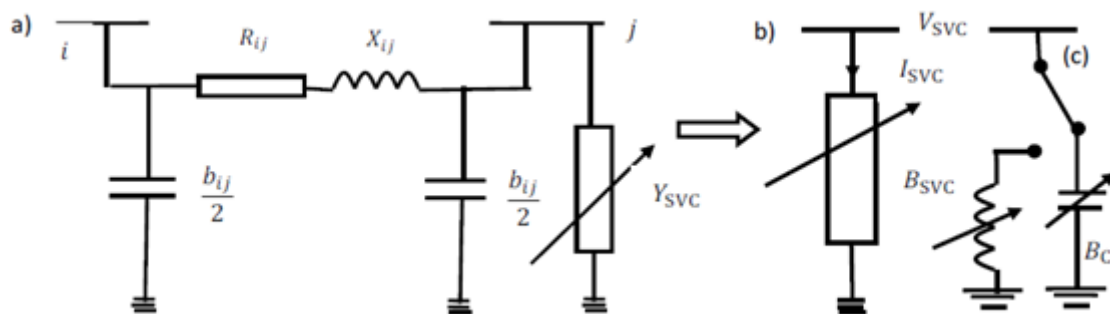


Figure II.14. Modélisation d'un SVC: a) SVC placé en un nœud j, b) symbole, c) modèle du SVC.

La modélisation du SVC est basée sur deux modèles :

1^{er} modèle : on considère le SVC comme une susceptance shunt variable [II-20].

2^{ème} modèle : on considère le SVC comme une susceptance shunt variable et angle d'amorçage variable.

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

$$I_{svc} = -jB_{svc}V_k \quad (II.3)$$

La puissance réactive absorbée par le SVC et aussi injecté dans le nœud k est donnée par l'équation :

$$Q_{svc} = Q_k = -V_k^2 B_{svc} \quad (II.4)$$

La linéarisation de l'équation est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_k \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta B_{svc}/B_{svc} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (\text{II. 5})$$

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

$$B_{svc}^{(i)} = B_{svc}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta B_{svc}}{B_{svc}} \right)^{(i)} B_{svc}^{(i-1)} \quad (\text{II. 6})$$

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

2^{ème} modèle :

On considère le SVC comme une susceptance shunt variable et angle d'amorçage variable.

$$Q_k = \frac{-V_k^2}{X_c X_L} \left\{ X_L - \frac{X_c}{\pi} [2(\pi - \alpha_{svc}) + \sin(2\alpha_{svc})] \right\} \quad (\text{II. 7})$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2V_k^2}{\pi X_L} [\cos(2\alpha_{svc}) - 1] \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \alpha_{svc} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (\text{II. 8})$$

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

$$\alpha_{svc}^{(i)} = \alpha_{svc}^{(i-1)} + \Delta \alpha_{svc}^{(i)} \quad (\text{II. 9})$$

II.11.2 Modélisation du STATCOM

Le STATCOM est une deuxième génération de dispositif de FACTS. Selon l'IEEE, Le STATCOM est un moyen de compensation dynamique connecté en parallèle au système électrique, il est basé sur l'injection d'un courant AC contrôlé à travers un transformateur de couplage [II-21]. La structure de base d'un STATCOM ayant le schéma qui est montré par la (Figure II.15).

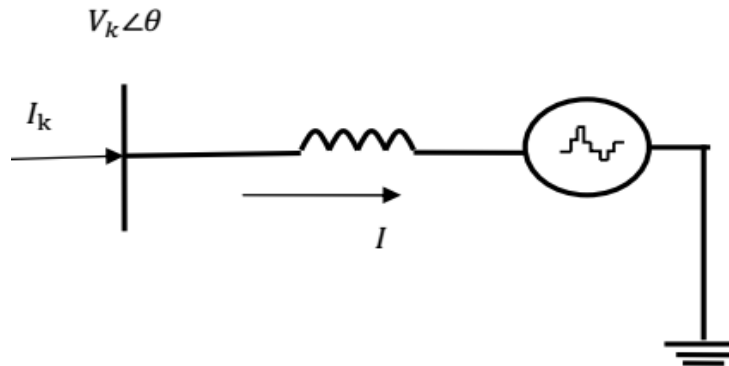


Figure II.15. Représentation schématique du STATCOM.

Le compensateur statique synchrone produit ou absorbe de la puissance réactive dans un temps plus courts en cas de besoin (rapidité de réaction). En principe, il remplit la même

fonction de régulation de la tension que le SVC mais d'une façon plus robuste. Contrairement au SVC, son fonctionnement ne s'arrête pas lors de la présence des basses tensions (IEEE/CIGRE, 1995). Le STATCOM peut être représenté dans la même manière comme un compensateur synchrone, qui est dans la plupart des cas le modèle d'un générateur synchrone avec une production de puissance active nulle. Un modèle plus flexible peut réaliser la représentation du STATCOM comme une source de tension variable E_{vR} , à laquelle le module et l'angle de phase peut être réglée, en utilisant un algorithme itératif, pour satisfaire le module de la tension au moment du raccordement avec le réseau C.A. La source de tension shunt du STATCOM peut être représentée par :

$$E_{vR} = V_{vR}(\cos \delta_{vR} + j \sin \delta_{vR}) \quad (\text{II. 10})$$

La puissance peut être écrite sous forme :

$$S_{vR} = V_{vR} I_{vR}^* = V_{vR} Y_{vR}^* (V_{vR}^* - V_k^*) \quad (\text{II. 11})$$

Les équations de puissance active et réactive obtenues pour le convertisseur au nœud k , sont les suivantes, respectivement :

$$P_{vR} = V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k [V_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (\text{II. 12})$$

$$Q_{vR} = -V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_k - \theta_k)] \quad (\text{II. 13})$$

$$P_k = V_k^2 G_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \cos(\delta_k - \theta_{vR}) + B_{vR} \sin(\delta_k - \theta_{vR})] \quad (\text{II. 14})$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\delta_k - \theta_{vR})] \quad (\text{II. 15})$$

II.12 Conclusion

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

En deuxième partie nous avons présenté la modélisation de quelques dispositifs FACTS insérés dans le réseau électrique afin d'intégrer ces modèles pour contrôler la tension et optimiser la puissance réactive dans un réseau de transport de l'énergie électrique dans le chapitre suivant.

Référence bibliographique

- [II-1] C. Michel, « commande et régulation des réseaux électriques », Traité EGEM série génie électrique, Lavoisier, 2003.
- [II-2] BOUNAB Houria. « Amélioration du Transit de Puissance d'un réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS (STATCOM) ». Diplôme de Master. Spécialité : Energie et réseau électrique. Université LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI. Année universitaire : 2016/2017.
- [II-3] Ay Abdelouahab « Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique SVC » mémoire magister, université de Batna 02 /05/2013.
- [II-4] Stéphane GERBEX. « Meta heuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique ». Thèse PHD. Ecole poly technique de Lausanne. Lausanne 2003.
- [II-5] Rabah BENABID. « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » Mémoire de Magister. Université Amar Telidji, 2007.
- [II-6] OUDAYA Mohamed Bachir et DRISSI Mohamed El Hadi. « Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositifs FACTS ». Mémoire de Fin d'Études En vue de l'obtention du diplôme de Master (LMD). Spécialité SYSTEMES ENERGETIQUES. Université Dr. Tahar Moulay de Saïda. Soutenu le 03/07/2017.
- [II-7] Alain Innocent Leka, « Amélioration du transit de puissance par les FACTS et simulation sur Matlab/Simulink d'un réseau électrique ». Diplôme de professeur d'enseignement technique deuxième grade 2008.
- [II-8] S. DAIBOUN, « Renforcement de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS », Mémoire de Magistère, Département d'électrotechnique Université de Skikda 2005.
- [II-9] ESKANDAR GHOLIPOUR SHAHRAKI « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Université Henri Poincaré Nancy-I, Thèse de Doctorat 2003.
- [II-10] Mokhnache Madiha, « 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.

Chapitre II : Les systèmes FACTS

- [II-11] L. THOMAS, « Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique FACTS », 10ème entretien, Physique – industrie, Paris, 19 Octobre 2006.
- [II-12] 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-13] S. DUPUIS et 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-14] Abdelaàli alibi, « contrôle des réseaux Electriques par les systèmes FACTS », Mémoire de Magistère, option : Electricité industrielle Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Univ-Batna, soutenue le 13/06/2009.
- [II-15] M. ZITOUNI Fares. « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS ». Mémoire de Magister. Université FERHAT ABBAS SETIF UFAS (ALGERIE). Soutenu le 15/12/2010.
- [II-16] J.C. Passelergue , « Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques », Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.
- [II-17] Nitus Voraphonpiput et Somchai Chatratana , « STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation », transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.
- [II-18] C. A. Enrique, R.Clodio, Claudio, R. Fuerte-Esquivel, H.Ambriz-Perez, C.Angeles Camacho, « Modelling and Simulation in Power Networks », John Wily & Sons, LTD, 2004.
- [II-19] 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.
- [II-20] Sayah Samir, « Application de l'intelligence artificielle pour le fonctionnement optimal des systèmes électriques », Thèse Doctorat en sciences, Université de Sétif.
- [II-21] C.A. Gross, « Power system analysis, Second Edtion», John Wiley & Sons, New York, 1986.

Chapitre III :Application

III.1 Introduction

Afin de compléter le travail théorique que nous avons présenté aux chapitres I et II, nous proposons dans celui-ci quelques applications. Pour cela, nous avons choisi le logiciel PSAT (power system analysis toolbox) [III-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 IEEE 14 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 STATCOM intégré dans le programme standard de Newton-Raphson (N-R).

III.2 Outils de simulation

Plusieurs outils de simulation ont été utilisés pour l'analyse des réseaux électriques tels que (Matlab, EMTP, Etap, PowerWorld, PSAT,... etc). Ces logiciels permettent de nous renseigner sur les différents facteurs d'un réseau électrique et à simuler les différents cas pour avoir les paramètres du réseau. Ces derniers utilisent les mêmes concepts. Dans le présent travail, on a choisi PSAT comme outil de simulation.

Toutes les opérations de PSAT sont réparties en deux types d'analyse :

- La première analyse est le calcul de l'écoulement de puissance. Cette application s'effectue dans une page de commande ou un éditeur comme montre la (Figure A.1) (**Annexe A**).
- La seconde opération consiste à construire le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque de Simulink qui contient de nombreux modèles unifilaires (Figure A.2) (**Annexe A**).

III.3 Applications et résultats de simulation

III.3.1 Etude d'un réseau IEEE à 14 nœuds

Cette étude nous permettra à partir des données topologiques du réseau (nœuds, lignes et impédances des lignes), des données des charges (puissance active et réactives) et des données des générateurs (puissance actives, tensions et limites en puissance réactives) d'avoir le module et la phase de la tension en chaque nœud, les pertes et les transits de puissance 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 III.1). Dont les données des paramètres du réseau sont reportées dans le Tableau III.1.

Nous appliquons et comparons les deux méthodes, présentées au chapitre I, utilisées pour le calcul de la répartition de puissance (Newton Raphson et Fast Decoupled Load Flow).

On suppose que la valeur typique de ' ϵ ' est 10^{-5} .

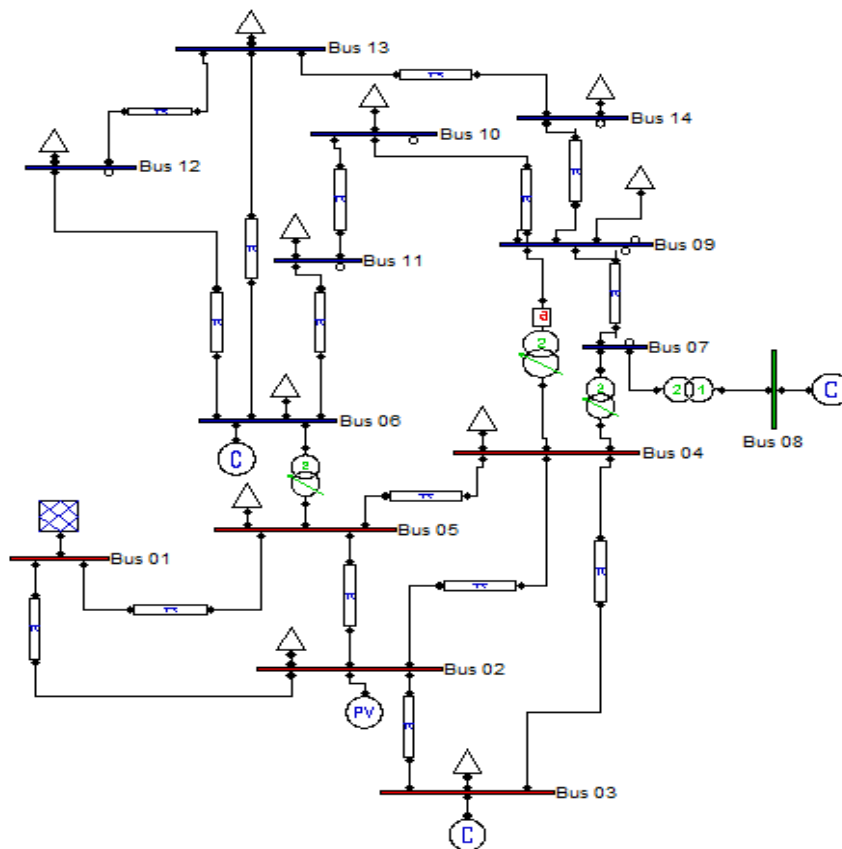


Figure III.1 Schéma du système d'application IEEE à 14 nœuds.

Chapitre III : Application et résultats de simulation

Nœuds	Tensions [p.u.]	P. Générée [p.u.]	Q. Générée [p.u.]	P. Consommée [p.u.]	P. 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 III.1 Données des nœuds producteurs et consommateurs.

De	A	Résistance [p.u.]	Réactance [p.u.]	Suscéptance [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 III.2 Paramètres des lignes.

De	à	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	0.000

Tableau III.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 III.4 Données des nœuds de régulation.

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

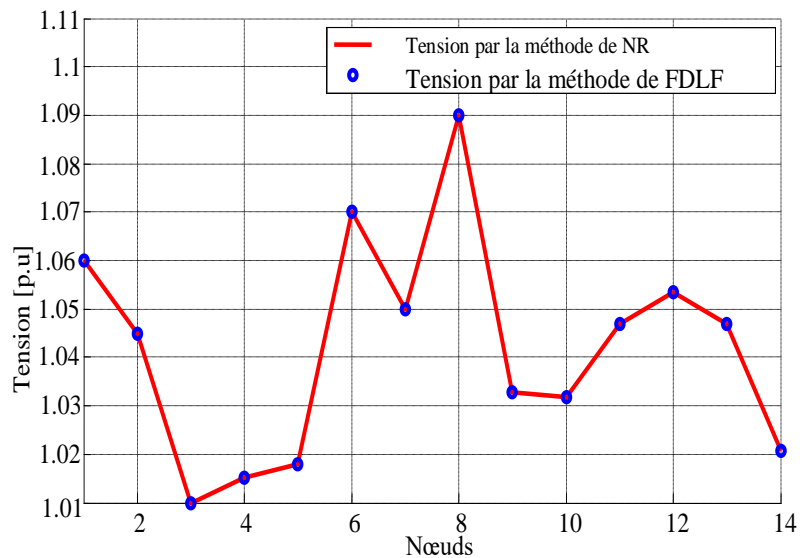


Figure III.2 Plan de tension du réseau dans l'état normal par les deux méthodes de calcul.

Les puissances actives et réactives (Condition initiale) 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 III.5 Puissance actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

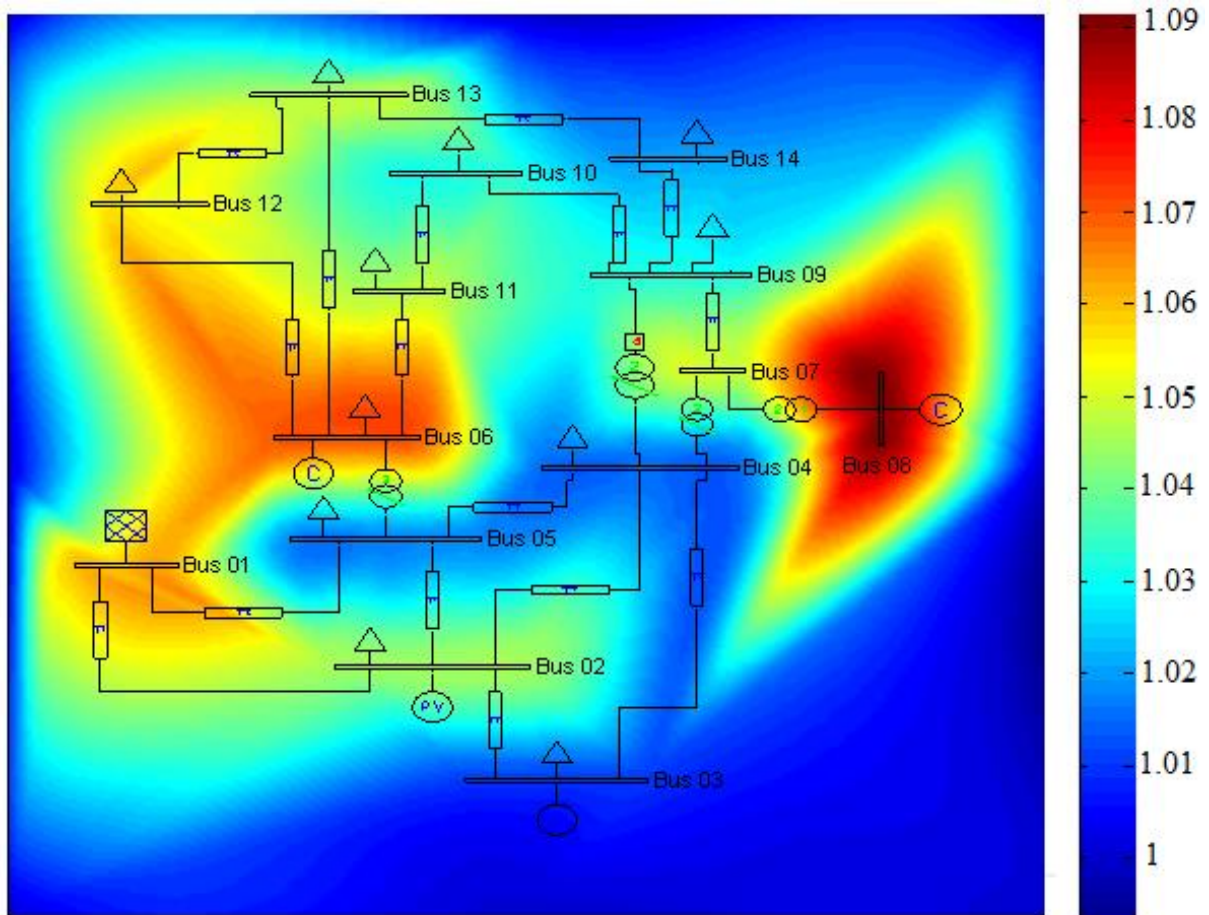


Figure III.3 Visualisation des amplitudes des tensions dans chaque bus du réseau.

Les deux Figures (Figure III.2) et (Figure III.3) représentent les tensions du réseau dans son fonctionnement normal dans chaque nœud. D'après les résultats obtenus, nous constatons que toutes les tensions des nœuds du réseau sont dans des plages acceptables (1.0 -1.09) p.u, ainsi que pour les puissances active et réactive transitant dans chaque ouvrage du réseau comme montré en Tableau III.5 et (Figure III.4) où le maximum de puissance active transitée est de 1.6 pu entre le bus 1 et 2.

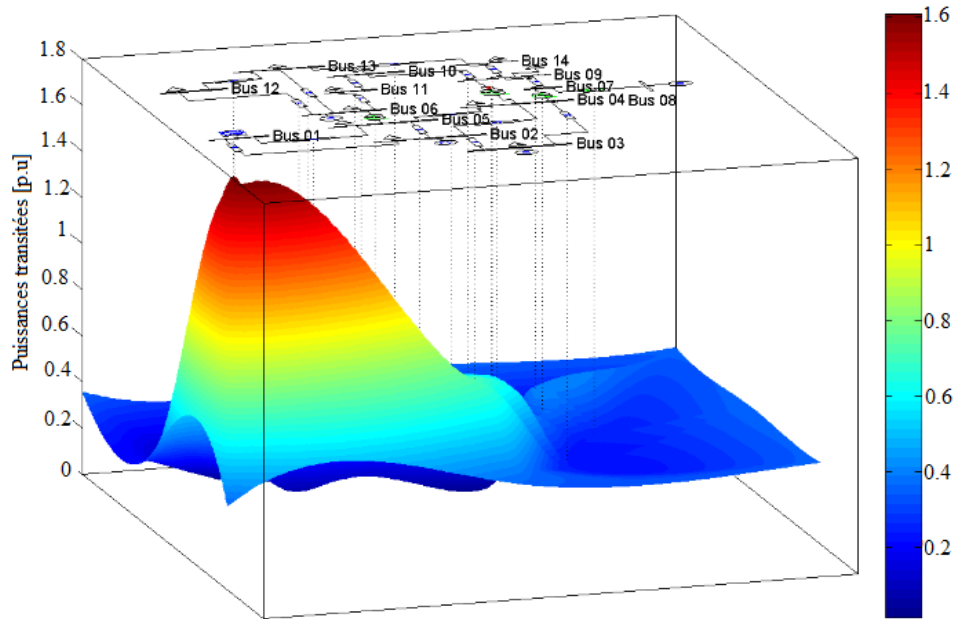


Figure III.4 Visualisation 3-D des puissances transitées entre chaque ouvrage.

III.4 Répartition de puissance sur un réseau suite à un défaut sans systèmes FACTS

Après étude du réseau dans son état normal où nous avons vu que les tensions sont acceptables, nous allons dans ce qui va suivre entamer l'analyse d'un réseau soumis à plusieurs types de défauts et comparer son comportement par rapport à l'état normal.

III.4.1 Cas d'un court-circuit triphasé

Comme deuxième application, nous avons simulé le réseau IEEE à 14 nœuds en introduisant un court circuit triphasé franc ($R_d=0$ Ohm) au bus 12 en (Figure III.1).

Les résultats du calcul de l'écoulement de puissance sont montrés sur les Tableau III.6 et Tableau III.7. La (Figure III.5) illustre la variation de tension dans chaque nœuds après création du défaut au nœud 12.

Bus	Tension [p.u.]	Phase [p.u.]	P générée [p.u.]	Q générée [p.u.]	P consommée [p.u.]	Q consommée [p.u.]
Bus 01	1,06	0	3,520522998	- 0,27899154	0	0
Bus 02	1,045	-0,30029312	0,4	0,95133519	0,3038	0,1778
Bus 03	1,01	-0,61010033	2,22045E-15	0,59796023	1,3188	0,266
Bus 04	0,87579793	-0,59529509	2,39808E-14	3,9829E-15	0,6692	0,056
Bus 05	0,8481889	-0,55625314	-5,82867E-16	4,3607E-14	0,1064	0,0224
Bus 06	1,07	-1,40927142	8,49321E-15	0,44263937	0,1568	0,105
Bus 07	0,95036484	-0,88119306	-1,08708E-15	2,361E-15	0	0

Chapitre III : Application et résultats de simulation

Bus 08	1,09	-0,88119306	4,57967E-16	0,34241592	0	0
Bus 09	0,92077925	-1,02598459	-1,04361E-14	3,6082E-15	0,413	0,2324
Bus 10	0,92953775	-1,10671348	2,47025E-15	2,9143E-15	0,126	0,0812
Bus 11	0,98537599	-1,26654474	3,95517E-15	-4,198E-16	0,049	0,0252
Bus 12	6,1631E-06	-2,36183789	6,6613E-16	2,7756E-16	0,061	0,016
Bus 13	0,73815385	-1,4236332	-1,9429E-15	3,8858E-16	0,135	0,058
Bus 14	0,81659905	-1,14345662	1,9429E-16	-4,0939E-16	0,149	0,05

Tableau III.6 Puissances générées et consommées.

De	A	Ligne	Pij [p.u.]	Qij [p.u.]	Pertes en Pij [p.u.]	Pertes en Qij [p.u.]
Bus 02	Bus 05	1	1,564525268	0,817902098	0,164140304	0,470359287
Bus 06	Bus 12	2	0	0	1,74706327	3,636126069
Bus 12	Bus 13	3	-2,95853E-06	-1,4848E-05	1,33772273	1,210320566
Bus 06	Bus 13	4	1,42271392	2,056545908	0,361314314	0,711540676
Bus 06	Bus 11	5	-0,41602108	0,707803985	0,055919487	0,1171024
Bus 11	Bus 10	6	-0,516386952	0,567843444	0,049781145	0,11653217
Bus 09	Bus 10	7	0,69483561	-0,32402212	0,022053245	0,058582181
Bus 09	Bus 14	8	0,61311733	0,175701189	0,0609863	0,129726031
Bus 14	Bus 13	9	0,417510758	0,00080057	0,046571758	0,094821875
Bus 07	Bus 09	10	1,14772636	0,338822803	0	0,174428609
Bus 01	Bus 02	11	5,328363013	-0,66839729	0,496736408	1,458117059
Bus 03	Bus 02	12	-1,521800668	0,414124384	0,115454103	0,440155374
Bus 03	Bus 04	13	0,203000668	0,695899383	0,036152867	0,061355956
Bus 01	Bus 05	14	2,379828173	1,010215839	0,32413807	1,292728511
Bus 05	Bus 04	15	0,469334919	-0,69606041	0,012959616	0,031365351
Bus 02	Bus 04	16	1,726046566	0,63776416	0,181586628	0,51621421
Bus 04	Bus 09	17	0,504321278	0,055273439	0,00157547	0,175248932
Bus 05	Bus 06	18	2,910553152	0,745051184	-4,44089E-16	2,746611568
Bus 04	Bus 07	19	1,14772636	-0,06975523	2,22045E-16	0,344781076
Bus 08	Bus 07	20	8,32667E-16	0,864048506	-1,66533E-16	0,110689395

Tableau III.7 Puissances transitées entre les bus.

D'après les résultats affichés dans le Tableau III.6 et la (Figure III.5), nous pouvons tirer les remarque suivantes :

1. La tension est nulle au bus de défaut (bus 12).
2. Les tensions aux bus 4, 5, 7, 9, 10, 11,13 et 14, ont fortement diminuées par rapport à celles de l'état normal (Figure III.5).
3. Les tensions dans les bus 3,6 et 8 sont restées les mêmes grâce aux compensateurs qui y sont raccordés.

4. Les puissances active et réactive sont presque nulles dans les lignes raccordées au bus du défaut (la ligne 12-13). Cela a pour conséquence une surcharge des autres lignes (2-5, 2-4, 6-12,... etc.) qui reçoit la puissance transitée dans le cas normale par la ligne 12-13.

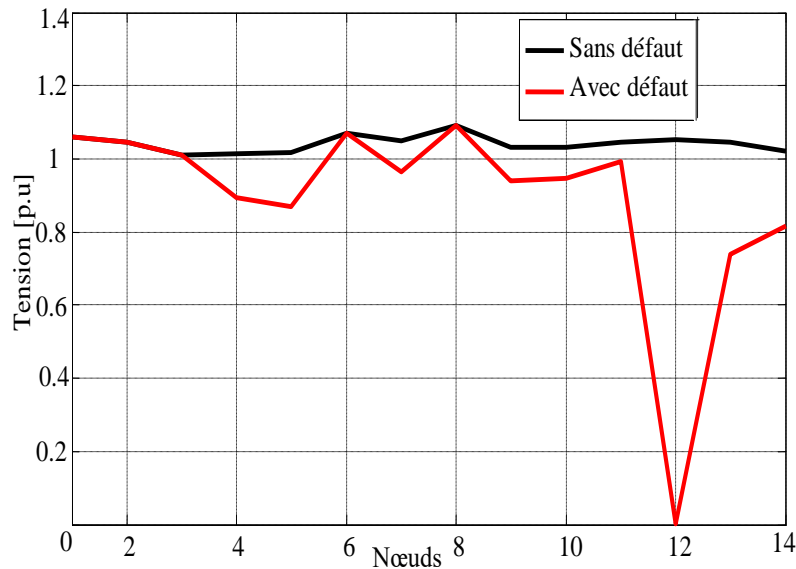


Figure III.5 Tensions dans chaque jeu de barre après création d'un défaut.

III.5 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau électrique

a- Perte des lignes électriques

Deux types de perturbations dues aux pertes de quelques éléments du réseau seront considérés dans l'étude du réseau IEEE 14 nœuds présenté dans la (Figure III.1). Le comportement du réseau après avoir été soumis aux perturbations, permet de trouver l'impact de ces perturbations sur la répartition de puissance.

Afin de tester la règle N-1 (perte de n'importe quelle élément du réseau sans avoir un effet considérable sur la continuité du service du réseau), deux perturbations sévères sont considérées survenir dans le réseau.

Dans cette application, 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:

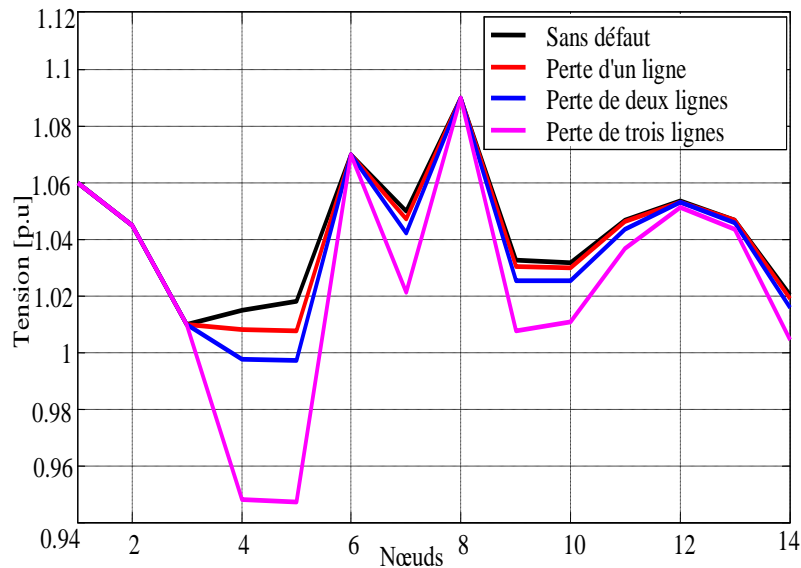


Figure III.6 Plan de tension avant et lors de la perte d'une ou plusieurs lignes.

Les résultats des puissances active et réactive qui transitent dans chaque ouvrage du réseau suite à la perte d'une ou plusieurs lignes sont représentés dans le Tableau III.8:

	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	00.00000	00.00000	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 III.8 Les puissances actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau lors de la perte d'une ou plusieurs lignes.

b- 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 III.7) et le Tableau III.9:

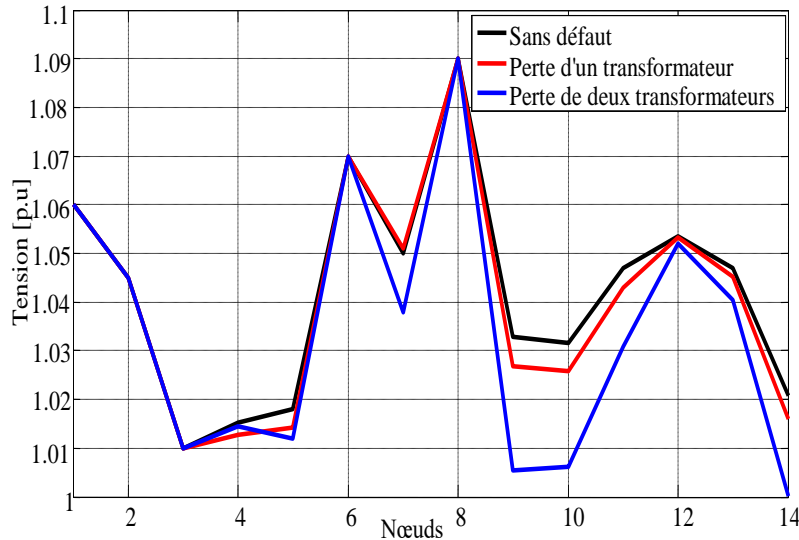


Figure III.7 Plan de tension avant et lors de la perte d'un ou plusieurs transformateurs.

	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 III.9 Les puissances actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau lors de la perte d'un ou plusieurs transformateurs.

Nos résultats de simulation, (Figures III.6) et (Figure III.7), montrent bien que 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). On remarque aussi d'après le Tableau III.8 que la perte de ces ouvrages provoque une augmentation des puissances actives transitées dans quelques lignes (exemple: 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), c'est-à-dire, la surcharge de ces ouvrages.

En effet, nous remarquons bien ici, vu la marge de tension admissible $\pm 10\%$ que les résultats obtenus pour les tensions sont encore dans les plages admissibles grâce à l'intervention des compensateurs synchrones.

III.6 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:

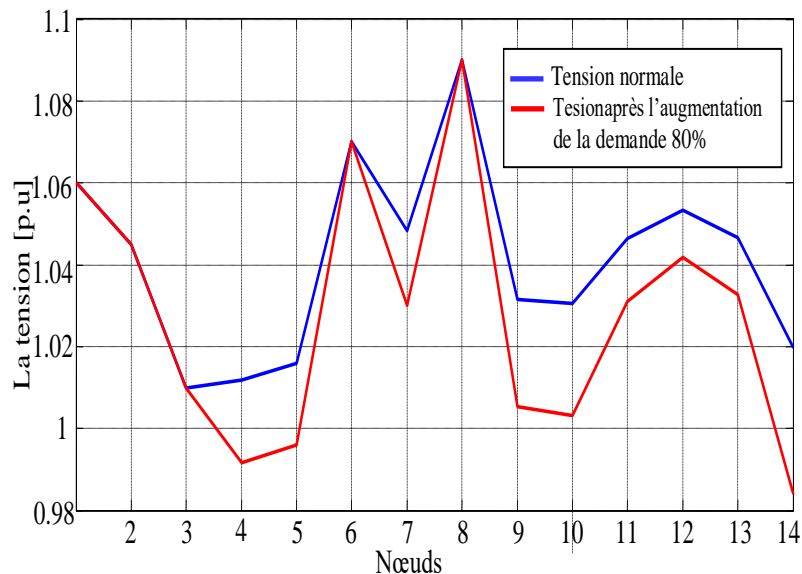


Figure III.8 Plan de tension avant et après l'augmentation de la demande de 80%.

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 III.10 Les puissances actives et réactives transitant dans les ouvrages du réseau d'après l'augmentation de la charge 80%.

D'après la (Figure III.8), 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.

III.7 Effet de système FACTS (STATCOM) sur un réseau en défaut

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

III.7.1 Cas d'un court-circuit triphasé

Dans ce cas, le STATCOM est connecté au nœud 11 (Figure III.9), avec 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.

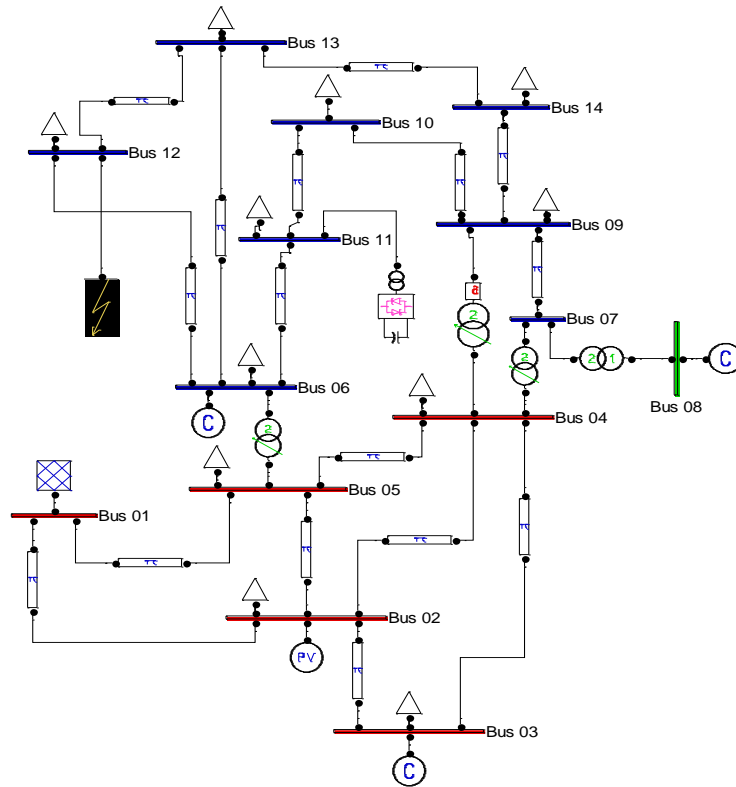


Figure III.9 Réseau en défaut étudié avec installation d'un STATCOM au bus 11.

À cet effet, les données du STATCOM sont prises par défaut et on obtient un nouvel écoulement de puissance dont les résultats sont consignés dans les (Figure III.11) et (Figure III.12) et les tensions de chaque bus sont montrées en (Figure III.10).

Les données du STATCOM sont prises par défaut.

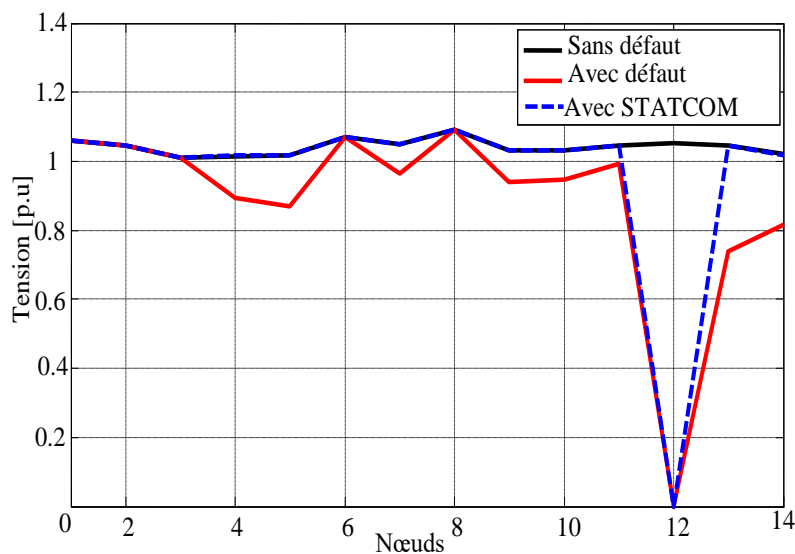


Figure III.10 Tensions dans chaque jeu de barre après installation du STATCOM.

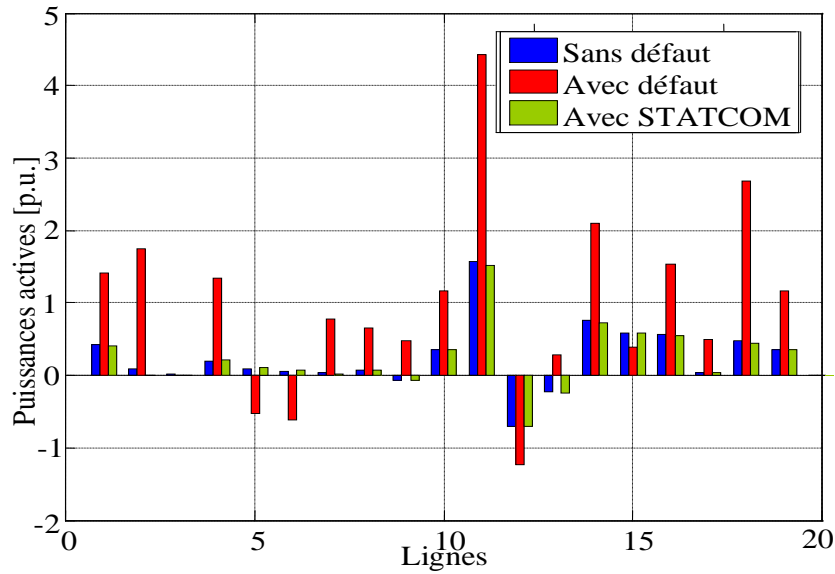


Figure III.11 Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.

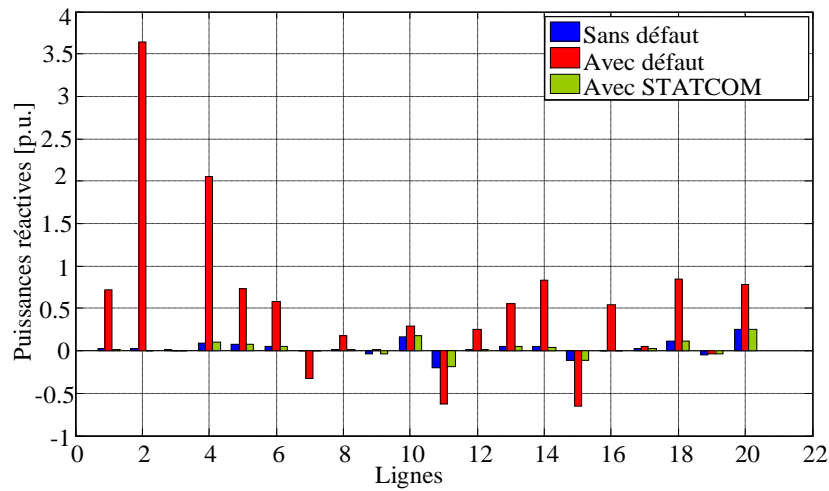


Figure III.12 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

		Sans défaut		Avec défaut		Avec STATCOM	
De	A	Pertes actives	Pertes réactive	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
2	5	1,141E-05	0,00126923	0,00159926	0,17789509	9,7099E-06	0,00108009
6	12	-5,5511E-17	0,05947793	0	2,65225497	0	0,04992294
12	13	-5,5511E-17	0,02696423	0	0,3589574	0	0,02511031
6	13	6,9389E-18	0,00915092	0	0,08982744	-6,9389E-18	0,00922042

Tableau III.11 Les Pertes actives et réactives dans les ouvrages du réseau lors d'un court-circuit triphasé.

III.8 Répartition de puissance suite à la perte d'un ou plusieurs ouvrages du réseau électrique

a- Perte des lignes électriques

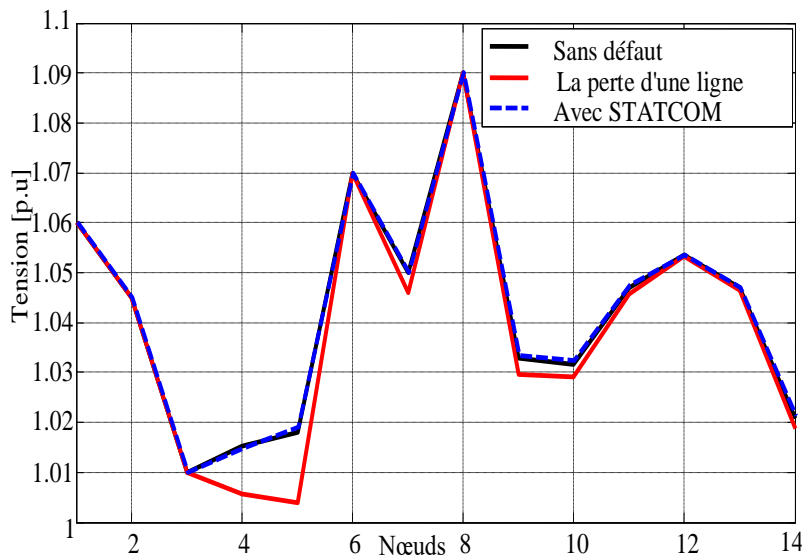


Figure III.13 Tensions dans chaque jeu de barre après installation du STATCOM.

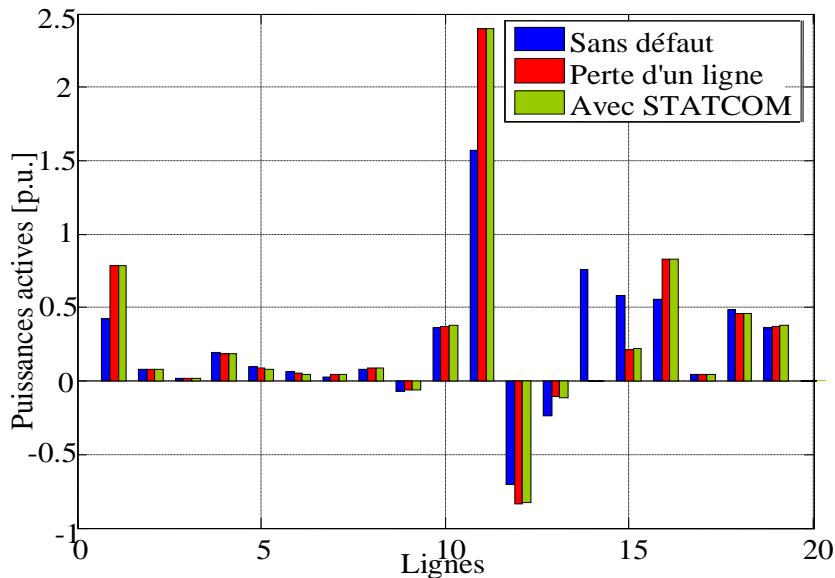


Figure III.14 Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.

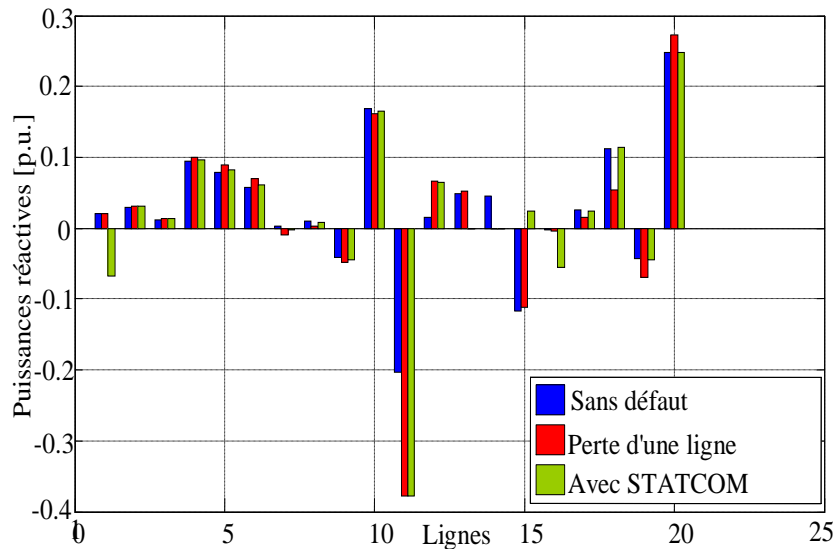


Figure III.15 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

		Sans défaut		Avec défaut		Avec STATCOM	
De	A	Pertes actives	Pertes réactive	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives
2	5	0,00925561	-0,00792088	0,03227056	0,06282821	0,03264114	0,06344645
6	12	0,00082174	0,00171027	0,00081319	0,00169248	0,00079819	0,00166127
12	13	0,00011274	0,000102	0,00011315	0,00010238	0,00010442	9,4473E-05
6	13	0,00260918	0,0051383	0,00255273	0,00502713	0,00248156	0,00488697
6	11	0,00128391	0,00268867	0,0012757	0,00267147	0,00113675	0,00238049
11	10	0,00052098	0,00121956	0,00054069	0,00126569	0,0004523	0,00105878
9	10	2,6752E-05	7,1063E-05	5,4396E-05	0,0001445	5,5805E-05	0,00014824
9	14	0,00073436	0,00156207	0,00086136	0,00183222	0,00089136	0,00189604
14	13	0,00112633	0,00229325	0,00109586	0,00223121	0,00098877	0,00201317
7	9	0	0,01594029	0	0,01663356	0	0,01681812
1	2	0,04293563	0,07259631	0,10162466	0,25178259	0,10156489	0,25160009
3	2	0,02318979	0,05144359	0,03250067	0,09067056	0,03210497	0,08900348
3	4	0,00387201	-0,02559454	0,00106164	-0,03243402	0,00083813	-0,03332273
1	5	0,02783451	0,06177146	0	0	0	0
5	4	0,00452182	0,00103558	0,000757	-0,01053588	0,00064376	-0,01120401
2	4	0,01652612	0,01045123	0,03668886	0,07199037	0,03680401	0,07199576
2	5	1,141E-05	0,00126923	1,2573E-05	0,00139856	1,4312E-05	0,00159196
6	12	-5,5511E-17	0,05947793	5,5511E-17	0,05436138	-5,5511E-17	0,05439722
12	13	-5,5511E-17	0,02696423	5,5511E-17	0,02973862	0	0,02911761
6	13	6,9389E-18	0,00915092	-1,3878E-17	0,01099818	1,3878E-17	0,00909281

Tableau III.12 Les Pertes actives et réactives dans les ouvrages du réseau lors de la perte d'une ligne.

b- Perte des transformateurs

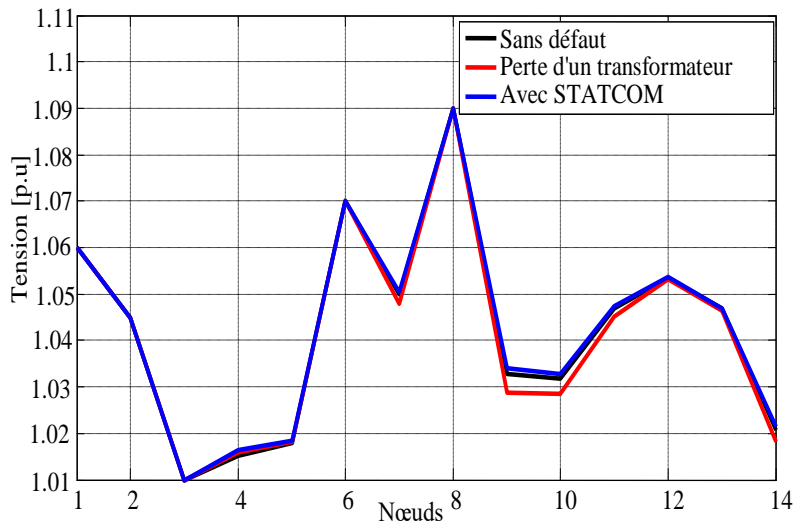


Figure III.16 Tensions dans chaque jeu de barre après installation du STATCOM.

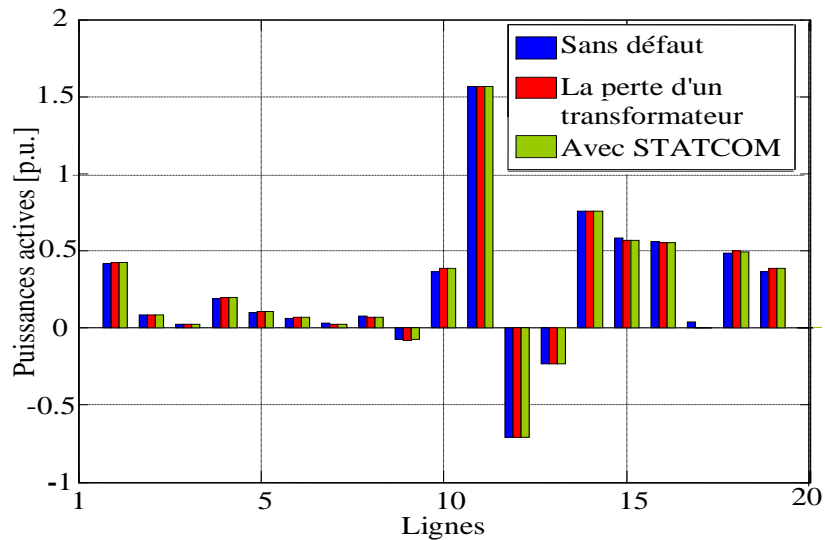


Figure III.17 Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.

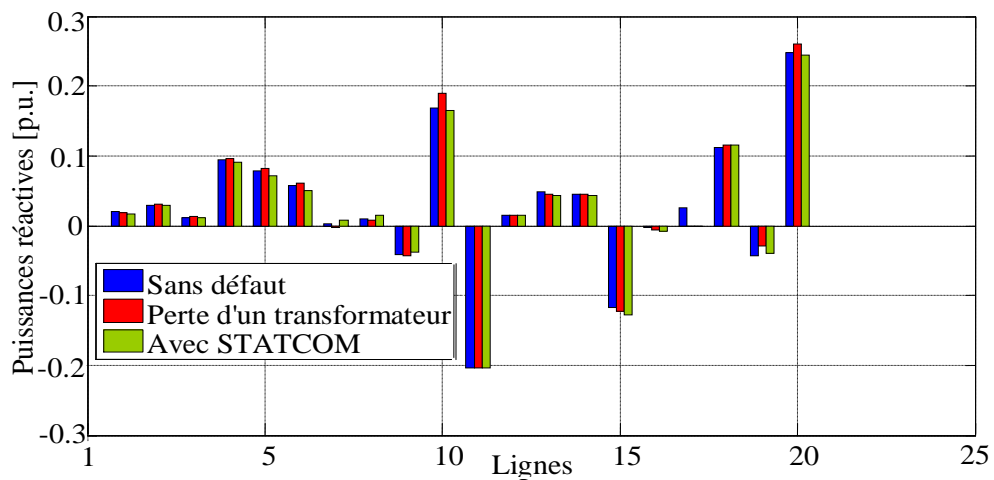


Figure III.18 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

		Sans défaut		Avec défaut		Avec STATCOM	
De	A	Pertes actives	Pertes réactive	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives
2	5	0,00925561	-0,00792088	0,00932349	-0,00772151	0,00932349	-0,00781075
6	12	0,00082174	0,00171027	0,00084998	0,00176904	0,00084998	0,0017305
12	13	0,00011274	0,000102	0,00012644	0,0001144	0,00012644	0,00010442
6	13	0,00260918	0,0051383	0,00275355	0,00542259	0,00275355	0,00525313
6	11	0,00128391	0,00268867	0,0015148	0,00317219	0,0015148	0,00281607
11	10	0,00052098	0,00121956	0,00065629	0,0015363	0,00065629	0,00128393
9	10	2,6752E-05	7,1063E-05	1,2746E-05	3,3858E-05	1,2746E-05	4,309E-05
9	14	0,00073436	0,00156207	0,00062129	0,00132156	0,00062129	0,00139714
14	13	0,00112633	0,00229325	0,00131847	0,00268445	0,00131847	0,00241964
7	9	0	0,01594029	0	0,01862678	0	0,01787356
1	2	0,04293563	0,07259631	0,04288163	0,07243143	0,04288163	0,07237479
3	2	0,02318979	0,05144359	0,0231215	0,05115591	0,0231215	0,05111922
3	4	0,00387201	-0,02559454	0,00387372	-0,02561332	0,00387372	-0,02567612
1	5	0,02783451	0,06177146	0,02792379	0,06212858	0,02792379	0,06201373
5	4	0,00452182	0,00103558	0,00433943	0,00044873	0,00433943	0,00059385
2	4	0,01652612	0,01045123	0,01642919	0,01013213	0,01642919	0,01014681
2	5	1,141E-05	0,00126923	0	0	0	0
6	12	-5,5511E-17	0,05947793	5,5511E-17	0,06350046	5,5511E-17	0,06272544
12	13	-5,5511E-17	0,02696423	5,5511E-17	0,03051928	5,5511E-17	0,0310613
6	13	6,9389E-18	0,00915092	1,3878E-17	0,01001743	1,3878E-17	0,00884142

Tableau III.13 Les Pertes actives et réactives dans les ouvrages du réseau lors de la perte d'un transformateur.

III.9 Répartition de puissance suite à une augmentation brutale de la charge

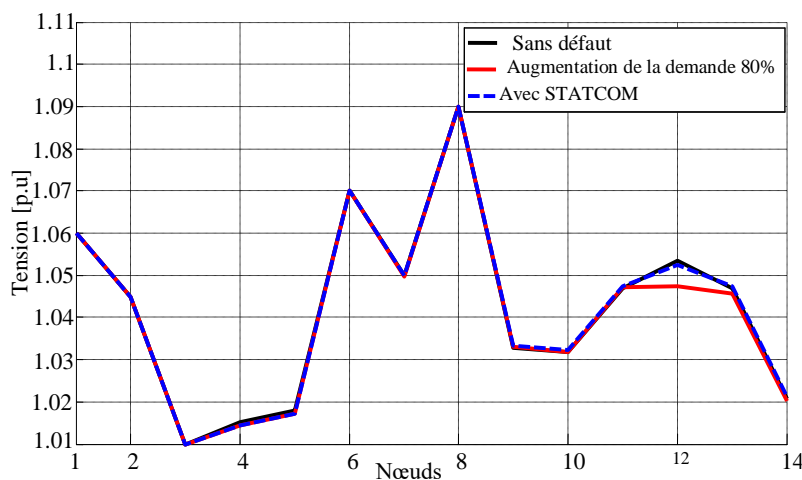


Figure III.19 Tensions dans chaque jeu de barre après installation du STATCOM.

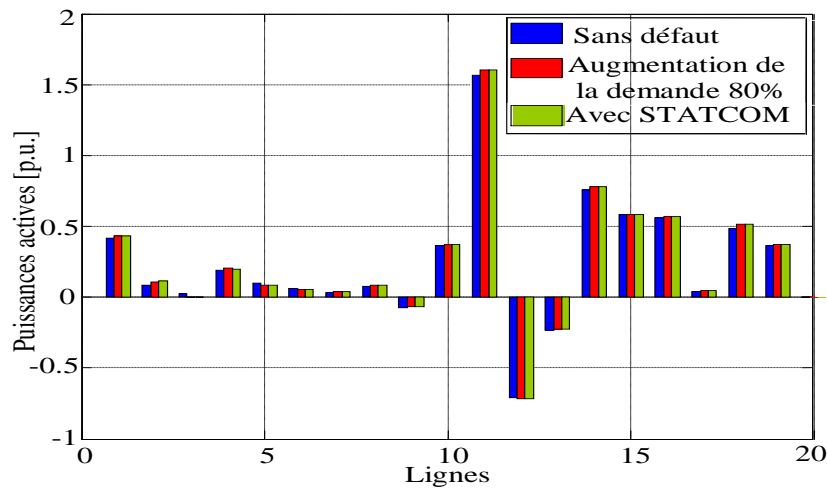


Figure III.20 Les puissances actives transitant dans les ouvrages du réseau.

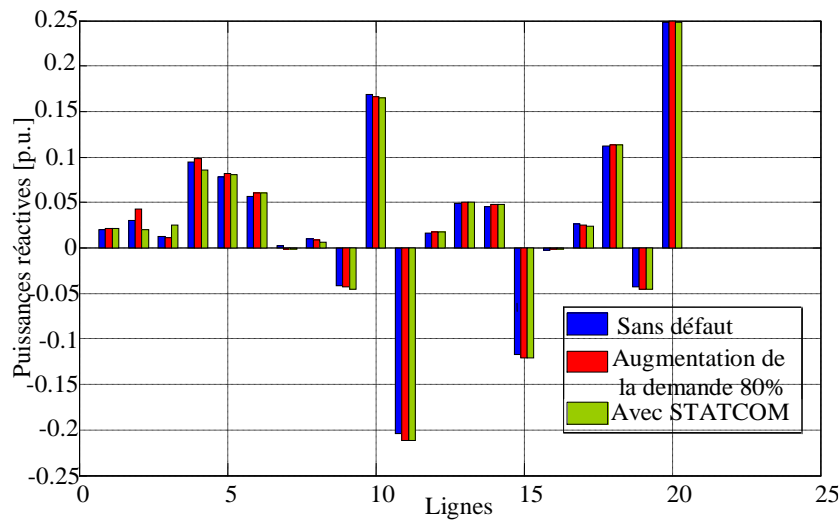


Figure III.21 Les puissances réactives transitant dans les ouvrages du réseau.

De	A	Sans défaut		Avec défaut		Avec STATCOM	
		Pertes actives	Pertes réactive	Pertes actives	Pertes réactives	Pertes actives	Pertes réactives
2	5	0,00925561	-0,00792088	0,00985228	-0,00606845	0,00984957	-0,00607779
6	12	0,00082174	0,00171027	0,00148943	0,00309992	0,00140002	0,00291384
12	13	0,00011274	0,000102	2,4269E-05	2,1958E-05	0,00013319	0,00012051
6	13	0,00260918	0,0051383	0,00294847	0,00580645	0,00275471	0,00542488
6	11	0,00128391	0,00268867	0,00119137	0,00249488	0,00117996	0,00247098
11	10	0,00052098	0,00121956	0,00047774	0,00111833	0,00047079	0,00110206
9	10	2,6752E-05	7,1063E-05	4,4528E-05	0,00011828	4,5031E-05	0,00011962
9	14	0,00073436	0,00156207	0,00090892	0,00193339	0,00089761	0,00190933
14	13	0,00112633	0,00229325	0,00095861	0,00195177	0,000996	0,00202789
7	9	0	0,01594029	5,5511E-17	0,01669382	0	0,01664185
1	2	0,04293563	0,07259631	0,04489553	0,07858018	0,04488764	0,07855608
3	2	0,02318979	0,05144359	0,02360544	0,05319477	0,02360251	0,05318239
3	4	0,00387201	-0,02559454	0,0036977	-0,02601439	0,00369658	-0,02601897
1	5	0,02783451	0,06177146	0,02931006	0,06790702	0,02930539	0,06788618
5	4	0,00452182	0,00103558	0,00452888	0,00107865	0,00452984	0,00108064
2	4	0,01652612	0,01045123	0,01731307	0,01286607	0,01731001	0,01285497
2	5	1,141E-05	0,00126923	1,3778E-05	0,00153258	1,3645E-05	0,00151786

Chapitre III : Application et résultats de simulation

6	12	-5,5511E-17	0,05947793	0	0,06729788	0	0,06727817
12	13	-5,5511E-17	0,02696423	5,5511E-17	0,02874525	5,5511E-17	0,02874832
6	13	6,9389E-18	0,00915092	0	0,00922107	6,9389E-18	0,00915135

Tableau III.14 Les Pertes actives et réactives dans les ouvrages du réseau d'après l'augmentation de la charge 80%.

III.10 Discussions des résultats

Quand le STATCOM est connectés, on observe d'après les (Figure III.10, III.13, III.16 et III.20), que les nœuds ont un profil de tension presque semblable à celui des tensions du réseau d'avant défaut sauf le cas de la (Figure III.10) (bus 12) objet du défaut triphasé et isolé du réseau par les disjoncteurs de protection.

D'après ces résultats on tient compte aussi que 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 III.11, III.14, III.17 et III.20) montrent le transit de puissance entre les bus (lignes) dans le cas du réseau sans défaut, avec défaut, et avec STATCOM.

On peut remarquer aussi d'après ces Figures que l'installation de STATCOM a pour effet de soulager quelques lignes en surcharge lorsque le réseau est soumis au défaut et les rendre presque leurs état initiale d'avant défaut comme le montre les puissances dans les lignes 1, 11, et 14,...etc. (Figure III.11).

D'après les Tableaux III.11, III.12, III.13 et III.14 on peut dire que l'amélioration de profile de la tension due a l'intégration du STATCOM a influencé la réduction des pertes active et réactive totale.

III.11 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 PSAT et 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 (STATCOM). 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

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

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux menés dans cette mémoire portent principalement sur la connaissance et la visualisation de comment STATCOM peut ramener le niveau de tension à son état normal après plusieurs types de défaut. En effet, à partir des années 1990, les STATCOM ont montré leur suprématie par rapport aux autres systèmes FACTS comme moyens de compensation de l'énergie réactive dans les réseaux afin d'améliorer leurs performances, en particulier réduire la chute de tension en charge et améliorer la stabilité dynamique.

Afin d'atteindre notre objectif, nous avons parcouru ces chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté divers phénomènes perturbateurs affectant la qualité de l'effort, la méthode de Newton Raphson pour résoudre le problème de flux d'énergie ainsi que divers moyens de compensation classiques de la force réactive en première ligne de combat. Réduire l'impact des perturbations sur les réseaux de transport.

Dans le deuxième chapitre, qui est divisé en deux sections dans la première section, nous introduisons les principes de fonctionnement pour différents types d'appareils FACTS et nous fournissons également une introduction à STATCOM et dans la deuxième section nous avons présenté la modélisation de quelques dispositifs FACTS insérés dans le réseau électrique.

Dans le dernier chapitre, nous donnons des exemples de différents défauts, afin de voir le niveau de tension dans l'état normal et l'état par défaut. Ensuite, nous avons complété ce travail en appliquant STATCOM sur un réseau modèle IEEE à 14 nœuds à l'aide du logiciel PSAT, en ramenant le niveau de tension à son état normal. Et nous avons vu aussi la puissance active et réactive et les pertes actives et réactives.

Annexe

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.

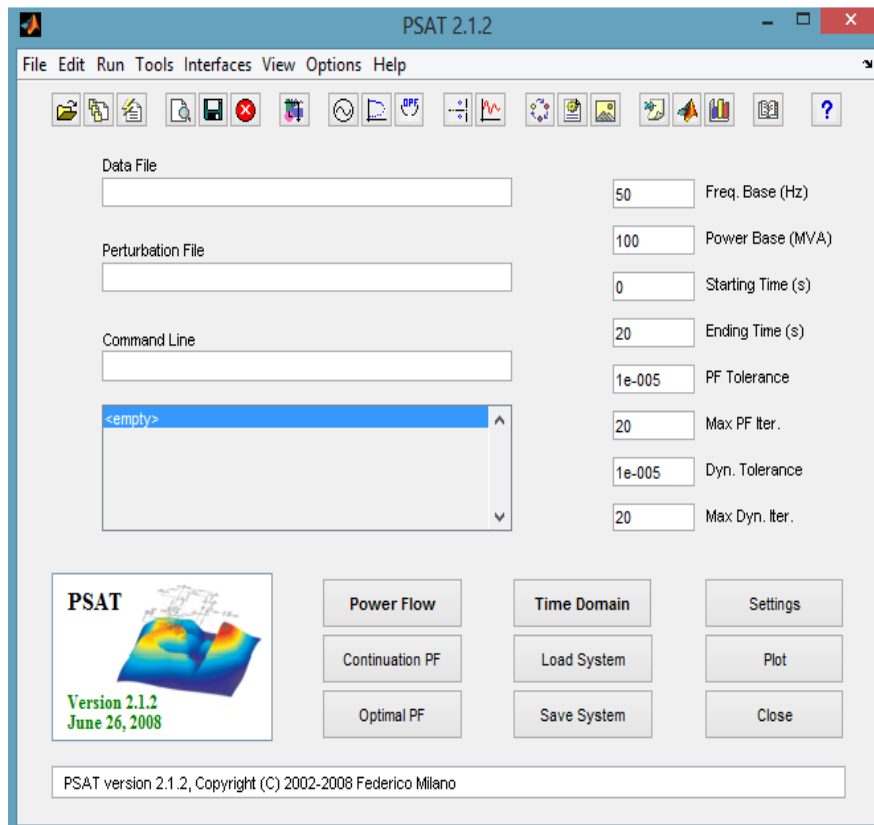


Figure A.1. Page d'accueil du PSAT.

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 no 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.

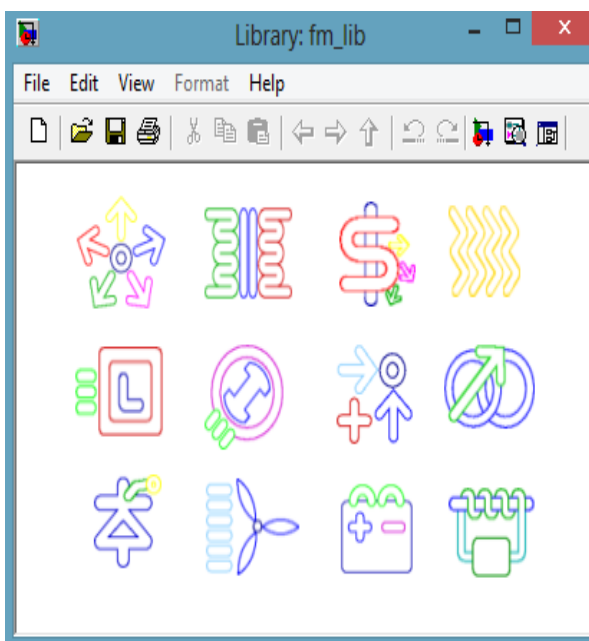


Figure A.2. Bibliothèque-Simulink de PSAT.

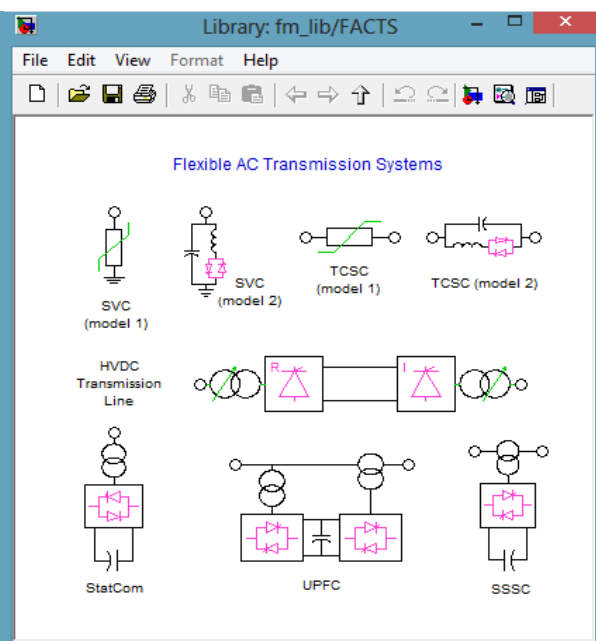


Figure A.3. Model de FACTS.

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. Découplage du problème d'écoulement de puissance

L'indépendance comparative de la puissance active par rapport aux variations de l'amplitude de tension ainsi que l'indépendance comparative de la puissance réactive par rapport aux variations de la phase de tension, a permis d'utiliser la propriété de découplage et de décomposer le problème d'écoulement de puissance en deux sous-problèmes plus simple à résoudre.

L'équation (I.36) est connue dans la littérature comme étant l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V|/|V| \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

En général, pour un réseau électrique donné, la puissance active est considérée comme étant moins sensible à un changement de l'amplitude de tension qu'à sa phase. Aussi, les éléments de la sous-matrice N (ou J_2) peuvent être approximés à zéros. De manière analogique, la puissance réactive étant moins sensible à la variation de la phase de tension qu'à son amplitude, les éléments de (J ou J_3) peuvent également être approximés à zéros.

L'équation (B.1) devient donc:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V|/|V| \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Que l'on peut réécrire:

$$[\Delta P] = [H][\Delta \delta] \quad (\text{B.3})$$

$$[\Delta Q] = [L][\Delta |V|/|V|] \quad (\text{B.4})$$

Ces deux équations sont connues dans la littérature comme étant les deux équations découplées d'écoulement de puissance. Elles sont résolues séparément, ce qui donne:

$$[\Delta \delta] = [H]^{-1} [\Delta P] \quad (\text{B.5})$$

$$[\Delta |V|/|V|] = [L]^{-1} [\Delta Q] \quad (\text{B.6})$$

Il faut noter que la solution implique l'inversion des matrices H et L dont les dimensions sont approximativement le quart de la matrice Jacobienne originale. Il est donc clair que cette approche réduit sensiblement le temps de calcul de chaque itération ainsi que l'occupation de l'espace mémoire de la machine est relativement réduit.

B.1 Méthode découplée rapide d'écoulement de puissance

Sur la base des définitions suivantes :

$$V_i = |V_i| \cos \delta_i + j |V_i| \sin \delta_i \quad (\text{B.7})$$

$$Y_{ij} = G_{ij} - j B_{ij} \quad (\text{B.8})$$

$$S_i = P_i - j Q_i = V_i^* I_i = |V_i| e^{-j\delta_i} \sum_j Y_{ij} |V_j| e^{j\delta_j} \quad (\text{B.9})$$

L'expression de la puissance apparente en un nœud "i" d'un réseau électrique s'écrit :

$$\begin{aligned} P_i - j Q_i &= V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = V_i \cos(\delta_i - j \sin \delta_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij} - j B_{ij}) V_j (\cos \delta_j + j \sin \delta_j) \\ &= [V_i \cos \delta_i - j V_i \sin \delta_i] \sum_{j=1}^n (G_{ij} V_j \cos \delta_j + j B_{ij} V_j \sin \delta_j) + j (G_{ij} V_j \sin \delta_j + j B_{ij} V_j \cos \delta_j) \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

Sa décomposition en puissances active et réactive donne respectivement :

$$P_i = [V_i \cos \delta_i] \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_j + B_{ij} \sin \delta_j) + [V_i \sin \delta_i] \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_j - B_{ij} \cos \delta_j) \quad (\text{B.11})$$

$$Q_i = [V_i \cos \delta_i] \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_j - B_{ij} \cos \delta_j) + [V_i \sin \delta_i] \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_j + B_{ij} \sin \delta_j) \quad (\text{B.12})$$

$$Q_i = [V_i \cos \delta_i] \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_j + B_{ij} \sin \delta_j) - [V_i \sin \delta_i] \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_j - B_{ij} \cos \delta_j) \quad (\text{B.13})$$

Les puissances active et réactive se réécrivent :

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (\text{B.14})$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (\text{B.15})$$

Les hypothèses établies par Stott and Alsac ont pour but de simplifier les expressions de P et Q et de mettre en évidence leur découplage (ou couplage) en fonction des $|V|$ et δ .

Les équations découplées concernant les éléments des sous-matrices H et L sont exprimées par :

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (\text{B.16})$$

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -B_{ii} |V_i|^2 - Q_i \quad (\text{B.17})$$

$$L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{(\partial |V_j| / |V_j|)} = |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = H_{ij} \quad (\text{B.18})$$

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{(\partial |V_j| / |V_j|)} = -B_{ii} |V_i|^2 + Q_i \quad (\text{B.19})$$

On peut remarquer que même si l'espace mémoire de stockage est relativement réduit par la méthode découlée, il demeure encore considérable.

De plus, les efforts de calcul sont encore loin d'être insignifiants. La technique développée par Stott et Alsac (1974) a donné une efficacité et une rapidité de calcul très important aux méthodes de calcul d'écoulement de puissance.

Cette technique se base sur les hypothèses suivantes :

- 1- Les réseaux électriques ayant généralement un rapport X/R (rapport entre la résistance et l'inductance des lignes) élevés, c'est-à-dire $X \gg R$, on peut alors écrire :

$$G_{ij} \sin \delta_{ij} \ll B_{ij} \quad (\text{B.20})$$

- 2- La différence entre les angles ou phases de tension de deux nœuds adjacents est en général très petite. Ceci nous permet d'écrire :

$$\sin \delta_{ij} = \sin (\delta_i - \delta_j) \cong \delta_i - \delta_j = \delta_{ij} \quad (\text{B.21})$$

$$\cos \delta_{ij} = \cos (\delta_i - \delta_j) \cong 1.0 \quad (\text{B.22})$$

- 3- Puisque $G_{ij} \sin \delta_{ij} \ll B_{ij}$ et $\cos \delta_{ij} \approx 1$ alors :

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}] \approx V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}] \ll V_i \sum_{j=1}^n V_j [-B_{ij}] \ll B_{ij} V_i^2 \quad (\text{B.23})$$

D'où par expérience : $Q_i \ll B_{ii} |V_i|^2$

Les équations (B.3) et (B.4) peuvent ainsi être approximés par :

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [V \ B' \ V] [\Delta \delta] \\ [\Delta Q] &= [V \ B'' \ V] \left[\frac{\Delta |V|}{|V|} \right] \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

Les éléments de $[B']$ et $[B'']$ sont les éléments du négatif de la matrice susceptance $[-B]$ tirée de la matrice admittance complexe du réseau étudié :

$$B'_{ij} = -\frac{1}{X_{ij}} \quad i \neq j \quad (\text{B.25})$$

$$B'_{ii} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{X_{ij}} \quad i \neq j \quad (\text{B.26})$$

$$B''_{ij} = -B_{ij} \quad (B.27)$$

Un découplage plus raffiné est obtenu si on ajoute les hypothèses suivantes :

- a) Omettre de [B'] les éléments qui n'affectent pas directement la puissance active mais altèrent plutôt la puissance réactive (ce qui respecte de découplage $P-\theta$ et $Q-V$), comme les susceptance shunts, les capacités des modèles en π des lignes ou transformateurs, etc.
- b) Omettre de [B''] les éléments qui affectent la puissance active, comme les angles de phase de tension des transformateurs déphaseurs, etc.
- c) Prendre $V_j = 1$ [p.u] dans l'élément H_{ij} puisque cela affecte plus la puissance réactive, et diviser les équations (B.16) et (B.17) par V_i^*

Il faut noter que les matrices [B'] et [B''] sont réelles, creuses et symétriques puisque les susceptances shunts, les capacités des modèles en π des lignes ou transformateurs et les angles de phase de tension des transformateurs déphaseurs sont omis. Ceci permet aux facteurs triangulaires supérieurs constants des deux matrices d'être calculés et stockés une fois pour toute au début du processus. C'est ce qui rend cette méthode rapide et efficace.

Les équations (B.16) et (B.17) se réécrivent finalement :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ |V| \end{bmatrix} = [B'] [\Delta \delta] \quad (B.28)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ |V| \end{bmatrix} = [B''] [\Delta |V|] \quad (B.29)$$

Les équations (B.22) et (B.23) sont des vecteurs dont les éléments d'ordre i sont respectivement :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ |V_i| \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n B'_{ij} \Delta \delta_j \quad i=1, \dots, n \quad (B.30)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ |V_i| \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n B''_{ij} \Delta |V_j| \quad i=1, \dots, n \quad (B.31)$$

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 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, 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 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, 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 أيضًا ، 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 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: FACTS , طريقة نيوتن رافسون , PSAT.