الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابـــة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Électrotechnique

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseau Électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Amélioration du plan de tension par l'insertion d'un dispositif FACTS

Présenté par :

LOUIZA Rayane

BELAID Nada Hibat Errahmen

Encadrant : *MESBAH Tarek* *Professeur* *UBMA*

Jury de Soutenance :

MELLOUKI Hamza	MAB	UBMA	Président
MESBAH Tarek	Prof	UBMA	Encadrant
BENALIA Nadia	MCA	UBMA	Examinatrice

Année Universitaire : 2023/2024

Résumé

Le mémoire traite de l'amélioration du plan de tension dans les réseaux électriques en utilisant un dispositif FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System). Les FACTS sont des technologies qui permettent de contrôler efficacement les paramètres du réseau électrique, tels que la tension et la puissance, pour optimiser la transmission d'électricité. L'étude explore comment l'insertion de ces dispositifs peut améliorer la stabilité et l'efficacité du système de distribution électrique, en minimisant les pertes d'énergie et en répondant aux variations de charge.

Le mémoire se compose de quatre chapitres principaux, chacun abordant un aspect spécifique des systèmes FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Le premier chapitre introduit les concepts fondamentaux et explique leur nécessité, tout en classifiant les différents dispositifs et décrivant leurs applications. Le deuxième chapitre explore ces applications à travers des simulations numériques sur un réseau de test IEEE 14 nœuds (JB) pour analyser l'impact de l'augmentation des charges. Le troisième chapitre se concentre sur l'installation des dispositifs SVC et STATCOM, montrant leur capacité à améliorer la régulation de la tension. Enfin, le dernier chapitre examine l'impact des court-circuit sur la stabilité de la tension, démontrant l'efficacité des dispositifs FACTS dans la gestion des perturbations. Ce mémoire fournit une compréhension approfondie des systèmes FACTS et de leur rôle crucial dans les réseaux électriques modernes.

Abstract

The thesis deals with the improvement of the voltage plan in electrical networks using a FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) device. FACTS are technologies that allow to efficiently control the parameters of the electrical network, such as voltage and power, to optimize the transmission of electricity. The study explores how the insertion of these devices can improve the stability and efficiency of the electrical distribution system, by minimizing energy losses and responding to load variations.

The thesis consists of four main chapters, each addressing a specific aspect of FACTS (Flexible AC Transmission Systems). The first chapter introduces the fundamental concepts and explains their necessity, while classifying the different devices and describing their applications. The second chapter explores these applications through numerical simulations on a 14-node IEEE test network (JB) to analyze the impact of increasing loads. The third chapter focuses on the installation of SVC and STATCOM devices, showing their ability to improve voltage regulation. Finally, the last chapter examines the impact of short circuits on voltage stability, demonstrating the effectiveness of FACTS devices in handling disturbances. This thesis provides an in-depth understanding of FACTS systems and their crucial role in modern power grids.

تلخيص

تتناول الأطروحة تحسين خطة الجهد في الشبكات الكهربائية باستخدام جهاز FACTS نظام نقل التيار المتناوب المرن FACTS .(هي تقنيات تسمح بالتحكم بكفاءة في بارامترات الشبكة الكهربائية، مثل الجهد والطاقة لتحسين نقل الكهرباء) . تستكشف الدراسة كيف يمكن لإدخال هذه الأجهزة تحسين استقرار وكفاءة نظام التوزيع الكهربائي، من خلال تقليل خسائر الطاقة والاستجابة لتغيرات الأحمال.

تتألف الأطروحة من أربعة فصول رئيسية، يتناول كل منها جانباً محدداً من جوانب أنظمة نقل التيار المتردد المرنة .(FACTS) يقدم الفصل الأول المفاهيم الأساسية ويشرح ضرورتها، مع تصنيف الأجهزة المختلفة ووصف تطبيقاتها. يستكشف الفصل الثاني هذه التطبيقات من خلال المحاكاة العددية على شبكة اختبار IEEE المكونة من 14 عقدة (JB)لتحليل تأثير زيادة الأحمال. ويركز الفصل الثالث على تركيب أجهزة SVC و STATCOM، مبينًا قدرتها على تحسين تنظيم الجهد. أخيرًا، يبحث الفصل الأخير في تأثير الدوائر القصيرة على استقرار الجهد، مما يوضح فعالية أجهزة FACTS في التعامل مع الاضطرابات. تقدم هذه الأطروحة فهماً متعمقاً لأنظمة FACTS ودورها الحاسم في شبكات الطاقة الحديثة.

REMERCIMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur M.Mesbah Tarek, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les Personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A la mon cher père ma chère Mère pour ses sacrifices et son soutien tout au long de mon parcours ainsi que ma sœur DARINNE.

A mes frères YAHYA et LOUAY, et surtout mon cher

SALAH qui, grâce à son appui, sa compréhension et son

encouragement, ce travail n'aurait pas vu le jour.

Et à mon collègue du travail BELAID NADA HIBAT

ERRAHMEN

A toutes mes chères amies qui sont aussi mes sœurs de cœur
Et à ceux qui croiront toujours en moi.

Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire

LOUIZA RAYANE

DEDICACE

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A la mon cher père ma chère Mère pour ses sacrifices et son soutien tout au long de mon parcours ainsi que mes sœurs SAFA ET ZINEB.

A mon frère MOUHAMED RIAD et surtout mes chères MARWA et KHOULOD qui, grâce à ses appuis, ses compréhensions et ses encouragements, ce travail n'aurait pas vu le jour. Et à mon collègue du travail LOUIZA RAYENA toutes mes chères sœurs de cœur Et à ceux qui croiront toujours en moi

Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire

BELAID NADA HIBAT ERRAHMEN

Sommaire

Résumé

Remerciement

Décidas

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....01

Chapitre I : Généralités sur les dispositifs FACTS

I.1.Introduction.....03

I.2.définition de système FACTS.....03

I.3.Rôles des dispositifs FACTS.....04

I.4.Fonctionnement des FACTS.....04

I.5.Les dispositifs FACTS.....05

I.6.Classification des dispositifs FACTS.....05

I.7.Différents types des dispositifs FACTS.....07

I.8.Nécessité des dispositifs FACTS.....08

I.9. Exemple de dispositifs FACTS.....08

I.9.1.SVC (Static Var Compensator).....08

I.9.1.1.Le principe de fonctionnement de SVC.....10

I.9.1.2. Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC.....11

I.9.2.STATCOM (Static Synchronous Compensator).....12

I.9.3.TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).....14

I.9.4.UPFC (Unified Power Flow Controller).....15

I.10.Modélisation des dispositifs FACTS.....16

I.10.1. Modélisation du SVC.....16

I.10.2. Modélisation du STATCOM.....19

I.11.Conclusion.....20

Chapitre II : Etude du réseau IEEE 14 nœuds

II.1.Introduction.....21
II.2.Définition sur l'écoulement de puissance.....21
II.3.Concept général de l'écoulement de puissance.....21
II.4.Problème de l'écoulement de puissance.....22
II.4.1.Nœud de charge(PQ).....22
II.4.2.Nœud générateur (PV).....22
II.4.3.Accès bilan.....22
II.5.Etude d'un réseau IEEE 14 nœuds.....22
II.6.Problématique.....24
II.7.La plateforme de simulation (ETAP).....25
II.7.1.ETAP (Electrical transient analyser program).....25
II.7.2.Utilisation de l'ETAP.....28
II.8.Cas normale : Réseau standard (modèle IEEE14 JB).....29
II.9.Réseau 14 JB avec l'évolution des charges.....31
II.10.L'environnement de simulation (PSAT).....33
II.11. Vérification des nôtres résultats avec logiciel PSAT.....34
II.11.1.Cas normale : Réseau standard (modèle IEEE14 JB).....36
II.11.2.Réseau 14 JB avec l'évolution des charges.....37
II.12.Conclusion.....38

Chapitre III : Insertion des dispositifs FACTS pour amélioré le plan de tension

III.1.Introduction.....41
III.2.Rôles et fonctions d'un SVC.....41
III.3.Contrôle de la tension aux nœuds du réseau.....41
III.4. Résultats des simulations par logiciel ETAP.....42
III.4.1.Utilisation d'un seul SVC au JB 14.....42
III.4.2.Utilisation de deux SVC aux nœuds 14 et 5 44
III.5. Vérification des résultats des simulations par logiciel PSAT.....46

III.5.1. Utilisation d'un seul SVC au JB 14.....46
III.5.2. Utilisation de deux SVC aux nœuds 14 et 5.....48
III.6.Apport du FACTS shunt (STATCOM).....50
III.6.1. Utilisation d'un seul STATCOM au JB 14 par PSAT.....50
III.6.2. Utilisation de deux STATCOM aux nœuds 14 et 5.....52
III.7.Conclusion.....54

Chapitre IV : Impact Des Court-circuit Sur Le Plan De Tension

IV.1.Introduction.....55
IV.2.Définition d'un court- circuit.....55
IV.3.Les déférents types du court-circuit.....55
IV.4.Caractéristique des courts-circuits.....56
IV.5. Répartition de tension sur le réseau IEEE 14 nœud suite a un seul défaut.....57
IV.5.1.Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 01.....57
IV.5.2.Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 09.....59
IV.5.3.Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 10.....61
IV.5.4.Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 11 63
IV.5.5.Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 12 65
IV.5.6.Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 13 67
IV.6.Répartition de tension sur le réseau IEEE 14 nœud suite a un deux défauts.....69
IV.6.1.Cas d'un court-circuit triphasé aux nœuds 11 et 9.....69
IV.6.1.Cas d'un court-circuit triphasé aux nœuds 11et13.....71
IV.7. Conclusion.....72

Conclusion général.....73

Référence bibliographiques.....74

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 [1].

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 [1].

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, SVC** respectivement [2].

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux électriques par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (tension, déphasage, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues.

Ce travail s'articule autour de l’analyse de réseau électrique de transport d’électricité ; pour réussir cette analyse en utilisant des logiciels de simulations plus confiants et plus rapides nommés **ETAP** et **PSAT.**

L'objectif de ce travail est d'améliorer le plan de tension d'un réseau électrique par systèmes **FACTS**.

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

- Le premier chapitre présente des généralités sur les 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 illustrées dans le deuxième chapitre où des simulations numériques seront réalisées à l'aide du logiciel **ETAP** et **PSAT** sur un réseau **IEEE 14 JB** permettant ainsi d'analyser le comportement de ce réseau avec l'augmentation des charges.
- Dans le troisième chapitre nous avons installé les dispositifs **FACTS** de différents types **SVC** et **STATCOM**, pour mieux améliorer le plan de tension après l'augmentation des charges .
- Dans le quatrième chapitre nous avons étudié l'effet des courts-circuits sur le plan de tension .

Chapitre I :

Généralités sur

Les dispositifs FACTS

I.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 [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.

I.2. Définition de système FACTS

Le concept FACTS « **F**lexible **A**lternative **C**urent **T**ransmission **S**ystems » 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. [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 [3].

I.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 où en fournissantde 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, lessurcharges 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 [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 [5].

I.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 Curent).

Réseaux Industriels Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du

Réseau AC en présence de fluctuations de charge, compensation du flicker pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission [6].

I.5. Les dispositifs FACTS

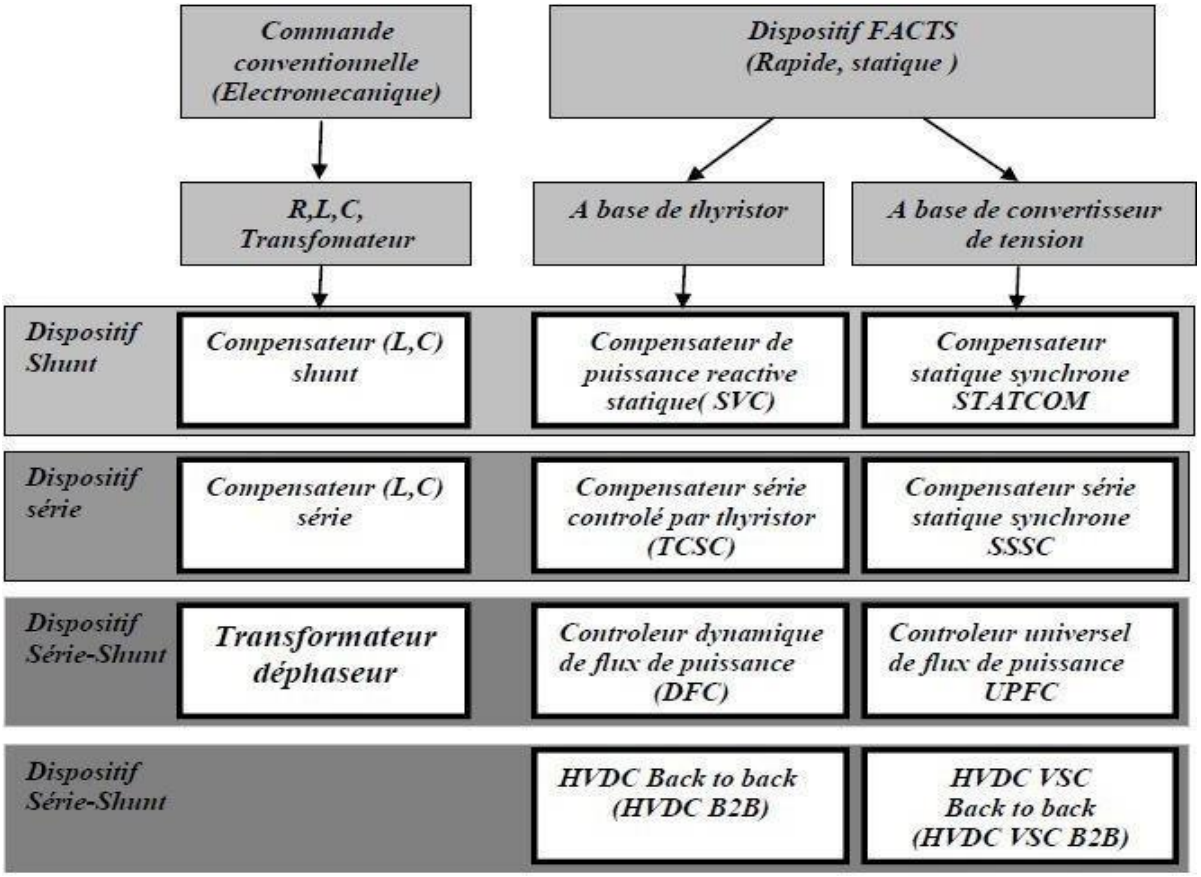
Selon l'IEEE (Institute of Electric al and Electroniques Engainées), la définition du terme FACTS est la suivante : Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité 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 [7].

I.6. Classification des dispositifs FACTS

Plusieurs types de FACTS avec des architectures et des technologies différentes, ont été Développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (Static Var Compensator), le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), le STATCOM (Static Synchronous Compensator), et 1’UPFC (Unified Power Flow Controller). Chacun de ces dispositifs possède ses propres Caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. Le choix du Dispositif approprié est donc essentiel et dépend des objectifs à atteindre. La position de L’installation dans le réseau est également un paramètre important pour son efficacité. Lorsque Plusieurs dispositifs sont insérés dans un réseau, il convient que leurs effets soient coordonnés Afin qu’ils n’agissent pas de façon opposée. Dans ce cas, la stratégie de contrôle revêt une Importance toute particulière [8].

Tableau (I.1) : Principaux dispositifs des FACTS



La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement Contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs [09]. Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau. En général les FACTS sont devisés en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries**

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la Compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission.

- **Compensateurs shunts**

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquence contrôler de tension des nœuds.

- **Compensateurs hybrides série-shunt**

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle 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 [10].

I.7. Différents types des dispositifs FACTS

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

- **Génération I**

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

- **Génération II**

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

- **Génération III**

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

Transformateurs pour le couplage avec le réseau.

I.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, quel que soit son type, si lacompensation 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 [11].

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 [12].

I. 9. Exemples de dispositifs FACTS

I.9.1. SVC (Static Var Compensator)

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

Dans la pratique, il y a plusieurs modèles de SVC, le modèle défini par (Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electrique) considère le SVC comme un générateur synchrone qui ne produit aucune puissance active, identique à un condensateur synchrone en parallèle avec une réactance inductive. Le jeu de barres au point de raccordement est comme un jeu de barres PV bus, devient PQ bus quand le SVC fonctionne à sa limite [13].

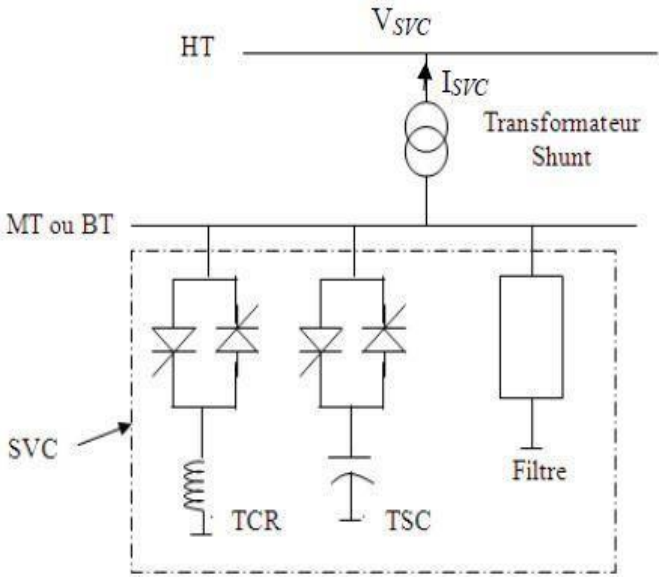


Fig (I.1) : Schéma de principe d'un SVC.

Le SVC est l'association d'une inductance commandée par thyristor (Thyristor- Controlled Reactor: TCR), d'un condensateur commuté par thyristor (Thyristor-Switched Capacitor: TSC) et d'un filtre d'harmoniques. La caractéristique statique de ce type de FACTS est donnée par la figure (I.2).

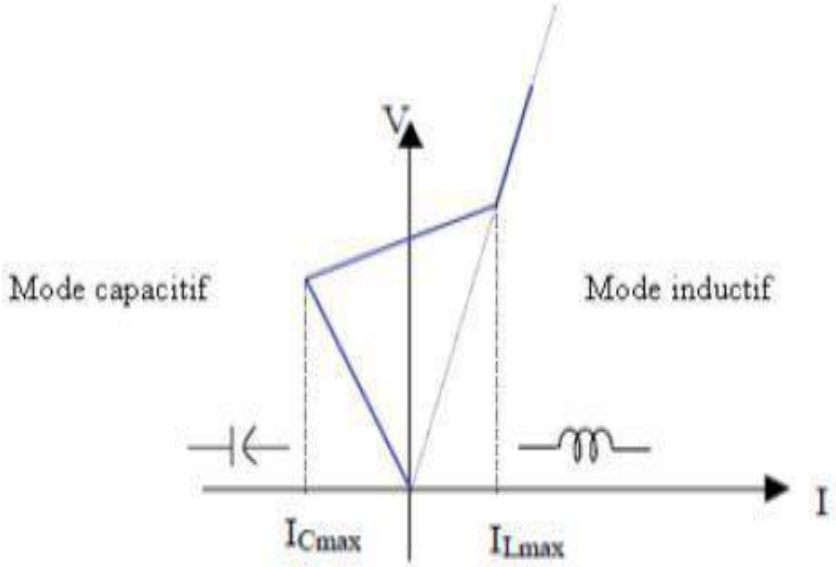


Fig (I.2): Caractéristique d'un SVC.

$I_{C\,max}$ et $I_{L\,max}$ sont les courants limites que peuvent supporter respectivement le TCR et le TSC.

Le SVC est un dispositif qui met en jeu des thyristors montés en tête-bêche ; Un “Static Var Compensator” est un dispositif shunt, branché en général à travers un transformateur HT/MT ou BT. Un SVC est un générateur de puissance réactive qui produit/absorbe une puissance variant de façon continue depuis : $+Q_c$ à $-Q_1$.

Le SVC répond en dynamique, dans un temps court, de l’ordre de deux cycles, pour compenser une variation brusque de la tension consécutive à un à-coup de charge ou à un défaut.

Le TSC fournit rien, ou sa pleine puissance : $0/+Q_c$

Le TCR absorbe de façon continûment variable :$0/-Q_1$

Le filtre fournit en permanence sa puissance : $+Q_f$

Le bilan du SVC est donc : $Q=+Q_c+Q_f-Q_1$

Fig (I.3) : photo réel de SVC

I.9.1.1. Le principe de fonctionnement de SVC

La figure (I.3) Présente le schéma monophasé d'un compensateur statique shunt. Il est composé d'un condensateur de réactance "Xc" dont la puissance réactive fournie peut être complètement enclenchée ou complètement déclenchée et d'une bobine d'induction de réactance inductive "XL" dont la puissance réactive absorbée est commandée entre zéro et sa valeur maximale par des thyristors montés en tête-bêche pour assurer des inversions très rapides du courant.

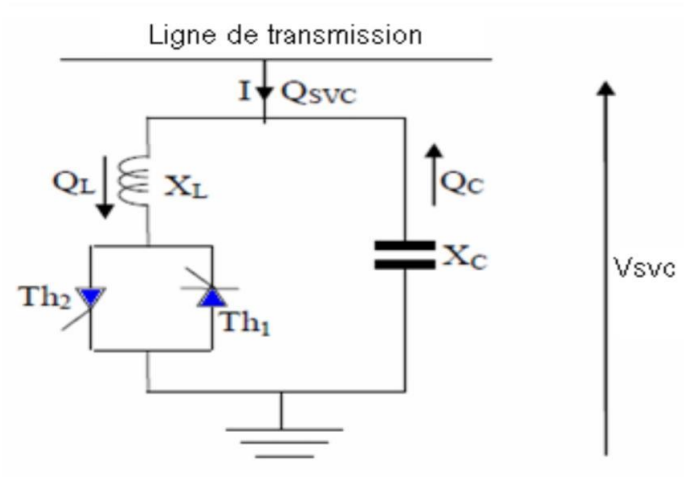


Fig (I.4) : Schéma monophasée d'un compensateur statique shunt

Pour fixer le signe de puissance réactive Qsvc, le compensateur est considéré comme un commutateur. La puissance réactive Qsvc est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif), le courant d'entrée I est un courant réactif, il est supposé positif lorsqu'il est retardé de 90° par rapport à la tension Vsvc. Si par contre, le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), cette dernière est considérée comme étant négative, ainsi que le courant.

I.9.1.2. Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC

Le dispositif SVC est modélisé par une admittance shunt y SVC variable.

Un SVC supposé idéal ne contient pas de composant résistif G SVC = 0, donc il ne Consomme pas d'énergie active du réseau. Sa puissance réactive est fonction de La tension au jeu de barre de connexion et de la susceptance B svc.

P1 = 0
Q1 = −□V1□BSVC

Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire :

Ysvc = jbsvc

La susceptance b SVC peut être de nature capacitif fournir ou d'absorber, de la Puissance réactive QSVC

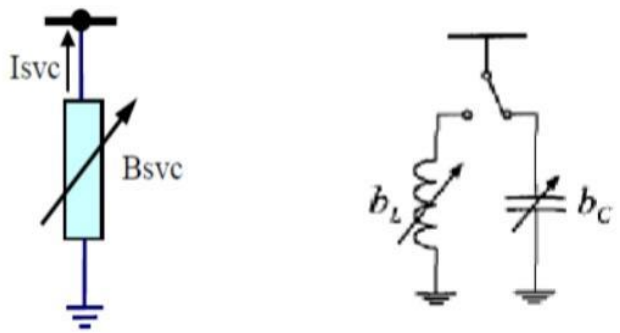


Fig (I.5) : Symbole Modèle

I.9.2. STATCOM (Static Synchronous Compensator)

Ce type de compensateur a été défini par IEEE comme un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive. Le courant capacitif et inductif peut être contrôlé séparément de la tension du réseau [14].

Ce type de compensateur a été développé à la fin des années 70, mais ce n'est que durant les années 90 qu'il a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance [15]. La figure (I.6), représente le schéma électrique d'un STATCOM. Son rôle est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. L'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur shunt de couplage.

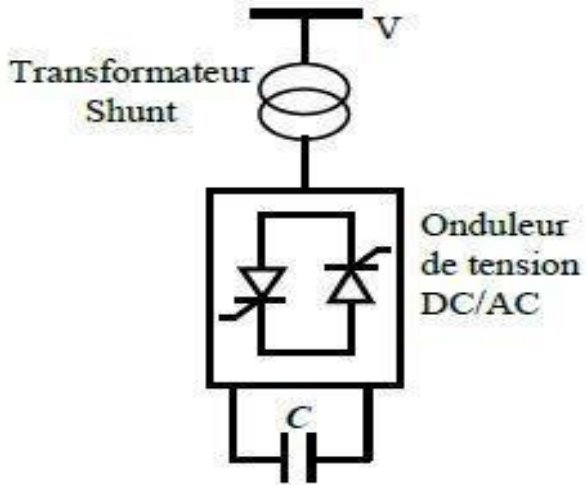


Fig (I.6) : Schéma électrique d'un STATCOM.

Son principe est simple, un onduleur de tension produit, grâce à une source de tension continue, un jeu de tensions triphasées, en phase et couplées aux tensions d'une ligne via une inductance faible. Celle-ci correspond en général à l'inductance de fuite par phase du transformateur de couplage [16].

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_{sh}, Laquelle est en phase avec la tension du réseau V. Le fonctionnement peur être décrit de la façon suivante [17].

Fig (I.7) : Photo réel de STATCOM

- Si la tension V_{sh} est inférieure à V, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de (–π/2) par rapport à la tension V ce qui donne un courant inductif.
- Si la tension V_{sh} est supérieur à V, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de (+π/2) par rapport à la tension V ce qui donne un courant capacitif.
- Si la tension V_{sh} est égale à V, le courant circulant dans l'inductance est nul et par Conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

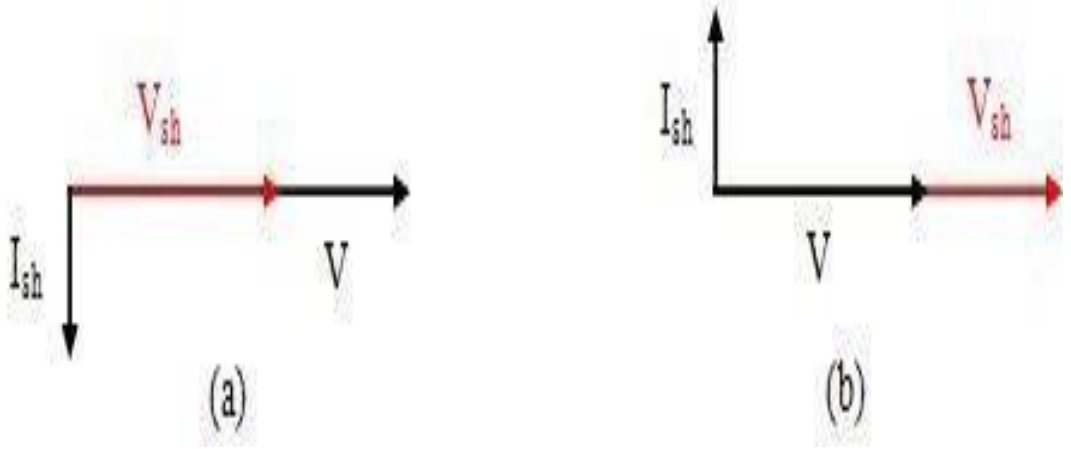


Fig (I.8) : Diagramme fonctionnel du STATCOM.

(a) Courant inductif , (b) Courant capacitif

Les avantages et les inconvénients que porte ce moyen de compensation sont :

- **Avantage :**

Pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une seule inductance. Contrairement au compensateur statique, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension V diminue [17].

- **Inconvénient :**

Une seule fonction qui est l'échange d'énergie réactive (absorber/fournir) avec le jeu de barre.

I.9.3. TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

IEEE définit le TCSC comme étant un compensateur à réactance capacitif qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive.

Fig (I.9) : Photo réel de TCSC

L'ensemble monté en parallèle avec une capacité comme montre la figure (I.7) et connecté en série avec le réseau pour contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance XTCSC(α) qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80. [18] Constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité figure (I.10).

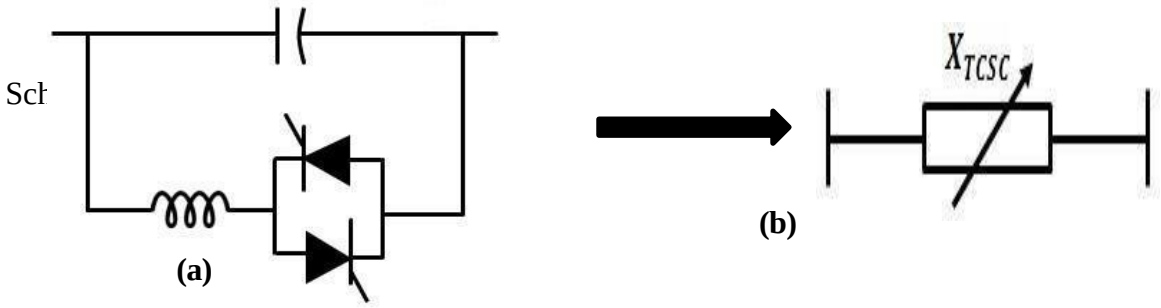


Fig (I.10) :(a) Structure d'un TCSC , (b) Représentation par réactance variable.

I.9.4. UPFC (Unified Power Flow Controller)

Composé de deux convertisseurs de tension (onduleur) qui partagent le même condensateur dans leurs côtés continus et possédant un système de commande unifié. La figure (I.11), illustre son schéma de base [18].

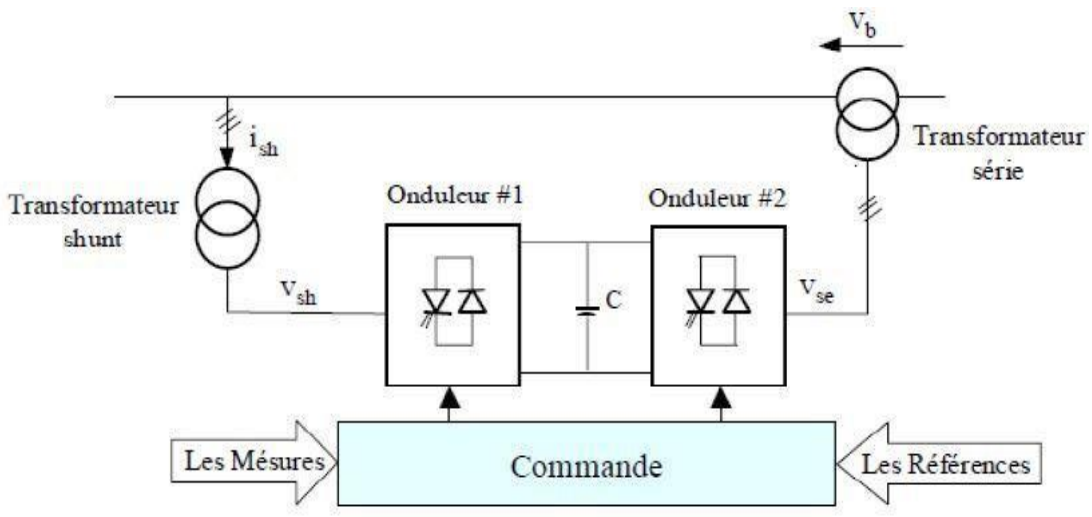


Fig (I.11) : Schéma de base de l'UPFC.

L'UPFC est capable de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS.
Il Peut être utilisé particulièrement pour : [19]

- Le réglage de la tension.
- Le contrôle de flux de puissance active et réactive.
- L'amélioration de la stabilité.

I.10. Modélisation des dispositifs FACTS shunt

I.10.1. 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 [20].

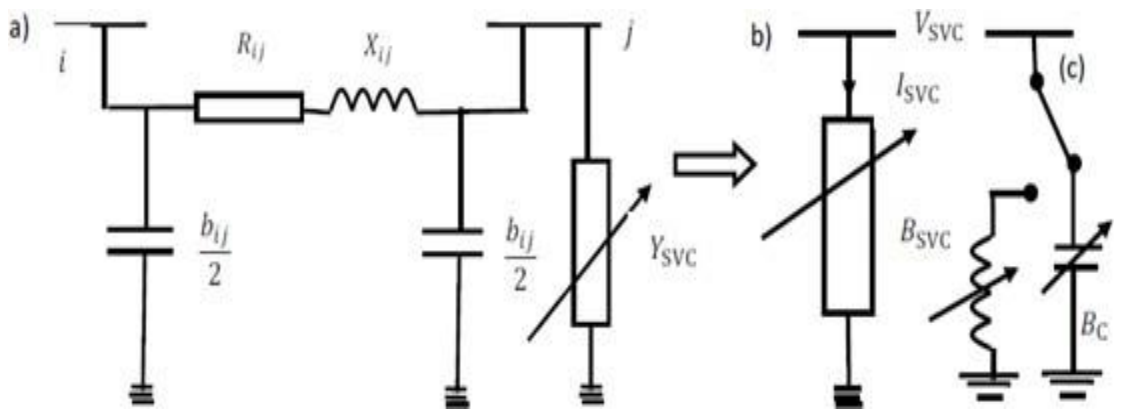


Fig (I.12) : Modélisation d'un SVC : **(a)** SVC placé en un nœud j, **(b)** symbole, **(c)** modèle du SVC

Afin de prendre en compte ce nouveau nœud, une ligne et une colonne Supplémentaires devraient être ajoutées à la matrice d'admittance nodale. Pour éviter à changer le nombre de nœuds du réseau et donc la taille de la matrice D'admittance, une transformation étoile-triangle permet de réduire le système en Supprimant le nœud m et en calculant les paramètres d'une ligne équivalente.

La Figure (I.13) ; illustre les étapes pour obtenir cette ligne équivalente.

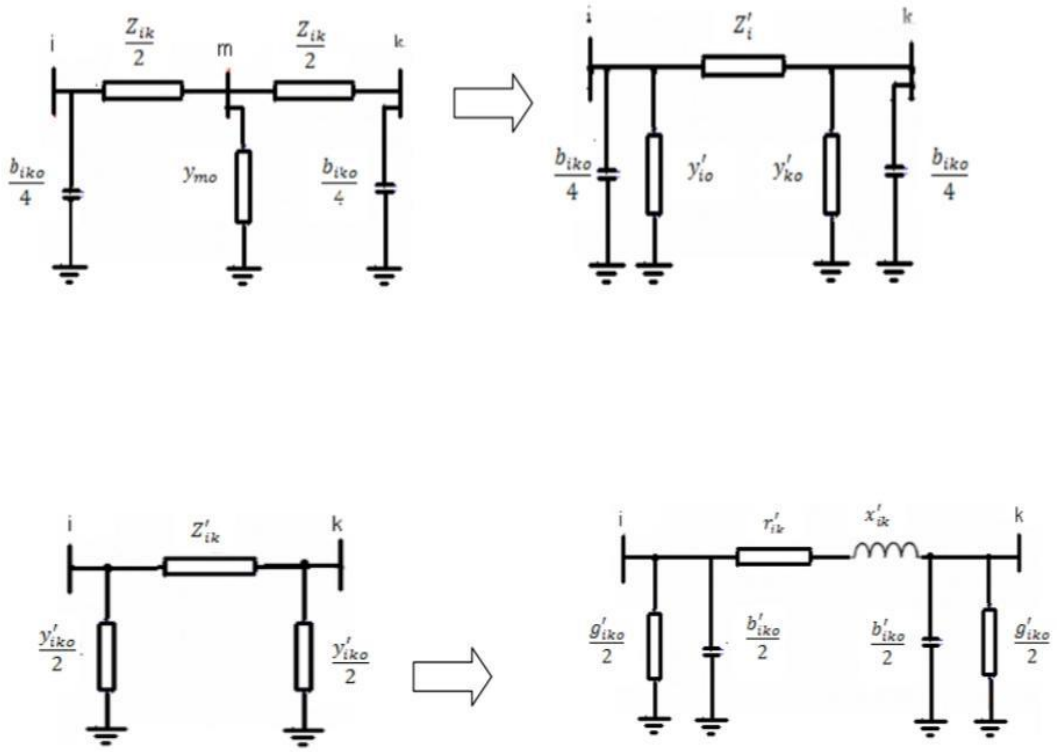


Fig (I.13) : Transformation en une ligne équivalente avec un SVC en Son milieu modifié.

La modélisation du SVC est basée sur deux modèles :

1er modèle : on considère le SVC comme une susceptance shunt variable [20].

2ème 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 :

$$I_{svc} = -jB_{svc}V_k \qquad (I.3)$$

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

$$Q_{svc} = Q_k = -V^2{}_k B_{svc} \qquad (I.4)$$

La linéarisation de l'équation est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_K \\ \Delta Q_K \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_k \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta\theta_K \\ \Delta B_{SVC}/B_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)} \qquad (1.5)$$

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

$$B_{SVC}{}^{(i)} = B_{SVC}{}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}}\right)^{(i)} B_{SVC}{}^{(i-1)} \qquad (I.6)$$

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

2ème modèle :

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

$$Q_K = \frac{-V_K{}^2}{X_C\ X_L}\{X_L - \frac{X_C}{\pi}[2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{svc})]\} \qquad (I.7)$$

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

$$\begin{pmatrix} \Delta P_K \\ \Delta Q_{KK} \end{pmatrix}^{(Ii)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2V_K{}^2}{\pi X_L}[\cos(2\alpha_{svc}) - 1] \end{bmatrix}^{(I)} \begin{bmatrix} \Delta\theta_K \\ \Delta\alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(I)} \qquad (I.8)$$

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

$$\alpha_{sv}{}^{(I)} = \alpha_{svc}{}^{(I-1)} + \Delta\alpha_{svc}{}^{(I)} \qquad (I.9)$$

I.10.2. 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 [21].
La structure de base d'un STATCOM ayant le schéma qui est montré par la Figure (I.14).

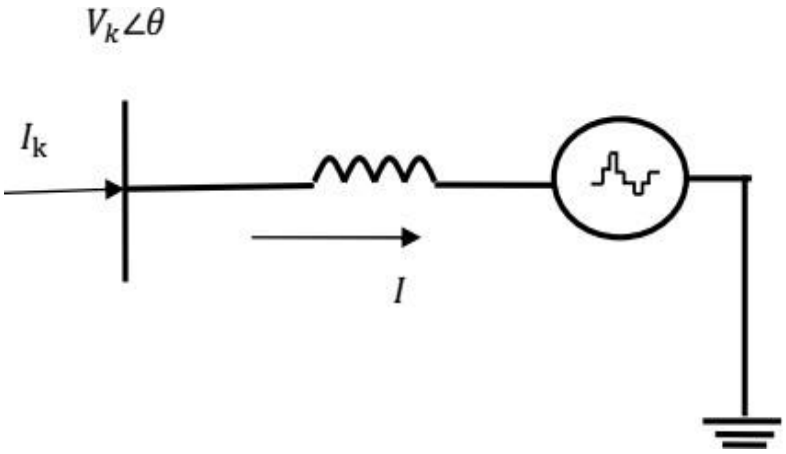


Fig (I.14) : Représentation schématique du STATCOM

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 variableE_{vR}, à laquelle le module et l'angle de phase peut être réglé, 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 :

$$E_{vR} = V_v\,(\cos\delta_{vR} + j\sin\delta_{vR}) \qquad (I.10)$$

La puissance peut être écrite sous forme :

$$S_{vR} = V_{vR}I^*{}_{vR} = V_{vR}Y^*{}_{vR}\,(V^*{}_{vR} - V^*{}_k) \qquad (I.11)$$

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

$$P_{vR} = V^2{}_{vR}G_{vR} + V_{vR}V_k\,[V_{vR}\cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR}\sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \qquad (I.12)$$

$$Q_{vR} = -V^2{}_{vR}B_{vR} + V_{vR}V_k\,[G_{vR}\sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR}\cos(\delta_k - \theta_k)] \qquad (I.13)$$

$$P_k = V^2{}_kG_{vR} + V_kV_{vR}\,[G_{vR}\cos(\delta_k - \theta_{vR}) + B_{vR}\sin(\delta_k - \theta_{vR})] \qquad (I.14)$$

$$Q_k = -V^2{}_kB_{vR} + V_kV_v[G_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR}\cos(\delta_k - \theta_{vR\text{à}})] \qquad (I.15)$$

I.11. Conclusion

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

En deuxième partie nous avons présenté la modélisation de 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.

Chapitre II :
Etude Du Réseau IEEE 14 Nœuds

II.1. Introduction

Afin de compléter le travail théorique que nous avons présenté au chapitre I, nous proposons dans celui-ci quelques applications. Pour cela, nous avons choisi le logiciel ETAP et PSAT pour le calcul du plan de la tension.

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 profile de tension et sur les pertes réactives dans le régime normal.

De ce fait nous allons, en premier temps, effectué nos applications sur le réseau standard IEEE14 nœuds, constitué des lignes de transmission, des générateurs, des charges et des compensateurs synchrones…etc. Nous calculons les transits de puissances, ainsi que les tensions aux différents points du réseau.

II.2. Définition sur l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'évaluer toutes les grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, puissances injectées aux nœuds et celles transitant dans les lignes.

Le gestionnaire du réseau doit déterminer le point de fonctionnement de l'écoulement de puissance en fonction des caractéristiques du réseau : demande en énergie électrique, les capacités de production, les valeurs des flux d'énergie transitant sur les lignes de transmission, les amplitudes et phases des tensions.

II.3. Concept général de l'écoulement de puissance

L'écoulement de puissance est utilisé pour déterminer en régime permanent les tensions complexes des jeux de barre du réseau, à partir de là on calcule les transits de puissance active et réactive des lignes et transformateurs [23].

En dernier lieu, on calcule les courants et les puissances transitant dans les lignes et celles générées par les sources.

II.4.Problème de l'écoulement de puissance

Le calcul de l'écoulement de puissance consiste à déterminer l'ensemble des transits de puissance et des tensions dans un réseau contenant un nombre de charges donné.
Pour chaque nœud du système on associe quatre grandeurs : puissance active et réactive, module et phase de la tension. Sur ces quatre grandeurs seules deux sont connues en un nœud, les deux autres sont déterminées par calcul [26].
Trois types de nœuds sont utilisés :

II.4.1. Nœud de charge(PQ)

Il est connecté directement avec la charge. Il ne possède aucune source d'énergie. Les deux puissances P et Q sont considérées connu.

II.4.2. Nœud générateur(PV)

Il est connecté directement à une source d'énergie réactive ou avec un générateur. La puissance active et la tension sont connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures, Qgimin et Qgimax respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur de la puissance réactive se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud charge (PQ).

II.4.3. Accès bilan

Il est connecté directement avec un générateur relativement puissant, on le considère dans le calcul de l'écoulement de puissance pour compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. L'amplitude et l'angle de la tension sont supposé connus.

II.5. Etude d'un réseau IEEE 14 nœuds

Cette étude nous permettra à partir des données topologiques du réseau (nœuds, ligne 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.

Dans cet exemple d'application, un réseau électrique IEEE standard à 14 nœuds, Ce réseau est constitué de [28] :

Tableau (II.1) : Les caractéristiques de modèle d'étude (réseau 14 JB).

Nombre de JB	Nombre de ligne	Nombre de transformateur	Nombre de générateur	Nombre de charge
14	20	4	5	11

Sachant que le nœud 01 est pris comme nœud de référence et que tous les angles de phase ont une valeur initiale de 0,0°. Les caractéristiques des lignes sont indiquées dans le tableau :

Tableau (II.2) : Données des lignes de transport du réseau IEEE standard à 14 nœuds

From Bus	To Bus	R (P.u)	X (P.u)	B(P.u)
2	5	0.05695	0.17388	0.03400
6	12	0.12291	0.25581	0.00000
12	13	0.22092	0.19988	0.00000
6	13	0.06615	0.13027	0.00000
6	11	0.09498	0.19890	0.00000
11	10	0.08205	0.19207	0.00000
9	10	0.03181	0.08450	0.00000
9	14	0.12711	0.27038	0.00000
14	13	0.17093	0.34802	0.00000
7	9	0.0000	0.11001	0.00000
1	2	0.01938	0.05917	0.05280
3	2	0.04699	0.19757	0.04380
3	4	0.06701	0.17103	0.03460
1	5	0.05403	0.22304	0.04920
5	4	0.01335	0.04211	0.01280
2	4	0.05811	0.17632	0.03740
5	6	0.0000	0.25202	0.00000
4	9	0.0000	0.55618	0.00000
4	7	0.0000	0.20912	0.00000
8	7	0.0000	0.17615	0.00000

II.6. Problématique

Dans notre étude nous avant présenté 2 cas :

- Cas N°1 : fonctionnement normal (sans augmentation des charges, sans FACTS).
- Cas N°2 : avec évolution des charges et sans FACTS.

II.7. La plateforme de simulation (ETAP)

II.7.1 ETAP (Electrical Transient Analyser Program)

C'est la solution d'analyse la plus exhaustive pour concevoir, simuler, gérer et automatiser les systèmes de production, de distribution et d'énergie industrielle. ETAP a été créé en collaboration avec un programme d'assurance qualité établi et est largement utilisé à travers le monde en tant que logiciel à forte influence.

ETAP est entièrement accessible dans quatre langues, avec des rapports de sortie traduits dans six langues différentes. En tant que solution intégrée pour les entreprises, ETAP offre une solution de gestion d'énergie intelligente en temps réel qui permet de surveiller, contrôler, automatiser, simuler et optimiser le fonctionnement des systèmes d'alimentation.

Fig (II.1) : la première fenêtre d'ETAP

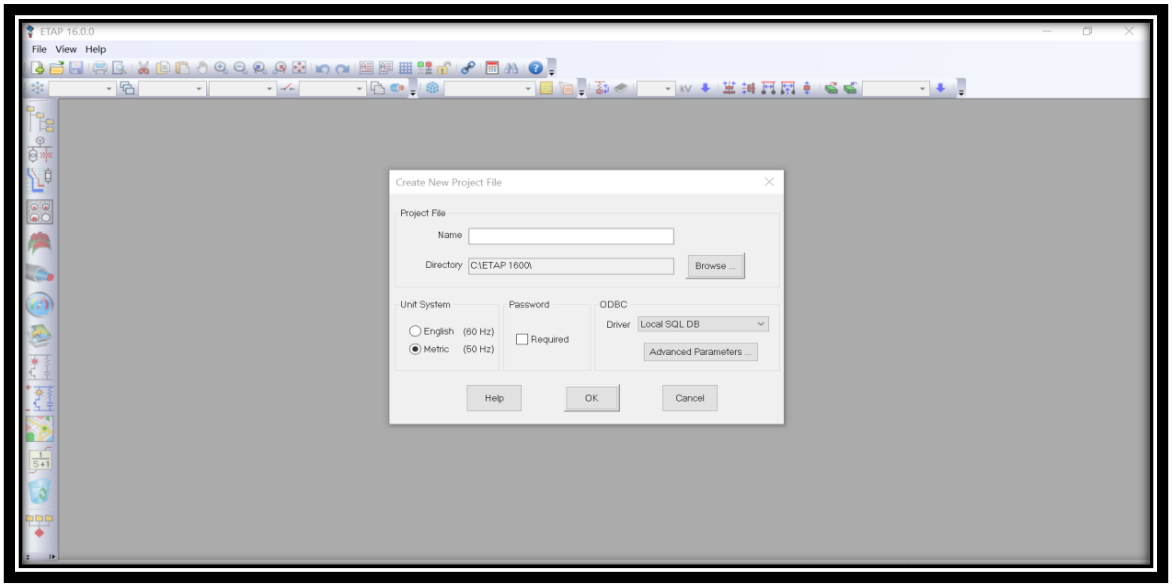


Fig (II.2) :la fenêtre principale de l'ETAP.

Fig (II.3) : Barre de menu

La barre de menus propose une liste exhaustive des différentes options du menu. Toutes les options permettent d'activer une liste déroulante de commandes, comme les opérations sur les fichiers, l'impression, les conversions de base de données, l'échange de données, les objets OLE, les normes de projet, les paramètres de projet et les options de projet, les bibliothèques, les valeurs par défaut, les polices d'annotation, la base et la révision. Tableau de bord du projet :

Fig (II.4) : barre d'outils.

La barre des outils Les boutons présents dans le projet permettent de raccourcir de nombreuses fonctions couramment utilisées. Ces tâches incluent la création de projets, Création de projets, Gestion de projets, Impression, Pré-impression, Couper, Copier, Coller, Zoom panoramique, Modifier, Restaurer, Zone de texte, Mise en évidence de grille, Analyse de la continuité, Thèmes, Demander un modèle, Ajouter un lien hypertexte et un calculateur au modèle OLV de force, de recherche et d'assistance. Dans la barre d'outils, sélectionnez le bouton Power Grid. Lorsque vous passez sur l'OLV, le curseur devient une icône de Grille de puissance. Placez un utilitaire à une ligne sur votre diagramme en cliquant n'importe où dans l'OLV.

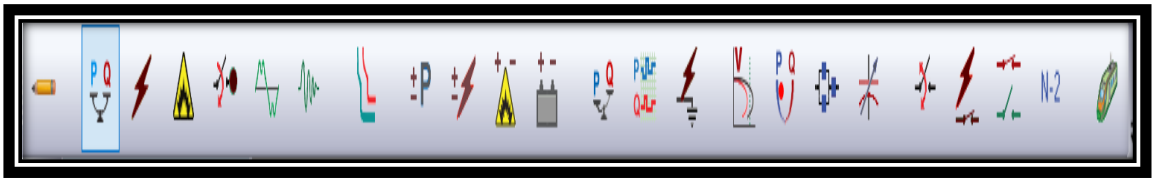


Fig (II.5) : Modes d'étude.

Mettre à jour les barres d'outils : Lorsque vous êtes en mode Edition, les barres d'outils Modifier sont activées. Il est possible de sélectionner, glisser-déposer des éléments CA, CC et d'instrument sur les diagrammes à une ligne en cliquant ou en double-cliquant. De plus, vous avez la possibilité de réaliser les tâches suivantes :

• Afficher et imprimer des rapports de sortie personnalisables (Rapports texte et Crystal)

• Changer les paramètres d'affichage

• Gérer les rapports du calendrier d'accès

• Ajouter de nouveaux systèmes de grille au sol

• Ajouter des réseaux composites et des moteurs composites.

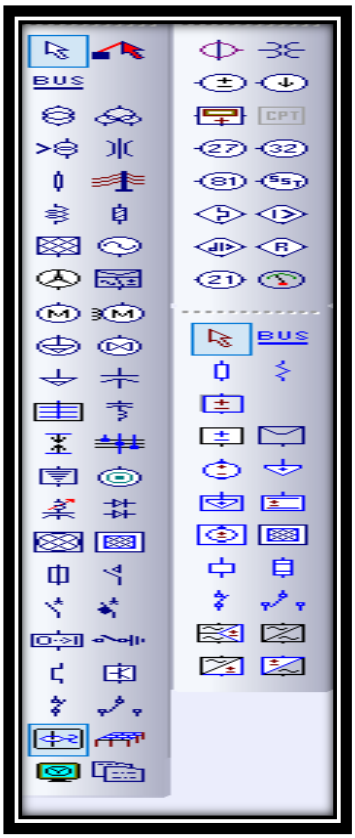


Fig (II.6) : les barres d'outils.

II.7.2. Utilisation de l'ETAP

Les étapes d'utilisations de l ETAP se résument comme suit :

1- Ouvrir un nouveau fichier avec son nom.

2- Créer du réseau électrique à étudier.

3- Lancer le modelé de la bibliothèque de simulation.

4- Introduire les données numériques des éléments (générateur, lignes, transfos, FACTS).

5- Exécuter l'écoulement de puissance.

6- Exécuter la simulation dans le domaine temporel.

II.8. Cas normale : Réseau standard (modèle IEEE 14 nœuds)

D'après les données du réseau IEEE standard à 14 nœuds, nous avons utilisé la programmation sur logiciel ETAP e pour résoudre les équations de l'écoulement de puissance

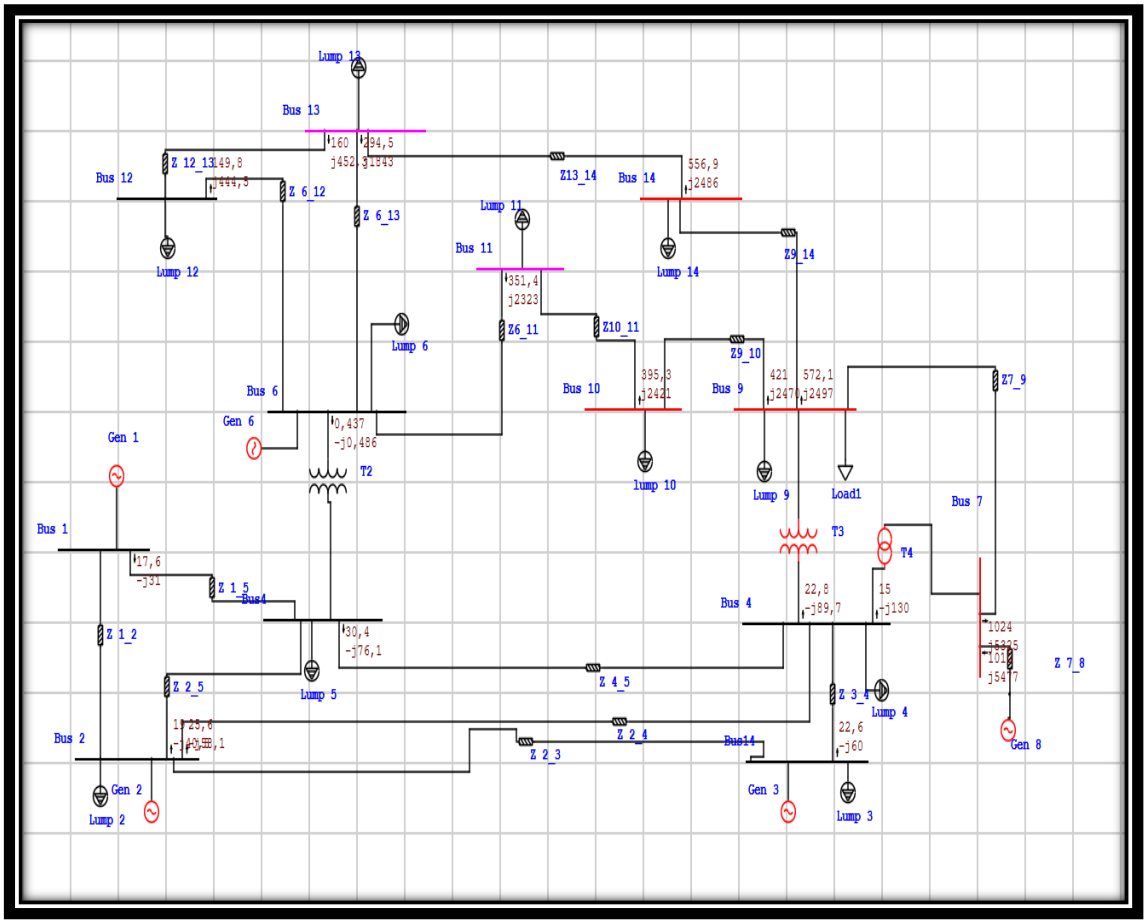


Fig (II.7) : Le réseau IEEE14 nœud standard par logiciel ETAP

Tableau (II.3) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud cas normal

LOAD FLOW REPORT

Bus	Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID	V(pu)	ang(pu)	P(Pu)	Q(Pu)	P(Pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	pu
*Bus 1	1.06	0.0	1,906	_0.1003	0	0	Bus 2	0.000	-0.013	0.0
							Bus4	0,117	-0,206	-0,49
*Bus 2	1.05	-0.072	0.47	0.3845	21.370	13.244	Bus 1	0.000	-0.013	0.0
							Bus 14	0.000	-0.011	0.0
							Bus 4	0,17	-0,387	-0,404
							Bus4	0,126	-0,269	-0,424
Bus3	1.00	_0.0202	0	0.2634	6.604	4.093	Bus 1	-0,118	0,206	-0,49
							Bus 2	-0,126	0,26	-0,42
							Bus 4	0,202	-0,509	-0,37
							Bus 6	-0.437	0.487	-0,668
Bus 4	1.02	_0.178	0	0	40.778	25.273	Bus 2	-0,17	0,387	-0,40
							Bus 14	-0,149	0,4	-0,352
							Bus4	-0,202	0,507	-0,371
							Bus 9	0,151	-0,6	-0,247
							Bus 7	0,101	-0,866	-0,112
*Bus 6	1.06	-0.208	0	0,2002	11.456	7.100	Bus 11	-2,024	-14,815	0,13
							Bus 12	-0,981	-2,927	0318
							Bus 13	-1,817	-11,9	0,15
							Bus4	0.437	-0.486	-0,669
Bus 7	1,,047	-0.173	0	0	0	0	Bus 8	-6,731	-37,308	0,181
							Bus 9	6,828	35,501	0,189
							Bus 4	-0,96	1.008	-0,95
*Bus 8	1.08	_0.168	0	0.2481	0	0	Bus 7	6,731	41,091	0,162
Bus 9	1,023	-0.207	0	0	53.720	18.587	Bus 7	-6,828	-33,906	0,197
							Bus 10	2,806	16,465	0,168
							Bus 14	3,813	16,,648	0,223
							Bus 4	-0,15	0,669	-0,220
Bus 10	1,043	-0.210	0	0	9.537	5.722	Bus 9	2,701	-16,180	0,165
							Bus 11	2,635	16,142	0,161
Bus 11	1,04	-0.199	0	0	2.534	1.570	Bus 6	2,342	15,486	0,150
							Bus 10	-2,543	-15,496	0,151
Bus 12	1,01	-0.193	0	0	5.388	3.339	Bus 6	0,998	2,963	0,319
							Bus 13	-1,034	-2,985	0,327
Bus 13	1,05	-0.207	0	0	12.616	7.817	Bus 6	1,663	12,287	0,158
							Bus 12	1,066	3,015	0,334
							Bus 14	-3,114	-15,355	0,199

Bus	Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID	V(Pu)	ang(pu.)	P(Pu)	Q(Pu)	P(Pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	pu
*Bus14	1,049	_0.168	0.45	-0.0421	0.150	0.047	Bus 2	0.000	-0.011	0.0
							Bus 4	0,15	0,4	-0,353
Bus 14	1,11	-1.6	0	0	13.987	8.668	Bus 9	-3,806	-16,631	0,223
							Bus 13	3,712	16,57	0,219

D'âpres le résultat de tableau (II.3), nous constatons que les différents nœuds du réseau présenté des niveaux de tension acceptables, ce qui indique que le réseau étudié est en parfait équilibre.

II.9. Réseau IEEE 14 nœud avec évolutions des charges

Après une augmentation de 10 %des charges chaque année, on atteint 100% des charges après 10 ans. La variation de tension de tous les nœuds de charges l'écoulement de puissances dans les lignes, sont observés dans cette situation.

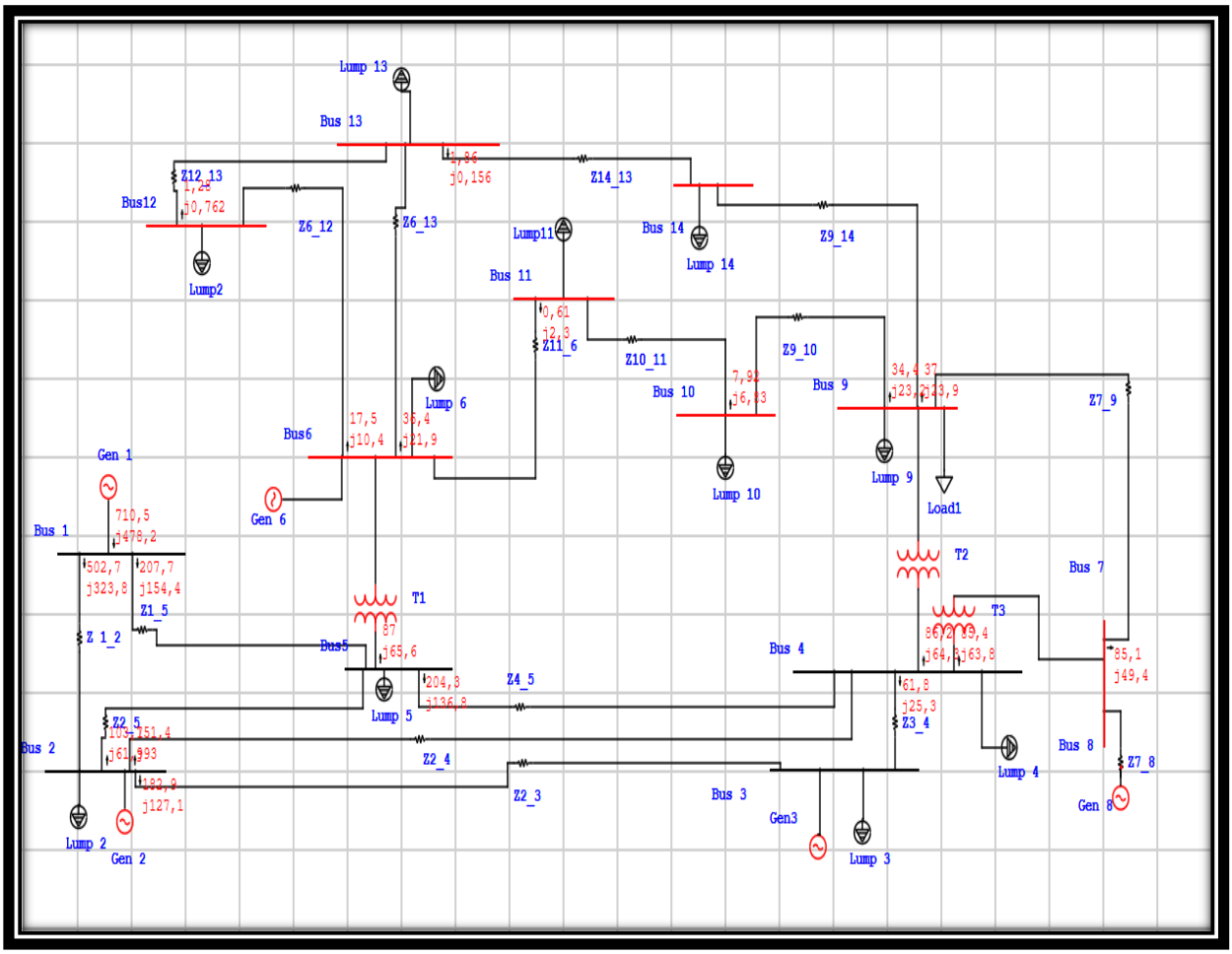


Fig (II.8) : Réseau IEEE 14 nœud avec évolutions des charges

Tableau (II.4) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud de chargés en fonction de l'évolution des charges.

LOAD FLOW REPORT

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID		V (pu)	pu	P(pu)	Q(pu)	p (pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	pu
*Bus 1		1	0.0	5.380	-0.3504	0	0	Bus 2	3,351	2,157	0,55
								Bus5	1,39	1,029	0,536
Bus 2		1.05	-0.368	0.417	1.9126	0.421	0.279	Bus 1	-3,356	-2,145	0,561
								Bus 3	1,238	0,848	0,546
								Bus 4	1,008	0,62	0,579
								Bus5	0,671	0,413	0,582
Bus 3		0.99	-0.885	0	1.2107	1.776	0.29	Bus 2	-1,227	-0,852	0,559
								Bus 4	-0,411	-0,167	0,617
Bus 4		0,91	-0.647	0	0	0,970	0.1	Bus 2	-1,007	-0,615	0,561
								Bus 3	0,412	0,170	0,616
								Bus5	-1,361	-0,911	0,554
								Bus 9	0,574	0,429	0,534
								Bus 7	0,570	0,43	0,534
Bus5		0,91	-0.602	0	0,82421	0,147	0,126	Bus 1	-0,390	-1,02	0,576
								Bus 2	-0,671	-0,422	0,583
								Bus 4	1,361	0,915	0,554
								Bus6	0,581		0,532
Bus6		1.03	-0.994	0	0	0.236	0,252	Bus12	0,118	0,07	0,587
								Bus 13	0,242	0,15	0,5847
								Bus 11	-0.610	-0,014	0,170
								Bus5	-0,584	-0,346	0,575
Bus 7		0,96	-0.904	0	0.5002	0	0	Bus 8	0.000	0.000	0.0
								Bus 9	0,577	0,323	0,586
								Bus 4	-0,576	-0,33	0,686
Bus 8		1,02	-0.902	0	0	0	0	Bus 7	0.000	0.000	0.0
Bus 9		0,91	-0.998	0	0	0.65	0.321	Bus 7	-0,578	-0,337	0,585
								Bus 10	0,232	0,153	0,565
								Bus 14	0,247	0,166	0,568
								Bus 4	-0,572	-0,331	0,589
Bus 10		0,91	-0.101	0	0	0.11	0,127	Bus 9	-0,232	-0,154	0,557
								Bus 11	0.053	0,055	0,504
Bus 11		0.98	-.1.04	0	0	0.05	0.045	Bus 10	-0,056	-0,054	0,508
								Bus6	0.610	0,016	0,170
Bus12		0.99	-1.121		0	0,142	0.034	Bus6	-0,117	-0,067	0,582
								Bus 13	0,009	0.762	0,589
Bus 13	0	0.95	-1.009	0	0	0,317	0.109	Bus6	-0,242	-0,155	0,583

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID		V(Pu)	ang(pu)	P(Pu)	Q(Pu)	P(Pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	pu
								Bus12	-0,0085	-0.762	0,86
								Bus 14	0.0124	0.156	0,997
Bus 14		0,90	-1.062	0	0	0,258	0,160	Bus 9	-0,246	-23.884	0,842
								Bus 13	-0,012	-0.156	0,997

D'après les résultats de tableau (II.6), on remarque clairement que les tensions dans les nœuds de charge 4, 5,9, 10, 14, sortent des écarts admissibles de tensions par contre le nœud 13 est rentré dans la limite admissible.

II.10. L'environnement de simulation (PSAT)

PSAT est une boîte à outils MATLAB pour l'analyse et le contrôle des systèmes d'alimentation électrique. PSAT comprend le flux de puissance, le flux de puissance de continuation, le flux de puissance optimal, l'analyse de la stabilité des petits signaux et la simulation dans le domaine temporel.

Toutes les opérations PSAT peuvent être évaluées au moyen d'interfaces utilisateur graphiques (GUI) et une bibliothèque basée sur SIMULINK fournit un outil convivial pour la conception de réseau [27]. PSAT le noyau est la routine de power flow, qui prend également en charge l'initialisation des variables d'état. Une fois que le power flow a été résolu, une analyse statique et / ou dynamique supplémentaire peut être effectuée. Optimal power flow (OPF)

- Continuation Power flow (CPF)
- Small signal stability analysis
- Time domain simulation

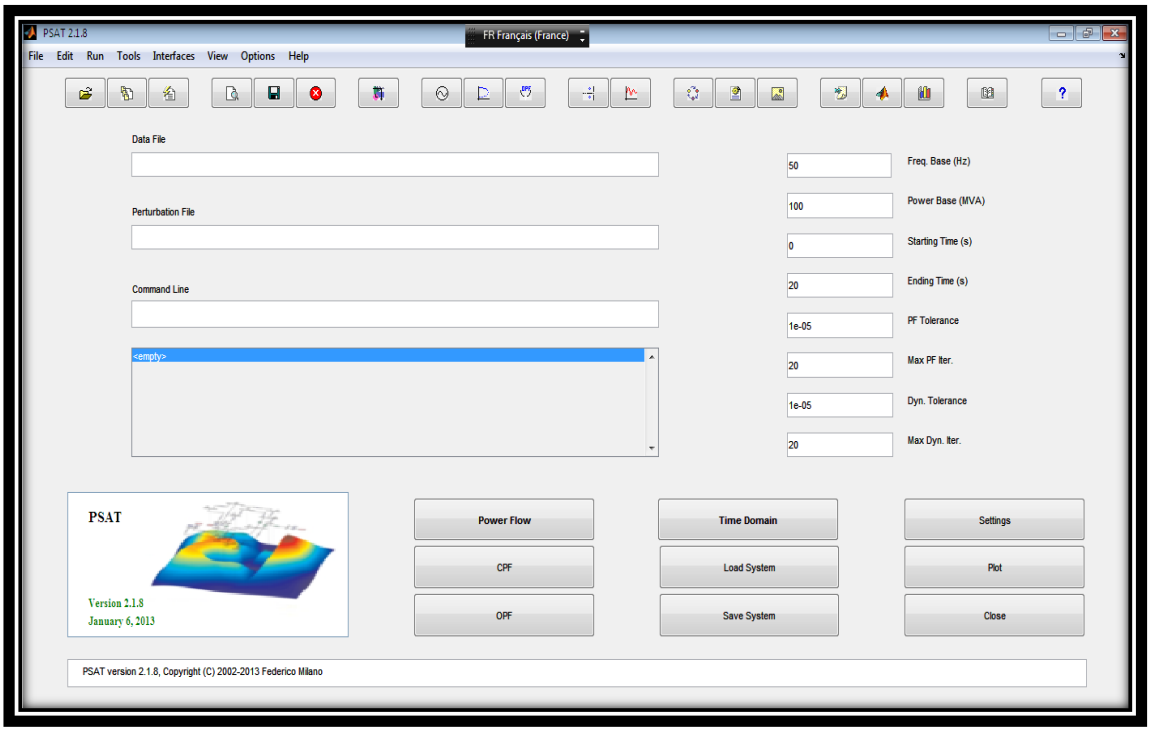


Fig (II.9) :la fenêtre principale du PSAT.

II.11. Vérification des nôtres résultats avec logiciel PSAT

II.11.1. Cas normal : Analyse du réseau IEEE 14 JB

Pour obtenu les résultats de l'écoulement de puissance à l'état initial poser les étapes suivant :

- Cliquer deux fois « data file »
- Choisir PSAT Similunk «. Mdl » puis « tests » et choisir modèle 14JB dans la bibliothèque de PSAT puis cliqué « load » pour charger le modèle.
- Cliquer « power flow » en suite Static rapport.

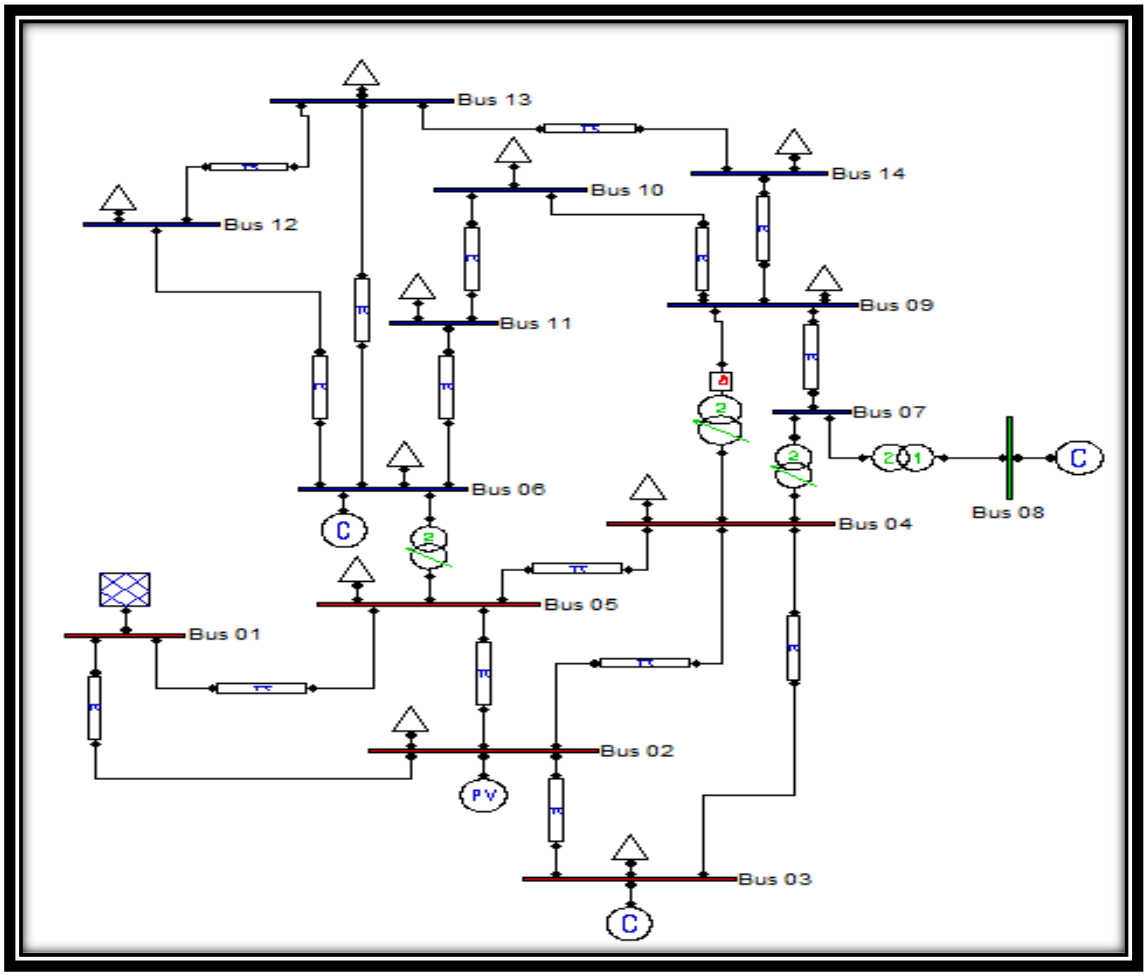


Fig (II.10) : réseau IEEE standard à 14 nœuds par PSAT.

Après le calcul de l'écoulement de puissance continu sur le réseau, on a prélevé les tensions et les déphasages dans chaque jeu de barre, les valeurs obtenues sont illustrées dans le tableau (II.5) :

Tableau (II.5) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE à 14 nœuds par PSAT

PSAT						
Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)	P load (p.u)	Q load (p.u)
Bus 01	1.06	0	2,326	-0.1467	0	0
Bus 02	1.045	-0.08696	0.4	0.4918	0.217	0.127
Bus 03	1.01	-0.22213	0	0.2749	0.942	0.19
Bus 04	1.0178	-0.17749	0	0	0.478	0.04
Bus 05	1.0154	-0.15324	0	0	0.076	0.016
Bus 06	1.07	-0.26161	0	0.2214	0.112	0.075
Bus 07	1.048	-0.24546	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.24546	0	0.24152	0	0
Bus 09	1.0327	-0.28133	0	0	0.295	0.166
Bus 10	1.0299	-0.28243	0	0	0.09	0.058
Bus 11	1.0469	-0.27426	0	0	0.035	0.018
Bus 12	1.0551	-0.27734	0	0	0.061	0.016
Bus 13	1.0432	-0.27888	0	0	0.135	0.058
Bus 14	1.0193	-0.29818	0	0	0.149	0.05

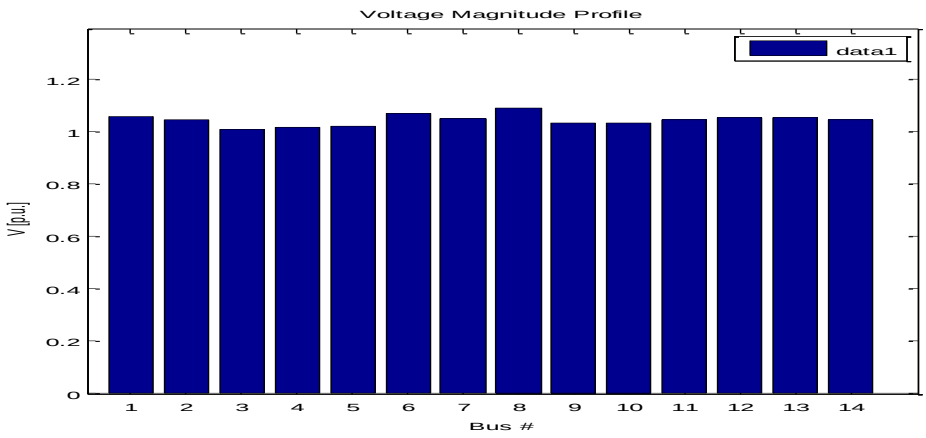


Fig (II.11) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau.

La figure précédente (figure II.11), montre les niveaux de tension dans les différents nœuds du réseau, nous remarquons que le réseau étudié est bien en régime équilibré et que les tensions sont acceptables.

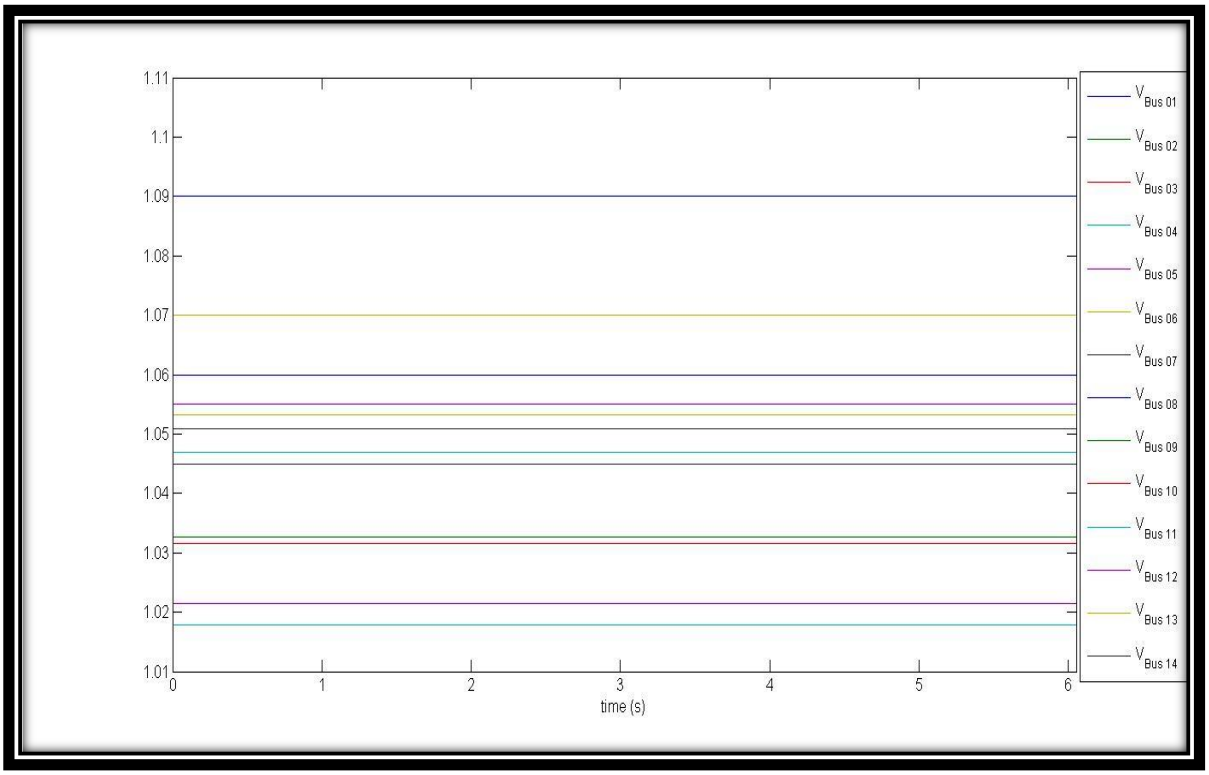


Fig (II.12) : les tensions dans chaque nœud du réseau par rapport le temps.

II.11.2. Réseau IEEE 14 nœud avec évolutions des charges

Après une évolution des charges de 10% par année on arrive à 100% des charges après 10 ans. On observe, dans ce cas la variation de tension de tous les nœuds de charge ainsi que l'écoulement de puissances dans les lignes.

Tableau (II.6) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau de chargés en fonctionnel l'évolution des charges.

PSAT						
Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)	P load (p.u)	Q load (p.u)
Bus 01	1.06	0	5.4622	-0.33097	0	0
Bus 02	1.045	-0.37497	0.4	1.8937	0.434	0.254
Bus 03	1.01	-0.86854	0	1.1659	1.884	0.38
Bus 04	0.90261	-0.683	0	0	0.956	0.08
Bus 05	0.90603	-0.59786	0	0	0.152	0.032
Bus 06	1.07	-0.97226	0	0.84642	0.224	0.15
Bus 07	0.9522	-0.89031	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.89031	0	0.49215	0	0
Bus 09	0.9073	-1.00375	0	0	0.59	0.332
Bus 10	0.9017	-1.01417	0	0	0.18	0.116
Bus 11	0.9727	-0.99203	0	0	0.07	0.036
Bus 12	1.0120	-1.02373	0	0	0.122	0.032
Bus 13	0.9493	-1.05792	0	0	0.27	0.116
Bus 14	0.8957	-1.06147	0	0	0.298	0.1

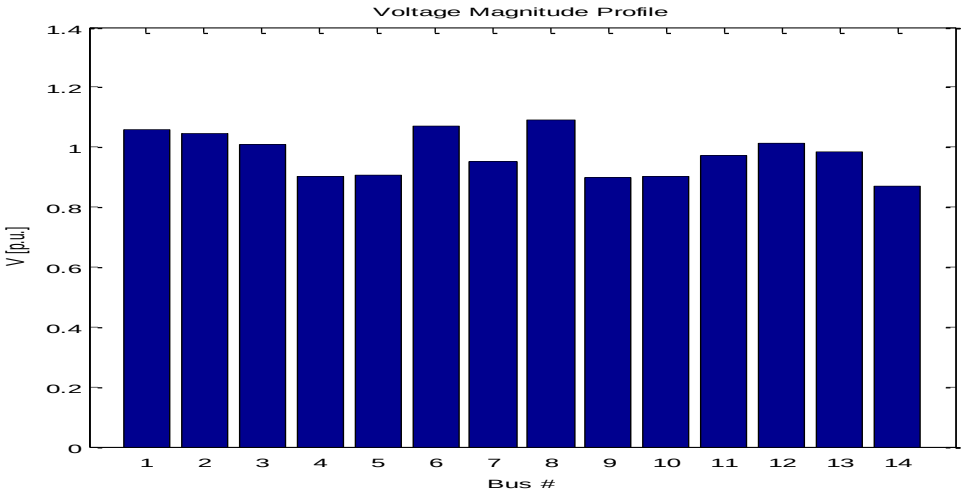


Fig (II.13) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

D'après les résultats de l'écoulement de puissance obtenus, et plus particulièrement les plans de tensions tableau (II.6), on remarque clairement que les tensions dans les nœuds de charge 4,5, 9, 10,13 et 14 sortent des écarts admissibles.

II.12. Conclusion

D'après nos résultats de simulation et plus particulièrement l'analyse des plans de tension des réseaux étudiés et de leurs écoulements de puissance, nous avons conclu que l'augmentation de la charge dans un réseau, engendre une augmentation des chutes de tensions ce dernier, cela est normal du fait que la circulation de l'énergie réactive est devenue importante.

Chapitre III :

Insertion Des Dispositifs FACTS pour amélioré le plan de tension

III.1. Introduction

Les développements dans le domaine des dispositifs FACTS ont ouvert la voie à l'atténuation du problème de réglage du plan de tension dans le réseau électrique.

Dans ce chapitre, nous avons installé deux dispositifs FACTS déférents de type SVC et STATCOM aux nœuds les plus faibles du système pour mieux améliorer le plant de tension après l'augmentation de la charge dans le réseau IEEE 14 nœud que nous avons étudié en chapitre II, Se fait à l'utilisation de logiciels PSAT et ETAP.

III.2. Rôles et fonctions d'un SVC

Il est reconnu depuis longtemps que le profil de la tension en régime permanant et la puissance transmissible peuvent être contrôlé aux niveaux désirés lorsque les conditions du système changent par la compensation shunt.

Le SVC injecte ou absorbe le courant de réseau via le point de raccordement, ce courant est variable selon la commande des convertisseurs, donc cette injection ou absorption du courant modifie la puissance active et réactive du réseau transmise dans la ligne. Dans les deux cas, la compensation shunt ajuste le fonctionnement du réseau par un contrôle de l'énergie réactive, selon les conditions de la charge [27].

III.3. Contrôle de la tension aux nœuds du réseau

Une autre fonction principale des SVC est le maintien de la tension aux nœuds du réseau à des valeurs acceptables (+/- 10%). Ce contrôle de tension est lié au contrôle de la puissance réactive ; l'injection de cette puissance augmente la tension, et l'absorption de la puissance le fait abaisser.

III.4. Résultats des simulations par Logiciel ETAP

III.4.1. Utilisation d'un seul SVC au nœud 14

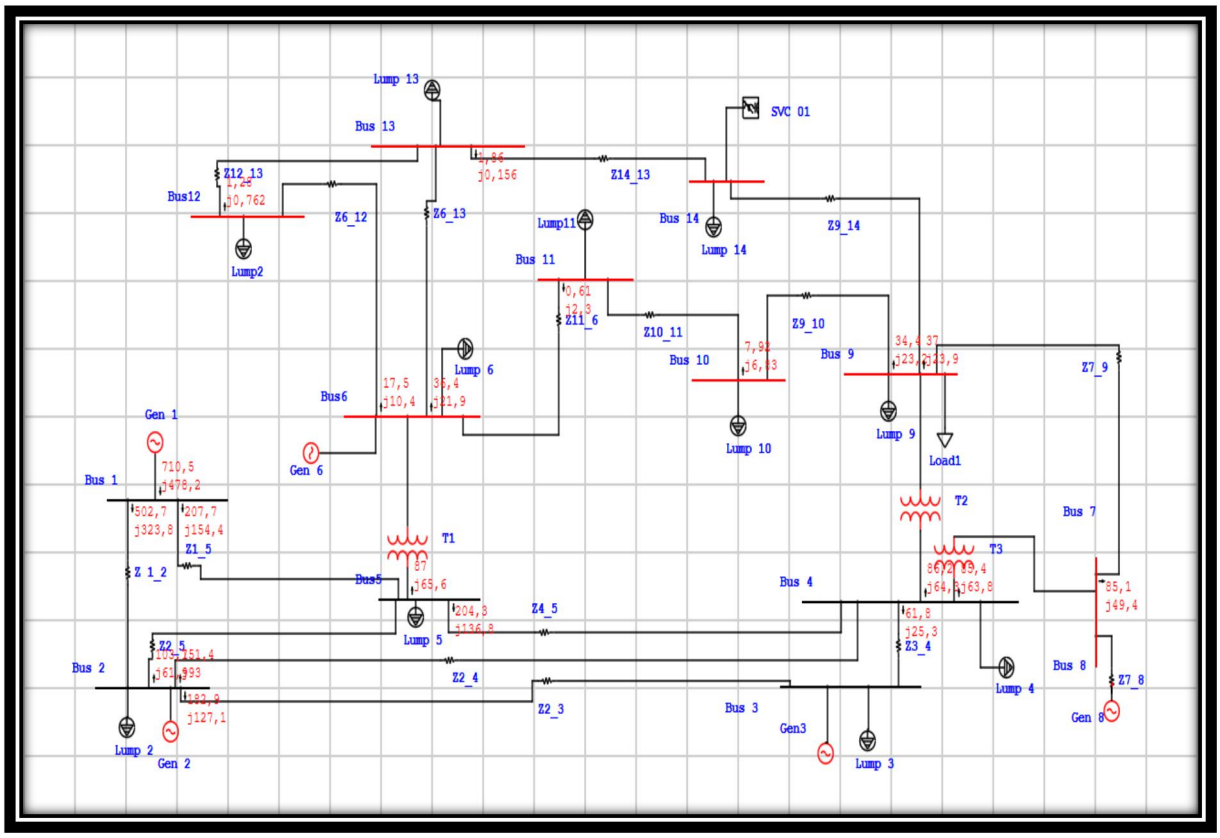


Fig (III.1) : Le réseau IEEE14 nœud en insertion un SVC au nœud 14

Tableau (III. 1) : rapport de réseau IEEE14 nœud en insertion un SVC au nœud 14

LOAD FLOW REPORT

Bus	Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID	V(pu)	ang(pu)	P(Pu)	Q(Pu)	P(Pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	pu
*Bus 1	1	0.0	5,502	-0.415	0	0	Bus 2	3,372	1,445	0,919
							Bus 5	1,43	0,638	0,913
Bus 2	1.03	-0.1	0,5	1.817	0.463	0.272	Bus 1	-3,368	-0,433	0,920
							Bus 3	1,227	0,701	0,869
							Bus 4	1,017	0,310	0,957
							Bus 5	0,701	0,162	0,974
Bus 3	0.99	-0.3	0	1.173	1.842	0.34	Bus 2	-1,225	-0,701	0,871
							Bus 4	-0,415	-0,320	0,787
Bus 4	0, 92	-0.3	0	0	0.947	0.1	Bus 2	-1,017	-0,301	0,958
							Bus 3	0,406	0,319	0,787
							Bus 5	-1,385	-0,642	0,907
							Bus 9	0,603	0,062	0,994
							Bus 7	0,654	0,061	0,994
Bus5	0,92	-0.2	0	0	0.174	0.04	Bus 1	-1,422	-0,630	0,915
							Bus 2	-0,675	-0,161	0,974
							Bus 4	1,384	0,643	0,907
							Bus 6	0,602	0,065	0,994
Bus6	1.02	-0.103	0	0.630	0,248	0.2	Bus 12	0,128	-0,036	-0,964
							Bus 13	0,248	0,024	0,995
							Bus 11	-0.540	1.594	-0,321
							Bus 5	-0,6003	0.617	1
Bus 7	0,98	-0.912	0	0	0	0	Bus 8	0.000	0.000	0.0
							Bus 9	0,586	-0.556	1
							Bus 4	-0,587	0.556	1
Bus 8	1.01	0.911	0	0.413	0	0	Bus 7	0.000	0.000	0.0
Bus 9	0.96	-0.963	0	0	0.6	0.34	Bus 7	-0,585	0.643	1
							Bus 10	0,234	-0,161	-,0824
							Bus 14	0,246	-0,052	-0,979
							Bus 4	-0,591	0.666	1
Bus 10	0,98	-1.022	0	0	0.2	0.120	Bus 9	-0,235	0,161	-0,824
							Bus 11	0,0547	-0,124	-0,395
Bus 11	0.98	-1.08	0	0	0.03	0.04	Bus 10	-0,532	0,131	-0,395
							Bus 6	0.540	-1.594	-0,321
Bus12	1.01	-0.997	0	0	0.130	0.036	Bus 6	-0,127	5.287	-0,964

Bus	Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID	V(pu).	Ang(pu)	P(Pu)	Q(Pu)	P(Pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	PU
							Bus12	-2.537	-0,044	0,352
							Bus 14	2.805	0,063	0,282
Bus 14	1.01	-1.1	0	0,354	0,35	0,18	Bus 9	-0,247	0,052	-0,978
							Bus 13	-2.803	-0,063	0,282

- A partir du tableau (III.1), il est clair que le SVC au niveau du nœud 14 donne le plus important plan de tension ce que le définit comme étant l'emplacement optimale pour améliorer le plan de tension. Cet emplacement peut s'expliquer par le fait que, le nœud 14 représente l'un des nœuds les plus sensibles du réseau IEEE14 nœuds.

Ce pendant, on constante qu'il Ya encore une diminution de la tension aux nœuds 4,5.

III.4.2. Utilisation de deux SVC (aux nœuds 14 et 05)

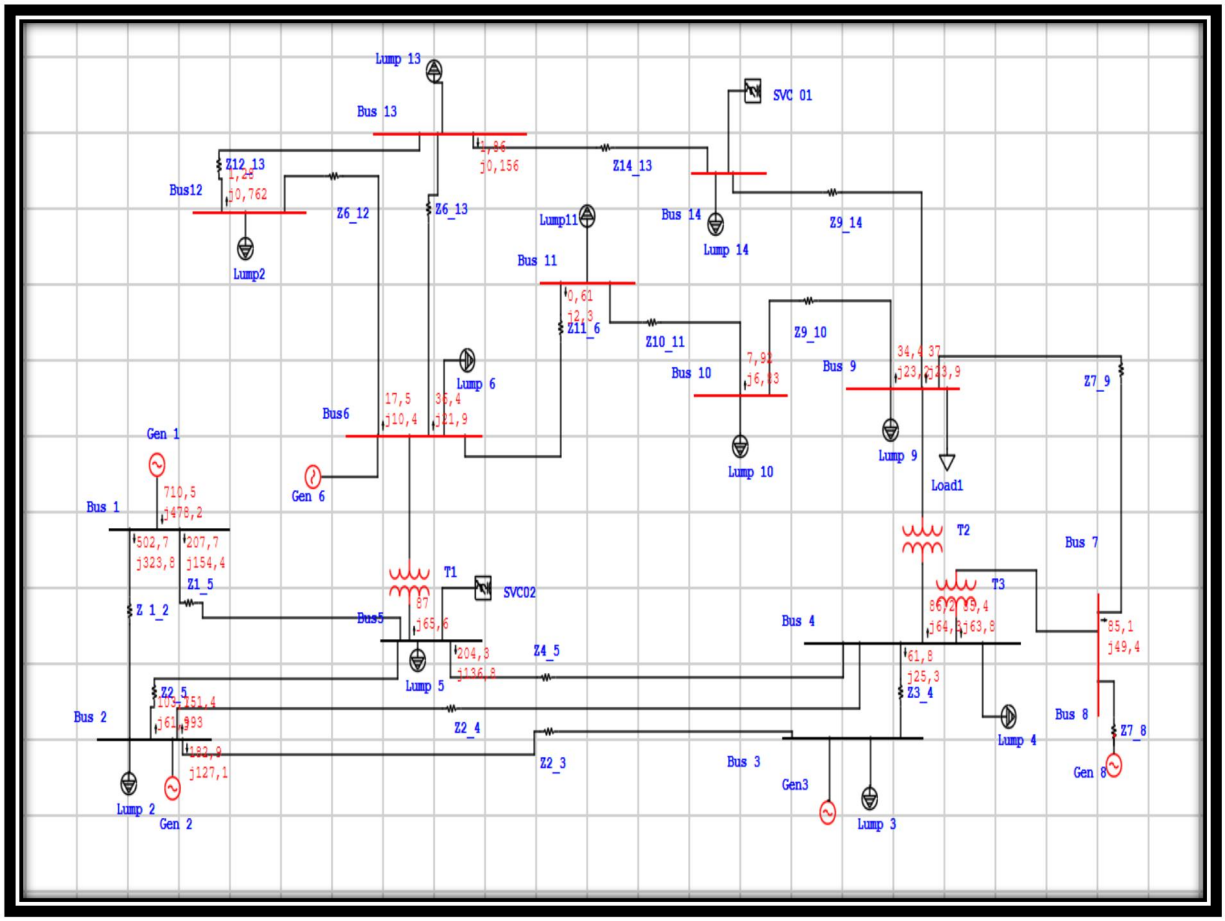


Fig (III.2) : Le réseau IEEE14 nœud en insertion un SVC au nœud 14 et 5

Tableau (III.2) : rapport de réseau IEEE14 nœud en insertion un SVC au nœud 14 et 5

LOAD FLOW REPORT

Bus	Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID	V(pu)	ang(pu)	P(Pu)	Q(Pu)	P(Pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	pu
*Bus 1	1	0.0	5,502	-0.415	0	0	Bus 2	3,372	1,445	0,919
							Bus 5	1,43	0,638	0,913
Bus 2	1.03	-0.1	0,5	1.817	0.463	0.272	Bus 1	-3,368	-0,433	0,920
							Bus 3	1,227	0,701	0,869
							Bus 4	1,017	0,310	0,957
							Bus 5	0,701	0,162	0,974
Bus 3	0.99	-0.3	0	1.173	1.842	0.34	Bus 2	-1,225	-0,701	0,871
							Bus 4	-0,415	-0,320	0,787
Bus 4	0,985	-0.3	0	0	0.947	0.1	Bus 2	-1,017	-0,301	0,958
							Bus 3	0,406	0,319	0,787
							Bus 5	-1,385	-0,642	0,907
							Bus 9	0,603	0,062	0,994
							Bus 7	0,654	0,061	0,994
Bus5	1,03	-0.2	0	0	0.174	0.04	Bus 1	-1,422	-0,630	0,915
							Bus 2	-0,675	-0,161	0,974
							Bus 4	1,384	0,643	0,907
							Bus 6	0,602	0,065	0,994
Bus6	1.02	-0.103	0	0.630	0,248	0.2	Bus 12	0,128	-0,036	-0,964
							Bus 13	0,248	0,024	0,995
							Bus 11	-0.540	1.594	-0,321
							Bus 5	-0,6003	0.617	1
Bus 7	0,98	-0.912	0	0	0	0	Bus 8	0.000	0.000	0.0
							Bus 9	0,586	-0.556	1
							Bus 4	-0,587	0.556	1
Bus 8	1.01	0.911	0	0.413	0	0	Bus 7	0.000	0.000	0.0
Bus 9	0.96	-0.963	0	0	0.6	0.34	Bus 7	-0,585	0.643	1
							Bus 10	0,234	-0,161	-,0824
							Bus 14	0,246	-0,052	-0,979
							Bus 4	-0,591	0.666	1
Bus 10	0,98	-1.022	0	0	0.2	0.120	Bus 9	-0,235	0,161	-0,824
							Bus 11	0,0547	-0,124	-0,395
Bus 11	0.98	-1.08	0	0	0.03	0.04	Bus 10	-0,532	0,131	-0,395
							Bus 6	0.540	-1.594	-0,321
Bus12	1.01	-0.997	0	0	0.130	0.036	Bus 6	-0,127	5.287	-0,964
							Bus 13	0,017	6.741	0,352
Bus 13	1	-1.005	0	0	0.32	0.119	Bus 6	-0,246	-3.602	0,995

Bus	Voltage		Generation		Load		Load Flow			
ID	V(pu).	Ang(pu)	P(Pu)	Q(Pu)	P(Pu)	Q(Pu)	ID	pu	pu	PU
							Bus12	-2.537	-0,044	0,352
							Bus 14	2.805	0,063	0,282
Bus 14	1.01	-1.1	0	0,354	0,35	0,18	Bus 9	-0,247	0,052	-0,978
							Bus 13	-2.803	-0.063	0.282

III.5. Résultats des simulations par Logiciel PSAT

III.5.1. Utilisation d'un seul SVC

Après l'emplacement d'un SVC dans les jeux de barre plus sensible (14), on obtient les résultats suivant :

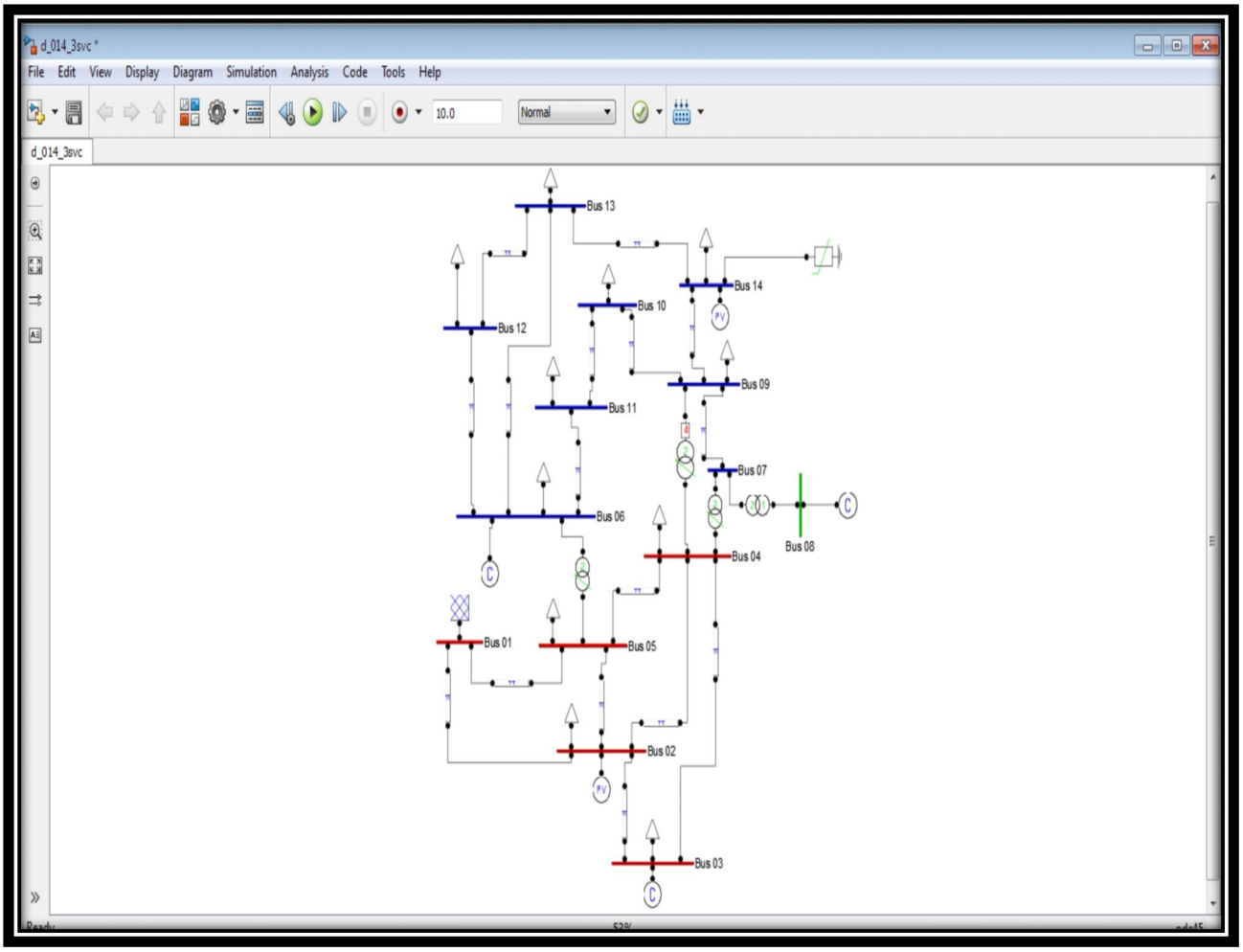


Fig (III.3) : Le réseau IEEE14 nœud en insertion un SVC au nœud 14

Tableau (III.3) : rapport des tensions en insertion un SVC au nœud 14 (cas 1).

PSAT						
Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)	P load(p.u)	Q load (p.u)
Bus 01	1.06	0	5.4542	-0.34246	0	0
Bus 02	1.045	-0.3554	0.4	1.8544	0.434	0.254
Bus 03	1.01	-0.8397	0	1.1428	1.884	0.38
Bus 04	0.913	-0.6687	0	0	0.956	0.08
Bus 05	0.914	-0.5739	0	0	0.152	0.032
Bus 06	1.07	-0.9358	0	0.62551	0.224	0.15
Bus 07	0.979	-0.8729	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.8729	0	0.42104	0	0
Bus 09	0.950	-0.9778	0	0	0.59	0.332
Bus 10	0.946	-0.9870	0	0	0.18	0.116
Bus 11	0.995	-0.9671	0	0	0.07	0.036
Bus 12	1.030	-0.9873	0	0	0.122	0.032
Bus 13	1.020	-1.0005	0	0	0.27	0.116
Bus 14	1.025	-1.0953	0	0.32321	0.298	0.1

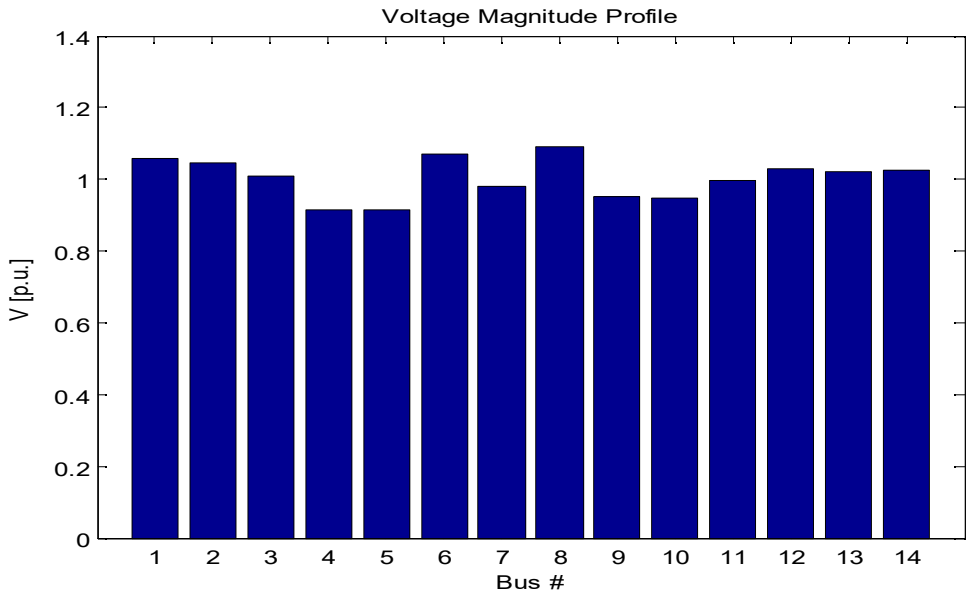


Fig (III.4) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau (cas1).

- Le tableau (III.3) montre l'évolution des tensions nodales dans le cas où nous avons un seul SVC installé dans le réseau nœud14, il y a des améliorations des tensions nodales qui sont dans limites admissibles, il y a aussi des nœuds ou les tensions sont encore hors des limites admissibles (nœud 4, 5,10).

III.5.2 Utilisation de deux SVC

Nous avons placé les deux SVC dans d4autres emplacements différents aux nœuds 14 et 05 :

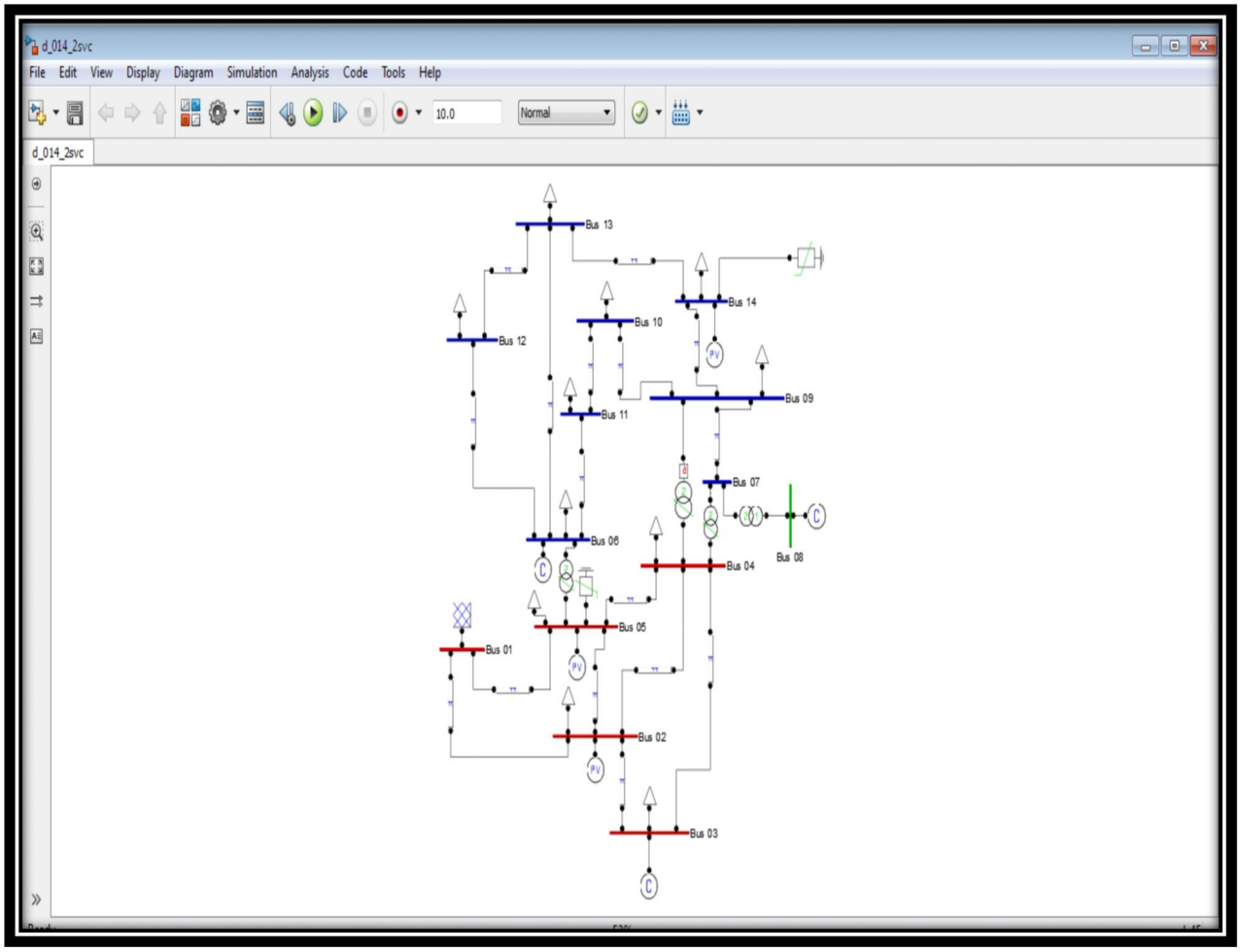


Fig (III.5) : Le réseau IEEE14 nœud en insertion un SVC au nœud 14 et 5

Tableau (III.4) : rapport des tensions en insertion un SVC aux nœuds 14 et 5 (cas 2).

PSAT						
Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)	P load (p.u)	Q load (p.u)
Bus 01	1.06	0	5.4313	-0.54444	0	0
Bus 02	1.045	-0.3387	0.4	1.3928	0.434	0.254
Bus 03	1.01	-0.7927	0	0.96467	1.884	0.38
Bus 04	0.983	-0.6393	0	0	0.956	0.08
Bus 05	1.025	-0.5660	0	1.0941	0.152	0.032
Bus 06	1.07	-0.8806	0	0.39007	0.224	0.15
Bus 07	1.0105	-0.8260	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.8260	0	0.34718	0	0
Bus 09	0.977	-0.9266	0	0	0.59	0.332
Bus 10	0.969	-0.9347	0	0	0.18	0.116
Bus 11	1.007	-0.9137	0	0	0.07	0.036
Bus 12	1.030	-0.9312	0	0	0.122	0.032
Bus 13	1.021	-0.9434	0	0	0.27	0.116
Bus 14	1.025	-1.032	0	0.28296	0.298	0.1

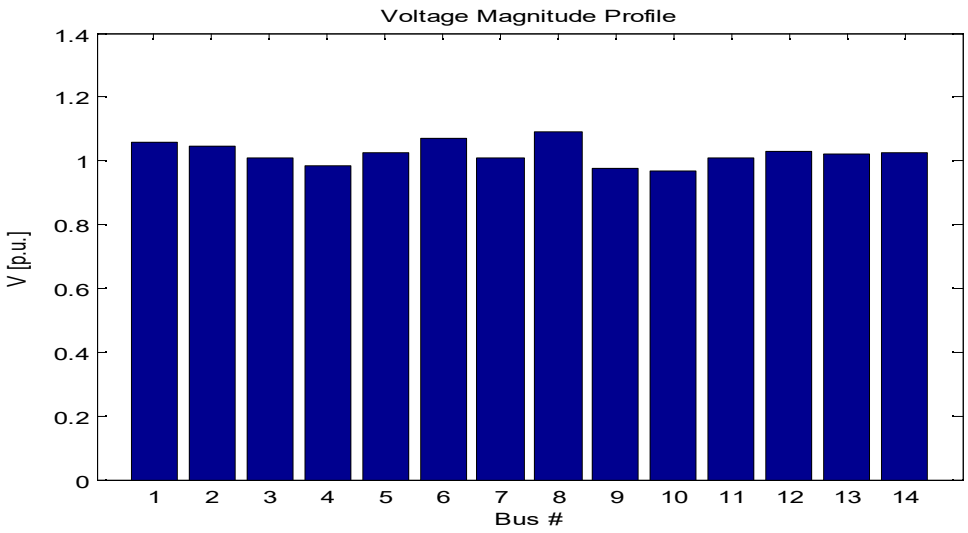


Fig (III.6) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau. (Cas 2)

- D'après le tableau précédant, il clair que le plan de tension s'est amélioré dans le cas d'intégration d'un SVC dans les jeux de barre (14-05), et les pertes actives totales diminuent légèrement par rapport à l'état sans compensation. On constate que le profil de tension est dans les normes admissibles.

III.6. Apport du FACTS shunt (STATCOM)

L'influence du système FACTS shunt « STATCOM » sur le profil de la tension est une image de son influence sur le transit de l'énergie réactive dans le réseau étudié.

III.6.1 Utilisation d'un seul STATCOM

Le STATCOM est implanté dans le nœud de charge ou la tension sort des écarts admissibles de tensions. Pour le réseau standard IEEE à 14 nœuds, on a vu précédemment que le nœud concerné est le nœud 14 :

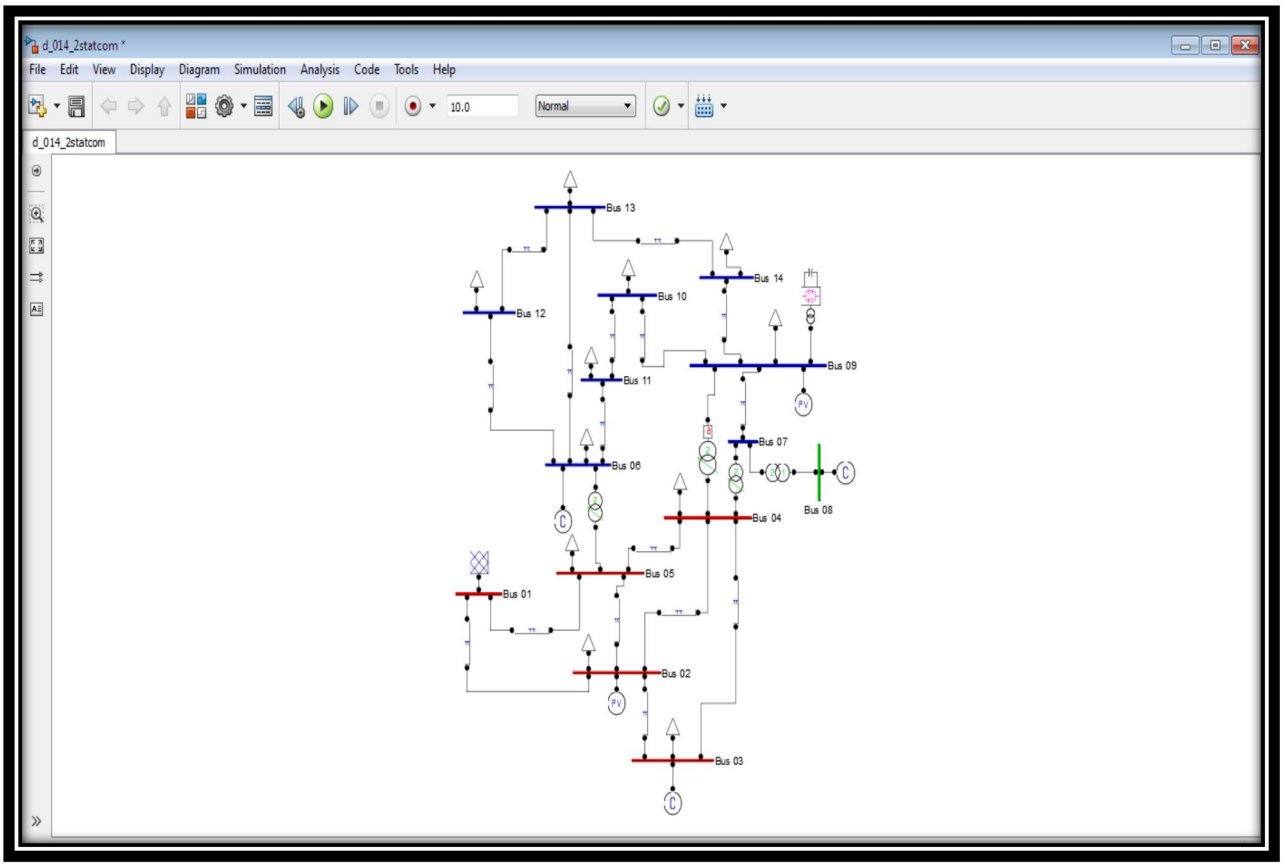


Fig (III.7) : Le réseau IEEE14 nœud en insertion un STATCOM au nœud 14.

Tableau (III.5) : rapport des tensions en insertion un STATCOM aux nœuds 14 (cas 3).

PSAT						
Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)	P load (p.u)	Q load (p.u)
Bus 01	1.06	0	5.4432	-0.36742	0	0
Bus 02	1.045	-0.376	0.4	1.7701	0.434	0.254
Bus 03	1.01	-0.8588	0	1.092	1.884	0.38
Bus 04	0.9132	-0.6868	0	0	0.956	0.08
Bus 05	0.9141	-0.5901	0	0	0.152	0.032
Bus 06	1.07	-0.9517	0	0.54038	0.224	0.15
Bus 07	0.9836	-0.8917	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.8917	0	0.26264	0	0
Bus 09	0.9589	-0.9961	0	0.66969	0.59	0.332
Bus 10	0.9537	-1.0048	0	0	0.18	0.116
Bus 11	0.9994	-0.9840	0	0	0.07	0.036
Bus 12	1.0339	-1.004	0	0	0.122	0.032
Bus 13	1.0266	-1.0191	0	0	0.27	0.116
Bus 14	1.051	-1.1204	0	0	0.298	0.1

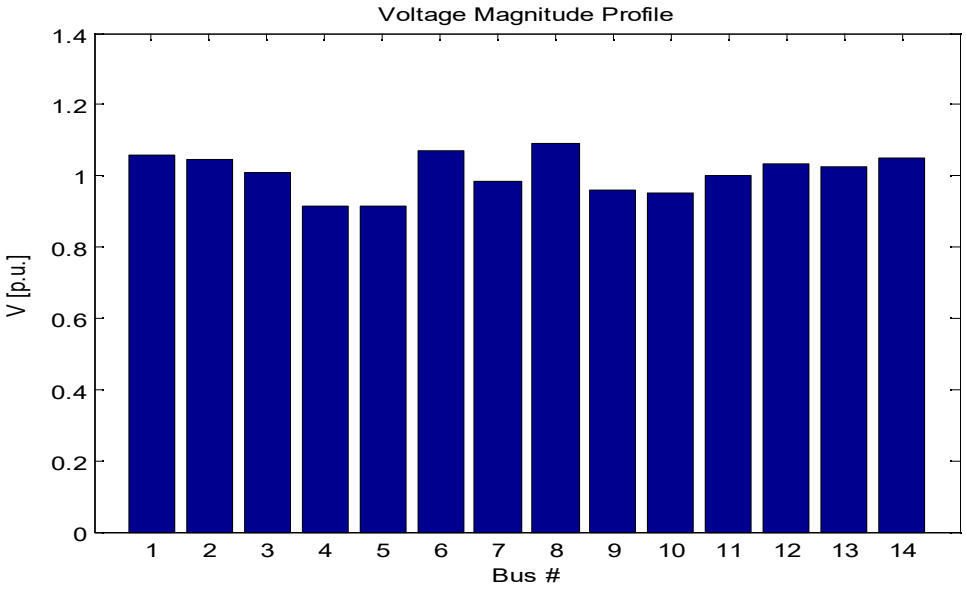


Fig (III.8) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau. (Cas 3)**.**

D'après le tableau (III.5), il parait clairement que le STATCOM améliore le profil de tension du nœud où il est implanté à savoir le nœud 14. En effet, l'amplitude de la tension est rentrée dans les limites admissibles.

III.6.2 Utilisation de deux STATCOM

Nous avons placé les deux STATCOM dans emplacement différent afin de pouvoir retrouver un positionnement idéal pour nos systèmes de compensation aux nœuds 14 et 05 :

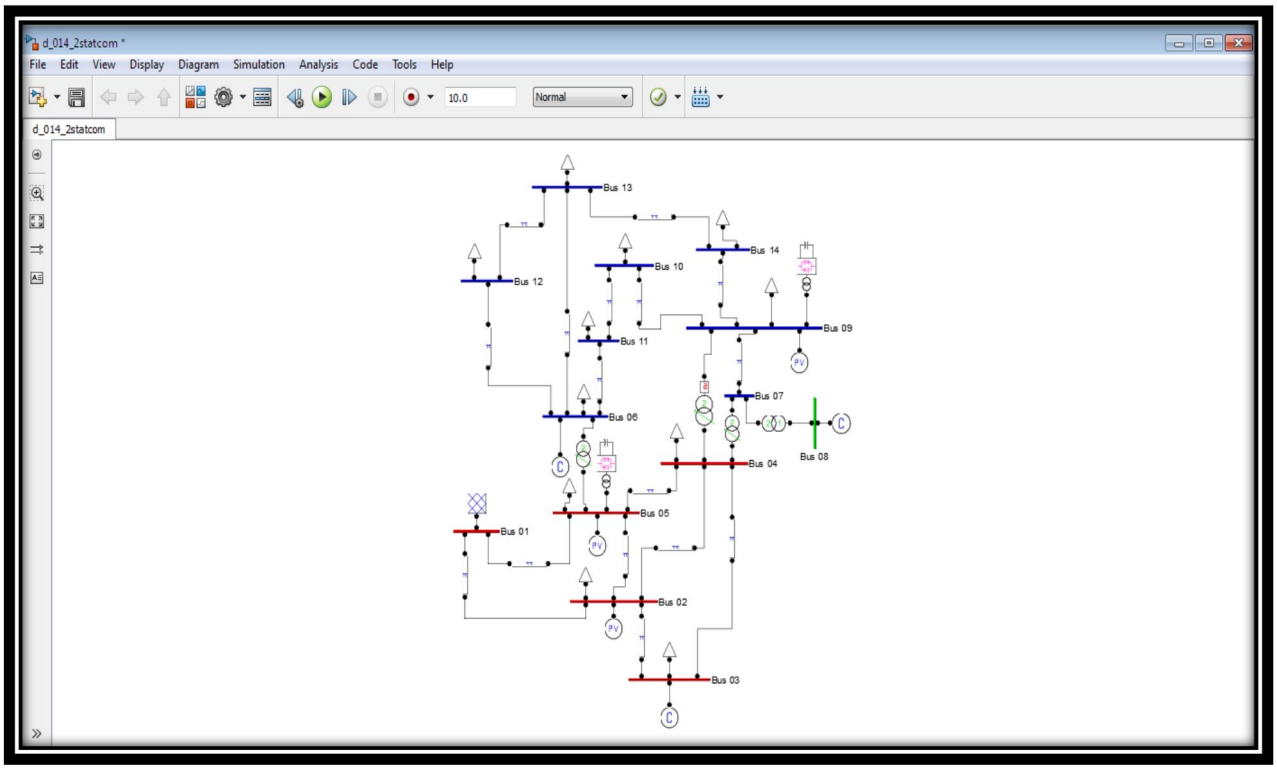


Fig III.9) : Le réseau IEEE14 nœud en insertion un STATCOM aux nœuds 14 et 5.

Tableau (III.6) : rapport des tensions en insertion un STATCOM aux nœuds 14 et 5 (cas 4).

PSAT						
Bus	V (p.u)	Phase (rad)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)	P load (p.u)	Q load (p.u)
Bus 01	1.06	0	5.4281	-0.65488	0	0
Bus 02	1.045	-0.3554	0.4	1.127	0.434	0.254
Bus 03	1.01	-0.8015	0	0.84819	1.884	0.38
Bus 04	1.0012	-0.6515	0	0	0.956	0.08
Bus 05	1.051	-0.5812	0	1.6398	0.152	0.032
Bus 06	1.07	-0.8852	0	0.23735	0.224	0.15
Bus 07	1.0218	-0.8350	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.8350	0	0.20167	0	0
Bus 09	0.9921	-0.9342	0	0.49673	0.59	0.332
Bus 10	1.9817	-0.9417	0	0	0.18	0.116
Bus 11	1.0139	-0.9197	0	0	0.07	0.036
Bus 12	1.0339	-0.9363	0	0	0.122	0.032
Bus 13	1.027	-0.9502	0	0	0.27	0.116
Bus 14	1.051	-1.0437	0	0	0.298	0.1

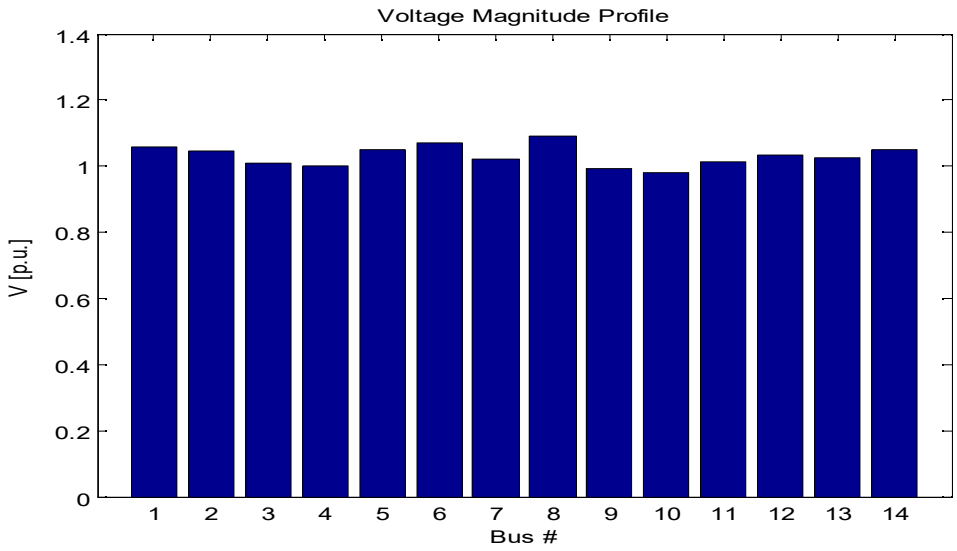


Fig (III.10) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau. (Cas 4)

- Nous remarquons que le compensateur shunt ne s'est pas limité uniquement à la Compensation du nœud 14 mais son action s'est élargie sur l'ensemble des nœuds du réseau et particulièrement les nœuds voisins. Cet effet est l'une des caractéristiques des systèmes FACTS shunt qui soutiennent la tension de façon homogène sur l'ensemble du réseau.
- Par ailleurs, l'amplitude de la tension du nœud 14 est toujours inférieure à 1,0 pu pour un réseau surchargé. Afin de soutenir ce nœud et améliorer l'état global du réseau, le STATCOM adapte sa tension V sh qui doit être supérieure à celle du nœud 14 et varie en fonction du niveau de tension dans le but de fournir la puissance réactive suffisante.

III.7. Conclusion

Grace aux systèmes FACTS (SVC, STATCOM) nous avons amélioré le plan de tension des nœuds de charge qui étaient hors des écarts admissible et des autres nœuds et cela à cause de la réduction du transit de la puissance réactive dans le réseau, engendrant une réduction des chutes des tensions globales et diminution des pertes de puissances totales d'où un meilleur rendement.

Chapitre IV :

Impact des Court-circuit sur Le plan de la tension

IV.1. Introduction

Les court-circuit représentent des incidents électriques majeurs ayant des répercussions significatives sur les systèmes de distribution d'énergie. Leur survenue peut entraîner des variations brusques de tension, des dommages aux équipements et une perturbation du service. Ce chapitre se propose d'explorer en profondeur l'impact des court-circuit sur le plan de tension,

IV.2. Définition d'un court-circuit

Un court-circuit se produit généralement à la fermeture d'un circuit électrique sur une impédance nulle ou de faible valeur. Le cas le plus courant est celui où se produit un court-circuit entre une ou plusieurs phases d'un réseau et la terre. Un autre cas est la connexion accidentelle entre deux phases avec une impédance négligeable. Les courants de court-circuit sont caractérisés par leurs valeurs très élevées par rapport au courant nominal et qui nécessitent, par conséquent un débranchement immédiat.

IV.3. Les différents types du court- circuit

Les court-circuit engendrent des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tensions différentes ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituants le réseau. Les court-circuit sont de natures et de types différents (Figure. IV.1) :

Ceux qui sont du type symétrique sont :

- Court- circuit triphasé entre les trois phases sans liaison à la terre.
- Court- circuit triphasé entre les trois phases avec liaison à la terre.

Et ceux qui sont asymétriques sont :

- Court- circuit biphasé entre deux phases sans liaison à la terre.
- Court- circuit biphasé entre deux phases avec liaison à la terre.
- Court- circuit monophasé entre phases avec liaison à la terre.

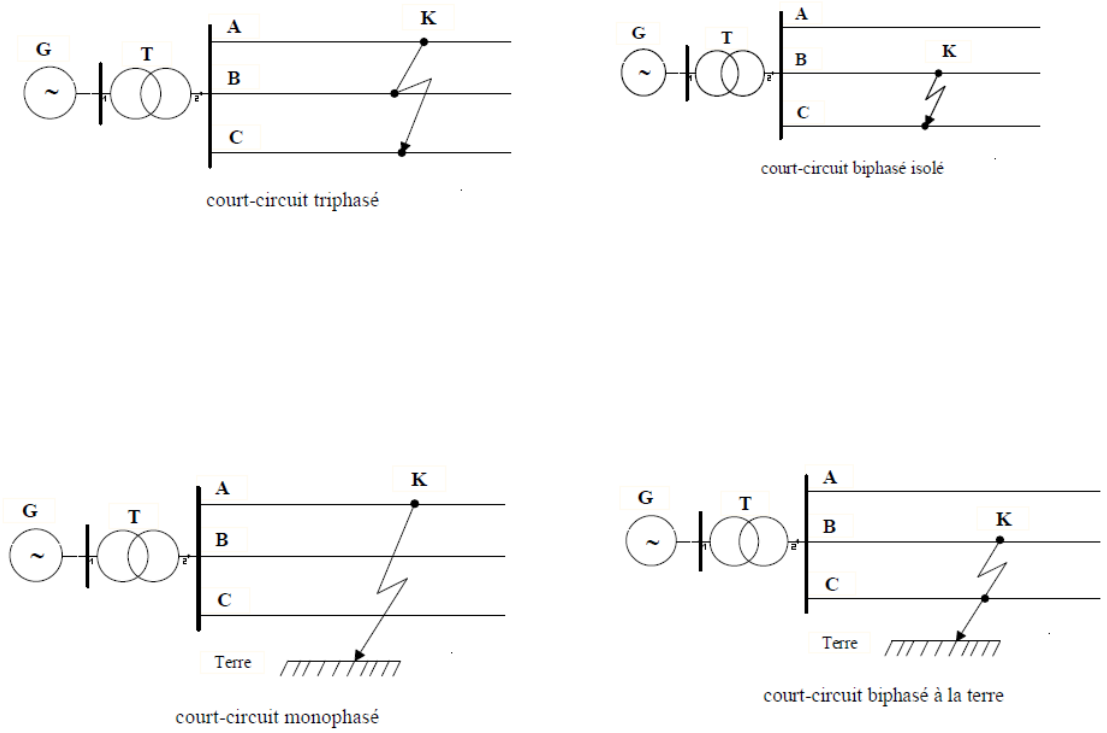


Fig (IV.1): Différents types des courts-circuits

IV.4. Caractéristique des courts circuits

Un défaut est toujours le résultat de défaillance d'isolement ; Si le défaut d'isolement est durable, le court- circuit est dit permanent dans le cas contraire est appelé fugitif.

Un court- circuit peut être :

- **Intermittent** : Lorsqu'il se répète à intervalle très rapproché, c'est le cas par exemple

D'un court- circuit dû au balancement des conducteurs ou de branches sous l'effet d'un vent violent.

- **Semi -permanent** : Lorsqu'il persiste pendant un certain temps puis disparaît avec sa cause, C'est le cas, par exemple, d'un défaut dû à la croissance de la végétation, il disparaît lorsque Celle-ci est consumée, un bon élagage permet d'éviter ce type d'incident.
- **Auto -extincteur** : Lorsqu'il disparaît de lui-même. On rencontre ce type de court-circuit sur les réseaux HT en cas de défaut monophasé.

- **Evolutif** : Il arrive également que la nature du court-circuit change rapidement à cause des mouvements désordonnés des conducteurs provoqués par la chute d'un arbre ou par les forces électrodynamiques dues aux courants de court-circuit [28].

IV.5. Répartition de tension sur le réseau IEEE 14 nœud suite a un défaut

IV.5.1. Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 01

Nous provoquons un court-circuit dans le jeu de barre 12, nous obtenons des résultats tableau (IV.1) :

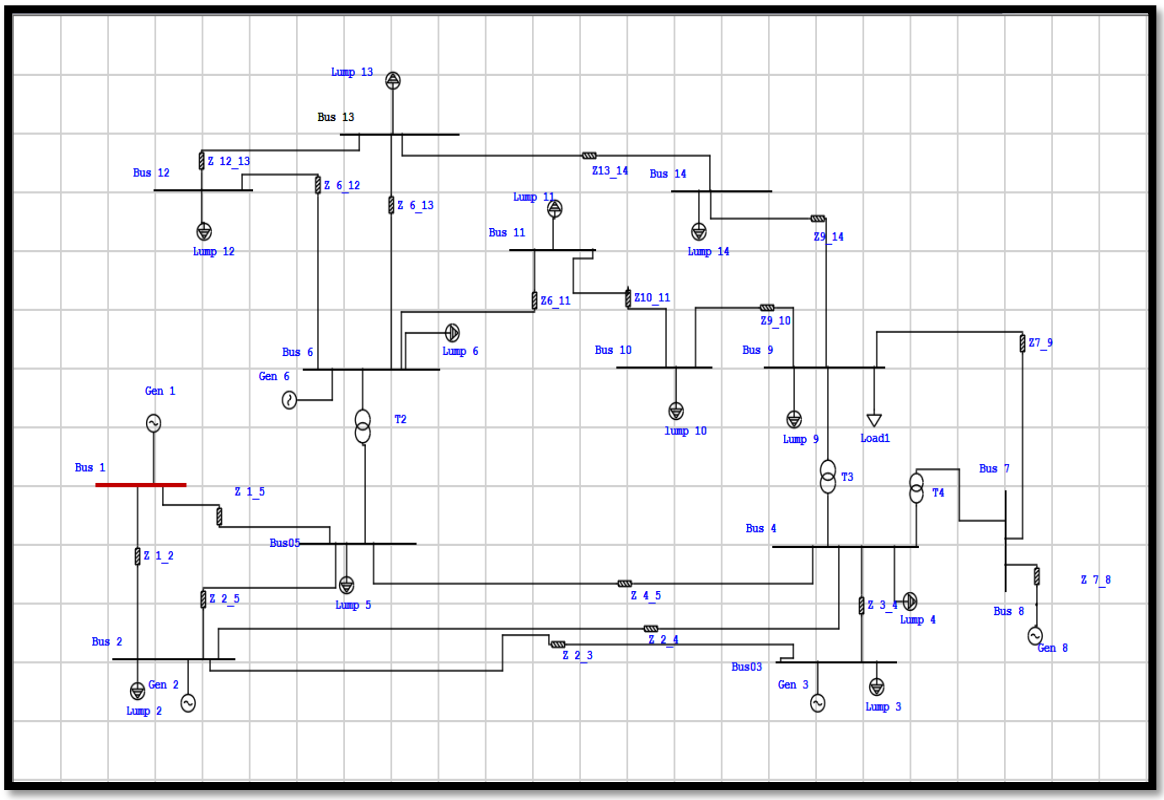


Fig (IV.2) : Topologie du réseau IEEE 14 nœud avec défaut au nœud 01

Tableau (IV.1) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 01

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 1**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 75.276 kA Method C
Steady State = 19.555 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 1	Total	0.00	14.5	29.286
Bus 2	Bus 1	1.20	11.5	17.812
Bus05	Bus 1	1.66	30.5	6.645
Gen 1	Bus 1	100.00	19.0	4.838
Bus03	Bus 2	2.53	24.4	5.981
Bus 4	Bus 2	1.95	7.0	3.696
Bus05	Bus 2	1.66	5.6	2.280
Gen 2	Bus 2	100.00	18.0	4.781
Lump 2	Bus 2	100.00	9.7	1.098
Bus 4	Bus05	1.95	13.5	6.106
Bus 6	Bus05	34.14	18.2	2.464
Lump 5	Bus05	100.00	9.7	0.338

Commentaire :

- La tension au nœud 01 chute drastiquement jusqu'à zéro en raison de la nature et de la gravité du court-circuit.
- Les nœuds adjacents, comme les nœuds 05 et 02, montrent également une chute de tension significative, bien que moins marquée qu'au nœud 01.
- Les nœuds plus éloignés subissent des variations de tension plus faibles, mais il est important de noter que l'effet reste perceptible selon la configuration du réseau et les paramètres de la ligne de transmission.

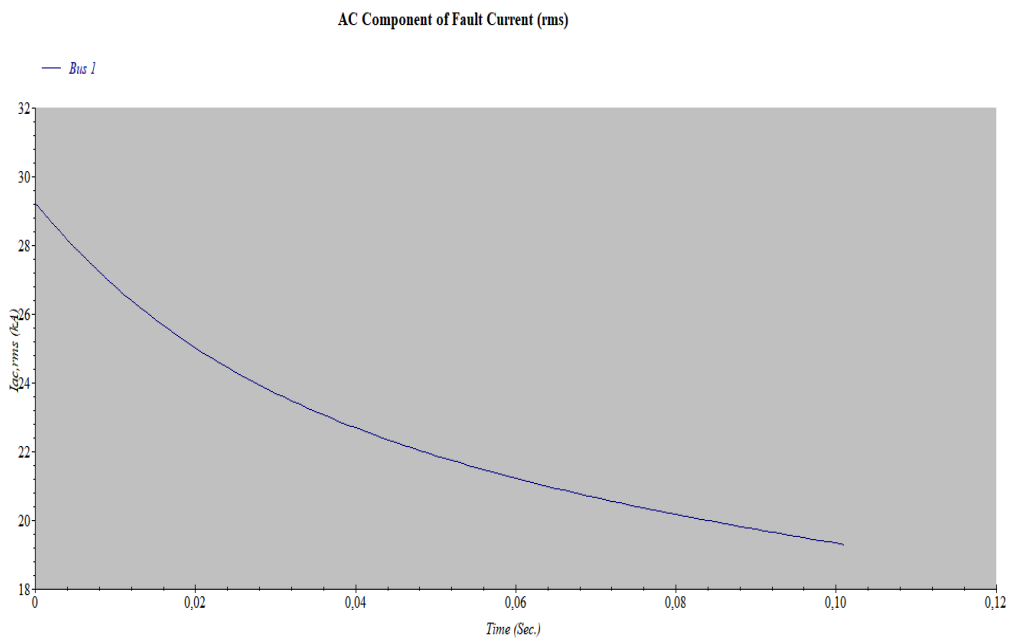


Fig (IV.3) : Le courant traversant le nœud 01 en cas de court-circuit.

Augmentation du courant au nœud défaillant : Le courant au nœud 01 augmente considérablement en raison d'un court-circuit. Ce courant de défaut atteint des niveaux très élevés, dépassant largement les courants de fonctionnement normaux.

IV.5.2. Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 09

Nous provoquons un court-circuit dans le jeu de barre 09, nous obtenons des résultats tableau (IV.2) :

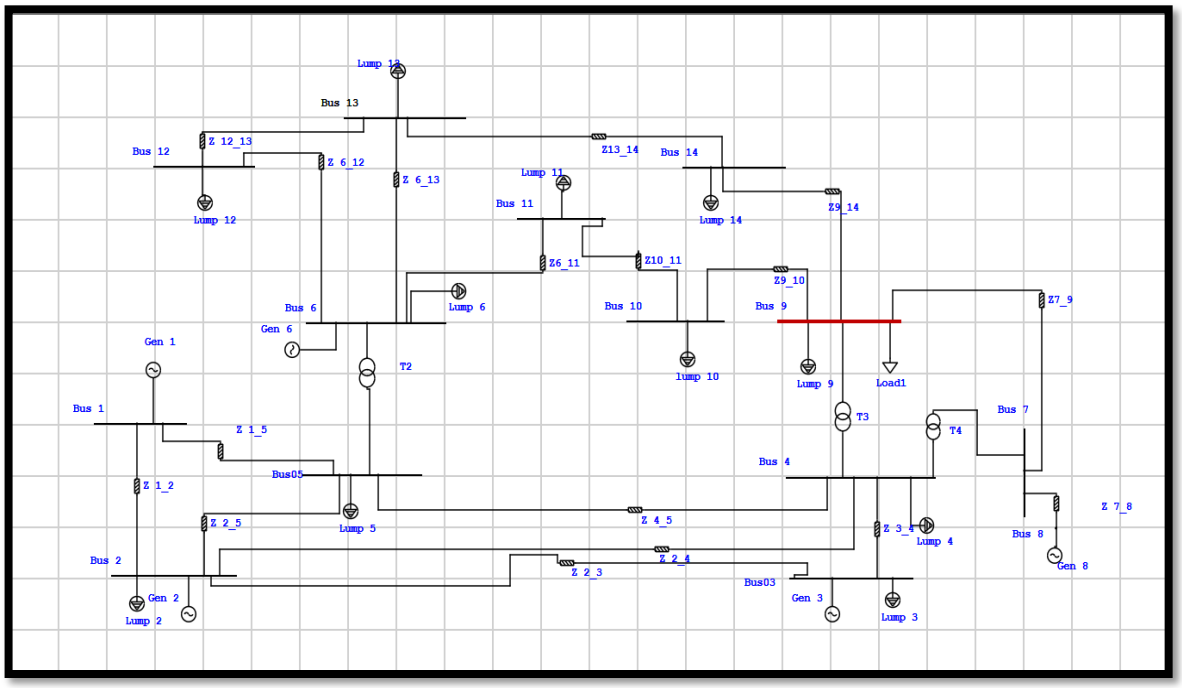


Fig (IV.4) : Topologie du réseau avec défaut au nœud 09

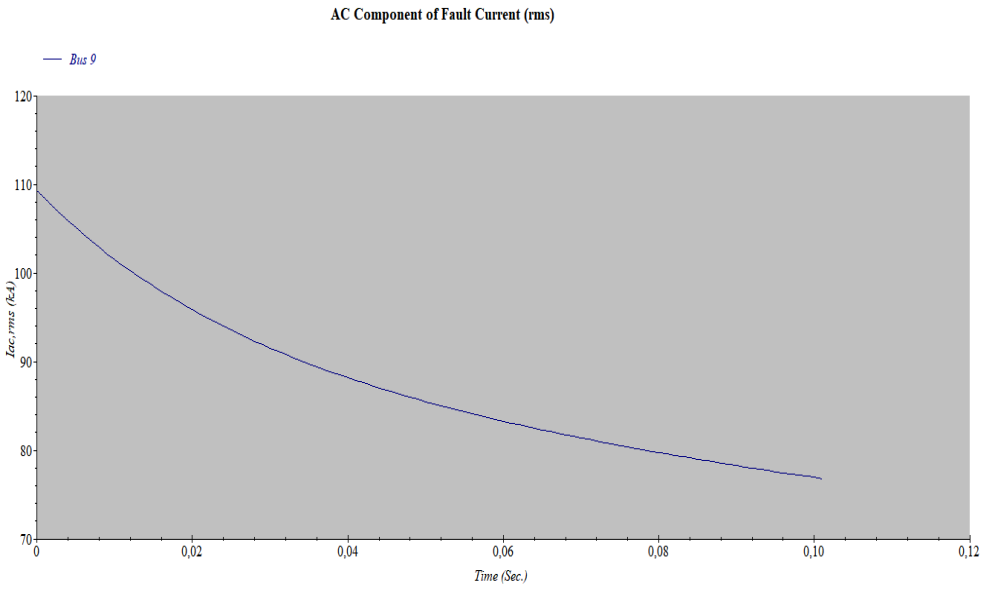
Tableau (IV.2) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 09

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 9**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 285.135 kA Method C
Steady State = 77.013 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 9	Total	0.00	15.9	110.002
Bus 7	Bus 9	0.78	21.2	32.558
Bus 10	Bus 9	0.48	20.9	24.294
Bus 14	Bus 9	0.03	10.2	26.829
Bus 4	Bus 9	49.84	22.7	18.875
Lump 9	Bus 9	100.00	10.0	7.477
Bus 8	Bus 7	1.29	19.3	13.978
Bus 4	Bus 7	49.84	23.0	18.580
Bus 11	Bus 10	1.47	23.8	21.943
lump 10	Bus 10	100.00	9.9	2.354
Bus 13	Bus 14	2.00	10.2	23.359
Lump 14	Bus 14	100.00	10.0	3.470
Bus 2	Bus 4	50.28	29.7	2.312
Bus03	Bus 4	50.50	11.2	3.476
Bus05	Bus 4	49.86	4.6	0.666
Lump 4	Bus 4	100.00	12.8	1.063



Fig(IV.5) : Le courant traversant le nœud 09 en cas de court-circuit

IV.5.3. Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 10

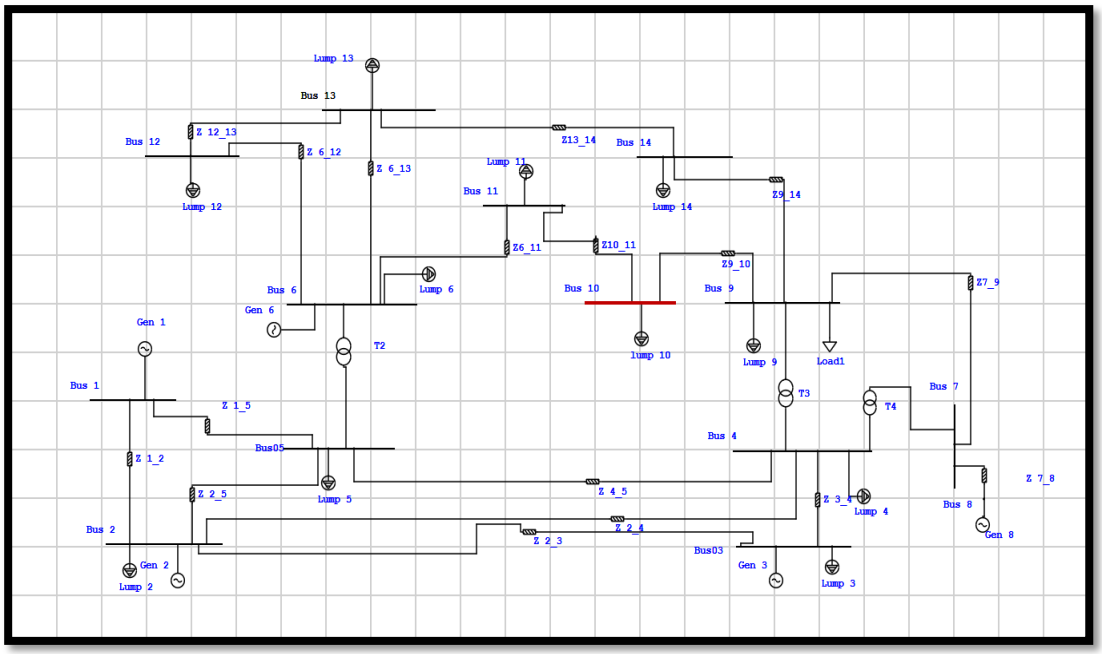
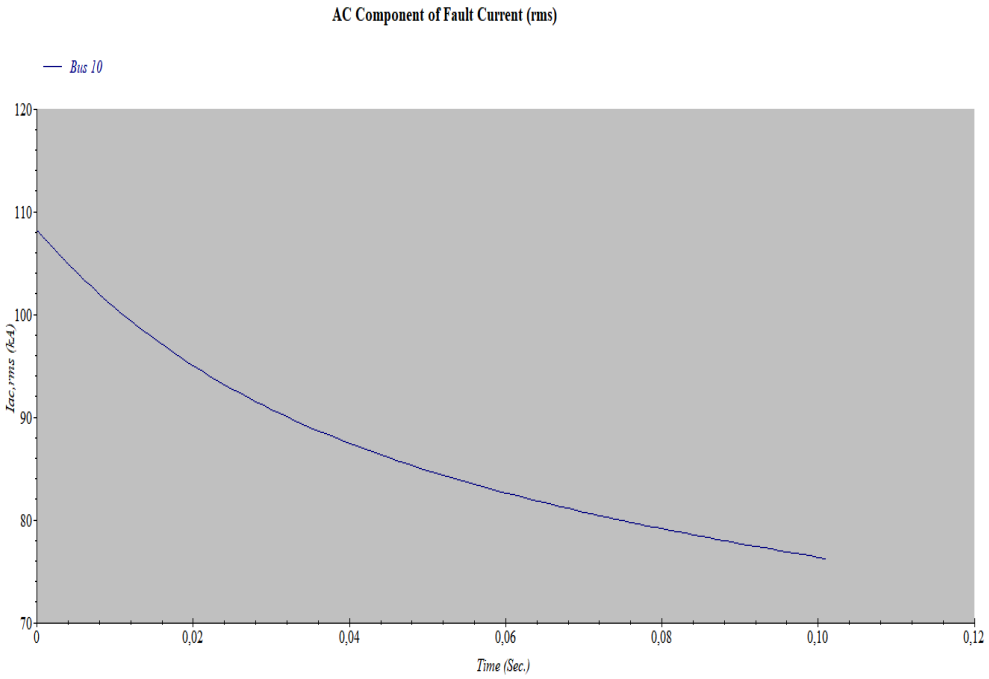


Fig (IV.6) : Topologie du réseau avec défaut au nœud 10



Fig(IV.7) : Le courant traversant le nœud 10 en cas de court-circuit

Tableau (IV.3) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 10

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 10**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 281.291 kA Method C
Steady State = 76.484 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 10	Total	0.00	15.2	108.947
Bus 9	Bus 10	1.47	16.3	75.144
Bus 11	Bus 10	1.43	13.6	31.441
lump 10	Bus 10	100.00	10.0	2.365
Bus 7	Bus 9	2.21	19.1	32.039
Bus 14	Bus 9	1.49	13.9	17.195
Bus 4	Bus 9	50.37	20.2	18.548
Lump 9	Bus 9	100.00	9.6	7.372
Bus 6	Bus 11	2.90	13.7	30.804
Lump 11	Bus 11	100.00	9.5	0.637

Commentaire :

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.3), nous pouvons noter les observations suivantes :

- La tension est nulle au nœud de défaut (nœud 10).
- Les tensions aux nœuds 11 et 09 ont considérablement diminué par rapport à leur état normal.

IV.5.4. Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 11

Nous provoquons un court-circuit dans le jeu de barre 11, nous obtenons des résultats tableau (IV.4) :

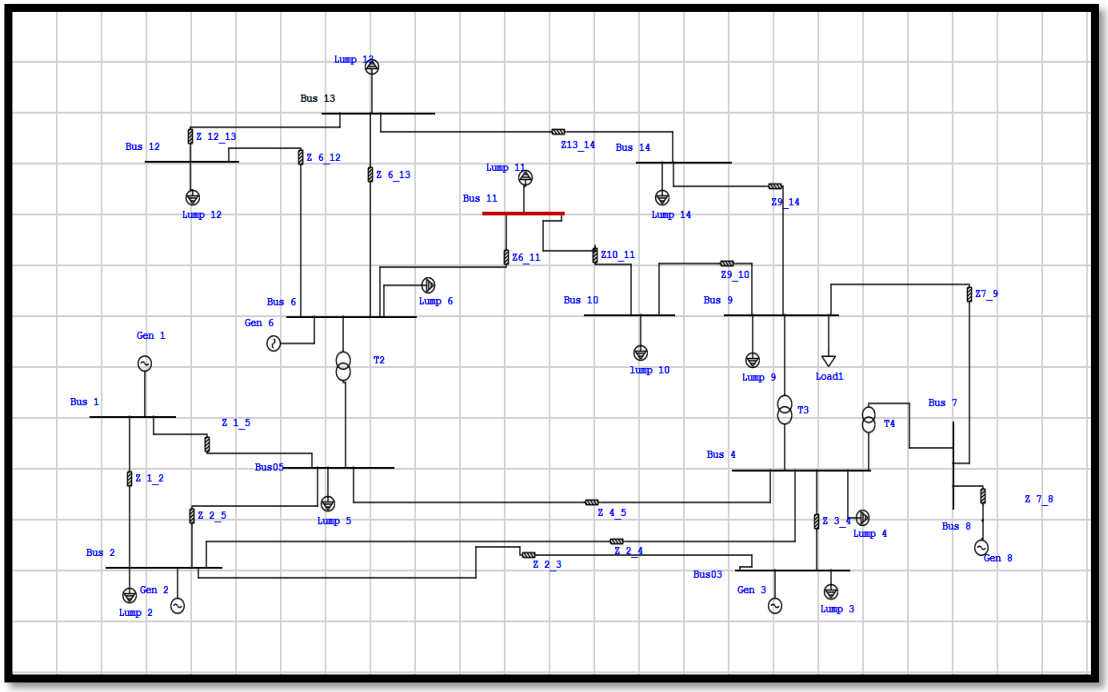


Fig (IV.8) : Topologie du réseau IEEE 14 nœud avec défaut au nœud 11

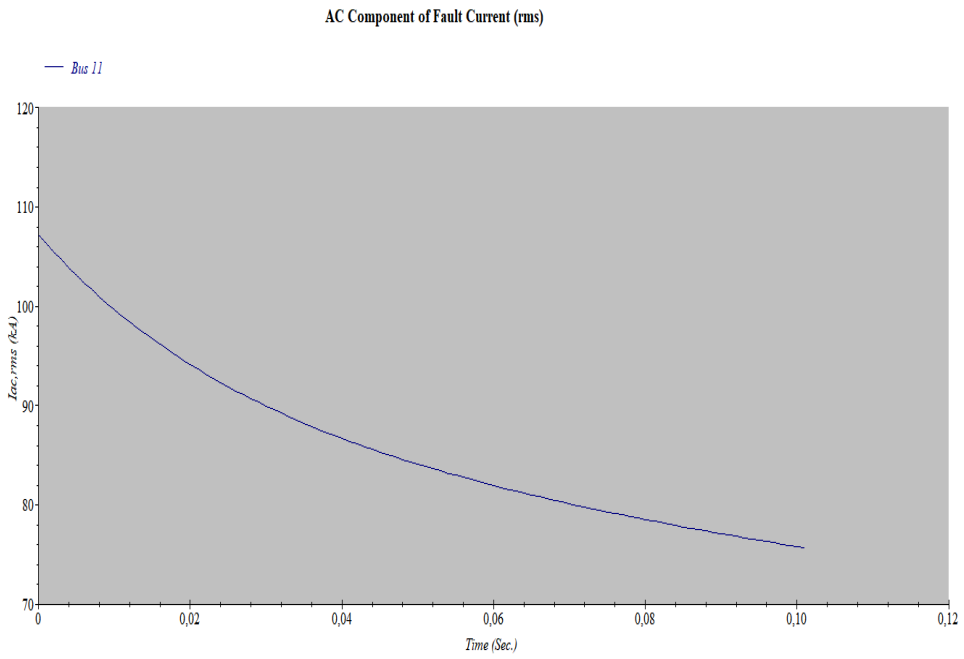


Fig (IV.9) : Le courant traversant le nœud 11 en cas de court-circuit.

Tableau (IV.4) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 11

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 11**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 277.075 kA Method C
Steady State = 76.038 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 11	Total	0.00	14.4	107.878
Bus 6	Bus 11	2.53	11.6	52.819
Bus 10	Bus 11	2.47	18.6	54.427
Lump 11	Bus 11	100.00	10.0	0.646
Bus 12	Bus 6	2.72	4.3	3.055
Bus 13	Bus 6	2.83	6.9	9.336
Bus05	Bus 6	50.96	18.5	18.411
Gen 6	Bus 6	100.00	16.2	19.172
Lump 6	Bus 6	100.00	9.2	2.907
Bus 9	Bus 10	3.49	19.5	52.120
lump 10	Bus 10	100.00	9.2	2.310

Commentaire :

D'après les résultats affichés dans le tableau (IV.3), nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- La tension est nulle au nœud de défaut (nœud 11)
- Les tensions aux nœuds 12 et 10 ont fortement diminuées par rapport à celles de l'état normal.
- Augmentation du courant au nœud défaillant : Le courant au nœud 11 augmente considérablement en raison d'un court-circuit. Ce courant de défaut atteint des niveaux très élevés, dépassant largement les courants de fonctionnement normaux.

IV.5.5. Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 12

Nous provoquons un court-circuit dans le jeu de barre 12, nous obtenons des résultats tableau (IV.5) :

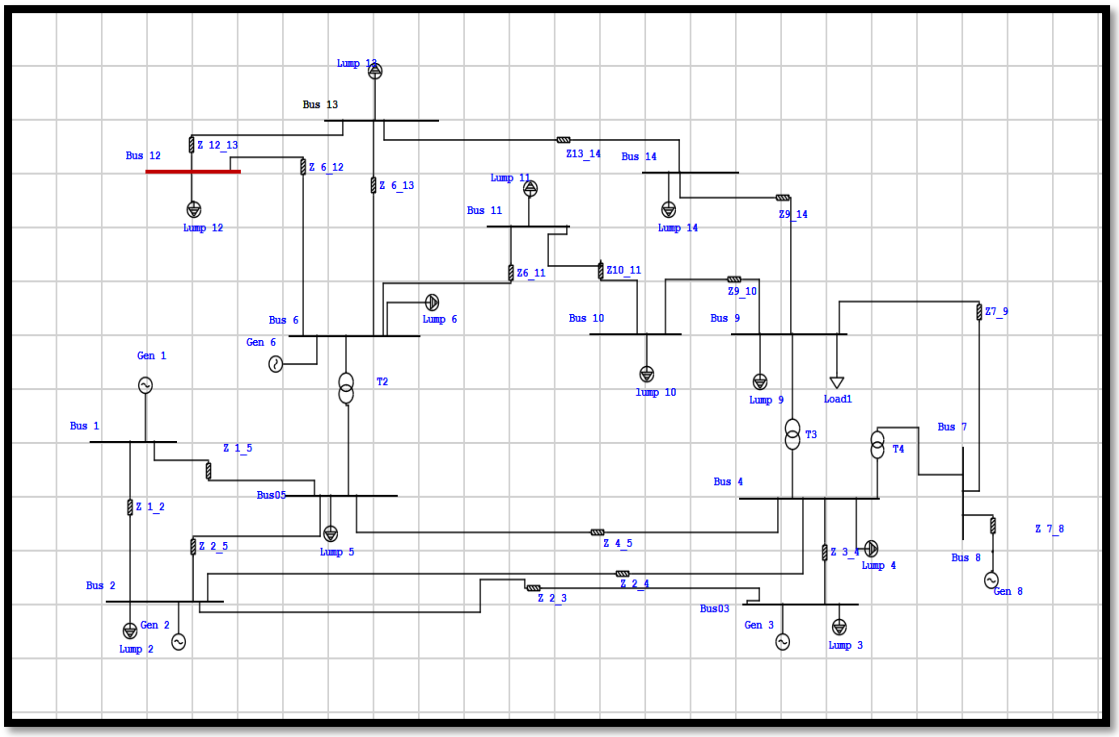


Fig (IV.10) : Topologie du réseau avec défaut au nœud 12.

Tableau (IV.5) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 12

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 12**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 268.332 kA Method C
Steady State = 75.192 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 12	Total	0.00	12.0	106.142
Bus 6	Bus 12	3.48	15.6	56.464
Bus 13	Bus 12	3.21	3.9	49.581
Lump 12	Bus 12	100.00	10.0	1.393
Bus 11	Bus 6	4.68	33.2	25.199
Bus 13	Bus 6	3.21	1.3	11.577
Bus05	Bus 6	51.82	17.7	18.488
Gen 6	Bus 6	100.00	14.2	19.043
Lump 6	Bus 6	100.00	8.5	2.887
Bus 14	Bus 13	6.19	7.4	36.066
Lump 13	Bus 13	100.00	8.4	3.159

Fig (IV.5) : Le courant traversant le nœud 12 en cas de court-circuit.

Commentaire :

- La tension au nœud 12 chute de manière significative en raison du court-circuit jusqu'à zéro, en fonction de la nature et de la gravité du court-circuit
- Les nœuds proches du nœud 12, tels que les nœuds 11 et 13, présentent également une chute de tension importante, mais moins prononcée que celle au nœud 12.
- Les nœuds distants subissent des variations de tension plus faibles, mais il est important de noter que l'effet reste perceptible en fonction de la configuration du réseau et des paramètres de la ligne de transmission.

IV.5.6. Cas d'un court-circuit triphasé au nœud 13

Nous provoquons un court-circuit dans le jeu de barre 13, nous obtenons des résultats tableau (IV.6) :

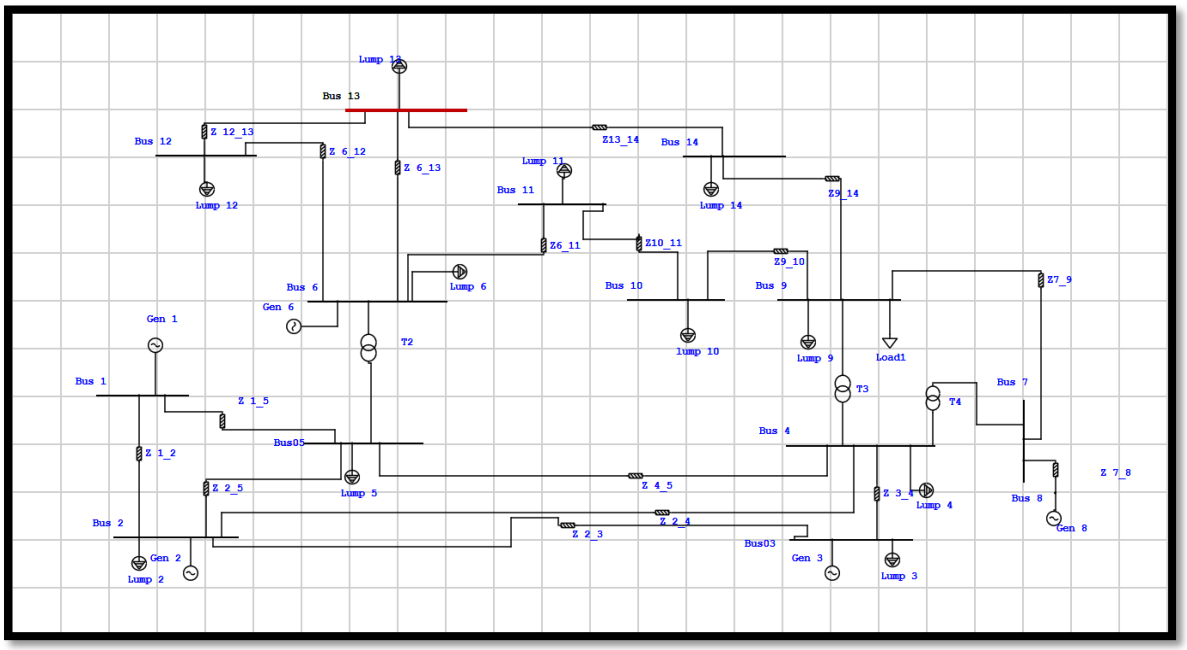


Fig (IV.11) : Topologie du réseau avec défaut au nœud 13

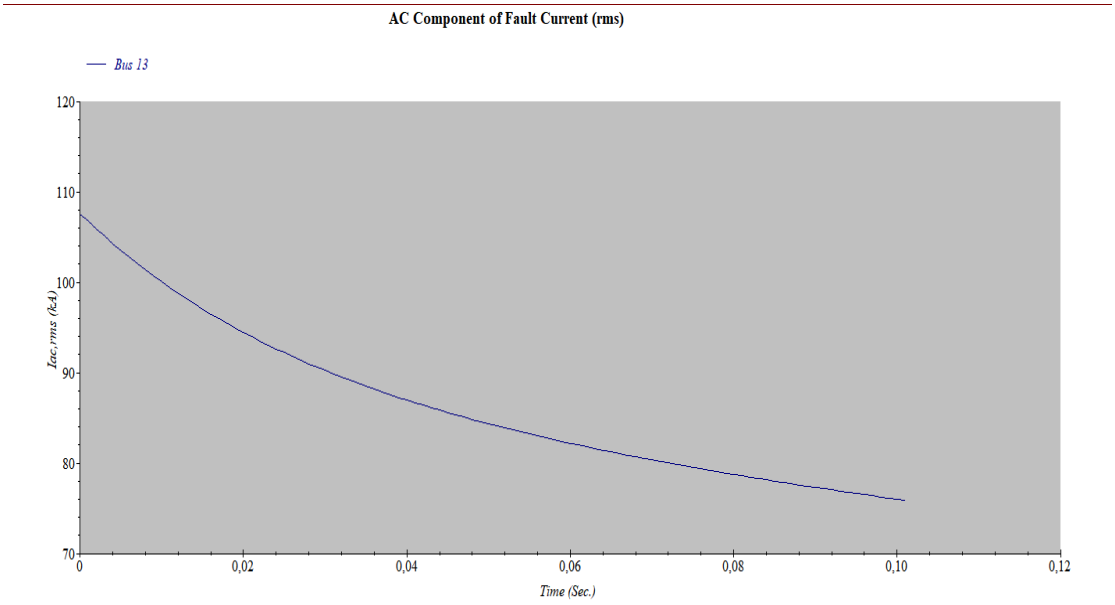


Fig (IV.12) : Le courant traversant le nœud 13 en cas de court-circuit

Tableau (IV.6) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 13

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 13**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 278.093 kA Method C
Steady State = 76.236 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 13	Total	0.00	14.3	108.288
Bus 6	Bus 13	1.55	37.3	48.939
Bus 12	Bus 13	0.86	4.7	13.210
Bus 14	Bus 13	3.63	13.5	43.068
Lump 13	Bus 13	100.00	10.0	3.245
Bus 11	Bus 6	2.49	12.7	19.580
Bus 12	Bus 6	0.86	4.5	11.835
Bus05	Bus 6	50.83	20.7	18.725
Gen 6	Bus 6	100.00	16.8	19.361
Lump 6	Bus 6	100.00	9.4	2.936
Lump 12	Bus 12	100.00	9.5	1.383
Bus 9	Bus 14	3.67	14.2	39.716
Lump 14	Bus 14	100.00	8.8	3.355

IV.6. Répartition de tension sur le réseau IEEE 14 nœud suite à un deux défaut

IV.6.1. Cas d'un court-circuit triphasé aux nœuds 11 et 09

Nous provoquons un court-circuit dans le jeu de barres 11 et 09, nous obtenons des résultats tableau (IV.7) :

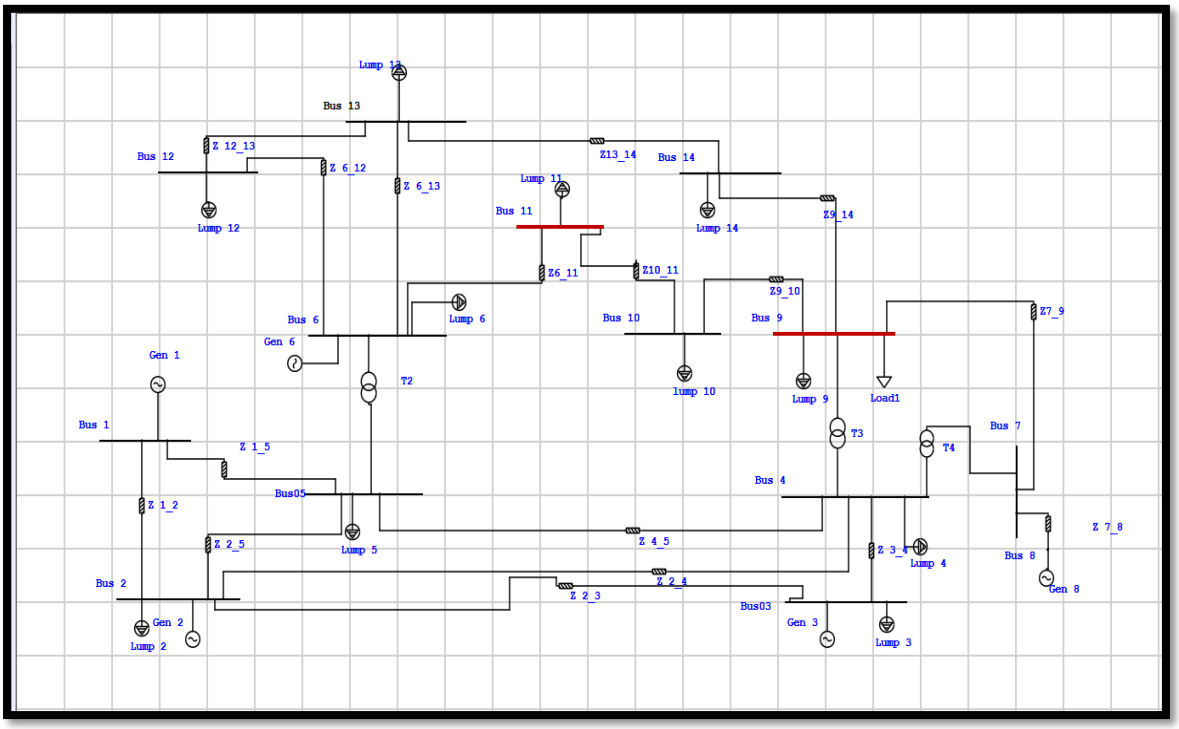


Fig (IV.13) : Topologie du réseau avec défaut aux nœuds 11 et 09

Tableau (IV.7) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 11 et 09

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 9 and 11**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 285.135 kA Method C
Steady State = 77.013 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
ID	ID	From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 9	Total	0.00	15.9	110.002
Bus 7	Bus 9	0.78	21.2	32.558
Bus 10	Bus 9	0.48	20.9	24.294
Bus 14	Bus 9	0.03	10.2	26.829
Bus 4	Bus 9	49.84	22.7	18.875
Lump 9	Bus 9	100.00	10.0	7.477
Bus 8	Bus 7	1.29	19.3	13.978
Bus 4	Bus 7	49.84	23.0	18.580
Bus 11	Bus 10	1.47	23.8	21.943
Bus05	Bus 6	50.96	18.5	18.411
Bus 12	Bus 16	2.72	4.3	3.055
Lump 11	Bus 11	100.00	10.0	0.646
Bus 10	Bus 11	2.47	18.6	54.427
Bus06	Bus 11	2.53	11.6	52.819
Bus09	Bus 10	3.49	19.5	52.120
Lump 10	Bus 10	100.00	9.2	2.310

Commentaire :

Lors de l'analyse de la tension dans un réseau IEEE à 14 nœuds avec des court-circuit aux nœuds 11 et 9, plusieurs observations importantes peuvent être faites :

- Nœud 11 et nœud 9 : les tensions aux nœuds 11 et 9 chutent fortement, jusqu'à des niveaux bas de 0, en raison de court-circuit.
- Nœuds voisins : les nœuds proches des nœuds 11 et 9, tels que les nœuds 10, 12, 8 et 14, présentent également des chutes de tension importantes. L'ampleur de la chute de tension dépend de la distance et de la configuration du réseau.
- Nœuds distants : les nœuds distants subissent des différences de tension, mais ces différences sont généralement moins prononcées.

- Interaction de court-circuit : La présence de deux court-circuit simultanés augmente la complexité de la réponse du réseau. Les effets combinés conduisent à de fortes fluctuations de tension et à une instabilité transitoire accrue.

IV.6.2. Cas d'un court-circuit triphasé aux nœuds 11 et 13

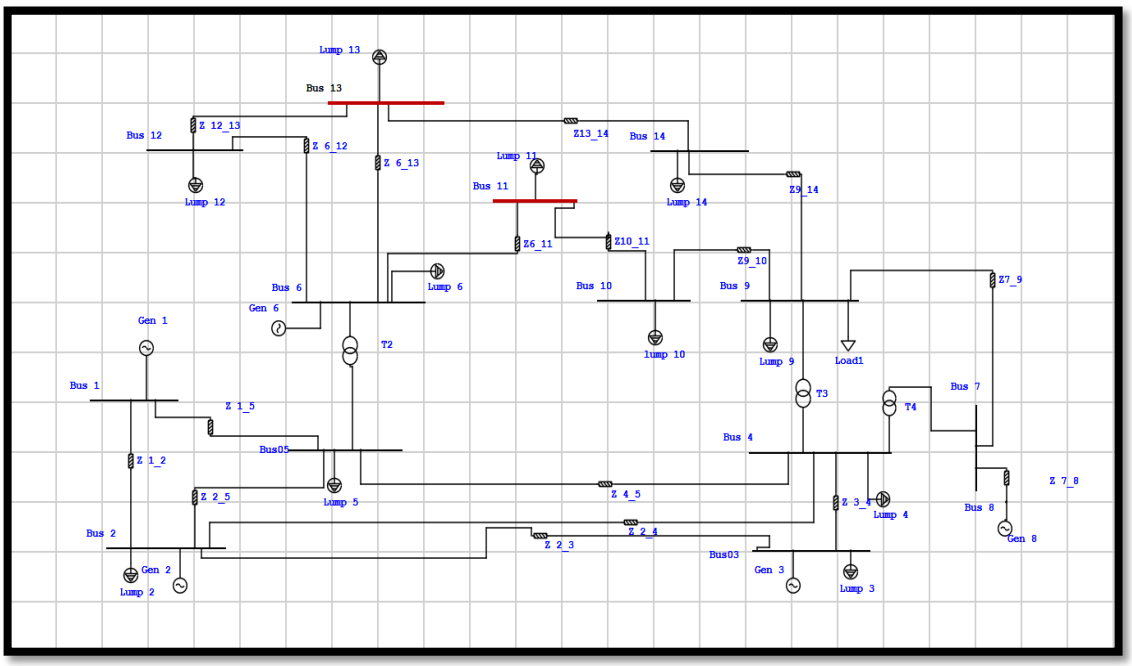


Fig (IV.14) : Topologie du réseau avec défaut aux nœuds 11 et 13.

Tableau (IV.8) : rapport du réseau 14 JB avec court-circuit au JB 11 et 13

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Bus 11 and 13**

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
Peak Value = 277.075 kA Method C
Steady State = 76.038 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)		
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	X/R Ratio	kA Magnitude
Bus 11	Total	0.00	14.4	107.878
Bus 6	Bus 11	2.53	11.6	52.819
Bus 10	Bus 11	2.47	18.6	54.427
Lump 11	Bus 11	100.00	10.0	0.646
Bus 12	Bus 6	2.72	4.3	3.055
Bus 13	Bus 6	1.55	37.3	48.939
Bus13	Bus 12	0.86	4.7	13.210
Gen 6	Bus 6	100.00	16.2	19.172
Lump 6	Bus 6	100.00	9.2	2.907
Bus 14	Bus 13	3.63	13.5	43.068
lump 14	Bus 14	100.00	8.8	3.355

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet des court-circuit sur la tension du réseau électrique. Ils peuvent provoquer des chutes de tension importantes aux nœuds proches du point de défaut, perturbant ainsi la stabilité et l'efficacité du réseau. Ces différences de tension peuvent endommager les équipements sensibles et réduire la qualité de l'alimentation électrique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ces dernières années ont vu que le développement récent des dispositifs **FACTS** a ouvert des nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux électriques par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance).

Dans ce travail de mémoire, nous somme intéressé à l'amélioration du plan de tension par un système **FACTS**. Ainsi, il était question de résoudre les équations de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique donné afin de voir le transit des puissances plus clairement. Cela se fait en utilisant le deux logiciel **PSAT** et **ETAP**

Dans le premier 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 (**SVC** et **STATCOM**) et dans la deuxième section nous avons présenté la modélisation de quelques dispositifs **FACTS** insérés dans le réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons fait une étude sur le réseau **IEEE14** nœuds et nous obtenons des résultats de compensation, en mettant l'accent sur l'analyse des plans de tension des réseaux étudiés et de leurs flux de puissance, nous avons conclu que l'augmentation de la charge dans un réseau entraine une augmentation des fluctuations de tension. Cela est logique étant donné que la circulation de l'énergie réactive et devenue croissante.

Dans le troisième chapitre de notre thème, nous nous avons amélioré le plan de tension des nœuds de charge qui étaient hors des écarts admissible et des autres nœuds et cela à cause de la réduction du transit de la puissance réactive dans le réseau, engendrant une réduction des chutes des tensions globales et diminution des pertes de puissances totales d'où un meilleur rendement.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet des court-circuit sur la tension du réseau électrique. Ils peuvent provoquer des chutes de tension importantes aux nœuds proches du point de défaut, perturbant ainsi la stabilité et l'efficacité du réseau. Ces différences de tension peuvent endommager les équipements sensibles et réduire la qualité de l'alimentation électrique.

Comme perspective de ce travail, nous proposons pour avoir le meilleur profil de la tension et le minimum de pertes de puissance tout en respectant toutes les contraintes techniques imposées préalablement.

Référence bibliographique

[01] C. Michel, « commande et régulation des réseaux électriques », Traité EGEM série génie électrique, Lavoisier, 2003.

[02] 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.

[03] Ay Abdelouahab « Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique SVC » mémoire magister, université de Batna 02 /05/2013.

[04] Stéphane GERBEX. « Meta heuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique ». Thèse PHD. Ecole poly technique de Lausanne. Lausanne 2003.

[05] 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.

[06] 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.

[07] 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 20

[08] www.energy.gov.

[09] Abdelaàli Alibi, " Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS : (Flexible AC Transmission Systemes)", Mémoire de Magister Soutenu au département d'électrotechnique Université de Batna, 2009.

[10] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.

[11] Mokhnache Madiha, « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS », mémoire de magister

Université FerhatAbbas-Sétif, 2012.

[12] L. THOMAS, « Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique FACTS », 10ème entretien, Physique – industrie, Paris, 19 Octobre 2006.

[13] H. Belguidoum, « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandés ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.

[14] C.A. Canizaires, Z.T. Faur, « Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage Ccollapse ». IEEE Transactions on Power Systems 14, 158-165, 1999.

[15] G.SH. Eskandar, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2003.

[16] B. Hadji, « Contribution à l'amélioration de l'efficacité des réseaux électriques par l'intégration et le contrôle flexible de l'énergie éolienne et des systèmes FACTS ». Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2017.

[17] E.G. Shahraki,« Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux Electriques ». Thèse de doctorat, Université de Henri PoincaréNancy1, 2003.

[18] E.Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, «Power electronic control in electrical systems».Newnes, 2002.

[19] F.Z. Zendagui, « Analyse de la stabilité transitoire dans les réseaux électriques ». Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.

[20] 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.

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

[22] C.A. Gross, « Power system analysis, Second Edtion», John Wiley & Sons, New York, 1986.

[**23**] A. Laoufi, A. Boumediène, "Répartition optimale des puissances actives d'un réseau électrique utilisant l'algorithme de colonis de fourmis", université de Bechar, 2011.

[24] N. Mancer, "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique FACTS", Mémoire de magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.

[25] V. Knazkins, Stability of Power Systems with Large Amounts of Distributed Generation, Thèse Doctorat, Stockholm, Sweden 2004.

[26] R. Benabid, « Optimisation multi objectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques ». Mémoire de Magistère, Université Amar Telidji, Laghouat, 2007.

[27] H. Boudjella, F.Z. Gherbi, S. Hadjeri, F. Ghezal, M. Flitti (Contrôle De Transite Des Puissances Réactives Dans Un Réseau Electrique Par L'intégration Du Dispositif FACTS) Laboratoire ICEPS (Intelligent Control And Electrical Power System) Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2010.

[28] T. N. Boutsika and S. A. Papathanassi ou, "Short-circuit calculations in networks with distributed generation,"Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 7, pp. 1181-1191, Jul. 2008.