

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaïb

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et Technologie

قسم الإلكترونيات

Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Sciences et
Technologie

Filière : Électrotechnique Spécialité : Commande Électrique

Thème

L'intégration d'un dispositif FACTS pour l'optimisation des réseaux électriques

Présenté par :

- 1) Mr SAIAH Zenagui Mohammed
- 2) Mr KHELIFI Lahcen

Devant le jury :

Dr. BERRACHED Djelloul	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. MESSAFEUR Rajaa	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. ADJOU DJ Labiba	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Je vous aime ! Je n'ai plus de force, j'ai tout donné, je voulais tellement ça, on a souffert pendant 18 ans, on le voulait tant ! C'était dur, très difficile. Mais cela montre nos valeurs, notre envie et notre détermination. Nos parents, nos proches, nos amis, merci infiniment ! C'est votre énergie qui a fait ce qu'on a accompli aujourd'hui

*À l'estimée **Dr. Adjoudj Labiba**, toute ma gratitude et mon affection pour votre encadrement exemplaire.*

Merci d'avoir été un guide précieux, merci pour votre grand cœur et votre esprit éclairé qui ont illuminé mon chemin. Ce fut un immense honneur de travailler sous votre direction, et je n'oublierai jamais l'impact positif que vous avez eu sur ma réussite.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	II
<i>Introduction Générale</i>	1
Chapitre I Actualités des électriques	1
I.1 Introduction.....	4
I.2. Structure des réseaux électriques	4
I.2.1 Production d'énergie électrique	4
I.2.1.1 Energies renouvelables	5
I.2.1.2 Energies fossiles.....	5
I.2.1.3 Energie nucléaire	6
I.2.2 Transport d'énergies électrique.....	6
.....	8
I.4 Distribution et consommation d'énergies électrique	8
I.5 Types des réseaux électriques	9
I.5.1 Réseaux d'interconnexions	9
I.5.2 Réseaux de transports	9
I.5.3 Réseaux de répartition.....	10
I.5.4 Réseaux de distribution.....	10
I.6 Structures topologiques des réseaux électriques	10
I.6.1 Réseau maillé	10
I.6.2 Réseau radial.....	11
I.6.3 Réseau bouclé	12
I.7 Poste de sources	12
I.8 Equipement en lignes et câbles	13
I.8.1 Câbles sous terrains.....	14
I.8.2 Câbles sous plomb isolés au papier imprègne	14
I.8.3 Câble à isolation synthétique	14
I.9 Poste de transformateurs	14
I.10 Pertes d'énergie dans les réseaux électriques	16

I.11	Conduite des réseaux de production et de transport d'électricité	16
I.11.1	Problématique de la conduite des réseaux électriques	17
I.11.2	Organisation de la conduite du système électrique	17
I.11.3	Rôle des systèmes d'information et conduite en temps réel	17
I.11.4	Système SCADA	18
I.11.6	Solutions de blackout	19
I.12	Transition énergétique et nouveaux défis	19
I.12.1	Émergence des Smart Grids	20
I.12.2	Éléments caractéristiques des Smart Grids	20
I.12.3	Digitalisation et modernisation des réseaux	20
I.12.4	Objectif d'un réseau intelligent Smart Grid	21
I.12.5	Introduction des Smart Grids en Algérie	21
I.12.6	Systèmes de transmission en courant alternatif flexibles (FACTS)	22
I.13	Conclusion	23
Chapitre II Optimisation des réseaux électriques en présence des FACTS		24
II.1	Introduction	25
II.2	Présentation des dispositifs FACTS	25
II.2.1	Définition des FACTS	26
II.2.2	Objectif des FACTS	26
II.2.3	Avantages des FACTS	26
II.3	Classification des dispositifs FACTS	27
II.3.1	FACTS série	27
II.3.2	Compensateur série commandé par thyristors (TCSC)	27
II.3.3	Compensateur série statique synchrone (SSSC)	28
II.3.4	FACTS parallèle	28
II.3.5	Compensateur statique d'énergie réactive (SVC)	28
II.3.7	FACTS combinés (série-série et shunt-série)	30
II.3.8	Contrôleur universel de flux de puissance (UPFC)	30
II.3.9	Contrôleur de puissance interlignes (IPFC)	31

II.3.10 Comparaison des dispositifs FACTS.....	32
II.4 Modélisation des FACTS dans les réseaux électriques	33
II.4.1 Modélisation dans le calcul de flux de puissance.....	33
II.4.2 Méthode de résolution de l'écoulement de puissance	34
II.4.2.1 Méthode de Newton-Raphson	34
II.4.3 Impact des FACTS sur le réseau	35
II.5 Ecoulement de puissance optimal (optimal power flow OPF).....	36
II.5.1 Formulation mathématique de l'OPF	37
II.5.2 Méthodes de résolution de l'OPF	40
II.5.2.1 Méthode du point intérieur	41
II.5.2.2 Application de la méthode des algorithmes génétiques à l'OPF	41
II.6 OPF en présence des dispositifs FACTS	42
II.6.1 Objectifs de l'OPF avec FACTS	43
II.6.2 Placement optimal des FACTS.....	43
II.6.3 Opérations de PSAT	44
II.7 Conclusion	45
Chapitre III Simulations et résultats.....	47
III.1 Introduction	48
III.2 Méthodes d'analyse.....	48
III.2.1 Etude sur le réseau test IEEE 9 nœuds	48
III.2.2 Validation et comparaison.....	54
III.3 Application sur le réseau IEEE 14 nœuds	55
III.3.1 Description du réseau étudié	55
III.3.2 Analyse de l'impact de l'insertion du SVC	60
III.3.3 Analyse de flux de puissance optimal	63
III.3.4 Résultats de l'OPF en présence des FACTS	66
III.4 Conclusion.....	69
Résumé	84

Liste des figures

Figure I.1 : les différentes sources d'énergies renouvelables [58]	<u>5</u>
Figure I.2 schéma de production et transport d'énergie [6]	<u>7</u>
Figure I .3 Architecture général d'un réseau électrique [59]	<u>8</u>
Figure I.4 : Réseau maillé [10]	<u>11</u>
Figure I.5 Réseau radial [10]	<u>11</u>
Figure I.6 Réseau bouclée [11]	<u>12</u>
Figure I.7 Postes de source [60]	<u>13</u>
Figure I. 8 Les différent cable [61]	<u>13</u>
Figure I. 9 Poste de transformateur [62]	<u>15</u>
Figure I.10 La gestion du réseau électrique [63]	<u>16</u>
Figure I.11 Système SCADA du réseau életricité [64]	<u>18</u>
Figure I. 12 Structure de controleur FACTS [65]	<u>22</u>
Figure II. 1 Schéma électrique du SVC [28]	<u>29</u>
Figure II 2 : Schéma électrique du STATCOM [29]	<u>30</u>
Figure II .3 : Schéma électrique de l'UPFC [30]	<u>31</u>
Figure II 4 Schéma électrique unifilaire simplifié de l'IPEC [31]	<u>32</u>
Figure II. 5 : Modélisation par injection de puissance [67]	<u>33</u>
Figure II. 6 :Organigramme de la méthode de Newton Raphson [40]	<u>35</u>
Figure II 7 Flux de puissance optimal traditionnel [36]	<u>36</u>
Figure II. 8 Organigramme de l'algorithm génétique [44]	<u>42</u>
Figure II 9 : Interface de PSAT	<u>44</u>
Figure II. 10 : Bibliothèque de PSAT	<u>45</u>
Figure III .1 : Topologie d'IEEE 9 nœuds [49]	<u>49</u>
Figure III. 2 : Réseau test IEEE 9-nœuds inséré dans PSAT	<u>50</u>
Figure III.3 : Profil de tension des différents jeux de barres du réseau IEEE9 BUS	<u>51</u>
Figure III 4 : Profil de la puissance active générée (Pgen) par noeud	<u>52</u>
Figure III. 5 : Profil de la puissance réactive générée Qgen par bus	<u>52</u>
Figure III. 6 : Pertes active dans les ligne du réseau test IEEE9 bus	<u>53</u>
Figure III 7 Pertes réactive dans les ligne du réseau test IEEE 9 bus	<u>53</u>

Figure III. 8 : Schéma unifilaire du réseau IEEE 14 noeuds [57].....	55
Figure III .9 : Profil de tension des différents jeux de barres du réseau IEEE 14 BUS	56
Figure III 10 : Profile de la puissance active	57
Figure III 11 Profile de la puissance réactive	58
Figure III.13 : Les perte réactive.....	59
Figure III.12 : Les perte active.....	60
Figure III.14 IEEE 14 bus avec SVC.....	61
Figure III. 15 : Profil de Tension avec et sans SVC - IEEE 14-bus	62
Figure III.16 : Réseau test IEEE 14 nœuds avec de fonction cout des générateure dans PSAT.....	64
Figure III .17 : Présenté les amplitudes de tension (p.u) aux différent noeud	66

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : les niveaux de tension définis par les normes de groupes SONELGAZ [7].....	8
Tableau II .1 Comparaison des dispositifs FACTS [22][32]	32
Tableau III.1 Résultats de l'écoulement de puissance du réseau test IEEE 9-nœuds..	50
Tableau III 2 Résultat globaux de la simulation	51
Tableau III 3 Données de références PSS/E et PSCAD pour les injections de puissance du système IEEE9 BUS.....	54
Tableau III 4 : Résultat de l'écoulement de puissance	54
Tableau III. 5 :Résultat de l'écoulement de puissance p.u	56
Tableau III 6 : Résultat de transit de la puissance dans les lignes p.u	58
Tableau III 7 : Profil électrique initial des noeuds avec SVC (cas des base)p.u	61
Tableau III .8 :Transit de puissance et pertes sur les lignes avec SVC p.u	62
Tableau III.9 : Compariasion de résultat de l'écoulement de puissance avant et après l'insertion	62
Tableau III.10 : Coefficient du cout et limites de puissance du réseau test IEEE 14 nœuds.....	64
Tableau III.11 : Comparaison des résultat de flux de puissance optimale et de tension du réseau teste IEEE 14 nœud.....	65
Tableau III. 12 : Tension des générateur du réseau test IEEE 14 nœud.....	65
Tableau III.13 : Puissance réactive optimale des générateur du réseau IEEE 14 nœud.....	65
Tableau III.14 : Tension des générateur du réseau test IEEE 14nœud.....	67
Tableau III.15 : Puissance optimale et cout et les pertes.....	68
Tableau III.16 : Puissance réactive optimale des générateure de réseau IEEE 14nœud avec SVC	68
Tableau III.17 : Synthèse globale et comparaison de résultat.....	69

Liste des Abréviations et Symboles

Liste des Abréviations et Symboles

Abbreviation / Symbole	Signification / Définition
FACTS	Flexible AC Transmission Systems (Systèmes de Transmission Flexibles en Courant Alternatif)
PF	Power Flow (Ecoulement de Puissance)
OPF	Optimal Power Flow (Ecoulement de Puissance Optimal)
PSAT	Power System Analysis Toolbox
AI	Intelligence Artificielle
NR	Newton Raphson
IPM	Méthode du Point intérieur
AG	Algorithmes Génétiques
PSO	Essaims de particulaire (particle swarm optimization)
HVDC	Courant continu haute tension (High Voltage Direct Current)
STATCOM	Compensateur statique synchrone
TCSC	Condensateur série commandé par thyristor
SVC	Compensateur statique d'énergie réactive
TSSC	Compensateur série commuté par thyristor
SSSC	Compensateur Statique Série Synchrone
TCPAR	Régulateur d'angle de phase commandé par thyristor
UPFC	Contrôleur de transit de puissance unifié
IPFC	Contrôleur de transit de puissance entre lignes
TCR	Réactances contrôlables par thyristor
TSR	Réactances commutables par thyristor

Liste des Abréviations et Symboles

TSC	Condensateurs commutables par thyristor
$F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$	Fonction Objective
$g_i(\mathbf{x}, \mathbf{u})$	Contraintes d'égalité
$h_j(\mathbf{x}, \mathbf{u})$	Contraintes d'inégalité
$\mathbf{x}$	Vecteur des variables d'état
$\mathbf{u}$	Vecteur des variables à contrôler
a_i, b_i et c_i	Coefficients de la courbe du coût quadratique du générateur i
P_{Gi}	Puissance active générée par le générateur thermique au nœud i
Q_{Gi}	Puissance réactive générée par le générateur thermique au nœud i
P_{Di}	Puissance active demandée par la charge au nœud i
Q_{Di}	Puissance réactive demandée par la charge au nœud i
N_G	Nombre de générateurs interconnectés
θ_{ij}	Différence entre les angles de tension des jeux de barres i et j
θ_i	Angle de tension au jeu de barres i
P_i	Puissance active injectée au jeu de barres i
Q_i	Puissance réactive injectée au jeu de barres i
V_i	Module de tension au jeu de barres i
V_{Li}	Module de tension au jeu de barres de la charge au nœud i
V_{Gi}	Module de tension au jeu de barres du générateur au nœud i
B_{ij}	Un élément de la partie imaginaire de la matrice admittance du réseau
G_{ij}	Un élément de la partie réel de la matrice admittance du réseau
δ_{ij}	Angle de phase d'un élément de la matrice admittance du réseau
t_{ij}	Prise du transformateur entre deux jeux de barres i et j

Liste des Abréviations et Symboles

α_{ij}	Angle de phase du transformateur entre deux jeux de barres i et j
S_{ij}	Transit de puissance apparent du jeu de barre i vers le jeu de barre j
P_{ij}	Transit de puissance active du jeu de barres i vers le jeu de barres j
Q_{ij}	Transit de puissance réactive du jeu de barres i vers le jeu de barres j
Q_{SVC}	Puissance réactive du SVC
e_i et d_i	Coefficients du coût de la production réactive du générateur thermique i

Introduction Générale

Introduction Générale

Les défis actuels et futurs auxquels l'Algérie est confrontée, notamment la forte croissance démographique, l'urbanisation rapide, le développement économique accéléré et l'augmentation de la demande énergétique, sont appelés à s'intensifier. En effet, la population Algérienne croît de 1,5 à 3 % par an, ce qui conduit à un doublement de la population tous les quarante ans [66].

La consommation nationale d'énergie augmente continuellement sous l'effet de la croissance démographique et urbaine ainsi que du développement économique.

Les technologies traditionnelles, telles que la construction de nouvelles lignes de transport, ne suffisent plus à répondre efficacement aux besoins croissants du réseau électrique en raison des coûts d'investissement élevés et des délais importants liés aux études et aux travaux de réalisation. L'ajout de nouvelles lignes devient de plus en plus complexe et contraignant. Par conséquent, les gestionnaires de réseaux doivent recourir à des solutions technologiques innovantes, telles que les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS), afin d'améliorer le contrôle des flux de puissance, d'accroître la sécurité du réseau et de limiter la construction de nouvelles infrastructures.

Parallèlement, l'écoulement de puissance optimal (Optimal Power Flow) constitue un outil essentiel pour l'exploitation économique et sécurisée des réseaux électriques. Son objectif est de minimiser le coût total de production ainsi que les pertes de puissance, tout en respectant les contraintes techniques du réseau, notamment les limites de puissance des générateurs, les niveaux de tension aux différents nœuds et les contraintes de transit sur les lignes de transport.

L'intégration des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques introduit de nouveaux défis liés à leur modélisation et à leur impact sur l'exploitation du système. Il devient alors nécessaire d'étudier l'influence de ces dispositifs sur l'écoulement de puissance et sur la résolution du problème d'OPF. L'objectif de ce travail est donc d'étudier et de résoudre le problème de l'écoulement de puissance optimal du réseau électrique en présence de dispositifs FACTS.

Il s'agit également d'évaluer l'impact de ces technologies sur les performances du réseau et de proposer une solution permettant d'améliorer la qualité de l'alimentation

électrique, de réduire les pertes et de minimiser les coûts de production. Ce manuscrit comporte trois chapitres.

Chapitre I : Actualités des réseaux électriques

Ce premier chapitre établit les fondements théoriques de notre travail. La première partie présente l'architecture générale du réseau électrique, comprenant la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, tandis que la seconde décrit les principales caractéristiques topologiques du réseau. Nous y introduisons également les concepts nécessaires à la modélisation des principaux composants tels que les lignes, les transformateurs et les alternateurs.

Chapitre II : Optimisation des réseaux électriques en présence des FACTS

Ce chapitre est consacré aux aspects théoriques des dispositifs FACTS et de l'optimisation des réseaux électriques. Il présente tout d'abord une classification des différents dispositifs FACTS (série, parallèle et hybrides) ainsi que leur modélisation mathématique, indispensable à leur intégration dans les outils de simulation. Ensuite, le problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF) est introduit et les différentes méthodes de résolution sont présentées. Enfin, nous montrons comment les dispositifs FACTS influencent la formulation mathématique classique de l'OPF et contribuent à l'amélioration des performances du réseau électrique.

Chapitre III : Simulations et résultats

Dans ce chapitre, nous présentons l'application de la méthode retenue aux réseaux tests IEEE à 9 nœuds et IEEE à 14 nœuds. Une comparaison entre les résultats obtenus sous PSAT/MATLAB et ceux rapportés dans la littérature est réalisée afin de valider l'approche proposée.

Les résultats obtenus permettent d'évaluer les performances du réseau en termes de profil de tension, de pertes de transmission, de répartition économique de la production et d'écoulement de puissance optimal. Une analyse approfondie est menée sur le réseau IEEE à 14 nœuds afin d'identifier les principales contraintes d'exploitation et d'évaluer l'efficacité de la méthode proposée.

Chapitre I : Actualités des réseaux électriques

I.1 Introduction

Les réseaux publics d'électricité ont servi le monde dans l'énergie depuis à peu près 100 ans, sur la base des mêmes infrastructures, dans le même contexte d'exploitation. Toutefois, le monde a beaucoup changé, par le fait qu'il y a beaucoup plus de consommations à cause de multiples facteurs (croissance démographique, besoins en énergies, nouvelles technologies qui nécessitent davantage d'énergie, consommation non contrôlée des ressources énergétiques...).

Aux coûts exorbitants du réseau réel en incapacité de gérer l'énergie s'oppose l'impérative transition vers une infrastructure compétente dans la maîtrise des besoins contemporains de coûts, de contrôle et d'environnement. Smart Grid est un système qui associe les infrastructures conventionnelles de production, transport, distribution d'électricité et les nouvelles technologies de l'information et de la communication, sur la base de nouvelles ressources énergétiques, de stockage et du contrôle de la demande.[1]

Dans ce chapitre, nous donnons une vision générale sur la structure classique des réseaux électriques (distribution, transport, consommation) et nous analysons également les facteurs qui conduisent à la transition énergétique mondiale, en particulier la croissance de la demande d'électricité. Enfin, nous nous concentrons sur le rôle des réseaux électriques dans les systèmes énergétiques et des réseaux intelligents (smart Grids) dans la modernisation des systèmes.

I.2. Structure des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques permettant le transport de l'énergie électrique depuis les lieux de production jusqu'aux consommateurs. Ce réseau comprend plusieurs lignes électriques à différents niveaux de tension, interconnectées au sein du système électrique. Il assure également la régulation dynamique entre la production, le transport et la consommation de l'énergie afin de garantir la stabilité du réseau. En effet, un déséquilibre entre la production et la consommation peut entraîner des perturbations dans le fonctionnement du système électrique. [2]

I.2.1 Production d'énergie électrique

La production d'énergie électrique est au cœur du fonctionnement des sociétés modernes. Elle permet d'alimenter les foyers, les industries, les transports et les

systèmes de communication. L'électricité est devenue une forme d'énergie indispensable grâce à sa facilité de transport, de distribution et d'utilisation.

I.2.1.1 Energies renouvelables

L'évaluation quantitative des ressources en énergies renouvelables s'étend à toutes les technologies disponibles et à leur déploiement à l'international face aux défis environnementaux de proximité comme avec ceux planétaires, de même qu'en rapport avec la sécurité énergétique et le développement durable, qui font des énergies renouvelables le pilier fondamental des stratégies énergétiques nationales et de ces technologies entrant dans les catégories des biocarburants, de l'énergie thermique solaire ou photovoltaïque, de l'énergie éolienne ou de l'hydraulique, marémotrice ou houlomotrice, de la géothermie, de l'énergie thermique des océans, en tant que solutions structurelles à la diversité du mix énergétique permettant de limiter la dépendance aux ressources fossiles, tout en les développant et en les intégrant dans le cours de leur utilisation, à une priorité politique, dans le cadre d'une transition énergétique durable jouant en faveur du respect des équilibres écologiques.[3].

La figure I.1 représente les différentes sources d'énergies renouvelables



Figure I.1 : les différentes sources d'énergies renouvelables[58]

I.2.1.2 Energies fossiles

Au sein des centrales thermiques, la fonction essentielle du tableau de commande est d'accomplir (ou de faire accomplir) la transformation de l'énergie chimique des combustibles fossiles stockée sous forme d'énergie thermique dans les générateurs de

vapeur et destinée à être transformée, en dernière étape, en énergie électrique. Le charbon, gros générateur de CO₂, principal gaz à effet de serre, ne tient pas compte des quantités considérables de CO₂ rejetées, mais constitue la première source primaire d'énergie en dépit de sa pollution et de ses autres inconvénients.

Le pétrole, généralement utilisé sous forme de fioul lourd, bien qu'il présente un bon pouvoir calorifique est également destiné à être utilisé à titre d'appoint ou de secours. Le gaz naturel serait à la fois le moins polluant et le mieux à même de réduire l'impact environnemental avec l'avantage d'une exploitation des ressources difficilement égalable. Une bonne combinaison entre ces trois ressources permet d'établir une régulation de la production électrique en fonction des exigences thermodynamiques des réseaux. [4]

I.2.1.3 Energie nucléaire

Bien que l'Algérie ne dispose pas encore, actuellement, de centrales nucléaires fonctionnelles à des fins de production d'électricité, cette alternative pourrait être envisagée pour diversifier le bouquet énergétique à l'avenir. De la même façon que de nombreux autres pays, l'Algérie renforce son optimisme pour accroître la part des énergies renouvelables et, par conséquent, réduire les gaz à effet de serre, élargissant ainsi la gamme des sources d'énergie disponibles.[5]

I.2.2 Transport d'énergies électrique

La possibilité de transporter l'électricité depuis les centrales nucléaires et les parcs éoliens, jusqu'aux foyers et autres utilisateurs industriels sur des milliers de kilomètres. Le réseau de transport constitue le maillon essentiel et incontournable d'un approvisionnement électrique sécurisé. Par exemple, l'immense réseau de transport électrique français permet d'assurer à tous l'alimentation en électricité, mais il doit également relever les défis de la transition énergétique. La gestion du réseau de transport Algérien est, assurée par la Société de gestion du réseau de transport (GRTE) Algérienne. Ce réseau, qui a pour vocation de transporter de l'électricité depuis les sites de production vers les principales installations industrielles et centrales électriques, est organisé autour de :

- **lignes à Très Haute Tension (THT, 400 000 et 225 000 volts)** : consacrées à la frontière transport-distribution lorsque l'on doit transférer des volumes importants d'énergie avec des pertes limitées sur une large distance,

- **lignes à Haute Tension (HT, 90 000 et 63 000 volts)** : orientées vers la distribution locale et régionale, ils sont essentiels (106 874 km) pour un approvisionnement en électricité de qualité et sécurisé de l'ensemble des consommateurs algériens.[5]

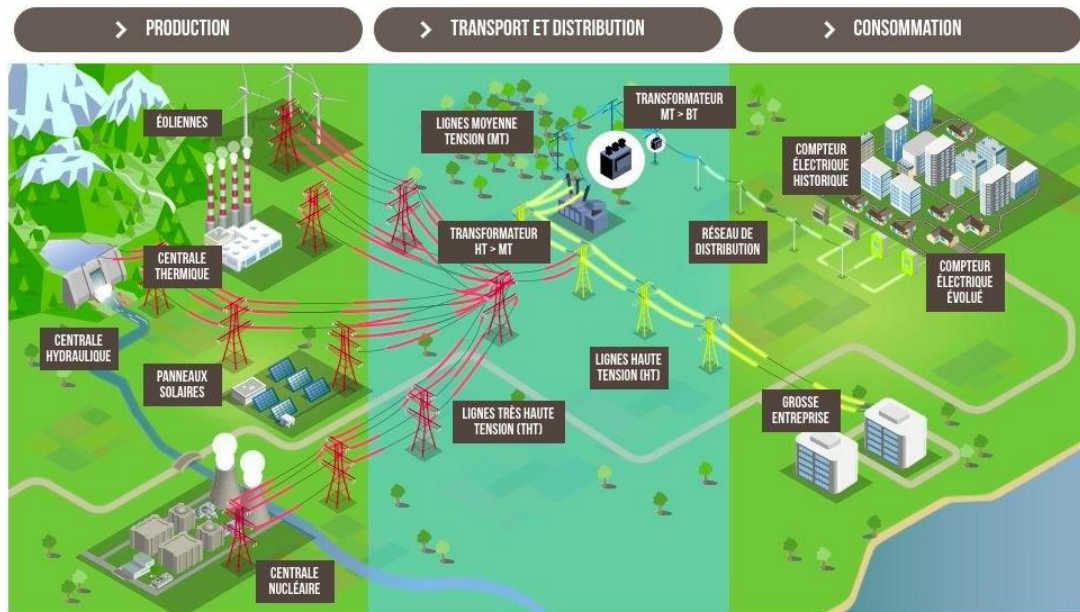


Figure I.2 : schéma de production et transport d'énergie [6]

I.3 Architecture des réseaux électriques

Le réseau THT (400 KV, 225 KV) d'interconnexion internationale, qui est un maillage, connecte les principales centrales, telles que les centrales nucléaires de 1000 MW. Il est supporté par le réseau de distribution (60 à 150 KV), généralement exploité en sections connectées au niveau de tension supérieur, et sur lequel se branchent des centrales d'énergie moins puissantes, ainsi que les grands consommateurs industriels. Par la suite, on observe un réseau de distribution (de 20 KV à 400 V) qui sert la clientèle composée de petites et moyennes entreprises, de commerces et du secteur résidentiel.

Ce système de distribution est généralement organisé selon une structure radiale. Dans les zones urbaines, il peut être exploité en boucle afin d'assurer une meilleure continuité de service, et, dans certaines grandes métropoles, le réseau peut même être bouclé jusqu'au niveau de la basse tension. Le tableau I.1 représente les niveaux de tension définis par les normes de groupe SONELGAZ. L'investissement dans un réseau en boucle est généralement plus élevé à cause de la complexité du contrôle et de la protection. Cependant, ce type de réseau offre une continuité de service supérieure.[7]

Tableau I.1 : Les niveaux de tension définis par les normes de groupe SONELGAZ [7]

Tension alternative	Domaine de tension	Autre appellation courante	Valeurs usuelles en Algérie (tension d'utilisation)
50V	TBT	Très basse tension	12-24-48V
500V	BTA	BT(basse tension)	220-380V
1000V	BTB	BT(basse tension)	220-380V
$U < 50KV$	HTA	MT(moyenne tension)	10-30KV
$U > 50KV$	HTB	HT(haute tension)	10-30KV
$U > 50KV$	HTB	THT(très haute tension)	220-400KV

L'alimentation d'une grande agglomération se fait en général par une boucle à 380 ou 225 KV, alimentée par le réseau d'interconnexion et sur laquelle sont raccordés des postes abaisseurs vers le réseau de répartition, souvent en câble pour la pénétration urbaine. Sur ce réseau de répartition sont branchés des postes abaisseurs vers le réseau de distribution (15 à 20 KV), bouclé et enfin le réseau basse tension de structure radiale alimentant les consommateurs (en triphasé ou en monophasé)[7]

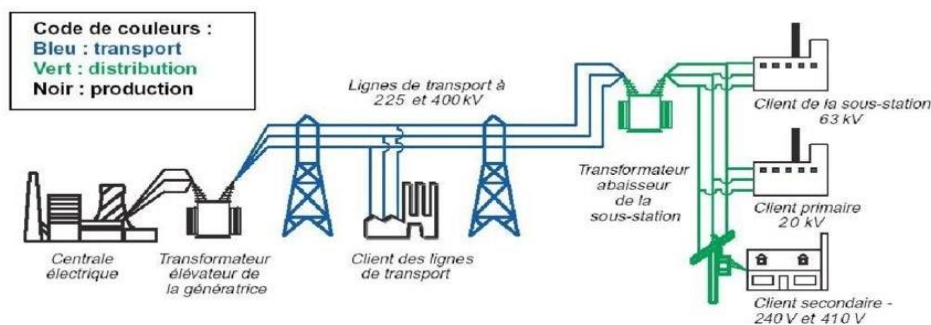


Figure I.3 : Architecture général d'un réseau électrique[59]

I.4 Distribution et consommation d'énergies électrique

En Algérie, le réseau de distribution succède au réseau de transport suite aux postes de transformation dont la fonction est de réduire la tension. Il fournit de l'électricité aux particuliers ainsi qu'aux petites et moyennes entreprises. Le réseau de moyenne tension

(MT, 20 000 volts), s'étendant sur une distance de 622 187 kilomètres, a pour tâche principale la fourniture d'énergie aux postes de distribution.

À partir de ces installations, se déploie le réseau de basse tension (BT, 400 ou 230 volts), qui s'étend sur une distance de 701 858 kilomètres, dont plus de 260 000 kilomètres sont enfouis sous terre. En Algérie, ce réseau à basse tension garantit la livraison finale de l'électricité aux utilisateurs finaux.[5]

Les postes électriques constituent des éléments essentiels du réseau électrique. Véritables nœuds d'interconnexion, ils assurent plusieurs fonctions indispensables au transport et à la distribution de l'énergie.

Ils permettent notamment l'adaptation des niveaux de tension grâce aux transformateurs, facilitant ainsi l'acheminement de l'électricité tout en répondant aux besoins des réseaux de distribution et des utilisateurs. Les postes électriques jouent également un rôle majeur dans la protection du réseau.

En cas d'incident ou de défaut, les disjoncteurs permettent d'interrompre rapidement le transit de l'énergie afin de garantir la sécurité des installations. Par ailleurs, ils assurent la répartition et la gestion des flux électriques grâce aux sectionneurs, qui permettent de connecter, d'isoler ou de rediriger certaines parties du réseau en fonction des besoins d'exploitation et de maintenance.[5]

I.5 Types des réseaux électriques

On classe les divers types de réseaux électriques selon leur structure, leur tension et leur manière d'opérer. Ceci est un récapitulatif des divers types de réseaux électriques. [9]

I.5.1 Réseaux d'interconnexions

Les réseaux d'interconnexion établissent la connexion entre les centres de production, facilitant ainsi les échanges entre diverses régions et même avec des nations voisines. Ces réseaux sont structurés de sorte que toutes les lignes à très haute tension soient connectées par des stations de transformation, garantissant ainsi la continuité entre les lignes de divers niveaux de tension.[9]

I.5.2 Réseaux de transports

Ces réseaux de transports lient les grands centres de production aux centres de Consommation, cette liaison est assurée par des lignes à très haute tension [9]

I.5.3 Réseaux de répartition

Ces réseaux, qui incluent des lignes à haute tension (60 kV), servent de lien entre les réseaux de transport et ceux de distribution. Ils doivent être capables de transporter plusieurs dizaines de MW sur une distance de quelques dizaines de kilomètres.[9]

I.5.4 Réseaux de distribution

Ils comprennent les lignes et les transformateurs utilisés pour fournir de l'énergie aux clients. Ces réseaux se composent de deux éléments :

- ❖ Les lignes de moyenne tension desservies par des postes HT/MT fournissent de l'électricité, directement aux utilisateurs ou vers les différentes installations MT/BT.
- ❖ Il existe également des lignes basse tension qui approvisionnent les besoins en électricité, soit en courant monophasé (220 V) entre phase et neutre, soit en courant triphasé à quatre fils (220 V/380 V).[9]

I.6 Structures topologiques des réseaux électriques

Les infrastructures de transport d'électricité peuvent se décliner sous plusieurs architectures morphologiques et en voici le détail pour apprécier leur fonctionnement. Ces architectures ont été choisies en fonction des contraintes économiques, de la densité de charge ou encore du niveau de sécurité d'approvisionnement.

Or la topologie choisie est déterminante pour la circulation des flux de puissance ainsi que pour la pertinence des systèmes de protection du réseau. Par conséquent l'analyse de ces structures doit permettre d'optimiser l'interconnexion entre sites de production et points de consommation.

I.6.1 Réseau maillé

La structure maillée est caractérisée par l'interconnexion de plusieurs lignes formant un réseau de mailles. Cette configuration offre une grande fiabilité d'alimentation et une meilleure continuité de service, tout en limitant les chutes de tension. Toutefois, sa conception, son exploitation et son analyse sont plus complexes, et sa mise en œuvre nécessite des investissements plus importants. [9]

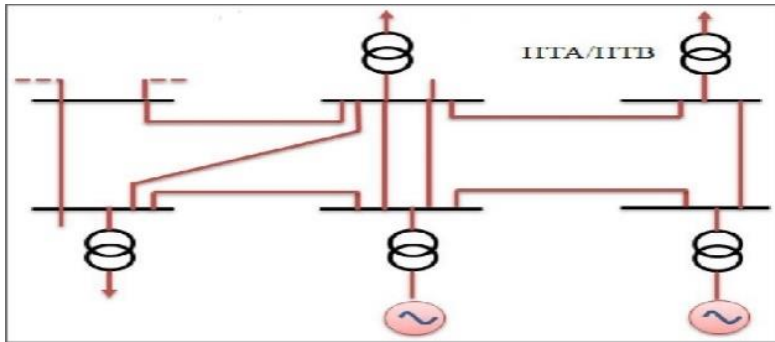


Figure I.4 : Réseau maillé [10]

I.6.2 Réseau radial

Un réseau radial est un réseau dont le diagramme unifilaire présente une structure arborescente. Chaque voie se divise des autres à l'image des ramifications d'un arbre, n'ayant ainsi qu'un seul point de convergence avec un autre lien, et c'est à la source que se trouve le point de distribution. Ils sont employés dans la distribution pour les réseaux MT / BT. Parmi ses atouts : Seule le circuit défectueux est arrêté, son emplacement est facile à identifier. On peut réaliser les tâches d'entretien sans interruption générale. Parmi ses points faibles : Un problème survenant dans un départ principal a des répercussions sur tous les départs secondaires ainsi que sur la distribution finale.[9]

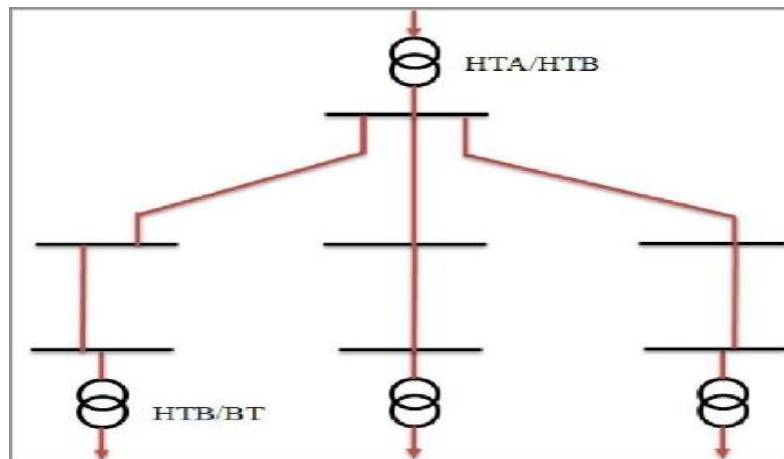


Figure I.5 : Réseau radial [10]

I.6.3 Réseau bouclé

Il s'agit d'un réseau maillé simplifié, comportant plusieurs boucles fermées, chaque boucle renfermant un nombre restreint de sources. Ainsi, l'énergie peut circuler par différentes voies, donc la coupure accidentelle d'un segment ne provoque pas de surcharges inacceptables pour les autres segments.[9]

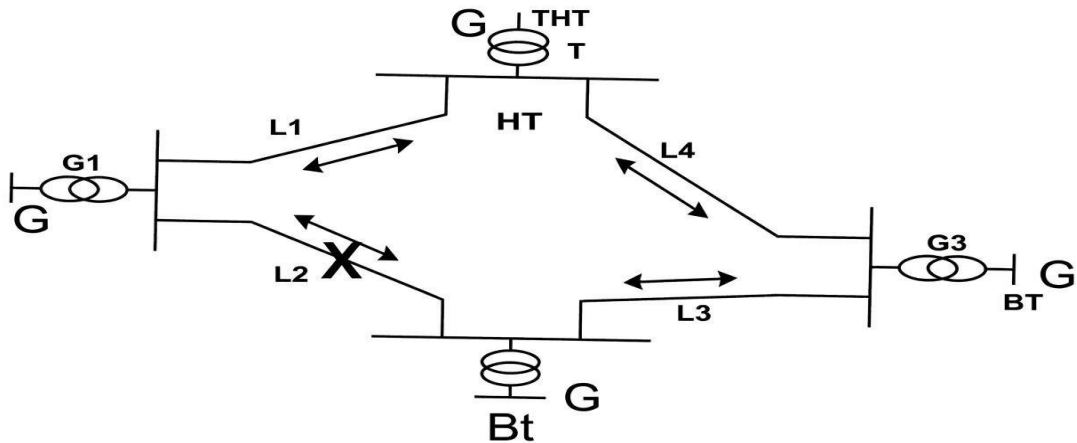


Figure I.6 : Réseau bouclée [11]

I.7 Poste de sources

Les postes-sources établissent un lien entre le réseau de transport et le réseau de distribution. Ils se raccordent au réseau de transport à 90,63 kV ou 225 kV dans les zones de forte consommation. Le poste source est équipé de moyens de surveillance, de protection et de télécommande. Le besoin de disponibilité conduit souvent à installer des dispositifs permettant à la station source de fonctionner toujours, même en cas de perte d'une ligne d'alimentation côté transport ou d'un transformateur HTB/HTA côté distribution.[12]



Figure I.7 : Postes de source [60]

I.8 Equipement en lignes et câbles

Les réseaux moyenne tension (MT) utilisent différents types de lignes et de câbles, dont le choix dépend de plusieurs critères techniques, économiques et environnementaux. Les lignes aériennes sont généralement privilégiées dans les zones rurales et les longues distances en raison de leur faible coût d'installation et de leur facilité de maintenance. Cependant, elles sont plus exposées aux conditions climatiques telles que le vent, le givre ou la foudre, ce qui peut affecter la continuité de service.



Figure I.8 : Les différents types de câbles [61]

I.8.1 Câbles sous terrains

À l'heure actuelle, sur les réseaux MT, deux sortes de câbles sont employés, les câbles unipolaires ou tripolaires isolés au papier imprégné sous plomb pour la mise en place des vrais réseaux et des fils unipolaires à isolation artificielle pour divers cas spécifiques.[13]

I.8.2 Câbles sous plomb isolés au papier imprègne

Les premiers câbles utilisés dans les réseaux moyenne tension étaient les câbles à champ radial, disponibles sous forme unipolaire pour les faibles et fortes sections, ainsi que les câbles tri-gainés constitués de trois conducteurs unipolaires regroupés sous une armure commune. Ces deux types de câbles nécessitaient l'emploi d'accessoires unipolaires. Avec l'amélioration des techniques de raccordement et des accessoires, les câbles tripolaires à revêtement métallique ont progressivement remplacé les câbles précédents pour les sections inférieures ou égales à 150 mm².

Ces câbles présentent l'avantage d'assurer une mise à la terre efficace grâce à leur enveloppe en plomb non isolée. En revanche, les câbles unipolaires non blindés doivent être installés dans des caniveaux spécifiques, ce qui augmente les coûts d'installation et les expose davantage aux risques de détérioration.[13]

I.8.3 Câble à isolation synthétique

Tous les câbles actuellement en usage en MT sont unipolaires et destinés aux connexions de courte distance. On peut recourir à deux types d'isolants :

- ✚ Des thermoplastiques tels que le polyéthylène (PE) et le polychlorure de vinyle (PVC)
- ✚ Certains élastomères supportent des températures opérationnelles élevées (90°C) et garantissent aux câbles une intensité autorisée plus élevée.[13]

I.9 Poste de transformateurs

Les transformateurs, qui exercent une fonction d'interface, permettent de passer d'un réseau à un autre. Ils se situent à la sortie des centrales, ainsi qu'entre des réseaux à différentes tensions pour permettre l'augmentation ou la diminution de la tension nécessaire à la distribution de l'énergie.



Figure I.9 : Poste de transformateur [62]

Les stations de transformation, qui sont implantées à la croisée de différents réseaux, sont équipées de plusieurs transformateurs pour que les flux d'énergie puissent être ajustés en fonction de la demande ou du cas où un problème surviendrait sur une ligne, un transformateur ou autre matériel. Au sein des réseaux électriques, se trouvent deux différents types de transformateurs de puissance :

- Les autotransformateurs, qui ne disposent d'aucune isolation entre le primaire et le secondaire. En service, ils possèdent un rapport de transformation fixe, mais qui peut être changé si l'autotransformateur est mis hors service
- Les transformateurs équipés de régulateurs en charge fonctionnent en maintenant leur rapport de transformation pas constant pendant la marche. Ils permettent de maintenir la tension la plus faible (la tension est celle qui est la plus sollicitée) à une valeur stable. Leur rôle est fondamental pour la stabilité de cette tension.[12]

I.10 Pertes d'énergie dans les réseaux électriques

Estimation des pertes d'énergie dans les réseaux configurés selon l'énergie produite au niveau des centrales et l'énergie facturée aux abonnés HT, MT et BT, s'agissant :

- ✓ des pertes dans les systèmes de transport (lignes HT, transformateurs HT/MT, équipements auxiliaires des postes),
- ✓ des pertes dans les systèmes de distribution (lignes MT, transformateurs MT/MT, transformateurs MT/BT, lignes BT, compteurs...pour chacun des cas toujours la distinction entre pertes sur les lignes et pertes sur les transformateurs)[14]

I.11 Conduite des réseaux de production et de transport d'électricité

La gestion des systèmes électriques constitue un enjeu majeur, dont l'objectif principal est d'assurer en permanence l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. En effet, contrairement à d'autres formes d'énergie, l'électricité ne peut être stockée à grande échelle de manière économiquement viable.

Par conséquent, la production doit être continuellement ajustée à la demande, tout en tenant compte des contraintes du réseau de transport et de distribution. Cette gestion nécessite une coordination rigoureuse entre les différents acteurs du système électrique afin de garantir la sécurité, la fiabilité et la continuité de l'alimentation.

Le modèle français illustre cette organisation à travers une gestion fortement centralisée et un haut niveau de coordination opérationnelle, permettant d'assurer un fonctionnement efficace du réseau électrique.[15]

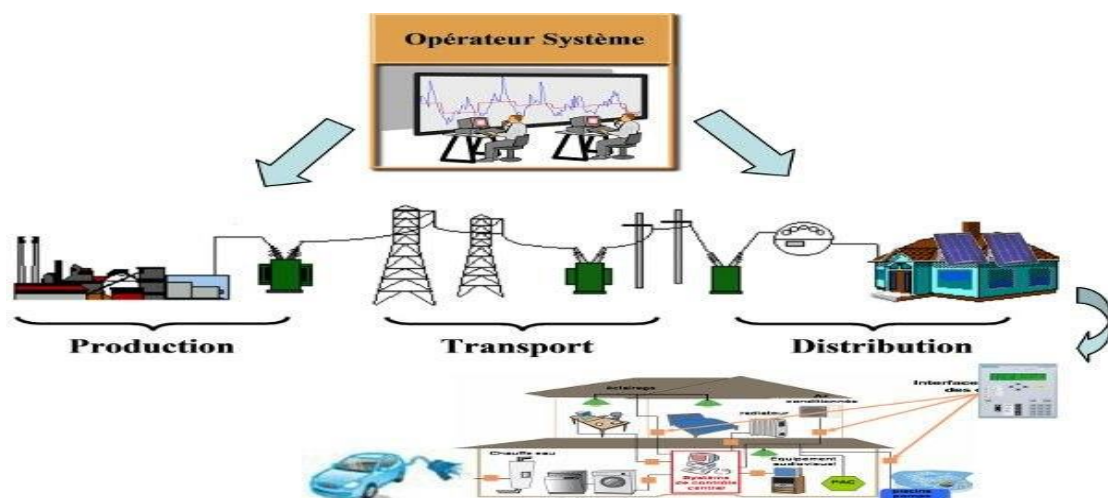


Figure I.10: La gestion du réseau électrique [63]

I.11.1 Problématique de la conduite des réseaux électriques

La problématique fondamentale concerne la gestion simultanée de trois objectifs

- garantir la sécurité du réseau électrique,
- maintenir un service régulier aux clients,
- minimiser les charges d'exploitation

Qui est posée à la faveur de l'incertitude quasi systémique de la demande d'électricité et des contraintes techniques des installations de production et de distribution.

Une défaillance de la concordance entre l'offre et la demande trop importante entraînerait un black-out du réseau nécessitant une gestion dans l'immédiateté, rendant cependant indispensable la planification préventive.[15]

I.11.2 Organisation de la conduite du système électrique

Le fonctionnement de l'ensemble électrique est le fruit de l'interaction de plusieurs acteurs. Des sites de production installés ou intégrés à des réseaux de transport d'électricité et des stations électriques. Leur coordination est assurée par des centres de conduite organisés selon un mode hiérarchisé en deux niveaux.

Le niveau régional assure la supervision opérationnelle des réseaux locaux et la qualité de l'ensemble du service délivré. Le niveau national assure l'équilibre général du système en coordonnant tous les contributeurs de la production et du transport d'électricité. Cette organisation permet de faire un usage efficient de la complémentarité disponible.[15]

I.11.3 Rôle des systèmes d'information et conduite en temps réel

L'avancement fulgurant des technologies de communication et d'information a bouleversé la gestion du réseau électrique. De nouveaux moyens de fonctionnement centralisés et d'opération (systèmes de contrôle-commande automatisés) permettent une gestion du système plus rapide et plus fiable. Ces avancées concourent à :

- réduire les délais de transmission des informations
- améliorer les décisions sur les opérations en situation perturbé
- diminuer les coûts d'exploitation

- renforcer la sécurité d'ensemble du réseau.[15]

I.11.4 Système SCADA

Le système **SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)**, une plateforme informatique de surveillance à distance, autorise l'enregistrement d'alarmes instantanées sur tout le territoire via le réseau électrique.

Un tel dispositif permet également de surveiller le réseau pour le protéger des actes de malveillance ou des vols, et autorise les techniciens de Sonelgaz à intervenir « sans délai, dès qu'une anomalie est repérée en temps réel », avait-on expliqué lors des premiers essais de mise en fonctionnement.

La mise en place du système SCADA implique non seulement l'installation des dispositifs, mais également l'aménagement d'une salle de télécommande gérée par un personnel compétent et formé pour garantir la surveillance et la gestion du système.[16]

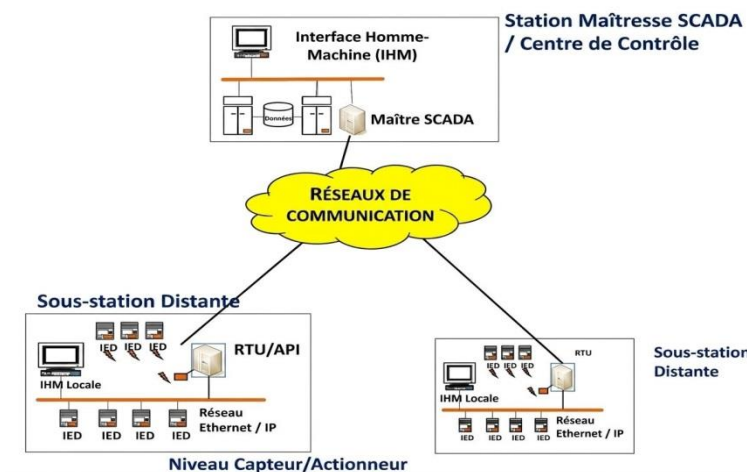


Figure I.11 : Système SCADA du réseau électrique [64]

I.11.5 Problème de blackout

Un blackout est une coupure massive de l'alimentation électrique causée par un déséquilibre important entre la production et la consommation d'énergie, une surcharge du réseau, une défaillance des équipements ou des perturbations sur les lignes de transport. Ce phénomène peut provoquer l'arrêt total ou partiel du système électrique sur une grande zone géographique.

- Facteurs environnementaux et/ou humains : conditions climatiques dures (telles que les dépôts de givre) ou effets engin sur les lignes.

- Défaillance des appareils de protection : défaillance du relais et coordination défaillante des systèmes de contrôle anciens (type SCADA)
- Difficultés de fonctionnement ; surcharge des lignes, classe de charge mal orientée, reprise de puissance réactive (tension) déficiente, entretien mal organisé ; Cyber attaques : intrusion dans un système de contrôle (type SCADA) afin de paralyser un secteur du réseau.[17]

I.11.6 Solutions de blackout

Le blackout peut être limité ou évité grâce à plusieurs solutions techniques appliquées au réseau électrique :

- Amélioration des infrastructures : réalisation du critère de sûreté (N-1), réquisitions des réseaux pour supporter les conditions, et diversification des sources de production.
- Réactualisation des systèmes de contrôle : transition des données aux réseaux intelligents (smart Grids) et unités de mesure avancées (PMU) pour un suivi en temps réel.
- Optimisation des dispositifs de protection : élaboration de relais intelligents et optimisation des stratégies de délestages automatiques.
- Amélioration de la coordination et de l'exploitation : amélioration de la coopération des opérateurs grâce à des travaux d'îlotage (islanding).
- Renforcement de la cyber sécurité : développement de systèmes de défense avancés pour protéger les réseaux de contrôle en cas d'intrusion [17]

I.12 Transition énergétique et nouveaux défis

La demande énergétique mondiale s'accroît sans relâche, tandis que, dans le même temps, les ressources fossiles sont rétrécies et doivent être accompagnées par les énergies renouvelables, à commencer par l'énergie solaire et l'énergie éolienne, car leur utilisation contribue aussi à protéger l'environnement. [18]

L'augmentation des installations de production d'énergie issue de ressources renouvelables représente un nouveau défi pour les entreprises nationales de distribution d'électricité, à savoir, la mise en réseau de sources décentralisées, soumises à l'intermittence de la puissance mais aussi de la régularité et des saisons, dans un réseau électrique national existant.[19]

I.12.1 Émergence des Smart Grids

L'apparition des Smart Grids s'inscrit dans l'évolution du réseau électrique traditionnel vers un système plus intelligent, interactif et fortement automatisé. Cette transition repose sur la mise en place d'une communication bidirectionnelle permettant l'échange d'informations entre les différents acteurs du réseau électrique.

Elle se traduit également par une meilleure intégration des activités de production, de transport et de distribution, ainsi que par un renforcement du contrôle et de la supervision des infrastructures.

Par ailleurs, cette évolution favorise l'intégration des énergies renouvelables, l'exploitation des technologies de communication avancées et la mise en œuvre de systèmes de surveillance intelligents. Elle contribue aussi à la réduction des pertes énergétiques, à l'introduction de mécanismes dynamiques de gestion de la demande et de tarification, tout en plaçant le consommateur au centre du système énergétique. Enfin, elle accompagne le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables ainsi que l'optimisation des flux de puissance. [20]

I.12.2 Éléments caractéristiques des Smart Grids

Les Smart Grids se caractérisent par une architecture évoluée basée sur la communication bidirectionnelle et l'échange permanent d'informations entre les différents composants du réseau. Ils assurent une intégration coordonnée des systèmes de production, de transport et de distribution, tout en garantissant un niveau élevé de contrôle et de supervision.

Ils facilitent l'intégration massive des énergies renouvelables et permettent une surveillance intelligente du réseau électrique. De plus, ils contribuent à la réduction des pertes, à l'optimisation des flux de puissance et à l'amélioration de la qualité de service. Ils introduisent également des mécanismes dynamiques de gestion de la demande et de tarification, tout en renforçant le rôle actif du consommateur dans le système énergétique. Enfin, ils soutiennent le développement des véhicules électriques et l'utilisation intensive des technologies de communication. [21]

I.12.3 Digitalisation et modernisation des réseaux

Convertir le réseau électrique national en un réseau moderne nécessite l'élaboration de technologies dites smart Grid, permettant une gestion dynamique (bidirectionnelle) des flux d'énergie. Ces dispositifs reposent sur des capteurs intelligents associés à des outils d'analyse tout aussi avancés, faisant appel à des

données en temps réel, et optimisant la redistribution. L'architecture créée repose sur trois composantes majeures, les compteurs communicants, les systèmes de supervision et les équipements de contrôle automatisés qui donnent une infrastructure numérique dont il est possible d'anticiper les pics de consommation pour ajuster la production attendue.[20]

I.12.4 Objectif d'un réseau intelligent Smart Grid

L'objectif principal d'un réseau intelligent (*Smart Grid*) est d'assurer une gestion optimale, fiable et efficace de l'énergie électrique grâce à l'échange d'informations en temps réel entre les producteurs, les gestionnaires du réseau et les consommateurs [20]. Les principaux objectifs d'un réseau intelligent (*Smart Grid*) sont les suivants :

- améliorer la stabilité du réseau électrique ;
- réduire les pertes énergétiques ;
- éviter les blackouts ;
- intégrer les énergies renouvelables ;
- optimiser la consommation d'énergie ;
- faciliter le stockage énergétique ;
- améliorer la qualité et la continuité de service ;
- réduire les émissions polluantes.[20]

I.12.5 Introduction des Smart Grids en Algérie

La recherche scientifique Algérienne favorise le déploiement des réseaux électriques intelligents (*Smart Grid*) en collaborant notamment avec les laboratoires de l'École Nationale Polytechnique d'Alger qui proposent des solutions nouvelles pour une meilleure gestion des échanges énergétiques, notamment par la modélisation numérique des micro réseaux, l'intégration des sources d'énergie distribuée avec des outils de simulation à la pointe de la technologie comme MATLAB/Simulink permettant d'étudier le comportement des systèmes hybrides. L'expertise nationale s'enrichit, en toute logique, des partenariats internationaux de recherche permettant le transfert de technologies avancées en matière de compteurs communicants et de normalisation des systèmes SCADA, tout en formant des ingénieurs de demain.

Les compteurs intelligents déployés par Sonelgaz, dispositif central de cette innovation, sont à même d'analyser en temps réel la production et la consommation

pour mieux équilibrer le réseau à la suite des variations de production renouvelables, grâce à l'architecture numérique mise en œuvre qui permet, via des algorithmes prédictifs, de stabiliser le réseau face aux imprévisibilités de la production renouvelable en anticipant les pics de production solaire pour adapter en temps réel, la distribution, gage d'une alimentation stable malgré l'intermittence des ressources vertes.[20]

Dans le contexte de l'évolution des réseaux électriques vers les Smart Grids, l'intégration de dispositifs de contrôle avancés devient indispensable pour assurer la flexibilité, la stabilité et la fiabilité du système. Parmi ces technologies, les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) occupent une place importante grâce à leur capacité à améliorer la gestion des flux de puissance et à renforcer les performances du réseau électrique.

I.12.6 Systèmes de transmission en courant alternatif flexibles

(FACTS)

Selon la définition de l'IEEE, les FACTS désignent des systèmes reposant sur l'électronique de puissance et d'autres équipements statiques, permettant de réguler un ou plusieurs paramètres d'un réseau de transmission en courant alternatif.

Ces dispositifs constituent une solution économique et efficace pour gérer le transfert de puissance au sein d'un réseau de transmission interconnecté.

Grâce aux FACTS, il devient possible de maîtriser l'angle de phase et l'amplitude de la tension aux nœuds sélectionnés, ainsi que les impédances des lignes d'un système de transmission.[38]

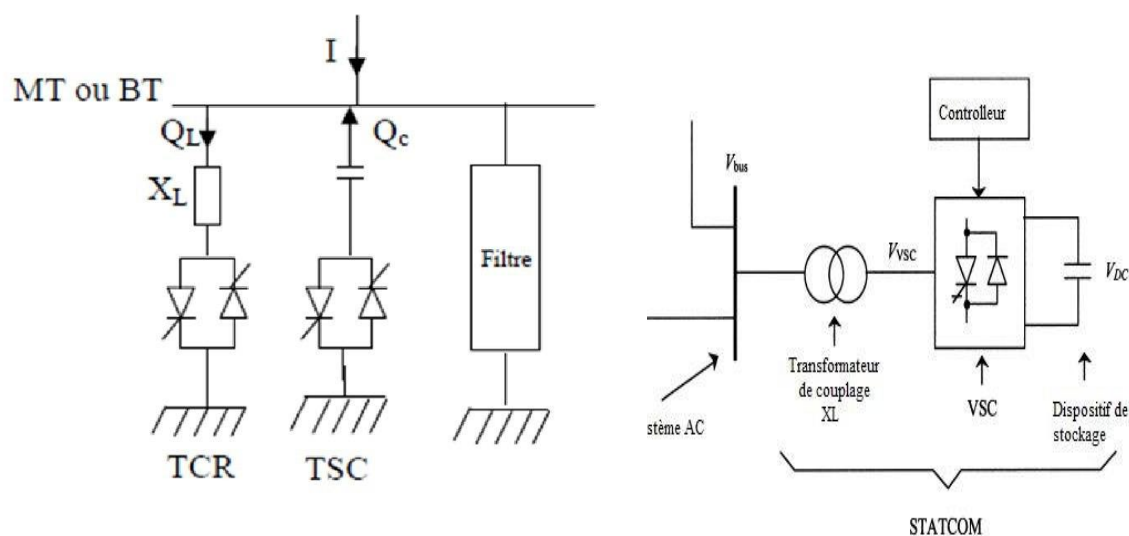


Figure I.12 : différents types de FACTS [65]

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux composants du réseau électrique ainsi que les défis associés à son évolution vers le concept de Smart Grid.

Nous avons également mis en évidence le rôle des technologies avancées dans cette transition, notamment les dispositifs FACTS, qui permettent d'améliorer la flexibilité, la stabilité, la fiabilité et l'efficacité du système électrique.

L'intégration de ces technologies constitue une étape essentielle pour répondre aux exigences croissantes des réseaux modernes et favoriser une gestion plus intelligente de l'énergie.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la modélisation des dispositifs FACTS ainsi que leur intégration dans les réseaux électriques. Une attention particulière sera accordée à l'étude de leur impact sur les performances du système, notamment en termes de régulation de tension, de contrôle des flux de puissance et de réduction des pertes. Par ailleurs, nous aborderons le problème de l'Optimal Power Flow (OPF) en présence des dispositifs FACTS, afin d'optimiser l'exploitation du réseau électrique tout en respectant les contraintes techniques et opérationnelles.

L'objectif est de mettre en évidence la contribution de ces dispositifs à l'amélioration de la stabilité, de la sécurité et de l'efficacité énergétique du réseau.

Chapitre II Optimisation des réseaux électriques en présence des FACTS

II.1 Introduction

Au cours des dernières années, l'industrie de l'énergie électrique a été confrontée à des défis découlant de nouvelles contraintes affectant divers aspects de la production, du transport et de la distribution de l'électricité. Parmi celles-ci figurent les restrictions relatives à la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit au sein des systèmes existants, la cogénération énergétique, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité, ainsi que le respect des normes environnementales.

Dans ce cadre, il devient essentiel pour le gestionnaire de réseau de disposer d'outils permettant de maîtriser les puissances réactives, les tensions et les transits de puissance dans les lignes, afin d'exploiter le réseau de transport existant de manière aussi efficace et sécurisée que possible. Jusqu'à la fin des années 1980, les seuls dispositifs capables d'assurer ces fonctions étaient des équipements électromécaniques, tels que les transformateurs à régulateur en charge, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs, utilisés pour maintenir la tension et gérer le réactif.

Cependant, leur usure et leur relative lenteur limitent leur activation à quelques fois par jour, ce qui les rend difficilement adaptés à un contrôle continu des flux de puissance. Une autre approche de régulation et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits, reposant sur l'électronique de puissance, a démontré son efficacité.

La résolution de ces enjeux nécessite une amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place, en leur conférant une flexibilité accrue pour répondre aux nouvelles exigences. Les éléments proposés pour ce contrôle amélioré sont les dispositifs FACTS, ou « Flexible Alternating Current Transmission System »[47]. Dans ce chapitre, nous présenterons d'une manière claire et détaillée les caractéristiques des dispositifs FACTS développés à ce jour. Nous aborderons aussi le problème de l'Optimal Power Flow (OPF) en présence des dispositifs FACTS, afin d'optimiser l'exploitation du réseau électrique tout en respectant les contraintes techniques et opérationnelles.

II.2 Présentation des dispositifs FACTS

Cette technologie est devenue un outil de référence, en raison de sa rapidité de réponse de commande, pour l'amélioration de l'exploitation et de la flexibilité des systèmes de puissance. Mais, il faut aussi considérer que, avec les évolutions récentes

des thyristors GTO/IGBT, le temps de réponse de ces équipements a été amené à quelques millisecondes, ce qui permet d'éventuellement apporter des solutions appropriées quelle que soit la situation du réseau électrique.[22] [23]

II.2.1 Définition des FACTS

Les dispositifs FACTS (Flexible Alternating Current Transmission) ont des systèmes utilisés pour rendre le réseau électrique plus flexible et contrôlé, qui ont été définis par IEEE, et ces systèmes contiennent des appareils qui reposent sur l'électronique de puissance comme GTO et IGBT. Leur rôle est de contrôler rapidement l'électricité et ils contiennent également des contrôleurs fixes (contrôleur statique).

Le dispositif FACTS est contrôlé par des ordinateurs, pas manuellement, et utilise des microprocesseurs et de la microélectronique. Les commandes sont calculées et les décisions sont prises rapidement (temps réel) et il contrôle plusieurs paramètres (déphasage, tensions, impédance). [22] [23]

II.2.2 Objectif des FACTS

Les dispositifs FACTS ont pour objectif d'améliorer la régulation des flux de puissance et la stabilité des niveaux de tension afin d'augmenter les marges de stabilité du réseau électrique et d'optimiser l'exploitation des lignes de transport. Grâce à l'intégration de technologies avancées, ils contribuent également à améliorer la qualité de l'énergie, à accroître les capacités de transit et à assurer un meilleur contrôle des réseaux électriques. [24][25]

II.2.3 Avantages des FACTS

Le contrôle du flux de puissance constitue la fonction fondamentale des dispositifs FACTS. Cette régulation permet d'ajuster l'alimentation en fonction de la demande de la charge, d'assurer un fonctionnement optimal et de faire face aux situations d'urgence.

Parmi les avantages des dispositifs FACTS, on peut citer :

- ✓ Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction secondaire des FACTS englobe le renforcement de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations, la prévention de l'effondrement des oscillations de puissance ainsi que le contrôle de la stabilité de tension.

- ✓ Augmentation de la capacité de transport des lignes, permettant d'exploiter pleinement leurs limites thermiques, que ce soit pour répondre à des pointes instantanées ou à des variations saisonnières de la demande.
- ✓ Établissement de connexions sécurisées entre les producteurs d'énergie et les différentes régions, en réduisant la réserve de puissance que chaque zone doit maintenir disponible pour répondre aux besoins.
- ✓ Réduction du flux de puissance réactive, ce qui libère la capacité des lignes pour transporter davantage de puissance active.
- ✓ Mise en œuvre de boucles de contrôle [26]

II.3 Classification des dispositifs FACTS

II.3.1 FACTS série

Ces compensateurs, qui constituent une portion du réseau, peuvent être raccordés en série au réseau et à ce titre leur fonctionnement peut être soit celui d'une impédance réglable (inductive ou capacitive), soit celui d'une source de tension variable. Ils interviennent en général sur l'impédance des lignes de transport pour compenser la chute de tension inductive, permettant alors de modifier la réactance effective de la ligne. Ces dispositifs sont performants pour contrôler l'équilibre de puissance et assurer la stabilité dynamique au sein du réseau électrique.[22]

II.3.2 Compensateur série commandé par thyristors (TCSC)

Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 1980. Un compensateur TCSC peut être constitué d'un condensateur fixe branché en parallèle avec une branche de réactance contrôlée par thyristors (TCR, ou gâchette à thyristors), montés tête bêche.

Il peut aussi être constitué de plusieurs modules mis en série. Le TCSC permet de modifier l'impédance de la ligne avec un temps de réponse de commande faible afin de pouvoir contrôler la puissance transmise. L'impédance équivalente de la ligne devient variable en fonction de l'angle de déclenchement des thyristors.

Le TCSC a été intégré sur les lignes de transport d'énergie électrique pour optimiser la puissance transmise en permanence. En cela, la régulation ou la variation de l'impédance des lignes de transport est assurée par le TCSC en fonction de l'angle de déclenchement des thyristors, principale caractéristique qui le rend apte à amortir les

oscillations des réseaux électriques et la résonance hypo synchrone provoquée par la compensation capacitive en série sur la ligne de transport d'énergie électrique.[22]

II.3.3 Compensateur série statique synchrone (SSSC)

Le compensateur série statique synchrone est introduit par Gyugyi en 1989 sous la forme d'un onduleur triphasé interconnecté en série avec la ligne de transmission via un transformateur. Sa fonction consiste à s'injecter à la fréquence du réseau une tension triphasée en série avec la ligne de transport, qui est déphasée à 90° du courant de ligne.

Il fonctionne ainsi en continu sur la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi insérée dans la ligne. Son principal avantage est que, contrairement à un vrai condensateur ou inducteur, il n'est pas installé physiquement, mais il simule leur effet tout en se préservant des oscillations de résonance qu'un condensateur ou une inductance serait susceptible de créer, en association avec les éléments inductifs du réseau. Le SSSC est alors capable d'interchanger de la puissance active, mais tout aussi bien réactive, avec le réseau électro-énergétique pour garantir une adéquate stabilité de ce dernier.[22]

II.3.4 FACTS parallèle

Ces compensateurs sont reliés au réseau électrique en parallèle. Grâce à une impédance variable, ces machines peuvent, à travers le point de raccordement, absorber ou bien injecter du courant dans le réseau électrique. L'injection de courant dans le réseau a pour effet, d'une part, de modifier les puissances active et réactive qui circulent dans la ligne et, d'autre part, de garder sa tension régulée.[27]

II.3.5 Compensateur statique d'énergie réactive (SVC)

Le compensateur statique de puissance réactive (Static Var Compensator) est un équipement de compensation à brancher en parallèle. Son principal objectif est d'adapter le niveau du voltage de ses bornes en jouant sur la quantité de puissance réactive à introduire dans le réseau électrique (ou à en retirer). Par ailleurs, il améliore la stabilité dynamique du système électrique en intégrant une boucle de régulation annexe pour amortir les oscillations de puissance à basse fréquence.[27]

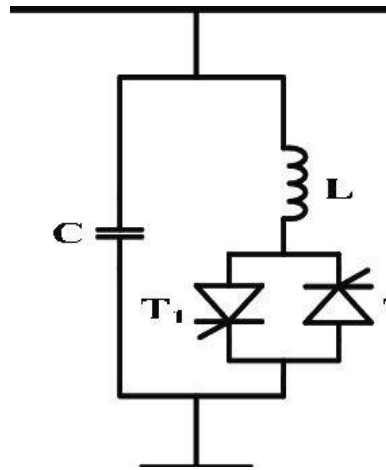


Figure II.1 : Schéma électrique du SVC.[28]

Le schéma électrique du SVC (voir Figure II.1), habituellement, est constitué des éléments ci-après :

- ✓ des batteries de condensateurs fixes (FC, Fixed Capacitor) .
- ✓ d'une inductance pilotée par thyristors (TCR, Thyristor Controlled Reactor).
- ✓ d'un condensateur commute par thyristors (TSC, Thyristor Switched Capacitor)
- .
- ✓ d'une inductance commutée par thyristors (TSR, Thyristor Switched Reactor).[27]

II.3.6 Compensateur statique synchrone (STATCOM)

Ce type de compensateur a été développé dans les années 70 et ne s'est vraiment répandu qu'à partir des années 1990, lorsque les progrès des interrupteurs GTO de forte puissance le permirent. Le STATCOM (Figure II.2) fonctionne comme un compensateur statique de puissance réactive (SVC), mais il est plus efficace que ce dernier pour assurer la stabilité transitoire et, du fait de son absence d'inertie, il est plus réactif.[27]

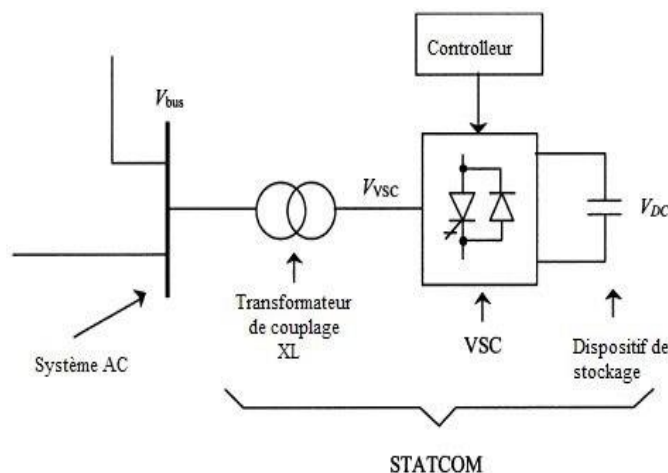


Figure II.2 : Schéma électrique du STATCOM [29]

II.3.7 FACTS combinés (série-série et shunt-série)

Cette configuration en résulte alors de l'association de dispositifs à la fois en série et en dérivation, commandée de façon coordonnée selon un réglage prédéterminé. Ces systèmes sont donc capables d'agir sur les trois paramètres (tension, impédance et déphasage) permettant la maîtrise du flux de puissance sur une ligne de transport électrique.[27]

II.3.8 Contrôleur universel de flux de puissance (UPFC)

Il apparaît clairement que l'équipement FACTS le plus performant est l'UPFC. Cet appareil, qualifié d'universel, est en effet le seul permettant de supporter l'ensemble des stratégies de compensation de puissance. Il permet ainsi de maîtriser la tension, l'angle de transit ainsi que l'impédance de la ligne. Son schéma électrique est présenté dans la figure II.3. Il est constitué de deux onduleurs triphasés de tension. Le premier, raccordé au réseau en parallèle par un transformateur shunt, et le second inséré en série dans la ligne.

Ces deux onduleurs sont reliés entre eux par un bus continu matérialisé par un condensateur. Il peut aussi instantanément passer d'une fonction à une autre sur simple évolution de la commande des onduleurs pour activer la fonction adéquate selon les défauts ou évolutions du réseau (Passelergue, 1998). L'UPFC va même moduler les fonctions des autres dispositifs FACTS : réglage de la tension, répartition des flux et stabilité mais aussi atténuation des oscillations de puissance.[27]

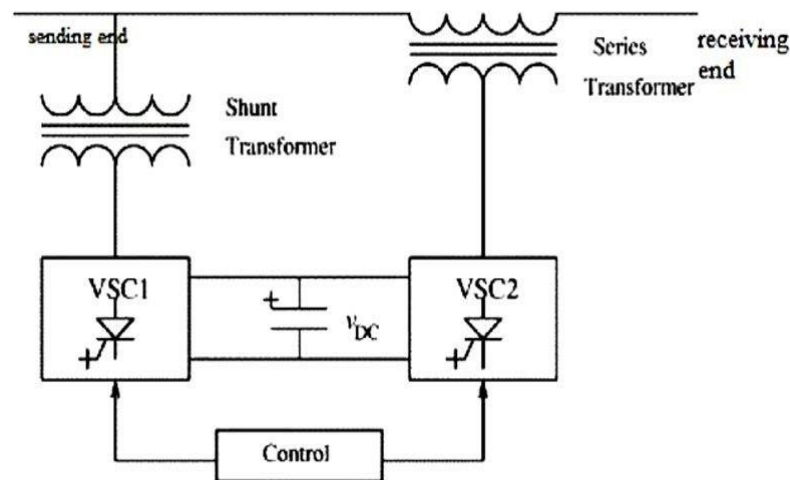


Figure II.3 : Schéma électrique de l'UPFC.[30]

II.3.9 Contrôleur de puissance interlignes (IPFC)

Le contrôleur de transit de puissance entre lignes de type IPFC est employé dans le cadre d'un système de multiples lignes connectées à un même poste électrique. L'IPFC est constitué de plusieurs compensateurs synchrones série (SSSC), chacun assurant une compensation série sur une ligne distincte. Sur le côté continu, l'ensemble des convertisseurs sont interconnectés par l'intermédiaire de disjoncteurs.

L'IPFC permet de transférer la puissance active entre les lignes compensées, afin d'équilibrer les transits de puissance active et réactive sur ces lignes, ou de délester une ligne surchargée au profit d'une autre moins sollicitée. Les tensions injectées comportent une composante en quadrature et une composante en phase avec les courants respectifs des lignes. La composante en quadrature assure une compensation série indépendante pour chaque ligne, tandis que la composante en phase détermine le niveau de puissance active échangée avec les autres lignes.

L'IPFC est conçu comme un contrôleur de transit de puissance, intégrant deux compensateurs synchrones statiques ou plus, chacun étant indépendamment contrôlable et connecté en série. Ces compensateurs sont des convertisseurs à semi-conducteurs à source de tension, capables d'injecter une tension quasi sinusoïdale dont l'amplitude est variable. Ils sont reliés entre eux par l'intermédiaire d'un condensateur commun en courant continu.[22]

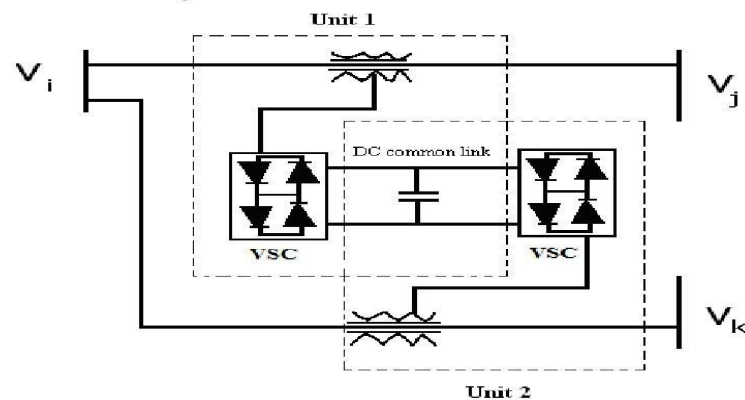


Figure II.4 : Schéma électrique unifilaire simplifié de l'IPFC [31]

Grâce à l'IPFC, la puissance active peut être transférée entre différentes lignes. Il devient ainsi possible de :

- ✓ Équilibrer les puissances active et réactive entre les lignes de transport.
- ✓ Accroître la puissance transmise via les lignes de transport.
- ✓ Assurer la compensation et réduire les chutes de tension.
- ✓ Améliorer l'efficacité des systèmes électriques en régime dynamique.[22]

II.3.10 Comparaison des dispositifs FACTS

La sélection d'un dispositif FACTS repose sur divers critères techniques, économiques et opérationnels, en fonction des contraintes propres au réseau électrique étudié. Afin de résumer les particularités des différentes technologies, le Tableau II.1 représente une analyse comparative des principaux systèmes FACTS.

Tableau II.1 : Comparaison des dispositifs FACTS[22][32]

Dispositif	Type	Performance	Coût	Application
SVC	shunt	bonne	faible	régulations de tension
STATCOM	shunt	très bonne	moyen	réseaux sensibles
TCSC	série	bonne	faible	contrôle du flux
SSSC	série	très bonne	moyen	compensation série
UPFC	combinés	excellente	élevé	contrôle global

IPFC	combinés	Très élevé	élevé	Puissance multi lignes
------	----------	------------	-------	------------------------

II.4 Modélisation des FACTS dans les réseaux électriques

L'intégration des dispositifs FACTS dans les réseaux de transport d'électricité exige une modélisation mathématique précise pour évaluer de manière adéquate leur influence sur le comportement en régime permanent [33]

II.4.1 Modélisation dans le calcul de flux de puissance

Lorsqu'un dispositif FACTS est intégré dans une ligne du réseau électrique, il agit directement sur les puissances active et réactive au niveau de la ligne de transport. En effet, ce modèle représente l'effet du dispositif FACTS sur les flux de puissance circulant dans la ligne par des injections de puissance équivalentes, calculées de manière à reproduire le même comportement que celui du dispositif FACTS considéré. [33]

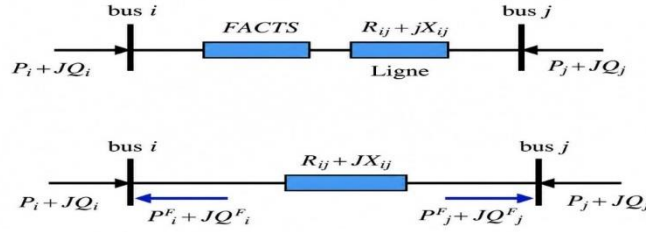


Figure II.5 : Modélisation par injection de puissance[8]

Les injections de puissances active et réactive au nœud i sont données par :

$$\begin{cases} P_i^F = P_{ij} - P_{ij}^F \\ Q_i^F = Q_{ij} - Q_{ij}^F \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

P_i^F, Q_i^F : Injections équivalentes de puissances active et réactive au nœud i

P_{ij}, Q_{ij} : Transits de puissances active et réactive sans dispositif FACTS.

P_{ij}^F, Q_{ij}^F : Transits de puissances active et réactive avec le FACTS dans la ligne.

Puissances active :

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{k=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (\text{II.2})$$

Puissances réactive:

$$Q_i + Q_i^F = V_i \sum_{k=1}^n V_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (\text{II.3})$$

Les valeurs des injections P_i^F , Q_i^F sont calculées après chaque itération, mais ne sont pas utilisées dans le calcul de la matrice Jacobéenne [33]

Dans le calcul de flux de puissance classique les variables associées au problème dépendent des variables de commande qui sont principalement constituées des amplitudes des tensions aux nœuds de charge, des puissances actives de référence (nœud de référence) ainsi que des rapports de transformation des transformateurs et aussi des phases des tensions pour tous les nœuds au niveau desquels il est nécessaire d'estimer les tensions sinon les puissances au niveau de l'ensemble du réseau de transport d'électricité. En finalité, l'état de fonctionnement d'un réseau électrique est donc entièrement spécifié par les variables de commande et les variables d'état [34].

II.4.2 Méthode de résolution de l'écoulement de puissance

II.4.2.1 Méthode de Newton-Raphson

En effet le temps de calcul nécessaire pour l'écoulement de puissance des grands réseaux est considérablement réduit, au prix d'une mémoire de stockage importante, cette méthode nécessitant plus d'opérations mathématiques et donc, à chaque itération, plus de temps que la méthode de Gauss-Seidel, mais sa convergence plus rapide (avec moins d'itérations), même pour les réseaux de grande taille, compense ces inconvénients.[39]

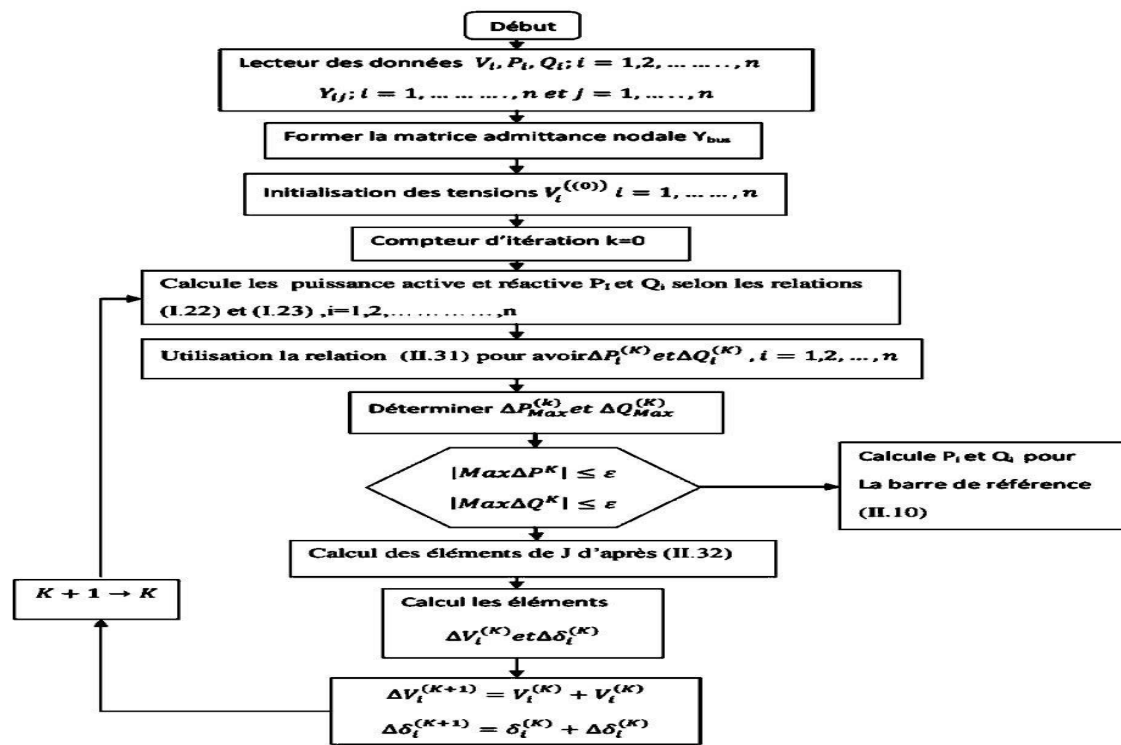


Figure II.5 : Organigramme de la méthode de Newton Raphson[40]

L'avantage de cette approche réside dans sa rapidité de convergence, attribuable à l'exploitation des informations issues de la dérivée de $F(x)$. Cette convergence présente un caractère quadratique. C'est précisément cette vitesse de convergence qui explique le succès de cette méthode ainsi que celui des techniques similaires.[40]

II.4.3 Impact des FACTS sur le réseau

Le contrôle du flux de puissance constitue la fonction prioritaire des FACTS, dont les caractéristiques peuvent être paramétrées conformément à une stratégie de charge préétablie afin de répondre aux exigences rigoureuses des clients. Parmi les fonctions d'un FACTS, on peut citer :

- Contrôle des tensions aux nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes jusqu'à leurs limites thermiques.
- Gestion de la puissance réactive : atténuer le transit de puissance réactive.
- Amélioration de la stabilité dynamique du système :
- Amélioration de la stabilité transitoire,
- Modulation des oscillations,

- Contrôle de la stabilité en tension, permettant à la ligne de transmettre plus de puissance active, et anticipé d'éventuelles pertes engendrées par la transmission de tension.
- Amélioration de la qualité de l'énergie.[35]

II.5 Ecoulement de puissance optimal (optimal power flow OPF)

L'écoulement de puissance optimal (OPF) est un problème crucial dans le fonctionnement des systèmes énergétiques. La recherche des niveaux optimaux de production d'électricité des centrales dans le but de minimiser les coûts d'exploitation, de réduire les pertes de transport, d'améliorer le profil de tension et d'augmenter le transit de puissance constitue un problème fondamental de gestion des systèmes énergétiques : c'est celui essentiellement étudié dans la littérature au cours des deux dernières décennies.

En effet, le dispatching économique d'un système électrique est un processus par lequel sont déterminés les niveaux des variables de commande à optimiser, selon plusieurs critères prédéfinis, tout en respectant les contraintes imposées par les conditions physiques et techniques du réseau électrique.

Différents types de méthodes d'optimisation peuvent être élaborés pour résoudre ce problème. La programmation linéaire est une des solutions choisie pour estimer le problème complexe du dispatching économique.

La figure II.7 présente le flux de puissance optimal tel qu'il est traditionnellement considéré, à savoir que la fonction objectif ainsi que les contraintes sont résolues au point de départ A, et que la solution optimale satisfait tous les contraintes du système jusqu'au point B, où la répartition est en revanche comprise dans l'intervalle de temps .[5]

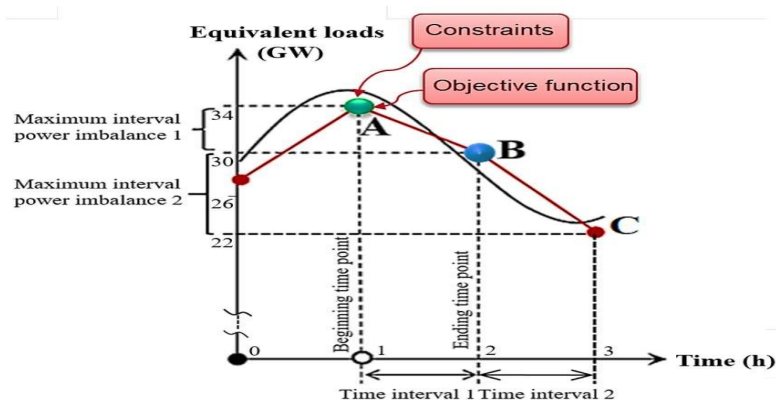


Figure II.7 : Flux de puissance optimal traditionnel [36]

II.5.1 Formulation mathématique de l'OPF

La résolution du problème d'écoulement de puissance optimal (OPF) consiste à déterminer l'état de fonctionnement optimal d'un réseau sous les contraintes des lois électriques et des limites techniques sur les variables de commande, en agissant sur les variables de commande disponibles afin d'optimiser un objectif donné, dans le cadre des équations de l'écoulement de puissance du réseau.

La fonction objective traduit, selon le problème envisagé, soit la moindre perte, soit la meilleure puissance transmissible, tandis que les contraintes associent les lois physiques de comportement du système à ses limites de conception et d'exploitation.

Ce type de problème est généralement traité comme un problème d'optimisation statique non linéaire où la fonction objectif est non linéaire et les contraintes peuvent être soit non linéaires, soit linéaires. Le problème de l'OPF peut être formalisé avec les équations suivantes :

$$\min f(x, u) \quad (II.4)$$

$$g(x, u) = 0 \quad (II.5)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (II.6)$$

$$U_{\{min\}} \leq U \leq U_{\{max\}} \quad (II.7)$$

Avec :

- u : variables de contrôle
- x : variables d'état
- (II.4) : Représente la fonction objective (Généralement le coût de production).
- (II.5) : Traduit les contraintes d'égalités représentant les équations d'écoulement de puissance (Production = Consommation + pertes).
- (II.6) : Contraintes d'inégalités fonctionnelles qui ont un rapport en particulier avec les puissances transitées que les lignes peuvent supporter.

- (II.7) : représente les limites admissibles des variables de décision (puissances générées ou tensions qui varient entre 0.95 et 1.05 Pu).[37]

a) minimisation du coût

Cette fonction témoigne de la nécessité de minimiser le coût global de production des puissances actives. On suppose que le seul coût du centre de production est tributaire de sa puissance active injectée dans le réseau.

$$F = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{\{Gi\}}) \quad (II.8)$$

Le coût individuel de chaque générateur thermique peut être exprimé comme suit:

$$F_i(P_{\{Gi\}}) = a_i + b_i p_{\{Gi\}} + c_i P_{\{Gi\}}^2 \quad (II.9)$$

$P_{\{Gi\}}$ est la puissance active générée par le générateur thermique au nœud i , N_G est le nombre de générateurs thermiques ; a_i, b_i, c_i sont les coefficients de coût du combustible.[38]

b) minimisation des pertes de transmission de puissance active

Le but du flux de puissance optimal est de minimiser les pertes liées à la transmission de la puissance active, ce qui peut être illustré par l'équation d'équilibre de puissance suivante.[34]

$$J = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_i = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{N_{Gen}} P_{Di} \quad (II.10)$$

c) minimisation des pertes des pertes de transmission de puissance réactive

La disponibilité de la puissance réactive est primordiale pour la marge de stabilité en tension du système statique, afin d'appuyer le transfert de la puissance active depuis la source vers les charges. Par conséquent, l'expression suivante fournit la minimisation des pertes de VAR.[34]

$$J = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} Q_i = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} Q_{Gi} - \sum_{i=1}^{N_{Gen}} Q_{Di} \quad (II.11)$$

d) Contraintes d'égalité

Ces restrictions reflètent les lois physiques qui régissent le système électrique. Ces dernières sont illustrées par les équations non linéaires relatives à l'écoulement de puissance. Il est nécessaire que l'addition des puissances actives et réactives alimentées dans chaque jeu de barres soit nulle.[38]

$$\Delta P_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{\{Gi\}} + P_{\{Di\}} \quad (\text{II.12})$$

$$\Delta Q_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{\{Gi\}} + Q_{\{Di\}} \quad (\text{II.13})$$

Ou ;

- ✓ $P_{\{Di\}}, Q_{\{Di\}}$: puissance active et réactive de la charge
- ✓ G_{ij}, B_{ij} : élément de la matrice d'admittance
- ✓ n : nombre de bus

e) Contraintes d'inégalités

Concrètement, il s'agit de veiller à ne pas dépasser les limites des éléments physiques du réseau électrique, tels que les générateurs, transformateurs à prises de charge réglables et transformateurs de phase. En plus des contraintes sur les puissances actives de chaque générateur, qui décrivent la fonction coût, des autres contraintes d'inégalité à respecter sont de type sur les puissances actives et réactives produites qui sont bornées inférieurement et supérieurement.[38].

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (\text{II.14})$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (\text{II.15})$$

Les transformateurs munis de prises de charge sont à l'origine des écarts « maximum et minimum » du niveau de tension par rapport à la tension nominale. De même, les transformateurs à déphasage sont à l'origine des écarts « maximum et minimum » dans les phases des tensions. Les deux types de transformateurs imposent les contraintes d'inégalités suivantes : .[38]

$$t_{ij}^{min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{max} \quad (II.16)$$

$$\alpha_{ij}^{min} \leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{ij}^{max} \quad (II.17)$$

Pour garantir la sécurité du réseau électrique, les lignes de transport et les transformateurs de puissance sont assujettis à des limites de transit de puissance apparente en raison des pertes thermiques dans les conducteurs et des problématiques de stabilité du système, ce qui se formalise sous forme d'une contrainte d'inégalité qui limite le carré de la puissance exprimée en MVA pour un transformateur ou pour une ligne de transport. .[38]

$$|S_{ij}|^2 \leq |S_{ij}^{max}|^2 \quad (II.18)$$

Pour préserver la qualité du service d'électricité et la sécurité du système, les niveaux de tension des jeux de barres leur doivent être maintenus impérativement dans le cadre qu'établissent leurs bornes minimales et maximales, tout en nécessitant de rapporter d'autres contraintes d'inégalité.[38]

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad II.19$$

Le problème en question s'appuie sur "n" contraintes d'égalité et "m" contraintes d'inégalité. Le nombre de variables du problème est égal à la dimension du vecteur de commande, qui est composé spécifiquement par les puissances active et réactive injectées aux nœuds, les tensions au niveau des nœuds, les positions des prises des transformateurs, voire d'autres variables du même type.[38]

II.5.2 Méthodes de résolution de l'OPF

Les principales approches méthodologiques visant à calculer l'écoulement de puissance, on peut dire, se classent en deux grandes catégories soit : d'une part, les

méthodes conventionnelles également appelées méthodes classiques qui servent à résoudre itérativement les équations non linéaires du problème d'écoulement de puissance en ayant recours à un processus répétitif de convergence et d'autre part, les méthodes non conventionnelles qui ont été élaborées spécifiquement et sont adaptées au but de résoudre le problème OPF, en permettant d'explorer une plus vaste étendue de solutions et d'intégrer des contraintes sophistiquées prenant part à l'optimisation du fonctionnement du réseau électrique.[38]

II.5.2.1 Méthode du point intérieur

Lancée en 1984, la méthode du point intérieur a marqué une rupture dans le domaine de la programmation linéaire ainsi que non linéaire à grande échelle notamment en recherche de solution optimale à l'intérieur de la région réalisable à partir de paramètres de barrière.

Sa remarquable robustesse numérique se traduit par un nombre d'itérations pratiquement indépendant de la taille du problème, ce qui la rend particulièrement adaptée à la résolution du flux de puissance optimal (OPF) dans les réseaux électriques de grande taille.

Parmi ces déclinaisons, la méthode de prédiction-correction de Mehrotra a fait figure de référence par la possibilité d'affiner la direction de recherche sur la base d'un processus itératif en deux phases différentes. La littérature dédiée a confirmé l'efficacité de cette stratégie de nombre d'itérations réduites sur les différents réseaux tests pour réduire les pertes de transport, intégrer l'énergie éolienne ou encore optimiser le placement des dispositifs FACTS. Les travaux récents s'attellent désormais à concevoir des méthodes hybrides combinant la puissance de l'approche par point intérieur à des algorithmes classiques ou à des méta-heuristiques.[38]

II.5.2.2 Application de la méthode des algorithmes génétiques à l'OPF

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Le but recherché ici est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation (la solution optimale est cherchée à partir d'une population de solutions enrichies par des processus aléatoires). La recherche de la meilleure solution s'effectue en générant à la suite d'une nouvelle génération de solutions une application successive et de manière répétitive, sur la population courante, de trois opérateurs : sélection,

croisement et mutation (leur application est répétée jusqu'à la satisfaction d'un critère d'arrêt).[43]

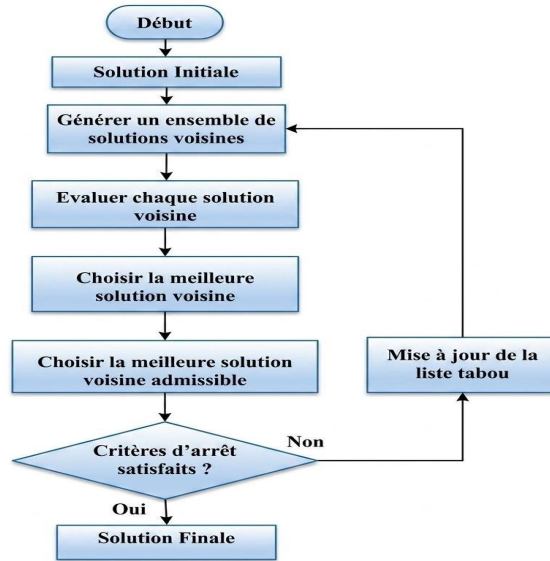


Figure II.8 : Organigramme de l'algorithme génétique.[44]

II.5.2.3 Application de la méthode PSO à l'OPF

La démarche est similaire à celle employée pour la méthode des algorithmes génétiques, à la différence près que, dans ce cas, un programme est élaboré en utilisant la boîte à outils d'optimisation par essaim de particules fin de minimiser la fonction de coût (fitness).

Ce programme reçoit en entrée les données relatives aux lignes, aux nœuds et aux coefficients de perte, puis applique le principe de déplacement des particules conformément à l'équation, permettant de faire évoluer en continu un ensemble d'individus (solutions potentielles) jusqu'à ce que les critères de convergence de l'algorithme soient satisfaits. Une fois la convergence atteinte, [37].

II.6 OPF en présence des dispositifs FACTS

La fonction objective à minimiser inclut la somme des coûts de production active et réactive des générateurs thermiques, ainsi que le coût de génération réactive des dispositifs FACTS, de la manière suivante [38]:

$$F = \sum_{i=1}^{N_G} (F_i(P_{Gi}) + F_i(Q_{Gi})) + \sum_{l=1}^{N_{FACTS}} F(Q_{GFACTS}) \quad (II.20)$$

La fonction de cout SVC

$$F(Q_{SVC}) = 127,28 - 0.3051Q_{SVC} + 0,0003Q_{SVC}^2 \quad (II.21)$$

II.6.1 Objectifs de l'OPF avec FACTS

L'objectif principal de la solution au problème d'écoulement de puissance optimal (OPF) consiste à déterminer les valeurs des variables d'action et de l'état du système assurant l'optimisation de la valeur de la fonction objectivement choisie. Le choix de cette fonction doit faire l'objet d'analyses approfondies de sécurité et d'économie du réseau électrique.

En général celle-ci est une fonction non linéaire d'ordre deux. Parmi les fonctions objectives généralement utilisées dans les études d'OPF on distingue :

- Les coûts de production minimaux.
- Les pertes actives de transport minimales.
- Les pertes réactives de transport minimales.
- Les puissances actives transmissibles maximales.
- Les émissions de gaz minimales.
- Les coûts de puissance réactive injectée à minimiser (pour déterminer où implanter des batteries ou bobines de compensation.)
- Les coûts de puissance active injectée à minimiser (pour déterminer où implanter des unités de production).[37]

II.6.2 Placement optimal des FACTS

À l'heure actuelle, les méthodologies les plus couramment employées pour déterminer l'emplacement optimal d'un contrôleur FACTS reposent sur des techniques d'optimisation méta heuristiques qui se révèlent être d'une grande efficacité pour le traitement de problèmes à objectifs multiples et d'algorithmes multi-objectifs sous contraintes. L'algorithme PSO a été appliqué dans le cadre de l'implantation optimale des contrôleurs FACTS tels que SVC, UPFC et TCSC, tandis que pour le SSSC, l'ensemble d'optimisation, a été imparti à l'algorithme génétique (GA). Une fonction

multi-objectif comme MOEPSO a aussi servi à l'identification de l'emplacement des dispositifs FACTS afin d'améliorer la stabilité du système.[46]

II.6.3 Opérations de PSAT

Le PSAT (Power System Analysis Toolbox) est une boîte à outils développée sous l'environnement Matlab pour effectuer l'analyse et la simulation des systèmes électriques, dont la version en ligne de commande sous GNU Octave. Les différentes opérations peuvent être réalisées à l'aide d'interfaces utilisateur graphiques (GUI) facilitant leur manipulation.

Une bibliothèque Simulink est également fournie comme outil ergonomique et accessible pour la conception et la modélisation des réseaux électriques.[41]

Le PSAT offre plusieurs modèles dynamiques d'équipements variés, notamment des machines électriques, équipements de commande et de mesure, différents types d'éoliennes, d'installations solaires photovoltaïques et de charges associées, transformateurs régulateurs, équipements FACTS, systèmes de transmission haute tension à courant continu (HVDC), modèle de résonance sub-synchrone, pile à hydrogène à oxyde solide (SOFC), et modèle dynamique masse-ressort.[38]. Figure II.9 et Figure II.10 représente respectivement, l'interface de PSAT et la Bibliothèque



Figure II.9 : Interface de PSAT

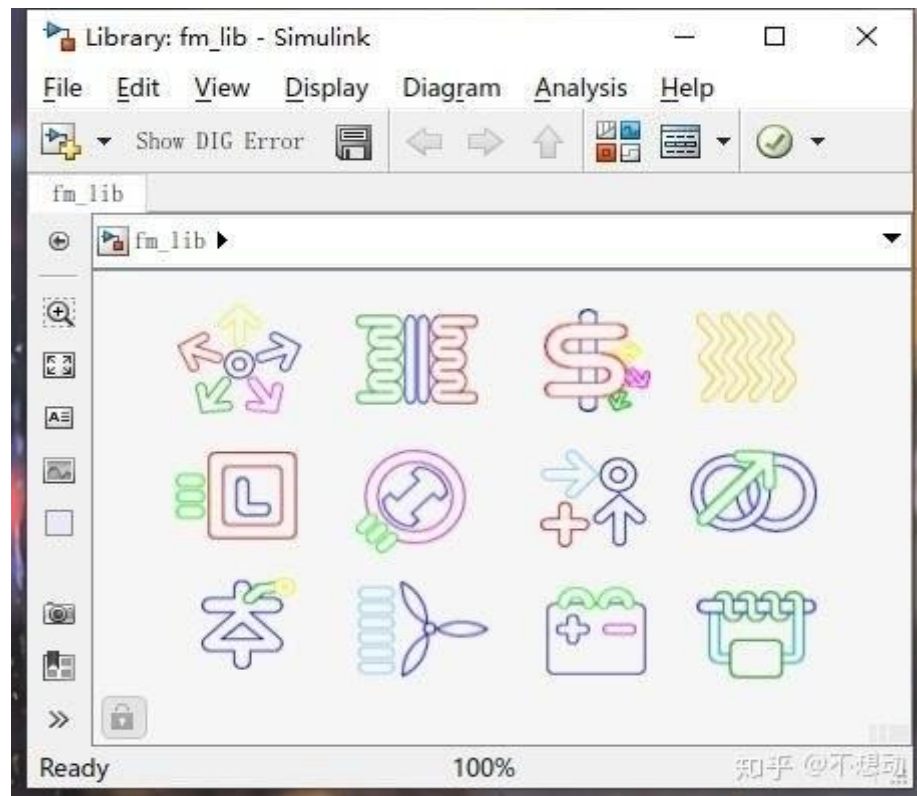


Figure II.10 : Bibliothèque de PSAT

Les principales opérations de PSAT sont :

- ✓ Le flux de puissance (PF)
- ✓ Le flux de puissance continu et/ou l'analyse de la stabilité de tension (CPE-VS)
- ✓ Le flux de puissance optimal (OPF)
- ✓ L'analyse de contingences
- ✓ L'analyse de la stabilité aux petites perturbations (SSA)
- ✓ La simulation temporelle (TD)

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évolution et la modélisation des dispositifs FACTS, ainsi que leur rôle dans l'amélioration des performances des réseaux électriques. Nous avons également introduit l'Optimal Power Flow (OPF) comme outil d'optimisation permettant d'exploiter efficacement ces dispositifs. Les FACTS contribuent notamment à l'amélioration du profil de tension, à la réduction des pertes et au renforcement de la stabilité du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats de simulation sous PSAT afin d'évaluer l'impact de l'intégration des dispositifs FACTS sur les performances du réseau à travers une étude d'OPF.

Chapitre III Simulations et résultats

III.1 Introduction

Après avoir présenté les fondements théoriques des dispositifs FACTS ainsi que leur modélisation, ce chapitre est consacré à l'étude de leur impact sur les performances des réseaux électriques à travers des simulations réalisées sous l'environnement PSAT. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de l'insertion d'un compensateur statique de puissance réactive (SVC) sur le fonctionnement du réseau électrique.

Dans un premier temps, une analyse de l'écoulement de puissance (Power Flow) sera effectuée afin d'examiner les effets du SVC sur la répartition des flux de puissance, les niveaux de tension aux différents nœuds du réseau ainsi que les pertes électriques.

Dans un second temps, une étude d'Optimal Power Flow (OPF) sera menée afin d'évaluer l'apport du SVC dans l'optimisation de l'exploitation du réseau, notamment en termes de réduction du coût de production, d'amélioration du profil de tension et de respect des contraintes opérationnelles.

Les simulations seront réalisées sur des réseaux tests de référence afin de comparer les performances du système avant et après l'intégration du SVC. Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence l'efficacité de ce dispositif FACTS dans l'amélioration de la stabilité, de la qualité de l'énergie et des performances économiques du réseau électrique.

III.2 Méthodes d'analyse

PSAT utilise la méthode de Newton –Raphson pour résoudre l'écoulement de puissance dans le réseau électrique.

Cette méthode itérative permet de calculer les tensions, les angles de phase et les flux de puissance dans le réseau. PSAT peut également effectuer d'autres analyses statique et dynamique, comme l'analyse de stabilité des petits signaux et la simulation temporelle.

Le logiciel offre des fonctions d'optimisation, notamment l'écoulement de puissance optimal (OPF) et l'écoulement de puissance continu (CPF), permettant d'optimiser le fonctionnement du réseau.

III.2.1 Etude sur le réseau test IEEE 9 nœuds

Dans le but de valider les performances de l'environnement PSAT, le réseau test IEEE à 9 nœuds a été choisi comme cas d'étude pour la simulation. Les résultats

issus de cette étude sont comparés aux valeurs de référence afin d'évaluer la précision des calculs et de confirmer la fiabilité des méthodes utilisées.

Le réseau test IEEE 9-bus est une sous-partie du système 3-machines 9-nœuds du Western System Coordination Council (WSCC) et se compose de 3 générateurs, de 9 nœuds et de 3 charges, avec un niveau de tension de base variant entre 16,5 kV et 230 kV. La charge présente dans le système est égale à 315 MW et 115 MVar [48]

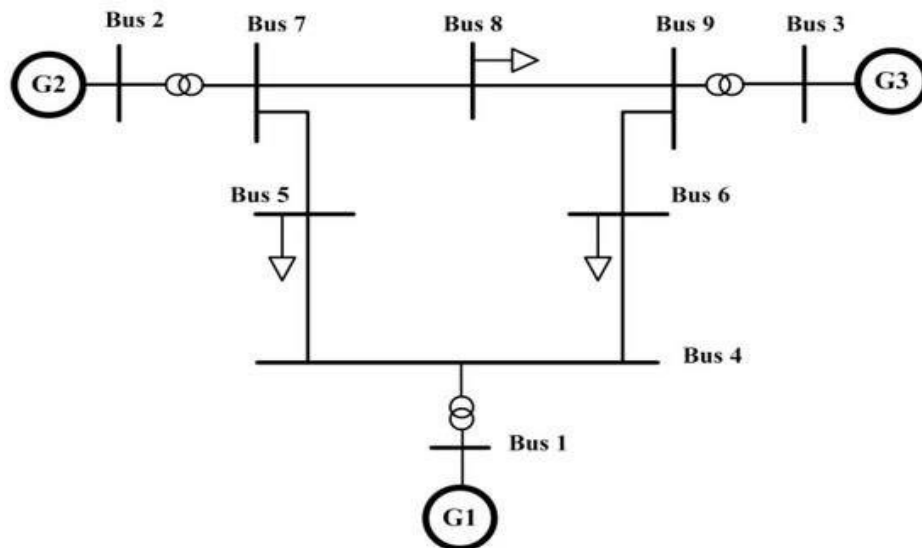


Figure III.1 : Topologie d'IEEE 9 nœuds [49]

Le réseau IEEE à 9 nœuds est un système de référence couramment utilisé dans les études des réseaux électriques, notamment pour l'analyse des flux de puissance, l'évaluation de la stabilité et les problèmes d'optimisation. La Figure III.2 représente le réseau test IEEE 9-nœuds inséré dans PSAT. Le tableau III.1 représente les résultats de l'écoulement de puissance du Réseau test IEEE 9-nœuds.

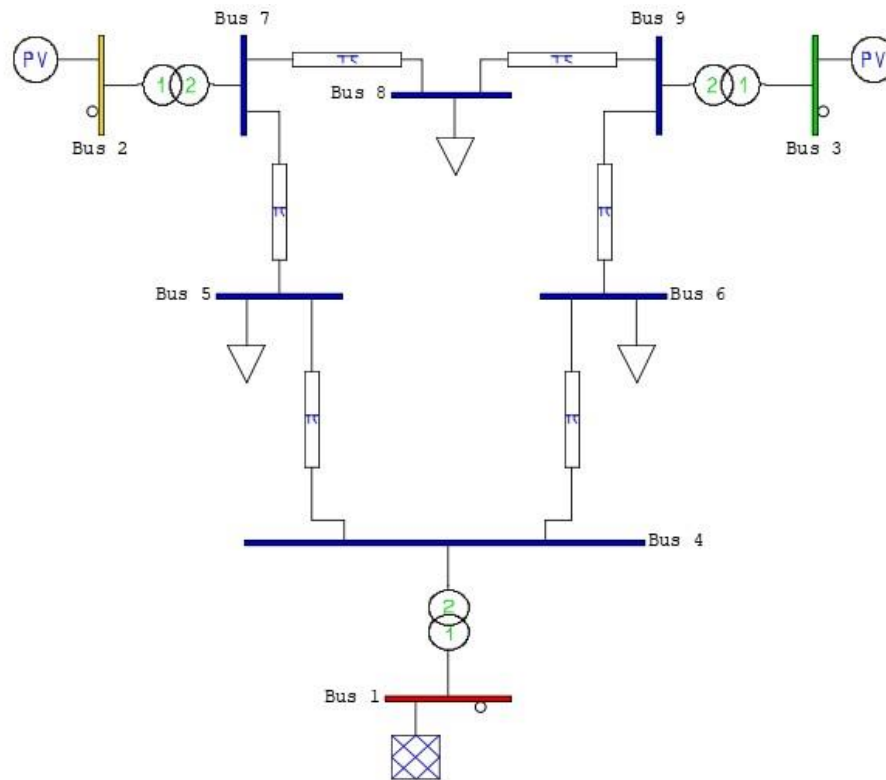


Figure III.2 : Réseau test IEEE 9-nœuds inséré dans PSAT.

Tableau III.1 : Résultats de l'écoulement de puissance du Réseau test IEEE 9-nœuds

Bus	V[pu]	Phase [rad]	Pgen [pu]	Qgen [pu]	Pch [pu]	Qch [pu]
Bus1	1.04	0	0.07168	0.29991591	0	0
Bus2	1.025	0.1629	1.63	0.0997474	0	0
Bus3	1.025	0.1629	1.63	0.0997474	0	0
Bus4	1.0242009	-0.038	9.399E-17	2.0024E-14	0	0
Bus5	0.99375655	-0.06965	-1.3323E-15	1.5543E-15	1.25	0.5
Bus6	1.00883469	-0.06434	4.4409E-16	-5.551E-16	0.9	0.3
Bus7	1.02375383	0.065714	3.4024E-15	2.239E-16	0	0
Bus8	1.01152389	0.0135514	-4.4409E-16	4.8295E-15	1	0.35
Bus9	1.025	0.0359531	0.85	-0.198088	0	0

La solution du problème d'écoulement de puissance a été obtenue après 4 itérations en utilisant la méthode de Newton–Raphson, avec un temps de calcul de 0,328 seconde. D'après les résultats présentés dans le tableau (III.2), la production totale de puissance active (PG) et réactive (QG) est respectivement de 319,681 MW et 20,0814 MVar. Les pertes totales de puissance active (PL) s'élèvent à 4,648 MW, tandis que les pertes de puissance réactive (QL) sont de -94,9185 MVar.

Tableau III.2 : Résultats globaux de la simulation

Catégorie	Description	Valeurs (p.u)
Pgen	production totale de puissance active	3.19680293
Qgen	production totale de puissance réactive	0.200818475
PL	pertes totales de puissance active	0.04680293
QL	pertes totales de puissance réactive	-0.949181525

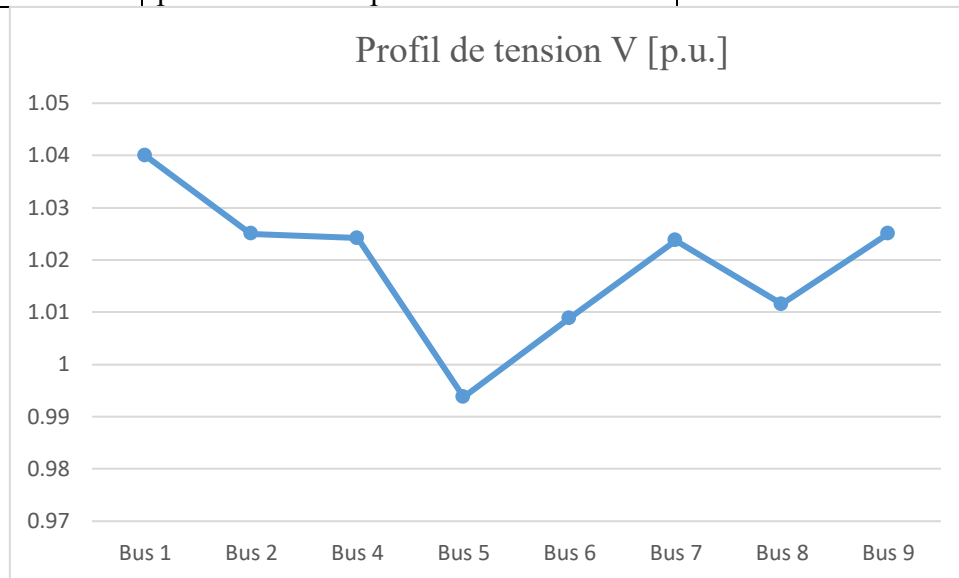


Figure III.3 : Profil de tension des jeux de barres du Réseau IEEE 9-nœuds.

La figure (III.3) présente le profil de tension (V en p.u.) de l'ensemble des jeux de barres du réseau. Les résultats montrent que les tensions restent dans les limites de fonctionnement admissibles, traduisant un état de fonctionnement satisfaisant du système. La tension la plus élevée est observée au niveau du jeu de barres 1, avec une valeur de 1,04 p.u., ce qui est cohérent puisqu'il s'agit du nœud de référence (Slack Bus). À l'inverse, la tension la plus faible est enregistrée au niveau du jeu de barres 5, avec une valeur d'environ 0,993 p.u. Cette diminution peut être attribuée à son éloignement relatif des sources de production ainsi qu'à la charge qui lui est raccordée. Malgré cette légère chute de tension, le profil global demeure relativement uniforme

sur l'ensemble du réseau, ce qui témoigne d'une bonne répartition des puissances et d'un fonctionnement stable du système dans les conditions de charge considérées.

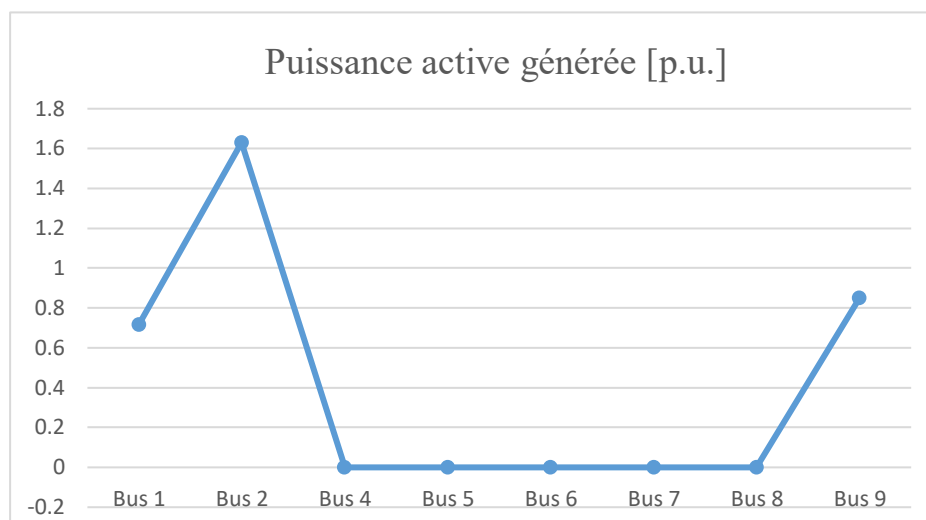


Figure III.4 : Puissance active générée (P_{gen}) par nœud.

Les figures III.4 et III.5 illustrent la répartition de la puissance active et réactive produite par les différents nœuds du réseau. Les résultats montrent que la production est concentrée au niveau des trois bus générateurs du système IEEE à 9 nœuds, à savoir le Bus 1 (0,716 p.u.), le Bus 2 (1,63 p.u.) et le Bus 9 (0,85 p.u.).

En revanche, les puissances actives relevées aux autres nœuds (Bus 4, 5, 6, 7 et 8) sont de l'ordre de 10^{-15} p.u., soit des valeurs pratiquement nulles. Cela s'explique par le fait que ces nœuds correspondent à des bus de charge ne disposant pas d'unités de production. Ces résultats sont conformes à la structure du réseau IEEE à 9 nœuds, dans lequel seuls les bus 1, 2 et 9 assurent la production de puissance électrique.

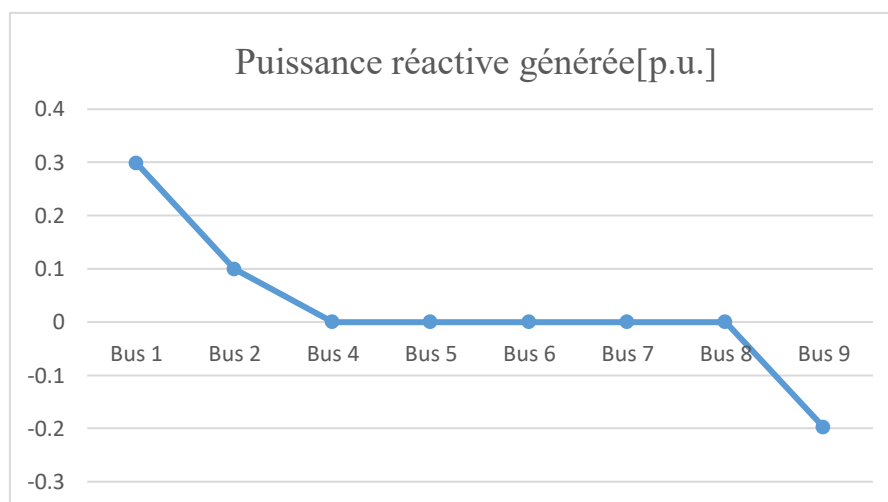


Figure III.5 : Puissance réactive générée (Q_{gen}) par nœud.

L'analyse du profil de puissance réactive révèle que les jeux de barres 1 et 2 fournissent de la puissance réactive afin de soutenir les niveaux de tension du réseau.

À l'inverse, le jeu de barres 9 absorbe de la puissance réactive, contribuant ainsi à l'équilibre et à la stabilité du système. Les autres nœuds présentent une production réactive nulle ou négligeable, ce qui confirme leur fonction de barres de charge ou de transit au sein du réseau. Les figures III.6 et III.7 suivantes présentent respectivement les pertes de puissance active et les pertes de puissance réactive dans les lignes du réseau test IEEE à 9 nœuds. Elles permettent d'identifier les lignes les plus sollicitées et d'évaluer l'impact du transit de puissance sur les performances globales du réseau.

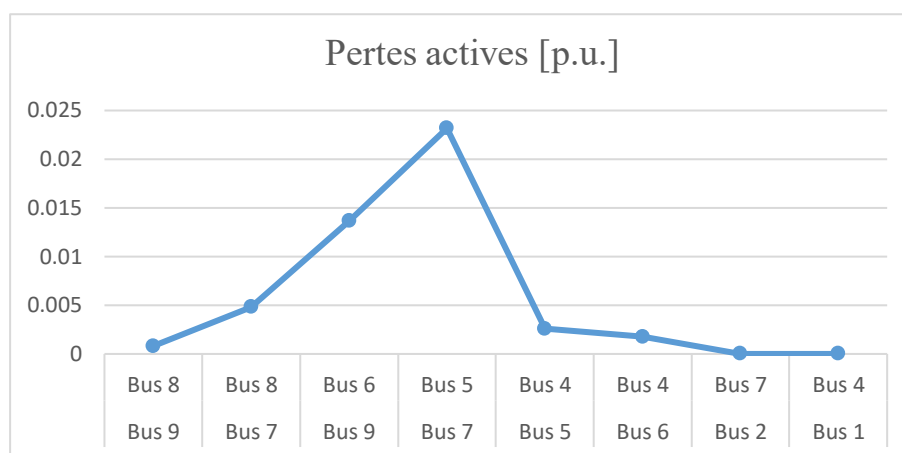


Figure III.6 : Pertes actives dans les lignes du réseau test IEEE9 bus

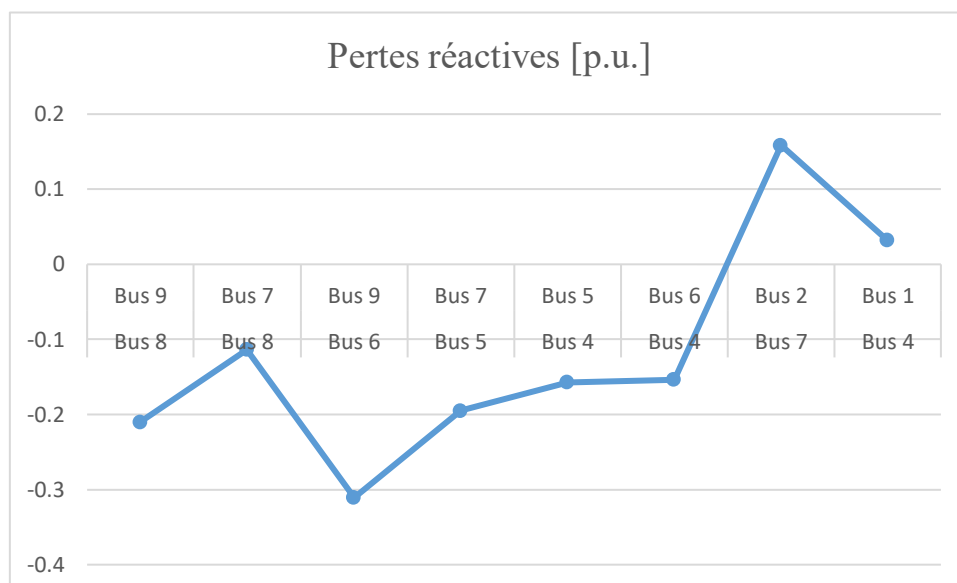


Figure III.7 : Pertes réactives dans les lignes du réseau test IEEE9 bus

III.2.2 Validation et comparaison

Le tableau (III.3) présente les valeurs de référence des flux de puissance active et réactive du réseau IEEE à 9 nœuds, obtenues à l'aide des logiciels PSS/E et PSCAD [50]. Ces résultats serviront de base de comparaison pour valider les simulations réalisées sous PSAT et évaluer la précision des calculs effectués.

Tableau III.3 : Données de référence PSS/E et PSCAD pour les puissances générées du système IEEE 9-bus.

Bus	PSS/E [50]		PSCAD [50]	
	P [pu]	Q [pu]	P [pu]	Q [pu]
1	0.716	0.279	0.7152	0.2761
2	1.630	0.049	1.6320	0.0454
3	0.850	-0.114	0.8512	-0.1170
TOTAL	3.196	0.214	3.1984	0.2045

Tableau III.4 : Résultats de l'écoulement de puissance.

	Génération totales		Génération du nœud de référence	
	P _G (MW)	Q _G (MVar)	P _G (MW)	Q _G (Mvar)
PSAT	319.680	20.081	71.680	29.999
PSS/E [50]	319.600	21.400	71.600	27.90
PSCAD [50]	319.840	20.450	71.850	27.080

D'après la comparaison des résultats des flux de puissance présentés dans le tableau (III.4), on constate que les résultats obtenus avec PSAT sont très proches de ceux fournis par les logiciels PSS/E et PSCAD. Cette concordance confirme la précision et la fiabilité de PSAT pour l'analyse des écoulements de puissance dans le réseau IEEE à 9 nœuds.

III.3 Application sur le réseau IEEE 14 nœuds

III.3.1 Description du réseau étudié

Dans cette étude, le réseau de référence IEEE à 14 nœuds, illustré à la figure III.8, a été utilisé pour évaluer les performances du système. Ce réseau comprend deux générateurs, trois compensateurs synchrones, vingt lignes de transport et onze charges. Le nœud 1 a été défini comme nœud de référence (Slack Bus), auquel est associé un angle de phase de référence fixé à 0° . Cette configuration constitue un cas d'étude largement utilisé pour l'analyse des flux de puissance et l'évaluation des méthodes d'optimisation dans les réseaux électriques. [51]

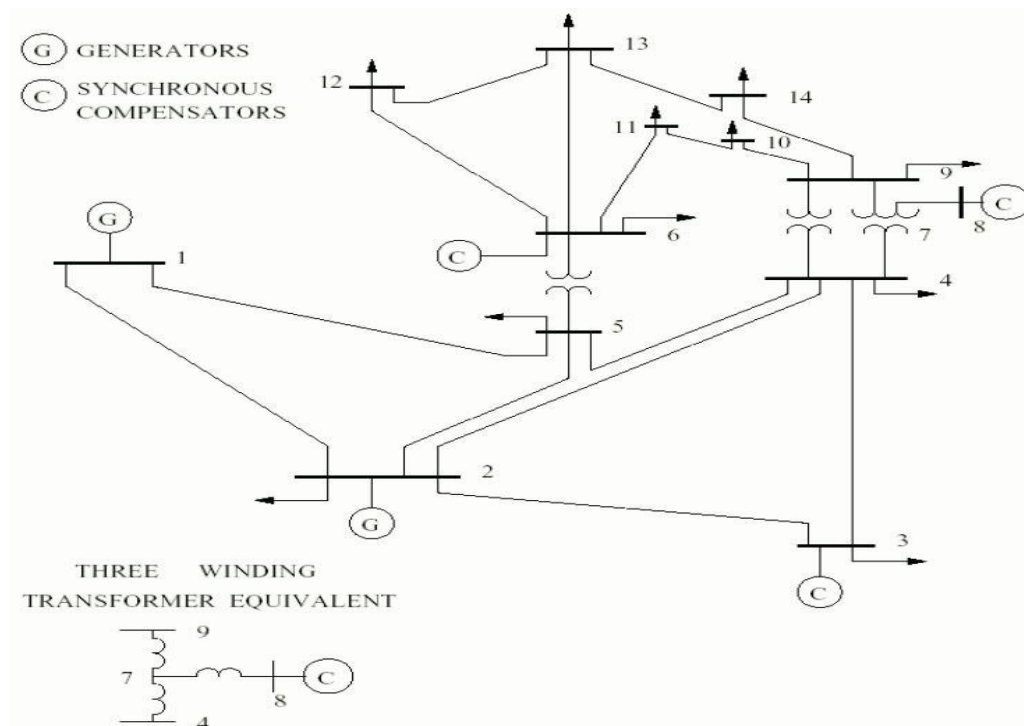


Figure III.8 : Schéma unifilaire du réseau IEEE 14 nœuds [57]

Les valeurs de référence pour la puissance de base et la tension de base sont respectivement de 100 MVA et 69 kV. Les Résultats de l'écoulement de puissance sont illustrés dans le tableau (III.5).

Tableau III.5 : Résultats de l'écoulement de puissance (p.u)

Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
Bus 01	1,06	0	3,520523	-0,27899154	0	0
Bus 02	1,045	-0,13554836	0,4	0,95133519	0,3038	0,1778
Bus 03	1,01	-0,33159785	3,3307E-15	0,59796023	1,3188	0,266
Bus 04	0,99772422	-0,26346311	2,1649E-14	3,4556E-15	0,6692	0,056
Bus 05	1,00235827	-0,22748119	-7,2858E-15	3,0542E-14	0,1064	0,0224
Bus 06	1,07	-0,37954463	1,0714E-14	0,44263937	0,1568	0,105
Bus 07	1,03466355	-0,35390135	1,9109E-15	5,1721E-15	0	0
Bus 08	1,09	-0,35390135	8,3267E-17	0,34241592	0	0
Bus 09	1,01108594	-0,40185775	-1,0825E-14	1,7764E-15	0,413	0,2324
Bus 10	1,01051937	-0,4049305	4,0801E-15	5,0931E-15	0,126	0,0812
Bus 11	1,04462219	-0,39504021	1,7486E-15	-1,4919E-15	0,049	0,0252
Bus 12	1,03910815	-0,40144211	3,3307E-16	4,3715E-16	0,0854	0,0224
Bus 13	1,02616059	-0,40318849	-3,6082E-16	1,8319E-15	0,189	0,0812
Bus 14	0,99567641	-0,42852362	1,8319E-15	-1,3878E-17	0,2086	0,07

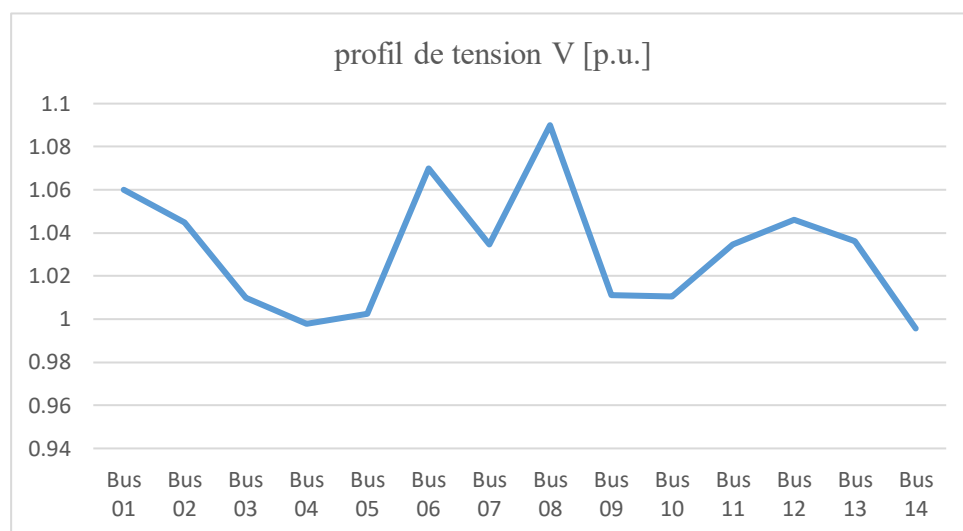


Figure III.9 : Profil de tension des différents jeux de barres du réseau IEEE 14 BUS.

Les résultats de la simulation du réseau IEEE à 14 nœuds montrent un fonctionnement stable du système, avec des tensions nodales maintenues dans les

limites admissibles. La tension la plus élevée est observée au niveau du bus 8, avec une valeur de 1,09 p.u., en raison de l'influence des unités de production et des dispositifs de compensation présents dans cette zone du réseau.

À l'inverse, le bus 14 présente la tension la plus faible, soit 0,9956 p.u., tout en restant dans la plage de fonctionnement acceptable. Par ailleurs, le bus 1, défini comme nœud de référence (Slack Bus), assure l'équilibre du système en fournissant la puissance active nécessaire pour compenser les pertes et satisfaire la demande globale du réseau.

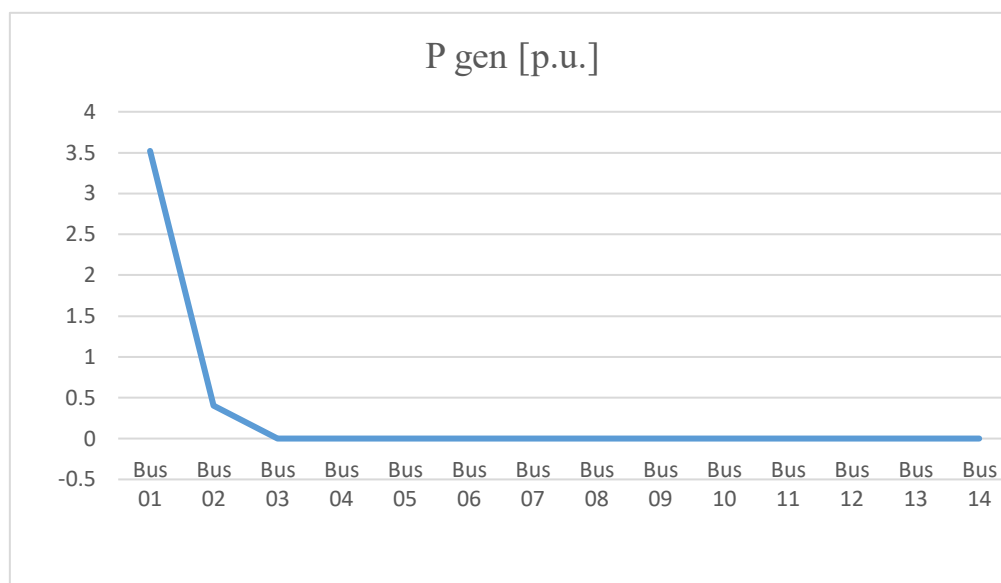


Figure III .10: Puissance active générée (Pgen) par nœud.

La figure (III.10) illustre l'évolution de la puissance active produite (Pgen) aux différents jeux de barres. On observe clairement que le nœud d'équilibre (Bus 01) assure la majeure partie de la production, avec une valeur d'environ 3,52 p.u., suivie d'une contribution modeste du Bus 02 (0,4 p.u.). En revanche, la puissance active générée est quasiment nulle pour les autres nœuds, du Bus 03 au Bus 14. Cela confirme que le bus de référence prend en charge l'essentiel de la charge et compense les pertes du réseau.

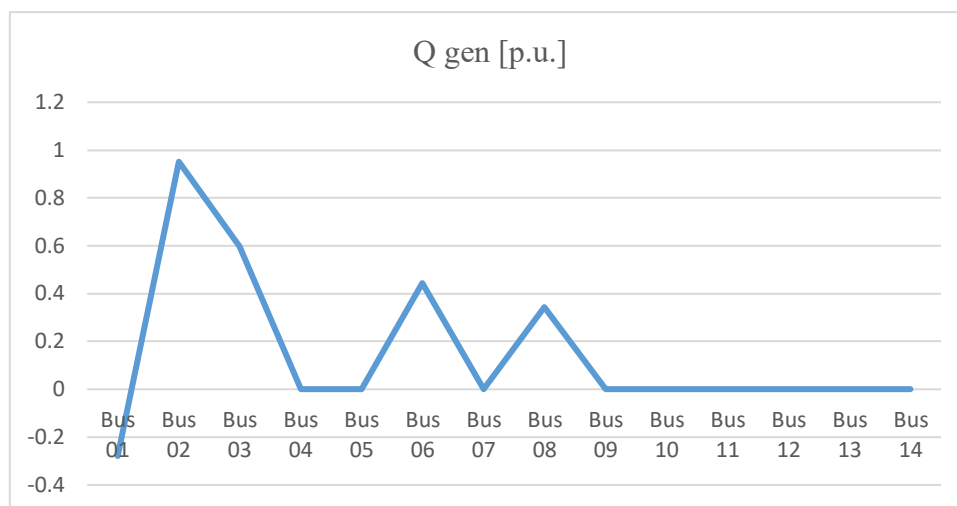


Figure III.11 : Puissance réactive générée (Pgen) par nœud.

La figure (III.11) indique que les bus de régulation (Bus 02, 03, 06, 08) fournissent de la puissance réactive afin de soutenir le profil de tension et d'alimenter les charges.

En revanche, le bus de bilan (Bus 01) présente une valeur négative de -0,28 p.u., ce qui lui permet d'absorber l'excédent et de préserver sa stabilité, tandis que la production demeure nulle pour les autres bus de charge.

Tableau III.6 : Résultats de transit de la puissance dans les lignes (p.u)

Du Bus	Au Bus	Ligne	Pflow	Qflow	PLoss	QLoss
Bus 02	Bus 05	1	0,58278051	0,07227146	0,01814245	0,01974791
Bus 06	Bus 12	2	0,11725841	0,04464406	0,00169004	0,00351744
Bus 12	Bus 13	3	0,03016837	0,01872662	0,00025453	0,00023029
Bus 06	Bus 13	4	0,27312804	0,14163374	0,00546921	0,01077058
Bus 06	Bus 11	5	0,14449423	0,12198641	0,00296656	0,00621235
Bus 11	Bus 10	6	0,09252767	0,09057406	0,00128505	0,00300816
Bus 09	Bus 10	7	0,03479628	-0,00626258	3,8895E-05	0,00010332
Bus 09	Bus 14	8	0,10400114	0,01005501	0,00135744	0,00288746
Bus 14	Bus 13	9	-0,1059563	-0,06283245	0,00261638	0,00532705
Bus 07	Bus 09	10	0,45586385	0,23268447	5,5511E-17	0,02691899
Bus 01	Bus 02	11	2,41497411	-0,38020698	0,10271229	0,25510329
Bus 03	Bus 02	12	-1,00031356	0,13865983	0,04728703	0,15296586
Bus 03	Bus 04	13	-0,31848644	0,19330041	0,00958627	-0,01040199
Bus 01	Bus 05	14	1,10554889	0,10121544	0,0595716	0,19355941
Bus 05	Bus 04	15	0,81253468	-0,13834742	0,00900364	0,01559912

Bus 02	Bus 04	16	0,77808071	0,05164742	0,03249208	0,0595531
Bus 04	Bus 09	17	0,09598311	0,03593766	4,9541E-05	0,00551071
Bus 05	Bus 06	18	0,69168068	0,076127	1,1102E-16	0,10550216
Bus 04	Bus 07	19	0,45586385	-0,05008748	5,5511E-17	0,04226045
Bus 08	Bus 07	20	5,4123E-16	0,34241592	1,5266E-16	0,01738352

Les résultats obtenus (voir figure III.12 et III.13) montrent que les pertes par effet Joule dans le réseau sont significatives. Les pertes totales de puissance active s'élèvent à 0,2921 p.u., soit 29,21 MW, tandis que les pertes de puissance réactive atteignent 0,8141 p.u., soit 81,14 MVar. Le cumul de ces pertes sur l'ensemble des lignes du réseau demeure important.

Cette situation s'explique principalement par le transit de puissance réactive sur de longues distances depuis les nœuds de production vers les centres de consommation. Ces échanges de puissance réactive entraînent une augmentation des courants dans les lignes, ce qui se traduit par des pertes plus élevées et des chutes de tension le long du réseau.

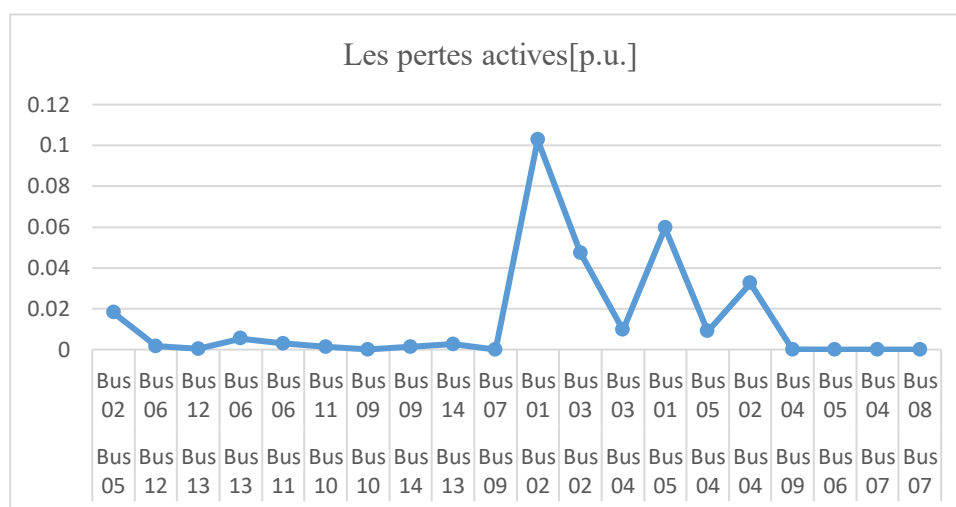


Figure III.12 : Pertes actives dans les lignes du réseau test IEEE 14 bus

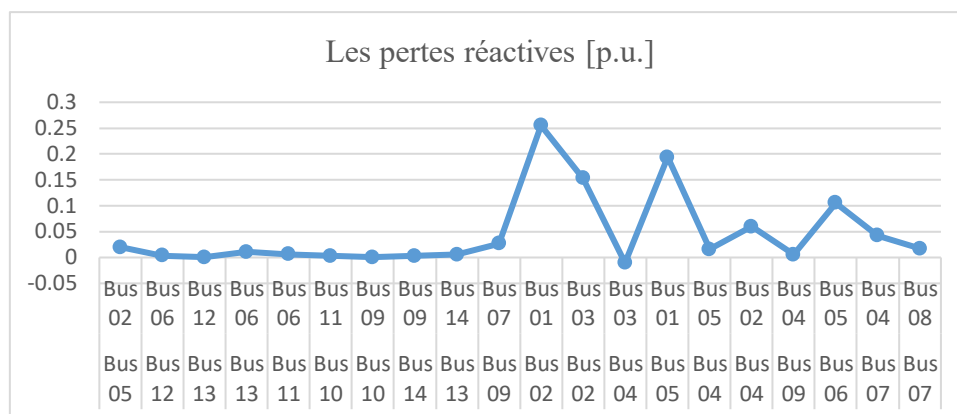


Figure III.13 : Pertes réactives dans les lignes du réseau test IEEE14 bus

III.3.2 Analyse de l'impact de l'insertion du SVC

Afin d'améliorer le profil de tension du réseau, un compensateur statique de puissance réactive (SVC) a été modélisé et installé au niveau du bus le plus sensible aux variations de tension, à savoir le bus 14. Ce dispositif FACTS est configuré pour fournir dynamiquement la puissance réactive nécessaire afin de soutenir la tension locale et de la maintenir à une valeur proche de 1 p.u. Son intégration vise ainsi à réduire les chutes de tension, à améliorer la stabilité du réseau et à renforcer les performances globales du système électrique.

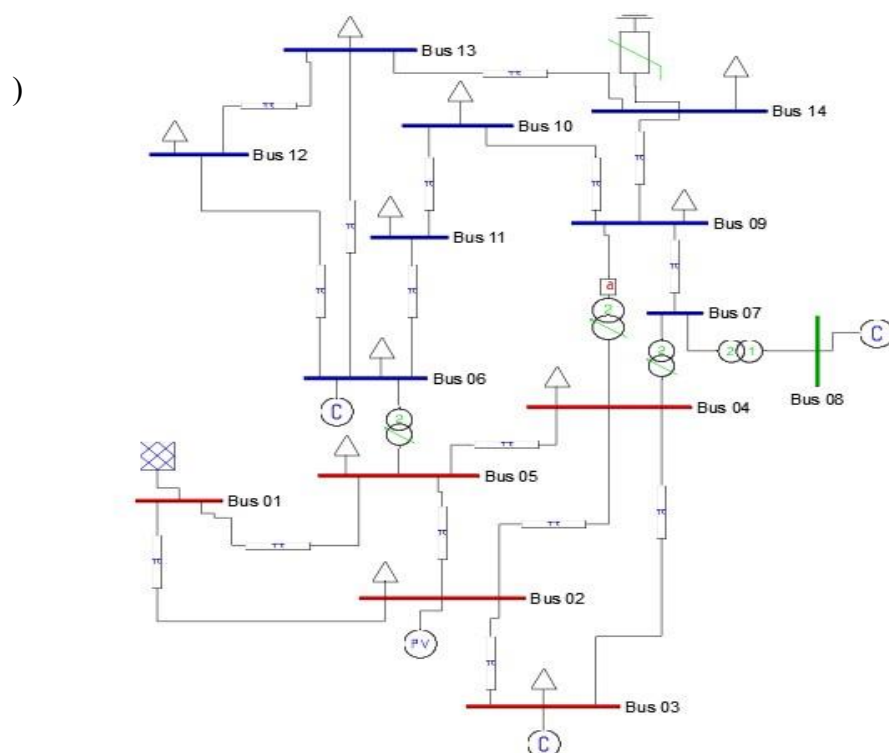


Figure III.14 : réseau IEEE 14 bus avec SVC

Tableau III.7 : Profil électrique initial des nœuds avec SVC (cas de base p.u)

bus	V	Phase	P gen	Q gen	P charge	Q charge
Bus1	1.06000	0	3.520522	-0.27899	0	0
Bus2	1.04500	-0.12145	0.400000	0.95133	0.303800	0.177800
Bus3	1.01000	-0.31054	0	0.59796	1.318800	0.266000
Bus4	1.00210	-0.24154	0	0	0.669200	0.056000
Bus5	1.00682	-0.20145	0	0	0.106400	0.022400
Bus6	1.07000	-0.35124	0	0.442639	0.156800	0.105000
Bus7	1.04124	-0.33014	0	0	0	0
Bus8	1.09000	-0.33014	0	0.342415	0	0
Bus9	1.02154	-0.38124	0	0	0.413000	0.232400
Bus10	1.02014	-0.38541	0	0	0.126000	0.081200
Bus11	1.01245	-0.37145	0	0	0.049000	0.025200
Bus12	1.05124	-0.31245	0	0	0.085400	0.022400
Bus13	1.04351	-0.38214	0	0	0.189000	0.081200
Bus14	1.01124	-0.42852	0	0	0.208600	0.070000

Tableau III.8 : Résultats de transit de la puissance dans les lignes avec SVC (p.u)

Du Bus	Au Bus	Ligne	Pflow	Qflow	PLoss	QLoss
Bus 02	Bus 05	1	0,55124102	0,06145214	0,01624245	0,01741254
Bus 06	Bus 12	2	0,11124578	0,04124406	0,0014204	0,00310245
Bus 12	Bus 13	3	0,02814521	0,01672662	0,00021023	0,000195541
Bus 06	Bus 13	4	0,25124587	0,12163374	0,00491245	0,00912457
Bus 06	Bus 11	5	0,13124587	0,11198641	0,00245121	0,00512458
Bus 11	Bus 10	6	0,08512457	0,08124587	0,00102145	0,00251421
Bus 09	Bus 10	7	0,03124587	-0,00512457	0,00003124	0,0009124
Bus 09	Bus 14	8	0,09124578	0,00812457	0,00111244	0,00214587
Bus 14	Bus 13	9	-0,09124580	-0,05124580	0,00214587	0,00421054
Bus 07	Bus 09	10	0,421458741	0,21124587	0,00000000	0,02312458
Bus 01	Bus 02	11	2,214578741	-0,34124580	0,00912450	0,2312458
Bus 03	Bus 02	12	-0,91245780	0,11124587	0,04214587	0,13124587
Bus 03	Bus 04	13	-0,29124580	0,17124580	0,00851245	-0,00912450
Bus 01	Bus 05	14	1,012454889	0,09124587	0,05412457	0,17124582
Bus 05	Bus 04	15	0,75124587	-0,1112480	0,00812458	0,01312580
Bus 02	Bus 04	16	0,71245871	0,04124587	0,02912457	0,05124587
Bus 04	Bus 09	17	0,08512457	0,03124587	0,00004125	0,00491245

Bus 05	Bus 06	18	0,63124587	0,06124587	0.00000000	0,09214587
Bus 04	Bus 07	19	0,42145874	-0,04214587	0.00000000	0,09381245
Bus 08	Bus 07	20	0	0,331245871	0.00000000	0,01512457

D'après la figure III.15, grâce à l'injection locale de puissance réactive par le SVC, la tension au niveau du bus 14 s'améliore sensiblement, passant de 0,9956 p.u. à 1,0112 p.u. Cette augmentation met en évidence l'efficacité du dispositif dans le soutien de la tension et l'amélioration du profil de tension du réseau. L'installation du SVC permet ainsi de compenser localement le déficit en puissance réactive et de renforcer la stabilité du système électrique.

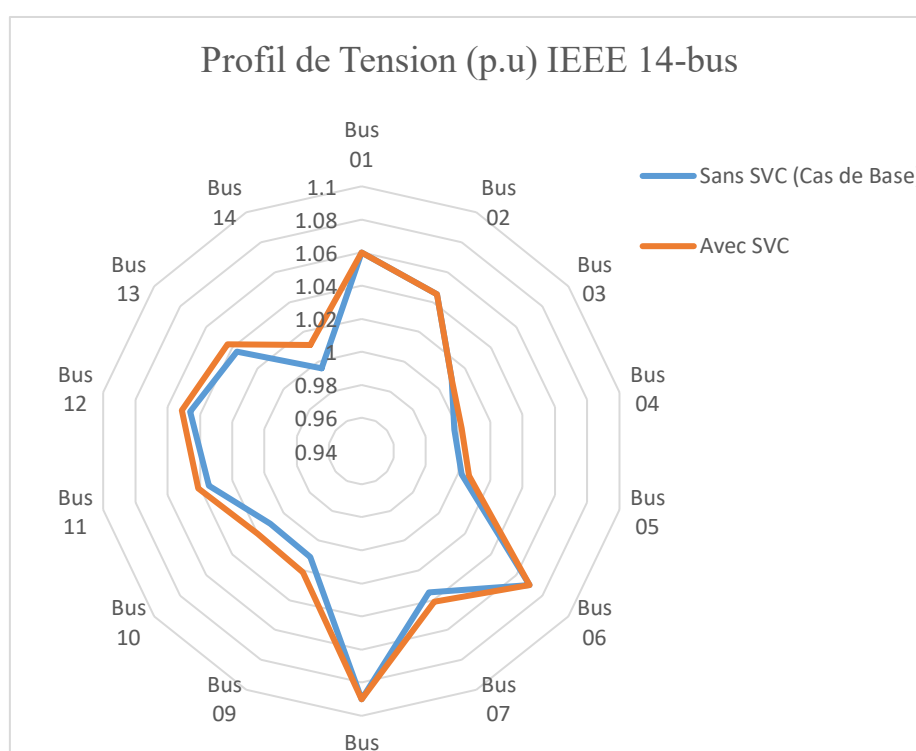


Figure III.15 : Profil de Tension avec et sans SVC- IEEE 14-bus

Tableau III.9 : Comparaison des Résultats de l'écoulement de puissance avant et après l'insertion du SVC.

	Génération totales		Les pertes active et réactive Totale avec et sans SVC	
	P_G (MW)	Q_G (MVar)	P_L (MW)	Q_L (Mvar)
Sans SVC	392.0523	91.4800	29.21	81.14
Avec SVC	392.0522	101.4815	16.91	72.47

III.3.3 Analyse de flux de puissance optimal

Cette section est consacrée à l'analyse de l'écoulement de puissance optimal sur le réseau test IEEE à 14 nœuds, réalisée par la méthode du point intérieur (prédiction-correction), permettant de déterminer les puissances actives et réactives optimales de chaque générateur, le coût total de production, les pertes actives totales et le profil des tensions. Pour tous les nœuds, les limites minimales et maximales des amplitudes de tension sont respectivement fixées à 0,95 p.u. et 1,06 p.u. (en valeur relative). Toutefois, pour les nœuds de générateurs, la limite inférieure est conservée à 0,95 p.u. Les fonctions de coût, accompagnées des limites de puissance des générateurs, figurent au Tableau (III.10). La figure (III.16) montre le réseau test IEEE 14 nœuds, avec les fonctions de coût des générateurs intégrées dans PSAT.

Au scenario de référence, l'analyse de l'écoulement de puissance optimal par la méthode du point intérieur (prédiction-correction) a abouti après 12 itérations, en un temps de 5,7354 secondes.

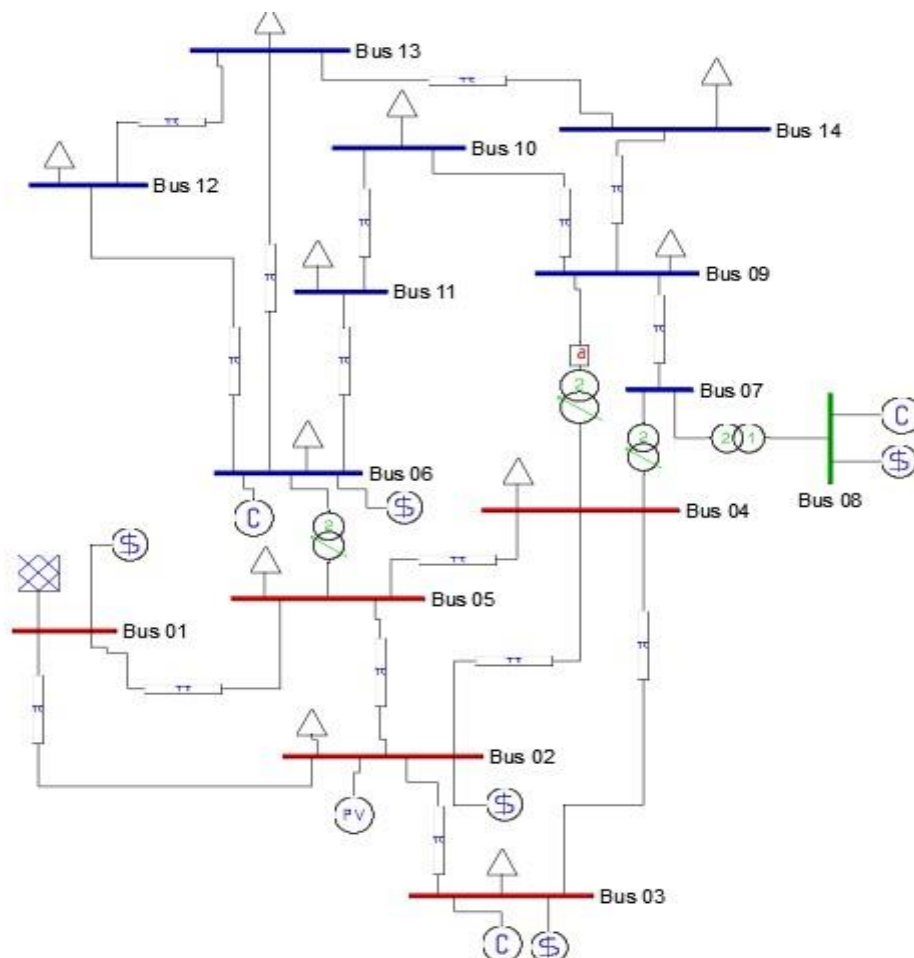


Figure III.16 : Réseau test IEEE 14 nœuds avec les fonctions couts des générateurs dans PSAT

Tableau III.10 : Coefficients du coût et limites de puissances du réseau test IEEE 14 nœuds

Noeud	a(\$/h)	b(\$/Mwh)	c.10 ⁻⁴ (\$/Mw ² h)	P_G^{min} (MW)	P_G^{Max} (MW)
1	0.00	23.50	430.00	0.00	250.00
2	0.00	36.10	250.00	0.00	140.00
3	0.00	40.00	500.00	0.00	100.00
6	0.00	40.00	500.00	0.00	100.00
8	0.00	40.00	500.00	0.00	100.00

Le Tableau (III.11) présente les résultats de l'écoulement de puissance optimal (OPF) pour le réseau test IEEE à 14 nœuds. La valeur des pertes de puissance active s'élève à environ 5,2140 MW, tandis que la fonction objectif obtenue via la méthode proposée atteint 8052,40 \$/h. À la lecture du Tableau (III.11), il apparaît que le logiciel PSAT fournit des résultats similaires à ceux issus de la méthode du point intérieur du logiciel MATPOWER et GA-OPF. Les Tableaux (III.12) et (III.13) exposent les tensions optimales et les puissances réactives des générateurs pour le réseau test IEEE à 14 nœuds.

Tableau III.11 : Comparation des résultats de flux de puissance optimale et de tension du réseau test IEEE 14 noeuds

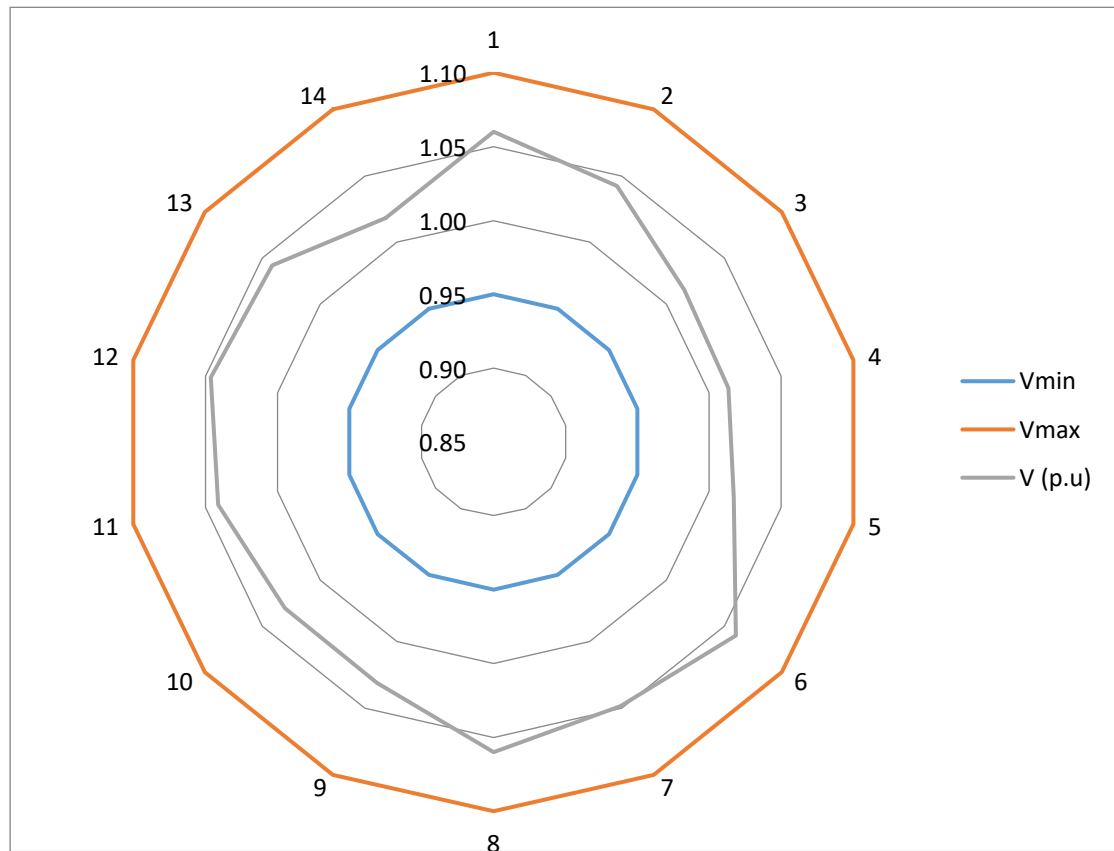
Variables	PSAT	MATPOWER /GA-OPF [52]
P_G1 (MW)	195,12	194,33
P_G2 (MW)	036,95	036,72
P_G3 (MW)	028,91	028,74
P_G6 (MW)	0,0000	0,0000
P_G8 (MW)	008,58	008,50
V_1 (p.u)	1,0600	1,0600
V_2 (p.u)	1,0450	1,0410
V_3 (p.u)	1,0110	1,0160
V_6 (p.u)	1,0700	1,0600
V_8 (p.u)	1,0900	1,0600
Coût de Génération (\$/h)	8 052,40	8 081,53
Les pertes totales actives	5.2140	5.2520

Tableau III.12 : Tensions des générateurs du réseau test IEEE 14 nœuds

Variables	VGmin (p.u)	VGmax (p.u)	PSAT
V_G1 (p.u)	0,95	1,10	1,0600
V_G2 (p.u)	0,95	1,10	1,0450
V_G3 (p.u)	0,95	1,10	1,0110
V_G6 (p.u)	0,95	1,10	1,0700
V_G8 (p.u)	0,95	1,10	1,0900

Tableau III.13 : Puissances réactives optimales des générateurs de réseau IEEE 14 nœuds

Variables	QGmin (MVar)	QGmax (MVar)	PSAT
Q_G1 (MVar)	-40,0	50,0	-16,5421
Q_G2 (MVar)	-40,0	50,0	31,2540
Q_G3 (MVar)	-40,0	40,0	24,8153
Q_G6 (MVar)	-6,0	24,0	15,4210
Q_G8 (MVar)	-6,0	24,0	11,6240

**Figure III.17** : Amplitudes de tension (p.u) aux différents nœuds

III.3.4 Résultats de l'OPF en présence des FACTS

Dans cette partie, nous présentons une étude d'optimisation de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE à 14 nœuds intégrant un dispositif FACTS de type SVC. L'analyse prend en compte les contraintes de fonctionnement du système, notamment les limites de puissance active et réactive des générateurs ainsi que les coefficients des fonctions de coût de production.

Le problème est formulé sous la forme d'un Optimal Power Flow (OPF) résolu à l'aide de la méthode du point intérieur. Cette approche permet d'évaluer l'impact de l'intégration du SVC sur les performances du réseau, notamment en termes de réduction du coût de production, de diminution des pertes de puissance et d'amélioration du profil de tension.

La fonction de coût associée au dispositif SVC est donnée par [53] :

$$F(Q_{SVC}) = 127.38 - 0.3051Q_{SVC} + 0.0003Q_{SVC}^2 (\$/Mvar) \quad (III.1)$$

Les paramètres du SVC sont limités comme suit [54]

$$-50 \text{ Mvar} \leq Q_{SVC} \leq 50 \text{ Mvar} \quad (III.2)$$

Le tableau (III.14) présente les valeurs optimales des tensions aux nœuds de production ainsi qu'au bus critique 14, obtenues après l'intégration du SVC dans le cadre de l'Optimal Power Flow (OPF). Ces résultats permettent d'évaluer l'impact du dispositif FACTS sur l'amélioration du profil de tension et sur les conditions optimales d'exploitation du réseau.

Tableau III.14 : Tensions des générateurs du réseau test IEEE 14 nœuds avec SVC

Nœuds	V_min (pu)	V_max (pu)	Tension Optimale V (pu)
Bus 1 (Générateur)	0,9500	1,1000	1,0600
Bus 2 (Générateur)	0,9500	1,1000	1,0425
Bus 3 (Générateur)	0,9500	1,1000	1,0152
Bus 6 (Générateur)	0,9500	1,1000	1,0600
Bus 8 (Générateur)	0,9500	1,1000	1,0600
Bus 14 (Nœud du SVC)	0,9500	1,1000	1,0268

Les résultats numériques montrent que les tensions des nœuds de production (V1, V2, V3, V6 et V8) sont maintenues à des valeurs optimales de 1,0600 p.u., 1,0425 p.u., 1,0152 p.u., 1,0600 p.u. et 1,0600 p.u., respectant ainsi les limites de sécurité imposées au réseau, comprises entre 0,9500 p.u. et 1,1000 p.u.

L'apport principal de l'intégration du SVC apparaît au niveau du bus 14, considéré comme le nœud le plus sensible du réseau. Grâce à l'injection contrôlée de puissance réactive par le SVC dans le cadre de l'OPF, la tension de ce bus est portée à sa valeur optimale de 1,0268 p.u.

Cette amélioration est particulièrement significative, car ce nœud est naturellement sujet aux chutes de tension en raison de son éloignement relatif des sources de production et des pertes associées au transport de puissance. Ces résultats confirment l'efficacité du SVC dans l'amélioration du profil de tension et dans le renforcement de la stabilité du réseau.

Tableau (III.15) : Résultats de flux de puissance optimale du réseau test IEEE 14 nœuds avec SVC

Variables	Valeurs
P_G1 (MW)	193,20
P_G2 (MW)	36,80
P_G3 (MW)	28,70
P_G6 (MW)	0,00
P_G8 (MW)	8,50
Coût de Génération (h/\$)	8 015,20
Pertes Actives (P_loss) (MW)	4,6520

Le tableau (III.15) présente la répartition optimale des puissances actives produites par les générateurs, déterminée par l'algorithme d'OPF en fonction des coûts de production de chaque unité. Cette optimisation permet d'atteindre un coût total de production de 8015,20 \$/h tout en limitant les pertes actives du réseau à 4,6520 MW.

Le tableau (III.16) présente les puissances réactives du système après optimisation, y compris la contribution du compensateur statique de puissance réactive (SVC) installé au bus 14. Celui-ci injecte une puissance réactive de 18,5240 MVar, contribuant ainsi au soutien de la tension, à l'amélioration du profil tensionnel et à la réduction des besoins en compensation réactive des autres éléments du réseau.

Tableau III.16 : Puissances réactives optimales des générateurs de réseau IEEE 14 nœuds avec SVC

Variables	Valeurs Optimales (MVar)	Limite Min (MVar)	Limite Max (MVar)
Q_G1	-16,5421	-40,0000	50,0000
Q_G2	31,2540	-40,0000	50,0000
Q_G3	24,8153	-40,0000	40,0000
Q_G6	15,4210	-6,0000	24,0000
Q_G8	11,6240	-6,0000	24,0000
Q_SVC (Bus 14)	18,5240	-50,0000	50,000

Le tableau (III.17) présente une étude comparative des résultats de l'Optimal Power Flow (OPF) dans les deux cas de fonctionnement : sans SVC et avec SVC. Cette comparaison permet d'évaluer l'impact de l'intégration du compensateur statique de puissance réactive sur les performances du réseau, notamment en termes de coût de production, de pertes de puissance et d'amélioration du profil de tension.

Tableau III.17 : Synthèse globale et comparaison des résultats

Paramètres / Nœuds	Cas 1 : OPF Seul	Cas 2 : OPF + SVC
V1 (p.u.)	1,0600	1,0600
V2 (p.u.)	1,0450	1,0425
V3 (p.u.)	1,0110	1,0152
V6 (p.u.)	1,0700	1,0600
V8 (p.u.)	1,0900	1,0600
V14 (p.u.)	1,0155	1,0268
P_G1 (MW)	195,12	193,20
P_G2 (MW)	36,95	36,80
P_G3 (MW)	28,91	28,70
P_G6 (MW)	0,00	0,00
P_G8 (MW)	8,58	8,50
Q_SVC (MVar)	0,00	18,52
Coût Total (\$/h)	8 052,40	8 015,20
Pertes Actives (MW)	5,2140	4,6520

Le tableau (III.17) présente une comparaison détaillée des résultats de l'Optimal Power Flow (OPF) en l'absence et en présence du compensateur statique de puissance réactive (SVC). Les résultats montrent que l'intégration du SVC améliore significativement les performances du réseau. En injectant une puissance réactive de

18,52 MVar au niveau du bus 14, le dispositif permet de porter la tension de ce nœud critique à 1,0268 p.u., tout en maintenant les tensions des autres nœuds à l'intérieur des limites de fonctionnement admissibles.

Cette amélioration du profil de tension contribue à une exploitation plus efficace du réseau, se traduisant par une réduction des pertes actives à 4,6520 MW et une diminution du coût total de production à 8 015,20 \$/h. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de l'intégration du SVC dans le cadre de l'OPF pour améliorer à la fois les performances techniques et économiques du système électrique.

Par ailleurs, la puissance réactive injectée par le SVC reste largement comprise dans sa plage de fonctionnement, définie par la contrainte :

$$-50 \text{ MVar} \leq Q_{\text{SVC}} = 18,52 \text{ MVar} \leq 50 \text{ MVar}$$

Ce qui confirme la faisabilité technique de la solution obtenue et montre que le dispositif fonctionne sans atteindre ses limites de compensation.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus sous l'environnement PSAT afin d'évaluer l'impact de l'intégration d'un dispositif FACTS de type SVC sur les performances des réseaux tests IEEE à 9 et 14 nœuds.

Dans un premier temps, les résultats de l'écoulement de puissance ont permis de valider les modèles développés à travers une comparaison avec les résultats de référence issus de la littérature et d'autres logiciels spécialisés.

L'analyse du réseau IEEE à 14 nœuds a mis en évidence l'existence de chutes de tension au niveau des nœuds les plus éloignés des sources de production, ainsi que des pertes de puissance non négligeables. Afin d'améliorer ces performances, un SVC a été installé au niveau du bus 14, identifié comme le nœud le plus critique du réseau.

Les résultats obtenus ont montré une amélioration significative du profil de tension grâce à l'injection locale de puissance réactive, permettant de maintenir les tensions dans les limites admissibles.

Par ailleurs, l'étude d'Optimal Power Flow (OPF) a permis d'évaluer l'impact du SVC sur l'exploitation optimale du réseau. Les résultats ont montré que l'intégration du dispositif contribue à réduire les pertes de puissance, à améliorer les conditions de

fonctionnement du système et à diminuer le coût total de production tout en respectant les contraintes techniques du réseau.

En conclusion, les simulations réalisées confirment l'efficacité du SVC dans l'amélioration du profil de tension, la réduction des pertes et l'optimisation du fonctionnement du réseau électrique. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de l'association des dispositifs FACTS et des méthodes d'Optimal Power Flow pour accroître les performances techniques et économiques des systèmes électriques modernes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons étudié l'optimisation des réseaux électriques à travers l'intégration des dispositifs FACTS, en particulier le compensateur statique de puissance réactive (SVC), dans le cadre de l'écoulement de puissance optimal (OPF). L'objectif principal était d'améliorer les performances techniques et économiques du réseau électrique en réduisant les pertes de puissance active, en renforçant la stabilité de tension et en optimisant l'exploitation des ressources de production.

Dans un premier temps, une analyse générale des réseaux électriques a permis de mettre en évidence les défis majeurs auxquels ils sont confrontés, notamment l'augmentation de la demande énergétique, la congestion des lignes de transport et les contraintes liées à la qualité et à la fiabilité de l'alimentation électrique. Cette étude a montré la nécessité de recourir à des solutions de contrôle avancées capables d'assurer une gestion efficace et flexible du réseau.

Par la suite, les technologies FACTS ont été présentées et classifiées, avec un intérêt particulier porté au SVC. Les principes de fonctionnement, les caractéristiques techniques ainsi que les modèles mathématiques utilisés pour son intégration dans les études d'écoulement de puissance ont été détaillés. En parallèle, la formulation du problème d'écoulement de puissance optimal a été développée en considérant les contraintes d'exploitation du réseau et les fonctions objectifs liées à la minimisation des pertes et à l'amélioration du profil de tension.

Enfin, l'application de la méthodologie proposée aux réseaux tests IEEE à 9 nœuds et IEEE à 14 nœuds sous l'environnement PSAT/MATLAB a permis de valider l'approche retenue. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de l'OPF dans l'identification des zones critiques du réseau et dans la détermination du positionnement ainsi que du dimensionnement optimal du SVC. L'intégration de ce dispositif a contribué à l'amélioration significative du profil de tension, à la réduction des pertes de transmission et à une meilleure exploitation des ressources de production, confirmant ainsi l'intérêt des dispositifs FACTS pour l'optimisation des réseaux électriques modernes.

Les résultats obtenus montrent que l'association des techniques d'optimisation et des dispositifs FACTS constitue une solution performante pour répondre aux exigences

actuelles des systèmes électriques. Cette approche contribue à améliorer la sécurité, la stabilité, la qualité de service et l'efficacité énergétique des réseaux de transport d'électricité.

Comme perspective de recherche, il serait intéressant d'étendre cette étude à l'intégration simultanée de plusieurs dispositifs FACTS et à l'utilisation de méthodes d'optimisation plus avancées afin d'améliorer davantage les performances techniques et économiques des réseaux électriques de grande taille

Bibliographie

- [1] El Makhtoum, H., & Bentaleb, Y. (2021, March). Réseaux Electriques Intelligents (Smart Grids). In Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC'2021.
- [2] ERP Services est une entreprise spécialisée dans les études techniques, la détection de réseaux, le géoréférencement, la DAO, le SIG et le diagnostic de réseaux et de bâtiments sur l'Essonne (91) et pour toute la région parisienne.<https://erp-services.fr/blog/reseau-electrique-francais/>
- [3] Twidell, J., & Weir, T. (2015). Renewable Energy Resources (3rd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315766416>
- [4] El-Wakil, M. M. (1984). Powerplant Technology. Chapter four fuels and combustion.(1984)
- [5] Mr. GUEZZOULI Azzedine. Mr. CHERITE Yacine << Contribution à l'étude de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques>> memoirs de projeter fin d'étude master 2 Commandes Electriques Université -Ain-Temouchent-Belhadj Bouchaib 2023/2024
- [6] CultureSciences-Physique. (2021, 6 avril). *Concepts et chiffres de l'énergie : le transport de l'électricité*. École normale supérieure de Lyon. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/chiffres-energie-transport-elec.xml>
- [7] Mr. HOCINE LABAR <<AMELIORATION DE LA STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUE PAR TRANSFORMATEURS DEPHASEUR>>DOCTORAT En SCIENCES En ELECTROTECHNIQUE,UNIVERSITE Badji Mokhtar ANNABA ,2016
- [8] Voltage Stability Indices Studies on Optimal Location of Wind Farm in Distribution Network - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Two-bus-system-model-representation-a-Line-Stability-Index-LMN-This-stability_fig3_321070753

- [9]MADANI NORA, MENAI DAHBIA<<Etude des protections de réseau électrique THT à SONELGAZ>>memoir De Fin d'études en Electrotechnique Industrielle,UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2012
- [10] https://www.researchgate.net/figure/Structure-maille-dun-reseau-de-transport-electrique_fig2_338645311
- [11]Estimation de l'état pour la surveillance des systèmes de grandes dimensions. Application aux réseaux électriques. - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Topologies-des-reseaux-electriques_fig1_259252242
- [12] BOUAZZA ABID, Amina, and Abir KAOUADJI. "MODELISATION NUMERIQUE D'ECOULEMENT DE PUISSANCE DANS UN RESEAU ELECTRIQUE A CINQ NOEUDS PAR LA METHODE DE GAUSS SEIDEL Projet de fin d'études Univ Ain-Temouchent (2015).
- [13] Nabila, Saim, and Chetouane Samira. *Restructuration du réseau électrique moyenne tension 30 kv de la région Azazga*. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri, 2010.
- [14] BOUKADA, Oussama, Mohammad Alaa Dinne BENDEBBOUZE, *Compensation d'énergie réactive par un compensateur statique*. Universitaire Projet de fin d'études ain Temouchent 2024.
- [15] Haag Denis. » La conduite des réseaux de production et de transport d'électricité « : l'exemple français. In: *Flux*, n°2, 1990. pp. 56-59.
DOI : <https://doi.org/10.3406/flux.1990.1140>
- [16] Régions : Biskra : Le Système SCADA de Surveillance Du Réseau Électrique Mis En Service Par La Sonelgaz.” [Http://Www.dknews-Dz.com/](http://Www.dknews-Dz.com/), 10 Apr. 2024, www.dknews-dz.com/article/7039-biskra-le-systeme-scada-de-surveillance-du-reseau-electrique-mis-en-service-par-la-sonelgaz.html? Accessed 8 Mar. 2026.
- [17] Narendra Balkishan Soni, Debanjan Mukherjee A Review Study on Power System Blackouts; Int J Sci Res Publ 8(5) (ISSN: 2250-3153). (2018); <http://www.ijsrp.org/research-paper-0518.php?rp=P777420>

- [18] Boufertella, A. (s.d.). Les smart grids, l'avenir du réseau électrique. Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER).
- [19] Hafida, Lamrani, and Lounis Nabila. Contribution à l'étude d'une centrale photovoltaïque de 25 MW connectée au réseau électrique. Diss. FGEL. UMMTO, 2022.
- [20] Senia Électrique. (2025, juin 12). Smart grid en Algérie : modernisation et avenir du réseau électrique national. https://seniadz.net/index.php/algeria-smart-grid-modernisation-et-avenir-du-reseau-electrique-national/?srsltid=AfmBOopgfqZUK2Z1DWfdWo6M0Wz_ChPMJMq2RH4CfYRBIh_rphGWckIu-
- [21] Harrouz, Abdelkader, et al. "Smart grid and renewable energy in Algeria." 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE, 2017.
- [22] GACEM, Abdelmalek. *Commande Robuste d'un Dispositif FACTS par les Méthodes Métaheuristiques pour la Stabilité de Tension d'un Réseau Electrique* Mémoire de doctora. Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [23] BOUGOUFFA, Lazhar. Effets des Systèmes de Compensation FACTS sur la Protection à Maximum de Courant dans les Réseaux Électriques Mémoire de doctora. Diss. Université de Batna 2, 2016.
- [24] Houari, Boudjella. "Contrôle des Puissances Réactives et des Tension dans un Réseau de Transport au Moyen de Dispositifs FACTS (SVC)." *Mémoire de magister, Université de Sidi Bel-Abbaes* 23 (2008).
- [25] Passelergue, J. C. *Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG). (1998).
- [26] Mancor, Nabil. « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositif de compensation dynamique (FACTS). » *memoir de Magister*. Université de Biskra (2012).

- [27] Tarik Zabaïou, « Coordination des régulateurs conventionnels des machines synchrones Et des compensateurs statiques (SVCS) », Thèse de doctorat, UNIV MONTRÉAL, DÉCEMBRE 2010
- [28] Best Locations of Shunt SVCs for Steady State Voltage Stability Enhancement - Scientific Figure on ResearchGate. Available from:
https://www.researchgate.net/figure/SVC-firing-angle-model_fig1_291975026 [
- [29] Modélisation et simulation d'une ferme éolienne raccordée à un réseau électrique en intégrant un dispositif FACTS - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-du-STATCOM-La-puissance-active-et-reactive-au-niveau-du-STATCOM-peut_fig2_339739364
- [30] Advanced control scheme of a unified power flow controller using sliding mode control - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Basic-structure-of-the-UPFC_fig1_341877461
- [31] An advanced FACTS controller for power flow management in transmission system using IPFC - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Basic-Configuration-Of-Interline-Power-Flow-Controller_fig1_252029195 [accessed 2 May 2026]
- [32] Sode-Yome, A., Mithulanathan, N., & Lee, K. Y. Comprehensive comparison of FACTS devices for exclusive loadability enhancement. *Ieej Transactions on Electrical and Electronic Engineering* (2013)., 8(1), 7–18.
<https://doi.org/10.1002/TEE.21785>
- [33] Hadji, B. . *Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité des Réseaux Electriques par l'Intégration et le Contrôle Flexible de l'Energie Eolienne et des Systèmes FACTS* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra). 2017
- [34] AMAR, B., & DELMA, L. *Résolution de problème de l'écoulement de puissance optimale dans un réseau électrique en utilisant une nouvelle technique d'optimisation* (Doctoral dissertation, university ghardaia) (2024).
- [35] .Belkacem, M. L'évolution des FACTS et leurs impacts sur les réseaux électriques (Mémoire de fin d'études de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret,

Faculté des sciences appliquées, Département de génie électrique). Sahla Mahla. (2018).

[36] A Progressive Period Optimal Power Flow for Systems with High Penetration of Variable Renewable Energy Sources - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Traditional-optimal-power-flow-where-the-objective-function-and-constraints-are-solved_fig1_351597897

[37] LAIB, A. (2022). *Écoulement de puissance optimal intelligent d'un système de puissance multi-sources* (Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique). . (2022).

[38] L. Adjoudj, "Contribution à l'étude de l'OPF du réseau Algérien basée sur les énergies renouvelables et les FACTS," Thèse de doctorat, Dept. d'Électrotechnique, Univ. Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 2018.

[39] Saim, A. Compensation de l'énergie réactive d'un réseau de transport par un système FACTS (Mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel). (2018).

[40] Aucharki, Z., & Belacel, O. Dispatching économique de la puissance dans un réseau électrique en utilisant les algorithmes génétiques (Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou). (2017).

[41] Djeblahi, Z., & Touti, F. Z. TP N° 2 : Analyse de l'écoulement de puissance par le logiciel 'PSAT' – Power Analyses Toolbox [Rapport de travaux pratiques, Université Mohamed Khider Biskra]. (2019).

[42] S. Boudaoud, A. Khellaf, K. Mohammedi, «Performance Analysis and Economic Evaluation of a Solar Power Tower in Algeria», 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey, October 2- 4, 2013

[43] Feguir, S., & Badi, *FPlacement Optimal de FACTS dans un Réseau électrique par les Méthodes Méta heuristiques* [Mémoire de Fin d'Étude de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued]. . (2018).

- [44] Bendouma, R., & Belbey, O. Optimisation de l'emplacement et de la taille d'une production décentralisée dans un réseau de distribution par l'algorithme génétique [Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla]. . (2022).
- [45] Boucherit, Y., & Sebaa, M. *Analyse et amélioration de la stabilité des réseaux électriques sous l'environnement PSAT* [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra]. . (2020).
- [46] GANDOTRA, R. et PAL, K. FACTS Technology : A Comprehensive Review on FACTS Optimal Placement and Application in Power System. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, 2022, vol. 18, no 3.
- [47] Connaissance des Énergies. Stockage de l'électricité : où en est-on ? Connaissance des Énergies. <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/peut-stocker-lelectricite>(2024, 20 août).
- [48] Al-Hinai, A. S. Voltage collapse prediction for interconnected power systems (Master's thesis). College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University. WVU Research Repository (2000).
- [49] MDPI Zhang, Y., Wang, Y., Li, Z., & Chen, C. (2023). *A fast method for uncertainty analysis of power system dynamic simulation. Processes*, 11(7), 1886. <https://doi.org/10.3390/pr11071886>
- [50] PSCAD. (n.d.). *Understanding the IEEE 9-bus system*. PSCAD Knowledge Base. <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/25>
- [51] Benyagoub, R., & Hadjaissa, *Optimisation de l'Emplacement et la Taille des Sources d'Energie Renouvelable dans les Réseaux Electriques* [Mémoire de master, Université de Ghardaïa]. Archive institutionnelle. (2019).
- [52] El-Shimy, M., & Abu El-Wafa, A. R. (n.d.). *Implementation and analysis of genetic algorithms (GA) to the optimal power flow (OPF) problem*. Electrical Power & Machine Department, Ain Shams University.

[53] A. A. Alabduljabbar, J. V. Milanovi, «Generation Costs Reduction Through Optimal Allocation of FACTS Devices Using Low Discrepancy Sequences», in Proc. IEEE Power Syst. Conf. Expo., Atlanta, GA, 2006.

[54] R. Benabid, «Optimisation Multiobjectif 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 de Jijel, 2007

[55] Hingorani, N. G. (1994). Introduction to 'FACTS'. *IEE Colloquium on Flexible AC Transmission Systems (FACTS) - The Key to Increased Utilisation of Power Systems*, 1-4. <https://doi.org/10.1049/ic:19940003>

[56] M. E. El-hawary, G. S. Christensen, «Optimal Economic Operation of Electric Power Systems», this is volume 142 in Mathematics in Science and Engineering, Livre: a series of Monographs and textbooks, edited by Richard Bellman, University of southern California, 1979.

[57] GA BASED OPTIMAL FACTS CONTROLLER FOR MAXIMIZING LOADABILITY WITH STABILITY CONSTRAINTS - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Single-line-diagram-of-the-IEEE-14-bus-standard-system_fig4_269464418

[58] Petovarga. (s.d.). *Distribution et transmission d'énergie électrique renouvelable, énergie solaire, réseau électrique avec bâtiments* [Illustration]. Dreamstime. <https://fr.dreamstime.com/distribution-d-%C3%A9nergie-transmission-%C3%A9lectricit%C3%A9-renouvelable-r%C3%A9seau-solaire-b%C3%A2timents-l-les-usine-maison-panneaux-image238773842>

[59] Amélioration de la sécurité des systèmes électriques à travers l'approche de sensibilité pour l'emplacement optimal des dispositifs FACTS - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/La-structure-generale-de-reseau-electrique-9_fig1_362318339

[60] Le Normand, L. (2024, 26 février). *Comment le poste source de Bayeux alimente 41 500 foyers en électricité*. Actu.fr.

https://actu.fr/normandie/bayeux_14047/comment-le-poste-source-de-bayeux-alimente-41-500-foyers-en-electricite_60999603.html

[61] ZMS Cable. (s.d.). *Quelle est la différence entre le câble CC et le câble CA ?*

<https://zmscable.es/fr/la-diferencia-entre-cable-dc-y-cable-ac/>

[62] Mefelec. (s.d.). *Poste de transformation*. <https://mefelec.com/service/poste-de-transformation/>

[63] Encyclopédie de l'Énergie. (2017, 26 mai). *Des réseaux électriques aux smart grids*. <https://www.encyclopedie-energie.org/des-reseaux-electriques-aux-smartgrids/>

[64] For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid - Scientific Figure on ResearchGate. Available from:

https://www.researchgate.net/figure/A-Power-Grid-SCADA-system_fig1_224237660

[65] Amélioration de la sécurité des systèmes électriques à travers l'approche de sensibilité pour l'emplacement optimal des dispositifs FACTS - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Schema-dun-SVC_fig2_362318339

[66] S. Boudaoud, A. Khellaf, K. Mohammedi, «Performance Analysis and Economic Evaluation of a Solar Power Tower in Algeria», 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey, October 2- 4, 2013

Résumé

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation des réseaux électriques à l'aide de l'écoulement de puissance optimal (OPF) et des dispositifs FACTS, notamment le compensateur statique de puissance réactive (SVC). L'étude vise à améliorer les performances techniques et économiques du réseau en réduisant les pertes de puissance active, en améliorant le profil de tension et en assurant le respect des contraintes d'exploitation.

Après une présentation générale des réseaux électriques et des technologies FACTS, une modélisation du SVC ainsi qu'une formulation mathématique du problème OPF ont été développées. La méthodologie proposée a été appliquée aux réseaux tests IEEE à 9 nœuds et IEEE à 14 nœuds sous l'environnement PSAT/MATLAB.

Les résultats obtenus montrent que l'intégration optimale du SVC permet d'améliorer significativement le profil de tension, de réduire les pertes de transmission et d'accroître la stabilité du réseau. Cette étude confirme l'efficacité des dispositifs FACTS associés à l'OPF pour l'amélioration des performances des réseaux électriques modernes.

Mots-clés : Réseau électrique, Écoulement de puissance optimal (OPF), FACTS, SVC, Profil de tension, Pertes de puissance, PSAT.

Abstract

This thesis focuses on the optimization of electrical power systems using Optimal Power Flow (OPF) and FACTS devices, particularly the Static Var Compensator (SVC). The main objective is to improve the technical and economic performance of the power network by reducing active power losses, enhancing the voltage profile, and satisfying operational constraints.

After presenting the fundamentals of power systems and FACTS technologies, an SVC model and a mathematical formulation of the OPF problem were developed. The proposed methodology was applied to the IEEE 9-bus and IEEE 14-bus test systems using the PSAT/MATLAB environment.

The obtained results demonstrate that the optimal integration of the SVC significantly improves voltage profiles, reduces transmission losses, and enhances system stability. The study confirms the effectiveness of combining FACTS devices with OPF techniques to improve the performance of modern electrical power networks.

Keywords: Power System, Optimal Power Flow (OPF), FACTS, SVC, Voltage Profile, Power Losses, PSAT.

الملخص

يتناول هذا العمل دراسة تحسين أداء شبكات الطاقة الكهربائية باستخدام التدفق الأمثل للقوة وتقنيات أنظمة النقل المرنة للتيار المتناوب، مع التركيز على المعوض الساكن للقوة غير الفعالة. ويهدف البحث إلى تحسين الأداء التقني والاقتصادي للشبكة من خلال تقليل خسائر القدرة الفعالة، وتحسين مستويات الجهد، وضمان احترام القيود التشغيلية للشبكة.

بعد تقديم المفاهيم الأساسية لشبكات الطاقة الكهربائية وتقنيات أنظمة النقل المرنة للتيار المتناوب، تم تطوير نموذج رياضي للمعوض الساكن للقوة غير الفعالة وصياغة مسألة التدفق الأمثل للقوة. ثم تم تطبيق المنهجية المقترحة على شبكتين معياريتين مكونتين من تسع عقد وأربع عشرة عقدة باستخدام بيئة المحاكاة المناسبة لتحليل وتشغيل أنظمة القدرة الكهربائية.

أظهرت النتائج أن الدمج الأمثل للمعوض الساكن للقوة غير الفعالة يساهم بشكل فعال في تحسين مستويات الجهد، وتقليل خسائر النقل، وتعزيز استقرار الشبكة الكهربائية. كما بينت الدراسة أن استخدام تقنيات أنظمة النقل المرنة للتيار المتناوب بالاقتران مع التدفق الأمثل للقوة يمثل حلاً فعالاً لتحسين أداء وموثوقية الشبكات الكهربائية الحديثة.

الكلمات المفتاحية: شبكات الطاقة الكهربائية، التدفق الأمثل للقوة، أنظمة النقل المرنة للتيار المتناوب، المعوض الساكن للقوة غير الفعالة، مستوى الجهد، خسائر القدرة، استقرار الشبكة.