

N° Ordre...../FHC/UMBB/2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

KAOUACHE Sadek

BOUNAB Haithem

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Electrique : Electricité Industrielle

Thème

Compensation de la Puissance Réactive à l'aide d'un UPFC

Devant le jury :

KIFOUCHE Rezki	MAA	UMBB	Président
KHELIFI Fateh	MAA	UMBB	Examineur
BENDJEGHABA Omar	Pr	UMBB	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département : Automatisation et Electrification des procédés
Filière : Hydrocarbures
Option : Génie Electrique - Electricité Industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Compensation de la Puissance Réactive à l'aide d'un UPFC

Présenté par :
KAOUACHE Sadek
BOUNAB Haithem

Avis favorable de l'encadreur :

Signature
BENDJEGHABA .O

Avis favorable du Président du jury
Nom Prénom **Signature**

Cachet et signature

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos reconnaissances envers Dr. BENDJEGHABA Omar de nous avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et pour les conseils qu'elle n'a cessé de nous donner et les remarques.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail avant tout à mes chers Parents qui m'ont enseigné la patience, la politesse, le sacrifice et qui ont toujours été là pour moi.

« Que ALLAH les protègent ».

À tous mes frères et sœurs et mes amis.

Sadek... 

À mes parents, vous avez été mes premiers enseignants, mes guides et mes modèles. Votre soutien indéfectible et votre confiance en moi ont nourri ma détermination à réussir.

À ma sœur, Tu as été ma meilleure amie, ma confidente et mon alliée. Ta présence bienveillante et tes encouragements constants m'ont donné la force de persévérer.

Et à mes amis, vous avez été mes compagnons de route, mes partenaires d'étude et mes confidents. Vos encouragements, vos conseils et votre présence ont rendu cette aventure encore plus enrichissante.

Ce mémoire est le fruit de nos liens indéfectibles et de notre soutien mutuel. Je vous suis reconnaissant d'avoir été présents dans ma vie et je partage avec vous cette réussite qui est aussi la vôtre. Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire.

Avec tout mon amour et ma gratitude.

Haithem... 

Résumé

Le transport de puissance réactive à travers les lignes des réseaux électriques impacte négativement la stabilité en tension, particulièrement lorsque les générateurs arrivent à leur limite de production d'énergie réactive et les lignes arrivent à leur limite de transit de puissance. Une compensation de l'énergie réactive est nécessaire, car elle permet d'augmenter les capacités de transit de la puissance active et elle permet d'améliorer et contrôler la stabilité de tension du réseau.

Parmi ces moyens de compensation on trouve les dispositifs conventionnels (les batteries de condensateurs, les compensateurs) et les dispositifs FACTS (SVC, STATCOM, TCSC...).

Cette étude vise à améliorer les performances et la stabilité d'un réseau électrique. Un calcul de l'écoulement de puissance a été réalisé sur deux réseaux, l'un avec 30 nœuds et l'autre avec 14 nœuds, en utilisant le logiciel PSAT.

L'amélioration de l'indice de performance et de l'indice de stabilité a été réalisée dans les deux réseaux. Dans cette étude, nous avons perturbé les deux réseaux électriques en augmentant les charges réactives. Ensuite, nous avons inséré un dispositif de compensation de la puissance réactive (UPFC) au niveau du nœud le plus faible. Ce dispositif a non seulement amélioré les performances et la stabilité du réseau, mais il a également démontré une amélioration de la capacité du réseau à transporter de l'énergie active.

Dans l'ensemble, cette étude met en évidence l'efficacité de l'UPFC pour améliorer les performances, la stabilité et la capacité du réseau électrique, en particulier lorsqu'il est confronté à des perturbations telles qu'une augmentation des charges réactives.

Abstract

The transport of reactive power across power grid lines has a negative impact on voltage stability, particularly when generators reach their reactive power production limit and lines reach their power transit limit. Reactive energy compensation is necessary, as it increases active power transit capacity and helps to improve and control network voltage stability.

Among these means of compensation are conventional devices (capacitor banks, compensators) and FACTS devices (SVC, STATCOM, TCSC...).

The aim of this study is to improve the performance and stability of a power system. A power flow calculation was carried out on two networks, one with 30 nodes and the other with 14 nodes, using PSAT software.

Improvement of the performance index and stability index was achieved in both networks. In this study, we disturbed both power networks by increasing the reactive loads. Then, we inserted a reactive power compensation device (UPFC) at the weakest node. This device not only improved network performance and stability, but also demonstrated an improvement in the network's ability to transport active energy.

Overall, this study highlights the effectiveness of UPFC in improving the performance, stability and capacity of the power network, particularly when faced with disturbances such as increased reactive loads.

ملخص

نقل الطاقة الغير فعالة عبر خطوط شبكات الكهرباء يؤثر سلبا على استقرار الجهد، وخاصة عندما تصل المولدات الى حدود انتاجها للطاقة الغير فعالة وتصل الخطوط الى حدود قدرتها على نقل الطاقة. إن تعويض الطاقة الغير فعالة ضروري، حيث يسمح بزيادة قدرات نقل الطاقة النشطة ويساعد في تحسين ومراقبة استقرار جهد الشبكة.

من بين وسائل التعويض المتاحة التي تتضمنها هذه الدراسة الأجهزة التالية :

التقليدية مثل (بطاريات المكثفات ومعوضات الطاقة)،

و اجهزة FACTs مثل (TCSC و STATCOM و SVC).

تهدف هذه الدراسة الى تحسين أداء واستقرار الشبكة الكهربائية. تم اجراء حساب لتدفق الطاقة على شبكتين تحتوي عقدة وأخرى على 30 عقدة باستخدام برنامج PSAT احدهما على 14 .

تم تحقيق تحسين في مؤشر الأداء ومؤشر الاستقرار في كلا الشبكتين. في هذه الدراسة , قمنا بإحداث اضطراب في كلا الشبكتين الكهربائيتين عن طريق زيادة الاحمال الغير فعالة . ثم قمنا بإدخال جهاز تعويض الطاقة الغير فعالة (UPFC) على مستوى الفرع الأضعف. هذا الجهاز لم يحسن فقط أداء واستقرار الشبكة، بل اظهر أيضا تحسنا في قدرة الشبكة على نقل الطاقة النشطة.

تسلط هذه الدراسة الضوء على فعالية جهاز (UPFC) في تحسين أداء واستقرار وقدرة الشبكة الكهربائية، وخاصة عند مواجهتها لاضطرابات مثل زيادة الاحمال الغير فعالة.

Sommaire

Sommaire :

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des symboles	
Liste des Abréviations	
1. Introduction générale	1
chapitre_I : Généralité sur les réseaux électriques	
I.1 Introduction	3
I.2 Structure d'un réseau électrique.....	4
I.2.1 Le réseau de transport THT	4
I.2.2 Le réseau de répartition HT	4
I.2.3 Le réseau de distribution	5
I.3 Rôle du réseau électrique	5
I.4 Topologie des réseaux	6
I.4.1 Réseaux radiaux	6
I.4.2 Réseaux bouclés.....	7
I.4.3 Réseaux maillés	7
I.5 Qualité de l'énergie électrique	8
I.6 Types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de la tension	9
I.6.1 Creux de tension et coupures	9
I.6.2 Harmoniques et inter harmoniques	10
I.6.2.1 Les principales sources d'harmoniques	11
I.6.2.2 Les niveaux d'harmoniques	11
I.6.3 Déséquilibre de tension	12
I.6.4 Chutes de tension	13
I.7 Définition de la stabilité des réseaux électriques	14
I.7.1 Classification de la stabilité	14
I.7.1 .1 Stabilité angulaire	15
I.7.1 .2 Stabilité de fréquence.....	15
I.7.1 .3 Stabilité de tension	16
I.7.2 Causes de l'instabilité de la tension	16
I.8 Réglages de tension	17
I.9 Conclusion	18
Chapitre_II : l'écoulement de puissance et la compensation de l'énergie réactive	
II.1 Introduction	19
II.2 Écoulement de puissance	19
II.2.2 Concept général de l'écoulement de puissance	19
II.2.3 But de l'étude de l'écoulement de puissance.....	20

Sommaire

II.2.4 Classification des nœuds	20
II.2.4.1 Nœud de charge (PQ)	20
II.2.4.2 Nœud générateur (PV)	20
II.2.4.3 Accès bilan ($V-\delta$)	20
II.2.5 Classification des variables de l'écoulement de puissance	21
II.2.5.1 Les variables de perturbation ou non contrôlables	21
II.2.5.2 Les variables contrôlables (de contrôle et d'état)	21
II.2.5.2.1 Variables d'état	21
II.2.5.2.2 Variables de contrôle	22
II.2.6 Equations d'écoulement de puissance	22
II.2.6.1 Formation de la matrice admittance	22
II.2.6.2 Formulation des équations de tension	23
II.2.6.3 Formulation des équations d'écoulement de puissance	24
II.2.6.4 Formulation de l'équation des pertes en puissance active	25
II.2.6.5 Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive	25
II.2.7 Méthodes de Résolution du problème de l'écoulement de puissance	26
II.2.7.1 Méthode de Newton – Raphson	26
II.2.7.1.1 Calcul des éléments du Jacobien	27
II.2.7.1.3 Organigramme de la méthode de Newton-Raphson	28
II.3 Puissances et facteur de puissance	29
II.3.1 Le facteur de puissance électrique (FP)	29
II.3.2 L'énergie réactive consommée	29
II.3.3 Importance de la puissance réactive	29
II.3.4 Bilan de la puissance réactive	30
II.3.5 Puissance transmise par une ligne électrique	30
II.4 Compensation d'énergie réactive	32
II.4.1 Principe général de la compensation	33
II.4.2 Objectif de la compensation de la puissance réactive	33
II.4.4 Moyens de compensation de la puissance réactive	33
II.4.4.1 Les batteries Les condensateurs	33
II.4.4.2 Les inductances	34
II.4.4.3 Groupes thermiques et hydrauliques	35
II.4.4.4 Les compensateurs synchrones	35
II.4.4.5 les dispositifs FACTS	35
II.5 Conclusion	36
Chapitre III : Les dispositifs FACTS	
III.1 Introduction	37
III.2 Définition des dispositif FACTS	37
III.2.1 Dispositifs FACTS Shunt	38

Sommaire

III.2.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (Static Var Compensator- SVC)	38
III.2.2 Dispositifs FACTS séries	38
III.2.2.1 Condensateur Série Contrôlé par Thyristors (Thyristor Controlled Series Capacitor-TCSC)	38
III.2.2.2 Compensateurs hybrides (série-série et shunt-série)	39
III.3 Classification des dispositifs FACTS	39
III.3.1 Première génération	39
III.3.2 Deuxième génération	39
III.3.3 Troisième génération :.....	39
III.4 Les systèmes FACTS les plus utilisés.....	39
III.5 Les différents types des systèmes FACTS	40
III.6 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques	41
III.7 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (UPFC) :.....	42
III.7.1 Les avantages et les inconvénients	45
III.7.2 Principe de fonctionnement	46
III.7.3 Modélisation du système UPFC	47
III.7.3.1 Modélisation de la branche série (UPFC série)	48
III.7.3.2 Modélisation de la partie shunt (STATCOM)	50
III.7.4 Calcul des puissances instantanées de l'UPFC	52
III.8 Conclusion	53

Chapitre IV : Simulation et résultats

IV. 1Introduction	54
IV.2Description générale de l'étude	54
VI.3 Outils de simulation	54
IV3.1 Pourquoi le choix de PSAT	55
IV.5 Analyse les deux réseaux de IEEE (14 JB, 30 JB) par logiciel PSAT	57
IV.5.1 Réseau test de 14 jeux de barres	57
VI.5.1.1Présentation du réseau	57
VI.5.2 Réseau IEEE 14 a l'état de l'équilibre	58
VI.5.2 .1Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE 14 à l'état de l'équilibre	58
VI.5.3 Réseau IEEE 14 a l'état perturbé	59
VI.5.3.1 Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état perturbé	60
VI.5.4 Intégration du UPFC dans un réseau test de IEEE14	61
VI.5.4 .1Analyse de l'emplacement du FACTS (UPFC) du réseau IEEE 14 JB	61
IV.5.5 Comparaison entre les résultats sans et avec élément UPFC	63
IV.5.5.1 Comparaison entre les résultats du transit de puissance sans et avec élément UPFC	63
IV.5.5.2 Comparaison entre les résultats des pertes de puissance	64
IV.5.6Interprétation	64
IV.6 Analyse de la stabilité dynamique du réseau IEEE 30 JB sans et avec intégration de dispositif FACTS (UPFC)	65

Sommaire

IV.6.1 Schéma descriptif du réseau test : Réseau IEEE 30 JB	65
IV.6.2 Caractéristique du modèle du réseau IEEE 30 JB	65
IV.6.3 Profile du module de la tension à l'état initial et à la marge de stabilité du réseau IEEE 30 JB	66
IV.6.4 Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE30 à l'état perturbé	66
IV.6.5 Intégration du UPFC dans un réseau test de IEEE30	68
IV.6.6 Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE30 avec UPFC	70
IV.6.6.1 Comparaison entre les résultats des pertes de puissance	71
IV.6.6.2 Comparaison entre les résultats de l'écoulement de puissance sans et avec élément FACTS UPFC	72
IV.6.7 Interprétation	73
IV.7 Conclusions	73
Conclusion générale	74
Annexe	
Annexe (A).....	75
Annexe (B).....	81

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Tableau représente la classification des nœuds.....	20
Tableau III.1 : différentes applications dans les réseaux électrique	41
Tableau III.2 : le rôle de chaque dispositif FACTS.....	42
Tableau IV.1 : Comparaison entre des logiciels d'analyse des réseaux électriques.....	55
Tableau IV.2 : Résultat de l'écoulement de puissance à l'état initial du réseau IEEE 14 JB.....	58
Tableau IV.3 : Les données des lignes étudié de IEEE 14.....	58
Tableau IV.4 : Résultat de l'écoulement de puissance à l'état perturbé du réseau IEEE 14 JB...	60
Tableau IV.5 : Résultat de l'écoulement de puissance après la compensation du réseau IEEE 14 JB.....	62
Le tableau IV.6 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 14 jeux de barres Pour Le UPFC et sans élément de FACTS	63
Tableau IV.7 : Les caractéristiques de modèle d'étude (réseau dynamique IEEE 30 JB)	65
Tableau IV.8 : Résultat de l'écoulement de puissance à l'état perturbé du réseau IEEE 30 JB...	67
Tableau IV.9 : Les tensions et les Puissances de IEEE30 avec l'intégration d'un UPFC.....	70
Tableau IV.10 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 30 jeux de barres Pour le UPFC et sans élément de FACTS.....	72

Liste des Figures

Figure I.1: structure d'un réseau électrique.....	4
Figure I.2 : Schéma d'un réseau radial.....	6
Figure I.3 : Schéma simplifié d'un réseau.....	7
Figure I.4 : Schéma simplifié d'un réseau maillé.....	7
Figure I.5 : Creux de tension.....	9
Figure I.6 : Dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire.....	11
Figure I.7: Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.....	12
Figure I.8: Déséquilibre de tension.....	13
Figure I.9: Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.....	13
Figure I.10: Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.....	13
Figure I.11: Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales.....	14
Figure I.12 : classification de la stabilité des réseaux électriques.....	17
Figure II.1 : Système à 3 nœuds.....	22
Figure II.2 : organigramme de la méthode de newton raphson.....	28
Figure II.3 : Réseau électrique alimentant une charge.....	30
Figure II.4 Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.....	31
Figure II.5 : Intérêt de la compensation dans l'échange d'énergie électrique.....	32
Figure II.6 : principe de la compensation de la puissance réactive.....	33
Figure II.7 : Schéma de montage d'un absorbeur sur jeu de barres HT.....	34
Figure II.8 : Schéma équivalent de la machine synchrone.....	35
Figure III.1 : Catégories des FACTS.....	38
Figure III.2 : Les différents types des systèmes FACTS.....	40
Figure III.3 : Schéma de base de l'UPFC.....	43
Figure III.4 : le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jXL avec Deux générateurs de tension V_S et V_R et un UPFC.....	44
Figure III.5 : PR en fonction de δ avec un UPFC et $\rho = 90^\circ$	45
Figure III.6 : Mode de fonctionnement d'un UPFC.....	46
Figure III.7 : Circuit équivalent simplifié du système UPFC.....	47
Figure III.8 : Passage dans le référentiel tournant de la composante équilibrée directe	52

Liste des Figures

Figure IV.1 : Organigramme pour le système IEEE14J.B et IEEE 30J.B.....	56
Figure IV.2 : Schéma du système d'application IEEE à 14 nœuds.....	57
Figure IV.3 : Les tensions de chaque jeu de barre de IEEE14.....	59
Figure IV.4 : Les tensions de chaque jeu de barre de IEEE14.....	60
Figure IV.5 : Topologie du réseau étudié IEEE14 avec UPFC.....	61
Figure IV.6 : Les tensions de chaque jeu de barre après la compensation.....	62
Figure IV.7 : Les pertes active sans et avec UPFC.....	64
Figure IV.8 : Les pertes active sans et avec UPFC.....	64
Figure IV.9 : Représentation du réseau dynamique IEEE 30 JB par le logiciel PSAT.....	65
Figure IV.10 : Les tensions de chaque jeu de barre de IEEE 30.....	66
Figure IV.11 : Les tensions d'un réseau IEEE30 sans élément FACTS.....	68
Figure IV.12 : Topologie du réseau étudié IEEE 30 avec UPFC.....	69
Figure IV.13 : Amplitude des tensions avec compensation série-shunt (UPFC).....	69
Figure IV.14 : pertes de puissance active après compensation.....	71
Figure IV.15 : pertes de puissance réactive après compensation.....	71

Liste des symboles

\mathbf{I}_{Bus} : Vecteur des courants injectés.

\mathbf{V}_{Bus} : Vecteur des tensions.

\mathbf{I}^* : Le conjugué de courant \mathbf{I} .

V_i : Tension au nœud i .

V_i^* : Le conjugué de la tension au nœud i .

\mathbf{Y}_{Bus} : Matrice admittance.

P_{loss} : Pertes de puissance active.

Q_{loss} : Pertes de puissance réactive.

δ : Déphasage de la tension V .

θ : Déphasage de la ligne.

I_{ij} : Courant dans la branche ij .

Y_{ij} : Admittance de la ligne entre nœud i et j .

P_i : La puissance active injectée au nœud i .

Q_i : La puissance réactive injectée au nœud i .

$\Delta P_i / \Delta Q_i$: l'écart entre les valeurs spécifiées et calculées pour les puissance active et réactive.

$P_{\text{spéc}} / Q_{\text{spéc}}$: la puissance active / réactive spécifiées.

$P_{\text{calc}} / Q_{\text{calc}}$: la puissance active / réactive calculées.

V_s : tension du réseau (départ).

V_r : tension du réseau (arrivé).

V_{dc} : tension continue.

F : fréquence de réseau.

r : la résistance de le ligne.

L : l'inductance de la ligne.

r_p : les chutes de tension du compensateur parallèle.

Liste des symboles

L_p : l'inductance de fuit du transformateur parallèle.

C : la capacité du circuit commun.

f_p : la fréquence de la porteuse.

V_p : l'amplitude de la porteuse.

f_r : la fréquence de fondamentale.

V_r : l'amplitude de l'onde de référence.

V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} : tension à la sortie de l'onduleur.

V_p : La tension de compensation parallèle

i_{pa} , i_{pb} , i_{pc} : Les courants de l'UPFC parallèle.

V_{pa} , V_{pb} , V_{pc} : Les tensions de l'UPFC parallèle.

P : La puissance active.

Q : La puissance réactive.

V_{pq} : La tension injectée par le compensateur.

Liste des abréviations

THT : Les réseaux de transport très haut tension.

HT : Les réseaux de répartition sont à haute tension.

MT : Les réseaux moyenne tension.

FACTS : Système de Transmission en Courant Alternatif Flexible.

SVC : Compensateur Statique.

TCSC : Condensateur série contrôlé par thyristors.

TCR : Inductance commutée par thyristors.

TSC : Condensateur commuté par thyristors.

STATCOM: Compensateur Synchrone Statique.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

TSR: Thyristor Switched Reactor.

SSSC: Statice Synchrones Série Compensateur.

UPFC: Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer.

Pu : Grandeur en unité relative (grandeur réduite).

GTO: Gate Turn Off.

PAT: Abréviation anglaise «Power Analysis Toolbox».

PST: Abréviation anglaise «Power System Toolbox».

SPS: Abréviation anglaise « SimPowerSystems».

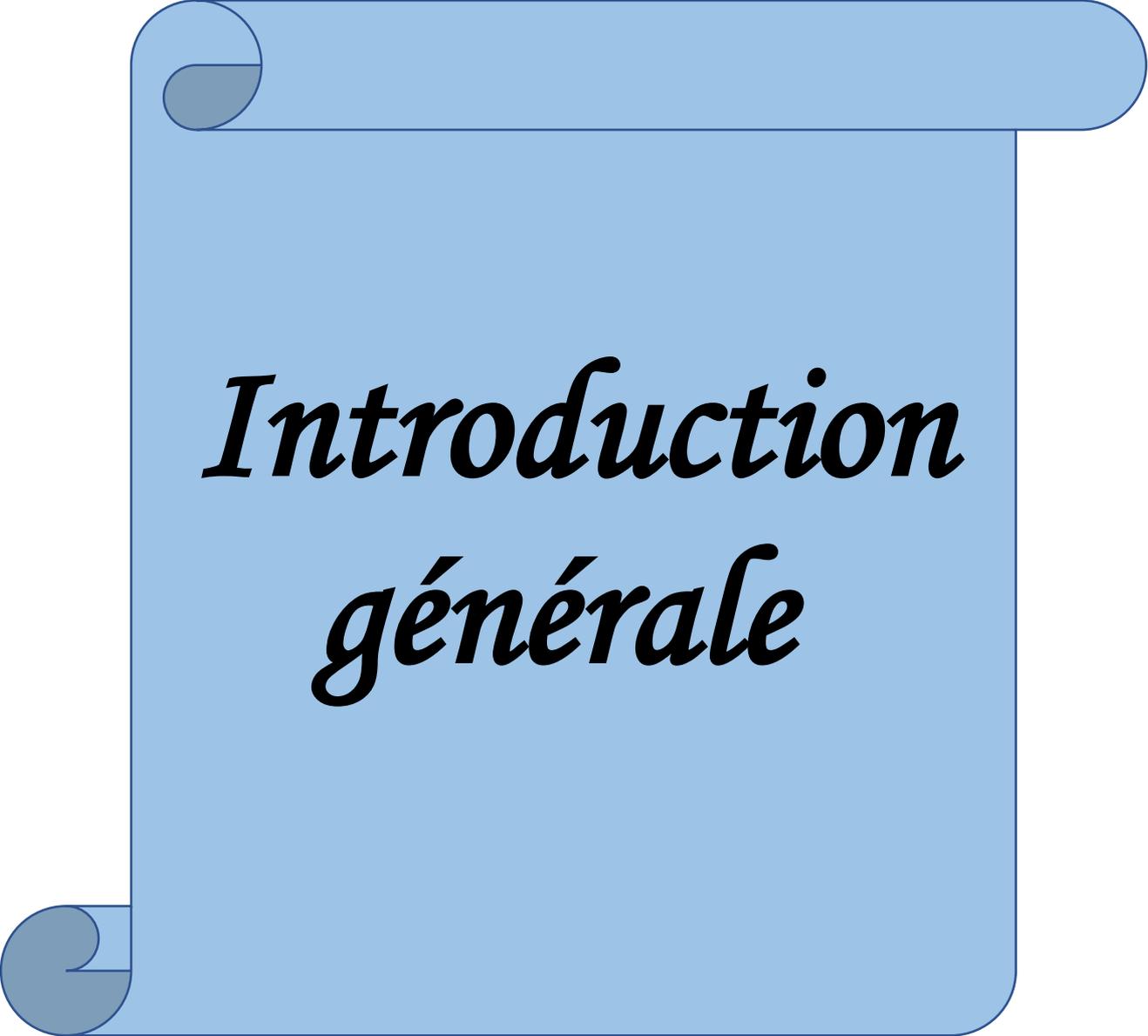
VST: Abréviation anglaise «Voltage Stability Toolbox».

EST : Abréviation anglaise « Educational Simulation Tool ».

MatEMTP : Abréviation anglaise « Electromagnetic Transients Program in Matlab ».

Matpower : Un paquet de « m-file » MATLAB pour résoudre les problèmes de flux

JB : Jeux de barres.



*Introduction
générale*

1. Introduction générale :

Le réseau électrique a été conçu pour transporter l'énergie électrique en partant des centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Pour ce faire, il met en œuvre des milliers de kilomètres de lignes, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage. Des contrôles hiérarchisés et des automates sont utilisés pour maintenir la tension et la fréquence et garantir la continuité du service. Cependant, le réseau peut être soumis à des perturbations qui peuvent se propager rapidement et avoir un impact critique sur l'ensemble du système.

La stabilité et la fiabilité des réseaux électriques sont des préoccupations primordiales dans le domaine de l'énergie. Avec la croissance constante de la demande en électricité, il devient crucial d'identifier et de résoudre les problèmes susceptibles de compromettre le bon fonctionnement du réseau. L'un des défis majeurs pour la stabilité du réseau électrique est la gestion de l'énergie réactive.

L'analyse de l'écoulement de puissance permet d'estimer les grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal. Ces grandeurs comprennent les tensions aux nœuds, les puissances injectées à ces derniers ainsi que celles qui circulent dans les lignes et les transformateurs. La réduction du transit de la puissance réactive vise à réduire les coûts de production, à maximiser le transit de la puissance active, à améliorer la qualité et la fiabilité du système en maintenant les tensions dans leurs limites autorisées et par conséquent à augmenter la marge de sécurité du système.

L'énergie réactive est essentielle pour le bon fonctionnement des équipements électriques, mais son accumulation excessive peut entraîner une détérioration de la qualité de l'énergie et une instabilité du réseau. Afin de maintenir une performance optimale, il est nécessaire de compenser l'énergie réactive excédentaire et d'en réguler le flux.

Les dispositifs FACTS sont des éléments d'électronique de puissance qui permettent un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils permettent de charger les lignes en transit de puissance active à des valeurs près de leurs limites thermiques et augmentent ainsi la capacité de transférer de la puissance utile d'une région à une autre. Ils permettent également de stabiliser le comportement du réseau.

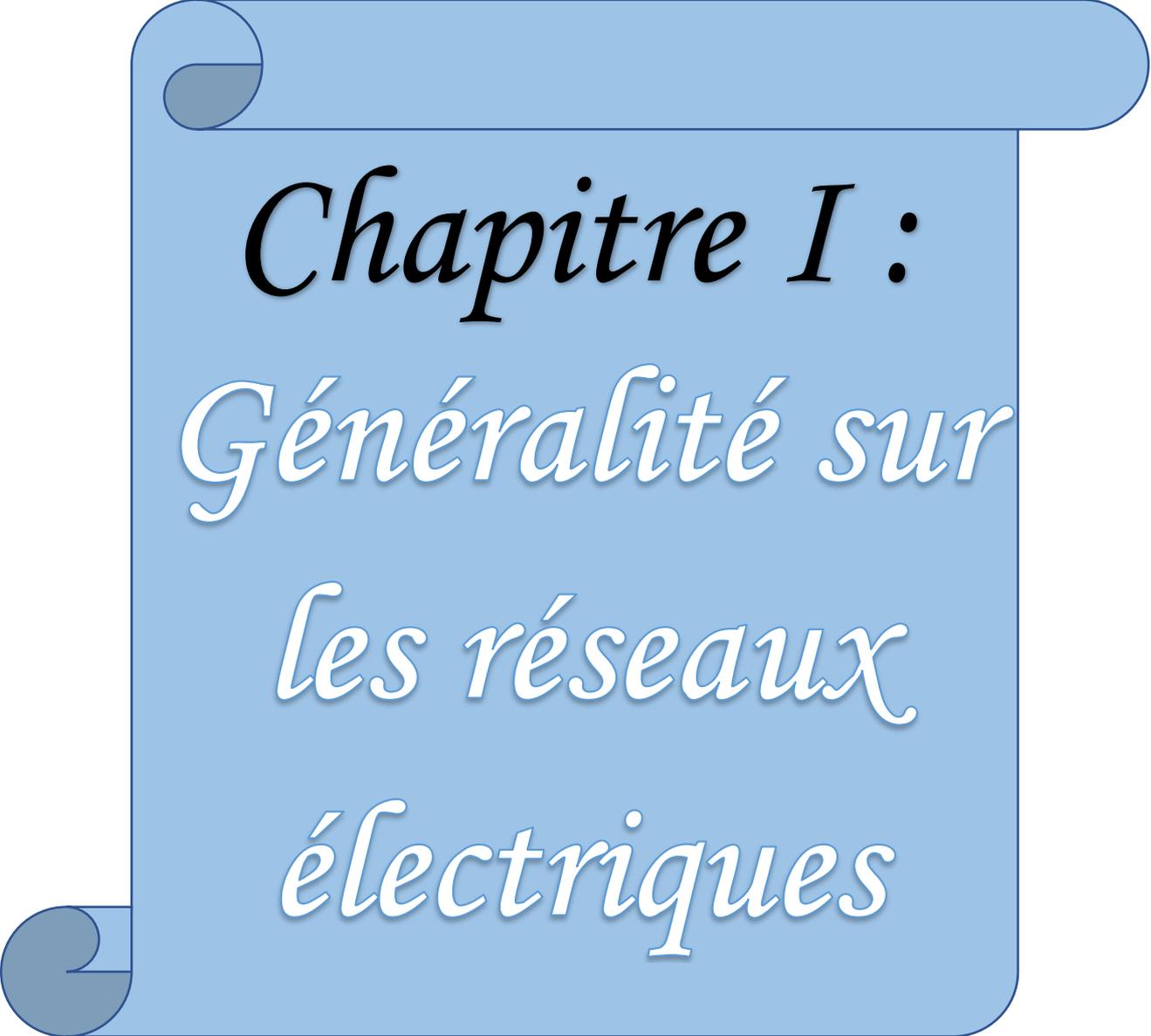
L'objectif de ce mémoire est d'étudier comment compenser l'énergie réactive pour résoudre le problème de dégradation de la stabilité des réseaux électriques. Pour cela, nous envisageons d'utiliser le dispositif FACTS, tel que l'UPFC, pour réguler le flux d'énergie réactive et maintenir la stabilité du réseau. L'UPFC combine une branche de réactance commandée par thyristors et une branche de convertisseur de tension. Il peut injecter ou

Introduction générale

absorber de la puissance réactive ainsi que contrôler la tension et la phase dans les systèmes électriques. L'UPFC joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances et la gestion des congestions dans les réseaux électriques.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres avec une introduction générale et une conclusion générale présentant des suggestions.

Initialement, nous avons abordé des généralités sur les réseaux électriques dans le premier chapitre. Puis on s'est intéressée au calcul de l'écoulement de puissance et la compensation de la puissance réactive dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre, nous avons traité et d'une manière générale les dispositifs FACTS. De plus nous avons une importance spéciale au dispositif UPFC. Enfin, le dernier chapitre est entièrement consacré à notre application toute en exposant en détails les organigrammes des programmes réalisés, des tests ainsi que des résultats obtenus.



Chapitre I :
Généralité sur
les réseaux
électriques

I. Généralité sur les réseaux électriques :**I.1 Introduction :**

Les réseaux électriques jouent un rôle crucial dans la production, le transport et la distribution de l'électricité, de la source de production à la destination finale. Ils interconnectent les centrales de production, qu'elles soient hydrauliques ou thermiques, avec les centres de consommation tels que les villes, les usines et les maisons. Pour minimiser les pertes joules, l'énergie électrique est généralement transportée à haute tension, voire très haute tension, avant d'être progressivement abaissée à une tension plus basse pour une utilisation finale. En somme, les réseaux électriques constituent un ensemble complexe d'appareils qui permettent de répondre aux besoins énergétiques de la société moderne.

Le transport de l'énergie électrique nécessite l'utilisation d'un réseau interconnecté pour éviter toute interruption dans la fourniture d'énergie aux consommateurs et aux réseaux de distribution connectés. Ce type de réseau maillé offre une redondance qui garantit la continuité du service en cas de panne d'un élément du réseau. En effet, la perte de l'un de ces éléments ne devrait pas affecter le fonctionnement global du réseau et la distribution d'électricité à grande échelle. Ainsi, le réseau maillé est un élément clé de la fiabilité et de la stabilité de la fourniture d'électricité à la société moderne.

Les interconnexions entre les pays sont également réalisées à l'aide d'un réseau maillé, constitué de lignes de transmission à courant alternatif très haute tension ou de liaisons à courant continu. Ces réseaux interconnectés permettent le partage de l'énergie électrique entre les pays voisins, offrant ainsi des avantages économiques, techniques et environnementaux. En effet, ils peuvent contribuer à la réduction des coûts de production d'énergie, à l'augmentation de la stabilité du système électrique et à la promotion de la production d'énergie renouvelable en partageant les sources d'énergie entre les pays. En somme, les interconnexions internationales sont un élément clé de la transition énergétique et de la collaboration internationale dans le domaine de l'énergie.

I.2 Structure d'un réseau électrique :

Les réseaux électriques sont structurés en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions.

Les réseaux électriques sont décomposés en trois sous-systèmes et chaque sous-système est relié à des postes sources chargé de l'adaptation des niveaux de tensions.

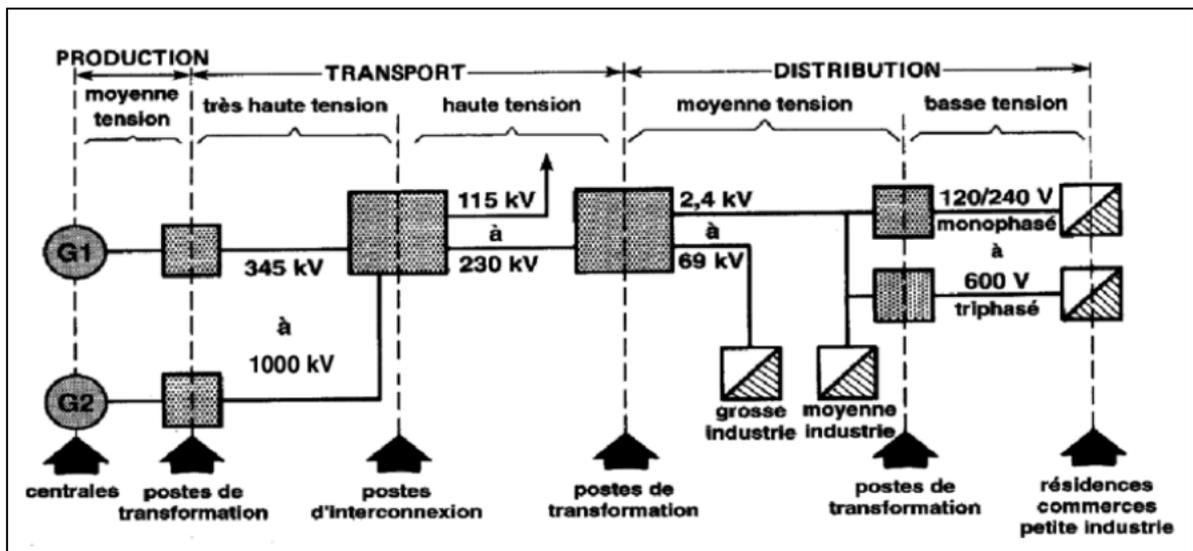


Figure I.1 : structure d'un réseau électrique.

I.2.1 Le réseau de transport THT :

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. Ce réseau permet de relier les principales centrales de production aux grands postes alimentant les réseaux de répartition. Il est aérien, triphasé et le plus souvent maillé. La tension se situe en général entre 225 kV et 400 kV, L'utilisation de ces tensions élevées est liée à un objectif économique (minimisation des pertes d'énergie) Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence. [1]

I.2.2 Le réseau de répartition HT :

Les réseaux de répartition ont pour objectif de fournir de l'électricité à l'échelle régionale, en utilisant des câbles à haute tension (généralement entre 30 et 150 kV). Ils sont alimentés principalement par le réseau de transport grâce à des transformateurs, mais également

par des centrales électriques de moyenne puissance (inférieure à environ 100 MW). Ces réseaux sont répartis de manière relativement uniforme sur le territoire d'une région.

I.2.3 Le réseau de distribution :

Les réseaux de distribution sont généralement basés sur une structure arborescente de réseau à partir d'un poste source, l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation MT/BT. Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension [1] :

- ❖ Les réseaux à moyenne tension MT (de 3 à 33 kV).
- ❖ Les réseaux à basse tension BT (de 220 à 380 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

La distribution se fait souvent soit par des lignes aériennes ou des câbles sous terrain. Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale.

Contrairement aux réseaux de transport, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

a) -les Réseaux de distribution à moyenne tension (MT) On appelle réseaux MT les réseaux couvrants la plage de 1 à 36 kV.

b) -les Réseaux de distribution à basse tension (BT) Permet d'acheminer l'énergie électrique du réseau de distribution MT aux points de faible Consommation. Ce réseau alimente un nombre très élevé de consommateurs du domaine Domestique. La structure de ce réseau est de type aérien ou souterrain. [2]

I.3 Rôle du réseau électrique :

Le rôle du réseau dans le système électrique pour garantir un approvisionnement sûr et économique de l'énergie est essentiel. Il n'est techniquement pas possible que ce rôle soit assuré par un type unique de réseau qui relierait moyens de production et utilisateurs. Une bonne solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseaux dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par le niveau de tension de leurs lignes ou le niveau de puissance qui transite [3]. Ses fonctions sont les suivantes :

- ❖ L'acheminement de l'énergie des centrales de production aux abords des grands centres de consommation, c'est le rôle du réseau de transport.

- ❖ La répartition de cette énergie en différents points de chacun des centres de consommation de manière à mieux assurer la sécurité de l'alimentation de l'ensemble des consommateurs, c'est le rôle des réseaux de répartition.
- ❖ L'alimentation directe de chacun des consommateurs à partir du réseau de répartition, c'est le rôle des réseaux de distribution. [4]

I.4 Topologie des réseaux :

Les réseaux doivent assurer le transit de l'énergie électrique avec une sécurité suffisante, cette sécurité d'alimentation est augmentée soit :

- ❖ Par les lignes aux appareillages plus solides.
- ❖ Par des circuits plus nombreux.

I.4.1 Réseaux radiaux :

Le principe de fonctionnement de réseau radial est à une seule voie d'alimentation. Ceci signifie que tout point de consommation sur une telle structure ne peut être alimenté que par un seul chemin électrique possible. Il est de type arborescent. Cette arborescence se déroule à partir des points d'alimentation, qui sont constitués par les postes de distribution publique HTB/HTA ou HTA/HTA (répartition). Ce schéma (figure I.2) est particulièrement utilisé pour la distribution de la MT en milieu rural. En effet il permet facilement, et à un moindre coût, d'accéder à des points de consommation de faible densité de charge ($\gg 10$ kVA) et largement répartis géographiquement ($\gg 100$ km²).

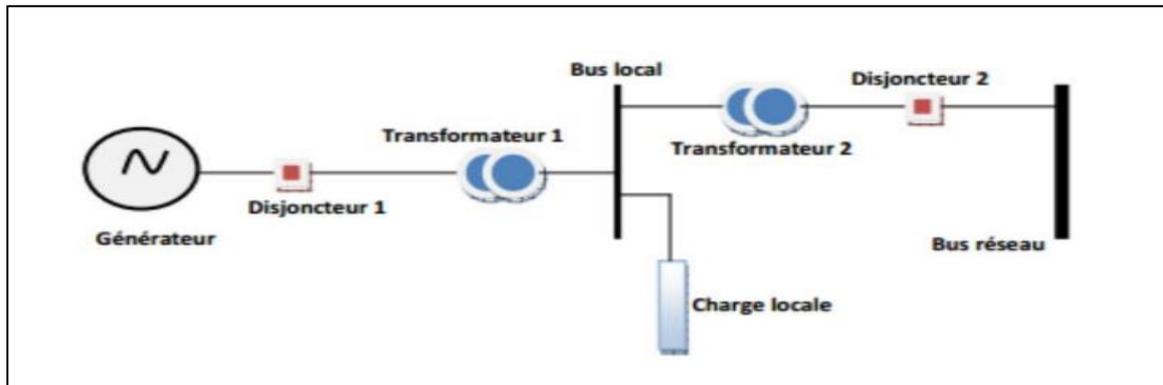


Figure I.2: Schéma d'un réseau radial.

I.4.2 Réseaux bouclés :

Cette topologie (Figure I.3) est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés [5].

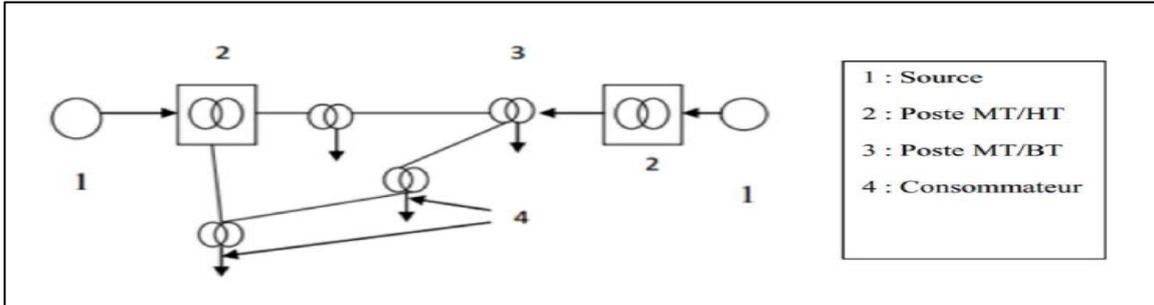


Figure I.3: Schéma simplifié d'un réseau bouclé.

I.4.3 Réseaux maillés :

Cette topologie (Figure I.4) est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale. On obtient ainsi une meilleure sécurité, mais à un prix plus cher [6].

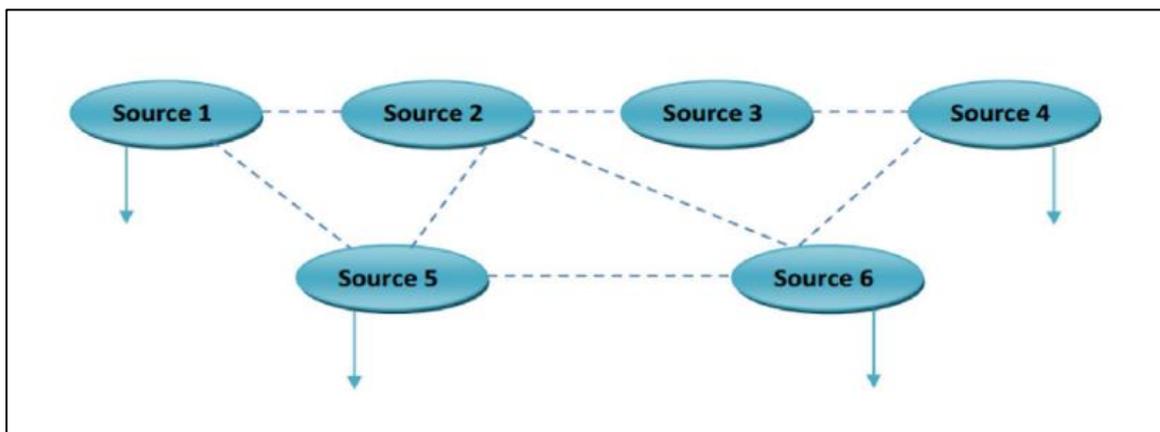


Figure I.4 : Schéma simplifié d'un réseau maillé.

I.5 Qualité de l'énergie électrique :

La tension possède 4 caractéristiques qui sont :

I.5.1 Amplitude :

L'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ de la valeur nominale. En fonction de la variation de l'amplitude, on trouve 2 familles de perturbation :

- ❖ Les creux de tension, coupure et surtension : elles se caractérisent par de grande variation de l'amplitude et leur principale origine est les courts-circuits.
- ❖ Les variations de tension : elles se caractérisent par la variation de l'amplitude de la tension inférieur à 10% de la tension nominale, sa source principale est les charges fluctuantes ou la configuration du réseau. [7]

I.5.2 Fréquence :

Des variations de fréquences peuvent être provoquer par des pertes importantes de production, de l'ilotage d'un groupe ou le passe en réseau séparé, ou d'un défaut de chute de tension qui entraîne une réduction de la charge. Ces variations doivent être maintenu dans un intervalle de $\pm 1\%$, un dépassement peut endommager le matériel ou provoqué un black-out.

I.5.3 Forme d'onde :

La forme d'onde des trois tensions doit être la plus proche possible d'une sinusoïde, en cas de perturbation, elle se compose d'harmonique et de bruit (signaux permanent mais pas périodique).

I.5.4 Symétrie :

C'est l'égalité des modules des trois tensions et celles de leurs déphasages, le déséquilibre provoque l'élévation du potentiel de neutre.

La mesure de qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) :

- ❖ Creux de tension et coupures.
- ❖ Harmoniques et inters harmoniques.
- ❖ Surtensions.
- ❖ Fluctuations de tension.
- ❖ Déséquilibres de tension.

- ❖ Variations de la fréquence d'alimentation.
- ❖ Tension continue dans les réseaux alternatifs.
- ❖ Tensions de signalisation.

En général, il n'est pas nécessaire de mesurer toutes ces perturbations. Elles peuvent être regroupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension. Souvent, plusieurs de ces caractéristiques sont modifiées simultanément par une même perturbation. Elles peuvent également être classées en fonction de leur caractère aléatoire (foudre, court-circuit, manœuvre), permanent ou semi-permanent.

I.6 Types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de la tension :

I.6.1 Creux de tension et coupures :

Un creux de tension est une baisse soudaine de la tension en un point du réseau électrique, jusqu'à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% (IEEE 1159) d'une tension de référence (U_{ref}), suivie d'une remontée de la tension après une courte période de temps comprise entre la demi-période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute.

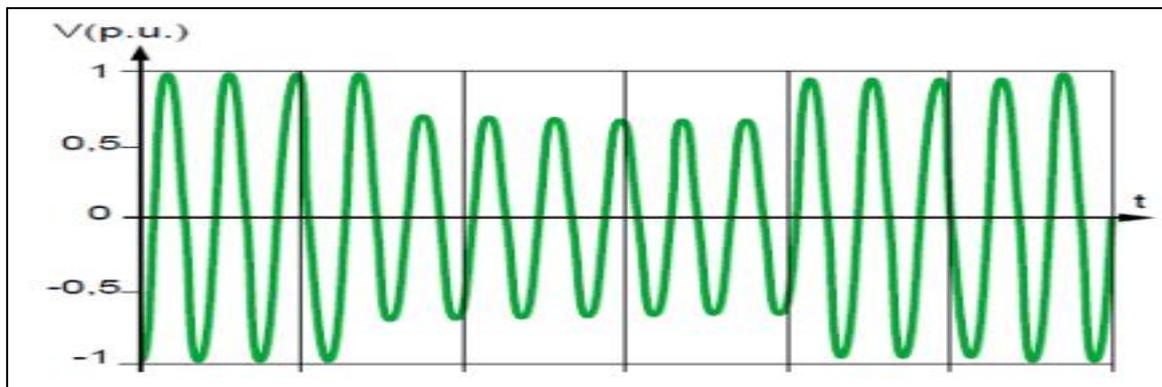


Figure : I.5 : Creux de tension

Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur, supérieures à 90 % (IEEE). Elles sont caractérisées par un seul paramètre : la durée.

Les coupures brèves sont de durée inférieure à une minute (CEIIEEE), elles sont notamment occasionnées par les réenclenchements automatiques lents destinés à éviter les coupures longues (réglés entre 1 et 3 minutes) ; les coupures longues sont de durée supérieure.

Les perturbations de tension de durée inférieure à la demi-période fondamentale T du réseau ($\Delta T < T/2$) sont considérées comme étant des transitoires.

Les Américains utilisent différents adjectifs pour qualifier les creux de tension et les coupures (Interruption) selon leur durée :

- ❖ Instantané ($T/2 < \Delta T < 30 T$),
- ❖ Momentané ($30 T < \Delta T < 3 s$),
- ❖ Temporaire ($3 s < \Delta T < 1 \text{ min}$),
- ❖ Maintenu et sous-tension ($\Delta T > 1 \text{ min}$).

Origine :

- ❖ La commutation de charges de puissance importante (tels que les moteurs asynchrones, les fours à arc, les machines à souder, les chaudières...) par rapport à la puissance de court-circuit.
- ❖ Proviennent soit des défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT), soit des installations des clients.
- ❖ Défaut électrique (bris de câble, accident, etc.) Contact avec la végétation, un animal...).

I.6.2 Harmoniques et inter harmoniques :

Toute fonction périodique (de fréquence f) peut se décomposer en une somme de sinusoides de fréquence $h \times f$ (h : entier), h est appelé rang harmonique ($h > 1$). La composante de rang 1 est la composante fondamentale.

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (y_{hn} \sqrt{2} \sin 2\pi h f + \varphi) \tag{I.1}$$

La valeur efficace est :

$$Y_{\text{eff}} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_h^2 + ..} \tag{I.2}$$

Le taux de distorsion harmonique (THD pour Total Harmonic Distortion) donne une mesure de la déformation du signal :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2} \tag{I.3}$$

Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente (figure I.6). Ce courant est riche en composantes harmoniques dont le spectre sera fonction de la nature de la charge. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau créent des tensions harmoniques qui Perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source.

I.6.2.1 Les principales sources d’harmoniques :

Ce sont des charges, qu’il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques.

❖ Les charges industrielles :

- Équipements d’électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diode ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage.
- Charges utilisant l’arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d’harmoniques (temporaires).

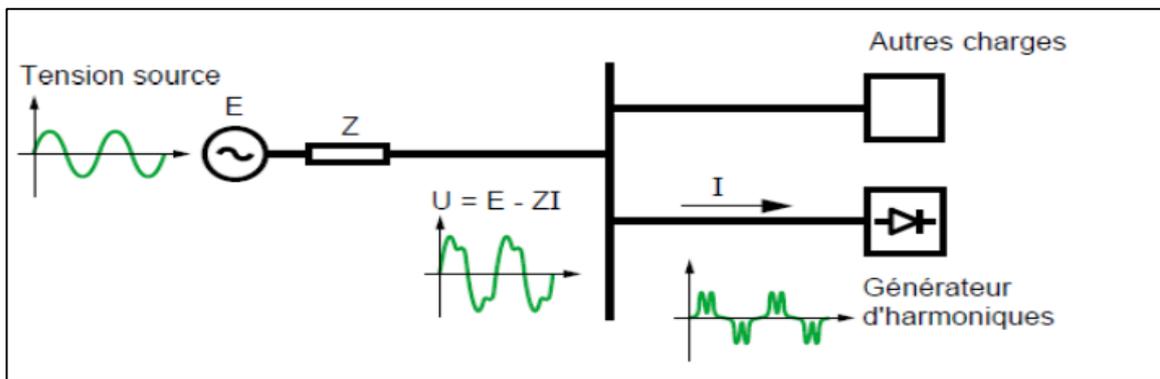


Figure I.6: Dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire.

❖ Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d’alimentation à découpage :

Téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes.

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes.

I.6.2.2 Les niveaux d’harmoniques :

Ils varient généralement selon le mode de fonctionnement de l’appareil, l’heure de la journée et la saison (climatisation).

Les sources génèrent, pour la plupart, des harmoniques de rangs impairs (figure I.7).

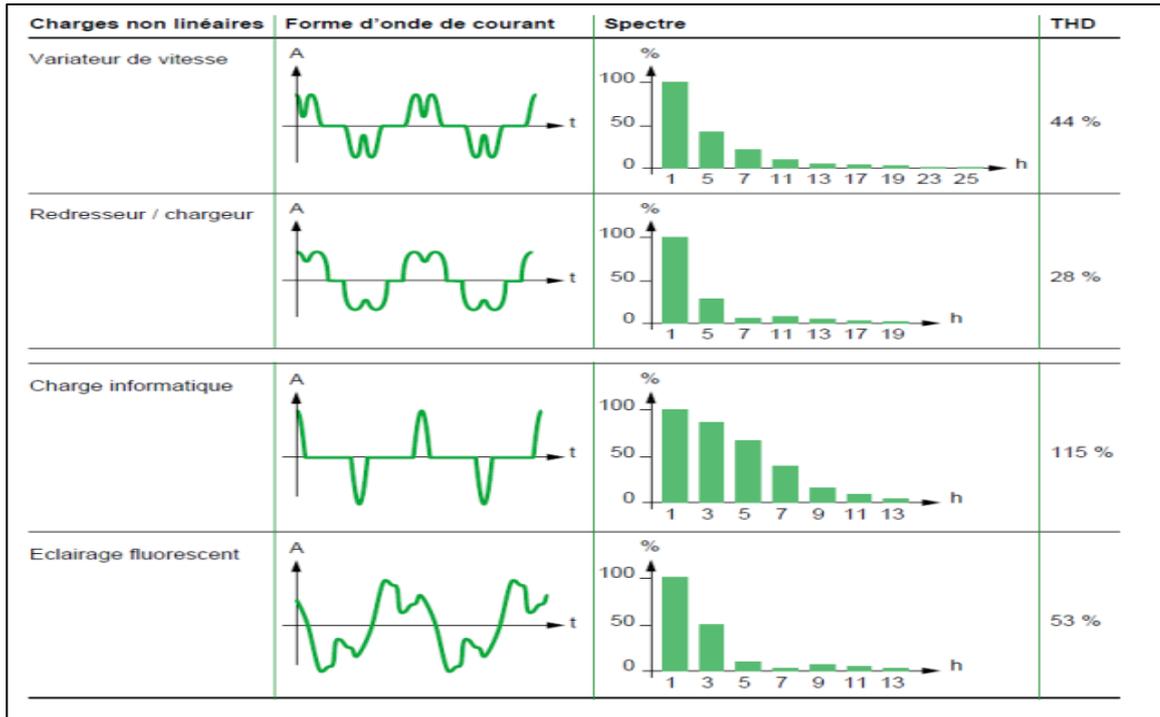


Figure. I.7 : Caractéristiques de quelques générateurs d’harmoniques.

La mise sous tension de transformateurs ou les charges polarisées (redresseurs mono alternance) ainsi que les fours à arc génèrent aussi (en plus des rangs impairs) des harmoniques de rangs pairs. Les inters harmoniques sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental (donc situées entre les harmoniques). Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels que fours à arc, machines à souder et convertisseurs de fréquences (variateurs de vitesse, cyclo convertisseurs). Les fréquences de télécommande utilisées par le distributeur sont aussi des inters harmoniques. Le spectre peut être discret ou continu et variable de façon aléatoire (four à arc) ou intermittente (machines à souder). Pour étudier les effets à court, moyen ou long terme, les mesures des différents paramètres doivent se faire à des intervalles de temps compatibles avec la constante de temps thermique des équipements.

I.6.3 Déséquilibre de tension :

Un récepteur électrique triphasé, qui n’est pas équilibré et que l’on alimente par un Réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau (figure I.7). Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [8].

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas

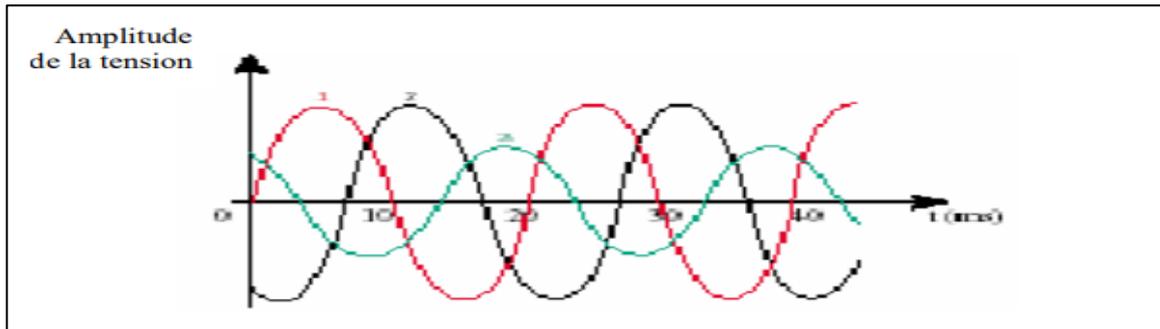


Figure I.8 : Déséquilibre de tension. [8]

I.6.4 Chutes de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension (figure I.9). La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

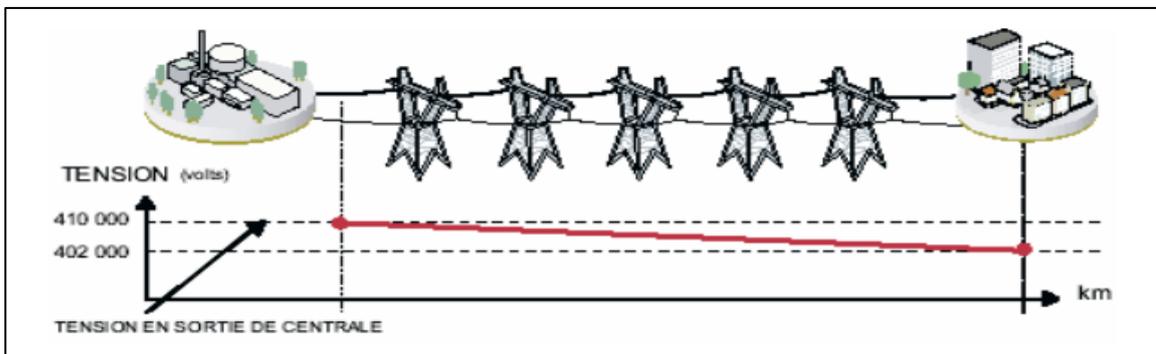


Figure I.9: Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

❖ Si la consommation double, la chute de tension double :

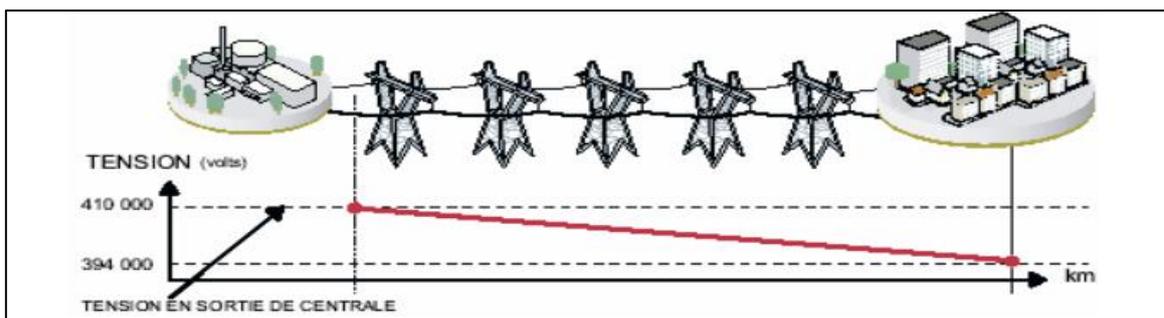


Figure I.10: Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties (figure I.11). Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.

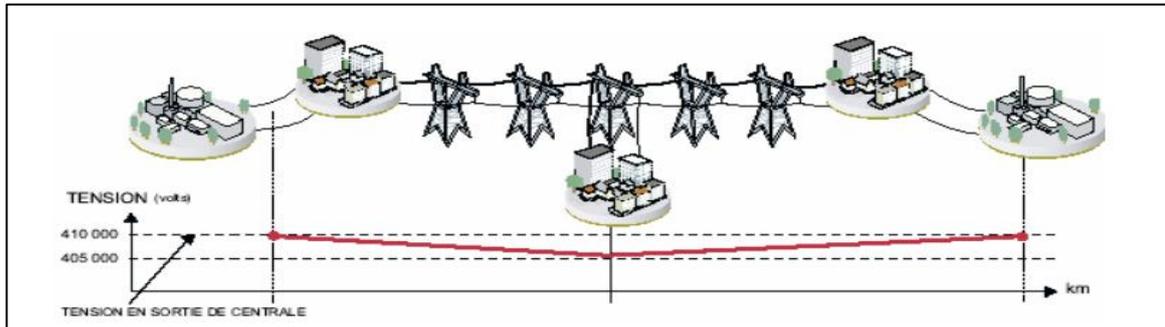


Figure I.11: Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales.

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

I.7 Définition de la stabilité des réseaux électriques :

La stabilité des réseaux électriques est définie en général par leur capacité de rester à un point de fonctionnement stable après l'apparition d'une petite perturbation et de retrouver un point de fonctionnement stable après l'apparition d'une grande perturbation. [9]

I.7.1 Classification de la stabilité :

L'instabilité d'un réseau électrique peut être causée par de nombreux facteurs comme il est précisé précédemment. L'analyse des problèmes de stabilité et l'identification des facteurs contribuant à l'atteinte de l'instabilité ont permis d'améliorer la stabilité des réseaux électriques et de classer la stabilité en fonction de leur nature. Pour cette classification on se base surtout sur :

- ❖ La nature physique de l'instabilité.
- ❖ La taille de la contingence en question.
- ❖ Le temps de la stabilité.
- ❖ Les méthodes de calcul et prédiction utilisée pour étudier la stabilité.

On peut classer les types de la stabilité comme suit :

I.7.1 .1 Stabilité angulaire :

Etant donné que les systèmes de puissance recourent principalement aux machines synchrones pour la génération de puissance électrique, un aspect important est le fonctionnement de ces générateurs au synchronisme. La stabilité angulaire (ou stabilité d'angle rotorique) implique l'étude des oscillations électromécaniques inhérentes aux réseaux électriques (oscillations angulaires de quelques générateurs menant à la perte du synchronisme de ces derniers avec d'autres générateurs). Elle est définie comme étant la capacité d'un ensemble de machines synchrones interconnectées capables de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après avoir été soumis à une perturbation. [10]

L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques soit d'une machine et du reste du système ou d'un groupe de machines et du reste du système. Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme. Ce qui met en danger l'équilibre production- consommation du système. Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations ou de la stabilité transitoire : [11]

a) Stabilité angulaire aux petites perturbations :

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations. Cas d'une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement etc... [11] [10]

b) Stabilité transitoire :

La stabilité transitoire concerne la capacité du réseau à maintenir le synchronisme suite à une perturbation sévère comme un court-circuit, arrêt d'un générateur etc... La réponse du système comporte de grandes variations des angles rotoriques et est influencée par la relation non linéaire entre couples et angles.

I.7.1 .2 Stabilité de fréquence :

La stabilité de fréquence est la capacité d'un système électrique à maintenir sa fréquence à la suite d'une grave perturbation résultant en un déséquilibre significatif entre la production et la consommation. L'instabilité se manifeste sous la forme de variations de fréquence soutenues, menant au déclenchement de générateurs et/ou de charges.

I.7.1 .3 Stabilité de tension :

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds dans des conditions de fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension. Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations :

a) Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations :

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production etc...

b) Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations :

Elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit etc... Dans ce mémoire, nous nous intéressons seulement à la stabilité de tension. Une étude détaillée sera présentée dans la section suivante.

I.7.2 Causes de l'instabilité de la tension :

Les principaux facteurs qui contribuent à l'effondrement de la tension sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive. Autrement dit l'instabilité de la tension est attribuable à l'exploitation du réseau à sa limite de puissance transmissible maximale, et à l'insuffisance de dispositifs de compensation de la puissance réactive. [8]

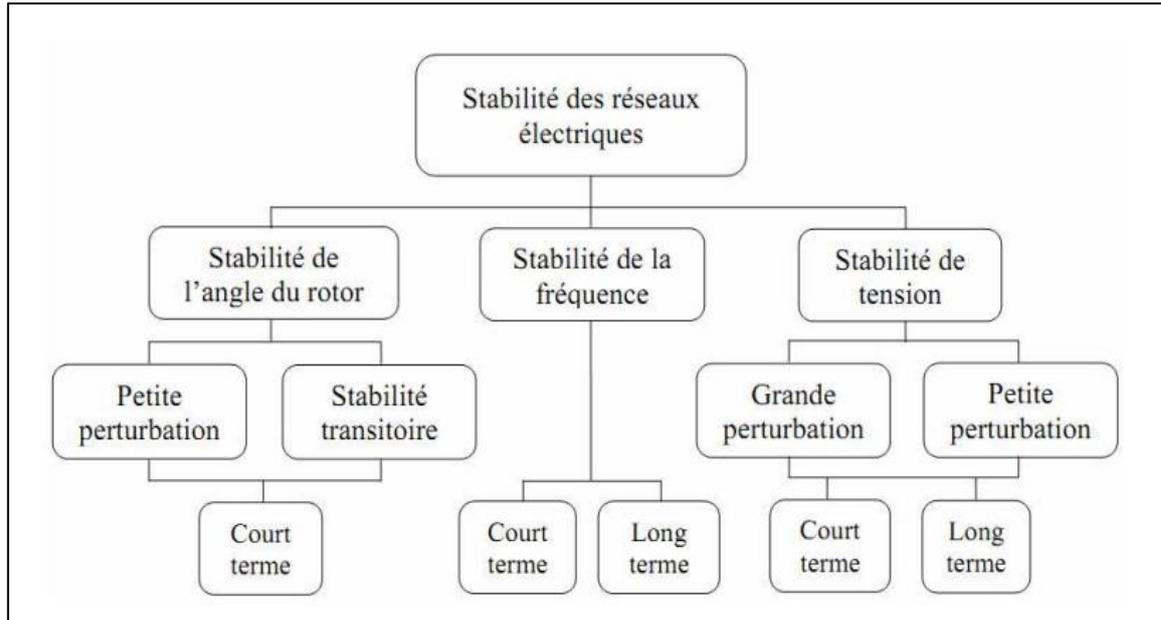


Figure I.12 : classification de la stabilité des réseaux électriques.

I.8 Réglages de tension :

La tension et la fréquence sont des paramètres très importants pour l'exploitation d'un système électrique. En effet, ces grandeurs sont les garants du bon fonctionnement de l'exploitation du réseau tant du point de vue du consommateur, dont certaines machines tournantes ou autres appareils (transformateurs, convertisseurs, etc.) sont dimensionnés pour des valeurs de fréquences ou de tensions fixes, que du point de vue de l'exploitation puisqu'un contrôle efficace de tension et de fréquence garanti une bonne qualité et bonne continuité de service. [12]

I.8.1 Méthodes d'amélioration de la stabilité de la tension :

La plupart de ces changements ont des effets significatifs sur la production, la consommation et la transmission de puissance réactive, ainsi sur la stabilité de tension. Par conséquent, des mesures peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité de tension, tels que :

- ❖ Un contrôle automatique des condensateurs shunts.
- ❖ Un blocage des régleurs en charge automatique.
- ❖ Une nouvelle répartition de la génération.
- ❖ Une re planification du fonctionnement des générateurs et des nœuds de commande.
- ❖ Une régulation de tension secondaire.
- ❖ Un plan de délestage. [13]

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction générale aux réseaux d'énergie électrique en décrivant leur structure et les composants nécessaires pour générer, transporter, distribuer et fournir de l'énergie électrique en commençant par une étude générale sur les réseaux, l'acheminement des puissances à travers ces réseaux.

De plus, nous avons présenté les profils des tensions et les différentes perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique ainsi la stabilité dans un réseau électrique. Le prochain chapitre sera entièrement consacré à l'étude détaillée de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique (Load Flow Analysis).

Chapitre II :
L'écoulement de
puissance et la
compensation de
l'énergie réactive

II. l'écoulement de puissance et la compensation de l'énergie réactive :

II.1 Introduction :

L'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques C'est une méthode permet d'évaluer toutes les grandeurs d'un réseau électrique représentées par les tensions aux nœuds, puissances injectées aux nœuds et celles transitant dans les lignes. Il est important de surveiller en temps réel ou de prévoir les surcharges, les sous-tensions et les surtensions pour éviter les pannes des lignes électriques et de l'électronique de puissance. Pour obtenir ces résultats, on résout des équations nodales d'équilibre de puissance en utilisant des techniques itératives non linéaires telles que Newton-Raphson, Gauss-Seidel et les méthodes de découplage rapide. Ces méthodes sont couramment utilisées pour résoudre ce problème.

La compensation de la puissance réactive est un aspect important de la gestion des réseaux électriques qui nécessite davantage de recherche et de développement pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie et la stabilité de réseau électrique. Les moyens de compensation de l'énergie réactive, tels que les condensateurs, permettent de réduire l'écoulement de puissance réactive et d'améliorer l'efficacité énergétique du système. Il est donc important de surveiller et de réguler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques pour garantir une fourniture d'énergie fiable et efficace.

II.2 Écoulement de puissance :

II.2.2 Concept général de l'écoulement de puissance :

L'écoulement de puissance implique le calcul des tensions complexes en régime permanent au niveau des nœuds du réseau électrique, à partir desquelles les transits de puissance active et réactive dans chaque ligne et transformateur peuvent être déterminés. Les équations qui représentent le réseau électrique sont non linéaires, mais les méthodes de calcul d'écoulement de puissance exploitent la configuration du réseau et les propriétés de ses équipements pour déterminer les tensions complexes au niveau de chaque nœud. En outre, il est important de noter que les systèmes triphasés du réseau électrique présentent une parfaite symétrie entre les trois phases.

II.2.3 But de l'étude de l'écoulement de puissance :

- ❖ Calcul des flux de courant.
- ❖ Calcul des pertes en ligne.
- ❖ Etablir une stratégie d'adaptation et de contrôle.
- ❖ Assurer l'équilibre entre la production et la demande d'énergie électrique (L'amélioration de Dépense de l'électricité, production d'énergie selon de besoin).
- ❖ Ne pas dépasser les valeurs limites (la stabilité théorique, selon bon la durée d'utilisation).
- ❖ Planification de réseau (à partir de calcul de la charge). Augmenter la sécurité de Fonctionnement des réseaux par une bonne stratégie d'EP avant les perturbations.

II.2.4 Classification des nœuds :

Chaque nœud est défini par quatre variables : P_i , Q_i , V_i et δ_i . En connaissant deux de ces variables, nous pouvons déterminer les deux autres en utilisant les équations principales de l'écoulement de puissance. Cependant, en pratique, le problème est abordé différemment en classifiant les nœuds du système comme suit :

II.2.4.1 Nœud de charge (PQ) :

Les charges sont généralement associées à ce type de nœuds et sont définies par leur consommation de puissances active et réactive. Des générateurs avec des puissances active et réactive fixes peuvent également être associés. Les variables à calculer sont le module et la phase de la tension.

II.2.4.2 Nœud générateur (PV) :

Ce type est directement relié à une source d'énergie réactive ou à un générateur. La puissance active et la tension sont connues. La production d'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures, $Q_{gi_{min}}$ et $Q_{gi_{max}}$ respectivement. Si l'une de ces limites est atteinte, la puissance réactive est fixée à cette limite et la tension est libérée, transformant ainsi le nœud en un nœud de charge (PQ).

II.2.4.3 Accès bilan (V- δ) :

Ce type de nœud est directement relié à un générateur relativement puissant et est pris en compte dans le calcul de l'écoulement de puissance pour compenser les pertes actives et assurer l'équilibre entre la demande et la production de puissance active. L'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus.

Type de nœud	Grandeurs spécifiées	Grandeurs recherchées
Noeud de charge	P, Q	$ V , \delta$
Noeud générateur	P, V	Q, δ
Noeud bilan	$ V , \delta$	P, Q

Tableau II.1 Tableau représente la classification des nœuds.

II.2.5 Classification des variables de l'écoulement de puissance :

On peut résumer toutes les grandeurs électriques qui participent à déterminer l'état électrique de réseau en quatre variables : la puissance active (P), la puissance réactive (Q), le module de tension et l'angle δ . La distinction entre ces différentes variables est dû à leurs natures.[14]

II.2.5.1 Les variables de perturbation ou non contrôlables :

Parmi les variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande (Charge) PD et QD qu'elles ne sont pas contrôlables car elles dépendent seulement des abonnés de la puissance. Les variables de perturbation avec cette définition constituent les composantes du vecteur de perturbateur y.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ y_{n+1} \\ y_{n+2} \\ \vdots \\ y_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ \vdots \\ P_{Dn} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \\ \vdots \\ Q_{Dn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

II.2.5.2 Les variables contrôlables (de contrôle et d'état) :

Les variables contrôlables peuvent être regrouper en deux catégories : les variables de contrôle et les variables d'état.

II.2.5.2.1 Variables d'état :

Ce sont l'amplitude $|V_i|$ et l'angle δ_i des tensions au niveau des jeux de barres i ($i = 1 \dots n$), elles sont qualifiées de variables d'état, suite à leur valeur déterminant l'état de réseau. Ces variables à déterminer sont représentées par le vecteur d'état X.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ X_{n+1} \\ X_{n+2} \\ \vdots \\ X_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \\ |V_1| \\ |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

II.2.5.2 Variables de contrôle :

Les puissances générées à savoir PG ou QG (actives ou réactives) sont des variables de contrôle représentées par le vecteur de contrôle U.

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \\ U_{n+1} \\ U_{n+2} \\ \vdots \\ U_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ \vdots \\ P_{Gn} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \\ \vdots \\ Q_{Gn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

II.2.6 Equations d'écoulement de puissance :

II.2.6.1 Formation de la matrice admittance :

On utilise des équations de courant obtenues dans les nœuds pour déterminer cette matrice.

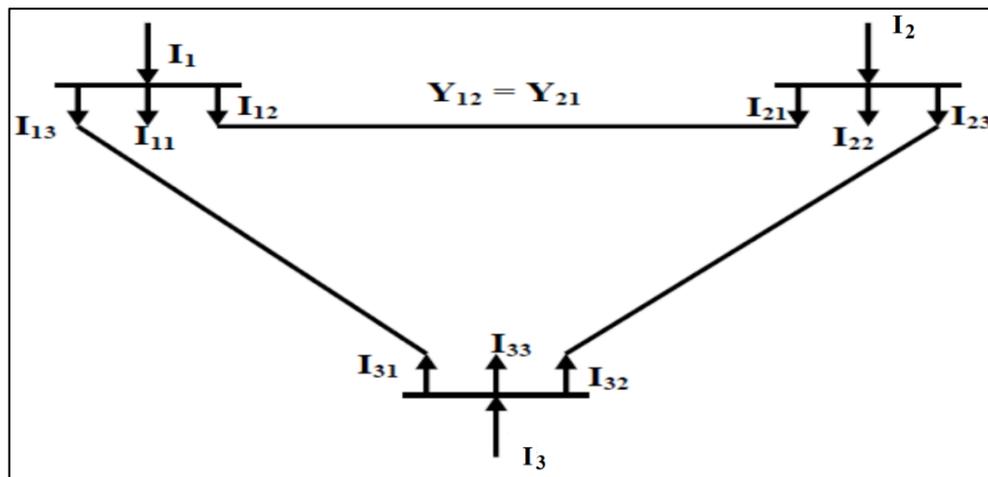


Figure II.1 : Système à 3 nœuds.

D'après le Théorème de Kirchhoff dans les trois jeux de barre, on obtient les équations suivantes Au nœud 1 :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11} + I_{12} + I_{13} \\ I_1 &= V_1 y_{11} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} \\ I_1 &= V_1 (y_{11} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y_{12} - V_3 y_{13} \\ I_1 &= V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} + V_3 Y_{13} \end{aligned}$$

Ainsi on obtient les éléments de la matrice admittance.

Y_{11} : admittance de charge shunt 'pau nœud 1 .

$$Y_{11} = y_{11} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{12} = -y_{12} , \quad Y_{13} = -y_{13} ,$$

Les équations finales sont :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} + V_3 Y_{13} \\ I_2 &= V_1 Y_{21} + V_2 Y_{22} + V_3 Y_{23} \\ I_3 &= V_1 Y_{31} + V_2 Y_{32} + V_3 Y_{33} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.4})$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

En général, on peut écrire :

$$I_{\text{bus}} = Y_{\text{bus}} V_{\text{bus}} \quad (\text{II.6})$$

I_{bus} : Vecteur des courants injectés.

Y_{bus} : Matrice admittance.

V_{bus} : Vecteur des tensions.

II.2.6.2 Formulation des équations de tension :

D'après l'équation (II.6) :

$$I_i = Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} Y_{ij} V_j \quad (\text{II.7})$$

$$\text{On a aussi :} \quad P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (\text{II.8})$$

$$I_i = \frac{p_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant (II.7) dans (II.9), on obtient :

$$\frac{P_i - Q_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \quad (\text{II.10})$$

Donc :

$$Y_{ii} V_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \quad (\text{II.11})$$

On peut déduire :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \right] \quad (\text{II.12})$$

II.2.6.3 Formulation des équations d'écoulement de puissance :

En utilisant les mêmes étapes avec l'équation de tension. On obtient l'équation d'écoulement de puissance :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \quad (\text{II.13})$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left[Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \right] \quad (\text{II.14})$$

Où :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| e^{-j\theta_{ii}}, Y_{ij} = |Y_{ij}| e^{-j\theta_{ij}}$$

$$V_i^* = |V_i| e^{-j\delta_i}, V_i = |V_i| e^{j\delta_i}, V_j = |V_j| e^{j\delta_j},$$

Nous aurons :

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| e^{-j\theta_{ii}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| e^{-j(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)} \quad (\text{II.15})$$

Finalement :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.16})$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.17})$$

II.2.6.4 Formulation de l'équation des pertes en puissance active :

On a l'équation (I.18)

$$P_{\text{loss}_{ij}} = P_{ij} + P_{ji} \quad (\text{II.18})$$

Où :

$$P_{ji} = |V_j|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad (\text{II.19})$$

$$P_{ij} = |V_i|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.20})$$

Et à partir de là nous avons :

$$P_{\text{Loss}} = \left[2|V_{ij}| |V_j| \cos (\delta_i - \delta_j) + |V_i|^2 + |V_j|^2 \right] |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} \quad (\text{II.20})$$

Nous avons aussi:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

$$G_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij}$$

$$B_{ij} = |Y_{ij}| \sin \theta_{ij}$$

Donc :

$$P_{\text{Loss}_{ij}} = G_{ij} \left[2|V_i| |V_j| \cos (\delta_i - \delta_j) + |V_i|^2 + |V_j|^2 \right] \quad (\text{II.22})$$

II.2.6.5 Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive :

On a:

$$Q_{\text{loss}_{ij}} = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (\text{II.23})$$

Où :

$$Q_{ji} = -|V_j|^2 |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad (\text{II.24})$$

$$Q_{ij} = -|V_i|^2 |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.25})$$

Finalement :

$$Q_{\text{Loss}_{ij}} = (-|V_i|^2 - |V_j|^2) B_{ij} - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \left[\sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + \sin (\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \right] \quad (\text{II.26})$$

II.2.7 Méthodes de Résolution du problème de l'écoulement de puissance :

Pour résoudre les équations d'écoulement de puissances. On utilise plusieurs méthodes :

La Méthode de GAUSS-SEIDEL.

La Méthode de NEWTON-RAPHSON.

La Méthode DECOUPLEE DE NEWTON.

La Méthode DECOUPLEE RAPIDE DE NEWTON.

Dans ce chapitre, nous expliquons la Méthode de NEWTON-RAPHSON.

II.2.7.1 Méthode de Newton – Raphson :

Cette méthode consiste à résoudre de manière répétée un système d'équations linéaires, qui est une approximation linéaire du système d'équations non linéaires original décrit par les expressions (II. 16) et (II.17). Cette approximation est obtenue en développant les expressions (II.16) et (II.17) en série de Taylor, ce qui conduit à la formulation d'un système linéaire. Les deux équations permettant de calculer P et Q avec deux inconnus δ et $|V|$. [14]

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \Delta |V_j| \tag{II.27}$$

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \Delta |V_j| \tag{II.28}$$

Les ΔP_i et ΔQ_i représentent physiquement l'écart entre les valeurs spécifiées et celles calculées pour les puissances actives $P_{spéc}$ et réactives $Q_{spéc}$. Ces dernières peuvent être calculées de la manière suivante :

$$\Delta p_i = P_{spéc} - P_{calc}$$

$$\Delta Q_i = Q_{spéc} - Q_{calc}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \tag{II.29}$$

Avec :

$$|j_1| = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \tag{II.30}$$

$$|j_2| = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \tag{II.31}$$

$$|j_3| = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$|j_4| = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

II.2.7.1.1 Calcul des éléments du Jacobien :

Eléments de J1 :

Les éléments diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.34})$$

Les éléments non diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (\text{II.35})$$

Le Jacobien J2 :

Les éléments non diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.36})$$

Les éléments diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.37})$$

Eléments de J3

Les éléments non diagonaux :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (\text{II.38})$$

Les éléments diagonaux

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.39})$$

Le Jacobien J4 :

Les éléments non diagonaux :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (\text{II.40})$$

Les éléments diagonaux :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.41})$$

II.2.7.1.2 Le passage d'une itération vers l'autre se fait à partir des ajustements suivants :

$$\begin{Bmatrix} \delta \\ V \end{Bmatrix}^{k+1} = \begin{Bmatrix} \delta \\ V \end{Bmatrix}^k + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1(k)} \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (II.42)$$

$$\begin{cases} |V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i|^{(k)} \\ \delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \end{cases} i = 1 \quad (II.43)$$

II.2.7.1.3 Organigramme de la méthode de Newton-Raphson :

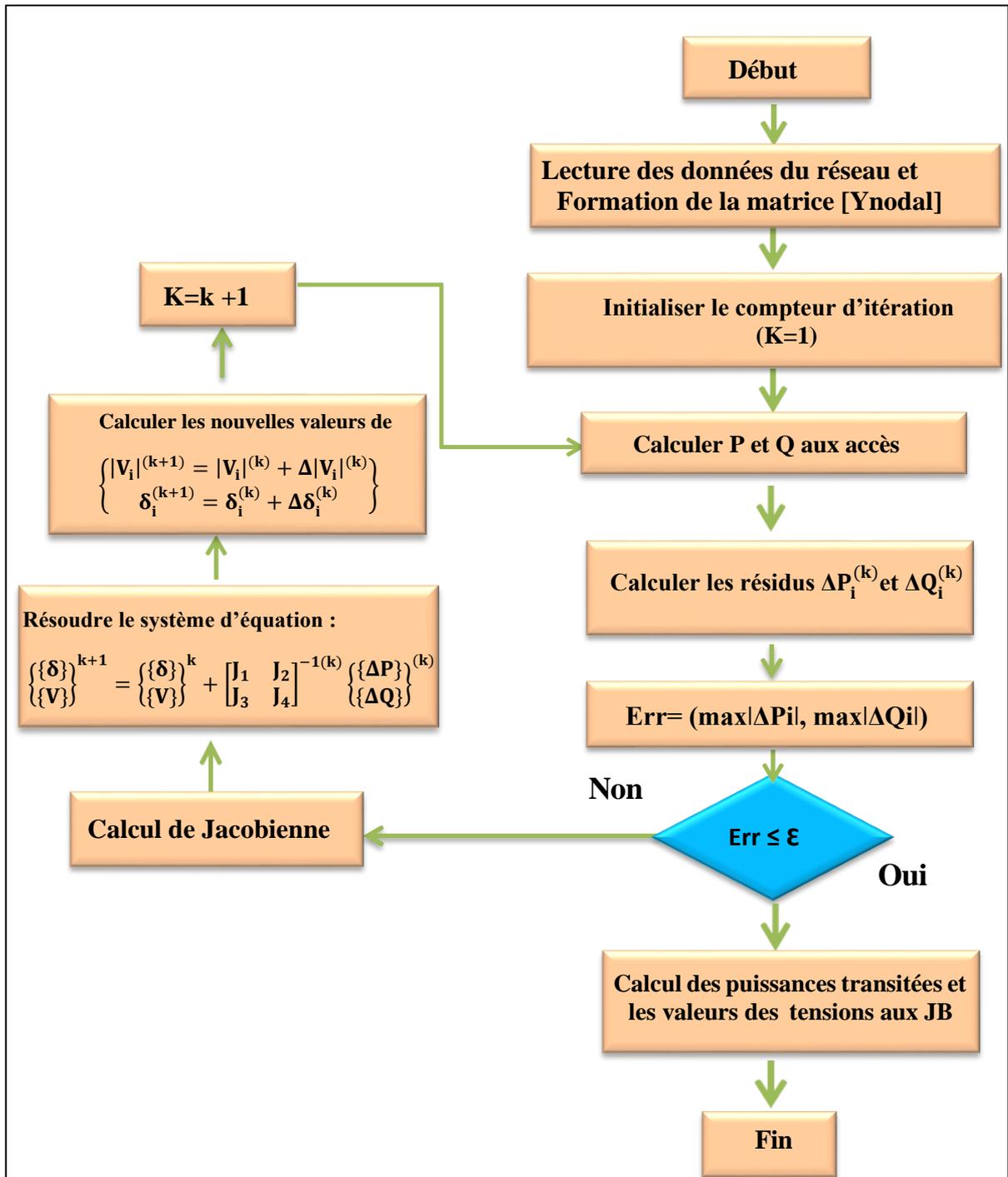


Figure II.2 : organigramme de la méthode de newton raphson.

II.3 Puissances et facteur de puissance :

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de Courant alternatif par des réseaux en haute, moyenne et basse tension. Cette énergie se décompose en deux formes d'énergie.

- ❖ Active transformée en chaleur tel que l'éclairage, le chauffage... Représente la partie de la puissance électrique qui est réellement utilisée pour effectuer le travail.
- ❖ Réactive transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs Electromagnétiques qui est nécessaire pour alimenter les Equipement électrique comme les moteur les transformateurs et les convertisseurs statiques.

II.3.1 Le facteur de puissance électrique (FP) :

Est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Un mauvais facteur de puissance et une circulation d'énergie réactive peuvent entraîner une inefficacité énergétique, une augmentation des pertes d'énergie et une surcharge du réseau électrique. En revanche, un bon facteur de puissance permet de maximiser l'efficacité énergétique, de réduire les coûts d'énergie et d'optimiser l'utilisation des équipements électriques.

II.3.2 L'énergie réactive consommée :

L'énergie réactive est une forme spéciale de puissance utilisée par les réseaux et les installations électriques qui possèdent une capacité. Cette énergie est transformée par les équipements électriques pour créer des champs électromagnétiques nécessaires à leur fonctionnement. Les câbles et les lignes peuvent également consommer ou produire de l'énergie réactive en fonction de leur charge, ce qui peut avoir un impact négatif sur le réseau. L'unité de mesure de l'énergie réactive est le var. En somme, l'énergie réactive est une énergie non productive qui peut entraîner des coûts supplémentaires pour les consommateurs d'électricité.

II.3.3 Importance de la puissance réactive :

La puissance réactive est importante dans les systèmes électriques car elle joue un rôle crucial dans la transmission de l'électricité et la stabilité et l'équilibre du réseau. L'influence de l'énergie réactive sur le réseau :

- ❖ Chute de tension et pertes supplémentaire dans les lignes transformateur...
- ❖ La fluctuation de la puissance réactive dans le système de production est intimement liée aux variations de tension du réseau.

II.3.4 Bilan de la puissance réactive :

L'expression suivante nous donne le bilan énergétique [15] :

$$\sum_{i=1}^n Q_i(t) = \sum_{i=1}^n Q_{gi}(t) - \sum_{i=1}^n Q_{Li}(t) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \Delta Q_{ij}(t) \quad (\text{II-44})$$

Avec :

n : le nombre des nœuds du réseau.

m : le nombre des éléments du réseau.

$Q_i(t)$: la puissance réactive injectée au nœud « i ».

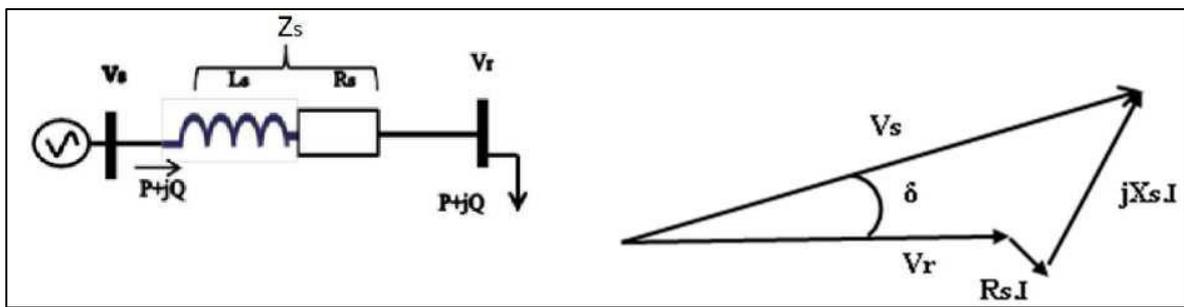
$Q_{gi}(t)$: la puissance réactive produite par les générateurs de nœud « i ».

$Q_{Li}(t)$: la puissance réactive consommée par les charges reliées au nœud « i ».

$\Delta Q_{ij}(t)$: Les pertes réactive dans l'élément « i- j » du réseau.

II.3.5 Puissance transmise par une ligne électrique :

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de l'angle de charge. La figure (II-3) représente une ligne électrique alimentant une charge (P + jQ).[16]



(a) schéma unifilaire.

(b) diagramme des tensions.

Figure II.3 : Réseau électrique alimentant une charge.

En prenant la tension aux bornes de la charge comme référence des phases (figure (II.3.b)) et en négligeant la résistance R_s , La puissance apparente demandée par la charge sera donnée par l'équation (II.45) :

$$S = P + jQ = V_r I^* \quad (\text{II.45})$$

Avec: $I = \frac{V_s - V_r}{Z_s}$

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X_s} \cdot \sin(\delta) \quad (\text{II.46})$$

Avec : $\delta = \delta_s - \delta_r$

$$Q = \frac{V_s \cdot V_r}{X_s} \cdot \cos(\delta) - \left(\frac{V_r^2}{X_s}\right) \quad (\text{II.47})$$

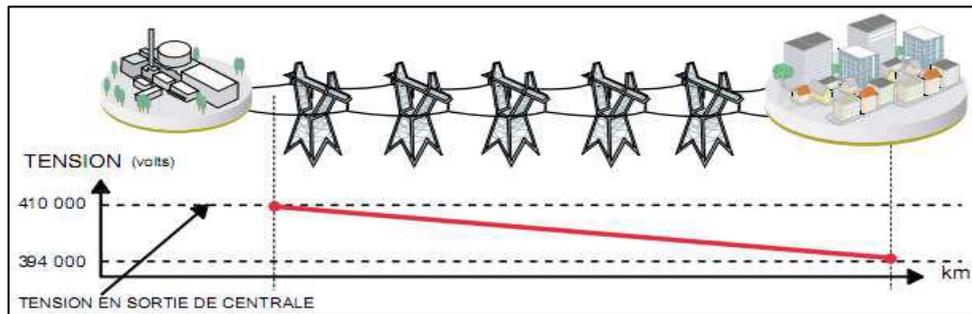


Figure II.4 : Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

La relation entre la tension au jeu de barres de charge et le courant de charge I est décrite par la droite de la figure (II.4) appelée ligne de charge du système qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par V_s et de pente $(-Z_s)$:

$$V_s - V_r = Z_s \cdot I \quad \Rightarrow \quad V_r = -Z_s \cdot I + V_s$$

On peut démontrer facilement le besoin du maintien de la tension aux bornes de la charge pour permettre un maximum de puissance à transmettre.

Si la charge varie et aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension.

V_r Égale à V_s alors depuis le diagramme de phase de la figure (II.3 b) :

$$V_r = V_s \cos(\delta) \tag{II.48}$$

En remplaçant (II.48) dans (II.46) en aura :

$$P = \frac{V_s^2}{X_s} \sin(\delta) \cos(\delta) \tag{II.49}$$

Dans ce cas en ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle égale à :

$$\delta = 45^\circ$$

$$P_{\max} = \frac{V_s^2}{2X_s}$$

Dans le cas où on maintient la tension V_r égale à V_s on peut avoir, depuis

L'équation (II.46), une puissance maximale :

$$P_{\max} = \frac{V_s^2}{X_s}$$

II.4 Compensation d'énergie réactive :

Les réseaux électriques à pour but de véhiculer de la puissance depuis la source jusqu'aux centres de consommation dans un réseau à courant alternatif. La puissance apparente S à deux composantes la puissance active P et la puissance réactive Q :

$$S = P + jQ = UI (\cos\delta + j \sin\delta) \quad (\text{II.50})$$

En général, l'écart de tension entre deux extrémités d'une ligne est lié au transit de la puissance réactive consommée par la charge. Pour obtenir une tension identique (ou proche) aux deux bouts de la ligne, il faut donc pouvoir produire localement de la puissance réactive.[16]

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{RP + XQ}{V^2} \quad (\text{II.51})$$

La présence des moyens de production d'énergie réactive (alternateurs, bancs de condensateurs ou compensateurs statiques) à proximité des zones de consommation contribuent donc à maintenir la tension constante sur le réseau.

(Figure II.5). Il est à noter que les solutions peuvent reposer sur des moyens de compensation de puissance réactive statiques (bancs de condensateurs, bancs de bobines) ou dynamiques (alternateurs).

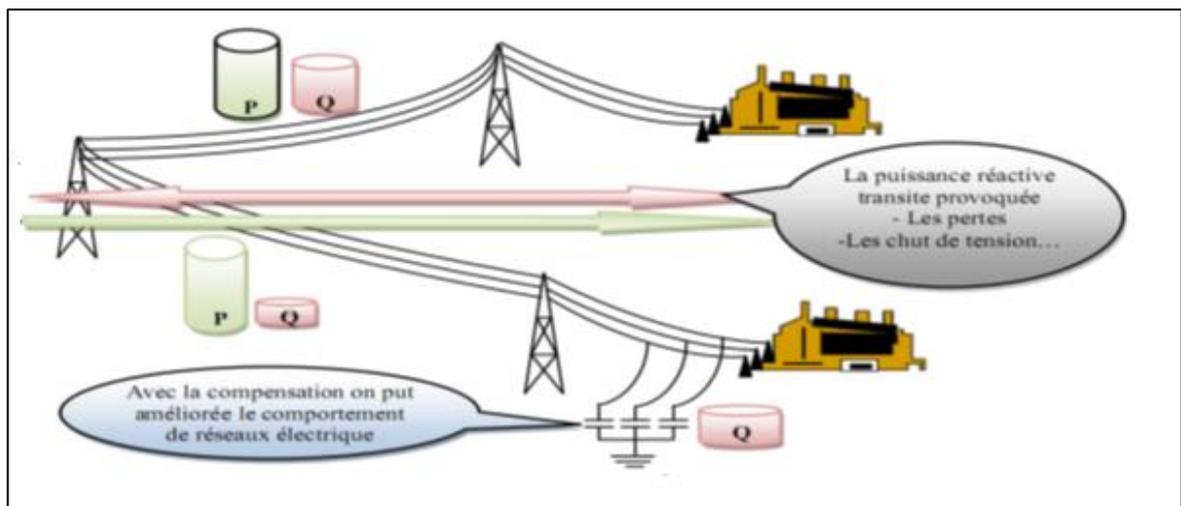


Figure II.5 : Intérêt de la compensation dans l'échange d'énergie électrique.

II.4.1 Principe général de la compensation :

Le principe de compensation avec des condensateurs peut être représenté par (La figure II.6) illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le condensateur.

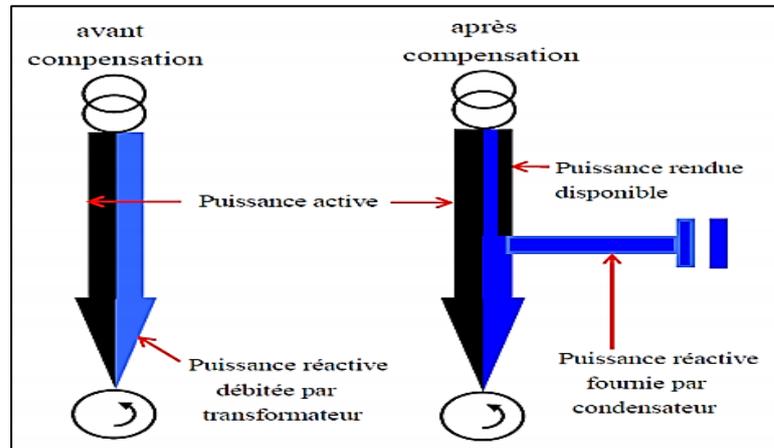


Figure II.6 : principe de la compensation de la puissance réactive.

II.4.2 Objectif de la compensation de la puissance réactive :

- ❖ Réduire les fluctuations de tension et les phénomènes de flicker.
- ❖ Améliorer le facteur de puissance $\cos(\varphi)$.
- ❖ Équilibrer les charges asymétriques.
- ❖ Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- ❖ Réduction des pertes actives totales.
- ❖ Maîtriser la répartition et les transits des puissances. [14]

II.4.4 Moyens de compensation de la puissance réactive :

Il y a plusieurs sources qui sont capables de produire de l'énergie réactive, ce qui permet de les utiliser comme des moyens de compensation d'énergie réactive et peut les classer comme suit :

- ❖ Les compensateurs rotatifs : qui sont les moteurs synchrones.
- ❖ Les compensateurs statiques : qui sont les batteries de condensateurs et les dispositifs FACTS.

II.4.4.1 Les batteries de condensateurs :

Les batteries de condensateurs représentent la méthode la plus abordable et simple pour la production de l'énergie réactive dans les environnements industriels et les réseaux publics. Bien que les moteurs synchrones puissent fournir de l'énergie réactive, leur objectif principal est de

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

- ❖ Les batteries de condensateurs HT sont connectées aux jeux de barres HT des postes THT/HT et sont principalement utilisées pour compenser les pertes réactives dans les réseaux HT et THT.
- ❖ Les batteries de condensateurs MT sont connectées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT et sont utilisées pour compenser l'appel global d'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Ces batteries sont dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension et sont utilisées pour maintenir une tension stable et éviter les perturbations dans le réseau électrique.

Les condensateurs peuvent être placés à trois niveaux différents dans un système électrique. La compensation globale, Compensation partielle ou par secteur et Compensation individuelle .et peuvent être installés en série ou en shunt.

II.4.4.2 Les inductances :

Sont utilisés pour compenser l'énergie réactive fournie par les lignes à très haute tension ou par les câbles en heures creuses. Elles agissent comme des réactances inductives, qui consomment de l'énergie réactive et compensent la consommation d'énergie réactive des charges.

Peuvent être directement raccordées au réseau électrique ou branchées sur les tertiaires des transformateurs. Elles permettent de limiter les surtensions dans le réseau électrique en absorbant l'énergie réactive en excès et d'éviter les perturbations dans le réseau électrique.

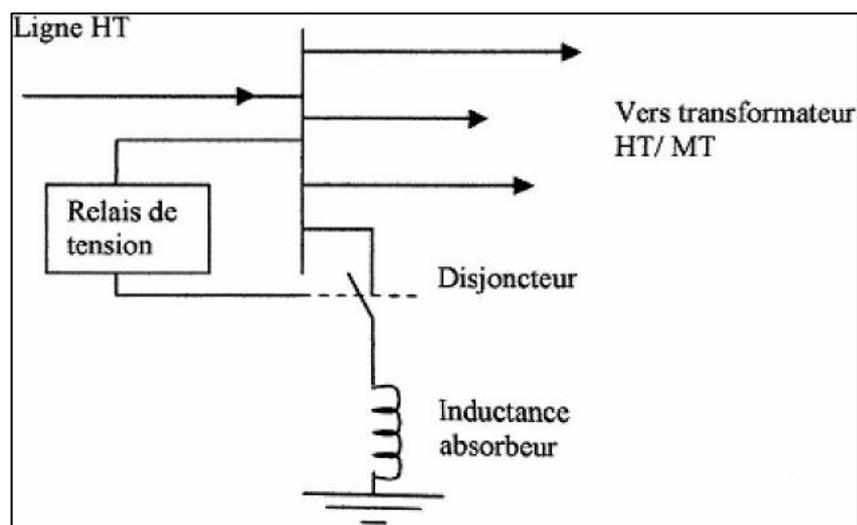


Figure II.7 : Schéma de montage d'un absorbeur sur jeu de barres HT.

II.4.4.3 Groupes thermiques et hydrauliques :

Jouent un rôle crucial dans la régulation de la tension et la compensation d'énergie réactive, en agissant comme des sources de tension à partir de l'alternateur. De plus, ils sont capables d'échanger des quantités importantes d'énergie réactive avec le réseau et offrent de bonnes performances dynamiques. Bien adaptés pour satisfaire les besoins en compensation d'énergie réactive sur les réseaux de transport, il convient toutefois de noter que leur capacité à compenser partiellement les charges réactives est limitée par les pertes importantes de tension créées lors du transit d'énergie réactive sur ces mêmes réseaux.

II.4.4.4 Les compensateurs synchrones :

Le compensateur synchrone est une machine synchrone fonctionnant en moteur à vide. Ses fonctionnements en régime surexcité ou sous-excité lui permettent respectivement de fournir ou d'absorber l'énergie réactive. Comme il n'entraîne aucune charge, le compensateur synchrone n'absorbe pratiquement aucune puissance active. Cette méthode permet de contribuer au contrôle et à la stabilité de la tension.

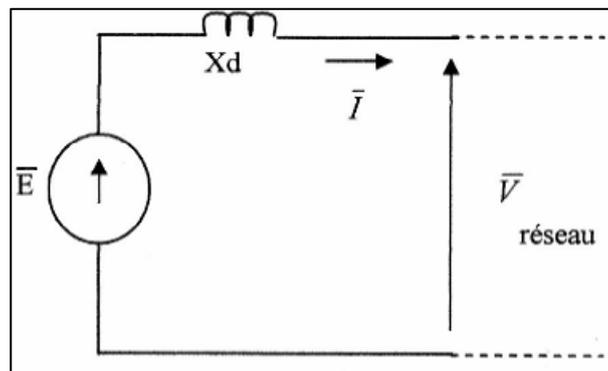


Figure II.8 : Schéma équivalent de la machine synchrone.

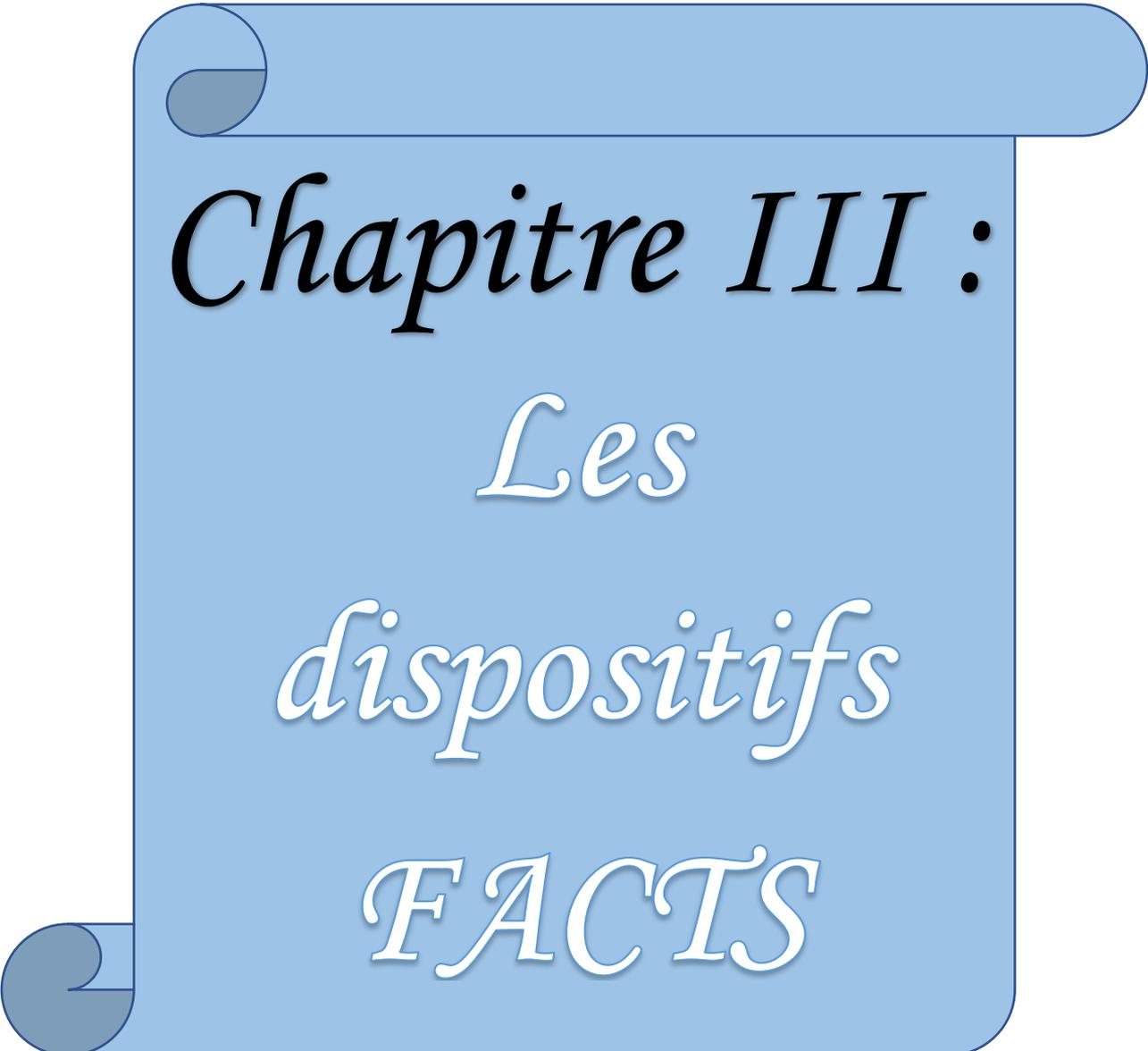
II.4.4.5 les dispositifs FACTS :

Les compensateurs statiques de puissance réactive FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) sont des dispositifs plus récents qui associent des bancs de condensateurs et de bobines à des convertisseurs d'électronique de puissance permettant de régler la puissance réactive délivrée et ainsi la tension du nœud de connexion. Ces appareils ont un temps de réponse très court, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.[16]

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre. Nous avons également construit la matrice d'admittance nodale du réseau et présenté le concept général, l'objectif et le problème de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique et classification des variables de l'écoulement. Enfin nous mentionner l'Importance de la puissance réactive, Objectif de la compensation et les moyens de compensation de la puissance réactive.

L'étude de l'écoulement de puissance est essentielle pour obtenir tous les paramètres du réseau électrique pour chaque nœud, tels que la puissance active et réactive et Module, Angle de la tension. Nous avons choisi la méthode de Newton-Raphson pour résoudre ce problème et avons présenté son principe, ses étapes et son algorithme.



Chapitre III :

Les

dispositifs

FACTS

III. Les dispositifs FACTS :**III.1 Introduction :**

Le concept FACTS, introduit en 1986 par EPRI regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO. Les FACTS peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides, ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques. [17]

La classification des FACTS en termes « rapide » et « statique » a besoin d'une certaine explication. Le terme « rapide » est employé pour exprimer la contrôlabilité rapide des FACTS fournis par l'électronique de puissance. C'est l'un des facteurs principaux de différenciation des dispositifs conventionnels. Le terme « statique » signifie que les dispositifs n'ont aucune pièce mobile comme les commutateurs mécaniques pour exécuter la contrôlabilité rapide. [18]

III.2 Définition des dispositif FACTS :

Les dispositifs FACTS sont utilisés pour contrôler dynamiquement la tension, l'impédance et l'angle de phase de la tension pour améliorer les performances dynamiques des réseaux et optimiser la distribution et le flux de puissance dans les réseaux. Grâce à leur technologie d'interrupteur statique, ils sont plus rapides que les systèmes électromécaniques traditionnels. Ils peuvent également réguler le flux de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité de transport efficace tout en maintenant ou en améliorant la stabilité des réseaux. Selon l'IEEE, les FACTS sont définis comme suit :

Ce sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance.

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories :

- ❖ Les compensateurs parallèles.
- ❖ Les compensateurs séries.
- ❖ Les compensateurs hybrides (série – parallèle).

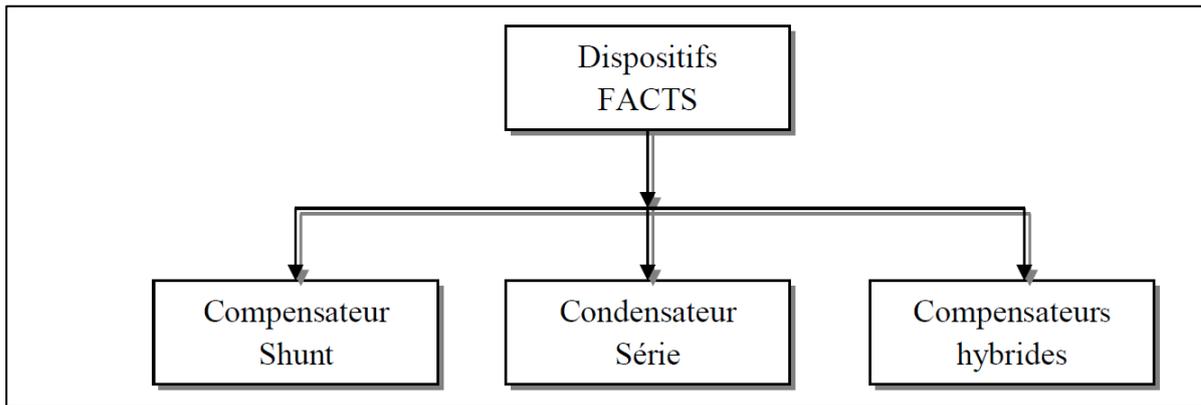


Figure III.1 : Catégories des FACTS.

III.2.1 Dispositifs FACTS Shunt :

III.2.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (Static Var Compensator- SVC) :

Un générateur statique d'énergie réactive est un dispositif shunt qui ajuste sa sortie en courant capacitif ou inductif pour contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, tels que la tension des nœuds. Les sous-ensembles du SVC sont :

- ❖ Inductance Contrôlée par Thyristors (Thyristor Controlled Reactor-TCR).
- ❖ Condensateur Commuté par Thyristors (Thyristor-Switched Capacitor- TSC).
- ❖ inductance Commutée par Thyristors (Thyristor-Switched Reactor-TSR).

III.2.2 Dispositifs FACTS séries :

La compensation série est une technique utilisée dans les systèmes énergétiques pour contrôler le flux d'énergie en régime permanent. Elle peut aider à soulager les surcharges sur les lignes parallèles en cas de lignes de transport ayant une capacité thermique suffisante.

III.2.2.1 Condensateur Série Contrôlé par Thyristors (Thyristor Controlled Series Capacitor- TCSC) :

Un compensateur à réactance capacitif est un dispositif composé d'une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par des thyristors. Il permet une variation homogène de la réactance capacitif.

III.2.2.2 Compensateurs hybrides (série-série et shunt-série) :

Il s'agit d'une combinaison de dispositifs séries et shunts qui sont commandés de manière coordonnée pour effectuer un contrôle prédéfini. Ils peuvent agir sur la tension, l'impédance et l'angle de déphasage pour contrôler le transit de puissance sur une ligne de transport.

Un des compensateurs hybrides les plus connus sont les :

- ❖ UPFC : Contrôleur universel de flux de puissance, (Unified Power Flow Controller).
- ❖ TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator).

III.3 Classification des dispositifs FACTS :

Depuis l'apparition des premiers compensateurs, il y a eu trois générations de dispositifs FACTS. Ces générations se différencient par les technologies de semi-conducteurs et les éléments de puissance qu'elles utilisent.

III.3.1 Première génération :

La première génération de dispositifs FACTS utilise des thyristors classiques. Ces thyristors sont généralement utilisés pour activer ou désactiver les composants afin de fournir ou d'absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

III.3.2 Deuxième génération :

La génération avancée de dispositifs FACTS est apparue avec l'introduction de semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, tels que les thyristors GTO. Ces éléments sont assemblés pour former des convertisseurs de tension ou de courant qui peuvent injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

III.3.3 Troisième génération :

La troisième génération de dispositifs FACTS utilise des composants hybrides et est conçue pour s'adapter à chaque situation. Contrairement aux deux premières générations, elle n'a pas besoin de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour se connecter au réseau.

III.4 Les systèmes FACTS les plus utilisés :

III.4.1 SATCOM, SVC : sont des dispositifs connectés en parallèle au réseau électrique. Ils se composent principalement d'un condensateur en parallèle avec une bobine, qui est en série avec deux thyristors montés en tête-bêche pour assurer une variation régulière de la réactance capacitive. Leur fonction est de générer ou d'absorber de l'énergie réactive pour maintenir la

tension à un niveau cible. En effet, en ajustant la valeur de l'énergie réactive, on peut réduire la chute de tension dans une ligne électrique.

III.4.2 TCSC : sont des dispositifs installés en série avec une ligne électrique. Ils peuvent être utilisés comme une impédance variable pour influencer l'admittance de la ligne et donc son impédance. Ce changement affecte directement la puissance transmise dans cette ligne. Les TCSC sont constitués des mêmes équipements que les compensateurs statiques (SVC).

III.4.3 UPFC : Ce dispositif combine les avantages de la compensation série et de la compensation parallèle. Au lieu de contrôler un seul paramètre, il permet de commander trois paramètres différents : La tension ; L'impédance de la ligne et Le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

III.5 Les différents types des systèmes FACTS :

La technologie FACTS regroupe une variété de dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui sont intégrés dans les réseaux électriques pour mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit des lignes. Grâce à leur capacité à contrôler rapidement les différents paramètres du réseau tels que la tension, l'impédance et le déphasage, ils peuvent améliorer les marges de stabilité et assurer une plus grande flexibilité dans le transfert d'énergie.

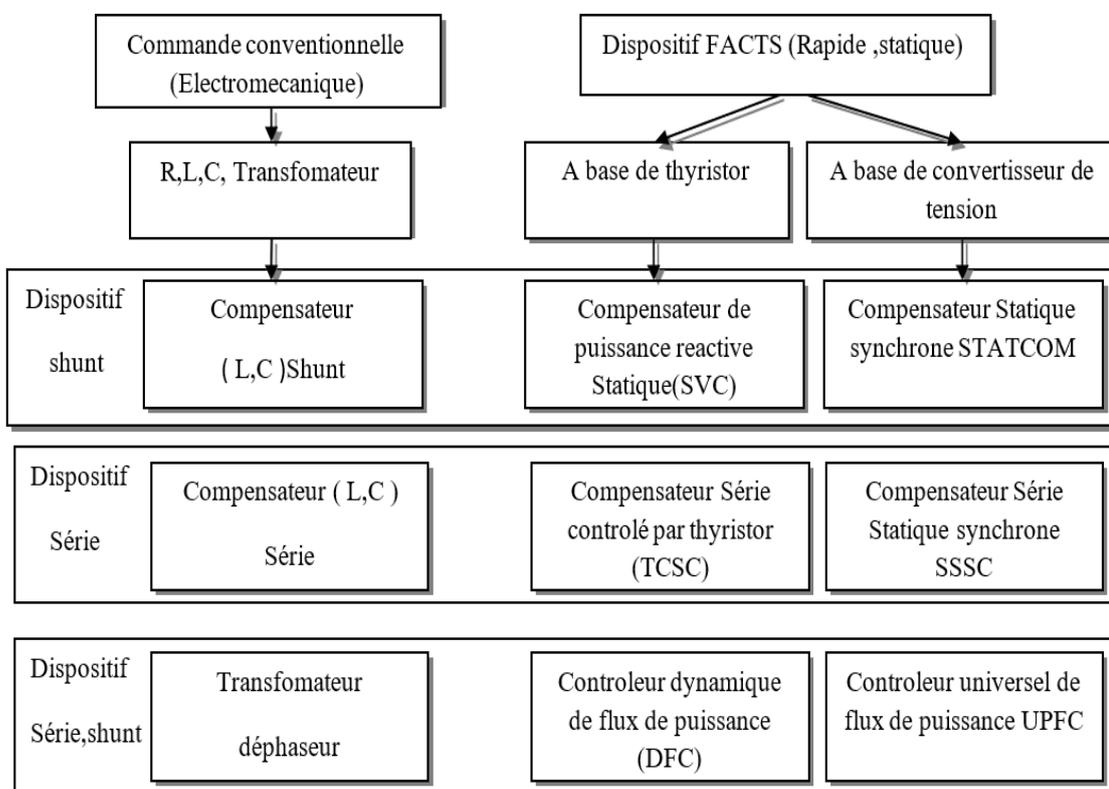


Figure III.2 : Les différents types des systèmes FACTS.

III.6 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :

Les dispositifs FACTS ont été intégrés dans les réseaux électriques depuis de nombreuses années et ont démontré leur efficacité. Les tableaux (III.1) et (III.2) présentent le rôle de chaque dispositif FACTS ainsi que leur capacité à contribuer à différentes applications dans les réseaux électriques.

III.6.1 Différentes des niveaux ascendants de contribution entre les FACTS :

Applications FACTS	Contrôle de Charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC, STATCOM	★	★★★	★	★★
TCSC	★★	★	★★★	★★
SSSC	★★★	★	★★★	★★
TCPAR	★★★	★★	★	★★
UPFC	★★★	★★★	★★★	★★★

Tableau III.1 : différentes applications dans les réseaux électriques.

Influence :

Petite → ★.

Moyenne → ★★★.

Forte → ★★★.

III.6.2 le rôle de chaque dispositif FACTS :

	Problème	Action à mener	Solutions Conventionnel	Dispositifs FACTS
Limite de la Tension	Chut ou sur - Tension	Fourniture où absorption de l'énergie réactive	Condensateurs séries et shunts	SVC STATCOM
Limites Thermiques	Surcharge Des lignes	Réduction des charges	Ajouter de nouvelles lignes	TCSC UPFC SVC
Courants de Boucles	Répartition de La Puissance transférée	Réajustement de La réactance de ligne	Ajouter des Condensateurs en série	TCSC UPFC SVC
Niveaux des Courts-circuits	Courant de Court-circuit Très élevé	Limitation du Courant de court-circuit	Ajouter des Condensateurs en série	TCSC UPFC
Résonances subsynchrones	Emballlement Des générateurs	Atténuation des oscillations	Compensation série	TCSC

Tableau III.2 : le rôle de chaque dispositif FACTS.

III.7 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (UPFC) :

UPFC (Unified Power Flow Controller) est la troisième génération FACTS, il constitue le premier dispositif FACTS et l'unique, qui a la capacité de contrôler simultanément chacun des trois paramètres clefs de l'écoulement de puissance.

L'UPFC est constitués de deux transformateur l'un est connecté en série et l'autre en shunt avec la ligne de transmission, chaque transformateur est connecté à un onduleur à base des thyristors GTO, ces derniers sont couplés à travers une liaison continue DC. Autrement dit, l'UPFC est la combinaison d'un STATCOM et un SSSC. Ils sont couplés à travers une liaison DC commune, pour permettre l'écoulement bidirectionnelle de la puissance active en effet,

l'énergie active peut circuler librement dans les deux directions entre les extrémités AC des deux convertisseurs pour générer ou absorber l'énergie réactive indépendamment.[19]

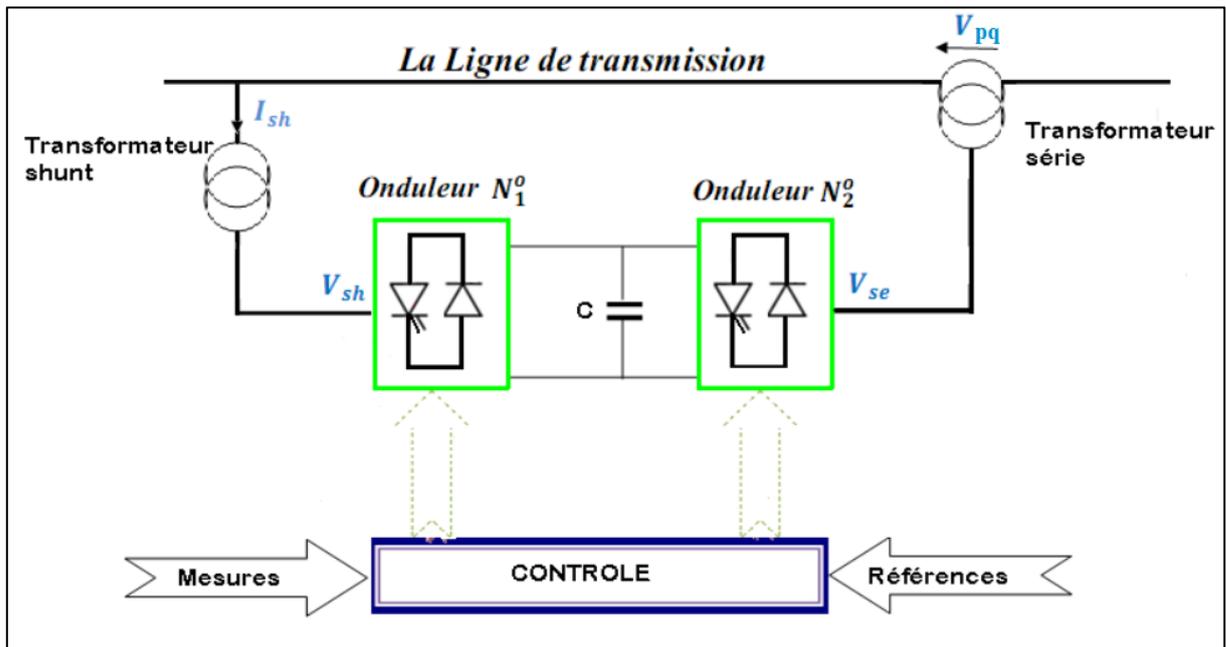


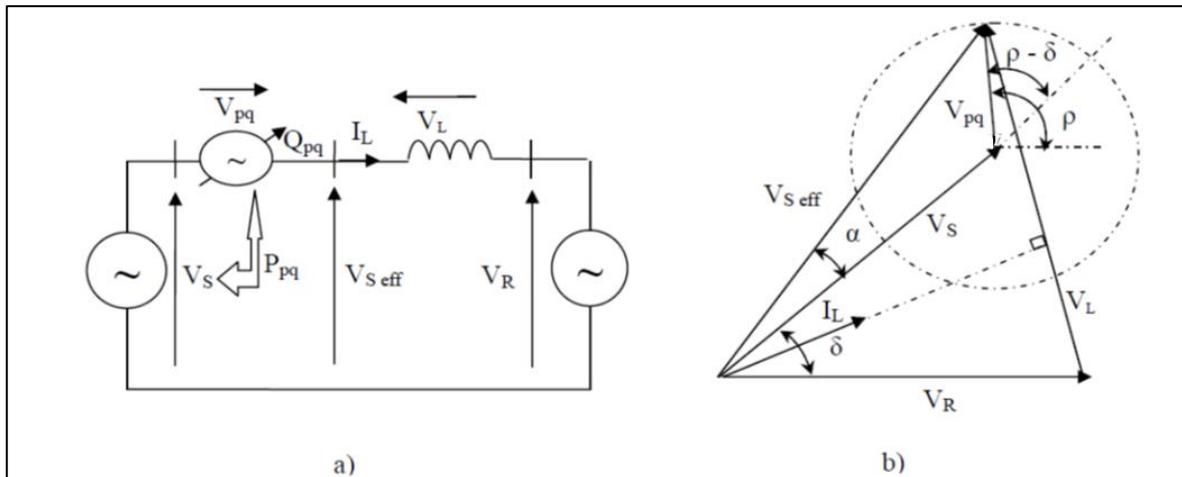
Figure III.3: Schéma de base de l'UPFC.

Dans la figure (III.3), l'onduleur-2- injecte la tension V_{pq} , qu'est contrôlable en amplitude et en phase, donc il peut réaliser la fonction de compensation série de la puissance active et réactive. D'autre part, l'onduleur-1- est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur-2-. Il sert aussi à compenser l'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. En effet, l'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de ligne. En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

L'UPFC est un type particulier des dispositifs FACTS dont les principales fonctions sont :

- ❖ Le réglage de la tension.
- ❖ L'amélioration des flux de puissances active et réactive.
- ❖ La limitation des courants de court-circuit.
- ❖ L'amortissement des oscillations de puissance.

- La figure suivante, montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R et un UPFC :



a) Circuit équivalent d'un réseau électrique b) Diagramme vectoriel associé.
Avec UPFC.

Figure III.4 : le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R et un UPFC.

D'après Le diagramme vectoriel de la figure précède. Nous permettons d'extraire les équations suivantes :

$$P = R\{V_R I_L^*\} \tag{III.1}$$

$$I_L = \frac{V_{S\text{eff}} - V_R}{jX_L} = \frac{V_S e^{j\delta} + V_{pq} e^{j\rho} - V_R}{jX_L} \tag{III.2}$$

A partir des deux équations (III.1) et (III.2), on peut calculer la puissance transmise :

$$P_R = \frac{V_S V_R}{X_L} \sin(\delta) + \frac{V_R V_{pq}}{X_L} \sin(\rho) = P_{R0}(\delta) + P_{pq}(\rho) \tag{III.3}$$

$$P_{R\text{min}} = P_{R0}(\delta) - \frac{V_R V_{pq\text{max}}}{X_L}(\rho) \text{ et } P_{R\text{max}} = P_{R0}(\delta) + \frac{V_R V_{pq\text{max}}}{X_L}(\rho) \tag{III.4}$$

De la même manière, on suppose dans ce cas, que la tension $V_S = V_R = V_{\text{base}}$, $X_L = X_{\text{base}}$ et $0 \leq \delta \leq \pi$ avec différentes valeurs de V_{pq} .

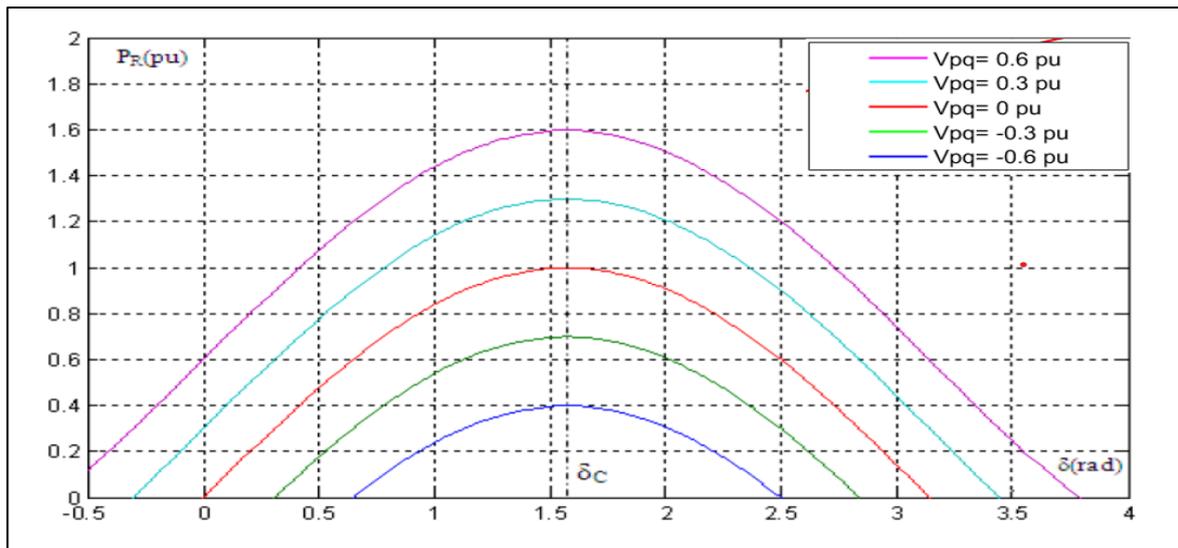


Figure III.5 : P_R en fonction de δ avec un UPFC et $\rho = 90^\circ$.

La figure précédente montre que lorsque l'angle (ρ) est égal à 90° , la tension injectée par l'UPFC a une influence maximale sur la puissance active transmise ($\delta_C = \pi/2$), qui dépend de la valeur de V_{pq} injectée. La puissance maximale augmente avec l'augmentation de V_{pq} et diminue avec sa diminution.

III.7.1 Les avantages et les inconvénients :

III.7.1.1 -les avantages :

- ❖ L'un des principaux avantages de ces compensateurs est la flexibilité qu'ils offrent. En effet, ils permettent de contrôler la tension, l'angle de transport et l'impédance de la ligne à l'aide d'un seul dispositif FACTS comprenant deux onduleurs de tension triphasés.
- ❖ Ce dispositif peut passer instantanément d'une fonction à l'autre en modifiant la commande des onduleurs. Cela permet de réagir rapidement aux défauts ou aux changements du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions.
- ❖ Ce dispositif peut être utilisé pour amortir les oscillations de puissance. Il peut également alterner entre différentes fonctions. Par exemple, la fonction shunt peut être utilisée pour soutenir la tension, tandis que les fonctions série et déphaseur peuvent être utilisées pour amortir les oscillations de puissance.
- ❖ L'un des avantages économiques du convertisseur à commutation forcée est qu'il utilise peu de composants passifs. De plus, la même structure de convertisseur peut être utilisée pour les trois schémas de base pour le réglage des transits : compensateur shunt, compensateur série ou déphaseur.

III.7.1.2 Les inconvénients :

- ❖ Ce dispositif est composé de deux onduleurs et sa commande très compliquée.

III.7.2 Principe de fonctionnement :

La source de tension au point de départ est connectée en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, dite source de tension shunt. La deuxième source de tension série est connectée via trois transformateurs monophasés dont les secondaires sont insérés dans la ligne et les primaires reliés entre eux en étoile. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu, dont le principe de fonctionnement consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne et de le réinjecter avec une phase appropriée.

Le compensateur shunt est bien reconnu dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le dispositif shunt génère une tension alternative triphasée synchronisée avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension de l'onduleur peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau. L'UPFC peut contrôler indépendamment ou séparément tous les paramètres affectant le flux de puissance sur une ligne. Il peut avoir différents modes de fonctionnement quand la tension injectée en série à différentes amplitudes et angle de phase (figure III.6) [20].

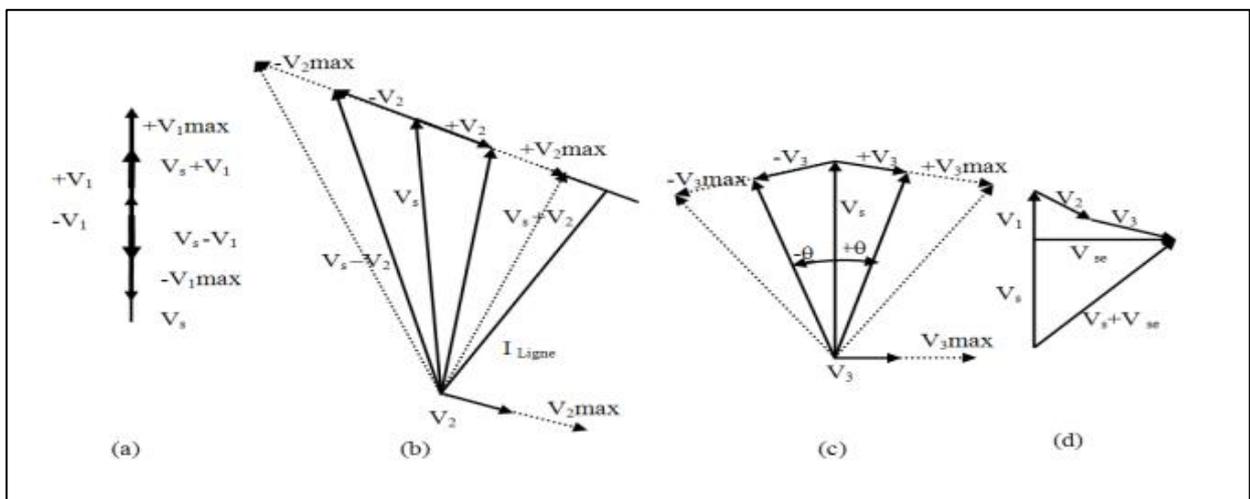


Figure III.6: Mode de fonctionnement d'un UPFC.

- ❖ Régulation de tension (figure III.6.a), la tension de départ V_s est augmentée (ou diminuée) en injectant une tension V_1 , en phase avec V_s . La tension V_1 est réglable en module et possède une amplitude maximale V_{1max} .

- ❖ Régulation d'impédance (figure III.6.b), la tension injectée V_2 est en quadrature avec le courant de ligne. La tension V_2 possède une amplitude maximale V_{2max} . Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- ❖ Contrôle de phase (figure III.6.c), l'angle la tension injectée V_3 est variable alors que l'amplitude de la tension V_s reste constante.
- ❖ Contrôle simultané (figure III.6.d), il est possible à l'UPFC d'accomplir trois fonctions à savoir le réglage de la tension, la compensation série et le réglage de l'angle de phase simultanément c'est le mode de fonctionnement automatique. L'angle de phase et l'amplitude de la tension injectée $V_{pq} = V_1 + V_2 + V_3$ ont été choisis d'une manière à produire un courant de ligne qui permet d'obtenir les puissances active et réactive désirées. [20]

III.7.3 Modélisation du système UPFC :

La figure (III.7) schématise le circuit simplifié du système UPFC en vue de contrôle et de compensation, la modélisation de ce circuit sera basée sur les hypothèses suivantes : [21]

- ❖ Tous les interrupteurs (statiques) sont supposés idéals.
- ❖ Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- ❖ Toutes les chutes de tension dans le compensateur série sont représentées par la résistance r .
- ❖ Les chutes de tension dans le compensateur parallèle sont représentées par la résistance r_p .
- ❖ Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligés. (Interrupteurs idéals).
- ❖ L'inductance de la ligne L_s , plus l'inductance de fuite du transformateur série T2 sont représentés par l'inductance L .
- ❖ L'inductance de fuite du transformateur shunt est représenté par l'inductance L_p .

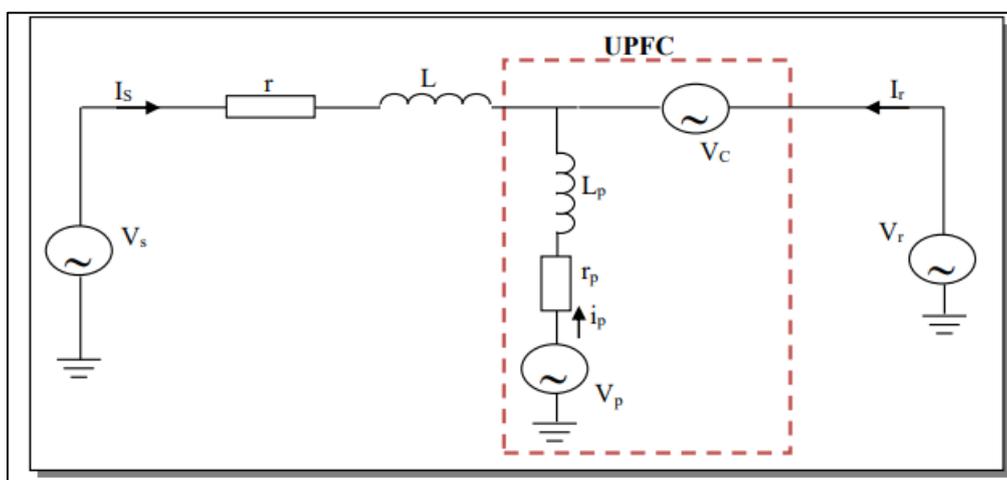


Figure III.7 : Circuit équivalent simplifié du système UPFC.

Les équations dynamiques de l'UPFC sont divisées en trois systèmes d'équations :

- ❖ Les équations de la branche série.
- ❖ Les équations de la branche parallèle et celles du circuit continu.

L'application des lois de " KIRCHHOFF " nous permet d'écrire les équations au niveau de chaque branche constituant l'UPFC sous les modèles suivants :

III.7.3.1 Modélisation de la branche série (UPFC série) :

On suppose que les onduleurs série et shunt sont des sources de tension contrôlable idéale. Donc à partir de la figure (III.03), on pourra déduire le système d'équations (III-3).[21]

On appliquant la loi de " KIRCHHOFF " sur (la maille) le système UPFC série de la figure (II.03) on aura l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 V_s - r i_s - L \frac{di_s}{dt} - V_c - V_r &= 0 \\
 -r i_s - L \frac{di_s}{dt} &= -V_s + V_c + V_r \\
 L \frac{di_s}{dt} &= -r i_s - V_r - V_c + V_s
 \end{aligned}$$

D'où :

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{r}{L} i_s + \frac{1}{L} (-V_r - V_c + V_s) \tag{III.5}$$

On peut écrire pour les trois phases :

$$\begin{cases}
 \frac{di_{sa}}{dt} = -\frac{r}{L} i_{sa} + \frac{1}{L} (-V_{ca} - V_{ra} + V_{sa}) \\
 \frac{di_{sb}}{dt} = -\frac{r}{L} i_{sb} + \frac{1}{L} (-V_{cb} - V_{rb} + V_{sb}) \\
 \frac{di_{sc}}{dt} = -\frac{r}{L} i_{sc} + \frac{1}{L} (-V_{cc} - V_{rc} + V_{sc})
 \end{cases} \tag{III.6}$$

Ou i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} , i_{sb} et i_{sc} sont les courants de phase de la ligne de transmission et r et L sont respectivement sa résistance et son inductance.

Pour simplifier les calculs, l'impédance du transformateur T_2 a été négligée.

L'onduleur série génère la tension de compensation V_c à l'arrivée de la ligne de transmission.
[21]

III.7.3.1.1 Tensions de compensation série :

Le système d'équation (III.6) peut être réécrite sous forme matricielle (III.7) :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + sL & 0 & 0 \\ 0 & r + sL & 0 \\ 0 & 0 & r + sL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ca} + V_{ra} \\ V_{cb} + V_{rb} \\ V_{cc} + V_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

On sous la forme matricielle :

$$[V_{sabc}] = [r]. [i_s] + [L]. [i_s] + [V_{cabc}] + [V_rabc]$$

Dont V_{ca}, V_{cb} et V_{cc} sont les tensions de compensation série en utilisant la représentation matricielle sur le système de : a, b et c le modèle mathématique de UPFC est donnée par le système d'équation suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L & 0 & 0 \\ 0 & -r/L & 0 \\ 0 & 0 & -r/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sa} + V_{ca} + V_{ra} \\ V_{sb} + V_{cb} + V_{rb} \\ V_{sc} + V_{cc} + V_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

Les sources de tension V_p et V_c représentant respectivement les onduleurs shunt et série du système UPFC. la transformation de " park " des courant triphasé, i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} et des tensions V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} est calculée comme suite :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

Ou x peut être une tension ou une courant dans notre cas la compensation X_0 est vue que le système d'alimentation est supposé symétrique après la transformation de Park en coéditant les hypothèses simplificatrices, les trois tensions V_{sabc} .[22]

Sous donne pare la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_s \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

V_s Étant la valeur efficace de la tension.

Après la transformation de Park en appliquant la matrice de Park sur la tension V_s et V_r on aboutit au système d'équation suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L & \omega \\ -\omega & -r/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{sd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{sq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

III.7.3.2 Modélisation de la partie shunt (STATCOM) :

Le modèle mathématique de l'UPFC shunte peut-être écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_{pa}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{pa} + \frac{1}{L_p} (V_{pa} - V_{ca} - V_{ra}) \\ \frac{di_{pb}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{pb} + \frac{1}{L_p} (V_{pb} - V_{cb} - V_{rb}) \\ \frac{di_{pc}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{pc} + \frac{1}{L_p} (V_{pc} - V_{cc} - V_{rc}) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

On i_{pabc} sont les courants de UPFC shunt V_{pabc} sont les tensions générées par les onduleurs r_p et L_p sont respectivement la résistance et l'inductance de UPFC shunt le système des équations (III.12) peut être réécrit sous forme matricielle (III.13). [22]

$$\begin{bmatrix} V_{pa} \\ V_{pb} \\ V_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p + sL_p & 0 & 0 \\ 0 & r_p + sL_p & 0 \\ 0 & 0 & r_p + sL_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ca} + V_{ra} \\ V_{cb} + V_{rb} \\ V_{cc} + V_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

$$[V_{pabc}] = [r_p] \cdot [i_p] + [L_p] \cdot s \cdot [i_p] + [V_{cabc}] + [V_{rabc}]$$

Dont i_{pa} , i_{pb} et i_{pc} représente on les courants shunts V_{pa} , V_{pb} et V_{pc} les tensions générées par l'onduleur shunt.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_p/L_p & 0 & 0 \\ 0 & -r_p/L_p & 0 \\ 0 & 0 & -r_p/L_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{pa} + V_{ca} + V_{ra} \\ V_{pb} + V_{cb} + V_{rb} \\ V_{pc} + V_{cc} + V_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

La représentation d'UPFC shunt série les axes (d-q) peut être dérivée en utilisant la même procédure que dans le cas de la branche série dans le repère (d-q) on obtient les transformations suivantes :

$$\frac{di_{pd}}{dt} = \omega \cdot i_{pq} - \frac{r_p}{L_p} i_{pd} + \frac{1}{L_p} (V_{pd} - V_{cd} - V_{rd}) \quad (III.15)$$

$$\frac{di_{pq}}{dt} = -\omega \cdot i_{pd} - \frac{r_p}{L_p} i_{pq} + \frac{1}{L_p} (V_{pq} - V_{cq} - V_{rq}) \quad (III.16)$$

La forme matricielle est donnée comme suite :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_p}{L_p} & \omega \\ \omega & -\frac{r_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{pd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{pq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

En se passant sur le principe d'équation des puissances et en négligeant les pertes des convertisseurs, la tension continue V_{cd} est déduite de figure (III-04) et est décrite par l'équation :

$$\frac{1}{2} \frac{dV_{cd}}{dt} = \frac{1}{CV_{dc}} (P_e + V_{ep}) \quad (III-18)$$

$$P_e = V_{ca} i_{ra} + V_{cd} i_{rd} + V_{cc} i_{cc} \quad (III-19)$$

$$P_{ep} = V_{pa} i_{pa} + V_{pd} i_{pd} + V_{pc} i_{pc} \quad (III-20)$$

Avec :

P_e : la puissance active absorbée du système AC.

P_{ep} : La puissance active injectée par l'onduleur shunt.

En appliquant la transformation de Park sur l'équation (III.18) on obtient :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2CV_{dc}} (V_{pq} * i_{pq} - V_{pd} * i_{pd} - V_{cd} * i_d - V_{cq} * i_q) \quad (III.21)$$

L'UPFC série et shunt sont identiques à tout point de vue.

Les commandes utilisées pour l'onduleur série sont aussi les mêmes pour l'onduleur shunt. [22]

III.7.4 Calcul des puissances instantanées de l'UPFC :

La transformation de Park peut être décomposée en deux phases équilibrées comme il est montré sur la figure ci-dessous. La première consiste à passer d'un système triphasé à un système diphasé ; on utilise alors la transformation de Clarke (C) :

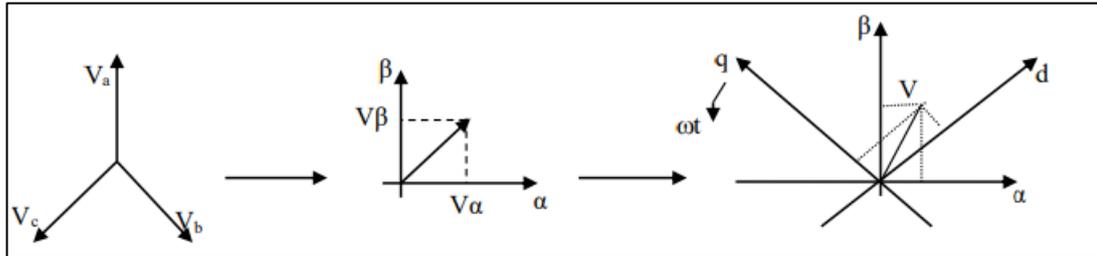


Figure III.8 : Passage dans le référentiel tournant de la composante équilibrée directe.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{III.22}$$

La seconde phase permet de passer par une rotation de $-\theta = \omega t$ du système diphasé dans le repère de Clark au système diphasé tournant de Park au moyen de la matrice de rotation R. [22] [23]

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{III.23}$$

Le calcul de la puissance active s'obtient au moyen de la formule classique :

$$p = V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c = (V)'(i)' \tag{III.24}$$

$$\begin{aligned} &= \left[c_{32} R(\theta) \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \right]' \left[c_{32} R(\theta) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right] \\ &= \left[\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} R(-\theta)' c_{32}' \right]' \left[c_{32} R(\theta) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right] \\ &= \frac{3}{2} [V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q] \end{aligned} \tag{III.25}$$

Ainsi pour la puissance réactive, on aura le développement suivant :

$$\begin{aligned} Q &= i_1 \left(\frac{V_3 - V_2}{\sqrt{3}} \right) + i_2 \left(\frac{V_1 - V_3}{\sqrt{3}} \right) + i_3 \left(\frac{V_2 - V_1}{\sqrt{3}} \right) = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \\ &= \left[c_{32} R(\theta) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right]' \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left[c_{32} R(\theta) \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}' R(-\theta)' \cdot C_{32}' \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} C_{32} R(\theta) \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \\
&= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}' R(-\theta) R\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \\
&= \frac{3}{2} [V_d \cdot i_d - V_q \cdot i_q] \tag{III.26}
\end{aligned}$$

Les puissances active et réactive (P et Q) sont données par les équations suivantes :

$$p = \frac{3}{2} [V_{rd} \cdot i_{rd} + V_{rq} \cdot i_{rq}] \tag{III.27}$$

$$Q = \frac{3}{2} [V_{rd} \cdot i_{rq} - V_{rq} \cdot i_{rd}] \tag{III.28}$$

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions, les catégories et les classifications des différents types de contrôleurs FACTS, tels que l'UPFC. Nous avons appris que ces dispositifs permettent un contrôle général du système électrique. Nous avons également examiné en détail le principe de fonctionnement de l'UPFC, ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Nous avons constaté qu'il s'agit d'un outil puissant pour améliorer la qualité de l'énergie et renforcer la stabilité du système électrique. Le chapitre se termine par une modélisation de l'UPFC.

Nous avons choisi d'étudier le UPFC comme dispositif FACT pour contrôler et améliorer la tension et la puissance réactive dans un réseau d'énergie électrique. Une étude profonde concerne l'intégration de UPFC dans deux réseaux électriques de IEEE sera développée dans le prochain chapitre.



Chapitre IV :

Simulation

et

Résultats

IV. Simulation et résultats :

IV. 1 Introduction :

Il est essentiel de maintenir la tension dans les limites acceptables dans tous les réseaux de transport d'électricité. Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) offrent un contrôle rapide et flexible pour faciliter le transit de puissance et améliorer la stabilité du réseau. Le contrôleur UPFC (Unified Power Flow Controller) est un exemple de dispositif FACTS qui permet de réguler la tension et d'utilisé pour amortir les oscillations de puissance causées par des perturbations dans le réseau électrique.

L'étude de l'écoulement de puissance est cruciale pour obtenir tous les paramètres du réseau électrique dans chaque nœud, y compris la puissance active et réactive, ainsi que le module et l'angle de tension.

Dans ce chapitre nous allons étudier l'impact des compensateurs statique type UPFC sur des réseaux électriques standards IEEE14, IEEE30 pour cela nous avons fait appel à un logiciel free sous Matlab (PSAT), pour avoir l'influence de cette FACT.

IV.2 Description générale de l'étude :

Le travail décrit dans ce chapitre est destiné à l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux électriques sous MATLAB/PSAT en utilisant les (FACTS) qui sont des moyens flexibles capables d'améliorer la stabilité et les performances des réseaux électriques et cela selon trois phases d'étude :

1-ère phase : Nous rencontrons une perturbation dans le réseau électrique due à une augmentation de la consommation de la puissance réactive dans plusieurs nœuds.

2 -ème phase : Identifier le nœud le plus sensible se traduit par le nœud le plus faible module de tension.

3 -ème phase : Introduire les dispositifs FACTS (UPFC) pour améliorer la stabilité de réseau.

VI.3 Outils de simulation :

PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un logiciel destiné à l'analyse et l'étude des réseaux électriques. Il est développé sous MATLAB par Mr. Federico Milano. PSAT est une boîte à outils qui est dédiée pour l'analyse statique, l'analyse dynamique et le contrôle des réseaux électriques. Le logiciel PSAT a des interfaces graphiques pour le système et les

paramètres de réglage de routine, il inclut l'écoulement de puissance basé sur la méthode de NEWTON-RAPHSON. L'interface graphique de ce logiciel permet à l'utilisateur de calculer :

- ❖ Ecoulement de puissance (L'EP) par la méthode de Newton Raphson.
- ❖ Accroissement continue de la charge (Continuation power flow).
- ❖ Optimisation de l'écoulement de puissance (Optimal power flow).
- ❖ Analyse de la stabilité des réseaux électriques.
- ❖ Intégration des systèmes FACTS dans les réseaux de transport. [24]

Malgré l'existence de plusieurs logiciels spécialisés dans l'analyse et l'étude des réseaux électriques, PSAT reste le plus utilisé par les chercheurs car il est très performant et précis. Le tableau suivant présente une comparaison approximative entre PSAT et d'autres méthodes basées sur MATLAB progiciels pour l'analyse de systèmes électriques. (Educational Simulation Tool (EST); Mat EMTP; Mat power; Power System Toolbox (PST); Power Analysis Toolbox (PAT); Sim Power Systems (SPS); Voltage Stability Toolbox (VST)) [25].

Package	P F	CP F	OP F	SSS A	TD S	EM T	GU I	CAD
PSAT	X	X	X	X	X		X	X
PAT	X			X	X			X
PST	X	X		X	X			X
SPS	X			X	X	X	X	X
VST	X	X		X	X		X	
EST	X			X	X			X
Mat EMTP					X	X	X	X
Mat power	X		X					

Tableau IV.2 : Comparaison entre des logiciels d'analyse des réseaux électriques.

IV3.1 Pourquoi le choix de PSAT :

Le choix du PSAT est justifié par :

- ❖ On peut lire n'importe quelle base de données.
- ❖ PSAT reste un outil performant et très prisé.
- ❖ On peut ouvrir un réseau soit on peut faire un autre réseau.
- ❖ C'est un logiciel gratuit et open access.
- ❖ La richesse de sa bibliothèque simulink pour réaliser des réseaux test.

IV.4 Organigramme de calcul de puissance avec PSAT:

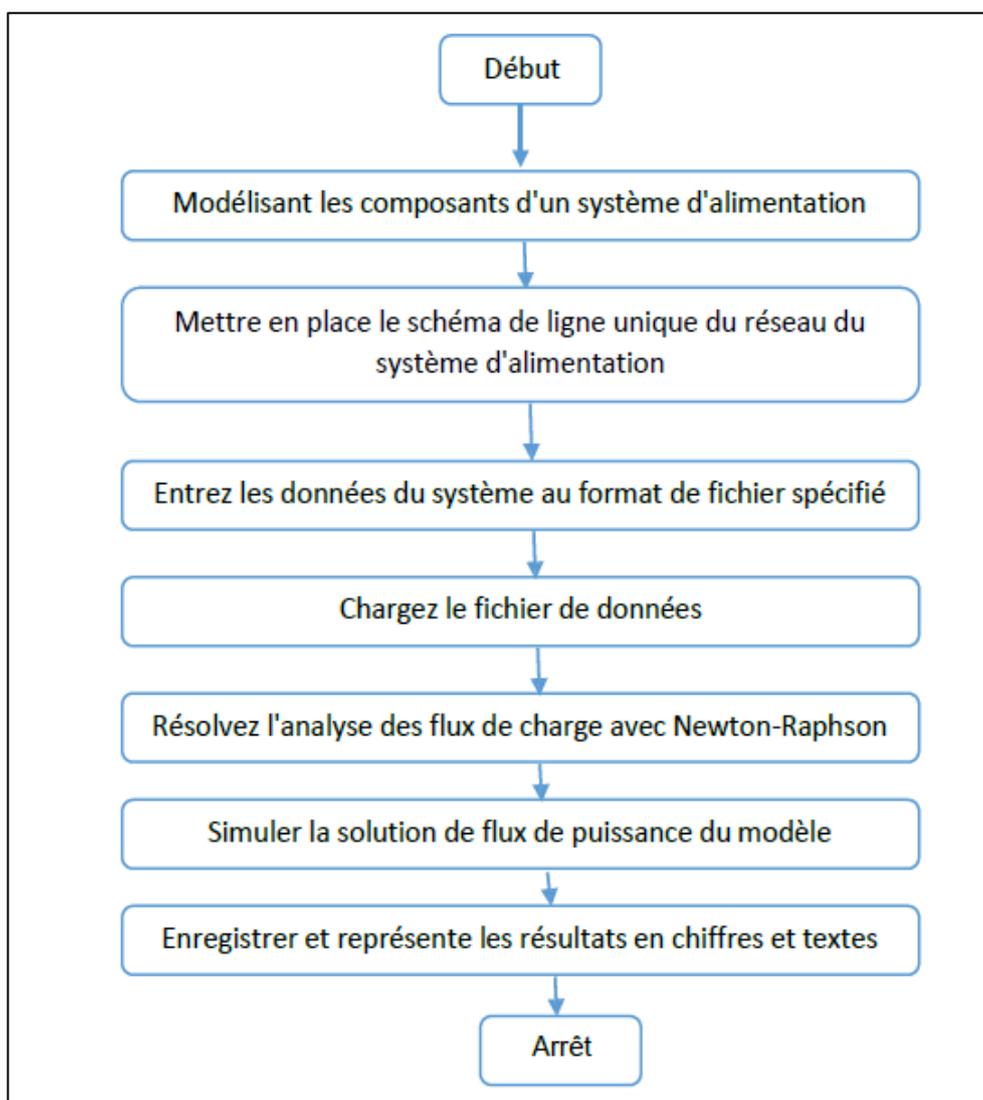


Figure IV.1 : Organigramme de calcul de puissance avec PSAT [26]

Cette section illustre les caractéristiques PSAT pour l'analyse d'état stable à l'aide de deux réseaux IEEE (14 JB, 30JB) comme présenté dans les figures (IV.2, IV.9) en utilisant la bibliothèque PSAT Simulink.

Une fois défini dans le modèle Simulink, on peut charger le réseau PSAT et résoudre le flux d'énergie. Cet outil de simulation permet également l'affichage des tensions de bus et les flux d'énergie dans la bibliothèque Simulink pour différents niveaux de charge au sein de modèle Simulink chargées dans le système.

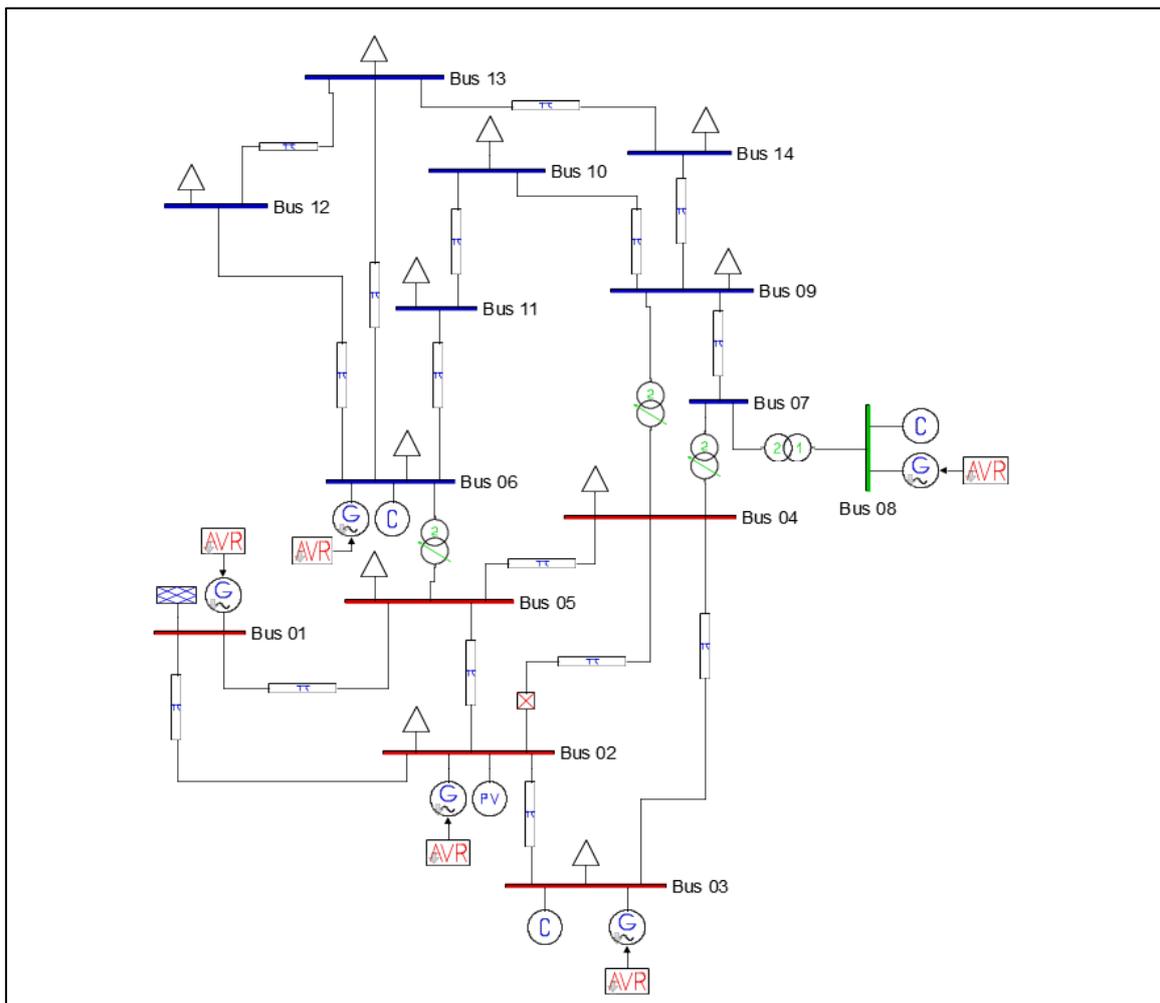
IV.5 Analyse les deux réseaux de IEEE (14 JB, 30 JB) par logiciel PSAT :

IV.5.1 Réseau test de 14 jeux de barres :

VI.5.1.1 Présentation du réseau :

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

Il correspond à un réseau aérien triphasé équilibré (69/13,8 KV, 100MVA) de 14 nœuds Il comprend cinq générateurs installés aux nœuds 1, 2,3,6,8, trois compensateurs synchrones installés aux nœuds 3, 6, et 8. Les générateurs sont considérés avec la limitation sur la puissance réactive. Des charges sont connectées aux accès 2 ,3,4,5,6,9,10,11,12,13et14.



Figures IV.2 : Schéma du système d'application IEEE à 14 nœuds.

VI.5.2 Réseau IEEE 14 a l'état de l'équilibre :

VI.5.2 .1 Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE 14 à l'état de l'équilibre :

Les tableaux IV.2, IV.3 présentent les résultats de l'écoulement de puissance à l'état initial :

JB	V [p.u]	Angle [rad]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]	P charge [p.u]	Q charge [p.u]
JB 01	1,06	0	3,520933	-0,28207	0	0
JB 02	1,045	-0,13569	0,4	0,948189	0,3038	0,1778
JB 03	1,01	-0,33212	1,78E-15	0,59695	1,3188	0,266
JB 04	0,997886	-0,26443	1,63E-14	7,9E-15	0,6692	0,056
JB 05	1,002929	-0,22703	-8E-16	2,78E-14	0,1064	0,0224
JB 06	1,07	-0,37019	3E-15	0,447453	0,1568	0,105
JB 07	1,036224	-0,33913	6,12E-16	1,74E-15	0	0
JB 08	1,09	-0,33913	-3,2E-16	0,33276	0	0
JB 09	1,013289	-0,37868	-4,1E-15	-2,7E-15	0,413	0,2324
JB 10	1,012521	-0,38425	-5,6E-16	1,58E-15	0,126	0,0812
JB 11	1,035836	-0,38006	2,26E-15	-6,7E-16	0,049	0,0252
JB 12	1,045933	-0,39142	-2,1E-16	9,02E-17	0,0854	0,0224
JB 13	1,036089	-0,39241	1,14E-15	1,3E-15	0,189	0,0812
JB 14	0,994903	-0,4127	1,36E-15	4,02E-16	0,2086	0,07

Tableau IV.2 : Résultat de l'écoulement de puissance à l'état initial du réseau IEEE 14 JB.

JB de départ	JB d'arrivé	La ligne	P transits [P.u.]	Q transits [P.u.]	P perdus [P.u.]	Q perdue [P.u.]
JB 02	JB 05	1	0,57875	0,069847	0,017876	0,018914
JB 06	JB 12	2	0,115113	0,046343	0,001653	0,003441
JB 12	JB 13	3	0,02806	0,020502	0,000244	0,000221
JB 06	JB 13	4	0,263611	0,146777	0,00526	0,010358
JB 06	JB 11	5	0,11632	0,128513	0,002493	0,00522
JB 11	JB 10	6	0,064827	0,098093	0,001057	0,002475
JB 09	JB 10	7	0,062356	-0,01408	0,000127	0,000336
JB 09	JB 14	8	0,115901	0,003342	0,002057	0,003933
JB 14	JB 13	9	-0,09476	-0,07059	0,002411	0,004909
JB 07	JB 09	10	0,377362	0,2235	0	0,019707
JB 01	JB 02	11	2,417487	-0,38067	0,102927	0,25576
JB 03	JB 02	12	-1,00211	0,139483	0,047465	0,153716
JB 03	JB 04	13	-0,31669	0,191467	0,009461	-0,01073
JB 01	JB 05	14	1,103446	0,098599	0,059316	0,192477
JB 05	JB 04	15	0,846761	-0,13815	0,009746	0,017933
JB 02	JB 04	16	0,782433	0,049883	0,03284	0,060603
JB 05	JB 06	17	0,651844	0,072805	1,11E-16	0,093626
JB 04	JB 09	18	0,213896	0,042823	-2,8E-17	0,024956
JB 04	JB 07	19	0,377362	-0,06343	2,22E-16	0,029412
JB 08	JB 07	20	-6,4E-16	0,33276	-2,6E-16	0,016417
					Les pertes active [p.u]	0,294933
					Les pertes réactive [p.u]	0,903685

Tableau IV.3 Les données des lignes étudié de IEEE 14.

- ❖ **JB** : jeu de barre.
- ❖ **V** : Tension de JB [pu].
- ❖ **Angle** : Le déphasage de la tension [rad].
- ❖ **Q gen** : La puissance réactive générée [p.u].
- ❖ **P gen** : La puissance active générée [p.u].
- ❖ **P charge** : La puissance active de la charge [p.u].
- ❖ **Q charge** : La puissance réactive de la charge [p.u].

Les tensions de chaque jeu de barre de réseau 14 jeux de barres à l'état d'équilibre sont données comme suite :

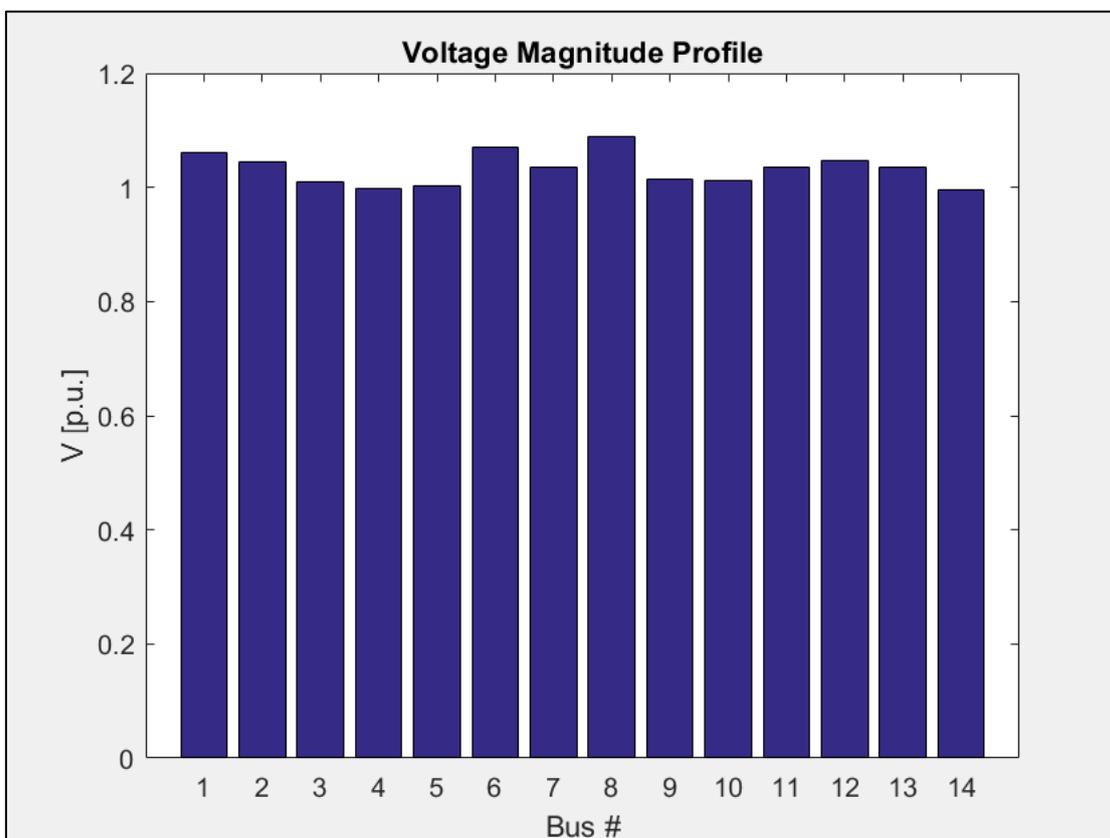


Figure IV.3 : Les tensions de chaque jeu de barre de IEEE14.

VI.5.3 Réseau IEEE 14 a l'état perturbé :

Dans cette phase nous allons procéder à une simulation de notre réseau pour un état perturbé, Pour obtenir une déstabilisation rapide du réseau, nous avons choisi d'augmenter les Charges réactives uniquement au niveau des zones fragiles à savoir les nœuds 13 et 14.

VI.5.3.1 Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE14 à l'état perturbé :

Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau VI.4 et sur la figure VI.4 ci- dessous

JB	V [p.u]	Angle [rad]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]	P charge [p.u]	Q charge [p.u]
JB 01	1,06	0	4,070551	-0,23619	0	0
JB 02	1,045	-0,1567	0,4	1,360697	0,3038	0,1778
JB 03	1,01	-0,36872	-2,2E-16	0,769918	1,3188	0,266
JB 04	0,969384	-0,30235	6,66E-16	1,79E-15	0,6692	0,056
JB 05	0,979644	-0,26686	-1,4E-15	-1,5E-15	0,1064	0,0224
JB 06	1,07	-0,4881	3,61E-15	2,504571	0,1568	0,105
JB 07	0,970225	-0,40413	-1,2E-15	5,08E-16	0	0
JB 08	1,09	-0,40413	-6,1E-16	0,741156	0	0
JB 09	0,888673	-0,46379	6,11E-15	2,78E-16	0,413	0,2324
JB 10	0,908689	-0,4762	1,3E-15	1,11E-16	0,126	0,0812
JB 11	0,982564	-0,48456	-1,4E-15	1,94E-16	0,049	0,0252
JB 12	0,956492	-0,499	-2,1E-16	5,24E-16	0,0854	0,0224
JB 13	0,867251	-0,44555	4,25E-15	3,33E-16	0,189	0,8
JB 14	0,559989	-0,35378	3,47E-15	2,32E-14	0,2086	0,96
Les pertes active [p.u]					0,844551	
Les pertes réactive [p.u]					2,391751	

Tableau IV.4 : Résultat de l'écoulement de puissance à l'état perturber du réseau IEEE 14 JB

Les tensions de chaque jeu de barre de réseau 14 jeux de barres a l'état perturber sont données comme suite :

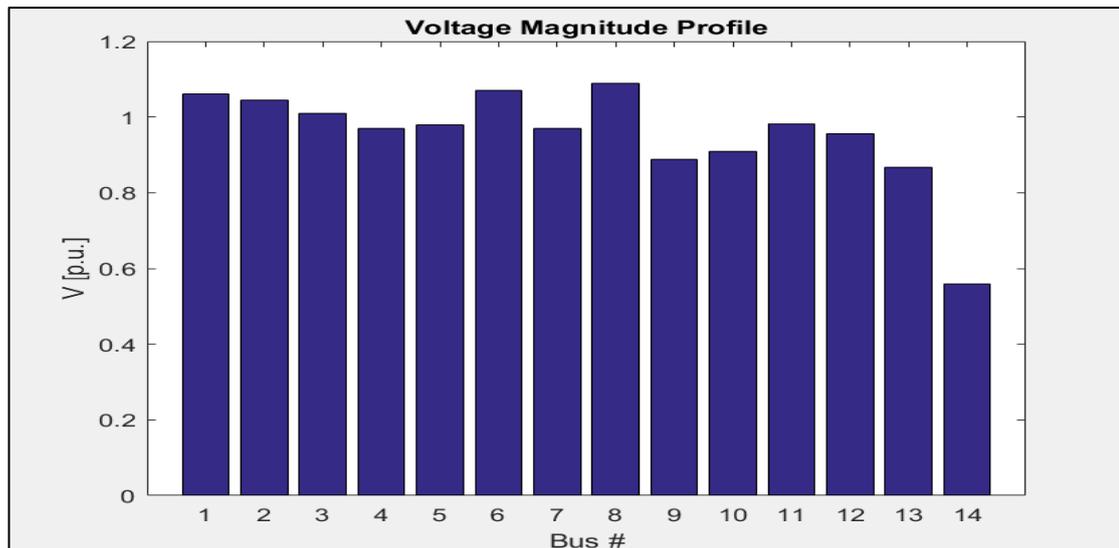


Figure IV.4 : Les tensions de chaque jeu de barre de IEEE14 a l'état perturbé

Les tensions de chaque jeu de barre de réseau 14 jeux de barres après la compensation sont données comme suite :

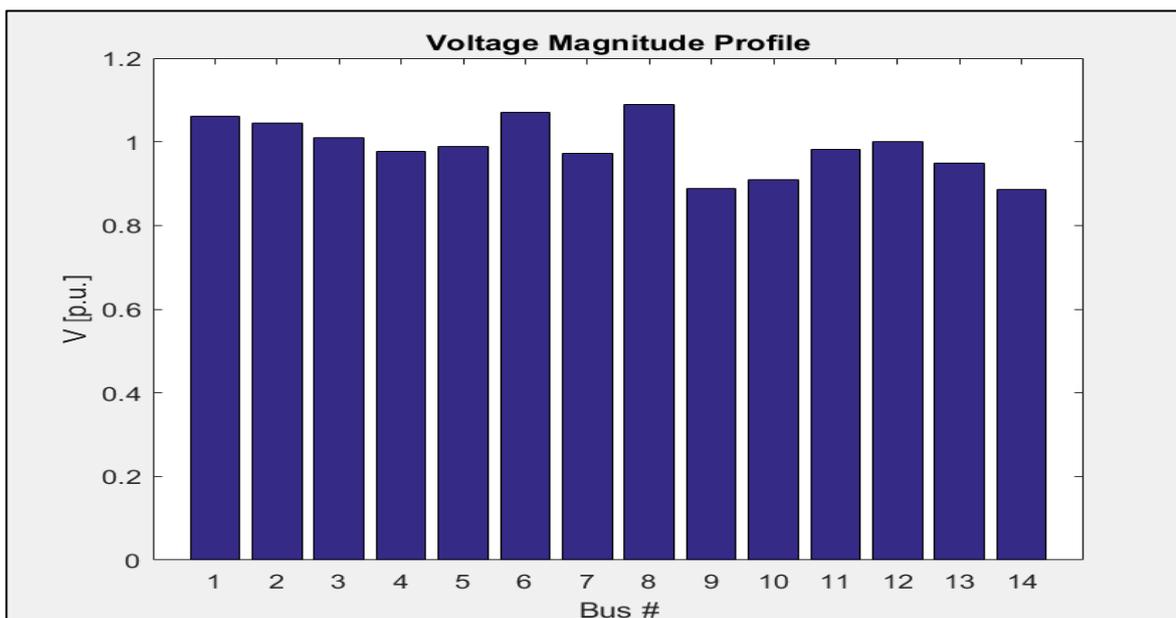


Figure IV.6 : Les tensions de chaque jeu de barre après la compensation.

VI.5.4 .1Calcul de l'écoulement de la puissance de réseau après la compensation :

❖ Le tableau ci- dessous illustre ces résultats :

JB	V [p.u]	Angle [rad]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]	P charge [p.u]	Q charge [p.u]
JB 01	1,06	0	3,619513	-0,22775	0	0
JB 02	1,045	-0,13973	0,4	1,17583	0,3038	0,1778
JB 03	1,01	-0,34046	7,59E-14	0,72487	1,3188	0,266
JB 04	0,976827	-0,26674	-1,8E-12	5E-13	0,6692	0,056
JB 05	0,988359	-0,23299	7,14E-14	2,01E-12	0,1064	0,0224
JB 06	1,07	-0,40353	1,12E-12	1,666072	0,1568	0,105
JB 07	0,972669	-0,34425	-4,4E-12	9,07E-13	0	0
JB 08	1,09	-0,34425	-8,3E-16	0,726032	0	0
JB 09	0,888156	-0,39008	9,69E-14	3,53E-12	0,413	0,2324
JB 10	0,908187	-0,40031	2,36E-12	-4,7E-13	0,126	0,0812
JB 11	0,982231	-0,40409	-1,8E-14	1,43E-14	0,049	0,0252
JB 12	0,999349	-0,41389	3,09E-14	-2,7E-14	0,0854	0,0224
JB 13	0,950153	-0,38299	1,96E-13	4E-15	0,189	0,8
JB 14	0,885231	-0,39058	4,84E-12	4E-12	0,2086	0,96
Les pertes active [p.u]					0,393513	
Les pertes réactive [p.u]					1,316656	

Tableau IV.5 : Résultat de l'écoulement de puissance après la compensation du réseau IEEE 14 JB

IV.5.5 Comparaison entre les résultats sans et avec élément UPFC :

IV.5.5.1 Comparaison entre les résultats du transit de puissance sans et avec UPFC :

(Le tableau IV.5) ci-dessous montre les résultats de l'écoulement de puissance, pour les deux cas (SANS, avec UPFC) dans le réseau de 14 jeux de barres qui sont obtenus par PSAT :

JB	Sans UPFC			Avec UPFC		
	V (p.u)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)	V (p.u)	P gen (p.u)	Q gen (p.u)
JB 01	1,06	4,070551	-0,23619	1,06	3,619513	-0,22775
JB 02	1,045	0,4	1,360697	1,045	0,4	1,17583
JB 03	1,01	-2,2E-16	0,769918	1,01	7,59E-14	0,72487
JB 04	0,969384	6,66E-16	1,79E-15	0,976827	-1,8E-12	5E-13
JB 05	0,979644	-1,4E-15	-1,5E-15	0,988359	7,14E-14	2,01E-12
JB 06	1,07	3,61E-15	2,504571	1,07	1,12E-12	1,666072
JB 07	0,970225	-1,2E-15	5,08E-16	0,972669	-4,4E-12	9,07E-13
JB 08	1,09	-6,1E-16	0,741156	1,09	-8,3E-16	0,726032
JB 09	0,888673	6,11E-15	2,78E-16	0,888156	9,69E-14	3,53E-12
JB 10	0,908689	1,3E-15	1,11E-16	0,908187	2,36E-12	-4,7E-13
JB 11	0,982564	-1,4E-15	1,94E-16	0,982231	-1,8E-14	1,43E-14
JB 12	0,956492	-2,1E-16	5,24E-16	0,999349	3,09E-14	-2,7E-14
JB 13	0,867251	4,25E-15	3,33E-16	0,950153	1,96E-13	4E-15
JB 14	0,559989	3,47E-15	2,32E-14	0,885231	4,84E-12	4E-12
Total pertes sans UPFC			Total pertes avec UPFC			
Puissance active [p.u]			0,844551	Puissance active [p.u]		0,393513
Puissance réactive [p.u]			2,391751	Puissance réactive [p.u]		1,316656

Le tableau IV.6 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 14 jeux de barres pour Le UPFC et sans élément de FACTS.

IV.5.5.2 Comparaison entre les résultats des pertes de puissance :

Les figures (VI.7, VI.8) ci-dessous montre les résultats des pertes de puissance, pour les deux cas (sans UPFC, avec UPFC) dans le réseau de 14 jeux de barres qui sont obtenus par PSAT :

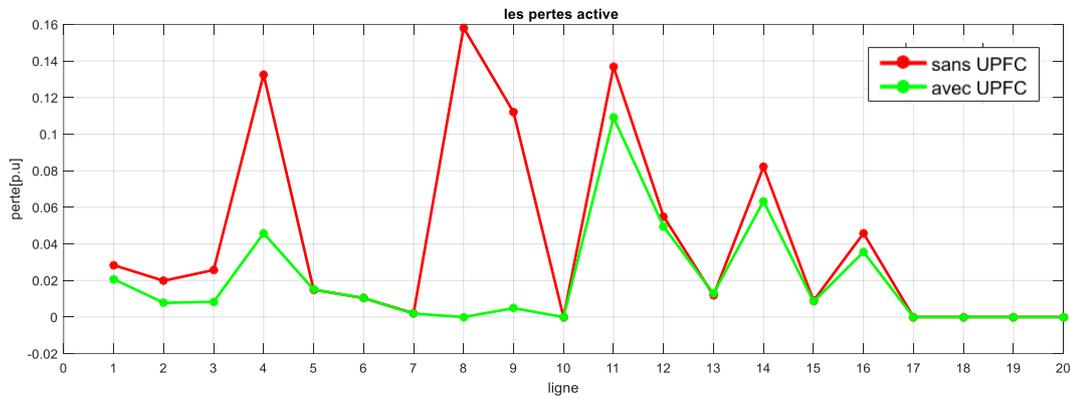


Figure IV.7 : Les pertes active sans et avec UPFC.

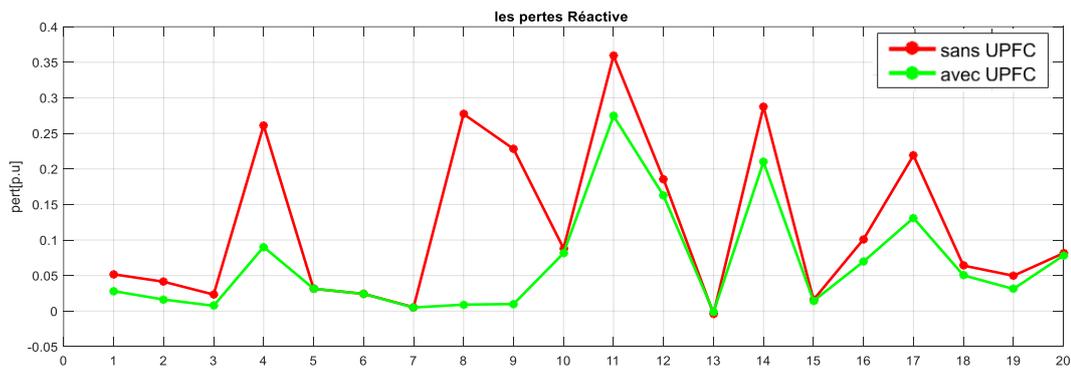


Figure IV.8 : Les pertes réactive sans et avec UPFC.

IV.5.6 Interprétation :

On remarque que Les résultats de l'écoulement de puissance après l'intégration du UPFC changent avec une bonne amélioration de la tension et de la puissance réactive et diminution des pertes (active, réactive) au niveau de jeu de barre où le dispositif est intégré (JB14). Ainsi Pour les autres jeux de barres, ce dispositif a un impact considérable sur la régulation et l'amélioration de la tension pour assurer la stabilité du système.

IV.6 Analyse de la stabilité dynamique du réseau IEEE 30 JB sans et avec intégration de dispositif FACTS (UPFC) :

Le réseau électrique IEEE 30 JB est un réseau plus développé et de grande taille.

IV.6.1 Schéma descriptif du réseau test IEEE 30 JB :

La représentation du réseau test IEEE 30 JB sous PSAT est donnée sur la figure IV.9.

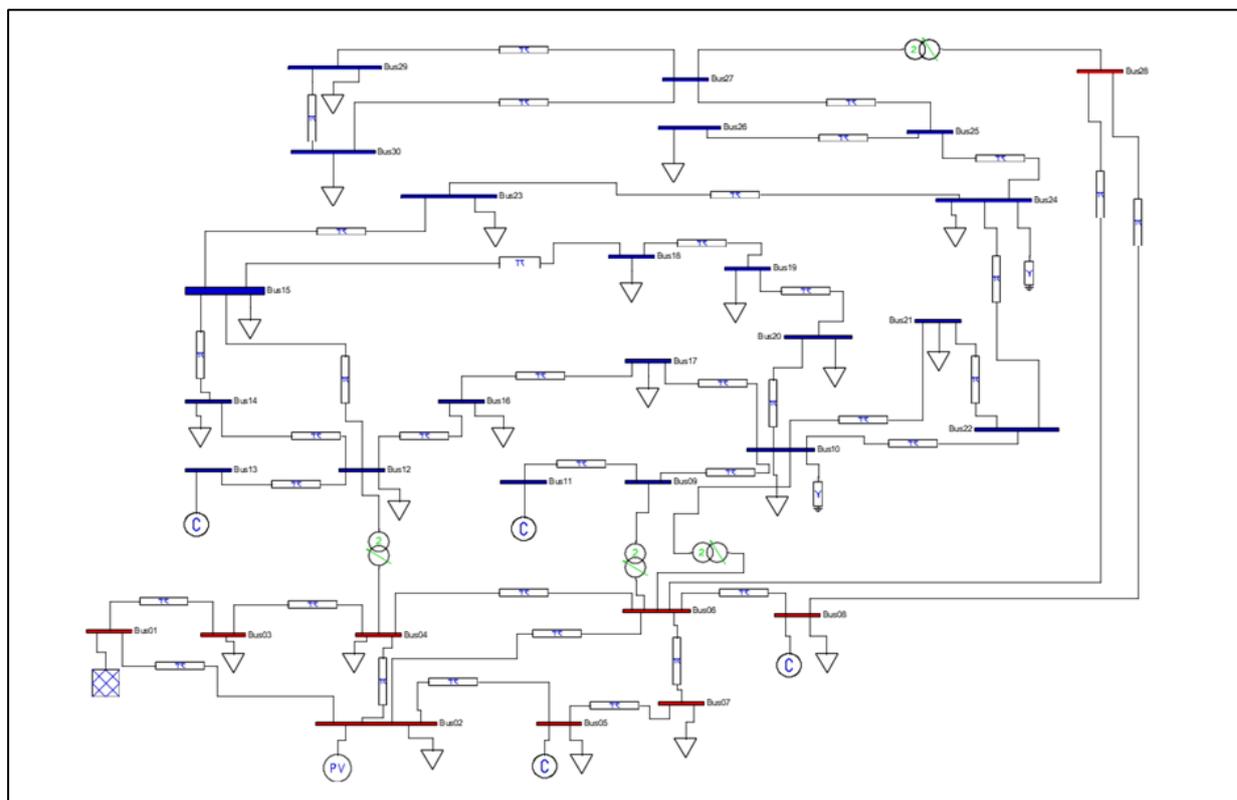


Figure IV.9 : Représentation du réseau IEEE 30 JB par le logiciel PSAT.

IV.6.2 Caractéristique du modèle du réseau IEEE 30 JB :

Le tableau A.2 illustre les caractéristiques du modèle d'étude (réseau dynamique) IEEE 30 JB et les tableaux A.3, A.4 présentent les résultats de l'écoulement de puissance à l'état initial du réseau. (Annex A)

Nombre de jeu de barre	Nombre de ligne	Nombre de générateur	Nombre de transformateur	Nombre de charge
30	37	6	4	21

Tableau IV.7 : Les caractéristiques de modèle d'étude (réseau dynamique IEEE 30 JB)

- ❖ Transformateur abaisseur [100 MVA], [132KV/33KV].
- ❖ Générateur [100 MVA, 132 KV].
- ❖ Charge [100 MVA, 33 KV et 132 KV].

IV.6.3 Profile du module de la tension à l'état initial et à la marge de stabilité du réseau IEEE 30 JB :

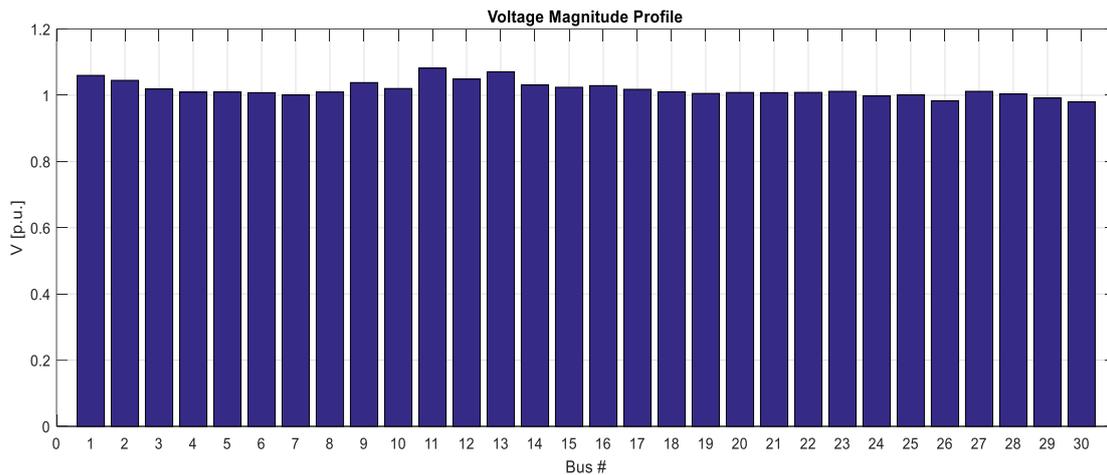


Figure IV.10 : Les tensions de chaque jeu de barre de IEEE 30.

IV.6.4 Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau IEEE30 à l'état perturbé :

Dans cette phase nous allons procéder à une simulation de notre réseau pour un état perturbé, qui correspond à une augmentation de charge réactive au niveau des jeux de barres JB14, JB15, JB16, JB18, JB19 et JB23.

Le tableau IV.8 présente les résultats de l'écoulement de puissance à l'état perturbé du réseau IEEE 30 JB.

❖ Le tableau ci-dessous illustre ces résultats :

Bus	V [p.u]	Angle [Rad]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]	P charge [p.u]	Q charge [p.u]
JB 01	1,06	0	2,73354	-0,11643	0	0
JB 02	1,045	-0,09895	0,4	0,805623	0,217	0,127
JB 03	1,003072	-0,13436	-1,6E-16	4,65E-15	0,024	0,012
JB 04	0,990065	-0,16605	1,53E-16	-9,8E-15	0,076	0,016
JB 05	1,01	-0,2566	6,66E-16	0,439486	0,94	0,19
JB 06	0,994623	-0,20093	3,41E-15	1,01E-14	0	0
JB 07	0,993036	-0,23313	-1,9E-15	-1,2E-16	0,228	0,109
JB 08	1,01	-0,21911	0	0,838728	0,3	0,3
JB 09	0,997853	-0,26355	-4,6E-16	-1,7E-15	0	0
JB 10	0,944881	-0,29917	6,52E-16	2,3E-15	0,058	0,048468
JB 11	1,082	-0,26355	1,39E-17	0,437728	0	0
JB 12	0,947784	-0,28686	1,9E-15	3,73E-15	0,112	0,075
JB 13	1,071	-0,28686	5,55E-17	0,942599	0	0
JB 14	0,784922	-0,21492	-1E-16	4,44E-16	0,059685	0,710442
JB 15	0,855486	-0,27936	-2,1E-16	-5E-16	0,082	0,3209
JB 16	0,93678	-0,29752	-1,3E-15	-7,7E-16	0,035	0,03
JB 17	0,936766	-0,30313	6,11E-16	-1,8E-15	0,09	0,058
JB 18	0,85684	-0,29556	6,94E-17	2,4E-15	0,032	0,05
JB 19	0,86764	-0,30375	-1,3E-15	-4,2E-15	0,095	0,0509
JB 20	0,881049	-0,3018	-5,6E-17	2,55E-15	0,022	0,09
JB 21	0,927124	-0,30675	2,05E-15	4,22E-15	0,175	0,112
JB 22	0,926471	-0,30579	-3,2E-15	-8,1E-15	0	0
JB 23	0,865137	-0,28727	2,08E-16	1,46E-15	0,032	0,059
JB 24	0,897792	-0,30279	-8,6E-16	-2,9E-16	0,087	0,073495
JB 25	0,931849	-0,30365	1,09E-15	1,39E-15	0	0
JB 26	0,912477	-0,31241	-1,9E-16	-2,4E-16	0,035	0,023
JB 27	0,962518	-0,29795	-1,6E-16	9,43E-16	0	0
JB 28	0,989065	-0,21306	-2,5E-15	-3,1E-15	0	0
JB 29	0,941276	-0,32228	4,27E-16	-1,2E-16	0,024	0,009
JB 30	0,928996	-0,33982	-1,4E-16	-3,5E-16	0,106	0,019
Total des pertes						
Puissance active [p.u.]					0,303855	
Puissance réactive [p.u.]					0,864529	

Tableau IV.8 : Résultat de l'écoulement de puissance à l'état perturbé du réseau IEEE 30 JB.

Les tensions de chaque jeu de barre de réseau 30 jeux de barres à l'état perturbé sont données comme suite :

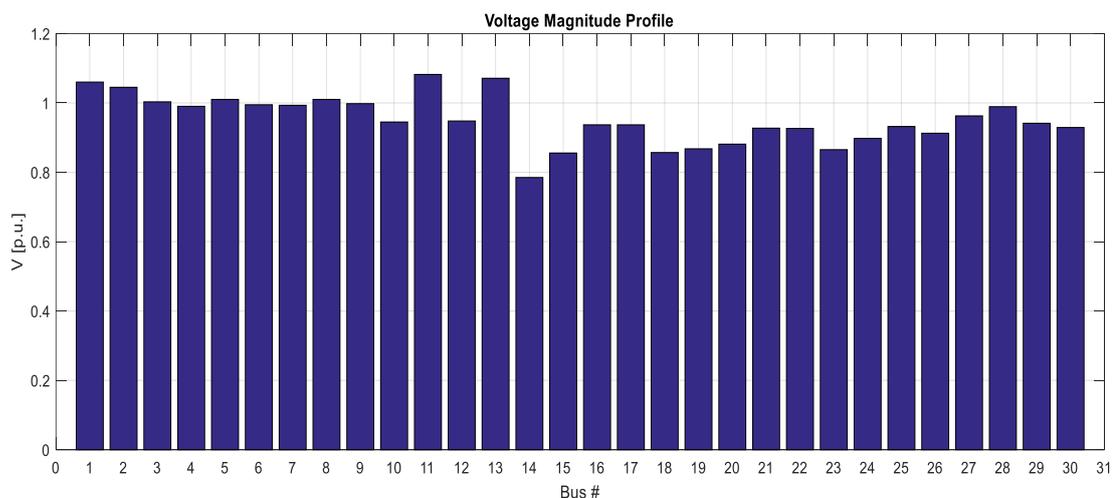


Figure IV.11 : Les tensions d'un réseau IEEE30 sans élément FACTS.

D'après les résultats du tableau (IV.7) et la figure (IV.11) montrent présente une forte chute de tension ($V=0.784922$) au niveau du jeu de barre 14.

Cette branche (entre 12-14) est considérée comme candidate pour l'emplacement du compensateur série-shunt (UPFC) afin de réduire les pertes totales dans le réseau.

IV.6.5 Intégration du UPFC dans un réseau test de IEEE30 :

Après avoir étudié l'écoulement de puissance dans un réseau test de 30 jeux de barres sans présence d'élément FACTS, maintenant on va refaire la même étude mais en présence d'un seul type d'éléments FACTS (type série-shunt). On traite le cas de la présence d'un seul UPFC connecté à la ligne 6. Le but de cette étude est de déterminer l'effet des systèmes FACTS dans l'amélioration du transit de puissance ainsi la tension dans les réseaux électrique.

Après avoir prélever le jeu de barre ayant le profil de tension le plus faible ou On a raccordé un dispositif FACTS (UPFC) entre JB12-14, comme montrer dans la figure suivante :

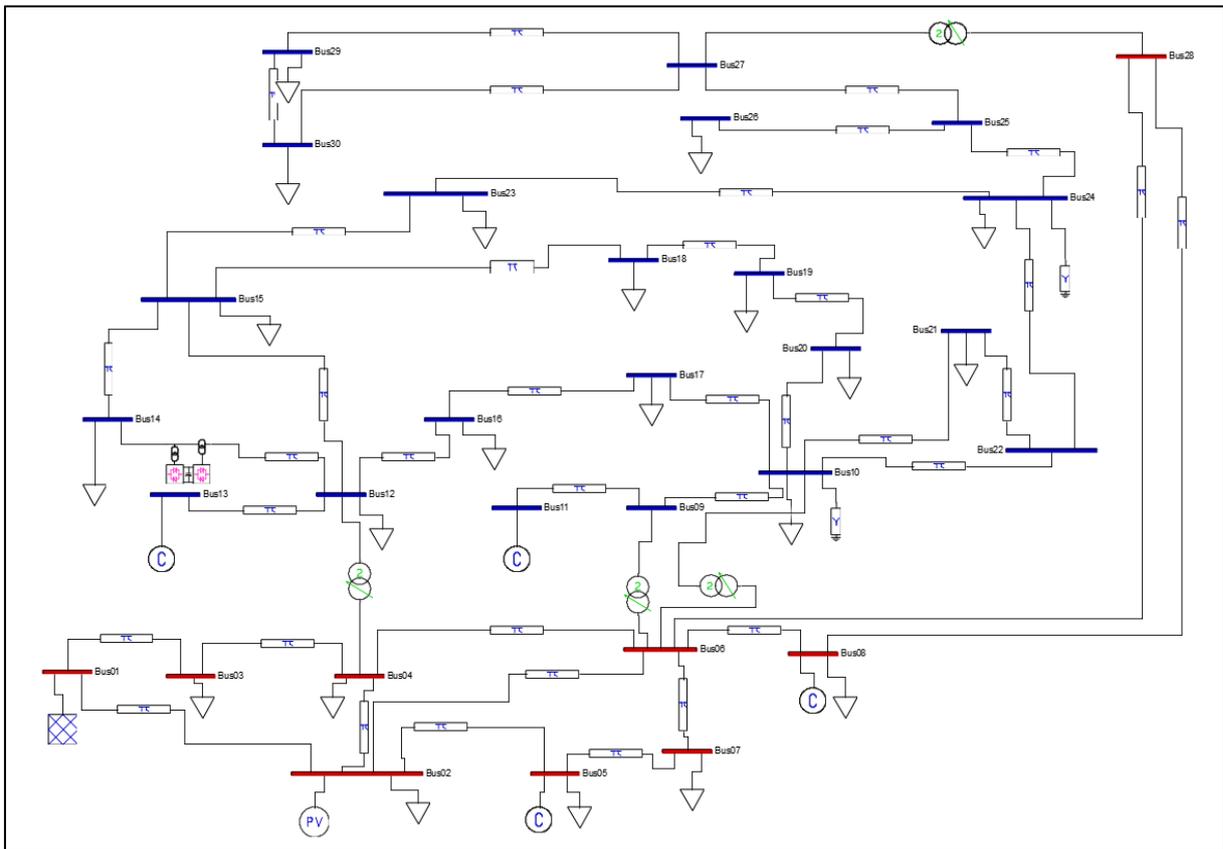


Figure IV. 12 : Topologie du réseau étudié IEEE 30 avec UPFC

Dans le cas où le UPFC est installé ; on remarque que les tensions ainsi l'écoulement de puissance de système améliorent.

La figure suivante montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseaux :

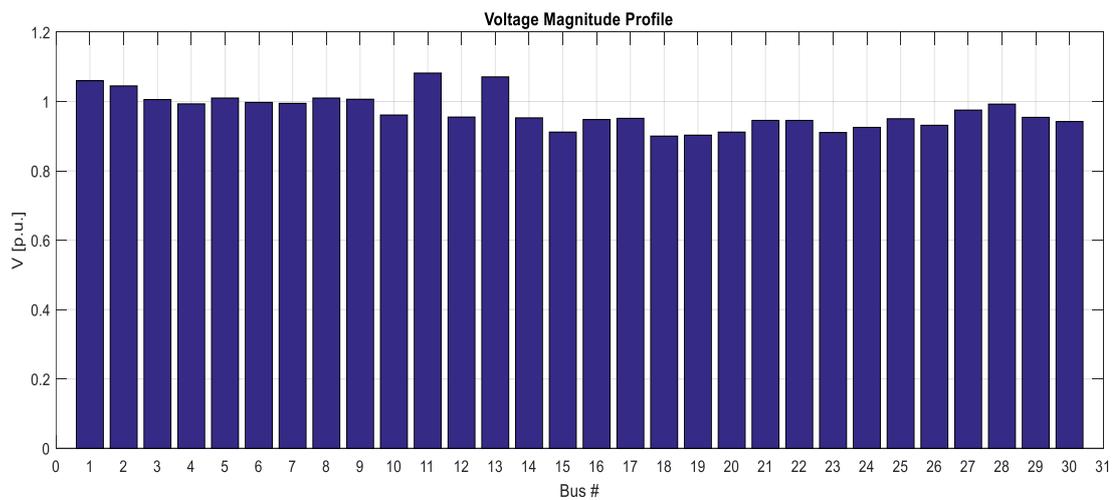


Figure IV. 13 : Amplitude des tensions avec compensation série-shunt (UPFC)

On voit que le système revient à son état de stabilité.

IV.6.6 Calcul de l'écoulement de la puissance du réseau IEEE30 avec UPFC :

L'écoulement de puissance est calculé par le biais du PSAT. Les résultats obtenus, sont illustrés sur le tableau ci-dessous :

JB	V [p.u]	Angle [Rad]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]	P charge [p.u]	Q charge [p.u]
JB 01	1,06	0	2,632736	-0,11319	0	0
JB 02	1,045	-0,09531	0,4	0,756737	0,217	0,127
JB 03	1,005717	-0,1289	-8,1E-15	-6,2E-16	0,024	0,012
JB 04	0,993196	-0,15916	-1,9E-14	2,62E-14	0,076	0,016
JB 05	1,01	-0,25044	5,55E-16	0,425327	0,94	0,19
JB 06	0,997344	-0,19322	-1,2E-14	-1,7E-14	0	0
JB 07	0,994664	-0,22603	1,36E-15	2,66E-15	0,228	0,109
JB 08	1,01	-0,21044	3,83E-15	0,755731	0,3	0,3
JB 09	1,006541	-0,2505	-2,5E-14	8,21E-15	0	0
JB 10	0,961014	-0,28263	-2,1E-14	3,78E-14	0,058	0,042626
JB 11	1,082	-0,2505	5,55E-17	0,392534	0	0
JB 12	0,955093	-0,26802	6,88E-15	-2,5E-14	0,112	0,075
JB 13	1,071	-0,26802	-5,6E-16	0,88669	0	0
JB 14	0,952852	-0,26845	5,58E-14	4,29E-14	0,062	0,738
JB 15	0,911807	-0,26468	-5,6E-14	5,06E-14	0,082	0,3209
JB 16	0,947926	-0,2799	1,91E-15	-1,9E-15	0,035	0,03
JB 17	0,951453	-0,28601	1,25E-14	-2,8E-16	0,09	0,058
JB 18	0,900278	-0,2791	3,4E-15	1,03E-14	0,032	0,05
JB 19	0,902958	-0,28655	6,58E-14	-2,3E-14	0,095	0,0509
JB 20	0,911781	-0,2847	-1,8E-14	2,21E-14	0,022	0,09
JB 21	0,945523	-0,29018	2,15E-14	-3,5E-15	0,175	0,112
JB 22	0,945492	-0,28935	2,82E-15	1,54E-14	0	0
JB 23	0,910593	-0,27568	1,46E-14	7,13E-15	0,032	0,059
JB 24	0,925346	-0,28874	1,92E-14	-1,1E-15	0,087	0,071787
JB 25	0,95038	-0,28944	-2,3E-15	3,33E-15	0	0
JB 26	0,931403	-0,29786	7,29E-15	-1,7E-15	0,035	0,023
JB 27	0,97525	-0,28407	-1,8E-14	2,31E-14	0	0
JB 28	0,992481	-0,20491	-9,1E-15	1,27E-14	0	0
JB 29	0,954319	-0,30775	-6,8E-16	3,28E-15	0,024	0,009
JB 30	0,942218	-0,3248	2,69E-14	-5,9E-15	0,106	0,019

Tableau IV.9 : Les tensions et les Puissances de IEEE30 avec l'intégration d'un UPFC.

En présence de compensateur UPFC. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.

IV.6.6.1 Comparaison entre les résultats des pertes de puissance :

Les valeurs des pertes de puissances active et réactive dans chaque ligne sont représentées dans les graphes suivants :

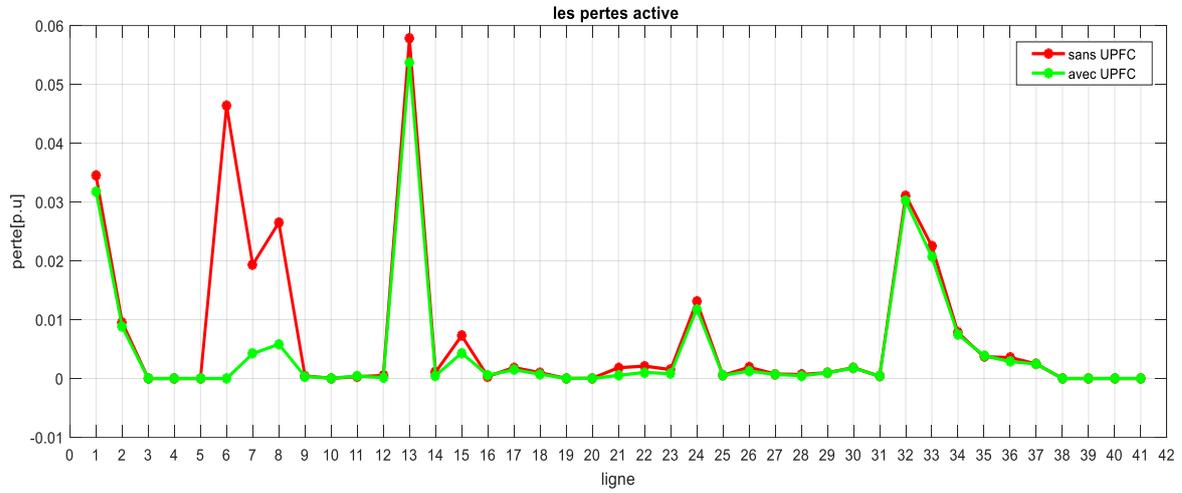


Figure IV.14 : pertes de puissance active après compensation.

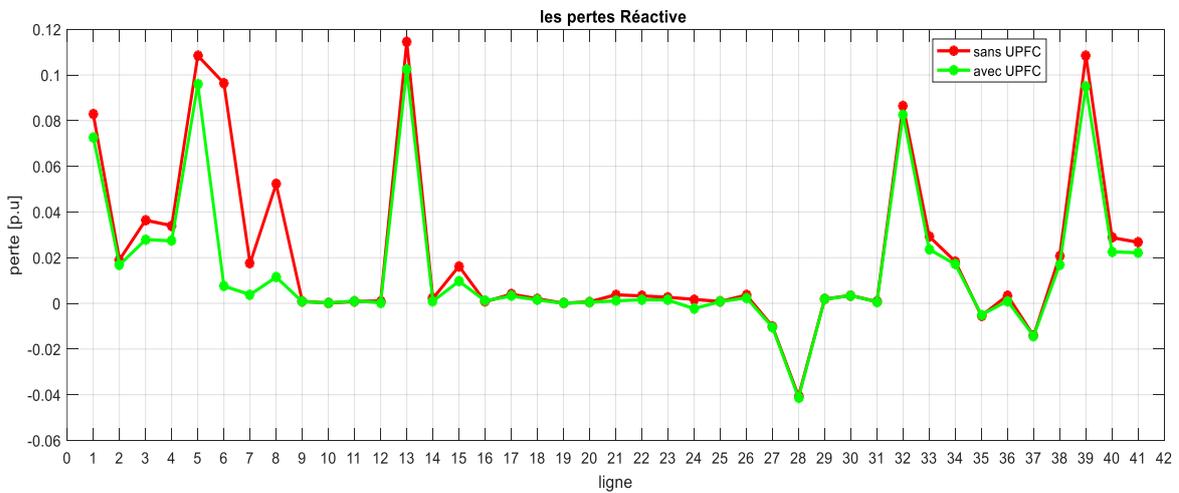


Figure IV.15 : pertes de puissance réactive après compensation.

IV.6.6.2 Comparaison entre les résultats de l'écoulement de puissance sans et avec élément FACTS UPFC :

JB	Sans UPFC			Avec UPFC		
	V [p.u]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]	V [p.u]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]
JB 01	1,06	2,73354	-0,11643	1,06	2,632736	-0,11319
JB 02	1,045	0,4	0,805623	1,045	0,4	0,756737
JB 03	1,003072	-1,6E-16	4,65E-15	1,005717	-8,1E-15	-6,2E-16
JB 04	0,990065	1,53E-16	-9,8E-15	0,993196	-1,9E-14	2,62E-14
JB 05	1,01	6,66E-16	0,439486	1,01	5,55E-16	0,425327
JB 06	0,994623	3,41E-15	1,01E-14	0,997344	-1,2E-14	-1,7E-14
JB 07	0,993036	-1,9E-15	-1,2E-16	0,994664	1,36E-15	2,66E-15
JB 08	1,01	0	0,838728	1,01	3,83E-15	0,755731
JB 09	0,997853	-4,6E-16	-1,7E-15	1,006541	-2,5E-14	8,21E-15
JB 10	0,944881	6,52E-16	2,3E-15	0,961014	-2,1E-14	3,78E-14
JB 11	1,082	1,39E-17	0,437728	1,082	5,55E-17	0,392534
JB 12	0,947784	1,9E-15	3,73E-15	0,955093	6,88E-15	-2,5E-14
JB 13	1,071	5,55E-17	0,942599	1,071	-5,6E-16	0,88669
JB 14	0,784922	-1E-16	4,44E-16	0,952852	5,58E-14	4,29E-14
JB 15	0,855486	-2,1E-16	-5E-16	0,911807	-5,6E-14	5,06E-14
JB 16	0,93678	-1,3E-15	-7,7E-16	0,947926	1,91E-15	-1,9E-15
JB 17	0,936766	6,11E-16	-1,8E-15	0,951453	1,25E-14	-2,8E-16
JB 18	0,85684	6,94E-17	2,4E-15	0,900278	3,4E-15	1,03E-14
JB 19	0,86764	-1,3E-15	-4,2E-15	0,902958	6,58E-14	-2,3E-14
JB 20	0,881049	-5,6E-17	2,55E-15	0,911781	-1,8E-14	2,21E-14
JB 21	0,927124	2,05E-15	4,22E-15	0,945523	2,15E-14	-3,5E-15
JB 22	0,926471	-3,2E-15	-8,1E-15	0,945492	2,82E-15	1,54E-14
JB 23	0,865137	2,08E-16	1,46E-15	0,910593	1,46E-14	7,13E-15
JB 24	0,897792	-8,6E-16	-2,9E-16	0,925346	1,92E-14	-1,1E-15
JB 25	0,931849	1,09E-15	1,39E-15	0,95038	-2,3E-15	3,33E-15
JB 26	0,912477	-1,9E-16	-2,4E-16	0,931403	7,29E-15	-1,7E-15
JB 27	0,962518	-1,6E-16	9,43E-16	0,97525	-1,8E-14	2,31E-14
JB 28	0,989065	-2,5E-15	-3,1E-15	0,992481	-9,1E-15	1,27E-14
JB 29	0,941276	4,27E-16	-1,2E-16	0,954319	-6,8E-16	3,28E-15
JB 30	0,928996	-1,4E-16	-3,5E-16	0,942218	2,69E-14	-5,9E-15
Total des pertes sans UPFC			Total des pertes avec UPFC			
Puissance active [p.u.]			0,303855	Puissance active [p.u.]		0,200736
Puissance réactive [p.u.]			0,864529	Puissance réactive [p.u.]		0,600614

Tableau IV.10 : Les résultats de l'écoulement de puissance d'un réseau de 30 jeux de barres pour le UPFC et sans élément de FACTS.

IV.6.7 Interprétation :

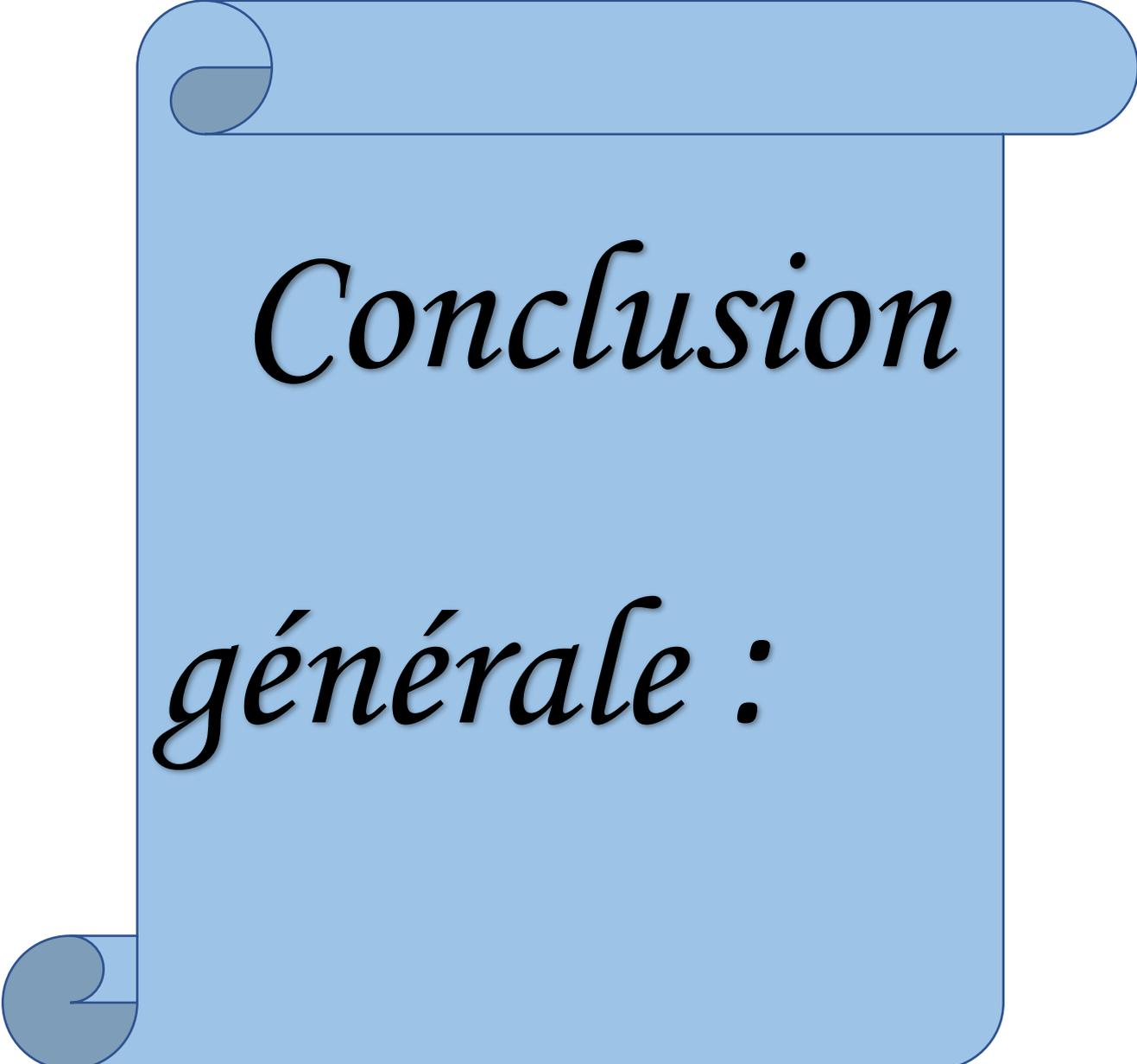
On remarque que l'emplacement du UPFC au niveau du jeu de barre N=14 apporte une amélioration considérable des tensions, qui deviennent par rapport aux résultats précédents.

Dans ce cas, On constate que l'impact de l'UPFC ne se limite pas à son nœud de connexion, adjacents. Cela permet d'améliorer la qualité du transport, d'augmenter le module de tension et de réduire les pertes (active, réactive) de nœud auquel il est connecté et les nœuds voisins. Cet effet positif conduit à la réalisation de la stabilité du réseau avec une bonne amélioration Ceci indique que le UPFC joue une grande influence et important sur le contrôle et l'amélioration de la tension, pour que le système soit en équilibre.

IV.7 Conclusions :

Dans ce chapitre nous avons traité deux réseaux test IEEE dans l'logiciel PSAT dans l'environnement Matlab pour montrer l'influence de la variation de la charge réactive qui engendre des chutes de tensions au niveau de chaque jeu de barre et nous avons montrées aussi l'efficacité des dispositifs FACTS tel que le UPFC pour l'amélioration de la stabilité de ce réseau électrique.

Le dispositif de contrôle UPFC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds. L'UPFC est le dispositif FACTS le plus flexible, offre un contrôle indépendant de la tension, la puissance active et réactive. L'UPFC pourra être utilisé pour la gestion de l'énergie dans les réseaux électriques.



Conclusion

générale :

Conclusion générale :

Le transport de puissance réactive à travers les lignes des réseaux électriques à un effet négatif sur la stabilité en tension, surtout lorsque les générateurs atteignent leur limite de production d'énergie réactive et que les lignes approchent de leur limite de capacité de transmission de puissance. Afin d'améliorer la stabilité de tension du réseau et d'accroître les capacités de transmission de puissance active, il est nécessaire de compenser l'énergie réactive.

Devant l'évolution récente des réseaux électriques, l'accroissement considérable des interconnexions ainsi que les contraintes économiques, la stabilité des réseaux électriques devient plus critique. L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS améliore les performances dynamiques du système électriques tel que :

- ❖ Une meilleure utilisation de moyens de transmissions existants.
- ❖ Augmenter la capacité du transfert du système de transmission.
- ❖ Améliorer la stabilité des réseaux électriques et la qualité de service.

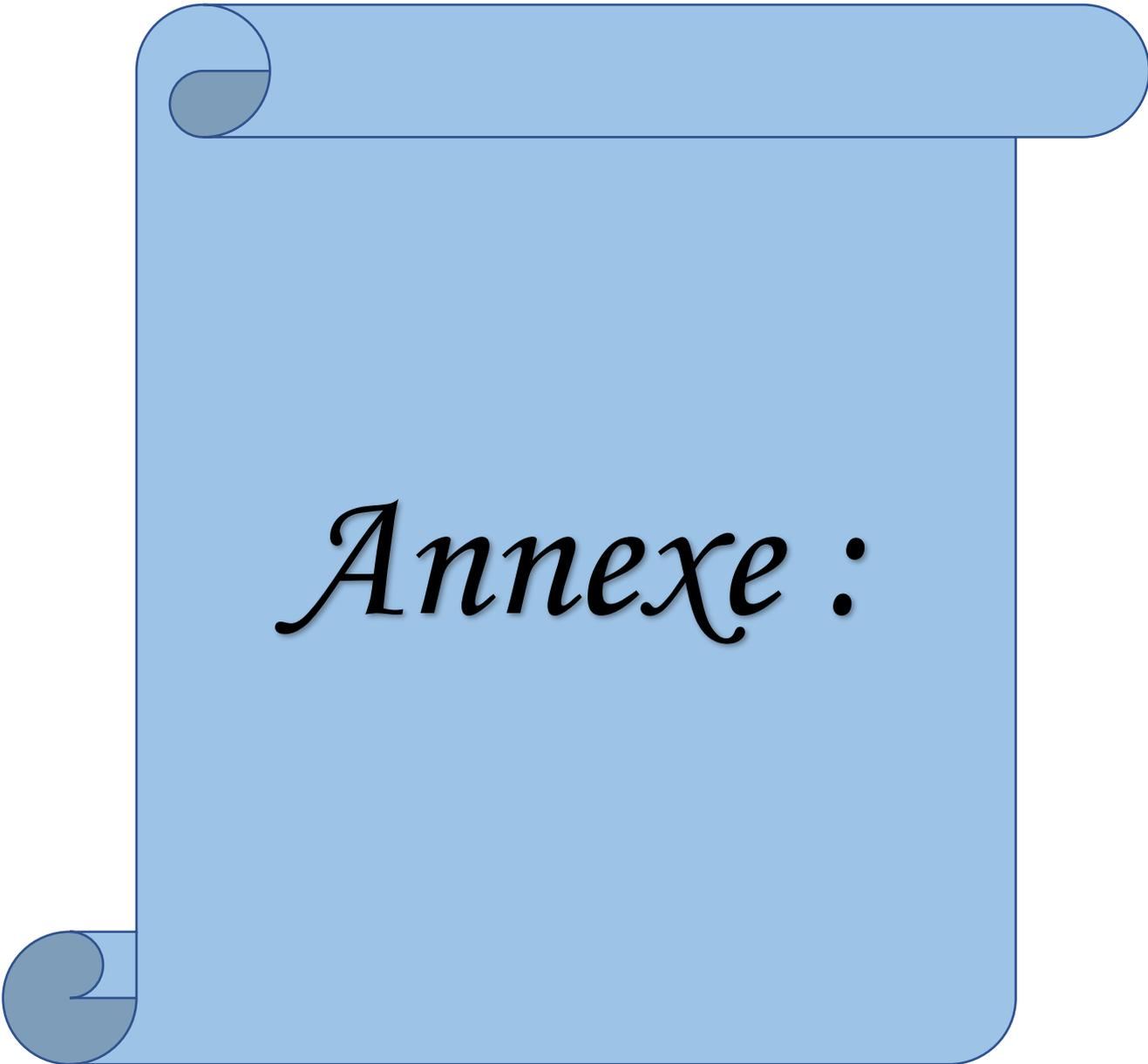
L'étude de flux de puissance est importante pour la planification de l'expansion future des systèmes électriques, ainsi que dans la détermination du meilleur fonctionnement des systèmes existants. Notre travail de recherche a été consacré à l'évaluation de l'aptitude de l'UPFC qu'il est un dispositif de la famille FACTS, à contrôler l'écoulement de puissance à travers une ligne de transmission et compenser la puissance réactive.

Notre étude est portée sur la compensation efficace de l'énergie réactive dans les réseaux de transport, afin d'améliorer la stabilité du système, l'efficacité de la transmission d'énergie, et de réduire les pertes et les coûts liés à l'excès d'énergie réactive.

Pour cela, Nous avons réalisé une application sur deux réseaux standards IEEE, en utilisant de logiciel PSAT.

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

L'étude de la stabilité des réseaux électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux, comme nous avons pu le constater tout le long de ce mémoire. De plus, il est clair que le dispositif UPFC fournit un outil puissant pour l'utilisation rentable de lignes de transport en facilitant le contrôle indépendant de flux de puissance active et réactive, et donc la maximisation du transfert de puissance avec un minimum des pertes.



Annexe :

Annexe

A. Annexe (A)

A.1 Power System Analysis Toolbox (PSAT):

A.1.1 Utilisation de PSAT

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

- ❖ Ouvrir un nouveau fichier.
- ❖ Créer du réseau électrique à étudier.
- ❖ Lancer le modèle de la bibliothèque de simulation.
- ❖ Introduire les données numériques des éléments (générateurs, lignes, transfos, FACTS...).
- ❖ Exécuter l'écoulement de puissances.
- ❖ Exécuter la simulation dans le domaine temporel.

A.1.2 Les principales caractéristiques de PSAT :

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

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

Dans nos applications, nous nous intéressons à l'analyse de la répartition de puissance et à la simulation dans le domaine du temps.[25]

La boîte à outils est également fournie avec un environnement graphique (Simulink), qui est un outil convivial pour la conception du réseau. La Figure suivante représente la bibliothèque-Simulink mise en œuvre dans PSAT.

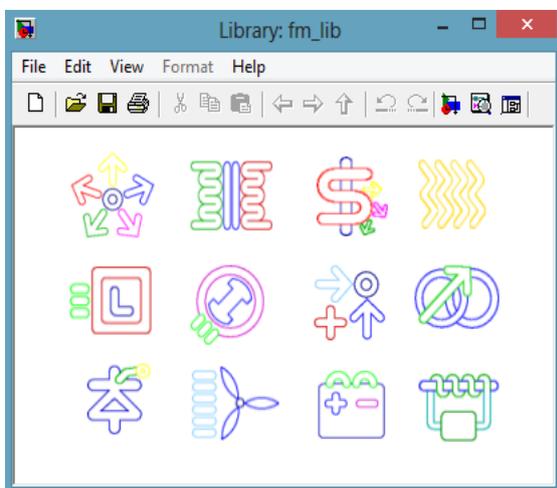


Figure A.1 : Bibliothèque-Simulink de PSAT.

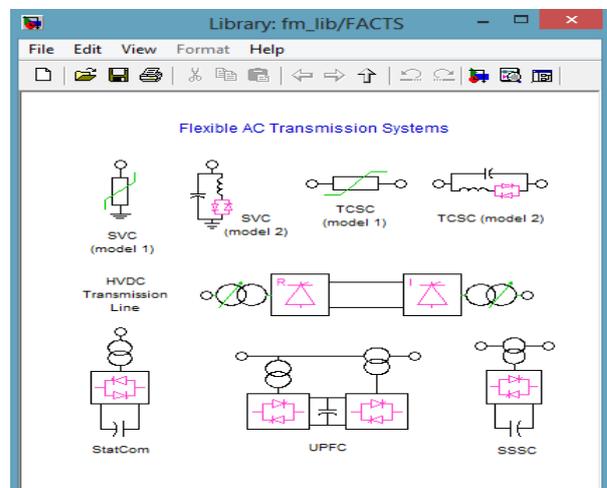


Figure A.2 : Model de FACTS.

Annexe

Les caractéristiques illustrées dans le tableau IV.3 :

- ❖ (PF) : le flux de puissance (power flow).
- ❖ (CPF-VS) : l'analyse d'écoulement de puissance et/ou de la stabilité de la tension (continuation power flow and/or voltage stability analysis).
- ❖ (OPF) : l'écoulement de puissance optimal (optimal power flow).
- ❖ (SSSA) : l'analyse de la stabilité des petits signaux (small signal stability analysis).
- ❖ (TDS) : la simulation du domaine temporel (time domain simulation).
- ❖ (GUI) : l'interface utilisateur graphique (graphical user interface).
- ❖ (CAD) : la construction des réseaux (graphical network construction). [25]

A.2 Données des applications :

A.2.1 Données de réseau IEEE 14 JB :

A.2.1.1 Données des lignes du réseau standard IEEE 14 nœuds :

Ligne	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1-2	0.01938	0.05917	0.0528
1-5	0.05403	0.22304	0.0492
2-5	0.05695	0.17388	0.034
2-3	0.04699	0.19797	0.0438
2-4	0.05811	0.17632	0.0374
3-4	0.06701	0.17030	0.0346
4-5	0.01335	0.04211	0.0128
6-12	0.12291	0.25581	0
6-13	0.06615	0.13027	0
6-11	0.09498	0.19890	0
9-14	0.15711	0.30038	0
9-10	0.03181	0.08450	0
10-11	0.08205	0.19207	0
13-12	0.22092	0.19988	0
13-14	0.17093	0.34802	0
7-9	0	0.11001	0

Tableau A.1 : les données des lignes de réseau IEEE 14 nœuds.

- ❖ **R** : Résistance de la ligne.
- ❖ **X** : Réactance de la ligne.
- ❖ **B** : Susceptance de la ligne.

Annexe

A.2.1.2 Données des transformateurs du réseau standard IEEE 14 nœuds :

Ligne	KV/KV	R (pu)	X (pu)
6-5	69/13.8	0	0.25202
4-7	69/13.8	0.0	0.20912
9-4	69/13.8	0.005	0.55618
7-8	13.8/18	0	0.17615

Tableau A.2 : données des transformateurs de réseau IEEE 14 nœuds.

A.2.2 Données de réseau IEEE 30 JB :

A.2.2.1 Résultat de l'écoulement de puissance à l'état initial du réseau IEEE30 JB :

JB	V [p.u]	Angle [Rad]	P gen [p.u]	Q gen [p.u]	P charge [p.u]	Q charge [p.u]
JB 01	1,06	0	2,609306	-0,19071	0	0
JB 02	1,045	-0,09389	0,4	0,59217	0,217	0,127
JB 03	1,019021	-0,131	-1E-15	-5,6E-15	0,024	0,012
JB 04	1,009633	-0,1615	5,55E-15	1,11E-14	0,076	0,016
JB 05	1,01	-0,24698	-1,4E-15	0,370002	0,94	0,19
JB 06	1,007908	-0,19225	-8,2E-15	-2,6E-14	0	0
JB 07	1,000974	-0,22394	1,36E-15	-1,6E-15	0,228	0,109
JB 08	1,01	-0,20607	2,28E-15	0,442805	0,3	0,3
JB 09	1,038292	-0,24468	-2,2E-16	1,96E-15	0	0
JB 10	1,020403	-0,27267	1,05E-15	-3,7E-15	0,058	0,020268
JB 11	1,082	-0,24468	-1,5E-16	0,227367	0	0
JB 12	1,048848	-0,2633	-1E-15	1,03E-15	0,112	0,075
JB 13	1,071	-0,2633	3,12E-16	0,169466	0	0
JB 14	1,031208	-0,27865	-4,2E-17	5,13E-16	0,062	0,016
JB 15	1,024203	-0,27875	7,36E-16	-3,9E-16	0,082	0,025
JB 16	1,029056	-0,27138	1,39E-16	4,65E-16	0,035	0,018
JB 17	1,017959	-0,27639	7,36E-16	2,89E-15	0,09	0,058
JB 18	1,010491	-0,28915	1,92E-15	1,28E-15	0,032	0,009
JB 19	1,005565	-0,2919	-2,1E-15	-2,2E-15	0,095	0,034
JB 20	1,008481	-0,28811	2,48E-15	4,81E-16	0,022	0,007
JB 21	1,008023	-0,28071	-6,1E-16	4,04E-15	0,175	0,112
JB 22	1,008671	-0,28042	-3E-15	-2,4E-15	0	0
JB 23	1,011899	-0,28787	-6,9E-17	-9E-16	0,032	0,016
JB 24	0,998124	-0,287	-4,7E-16	-8,7E-16	0,087	0,067027
JB 25	1,00126	-0,28149	-1,4E-15	4,01E-16	0	0
JB 26	0,983287	-0,28905	1,67E-16	-5,1E-16	0,035	0,023
JB 27	1,01193	-0,27329	-1,7E-15	-7E-16	0	0
JB 28	1,003913	-0,20326	1,53E-16	-3,7E-15	0	0
JB 29	0,991845	-0,29525	6,25E-17	-4,1E-16	0,024	0,009
JB 30	0,980228	-0,31103	2,5E-16	5,93E-16	0,106	0,019

Tableau A.3 : Niveau de tensions, puissances injectées et consommées de IEEE30.

Annexe

A.2.2.2 Les données des lignes de reseau IEEE30 :

JB de Départ	JB D'arrive	La ligne	P transits [p.u]	Q transits [p.u]	P perdus	Q perdus
JB 01	JB 03	1	0,875779	0,056422	0,031108	0,069589
JB 03	JB 04	2	0,820672	-0,02517	0,008567	0,015955
JB 09	JB 10	3	0,269592	0,172623	0	0,010457
JB 11	JB 09	4	-1,5E-16	0,227367	-6,9E-18	0,009185
JB 13	JB 12	5	3,12E-16	0,169466	0	0,003505
JB 14	JB 12	6	-0,08024	-0,03199	0,000864	0,001795
JB 15	JB 14	7	-0,01811	-0,01588	0,000122	0,00011
JB 15	JB 12	8	-0,1789	-0,10176	0,002673	0,005266
JB 12	JB 16	9	0,076386	0,068319	0,000902	0,001897
JB 16	JB 17	10	0,040483	0,048422	0,000197	0,000723
JB 17	JB 10	11	-0,04971	-0,0103	8,06E-05	0,00021
JB 18	JB 19	12	0,032682	0,022394	9,82E-05	0,000199
JB 01	JB 02	13	1,733526	-0,24713	0,052159	0,097714
JB 19	JB 20	14	-0,06242	-0,0118	0,000136	0,000271
JB 20	JB 10	15	-0,08455	-0,01908	0,000691	0,001544
JB 15	JB 18	16	0,065226	0,032501	0,000543	0,001106
JB 10	JB 21	17	0,155376	0,096922	0,001121	0,002412
JB 10	JB 22	18	0,074537	0,043922	0,000523	0,001078
JB 21	JB 22	19	-0,02075	-0,01749	8,41E-06	1,71E-05
JB 15	JB 23	20	0,049789	0,060134	5,81E-05	0,001174
JB 23	JB 24	21	0,017731	0,042961	0,000278	0,00057
JB 24	JB 22	22	-0,05287	-0,02472	0,000393	0,000612
JB 25	JB 24	23	0,016733	3,59E-06	5,26E-05	9,19E-05
JB 04	JB 02	24	-0,42723	-0,07025	0,010355	-0,0073
JB 26	JB 25	25	-0,035	-0,023	0,000462	0,000689
JB 27	JB 25	26	0,052552	0,024377	0,000358	0,000684
JB 28	JB 06	27	-0,18957	-0,019	0,000605	-0,01101
JB 28	JB 08	28	0,004131	-0,05342	6,51E-05	-0,04319
JB 29	JB 27	29	-0,06105	-0,01508	0,000883	0,001669
JB 30	JB 27	30	-0,0693	-0,01357	0,001662	0,003128
JB 29	JB 30	31	0,037046	0,006077	0,000344	0,000649
JB 02	JB 05	32	0,823668	0,027812	0,029434	0,079517
JB 02	JB 06	33	0,603117	0,029552	0,019486	0,01971
JB 04	JB 06	34	0,712273	-0,15563	0,006189	0,012373
JB 06	JB 07	35	0,379403	-0,04077	0,00381	-0,00545
JB 06	JB 08	36	0,297186	-0,13736	0,001252	-0,00478
JB 05	JB 07	37	-0,14577	0,128297	0,001826	-0,01602
JB 06	JB 09	38	0,269592	-0,03114	-1,1E-16	0,014423
JB 04	JB 12	39	0,45106	0,16876	-1,1E-16	0,050595
JB 06	JB 10	40	0,153357	0,043117	-5,6E-17	0,013042
JB 28	JB 27	41	0,185441	0,072415	-2,8E-17	0,014592

Tableau A.4 : Les données des lignes étudié de IEEE 30.

Annexe

A.2.2.3 Données des lignes du réseau standard IEEE 30 nœuds :

Ligne	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1-2	0,0192	0,0575	0,0528
1-3	0,0452	0,1652	0,0408
2-4	0,057	0,1737	0,0368
3-4	0,0132	0,0379	0,0084
2-5	0,0472	0,1983	0,0418
2-6	0,0581	0,1763	0,0374
4-6	0,0119	0,0414	0,009
5-7	0,046	0,116	0,0204
6-7	0,0267	0,082	0,017
6-8	0,012	0,042	0,009
9-11	0	0,208	0
9-10	0	0,11	0
12-13	0	0,14	0
12-14	0,1231	0,2559	0
12-15	0,0662	0,1304	0
12-16	0,0945	0,1987	0
14-15	0,221	0,1997	0
16-17	0,0524	0,1923	0
15-18	0,1073	0,2185	0
18-19	0,0639	0,1292	0
19-20	0,034	0,068	0
10-20	0,0936	0,209	0
10-17	0,0324	0,0845	0
10-21	0,0348	0,0749	0
10-22	0,0727	0,1499	0
21-22	0,0116	0,0236	0
15-23	0,1	0,202	0
22-24	0,115	0,179	0
23-24	0,132	0,27	0
24-25	0,1885	0,3292	0
25-26	0,2544	0,38	0
25-27	0,1093	0,2087	0
27-29	0,2198	0,4153	0
27-30	0,3202	0,6027	0
29-30	0,2399	0,4533	0
8-28	0,0636	0,2	0,0428
6-28	0,0169	0,0599	0,013

Tableau A-5 : les données des lignes de réseau IEEE 30 nœuds.

Annexe

A.2.2.3 Données des transformateurs du réseau standard IEEE 30 nœuds :

Ligne	KV/KV	R (pu)	X (pu)
4-12	132/33	0	0,256
6-9	132/33	0	0,208
6-10	132/33	0	0,556
28-27	132/33	0	0,396

Tableau A-6 : données des transformateurs de réseau IEEE 14 nœuds.

Annexe (B)

B.1 Transformation de PARK :

Cette transformation permet le passage d'un système triphasé équilibré à un système biphasé. La transformation de PARK définie par la matrice de rotation $P(\theta)$ permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (a, b, c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d, q, o). Le produit matriciel définissant la transformation de Park est exprimé sous forme matricielle :

$$[X]_{dq0} = P(\theta) * [X]_{abc}$$

Avec, la transformation de conservation de l'amplitude est considérée :

$$P(\theta) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

B.2 Transformation de PARK inverse :

Cette transformation permet le passage d'un système biphasé à un système triphasé équilibré. Le produit matriciel définissant la transformation de Park inverse est exprimé sous forme matricielle :

$$[X]_{dq0} = P(\theta)^{-1} * [X]_{abc}$$

Références

- [1] : M. ZELLAGUI, « étude des protections des réseaux électrique MT (30 &10 kV) » mémoire magistère, Université Mentouri Constantine ,2009.
- [2] : S. FERAHTIA, « Calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques lors de l'intégration des fermes éoliennes et des dispositifs FACTS » mémoire du master d'université de m'sila, 2012/2013.
- [3] G. NAUDET et P. REUSSE, « Énergie, électricité et nucléaire », EDP Sciences, France, 2008.
- [4] N. KAIDI, M. MESADI,« Compensateur statique d'énergie réactive (SVC) » mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université d'ADRAR, 2019/2020.
- [5] D. LOUARDIA, « Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS", Mémoire de Magister Soutenu au département d'électrotechnique Université de Batna 2009.
- [6] A. SEIFI, Ph.D. S GHOLAMI, M.S.; and A. SHABANPOUR, M.S, «Power Flow Study and Comparison of FACTS Series (SSSC) », Shunt (STATCOM), and Shunt-Series (UPFC). The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 11. Number 1. May 2010 (Spring).
- [7] V. IGNATOVA, « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'UJF, Université JOSEPH FOURIER, 20/10/2006.
- [8] F. CHERIF, « Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique » thèse de doctorat, université de Batna,27 Mai 2006.
- [9] P. KUNDUR et A. AL, «Definition and classification of power system stability » IEEE Trans.Power Syst., vol. 19 No.2, Mai 2004. 65.
- [10] M. EREMIA, J. TRECAT, and A. GERMOND, «Reseaux Electriques Aspects actuels» Editura Tehnica, 2000.
- [11] Y. GONG, «Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index Using Synchronized Phasor Measurement. » PHD thesis,
- [12] GUILLAUME RAMI, « Contrôle de tension auto adaptif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution », Electric power. Institut polytechnique de Grenoble – INPG ,2006.
- [13] S. BOUBATA, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC », Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 09 juin 2009.

Références

- [14] N. DEGHTMOUS, « Contribution à la stabilité de la tension par compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques », mémoire pour obtention du diplôme de Master université de Bejaïa, 2020.
- [15] H. SEKHANE, « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS », mémoire de magister, université de constantine1, 2013.
- [16] Y. LANSARI, « amélioration de la qualité de l'énergie dans un réseau électrique par le dispositif STATCOM » université Ahmed draïa – adrar 2017.
- [17] Site d'internet sur le lien : http://www.univsaida.dz/butec/doc_num.php?explnum_id=293.
- [18] D. K. YOUCEF ISLAM, « Incorporation de l'UPFC dans le calcul de la répartition des puissances dans un réseau électrique » ; Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème Cycle : Electrotechnique ; Option : Réseaux Electriques ; Université de Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès ; 2015.
- [19] AY. ABDELOUAHAB, « Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique : SVC ». Mémoire de Magistère en Electrotechnique, Université EL Hadj Lakhdar Batna 2013.
- [20] B. ETAYEB ET E. ALKHALIFA, « Synthèse de réglage appliqué pour contrôle d'un système UPFC », MEMOIRE MASTER ACADEMIQUE, Université Ahmed Draïa Adrar, 2019.
- [21] H. KHEFOUFI ET M. BENYOUCEF, « Etude de variation de charge universel UPFC pour la compensation de puissance active et réactive dans un réseau électrique », Mémoire en vue d'obtention du diplôme ING, UNSaida, 2008-2009.
- [22] M. MENTEFA ET K. AKERMI, « Etude de réglage de système UPFC pour le contrôle des puissances active et réactive », Mémoire en vue d'obtention du diplôme DEUA, UNSaida, 2006-2007.
- [23] T. ALLAOUI, « Réglage robuste de UPFC pour optimiser l'écoulement de puissance dans un réseau électrique », Mémoire en vue d'obtention du diplôme de MAGISTER, USTO, 2002
- [24] B. HAKKOUM M. ABDALILAH ET L. ALI, « Compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par système FACTS », mémoire de master, université Kasdi Merbah Ourgla, 2016.
- [25] FEDERICO MILANO, «Quick Reference Manual for PSAT version 2.1.2, June 26, 2008, Copyright c 2003 - 2008 Federico Milano».
- [26] FEDERICO MILANO, « Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0 β1, July 9, 2006, Copyright c 2003 - 2006 Federico Milano».

