

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES



Mémoire de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique

Option : Réseaux Electrique

Thème

**Contribution à la stabilité de
la tension par compensation
de l'énergie réactive dans les
réseaux électriques**

Rédigé par :

M^{lle} DEGHI MOUS Nacima

M^{lle} KENNOUCHE Nessrine

Encadré par :

Mr A. BOUZIDI

Année universitaire : 2019/2020

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 exprimons nos profonds remerciements et tous nos respects pour nos très chers **parents**, qui nous ont éduqué, encadré et soutenu par tous les moyens, jours après jours, depuis notre naissance jusqu'à ce jour-là.

Nos sincères gratitudes à Mr **A. BOUZIDI** pour la qualité de son encadrement, ses judicieux conseils et son encouragement. Les plus grandes leçons ne sont pas tirées d'un livre mais de la sagesse d'un enseignant de votre générosité. Merci d'avoir pris le temps de nous aider au cours de cette période et de nous avoir accompagné dans notre travail de recherche.

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

Nos remerciements s'étendent également à tous nos **enseignants d'électrotechnique** de l'université de Bejaia durant nos années d'études

Un remerciement spécial aux étudiants **Master Réseaux électriques**.

Nous remercions en fin toute personne qui nous a aidé de prêt ou loin à la réalisation de notre travail.

NACIMA ET NESSRINE

Dédicaces

Avant tout à la mémoire de ma grand-mère paix a son âme, **DJOHRA**

A mes parents "**FARIDA & AOMAR**"

Pour leurs encouragements, conseils et leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, même si Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon amour infini.

Je le dédie

À mes très chers frères **HAMID ET MASSI** ainsi que ma sœur **LYNDA**

A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines ;

Une spéciale dédicace à tous les membres de E307 avec qui j'ai passé des moments inoubliables et que j'aime énormément, que notre amitié puisse durer a tous jamais,

NABILA, NADJET, WISSAM.K, LYNDA, SARA, WISSAM.I, et la meilleure pour la fin **LEILA**

Sans oublier tout ceux avec qui j'ai partagé mes journées, et partager des faux rires **SABRINA, LAMIA, RYMA, RADIA, SARA, RAOUF** et à mon binôme de cœur **JUBA**

Ainsi que toute la promo de **RESEAUX ELECTRIQUES**

Je dédie ce travail aussi à celle que j'ai trouvé à mes coté et qui m'a énormément aidé et soutenu **SABRINA-AMINA-IBTISSAM** merci du fond du cœur et merci d'avoir été l'épaule sur laquelle j'ai pu compter.

A ma binôme et amie **NESSRINE**

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à **NADJIM** que dieu nous garde ensemble pour l'éternité.

DEGHMOUS NACIMA

DEDICACE

En signe de respect et de reconnaissances, Je tiens dédier ce modeste travail :

A la mémoire de mon père.

A ma mère et mes deux sœurs **Maissa** et **Melinda**, en témoignage et en gratitude de leurs soutien permanent durant ma vie, leurs sacrifices illimités et leurs réconforts moral.

A toute ma famille

A tous les membres de l'association **kafil el yatim** qui étaient toujours là pour m'encourager

A mon très cher **Oussama**

A tous mes chers amis sans exception spécialement **Juba, Sarah, Sabrina, Sissa** et **Lynda**

A toute la promo d'électrotechnique en général et **RESEAUX ELECTRIQUES** en particulier.

A ma chère amie et binôme **Nacima**.

Et à tous ceux qui m'ont encouragé.

KENNOUCHE NESSRINE

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

Liste des figures

Liste des tableaux

| | |
|--|----------|
| Introduction générale..... | 1 |
| I. Généralités, profil et paramètre de contrôle de la tension..... | 2 |
| I.1 Introduction | 2 |
| I.2 Définition d'un réseau électrique | 2 |
| I.3 Fonctionnement du réseau électrique | 3 |
| I.4 Les niveaux de tension des réseaux..... | 3 |
| I.5 Structure d'un réseau électrique | 4 |
| I.5.1 Réseau de transport | 4 |
| I.5.2 Réseau de répartition..... | 5 |
| I.5.3 Réseau de distribution | 5 |
| I.6 Qualité de l'énergie électrique..... | 6 |
| I.6.1 Amplitude..... | 6 |
| I.6.2 Fréquence | 6 |
| I.6.3 Forme d'onde | 6 |
| I.6.4 Symétrie..... | 6 |
| I.7 Réglage de la tension..... | 6 |
| I.7.1 Réglage primaire (les premières secondes après perturbation) | 8 |
| I.7.2 Réglage secondaire (dans les 15 minutes après perturbation)..... | 8 |
| I.7.3 Réglage tertiaire (dans les 15 à 30 minutes après perturbation)..... | 10 |
| I.8 Dégradation de la qualité de la tension..... | 11 |
| I.8.1 Variation ou fluctuation de la fréquence | 11 |
| I.8.2 Fluctuation de tension | 11 |
| I.8.2.1 Origines des variations et fluctuations de tens..... | 12 |
| I.8.3 Creux de tension..... | 12 |
| I.8.3.1 Origines des creux de tension..... | 12 |
| I.8.4 Interruption courte ou coupure brève | 12 |
| I.8.5 Bosses de tension..... | 13 |
| I.8.6 Chute de tension | 13 |
| I.8.7 Tension et/ou courant transitoire | 14 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| I.8.8 | Déséquilibre de tension | 14 |
| I.8.8.1 | Origines de déséquilibres..... | 15 |
| I.8.9 | Les harmoniques..... | 15 |
| I.9 | Définition de la stabilité d'un réseau électrique | 16 |
| I.10 | Classification de la stabilité des réseaux électriques | 16 |
| I.10.1 | Stabilité de l'angle du rotor (angulaire)..... | 17 |
| I.10.2 | Stabilité de la fréquence | 19 |
| I.10.3 | Stabilité de tension | 19 |
| I.10.3.1 | Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations..... | 19 |
| I.10.3.2 | Stabilité de la tension vis-à-vis des grandes perturbations..... | 19 |
| I.10.4 | Instabilité de la tension..... | 19 |
| I.10.4.1 | Causes de l'instabilité de la tension..... | 19 |
| I.10.4.2 | Importance et incidents..... | 20 |
| I.10.4.3 | Caractéristiques et analyse de la stabilité de la tension..... | 20 |
| I.10.4.4 | Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension..... | 21 |
| I.11 | Méthodes d'amélioration de la stabilité de la tension | 21 |
| I.12 | Problèmes rencontrés dans les réseaux de transport..... | 21 |
| I.13 | Les méthodes récentes d'amélioration de la stabilité | 22 |
| I.14 | Conclusion..... | 23 |
| II. | Compensation de la puissance réactive..... | 25 |
| II.1 | Introduction | 25 |
| II.2 | Puissance Réactive | 25 |
| II.2.1 | Définition de l'énergie réactive consommée..... | 25 |
| II.2.2 | Importance de la puissance réactive | 25 |
| II.2.3 | Bilan de la puissance réactive..... | 25 |
| II.2.4 | Transport de la puissance active et réactive | 26 |
| II.2.5 | Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive..... | 26 |
| II.2.5.1 | Chute de tension sur une ligne..... | 27 |
| II.2.5.2 | Contrôle de la tension..... | 29 |
| II.3 | La Compensation de la puissance réactive..... | 29 |
| II.3.1 | Rôles de la puissance réactive | 30 |
| II.3.2 | Principe général de la compensation | 30 |
| II.3.3 | Rôle de la compensation de la puissance réactive..... | 30 |
| II.3.4 | Moyens de compensation de l'énergie réactive..... | 31 |
| II.3.4.1 | Les compensateurs asynchrones..... | 31 |
| II.3.4.2 | Groupes thermiques et hydrauliques..... | 32 |
| II.3.4.3 | Condensateurs..... | 32 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| II.3.4.4 | Inductances..... | 32 |
| II.3.4.5 | Compensateurs statiques..... | 32 |
| II.4 | Les dispositifs FACTS | 33 |
| II.4.1 | Définition..... | 33 |
| II.4.2 | Rôle des dispositifs FACTS | 33 |
| II.4.3 | Classification des dispositifs FACTS..... | 34 |
| II.4.4 | Avantages et les Inconvénients de la technologie des dispositifs FACTS | 35 |
| II.4.4.1 | Avantages | 35 |
| II.4.4.2 | Inconvénients | 35 |
| II.4.5 | Contraintes des dispositifs FACTS | 36 |
| II.5 | Conclusion..... | 36 |
| III. | Écoulement de puissance..... | 38 |
| III.1 | Introduction | 38 |
| III.2 | Concept général de l'écoulement de puissance | 38 |
| III.3 | But de l'étude de l'écoulement de puissance | 38 |
| III.4 | Problème de l'écoulement de puissance..... | 39 |
| III.4.1 | Nœud de charge(PQ)..... | 39 |
| III.4.2 | Nœud générateur(PV)..... | 39 |
| III.4.3 | Accès bilan | 40 |
| III.5 | Modélisation des éléments de puissance d'un réseau électrique..... | 40 |
| III.5.1 | Modèle de l'alternateur(générateur) | 40 |
| III.5.2 | Modèle de la ligne électrique [48]..... | 40 |
| III.5.2.1 | Ligne de transmission courte ($l < 80$ km)..... | 40 |
| III.5.2.2 | Ligne de transmission moyenne ($80 < l < 250$)..... | 41 |
| III.5.2.3 | Ligne de transmission longue ($l > 250$ km)..... | 41 |
| III.5.3 | Charge | 42 |
| III.5.4 | Les compensateurs synchrones..... | 42 |
| III.5.5 | Les compensateurs statiques..... | 42 |
| III.5.6 | Les transformateurs [49]..... | 43 |
| III.6 | Classification des variables de l'écoulement de puissance | 43 |
| III.6.1 | Les variables de perturbation ou non contrôlables | 44 |
| III.6.2 | Les variables contrôlables (de contrôle et d'état) | 44 |
| III.6.2.1 | Variables d'état..... | 44 |
| III.6.2.2 | Variables de contrôle..... | 44 |
| III.7 | Écoulement de puissance..... | 45 |
| III.7.1 | Classification des accès d'un réseau électrique..... | 45 |
| III.7.2 | Formation de la matrice admittance nodale [Ybus]..... | 45 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| III.7.2.1 | Formation de [Ynodale] (Ybus) à partir des admittances des éléments du réseau..... | 46 |
| III.7.2.2 | Dérivation de la matrice [Ybus]..... | 46 |
| III.8 | Equations de l'écoulement de puissance..... | 47 |
| III.8.1 | Equations générales de la puissance..... | 47 |
| III.8.2 | Puissances écoulées dans les lignes..... | 47 |
| III.8.3 | Puissance écoulée dans les transformateurs régulateurs..... | 48 |
| III.8.4 | Calcul des pertes totales dans le réseau..... | 48 |
| III.9 | Méthodes de calcul de l'Écoulement de puissance..... | 49 |
| III.10 | Formulation du problème d'écoulement de puissance..... | 49 |
| III.10.1 | Écoulement de puissance par la méthode de Newton Raphson..... | 50 |
| III.10.2 | Formulation des équations de la méthode de Newton Raphson..... | 51 |
| III.10.3 | Système d'équation à résoudre..... | 52 |
| III.10.4 | Calcul des éléments du Jacobien [52]..... | 52 |
| III.10.4.1 | Eléments de J1..... | 52 |
| III.10.4.2 | Eléments de J2..... | 52 |
| III.10.4.3 | Eléments de J3..... | 53 |
| III.10.4.4 | Eléments de J4..... | 53 |
| III.11 | Organigramme de la méthode de Newton-Raphson..... | 54 |
| III.12 | Conclusion..... | 55 |
| IV. | Simulation et résultats..... | 57 |
| IV.1 | Introduction..... | 57 |
| IV.2 | Logiciel de simulation..... | 57 |
| IV.3 | Etude du profil et de la stabilité de la tension d'un réseau de 14Jdb et du réseau 6Jdb..... | 58 |
| IV.3.1 | Calcul de l'écoulement de puissance continu(CPF)..... | 61 |
| IV.3.2 | Calcul de l'écoulement de la puissance avec compensateur (STATCOM)..... | 65 |
| IV.4 | Interprétation des résultats..... | 69 |
| IV.5 | Conclusion..... | 70 |
| | Conclusion générale..... | 71 |
| | BIBLIOGRAPHIE..... | 72 |
| | ANNEXE..... | 76 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 réseau électrique | 3 |
| Figure I-2 niveau de tension | 4 |
| Figure I-3 structure d'un réseau électrique | 4 |
| Figure I-4 exemple d'un réseau de transport | 5 |
| Figure I-5 organisation des réglages hiérarchisé de tension | 7 |
| Figure I-6 principe du réglage RST | 9 |
| Figure I-7 principe du réglage RSCT | 10 |
| Figure I-8 exemple de fluctuation de tension | 11 |
| Figure I-9 exemple d'un creux de tension | 12 |
| Figure I-10 cas d'une consommation alimenté par une ligne depuis une centrale | 13 |
| Figure I-11 cas d'une forte consommation alimenté par une ligne depuis une centrale | 13 |
| Figure I-12 cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales | 14 |
| Figure I-13 exemple d'un cas de surtension transitoire | 14 |
| Figure I-14 déséquilibre de tension | 15 |
| Figure I-15 harmonique | 16 |
| Figure I-16 classification des différents types de stabilité | 17 |
| Figure I-17 tracé de l'angle rotatique en fonction de temps | 18 |
| Figure I-18 exemple d'un réseau radial | 20 |
| Figure I-19 méthodes d'amélioration de la stabilité | 23 |
| Figure II-1 exemple ligne de transport | 26 |
| Figure II-2 ligne électrique | 27 |
| Figure II-3 diagramme vectoriel | 27 |
| Figure II-4 principe de la compensation de la puissance réactive | 30 |
| Figure II-5 intérêt de la compensation | 31 |
| Figure II-6 compensateur statique | 33 |
| Figure II-7 classification des dispositifs FACTS | 35 |
| Figure III-1 symbole d'un générateur | 40 |
| Figure III-3 modèle d'une ligne courte | 41 |
| Figure III-4 ligne de longueur moyenne représenter en π | 41 |
| Figure III-5 schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur | 41 |
| Figure III-6 symbole d'une charge | 42 |
| Figure III-7 symbole d'un compensateur synchrone | 42 |
| Figure III-9 exemple d'un transformateur | 43 |
| Figure III-10 organigramme de la méthode de newton raphson | 54 |
| Figure IV-1 interface graphique du PSAT 2.1.11 | 58 |
| Figure IV-2 topologie du réseau 6 jeux de barres | 59 |
| Figure IV-3 topologie du réseau 14 jeux de barres | 59 |
| Figure IV-4 organigramme du processus CPF avec PSAT | 60 |
| Figure IV-5 profil de tension (réseau a) | 61 |
| Figure IV-6 pertes de puissance dans les lignes (réseau a) | 62 |
| Figure IV-7 profil de tension (réseau b) | 63 |
| Figure IV-8 pertes de puissance dans les lignes (réseau b) | 65 |
| Figure IV-9 profil de tension après compensation (réseau a) | 66 |
| Figure IV-10 pertes de puissance après compensation (réseau a) | 67 |
| Figure IV-11 profil de tension après compensation (réseau b) | 68 |
| Figure IV-12 pertes de puissance après compensation (réseau b) | 69 |
| Figure A-1 interface graphique du PSAT 2.1.11 | 76 |

Listes des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau IV-1 comparaison entre différentes méthodes d'analyse d'un réseau électrique | 58 |
| Tableau IV-2 résultats du CPF (réseau a) | 61 |
| Tableau IV-3 pertes de puissance dans les lignes (réseau a) | 62 |
| Tableau IV-4 résultats du CPF (réseau b) | 63 |
| Tableau IV-5 pertes de puissance dans les lignes (réseau b) | 64 |
| Tableau IV-6 résultats de l'écoulement de puissance après compensation (réseau a) | 65 |
| Tableau IV-7 pertes de puissance après compensation (réseau a) | 66 |
| Tableau IV-8 résultats de l'écoulement de puissance après compensation (réseau b) | 67 |
| Tableau IV-9 pertes de puissance après compensation (réseau b) | 68 |
| Tableau A-1 format de la structure bus.con | 77 |
| Tableau A-2 format de la structure line.con | 78 |
| Tableau A-3 format de la structure PQ.con | 79 |
| Tableau A-4 format de la structure SW.con | 79 |
| Tableau A-5 format de la structure PV.con | 80 |
| Tableau A-6 format de la structure shunt.con | 81 |
| Tableau A-7 format de la structure SVC | 82 |
| Tableau A-8 les données des jeux de barres PV | 82 |
| Tableau A-9 les données des jeux de barres PQ | 83 |
| Tableau A-10 les données des lignes | 83 |
| Tableau A-11 données des transformateurs | 83 |

Introduction générale

De nos jours le contrôle et la maîtrise d'énergie électrique est une nécessité absolue, à tout moment il faut estimer et prévoir la demande journalière et futur. Afin de répondre à cette demande, il faut en permanence faire le choix des installations nécessaires (centrales, lignes, élément de protections...), des quantités d'énergie à produire ainsi que les configurations du réseau électrique pour satisfaire la demande du lendemain (court terme). Il faut aussi envisager et prévoir les installations et les infrastructures avec leurs investissements pour satisfaire les prévisions en consommation d'énergie électrique à moyen et à long terme.

La planification des réseaux électriques consiste à prévoir de nouvelles centrales de production, des différentes extensions du réseau ainsi que le dimensionnement des ouvrages tel que les transformateurs, les lignes et les postes. Il s'agit de minimiser les coûts d'investissement et de fonctionnement des équipements et installations électriques envisagés dans l'objectif de satisfaire la demande estimée par la prévision en respectant les exigences de fiabilité, de qualité et de sécurité des biens et des personnes [1].

La planification de la puissance réactive a pour objectif de minimiser le coût d'investissement dans les équipements de puissance réactive nécessaire pour permettre au réseau de fonctionner d'une manière acceptable dans les conditions futures. De ce fait le planificateur doit faire face à un problème d'optimisation en tenant compte des différentes contraintes techniques. Les coûts d'investissements élevé ont encouragé le développement de méthodes robustes et flexibles pour la planification des réseaux électriques.

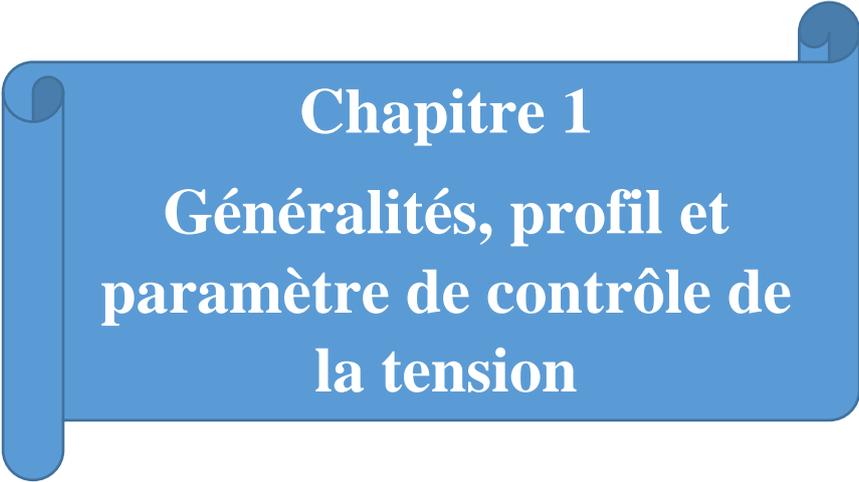
Les dispositifs FACTS sont des éléments d'électronique de puissance qui font appel aux microprocesseurs, l'automatique, la télécommunication ... Ils permettent un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance, de charger les lignes en transit de puissance active à des valeurs près de leurs limites thermiques et augmente ainsi la capacité de transférer de la puissance utile d'une région à une autre, ils permettent aussi de stabiliser le comportement du réseau [2].

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'évaluer les grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées à ces derniers ainsi que celles qui transitent dans les lignes et les transformateurs. Les pertes et les courants s'en déduisent. La réduction du transit de puissance réactive a comme objectifs la réduction des coûts de production, maximiser le transit de la puissance active, l'amélioration de la qualité et la fiabilité du système en maintenant les tensions dans leur limite permise ainsi que l'augmentation de la marge de sécurité du système.

Dans ce travail nous allons essayer d'aborder et d'apporter des solutions au problème de dégradation du profil et de la stabilité de la tension des réseaux électriques. Pour faire face à ce phénomène, notre étude portera sur l'évaluation du profil et de la stabilité en tension de deux réseaux test IEEE 14 jeux de barres et IEEE 6 JdB. Le point de compensation par des dispositifs FACTS permettant une amélioration du profil de la tension et de la stabilité du réseau sera fixé d'une façon optimale sur le JdB ayant le plus faible profil de la tension.

Ce travail est structuré en 4 chapitres :

On a abordé dans le premier chapitre des généralités sur les réseaux électriques et le profil et les paramètres de contrôle et de stabilité de la tension, puis on s'est intéressée à la planification et la compensation de la puissance réactive dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre se consacre au calcul de l'écoulement de puissance. Enfin le dernier chapitre sera dédié à l'application et la simulation avec le logiciel PSAT et le programme ACLF réalisé au niveau du laboratoire LGEB et l'analyse et les présentations des résultats



Chapitre 1
Généralités, profil et
paramètre de contrôle de
la tension

I. Généralités, profil et paramètre de contrôle de la tension

I.1 Introduction

Le producteur de l'électricité doit pouvoir satisfaire les demandes de sa clientèle à tout instant et au moindre coûts, il a pour rôles :

- Produire l'énergie électrique dans des centrales (hydrauliques, thermiques).
- Transporter cette énergie par des lignes à haute tension.
- Distribution de cette énergie aux usagers.

Dans ce chapitre nous allons traiter les éléments principaux d'un réseau électrique. Ces derniers sont reliés entre eux pour permettre la production de l'électricité dans le but de satisfaire la demande des clients. Cette énergie doit être de bonne qualité et à un prix compétitif.

La tension constitue un paramètre important de la sûreté du système électrique. Cette grandeur locale est le garant du bon fonctionnement de l'exploitation du réseau, elle peut varier de manière importante d'un point à l'autre de system.

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. Les courants et tensions qui apparaissent lors d'une perturbation affectant les réseaux électriques, jouent un rôle important dans la stabilité du système, qui est un problème crucial dans les réseaux électriques. Depuis les années 1920 beaucoup de blackouts de grande ampleur provoqués par l'instabilité du réseau électrique ont illustré l'importance de ce problème.

L'étude de la stabilité des réseaux électriques est l'un des aspects les plus importants dans l'analyse des systèmes de puissance, elle détermine si oui ou non le système peut trouver un nouveau point de fonctionnement après une perturbation. Durant ces dernières années, les problèmes de stabilité des réseaux électriques ont reçu beaucoup d'attention. Plusieurs études et techniques ont été dirigés et développés pour que le système maintien la stabilité sous une perturbation quelconque. Ces perturbations, peuvent être d'origine diverses ; (petites perturbations : comme les variations continues de charge, grandes perturbations comme les courts circuits et la perte de synchronisme d'un générateur de forte puissance).

I.2 Définition d'un réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'appareils destinés à la production, transport, distribution et l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de productions jusqu'aux maisons les plus lointaine.

La fonction des réseaux électriques c'est d'interconnecter les centrales de production (centrales hydrauliques, thermiques...) avec les centres de consommation (villes, usines, maisons...). L'énergie électrique est transportée en Haute tension et des fois même en très haute tension tout cela pour éviter les pertes joules puis on la baisse progressivement en basse tension pour l'utilisation final.

Pour le transport de l'énergie électrique on utilise un réseau maillé afin que la perte de l'un de ses éléments n'interrompe pas la fourniture d'énergie aux consommateurs ou aux réseaux de distribution qui y sont connectés. [3]

Ce maillage on le trouve aussi sur les interconnexions entre pays qui sont réalisés par des lignes à courant alternatif à très haute tension ou par des liaisons à courant continu.

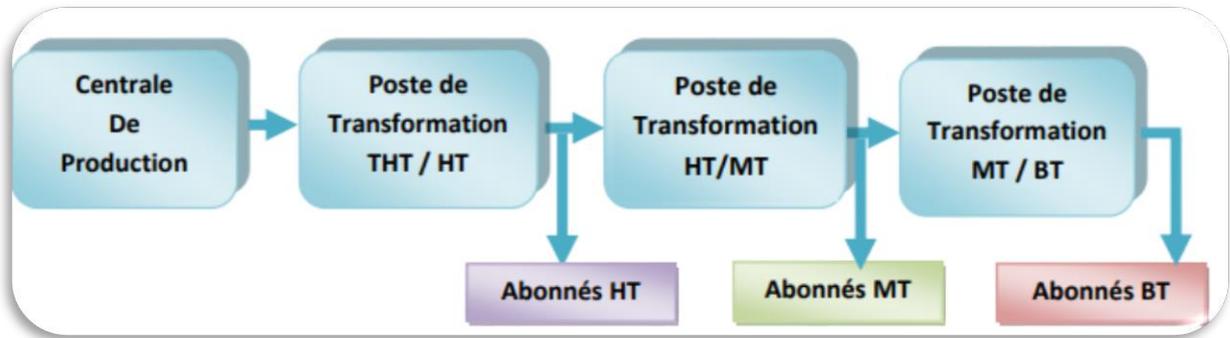


Figure I-1 réseau électrique

I.3 Fonctionnement du réseau électrique

L'électricité produite par les centrales est d'abord acheminée sur de longues distances dans des lignes à haute tension (HTB) gérée par RTE (Réseau de Transport d'Électricité).

Elle est ensuite transformée en électricité à la tension HTA pour pouvoir être acheminée par le réseau de distribution. Cette transformation intervient dans les postes sources.

Une fois sur le réseau de distribution, l'électricité haute tension HTA alimente directement les clients industriels. Pour les autres clients (particuliers, commerçants, artisans...), elle est convertie en basse tension (BT) par des postes de transformation avant d'être livrée.

Au final, la qualité de l'alimentation en électricité des utilisateurs du réseau est donc le résultat de la qualité de tout ce parcours. [1]

I.4 Les niveaux de tension des réseaux

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative comme suit :

| DOMAINE DE TENSION | COURANT ALTERNATIF | COURANT CONTINU |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| TBT | $U \leq 50$ volts | $U \leq 120$ volts |
| BTA | $50 < U \leq 500$ v | $120 < U \leq 750$ v |
| BTB | $500 < U \leq 1000$ v | $750 < U \leq 1500$ v |
| HTA | $1000 < U \leq 50$ kV | $1500 < U \leq 75$ kV |
| HTB | $U > 50$ kV | $U > 75$ kV |

Figure I-2 niveau de tension

I.5 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-système et chaque sous-système est relié à des postes sources chargé de l'adaptation des niveaux de tensions.

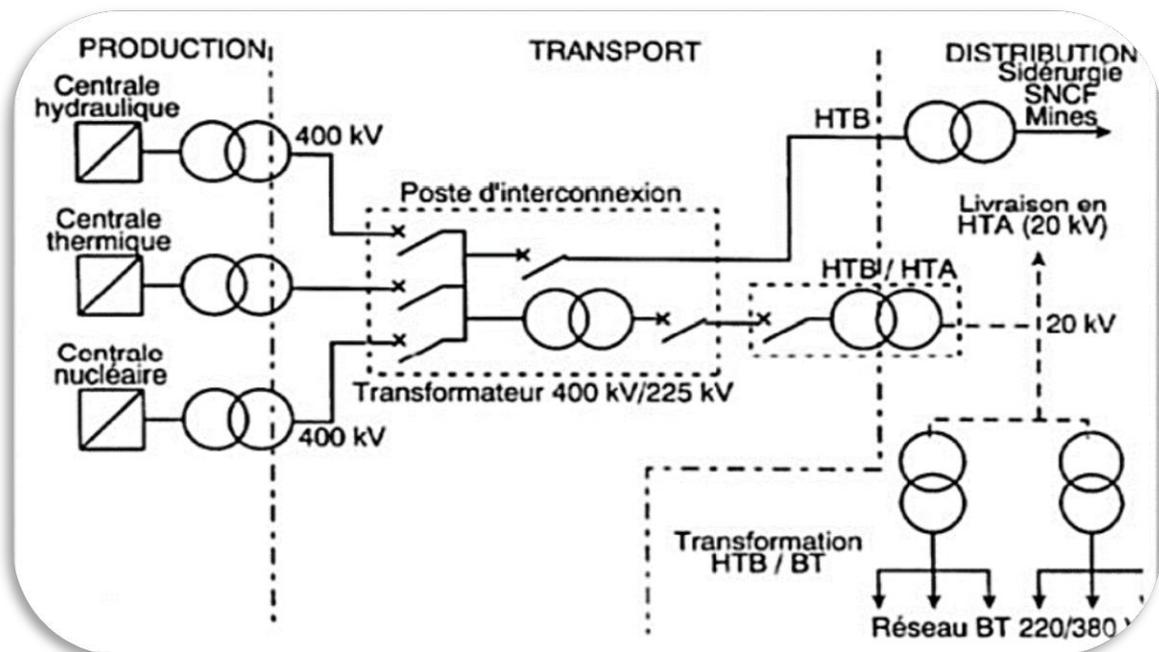


Figure I-3 structure d'un réseau électrique

I.5.1 Réseau de transport

Le réseau de transport (220kV - 400kV) appelé aussi réseau de haute tension de niveau B (HTB). Dans ce niveau on assure l'interconnexion entre région au niveau national et les échanges d'énergie électrique au niveau international. [4][5]

Les réseaux de transport ont principalement comme missions :

- Collecter l'électricité produite et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation
- La tension de 225kV jusqu'à 400kV
- Neutre directement relié à la terre.
- Réseaux maillés.

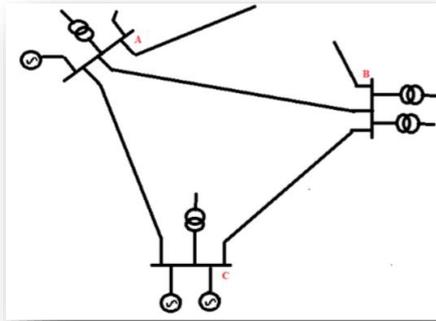


Figure I-4 exemple d'un réseau de transport

I.5.2 Réseau de répartition

Le réseau de répartition (60kV - 190kV) assure la répartition de l'énergie électrique puisé au réseau de transport et des productions de plus petite échelle vers les zones de consommation et aux gros clients industriels. [5]

Le réseau de répartition a quelques caractéristiques qui sont :

- la tension est de 60kV jusqu'à 90kV
- neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre.
- limitation courant neutre à 1500A pour le 90kV et de 1000A pour le 60kV.
- réseau en boucle ouverte ou fermée.

I.5.3 Réseau de distribution

Le réseau de distribution (400V- 50kV) permet d'alimenter l'ensemble de la clientèle et il est Géré par le Gestionnaire de Réseau de Distribution (GRD). [6]

Le réseau de distribution est de type radial ainsi le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation vers le point de consommation.

I.6 Qualité de l'énergie électrique

La tension possède 4 caractéristiques qui sont :

I.6.1 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 court-circuit.
- 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.6.2 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 entraine 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.6.3 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.6.4 Symétrie

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

I.7 Réglage de la tension

Le réglage de tension nécessite une coordination temporelle et spéciale des actions de contrôle pour assurer un contrôle rapide et performant et pour hériter des actions qui pourraient avoir des conséquences graves sur la stabilité et la sureté des réseaux. [8]

Le contrôle de la tension en régime normal est assuré par les groupes de production qui consiste à fournir au réseau ou à lui retirer, de la puissance réactive afin de relever son facteur de puissance et donc sa tension ou des diminuer pour obtenir l'effet inverse.

Le réglage de la tension sur les réseaux de transport et de répartition nécessite une coordination temporelle et spatiale des actions de contrôle pour assurer un contrôle rapide et performant, et pour éviter des interactions entre différentes actions de contrôle qui pourraient avoir des conséquences graves sur la stabilité et la sûreté du réseau. [8] [9]

Ce contrôle est réalisé par un système hiérarchisé qui comporte les niveaux primaire, secondaire et tertiaire (Figure I-5).

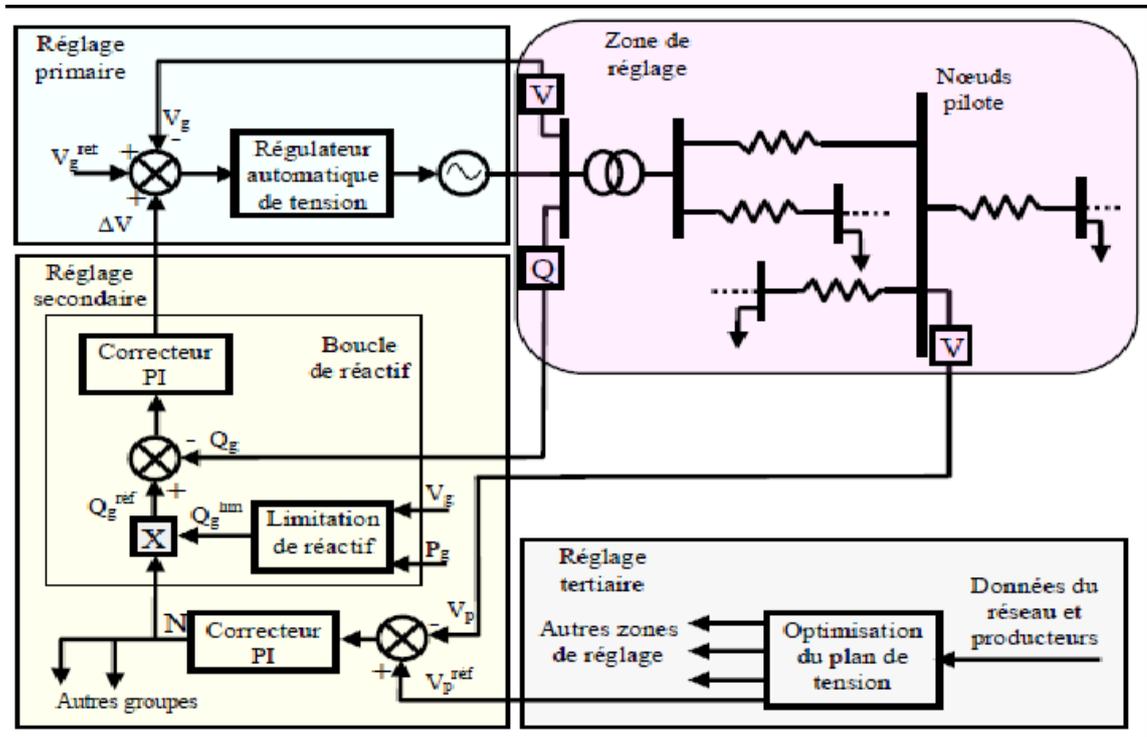


Figure I-5 organisation des réglages hiérarchisés de tension

Avec

V_g : tension mesurée de l'alternateur,

V_g^{ref} : tension de consigne de l'alternateur,

ΔV : la correction de la tension de référence de l'alternateur élaborée par la boucle de gestion de puissance réactive.

Q_g : la puissance réactive mesurée de l'alternateur

Q_g^{ref} : la puissance réactive de consigne de l'alternateur,

Q_{lim} : la limitation de puissance réactive que peut fournir ou absorber l'alternateur,

N : le niveau de participation (entre -1 et +1) envoyé à tous les groupes participants au réglage, Ce niveau détermine la proportion de la réserve de puissance réactive devant être mobilisée,

V_p : la tension mesurée du nœud pilote,

V_p^{ref} : la tension de consigne du nœud pilote

Les trois niveaux hiérarchiques du réglage de tension sont les suivants :

I.7.1 Réglage primaire (les premières secondes après perturbation)

Le réglage primaire agit au niveau local avec une constante du temps de l'ordre de 100ms, de manière automatique en a peine quelques secondes sur la tension aux bornes des groupes. Il a pour but de faire face à des variations rapides de la tension qui peuvent être induites par des variations de demande de la puissance réactive, par des défauts ou par des manœuvres sur le réseau. [8] [9]

Les alternateurs sont les sources qui permettent d'avoir sur le réseau de transport des points à tension régulée constante, ils sont équipés d'un régulateur primaire de tension, grâce à ce régulateur, les alternateurs fixent la tension à une valeur de consigne sur leur point de raccordement.

Le principe c'est d'agir sur l'excitation de l'alternateur pour garder le niveau de tension désiré. En effet, si l'alternateur est surexcité, celui-ci va produire de la puissance réactive, ce qui aura pour effet d'accroître la tension à son point de connexion. Inversement dans le cas d'une sous excitation de l'alternateur, celui-ci va absorber de la puissance réactive et il faut donc diminuer la tension à ses bornes. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur.

Ce réglage peut être de 3 types suivants :

- Réglage de puissance réactive constante au point livraison : réservé généralement aux installations de productions raccordées dans des réseaux d'usine à un niveau de tension inférieur à celui de jeu de barre où se situe le point de connexion au RPT. Le plus souvent RTE effectue un réglage réactif constant. La consigne de ce réglage est fixée par RTE en concertation avec le producteur.
- Réglage de tension au point de livraison : utilisé pour certaines installations directement raccordées au RPT, notamment les parcs éoliens et photovoltaïques, et dans des réseaux d'usine à proximité du point de connexion variant linéairement en fonction de la puissance réactive avec une pente λ fixée par RTE en concertation avec le producteur.
- Réglage de la tension au borne du stator des groupes selon une consigne : cette consigne peut être asservie aux ordres provenant du réglage secondaire de la tension émis par RTE, dans le cas des installations participant à ce service. [10]

I.7.2 Réglage secondaire (dans les 15 minutes après perturbation)

Ce réglage est envisagé par régions ou zones. Ces zones sont des parties de réseau dont les évolutions du plan de tension sont sensiblement différentes. Sur cette zone est définie un nœud particulièrement représentatif de l'évolution de la tension. Le principe est de réguler la tension en ce point pilote du réseau en agissant sur les productions de puissance réactive des groupes participants au réglage. Les mesures de tension sont fournies au réglage secondaire de tension qui calcule de nouvelle consigne de tension pour les groupes réglant dans le but de fixer la tension au point pilote. [8] [9]

La participation à ce réglage est déterminée par RTE en fonction des critères suivant :

- ❖ Proximité électrique de l'installation par rapport à un point pilote déjà existant.

- ❖ Intérêt de créer un nouveau point pilote en cas de point non proche.
- ❖ Capacités réactives de l'installation pour modifier la tension du point pilote proche.
- ❖ Capacités réactives des groupes déjà raccordés et asservis au réglage secondaire du point pilote proche.

Il existe deux types de réglage secondaire de la tension : le RST (Réglage Secondaire de Tension) et le RSCT (Réglage Secondaire Coordonné de Tension).

- ❖ Le RST est automatisé et centralisé, son principe consiste à organiser le réseau en zone de réglage et à contrôler le plan de tension séparément à l'intérieur de chaque zone en agissant de façon automatique et coordonnée sur le niveau de réactif des groupes de la zone. Ces zones doivent être indépendantes de point de vue de la tension c'est à dire que chaque zone est insensible à toutes variations de tension pouvant survenir dans une zone voisine.

Le schéma d'asservissement (Figure I-6) comporte une boucle de régulation située au dispatching régional qui permet de modifier automatiquement la consigne du régulateur primaire de tension des groupes asservis ; la tension de consigne du nœud pilote (V_p^{ref}) est fixée au RST. La tension du nœud pilote (V_p) est mesurée, ces mesures sont fournies au RST qui calcule de nouvelles consignes de tension pour les groupes réglant dans le but de fixer la tension au point pilote.

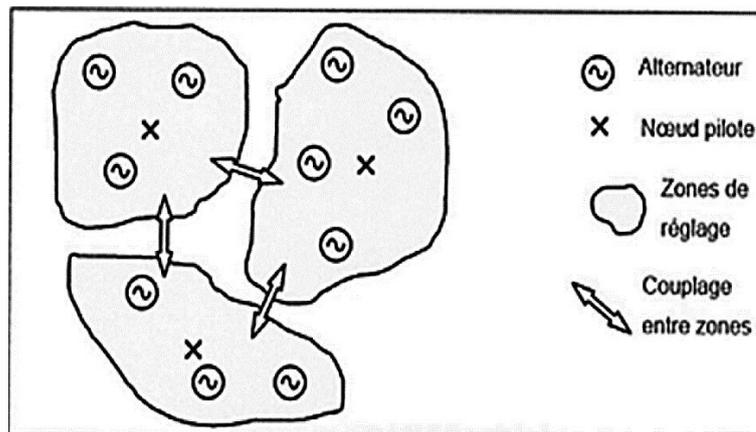


Figure I-6 principe du réglage RST

Le correcteur du réglage secondaire élabore un niveau de participation (N) à partir de l'écart ($V_p^{ref} - V_p$). Ce niveau est ensuite utilisé par la boucle de réactif de chaque alternateur afin de déterminer la correction à apporter sur la consigne de tension de ce dernier.

Ce niveau N est déterminé par l'équation suivante :

$$N = \alpha \int \frac{V_c - V_p}{V_n} dt + \beta \frac{V_c - V_p}{V_n}$$

Avec

V_c [kV] : tension de consigne de la zone,

V_p [kV] : tension mesurée du point pilote (échantillonnage toutes les 10 s),

V'_p [kV] : tension mesurée du point pilote après filtrage sur trois échantillons de mesure successifs,

V_n [kV] : tension nominale du pont pilote,

α, β : gains, respectivement intégral et proportionnel du régulateur.

- ❖ Le RSCT consiste à réguler la tension en plusieurs nœuds pilotes par zone de réglage de manière à mieux maîtriser le plan de tension sur des zones de réglages élargies par rapport au RST.

Le RSCT calcule directement et individuellement les variations de tension à appliquer à chaque régulateur primaire de tension des groupes, en prenant en compte (et en réactualisant) les contraintes du réseau et des groupes.

L'algorithme utilisé dans le RSCT consiste en la minimisation d'une fonction quadratique faisant intervenir notamment les écarts entre les tensions aux point pilotes et les tensions de références de ces points, tout en respectant certaines contraintes :

- ❖ Les écarts entre la puissance réactive produite ou absorbée par les groupes et les références de puissance réactive de ce groupe.
- ❖ Les écarts entre les tensions stator et leurs références, tout en respectant :
 - Les limites des diagrammes de fonctionnement des groupes en régime normal,
 - Les limites en tension sur un ensemble de points de la région,
 - Et les possibilités de variations de consignes des régulateurs primaires des groupes.

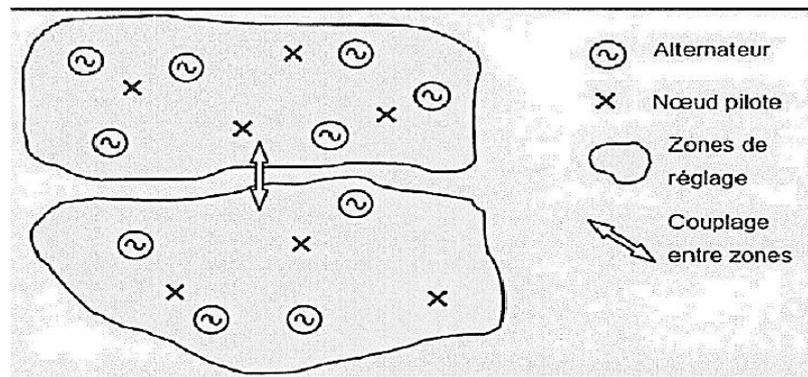


Figure I-7 principe du réglage RSCT

I.7.3 Réglage tertiaire (dans les 15 à 30 minutes après perturbation)

Ce réglage est manuel (effectué par les opérateurs de dispatching national), consiste à réévaluer à intervalles de quinze (15) minutes, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage selon des critères technico-économiques dont les principaux sont les suivant : [8] [9]

- Exploiter les réseaux électriques au niveau de sa sûreté.
- Respecter les contraintes de fonctionnement du matériel.

- Minimiser les pertes et les coûts de production.
- Utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport.

Il a pour but :

- ❖ D'assurer une bonne tenue du plan de tension,
- ❖ D'éviter des situations engendrant des surcoûts ou des risques pour le système électrique.

Les consignes de tension des nœuds pilotes sont calculées par un optimal power flow(OPF), en tenant compte des critères précédemment cités.

I.8 Dégradation de la qualité de la tension

La dégradation de la qualité de la tension résulte de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients, court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain...etc. Ces défauts résultent de cause atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matériels (vieillesse de l'isolation...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers ...). [11]
- Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuse, variateurs de vitesse et toutes application de l'électronique de puissance

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension :

I.8.1 Variation ou fluctuation de la fréquence

La variation de fréquence est souvent observée sur les réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupes électrogènes. ($F 50\text{Hz}\pm 1$)

I.8.2 Fluctuation de tension

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure I-8), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc. [12] [13]

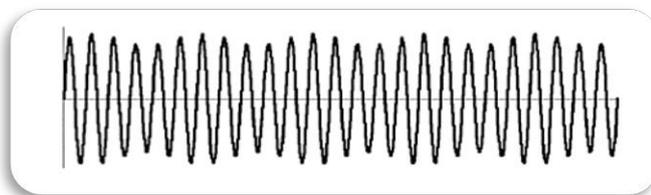


Figure I-8 exemple de fluctuation de tension

I.8.2.1 Origines des variations et fluctuations de tension

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

I.8.3 Creux de tension

Ces creux sont produits par des court-circuit survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Seule les chutes de tension supérieure à 10% sont considérées (les amplitudes inférieures entrent dans la catégorie des fluctuations de tension). Leur durée peut aller de 10ms à plusieurs secondes. En fonction de la localisation du court-circuit et des organes de protection. [13]

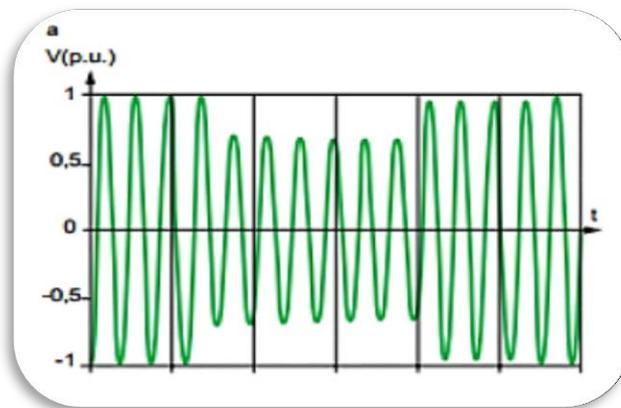


Figure I-9 exemple d'un creux de tension

I.8.3.1 Origines des creux de tension

Les creux de tension sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation. [14]

Les creux de tension ont principalement pour cause les défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même.

I.8.4 Interruption courte ou coupure brève

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de $\frac{1}{2}$ cycle jusqu'à 3s. elle se produit lorsque la tension d'alimentation des charges diminue à moins de 0.1pu.

Les coupures brèves sont principalement produites par des courts circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'origine de protection éliminant ces défauts. Ils sont également

la conséquence d'appel de puissance importante, lors de la mise en service de certaines charges du réseau. [15]

I.8.5 Bosses de tension

C'est une augmentation de la tension au-dessus de la tension nominale 1.1pu pour une durée de 0.5cycle à 60s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants.

I.8.6 Chute de tension

Lorsque le transit dans une ligne électrique est important, la circulation du courant provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'à son origine. Plus la ligne sera chargée en transit de puissance plus la chute de tension sera importante. [12]

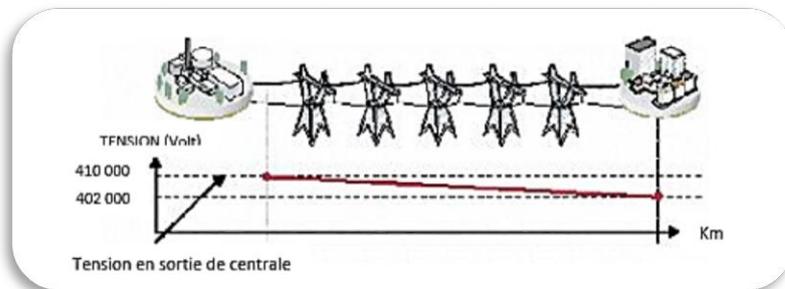


Figure I-10 cas d'une consommation alimenté par une ligne depuis une centrale

Si la consommation double, la chute de tension double

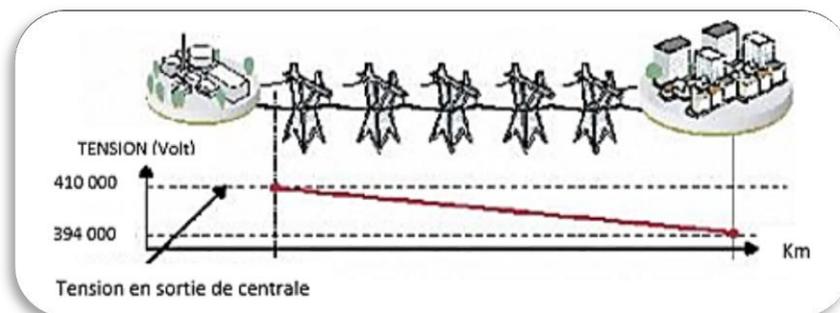


Figure I-11 cas d'une forte consommation alimenté par une ligne depuis une centrale

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-13). Chaque centrale impose la tension à sa sortie et cette dernière évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée

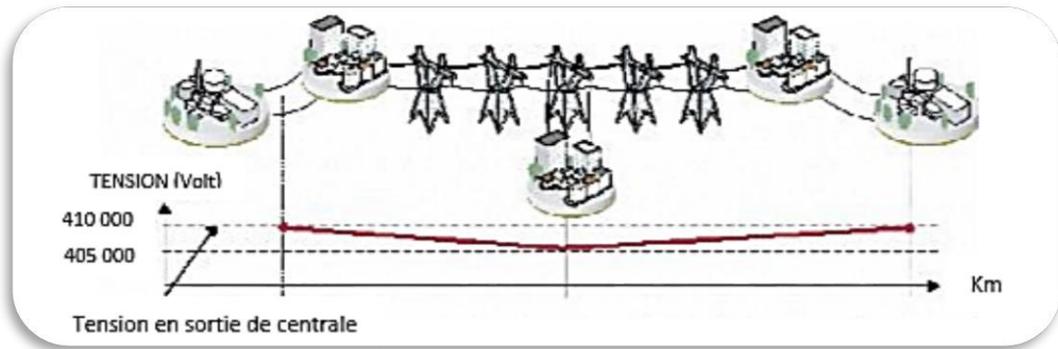


Figure I-12 cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. À 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. Les figures (I-10) (I-11) (I-13) sont valables pour un instant donné, à un niveau de consommation donné. Lorsque la consommation varie au cours du temps, la tension évolue, baissant lorsque la consommation augmente, remontant lorsque la consommation diminue. Le fait que la tension ne soit pas identique en tout point du réseau à tout moment est normal. Cette différence est compensée par des réglages de tension réalisés dans les postes de transformation. Cela permet de garantir que la tension reste dans la plage admissible en tout point de livraison à tout instant.

I.8.7 Tension et/ou courant transitoire

Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoire dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale de 50Hz durant moins d'une seconde. [16]

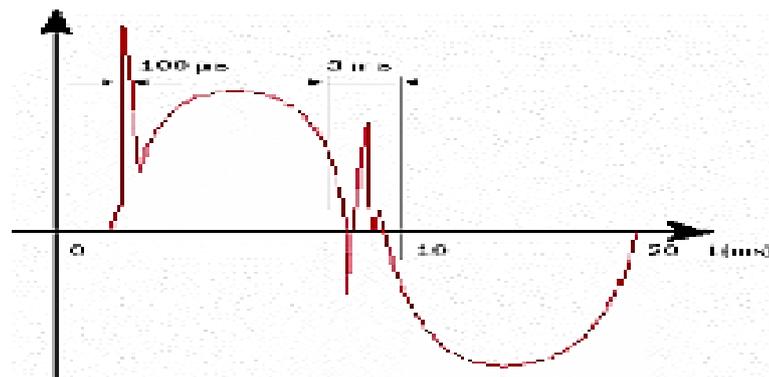


Figure I-13 exemple d'un cas de surtension transitoire

I.8.8 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 dû à la circulation non équilibrée dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices de courants.

Monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendrer, à des niveaux de tensions plus élevés, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° . [16]

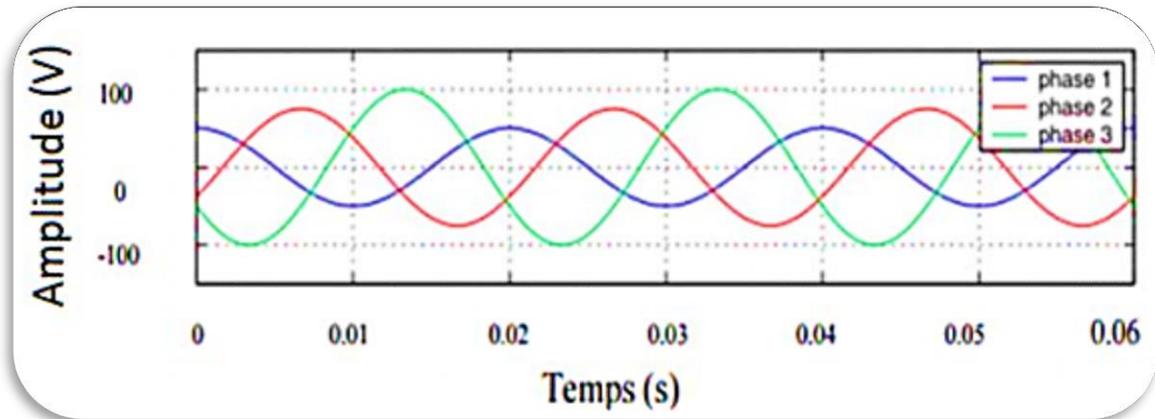


Figure I-14 déséquilibre de tension

I.8.8.1 Origines de déséquilibres

Les déséquilibres de tension surviennent habituellement en présence d'un déséquilibre des charges et de leurs appels de courant. En effet, toute charge triphasée doit appeler un courant identique sur chaque phase. Quant aux charges monophasées branchées à un réseau triphasé, on doit les répartir le plus uniformément possible entre les trois phases. De plus, certains déséquilibres de tension résultent de l'exploitation et de la nature des équipements du réseau électrique. [17]

I.8.9 Les harmoniques

Une harmonique (figure I-17) est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale.

- ❖ Inters harmoniques : les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale.
- ❖ Infra-harmoniques : les infra harmoniques sont des signaux de fréquence inférieure à celle du fondamentale.
- ❖ Conséquences des harmoniques : les courants harmoniques, qui se propagent dans les réseaux électriques, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par les mêmes réseaux. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types :
 - Les effets instantanés
 - Les effets à terme
- Les principales sources d'harmoniques [14]

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

- Les charges industrielles
- Équipements d'électroniques de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes 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)

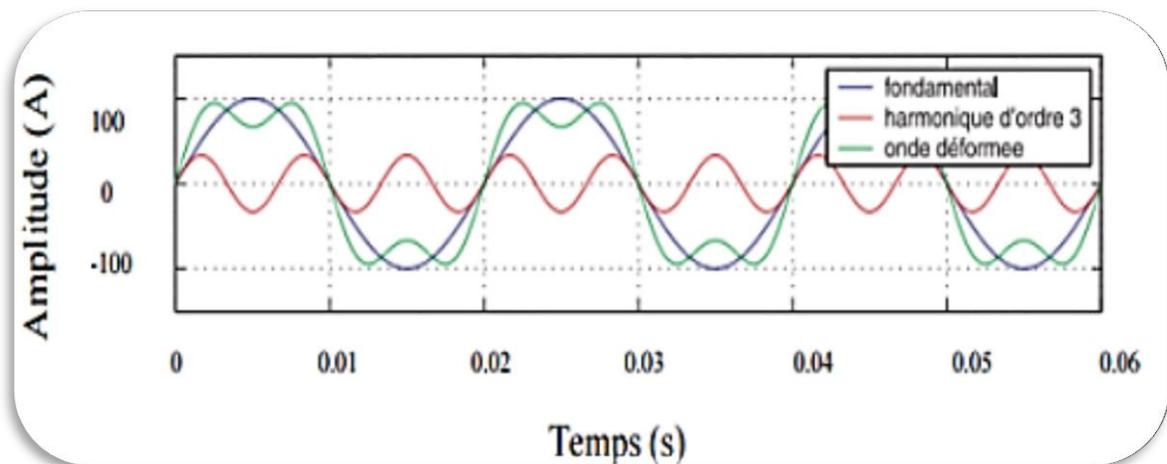


Figure I-15 harmonique

I.9 Définition de la stabilité d'un réseau électrique

La stabilité d'un réseau électrique de HT est une propriété d'un système de puissance qui lui permet de rester dans un état d'équilibre dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un état acceptable d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation. Une perturbation sur un réseau peut être une manœuvre prévue, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou non prévue comme un court-circuit causé par la foudre entre une phase et la terre par exemple. Lors de la perturbation, l'amplitude de la tension aux différents jeux de barres du réseau peut varier ainsi que la fréquence. La variation de la fréquence est due aux variations de la vitesse des rotors des alternateurs. [18] [19]

I.10 Classification de la stabilité des réseaux électriques

La stabilité peut être classifiée selon la nature de la perturbation : [18]

- Stabilité de l'angle du rotor
- Stabilité de la fréquence.
- Stabilité de la tension

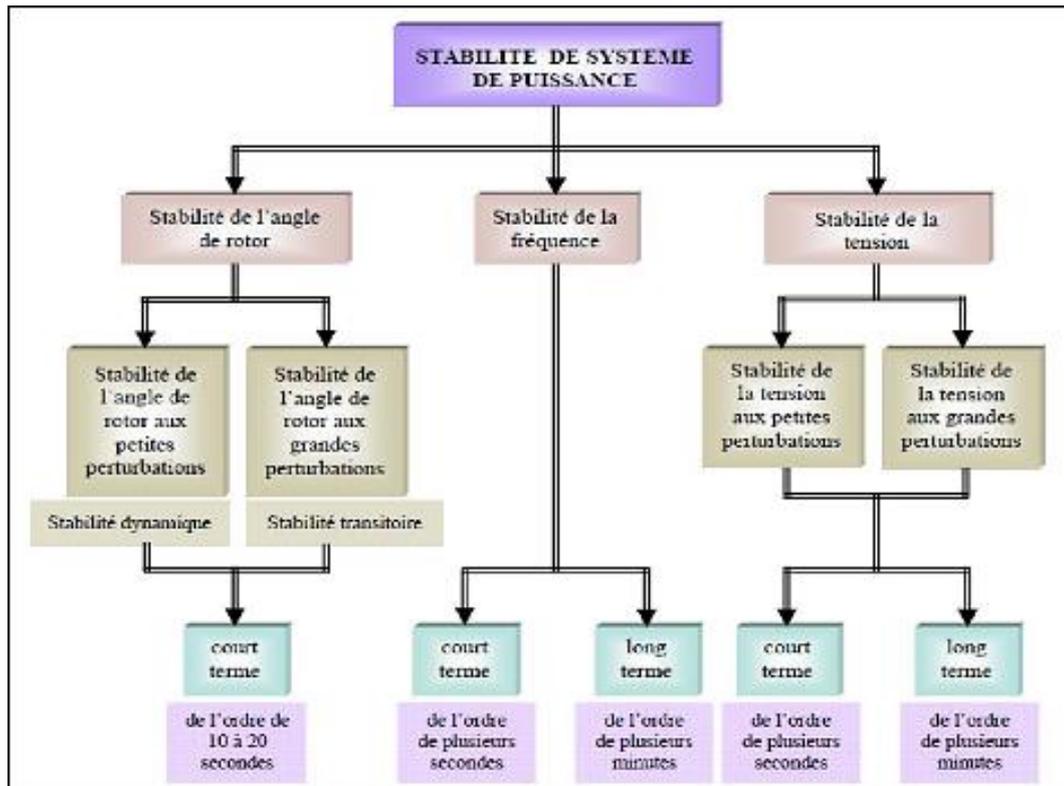


Figure I-16 classification des différents types de stabilité

I.10.1 Stabilité de l'angle du rotor (angulaire)

Dans un réseau électrique, la stabilité de l'angle du rotor est définie comme la capacité d'un ensemble de génératrices synchrones interconnectées de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après une perturbation. Un système est instable si la différence entre les angles rotoriques des générateurs augmente indéfiniment ou si l'oscillation transitoire provoquée par une perturbation, n'est pas suffisamment amortie dans le temps d'évaluation. L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques. Une machine qui a perdu le synchronisme sera débranchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système. [20]

La stabilité angulaire concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc. L'évaluation de ce type de perturbation prend quelques secondes.

❖ La stabilité statique [21]

Après le régime transitoire dû à la perturbation, le système entre dans le régime permanent. Dans ce cas, pour étudier le système, il faut évaluer la stabilité statique du réseau. Le système n'est pas stable si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : l'état instable ou l'état d'urgence. Dans un réseau qui est dans l'état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle

ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires.

❖ Stabilité dynamique

Si une perturbation mineure est effectuée sur le réseau, à partir d'un régime permanent stable, et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal en régime permanent, le réseau est dit dynamiquement stable. Pour un réseau d'énergie électrique, on entend par perturbation mineure des manœuvres ou des opérations normales sur le réseau, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou des variations mineures de la charge.

❖ Stabilité transitoire [22]

Lorsqu'il y a une perturbation majeure sur le réseau et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal après la perturbation, alors le réseau est dit transitoirement stable. Les perturbations majeures sont les court-circuit, les pertes de lignes, les bris d'équipements majeurs comme les transformateurs de puissance et les alternateurs peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement total du réseau. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première). La stabilité transitoire dépend de la relation non-linéaire couples- angles. Le phénomène de la stabilité transitoire concerne les grandes perturbations telles que

- Les court-circuit affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines.
- La perte d'un ouvrage (ex. une ligne de transmission...).
- La perte d'un groupe de production.

Les conséquences de ces défauts seconds (qui suit l'élimination du défaut), elles sont appelées instabilité de première oscillation (en anglais First Swing Instability), (cas 1, figure I.19), et elles s'étendent sur 3 à 5 secondes. Elles peuvent résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi oscillations), (cas 2, figure I.19). La gamme de temps associée s'étend de 10 à 20 secondes.

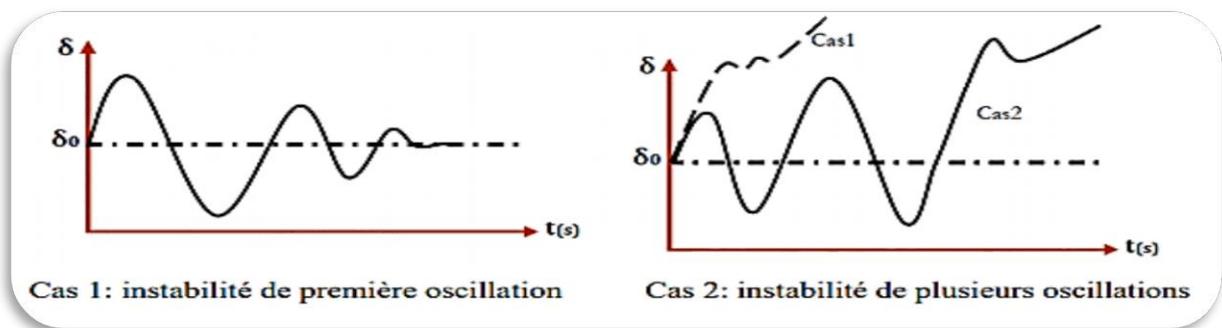


Figure I-17 tracé de l'angle rotatif en fonction de temps

I.10.2 Stabilité de la fréquence

La stabilité de fréquence concerne la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale, suite à un incident sévère ayant ou non conduit à un morcellement du système. La stabilité de fréquence est étroitement liée à l'équilibre global entre la puissance active produite et consommée. [21]

L'instabilité résultante se produit sous forme d'oscillations de la fréquence soutenue, menant au déclenchement des unités de production et/ou des charges pendant les variations de la fréquence. Le temps qui caractérise les processus et les dispositifs actifs, s'étend de la fraction de secondes à plusieurs minutes. Par conséquent, la stabilité de la fréquence peut être un phénomène à court ou à long terme.

I.10.3 Stabilité de tension

La stabilité de la tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions de fonctionnement normal et selon l'amplitude des perturbations, on distingue la stabilité de tension de petite perturbation et celle de grande perturbation. [23]

I.10.3.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations

Cette stabilité concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites autorisées en présence de perturbation comme les variations faibles des charges, de la production ...etc.

I.10.3.2 Stabilité de la tension vis-à-vis des grandes perturbations

Elle concerne la capacité du réseau à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement autorisées en présence de grandes perturbations comme la perte d'équipement de transport ou de production, court-circuit...etc.

I.10.4 Instabilité de la tension

Lorsqu'un réseau subit une perturbation on dit que c'est un réseau instable en tension et cela que ce soit à cause d'une perturbation ou d'un accroissement de la charge ou même à cause d'une modification de la condition du réseau qui entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable et tout cela aboutie à un effondrement généralisé de la tension. [17]

I.10.4.1 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. [24]

I.10.4.2 Importance et incidents

Au début, le problème de la stabilité de la tension était associé à un réseau faible et isolé, mais cette question est actuellement devenue sources de problèmes dans les réseaux les plus développés en raison de l'accroissement de la charge. Des instabilités et même des effondrements de la tension sont survenus plusieurs fois dans les réseaux importants à travers le monde entier durant ces dernières années.

I.10.4.3 Caractéristiques et analyse de la stabilité de la tension

La caractéristique la plus importante dans un réseau est la relation entre la puissance reçue P_R et la tension à l'extrémité du récepteur V_R .

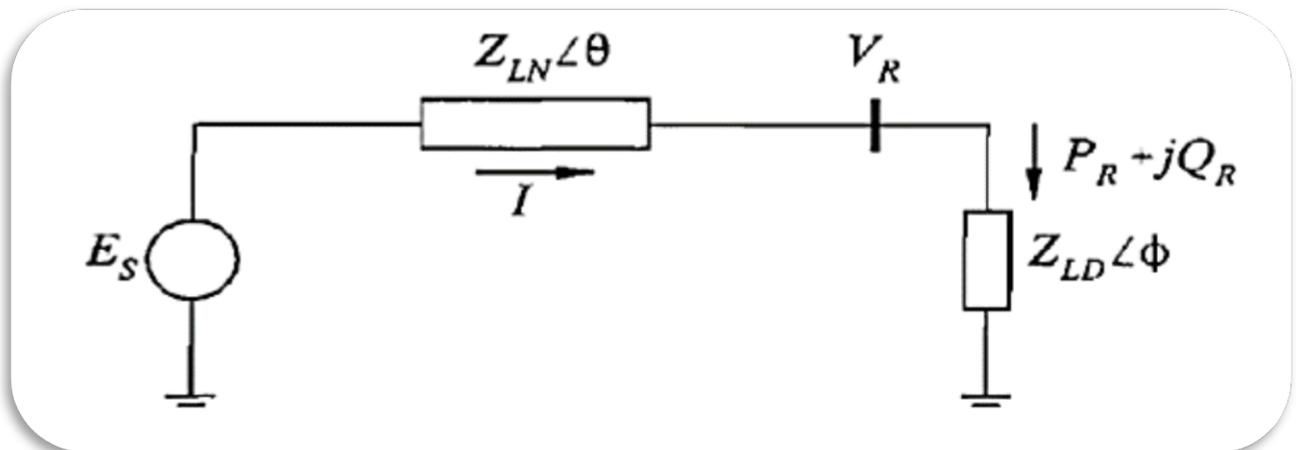


Figure I-18 exemple d'un réseau radial

Où :

E_S : La tension de la source.

Z_{LN} : L'impédance de la ligne de transmission.

V_R : La tension absorbée.

Z_{LD} : L'impédance de la charge.

P_R : La puissance absorbée

Les réseaux réels comportant un grand nombre de génératrices et de barres de consommation, ils montrent également une relation semblable entre le transfert de puissance active et la tension de la barre de charge.

I.10.4.4 Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent à la création d'un scénario propice à une instabilité de Tension. Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau : [25]

- Les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection.
- Les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe.
- Les changeurs de prises en charge (OLTC) et les transformateurs fixes.
- Les relais de protection.
- Les caractéristiques de la charge

Parmi les éléments qui influent la stabilité de la tension on retrouve les lignes de transport d'énergie. Les lignes de transport affectent considérablement les niveaux de tension en fonction de la charge. Si la charge est importante, la tension sur le réseau a tendance à être faible, par contre si la charge est faible, le niveau de tension peut en différents endroits sur le réseau s'élever au-dessus de la tension nominale. Sur les lignes de transport non compensées, le taux de régulation de tension a donc tendance à être mauvais

La stabilité en régime permanent est aussi influencée par la longueur des lignes de transport : plus la ligne est longue plus la limite de stabilité en régime permanent est faible. Ces deux effets néfastes des longues lignes de transport, sur le taux de régulation de la tension et sur la stabilité du réseau, peuvent être diminués ou même théoriquement éliminés en utilisant des techniques de réglage de la tension incluent des mesures comme la commutation par compensation shunt et le réglage de la tension des génératrices.

I.11 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 : [19]

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

I.12 Problèmes rencontrés dans les réseaux de transport

Les planificateurs sont de plus en plus conscients des limites d'utilisation des réseaux de transport et d'interconnexion. La situation actuelle dans beaucoup de pays au monde est caractérisée par les tendances suivantes : [26]

- Augmentation de la consommation d'électricité dû à l'industrialisation, à l'urbanisation et à la croissance de la population. Avec l'augmentation des transits de puissance, les réseaux deviennent plus compliqués à gérer, subissent de grandes variations de puissance et de grandes pertes. Ceci fait que leur niveau de sécurité diminue.
- Contraintes écologiques et administratives : Le respect de l'environnement joue un rôle important dans la société actuelle et c'est principalement pourquoi il est de plus en plus difficile d'obtenir des permis de construire pour de nouvelles lignes ou pour l'implantation de nouvelles centrales. Dans l'affirmative, cela demande plusieurs années.
- Contraintes opérationnelles : La demande de puissance a une croissance constante mais géographiquement irrégulière. Les centrales qui génèrent l'énergie sont souvent éloignées des charges importantes et la localisation des nouvelles centrales dépend essentiellement d'autorisations administratives et du respect de l'environnement

Pour satisfaire la demande d'énergie sous ces conditions contradictoires, les services publics font de plus en plus appel, pour des problèmes économiques et d'amélioration de la sécurité, aux échanges internationaux de puissance, ce qui demande une interconnexion entre des systèmes prévus indépendants au départ.

L'augmentation du maillage associé au mode de transit libre de puissance à travers les réseaux développe des boucles de puissance et des lignes en parallèle, ce qui surcharge certaines lignes avec pour conséquence de détériorer le profil de tension et de diminuer la stabilité du réseau. Considérant que les réseaux de transport électrique représentent une grande valeur économique, il faut essayer d'aller dans les directions suivantes :

- Améliorer l'utilisation des équipements existants en augmentant leur capacité de transfert de puissance. D'un point de vue financier, cela peut se révéler avantageux
- Améliorer la flexibilité des réseaux car pouvoir changer rapidement leur configuration permet une meilleure répartition de la puissance, particulièrement en cas de perturbations ou de transferts de puissance imprévus

I.13 Les méthodes récentes d'amélioration de la stabilité

Le transport de la puissance réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, de la compensation de puissance réactive, série ou shunt selon les cas, est utilisé pour limiter ce transport de puissance réactive. [27]

Il y a principalement deux moyens rapides permettant d'améliorer la stabilité :

- L'utilisation d'un contrôleur côté générateur : signal de contrôle supplémentaire dans le système d'excitation du générateur.
- L'utilisation d'un contrôleur côté lignes de transmission : signal de contrôle supplémentaire dans les systèmes FACTS

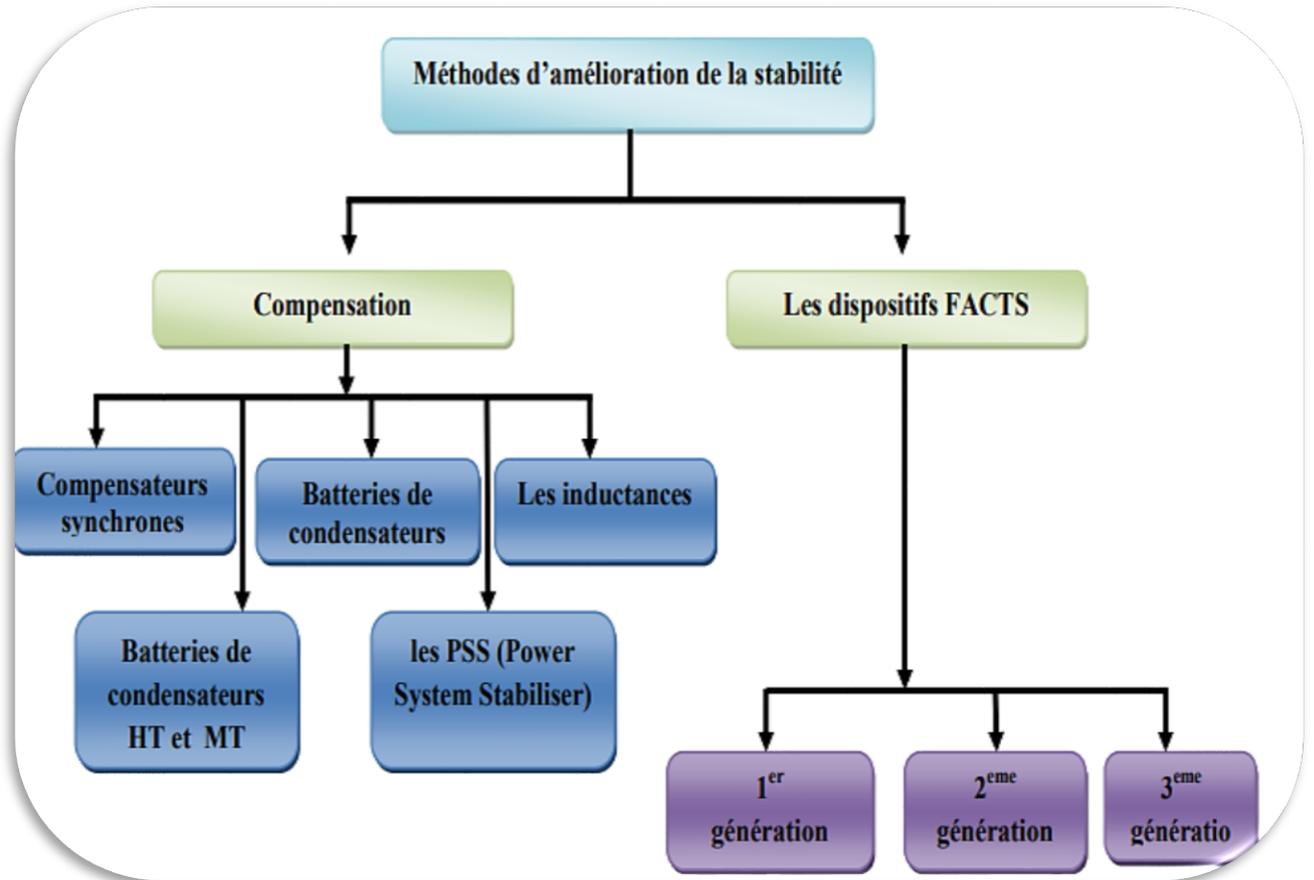
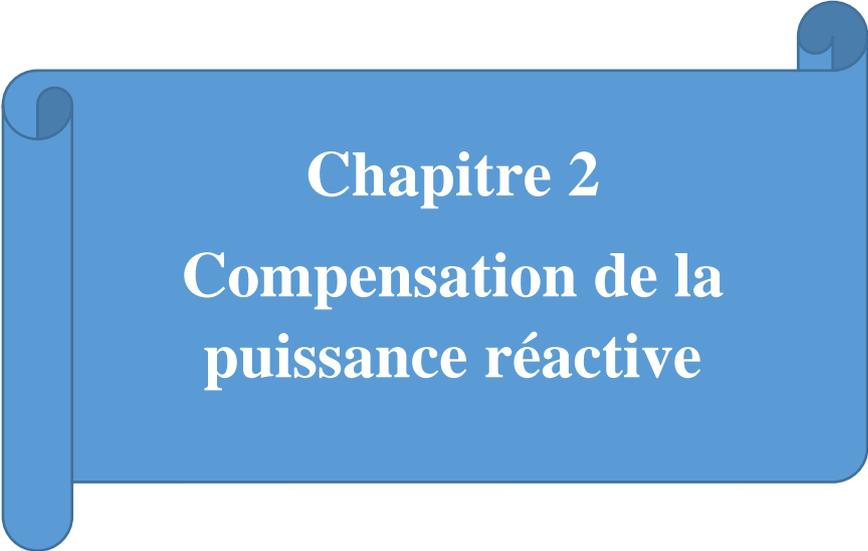


Figure I-19 méthodes d'amélioration de la stabilité

I.14 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'exposer des généralités sur les réseaux d'énergie électriques en mentionnant leurs structures et leurs composants nécessaire à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie électrique.

Nous avons présenté les profils de la tension, les paramètres de contrôle et aussi la manière dont se fait le réglage de la tension et la stabilité de la tension dans un réseau électrique. On a ainsi pu traiter les différents phénomènes perturbateurs qui influent sur la qualité de la tension.

A blue scroll graphic with a white border and rounded corners, containing the chapter title. The scroll is positioned horizontally in the center of the page.

Chapitre 2

Compensation de la puissance réactive

II. Compensation de la puissance réactive

II.1 Introduction

La croissance de la demande d'énergie ne cesse d'augmenter c'est pour cela que le développement de la concurrence pour la production de l'énergie a apparu et la construction de nouvelles lignes électrique aériennes est devenue plus que nécessaire. Cependant, pour qu'un réseau électrique fonctionne efficacement et en toute sécurité, l'importance de contrôle de la puissance réactive ne peut pas être surestimé, du coup il est nécessaire d'examiner les exigences de puissance réactive dans les conditions à la fois en régime statique et dynamique.

Ce chapitre donne un aperçu sur le phénomène de compensation de l'énergie réactive ainsi que sa planification.

II.2 Puissance Réactive

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent l'énergie apparente qui correspond à la puissance (ou puissance appelée). Cette énergie se décompose en deux formes d'énergie : [28]

- L'énergie active : transformée en énergie mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- L'énergie réactive : utilisée pour créer des champs magnétiques.

Les consommateurs de puissance réactive sont les moteurs asynchrones, les transformateurs, les inductances et les convertisseurs statiques (redresseurs).

II.2.1 Définition de l'énergie réactive consommée

C'est une forme particulière de puissance mise en jeu par un réseau ou une installation possédant une capacité, elle est transformée par les équipements électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques. De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. C'est une énergie parasite pour le réseau, son unité c'est le var. [28]

II.2.2 Importance de la puissance réactive

L'énergie réactive est un facteur très important qui influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur se résume dans les points suivants : [29]

- La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production.

II.2.3 Bilan de la puissance réactive

L'expression suivante nous donne le bilan énergétique : [28]

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

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.2.4 Transport de la puissance active et réactive

Quand un régime permanent de circulation d'énergie est établi dans un réseau électrique. On peut écrire les équations reliant les puissances actives P_i et réactives Q_i injectées ou soutirées en chaque sommet i et les tensions en modules $|v|$ et phases θ . La détermination des tensions et courants sur une ligne électrique peut être effectuée en utilisant la notation complexe. En schématisant chaque liaison (du sommet i au sommet k) par un π symétrique tel que ($i=1, k=2$). [29]

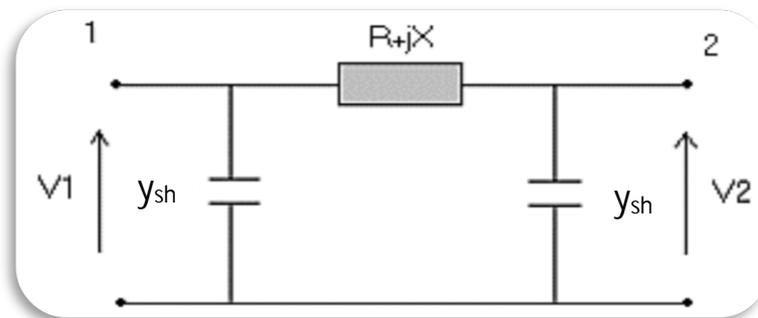


Figure II-1 exemple ligne de transport

Les lignes sont normalement spécifiées par :

- Une impédance série : $Z = R+jX \Omega/\text{Km}$
- Une admittance shunt: $y_{sh} = g+jb \mu\text{hos}/\text{Km}$

II.2.5 Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive

Un système est dit bien conçu s'il peut délivrer une énergie d'alimentation fiable et de bonne qualité par bonne qualité on entend un niveau de tension dans des limites acceptables. Chaque fois que le niveau de tension en un point du système est soumis à des variations cela est dû à un déséquilibre entre la puissance fournie et consommée. [29]

En effet quand une charge est alimentée à travers une ligne de transmission dont la tension de départ est constante, la tension de la charge dépend de l'amplitude de la charge et du facteur de puissance de la charge. La variation de tension en un nœud est un indicateur de déséquilibre entre la puissance réactive délivrée et celle consommée cependant une importation de la puissance réactive donne une augmentation des pertes de puissances et de la chute de tension à travers l'impédance d'alimentation.

II.2.5.1 Chute de tension sur une ligne

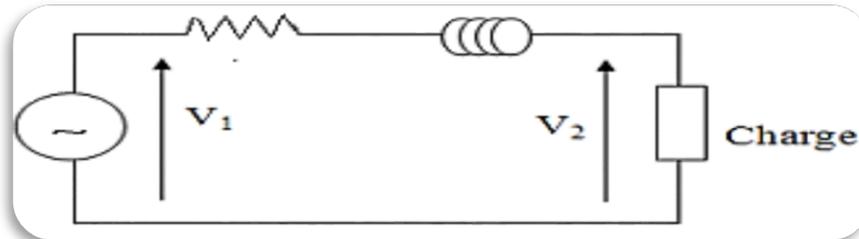


Figure II-2 ligne électrique

Afin d'illustrer les relations entre la puissance réactive et la chute de tension, considérons le circuit équivalent ci-dessous. La chute de tension due au courant I dans l'impédance

$$Z = R + j X \text{ et } \Delta V = ZI = V_1 - V_2 \tag{II-2}$$

Si nous traçons le diagramme vectoriel de ce circuit (Figure II-3)

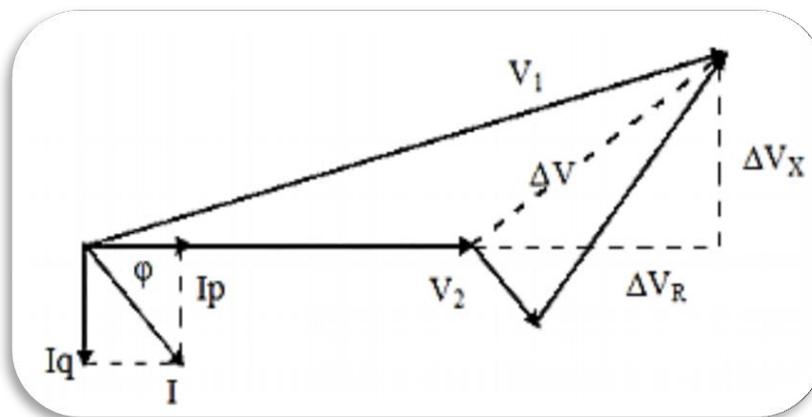


Figure II-3 diagramme vectoriel

Avec

V_1 : tension à la source,

V_2 : tension à la réception,

V_2 : tension à la réception,

ΔV_X : chute de tension au borne de la réactance,

ΔV_R : chute de tension aux borne de la résistance,

I_p : courant actif,

I_q : courant réactif.

V_2 étant pris comme référence

$$S_D = V_2 * I = P_D + j Q_D \quad (\text{II-3})$$

$$I = (P_D - j Q_D) / V_2 \quad (\text{II-4})$$

$$\Delta V = ZI = (R + j X) (P_D - j Q_D) / V_2 \quad (\text{II-5})$$

$$\Delta V = (R \cdot P_D + X \cdot Q_D) / V_2 + j (X \cdot P_D - R \cdot Q_D) / V_2 \quad (\text{II-6})$$

$$\Delta V = \Delta VR + j \Delta VX \quad (\text{II-7})$$

Avec

S_D : puissance apparente de la charge,

P_D : puissance active de la charge,

Q_D : puissance réactive de la charge

C'est-à-dire que la chute de tension a une composante ΔVR en phase avec V_2 et une composante ΔVX en quadrature avec V_2 .

Il est clair que la chute de tension dépend simultanément de la puissance active et réactive de la charge.

Comme $\Delta V = V_1 - V_2$ donc $V_1 = V_2 + \Delta V$ et en considérant de V_1 .

$$|VI|^2 = (V_2 + \Delta VR)^2 + (\Delta VX)^2 \quad (\text{II-8})$$

$$|VI|^2 = \left(V_2 + \frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \right)^2 + \left(\frac{XP_D - RQ_D}{V_2} \right)^2 \quad (\text{II-9})$$

Comme $\Delta VX < (V_2 + \Delta VR)$ on peut approximer

$$|VI|^2 = \left(V_2 + \frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \right)^2 \quad (\text{II-10})$$

$$V_1 - V_2 = \frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \quad (\text{II-11})$$

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

$$\Delta V = V_1 - V_2 \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (\text{II-12})$$

Donc la cause de la chute de tension à travers une impédance est dû principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est dû à la variation de la puissance réactive.

Pour maintenir V_2 constante si le courant I change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

II.2.5.2 Contrôle de la tension

La chute de tension sur un élément de réseau s'exprime par :

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2} \approx \frac{XQ}{V_2} \quad (\text{II-13})$$

L'examen de cette équation montre que pour maintenir V_2 constante au niveau du consommateur. On dispose de plusieurs solutions à savoir :

- Augmentation de la tension de départ V_1
- Diminution de la réactance de la ligne par insertion de réactance capacitive.
- Fourniture de la puissance réactive au niveau des usagers (compensation de la puissance réactive)

Cette compensation peut être obtenu soit par :

- La connexion de capacité shunts
- La connexion de compensateur synchrone
- La connexion de réactance shunt (pour les faibles charges, ou charges capacitives)

II.3 La Compensation de la puissance réactive

La compensation est l'installation d'une source d'énergie réactive afin de produire une quantité de cette énergie au plus près des charges pour éviter qu'elle ne circule dans le réseau électrique du distributeur dans le but de diminuer la quantité d'énergie réactive fournie par la source et améliorer la stabilité du réseau électrique

L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre- demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs dont les caractéristiques sont très différentes :

Le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande partie de l'ajustement peut être donc réalisée aux moyens dont l'action est discontinue et avec un temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur le réseau.

Le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en œuvre de moyen dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend les groupes de production, les compensateurs synchrones, les compensateurs statiques et les dispositifs FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems). [30]

II.3.1 Rôles de la puissance réactive

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

A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, le phénomène flicker, et une meilleure marge pour la stabilité. Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport. [30]

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

II.3.2 Principe général de la compensation

Le principe de compensation peut être représenté par la figure (II.4). Le rendement de l'installation se trouve donc améliorer puisque les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant. [31]

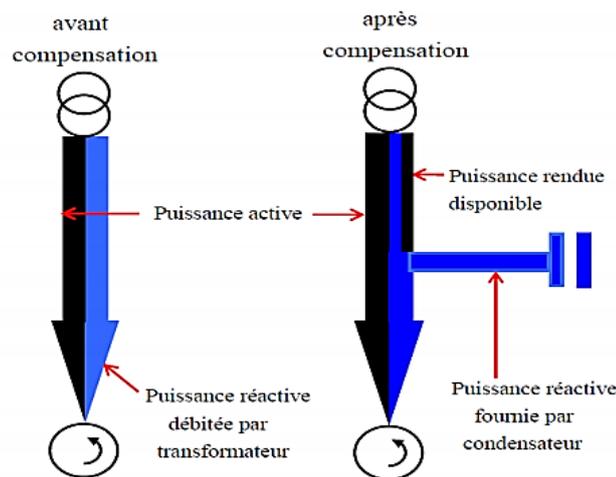


Figure II-4 principe de la compensation de la puissance réactive

II.3.3 Objectif de la compensation de la puissance réactive

- Compenser l'énergie 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.
- Amélioration des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production

En analysant la nature de la puissance réactive, on peut conclure que la puissance réactive est une chose très importante pour les réseaux électriques (en courant alternatif). On distingue les sources principales et les sources complémentaires (ou secondaire)

- Les sources principales : sont destinées pour la production de la puissance active et la puissance réactive, ce sont les générateurs des centrales électriques qui produisent ces puissances.
- Les sources complémentaires (ou secondaire) sont des installations électriques destinées pour la compensation du surplus ou des déficits de la puissance réactive dans les réseaux électriques et pour des différents réglages dans ces régimes de fonctionnement. Leur puissance installée et leur emplacement sont en relation directe avec des critères d'ordinaire technique et technico-économique. Les installations électriques sont installées dans des sous stations directement ou sous formes de consommateur

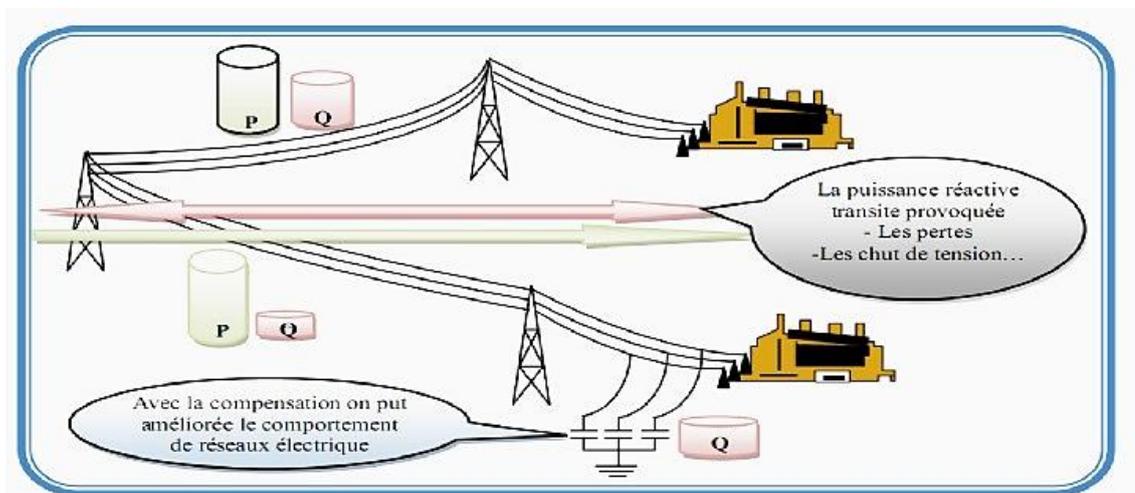


Figure II-5 intérêt de la compensation

II.3.4 Moyens de compensation de l'énergie réactive

II.3.4.1 Les compensateurs asynchrones

Ce sont des machines tournantes qui grâce à leur performance dynamique peuvent faire face aux fluctuations brusque de la demande, par contre, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives. En raison des chutes de tension importante créent les transits d'énergie réactive sur

les réseaux, et comme pour les groupes générateurs, la fourniture de puissance réactive est limitée par l'échauffement des enroulements et l'absorption par des problèmes de stabilité statique. [32]

II.3.4.2 Groupes thermiques et hydrauliques

Leurs rôles sont essentiels dans le contrôle de la tension et la compensation de l'énergie réactive, ils constituent les sources de tension du réseau grâce à la force électromotrice de l'alternateur. Ils peuvent de plus échanger des quantités très importantes d'énergie réactive avec le réseau et enfin ils ont de bonne performance sur le plan dynamique.

Les groupes sont donc bien situés pour satisfaire les besoins en compensation d'énergie réactive des réseaux de transport, en revanche ils ne peuvent pas compenser que partiellement les charges réactive en raison des chutes de tension importante que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux de transport [32]

II.3.4.3 Condensateurs

Leurs rôles sont de fournir une partie de l'énergie réactive consommé par les charges dans le réseau, on distingue 2 type :

- Des batteries de condensateurs HT : raccordés aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
- Des batteries de condensateurs MT : raccordés aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Elles servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseau de transports. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension. [32]

II.3.4.4 Inductances

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heure creuse par les lignes à très hautes tension ou par les réseaux de câbles. Elles sont raccordées directement au réseau (on dispose d'éléments de 100MVars raccordés au réseau de 400kV) ou bien branchées sur les tertiaires des transformateurs 400/225kV (éléments de 64Mvars raccordés à 20kV). [32]

II.3.4.5 Compensateurs statiques

Ils sont constitués de condensateurs et inductances commandés par thyristors montés en tête bêche dans chaque phase. De ce fait, chaque un d'entre eux est conducteur pendant une demi période. Les compensateurs statiques ont une bonne performance dynamique (temps de réponse et de quelque dixième de seconde), donc ils peuvent être utiliser pour le réglage de la tension en particulier dans les zones éloigner des centres de production. [32]



Figure II-6 compensateur statique

II.4 Les dispositifs FACTS

II.4.1 Définition

La définition du terme FACTS selon l'IEEE (institut of electrical and Electric engeneers) est : Système de transmission en courant alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroitre la contrôlabilité et augmenter la capacité de puissance du réseau.

Les FACTS sont capables d'accroitre la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissance. Les FACTS ne peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport. Par contre, ils permettent d'utiliser les lignes plus proches de cette limite en repoussant d'autre limitations en particulier celles liées à la stabilité.

De ce fait, il faut noter que les FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant. [33]

II.4.2 Rôle des dispositifs FACTS

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 représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'inductance et condensateur enclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. Dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les

problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régimes stationnaires qu'en régimes transitoires. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régimes permanents, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants : [34]

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

Les dispositifs FACTS peuvent aussi être utilisés pour la symétrisations de lignes de transport afin d'accroître leur capacité.

II.4.3 Classification des dispositifs FACTS

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

- La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher des composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive. Ils servent également au remplacement du changeur de prises en charge mécanique dans les transformateurs de réglage.
- La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former des convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
- Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau [33] [35]

Une autre classification basée sur le mode de couplage peut être réalisée. Selon ce critère, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence : [36] [37]

- Les dispositifs shunts connectés en parallèle dans les postes du réseau.
- Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport.
- Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages.

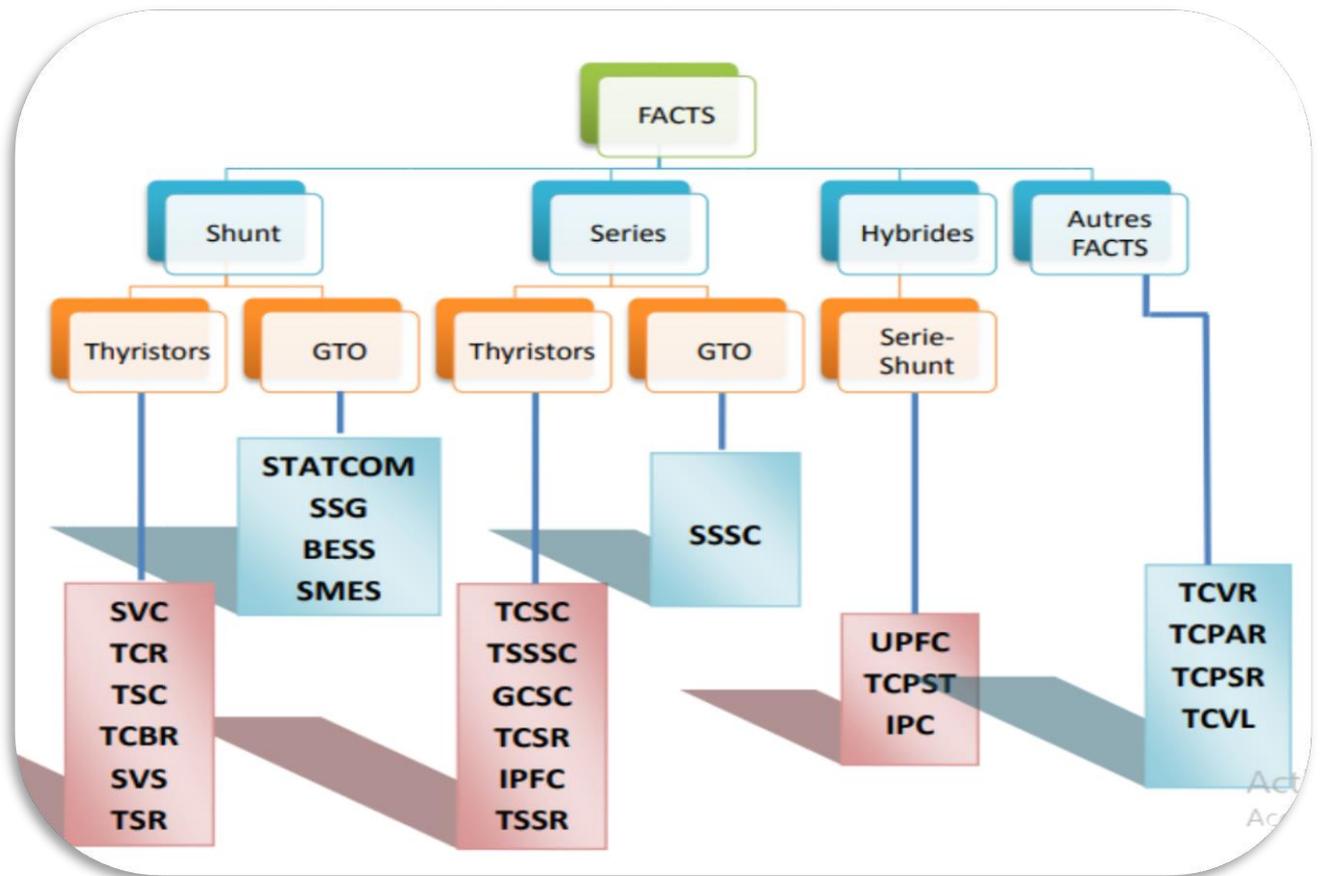


Figure II-7 classification des dispositifs FACTS

II.4.4 Avantages et les Inconvénients de la technologie des dispositifs FACTS

II.4.4.1 Avantages [23]

- Contrôle de la boucle de l'écoulement de puissance.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...).
- Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettra ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.
- Optimise les puissances générées, donc réduire le coût de production de l'énergie.

II.4.4.2 Inconvénients [38]

L'introduction des harmoniques du réseau électrique ce qui le rend pollué, c'est-à-dire le signal sera tendu et non sinusoïdale. Il rend le réseau vulnérable au sur tension dues aux commutations répétitives

II.4.5 Contraintes des dispositifs FACTS

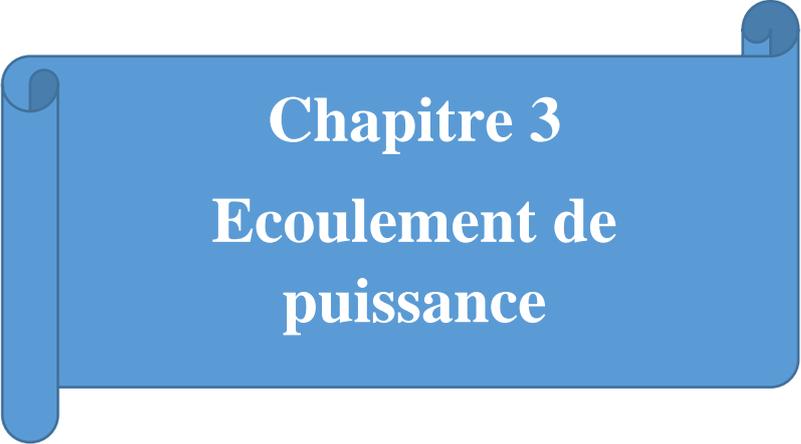
Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent des inconvénients, en plus qu'ils ne sont pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables : [39]

- Le choix du FACTS.
- Le choix du modèle du FACTS.
- Choix de la localisation des FACTS.
- Protection pour les FACTS et pour le réseau.
- Interactions entre les dispositifs FACTS et les autres éléments.

II.5 Conclusion

Le contrôle de la tension/puissance réactive a pour objectif de maintenir un profil adéquat dans le réseau de transport d'énergie électrique. En plus, il doit maintenir des réserves de puissance réactive dans les différentes zones du système pour faire face aux incidents de tension. On doit tenir en compte que les problèmes de tension doivent être corrigés localement étant donné, que la majorité des moyens qu'on peut prendre pour résoudre ces problèmes ont une étendue fondamentalement locale.

Dans ce chapitre nous avons parlé sur l'importance de la planification, la puissance réactive ainsi que les dispositifs conventionnels et les dispositifs FACTS qui peuvent assurer la compensation de l'énergie réactive. Nous avons aussi parlé sur les avantages de la technologie des dispositifs FACTS.

A blue scroll graphic with a white border and a dark blue shadow, containing the chapter title.

Chapitre 3

Ecoulement de puissance

III. Écoulement de puissance

III.1 Introduction

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

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

III.2 Concept général de l'écoulement de puissance

L'écoulement de puissance est utilisé pour déterminer en régime permanent les tensions complexes des jeux de barre du réseau, à partir de là on calcule les transits de puissance active et réactive des lignes et transformateurs. [40]

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

Pour conclure, un modèle mathématique régissant le problème de l'écoulement de puissance sera formulé pour pouvoir résoudre le problème d'écoulement de puissance.

III.3 But de l'étude de l'écoulement de puissance

Le calcul de l'écoulement de puissance est réalisé dans le but de : [41] [42]

- Définition de l'état du réseau : L'objectif du calcul d'écoulement de puissance dans un réseau est de déterminer l'état du réseau selon les charges connectées et leur répartition sur tous les accès du réseau. Le calcul fournit une image précise du flux de puissance active et réactive dans chaque élément du réseau de transport, ainsi que les niveaux de tension en chaque nœud. Ce calcul est basé sur l'hypothèse que le réseau fonctionne à l'état d'équilibre et que les générateurs fournissent de l'énergie sous forme de courant alternatif (CA) sinusoïdale et de tensions triphasées équilibrées.
- Calcul des flux de courant : La valeur du courant circulant à travers chaque élément du réseau (ligne, un câble ou un transformateur) ne doit pas dépasser les valeurs limites (I_{ijmax}) de courant de ces composants. Le calcul du flux de courant ne doit pas dépasser ces valeurs. Des valeurs excessives du courant peuvent conduire à une surchauffe des composants et même à une rupture.
- Calcul des pertes en ligne : Le calcul d'écoulement de puissance permet à travers les flux de courant une évaluation des pertes de puissance dans les lignes et les transformateurs. Des

Pertes excessives peuvent conduire à la reconfiguration du réseau afin de minimiser ces dernières sur l'ensemble du réseau.

- Etablir une stratégie d'adaptation et de contrôle : La détermination des tensions aux nœuds et de la puissance active et réactive que chaque générateur doit fournir pour assurer la livraison de puissance à chaque charge, permet de définir les instructions de commande pour la régulation de chaque machine connectée au réseau. Ce calcul est également utilisé dans l'analyse de stabilité.
- Optimisation de la capacité de transit de puissance : Enfin, il est possible d'optimiser le flux de puissance afin d'augmenter la capacité de transfert de puissance disponible dans le réseau en utilisant des algorithmes basés sur le concept de contraintes et de fonction objectif.
- Assurer l'équilibre entre la production et la demande d'énergie électrique.
- Conserver les tensions des jeux de barre entre les limites théoriques en utilisant le contrôle de puissance réactive.
- Planification des réseaux (à partir de calcul de la charge).
- Augmenter la sécurité de fonctionnement des réseaux par une bonne stratégie d'EP avant les perturbations.

III.4 Problème de l'écoulement de puissance

Le calcul de l'écoulement de puissance consiste à déterminer l'ensemble des transits de puissance et des tensions dans un réseau contenant un nombre de charges donné.

Pour chaque nœud du système on associe quatre grandeurs : puissance active et réactive, module et phase de la tension. Sur ces quatre grandeurs seul deux sont connues en un nœud, les deux autres sont déterminées par calcul. [43]

Trois types de nœuds sont utilisés :

III.4.1 Nœud de charge(PQ)

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

III.4.2 Nœud générateur(PV)

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

III.4.3 Accès bilan

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

III.5 Modélisation des éléments de puissance d'un réseau électrique

III.5.1 Modèle de l'alternateur(générateur)

Les turbo-alternateur (machines synchrones triphasées) sont considérés comme le cœur du réseau électrique, ils assurent la production de l'énergie demander par les consommateurs en convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique à tension et à fréquence désirées. [44] [45]



Figure III-1 symbole d'un générateur

III.5.2 Modèle de la ligne électrique [46]

Les lignes électriques constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que les résistances et les inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal.

III.5.2.1 Ligne de transmission courte ($l < 80$ km)

Si le niveau de tension dans la ligne électrique ne dépasse pas 66 kV et les lignes sont de moins de 80 km de long, la capacité peut être ignorée sans beaucoup d'erreur. Le modèle de ligne courte par phase est illustré par la (Fig III-3).

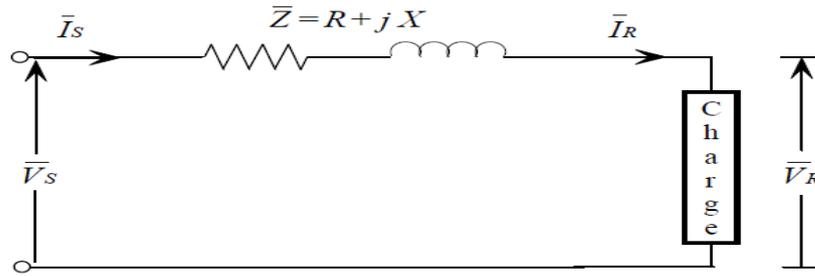


Figure III-2 modèle d'une ligne courte

III.5.2.2 Ligne de transmission moyenne (80 < l < 250)

Les lignes de longueurs moyennes sont les lignes de longueurs comprises entre 80 km et 250 km, le courant de ligne devient appréciable et la capacité shunt doit être considérée. La moitié de la capacité shunt peut être considérée à chaque extrémité de la ligne. Ceci est désigné sous le nom du modèle nominal en π .

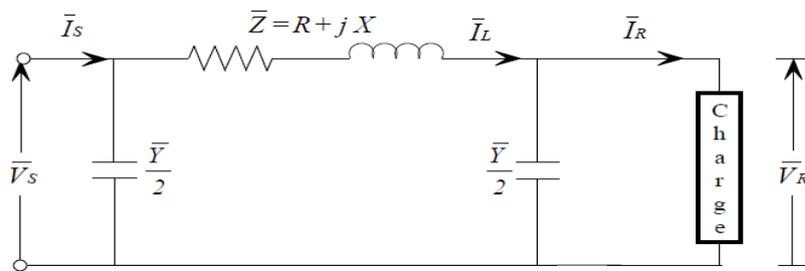


Figure III-3 ligne de longueur moyenne représentée en π

III.5.2.3 Ligne de transmission longue (l > 250km)

Les modèles des lignes courtes et moyennes ont été obtenus en supposant que les paramètres de la ligne sont des valeurs exactes. Dans le cas où la longueur de la ligne est supérieure à 250km, pour des solutions plus précises, les paramètres doivent être donnés comme une distribution uniformément répartie le long de la longueur, pour des solutions plus précises. Dans ce cas, les tensions et les courants varient d'un point à l'autre sur la ligne. (Fig. III.5) illustre un schéma unifilaire en π d'une ligne par unité de longueur.

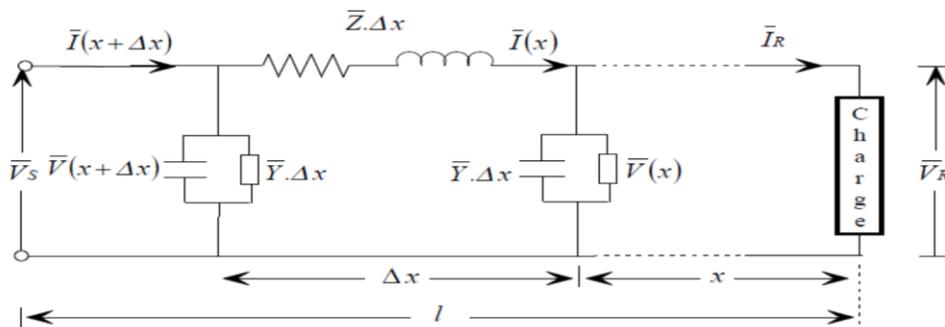


Figure III-4 schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur

III.5.3 Charge

Une charge est une impédance qui consomme de la puissance active P_L et consomme ou fournit de la puissance réactive Q_L .

La puissance réactive peut être fournie ou consommée, selon la nature de la charge capacitive ou inductive. Notons qu'une telle modélisation permet de représenter aussi bien des charges connectées directement sur le réseau de transport (cas exceptionnel) ou des points de connexion au réseau de répartition ou de distribution, ou encore des éléments du réseau tels que les moyens de compensation de la puissance réactive. [47]

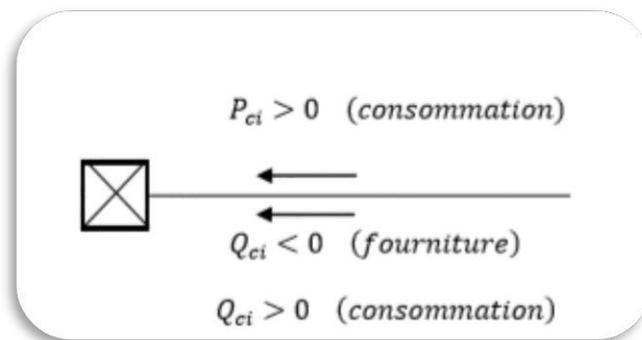


Figure III-5 symbole d'une charge

III.5.4 Les compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des générateurs de puissance réactive. L'avantage de ces derniers est que l'on peut varier la puissance réactive produite en jouant sur l'excitation du moteur, la régulation peut se faire sur une consigne de tension de l'installation ou du facteur puissance. [48]

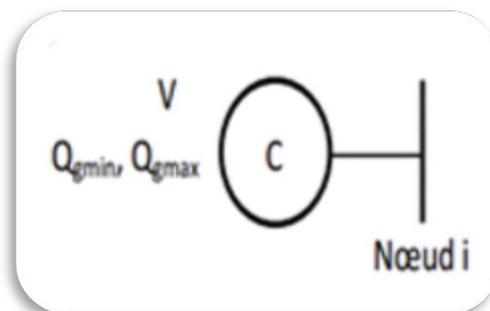


Figure III-6 symbole d'un compensateur synchrone

De nos jours cette technologie est moins utilisée, on la remplace avec celle du compensateur statique d'énergie réactive.

III.5.5 Les compensateurs statiques

Les compensateurs statiques d'énergie réactive connus aussi sous le nom de SVC (Static Var compensator) est un dispositif d'électronique de puissance utilisé pour compenser la circulation de

puissance réactive sur les réseaux électriques faisant partie du groupe des FACTS il est composé de : [47]

- Un banc de condensateur fixe ou commutable de façon discrète, qui fournit du réactif. Ce banc prend souvent la forme d'un filtre anti-harmonique.
- Un gradateur triphasé à thyristor faisant varier de façon continue le courant dans des inductances qui consomment l'axes du réactif.

En ajustant la puissance réactive Q délivrée au réseau électrique, un SVC permet d'ajuster la tension U du réseau suivant la formule

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{Q}{S_{cc}} \tag{III-1}$$

ou $\frac{\Delta U}{U}$ représente la variation relative de tension et S_{cc} la puissance de court-circuit du réseau.

III.5.6 Les transformateurs [47]

Les transformateurs sont représentés par leurs matrice admittance

Les grandeurs associées sont :

- Le rapport de transformation qui peut être complexe ou réel a.
- L'impédance de fuite $Z=R+jX$.
- La puissance maximale de transit.

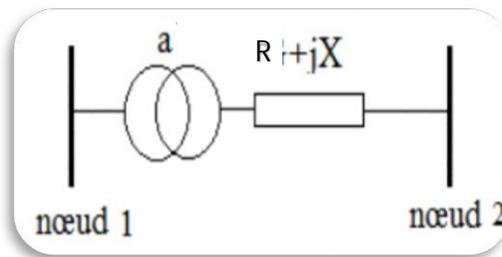


Figure III-7 exemple d'un transformateur

III.6 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 θ . La distinction entre ces différentes variables est dû à leurs natures.

III.6.1 Les variables de perturbation ou non contrôlables

Parmi les variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande (charge) P_D et Q_D 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 . [49]

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

III.6.2 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.

III.6.2.1 Variables d'état

Ce sont l'amplitude $|V_i|$ et l'angle θ_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 .

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ X_{n+1} \\ X_{n+2} \\ \vdots \\ X_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \\ |V_1| \\ |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (\text{III-3})$$

n : nombre de jeux de barres de tout le réseau.

III.6.2.2 Variables de contrôle

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

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \\ U_{n+1} \\ U_{n+2} \\ \vdots \\ U_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ \vdots \\ P_{Gn} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \\ \vdots \\ Q_{Gn} \end{bmatrix} \quad (\text{III-4})$$

III.7 Écoulement de puissance

III.7.1 Classification des accès d'un réseau électrique

Pour un réseau d'énergie électrique, on peut identifier trois types d'accès (ou jeux de barres) à savoir : [42]

- Accès bilan (ou barre d'équilibre) : 1 seul accès
- Accès générateur (P,V) : 15% des accès
- Accès de charge (P,Q) : 85% des accès

Chaque accès est caractérisé par quatre grandeurs réelles, à savoir :

- Puissance active (P)
- Puissance réactive (Q)
- Module de la tension (|V|)
- Angle de déphasage (θ)

Pour chaque accès, deux grandeurs sont spécifiées, et les autres varient suivant la demande en énergie électrique de l'ensemble des abonnés.

Pour les accès charge qui représentent généralement 85% des accès d'un réseau, la puissance complexe demandée (P et Q) est spécifiée, il reste à déterminer |V| et θ qui varient avec la demande en énergie électrique.

Pour les accès générateurs, où le module de la tension peut être réguler à l'aide de régulateur de tension, P et |V| sont spécifiés, il reste à déterminer Q et θ . Pour de tels accès, la puissance réactive est généralement bornée entre les limites Q_{\min} et Q_{\max} .

A part ces deux types d'accès, on considère un accès bilan puisque dans un réseau d'énergie électrique, la production totale est égale à la demande plus les pertes dans les lignes. Aussi du fait qu'on ne peut pas déterminer d'avance les pertes de puissances, on doit considérer un accès générateur à part pour fournir toute production additionnelle en dehors de la demande effective. Pour cet accès bilan, |V| et θ sont spécifiés et il reste à déterminer P et Q.

III.7.2 Formation de la matrice admittance nodale [Ybus]

On a trois méthodes pour la détermination de la matrice [Ynodale] qui sont : [42]

- Par inversion de la matrice impédance nodale.
- À partir des admittances des éléments du réseau.
- À partir des admittances des éléments du réseau et la matrice d'incidence (topologique).

III.7.2.1 Formation de [Ynodale] (Ybus) à partir des admittances des éléments du réseau

Cette méthode est la plus simple et la plus commode car elle nécessite moins d'opérations que les autres méthodes et surtout dans le cas où le réseau ne présente pas de couplage mutuel entre ses éléments

III.7.2.2 Dérivation de la matrice [Ybus]

Soit un réseau à n accès indépendant et un accès n+1 représentant l'accès de référence.

Considérons un accès i parmi les n accès différents de celui de référence.

Pour cet accès on a :

$$I_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \tag{III-5}$$

Avec :

I_i : le courant injecté à l'accès i par une source extérieure.

I_{ij} : le courant qui circule entre l'accès i et l'accès j à travers la branche (i-j).

On a aussi :

$$I_{ij} = (V_i - V_j) y_{ij} + y_{ij0}(V_i - V_0) \tag{III-6}$$

Telle que :

V_i et V_j : sont respectivement les tensions aux accès i et j.

y_{ij} : l'admittance propre de la branche (i-j).

y_{ij0} : l'admittance shunt de la branche (i-j).

On aura alors :

$$I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij}(V_i - V_j) = y_{i0}(V_i - V_0) + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \tag{III-7}$$

y_{i0} : la somme des admittances transversales des lignes reliées à l'accès i

Si on écrit l'équation précédente sous la forme matricielle pour les n accès on aura :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & & Y_{ii} & & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{III-8}$$

Tel que :

$$\begin{cases} Y_{ii} = \sum_{j=1}^n y_{ij0} + \sum_{j=1}^n y_{ij} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

[Y] : la matrice nodale des admittances carrée.

III.8 Equations de l'écoulement de puissance

III.8.1 Equations générales de la puissance

La puissance complexe $S_i = P_i + jQ_i$ injectée au nœud i , en fonction des tensions aux nœuds et les éléments de la matrice admittance nodale Y_{bus} , en tenant compte de l'expression du courant injecté I_i au nœud i , est donnée par la relation suivante. [42]

$$S_i = \bar{P}_i + j\bar{Q}_i = \bar{V}_i I^* = \bar{V}_i \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j^* \quad (\text{III-10})$$

En exprimant la tension sous sa forme polaire en module $|V_i|$ et argument θ_i , l'expression de la puissance complexe devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{S}_i^* = \bar{Y}_{ii} |\bar{V}_i|^2 + |\bar{V}_i| \sum_{j=1, j \neq i}^n \bar{Y}_{ij} |\bar{V}_j| \\ P_i = \text{Réal}(\bar{S}_i^*) = \text{Réal}\{\bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j\} \\ Q_i = -\text{Imag}(\bar{S}_i^*) = -\text{Imag}\{\bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j\} \end{array} \right\} \quad (\text{III-11})$$

III.8.2 Puissances écoulées dans les lignes

Pour calculer la puissance qui s'écoule dans la branche reliant les accès i et j , le courant qui circule entre les accès i et j a pour expression : [42]

$$I_{ij} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (\text{III-12})$$

Où $\bar{y}_{i0} = \sum_{j=1}^n \bar{y}_{ij0}$

Et la puissance apparente :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{S}_{ij} = \bar{V}_i \bar{I}_{ij}^* \\ \bar{S}_{ij} = \bar{V}_i [\bar{y}_{ij}(\bar{V}_i - \bar{V}_j) + y_{i0} \bar{V}_i]^* \\ \bar{S}_{ij} = |\bar{V}_i|^2 \bar{y}_{ij}^* - \bar{V}_i \bar{V}_j^* \bar{y}_{ij}^* + |\bar{V}_i|^2 \bar{y}_{i0}^* \end{array} \right\} \quad (\text{III-13})$$

De même la puissance apparente qui s'écoule de l'accès j vers l'accès i vaut :

$$\bar{S}_{ji} = |\bar{V}_j|^2 y_{ij}^* - \bar{V}_j \bar{V}_i^* y_{ij}^* + |\bar{V}_j|^2 \bar{y}_{j0}^* \quad (\text{III-14})$$

III.8.3 Puissance écoulee dans les transformateurs régulateurs

Considérant un transformateur régulateur dont sa matrice admittance est :

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{y_{ij}}{a^2} & \frac{-y_{ij}}{a} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (\text{III-15})$$

Le courant qui circule entre les accès i et j est donné comme suit :

$$\bar{I}_{ij} = \frac{y_{ij}}{a^2} \bar{V}_i - \frac{y_{ij}}{a} \bar{V}_j = \frac{1}{a} \bar{y}_{ij} \left(\frac{1}{a} \bar{V}_i - \bar{V}_j \right) \quad (\text{III-16})$$

Et la puissance \bar{S}_{ij}^* a pour valeur :

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{a^2} (\bar{V}_i)^2 \cdot \bar{y}_{ij}^* - \frac{1}{a} \bar{y}_{ij}^* \bar{V}_j^* \bar{V}_i \quad (\text{III-17})$$

D'autre part le courant qui circule de l'accès j vers l'accès i :

$$\bar{I}_{ji} = \frac{1}{a} \bar{y}_{ij} (\bar{V}_j - \frac{1}{a} \bar{V}_i) \quad (\text{III-18})$$

$$\bar{S}_{ji} = \frac{1}{a^2} (\bar{V}_j)^2 \bar{y}_{ij}^* - \frac{1}{a} \bar{y}_{ij}^* \bar{V}_j^* \bar{V}_i \quad (\text{III-19})$$

III.8.4 Calcul des pertes totales dans le réseau

Pour un élément du réseau reliant deux accès i et j on a : [42]

$$\bar{S}_{lossk} = \bar{S}_{ij} + \bar{S}_{ji} \quad (\text{III-20})$$

Tel que :

\bar{S}_{Lossk} : Puissance apparente perdue dans la branche (i et j).

\bar{S}_{ij} : Puissance apparente qui transite de l'accès i vers l'accès j.

\bar{S}_{ji} : Puissance apparente qui transite de l'accès j vers l'accès i.

D'où

$$\bar{P}_{lossk} = \text{Reel}\{\bar{S}_{lossk}\} \quad (\text{III-21})$$

$$\bar{Q}_{lossk} = \text{Imag}\{\bar{S}_{lossk}\} \quad (\text{III-22})$$

\bar{P}_{Lossk} : Puissance active perdue dans la branche (i et j)

\bar{Q}_{Lossk} : Puissance réactive perdue dans la branche (i et j)

La puissance totale perdue dans le réseau est égale à la somme des puissances perdues dans toutes les branches du réseau.

$$\begin{aligned}\bar{S}_{\text{loss}} &= \sum \bar{S}_{\text{loss}k} \\ \bar{P}_{\text{loss}} &= \text{Réal} \left\{ \sum \bar{S}_{\text{loss}k} \right\} \\ \bar{Q}_{\text{loss}} &= \text{Imag} \left\{ \sum \bar{S}_{\text{loss}kj} \right\}\end{aligned}$$

III.9 Méthodes de calcul de l'Écoulement de puissance

Pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance, on a recours à plusieurs méthodes,

- Méthode de Gauss-Seidel.
- Méthode de Newton-Raphson.
- Méthode découplée de Newton.
- Méthode découplée rapide de Newton

Dans notre travail on s'intéresse à la méthode de newton-raphson

III.10 Formulation du problème d'écoulement de puissance

Les puissances apparentes injectées dans chaque nœud : [42]

$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* \quad (\text{III-23})$$

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \bar{V}_2 \bar{I}_2^* \quad (\text{III-24})$$

⋮

$$\bar{S}_n = P_n + jQ_n = \bar{V}_n \bar{I}_n^* \quad (\text{III-25})$$

En tenant compte des équations

$$\bar{V}_1 \bar{I}_1^* = \bar{V}_1 (\bar{Y}_{11}^* \bar{V}_1^* + \bar{Y}_{12}^* \bar{V}_2^* + \dots + \bar{Y}_{1n}^* \bar{V}_n^*) = \bar{V}_1 \sum_{j=1}^n \bar{y}_{1j} \bar{V}_j^* \quad (\text{III-26})$$

⋮

$$\bar{V}_2 \bar{I}_2^* = \bar{V}_2 (\bar{y}_{21}^* \bar{V}_1^* + \bar{y}_{22}^* \bar{V}_2^* + \dots + \bar{y}_{2n}^* \bar{V}_n^*) = \bar{V}_2 \sum_{j=1}^n \bar{y}_{2j}^* \bar{V}_j^* \quad (\text{III-27})$$

⋮

$$\bar{V}_n \bar{I}_n^* = \bar{V}_n (\bar{y}_{n1}^* \bar{V}_1^* + \bar{y}_{n2}^* \bar{V}_2^* + \dots + \bar{y}_{nn}^* \bar{V}_n^*) = \bar{V}_n \sum_{j=1}^n \bar{y}_{nj}^* \bar{V}_j^* \quad (\text{III-28})$$

Pour le cas général d'un réseau à n accès :

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

$$\overline{y}_{ij} = y_{ij} e^{j\theta_{ij}} \quad (\text{III-29})$$

$$\overline{V}_i = V_i e^{j\delta_i} \quad (\text{III-30})$$

L'équation (III-28) devient donc :

$$P_i + jQ_i = |\overline{V}_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| e^{j(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})} \quad (\text{III-31})$$

Donc les équations non linéaires qui décrivent un réseau à n accès sont :

$$P_i = |\overline{V}_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad i = 1, n \quad (\text{III-32})$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad i = 1, n$$

(III-33)

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

$$P_i = |\overline{V}_i| \sum_{j=1}^n |V_j| (G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})) \quad i = 1, n \quad (\text{III-34})$$

$$Q_i = \overline{V}_i \sum_{j=1}^n |V_j| (G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})) \quad i = 1, n \quad (\text{III-35})$$

Tel que : $\overline{Y}_{lj} = G_{lj} + jB_{lj} \text{ et } \delta_{lj} = \delta_i - \delta_j \quad (\text{III-36})$

III.10.1 Écoulement de puissance par la méthode de Newton Raphson

L'expression générale permettant de calculer la puissance apparente S_i :

$$\overline{S}_i = \overline{V}_i (\sum_{j=1}^n \overline{Y}_{lj} \overline{V}_j)^* \quad (\text{III-37})$$

La méthode de Newton Raphson à plusieurs variantes selon que l'on exprime les éléments de la matrice admittance nodale et tensions aux accès en coordonnées cartésiennes, polaires ou hybrides. Dans la suite de ce travail on continu avec la forme polaire.

On a

$$\overline{V}_i = |V_i| e^{j\theta_i} \quad (\text{III-38})$$

Et

$$\overline{Y}_{lj} = |Y_{lj}| e^{j\varphi_{lj}} \quad (\text{III-39})$$

En séparant la partie réelle de la partie imaginaire on aura :

$$\begin{cases} P_i = |\bar{V}_i| \sum_{j=1}^n |\bar{V}_j| |\bar{Y}_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \\ Q_i = |\bar{V}_i| \sum_{j=1}^n |\bar{V}_j| |\bar{Y}_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \end{cases} \quad (\text{III-40})$$

Ou bien,

$$\begin{cases} P_i = F(\theta, |\bar{V}|) \\ Q_i = G(\theta, |\bar{V}|) \end{cases} \quad \text{pour } i = 1, n \quad (\text{III-41})$$

III.10.2 Formulation des équations de la méthode de Newton Raphson

Le système d'équations (III-40) est formé donc de deux équations permettant de calculer P et Q avec deux inconnus θ et $|\bar{V}|$.

En différenciant les équations (III-44) par rapport à (θ) et $(|\bar{V}|)$ on aura ;

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial |\bar{V}_j|} \Delta |\bar{V}_j| \\ \Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial |\bar{V}_j|} \Delta |\bar{V}_j| \end{cases} \quad (\text{III-42})$$

Physiquement, les ΔP_i et ΔQ_i représentent la différence entre les valeurs spécifiées et celles calculer des puissances actives $P_{\text{spéc}}$ et réactives $Q_{\text{spéc}}$ qui peuvent être calculées comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_n|} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta |\bar{V}_2| \\ \vdots \\ \Delta |\bar{V}_n| \end{Bmatrix} \quad (\text{III-43})$$

Avec,

$$[J_1] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (\text{III-44})$$

$$[J_2] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_n|} \end{bmatrix} \quad (\text{III-45})$$

$$[J_3] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (\text{III-46})$$

$$[J_4] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_n|} \end{bmatrix} \quad (\text{III-47})$$

III.10.3 Système d'équation à résoudre

Le système d'équation sous forme matricielle à résoudre s'écrit comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \{\Delta P\} \\ \{\Delta Q\} \end{Bmatrix}^k = [J]^k \begin{Bmatrix} \{\Delta \theta\} \\ \{\Delta |\bar{V}|\} \end{Bmatrix}^k \quad (\text{III-48})$$

Avec,

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III-49})$$

$$\begin{Bmatrix} \{\theta\} \\ \{\bar{V}\} \end{Bmatrix}^{k+1} = \begin{Bmatrix} \{\theta\} \\ \{\bar{V}\} \end{Bmatrix}^k + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1(k)} \begin{Bmatrix} \{\Delta P\} \\ \{\Delta Q\} \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (\text{III-50})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} |\bar{V}_i|^{(k+1)} = |\bar{V}_i|^{(k)} + \Delta |\bar{V}_i|^{(k)} \\ \theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta \theta_i^{(k)} \end{array} \right\} \quad i = 1, n \quad (\text{III-51})$$

III.10.4 Calcul des éléments du Jacobien [42]

Les éléments du Jacobien peuvent être calculer à partir des équations (III-41), et ceux on les dérivant par rapport aux modules des tensions et aux angles de phases.

III.10.4.1 Éléments de J1

Éléments de la diagonale :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -|\bar{V}_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |\bar{V}_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \quad (\text{III-52})$$

Éléments hors de la diagonale :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = -|\bar{V}_i| |\bar{V}_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \varphi_{ik}) \quad (\text{III-53})$$

III.10.4.2 Éléments de J2

Éléments de la diagonale :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |\bar{V}_i|} = 2|\bar{V}_i||\bar{Y}_{ii}|\cos(\varphi_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |\bar{V}_j||\bar{Y}_{ij}|\cos(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \quad (\text{III-54})$$

Eléments hors de la diagonale :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |\bar{V}_k|} = |\bar{V}_i||\bar{Y}_{ik}|\cos(\theta_i - \theta_k - \varphi_{ik}) \quad (\text{III-55})$$

III.10.4.3 Eléments de J3

Eléments de la diagonale :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -|\bar{V}_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |\bar{V}_j||Y_{ij}|\cos(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \quad (\text{III-56})$$

Eléments hors de la diagonale :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = |\bar{V}_i||\bar{V}_k||Y_{ik}|\cos(\theta_i - \theta_k - \varphi_{ik}) \quad (\text{III-57})$$

III.10.4.4 Eléments de J4

Eléments de la diagonale :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |\bar{V}_i|} = 2|\bar{V}_i||\bar{Y}_{ii}|\sin(\varphi_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |\bar{V}_j||\bar{Y}_{ij}|\sin(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \quad (\text{III-58})$$

Eléments hors de la diagonale :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |\bar{V}_k|} = |\bar{V}_i||\bar{Y}_{ik}|\sin(\theta_i - \theta_k - \varphi_{ik}) \quad (\text{III-59})$$

Pour un accès k générateur (P, |V|) où l'amplitude de la tension |V_k| est spécifiée et reste constante, alors Δ|V_k| = 0. Il est donc nécessaire de supprimer la ligne et la colonne correspondant à k dans la matrice J4 tant que Δ|V_k| = 0. Cela doit être appliqué pour tous les accès générateurs. Par conséquent, les puissances réactives injectées en ces accès peuvent être calculées directement par l'équation (III-42). Il est alors nécessaire de vérifier que la puissance réactive calculée à chaque accès générateur « i » est dans les limites de puissance réactive spécifiées

III.11 Organigramme de la méthode de Newton-Raphson

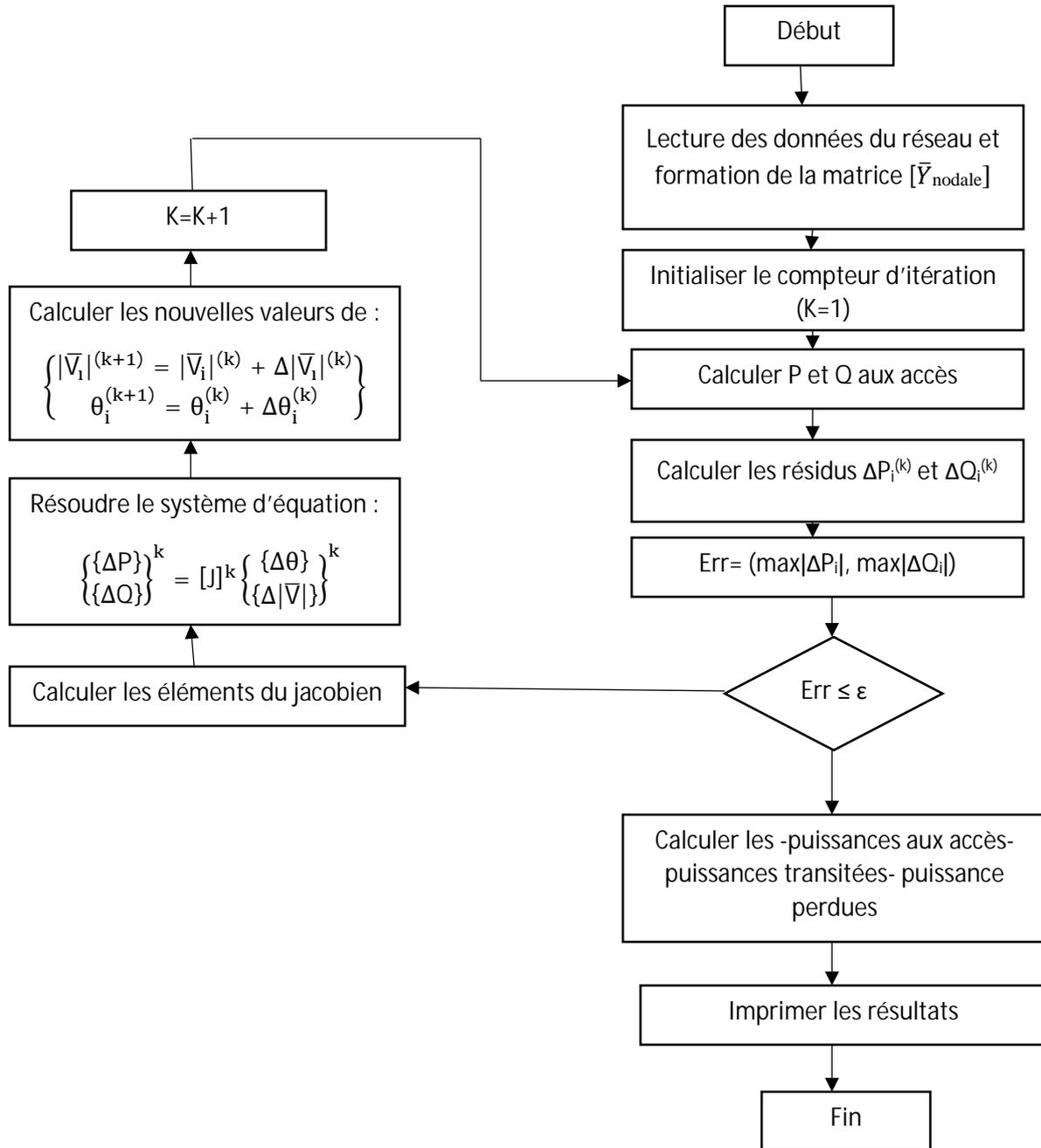
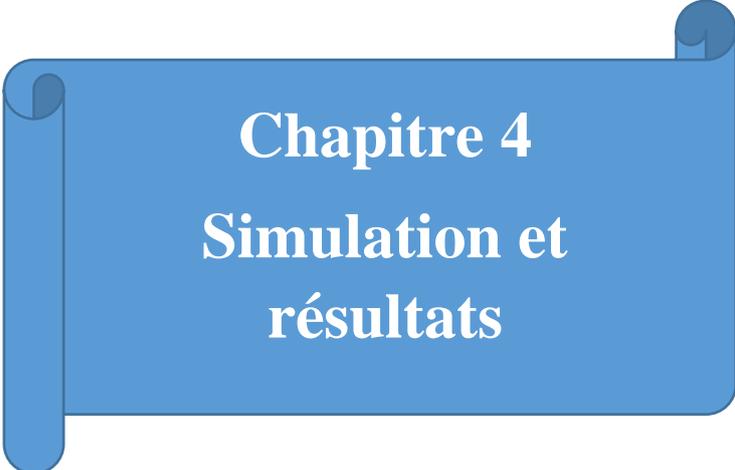


Figure 0-1 organigramme de la méthode de newton raphson

III.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les éléments du réseau électrique, à savoir les lignes, les transformateurs, les générateurs et les charges. Nous avons construit la matrice admittance nodale du réseau. On a aussi présenté le concept général, l'objectif et le problème de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique.

L'importance de l'étude de l'écoulement de puissance est capitale pour l'obtention de tous les paramètres du réseau électrique, pour chaque nœud dont : La Puissance (Active et Réactive) la tension (Module et Angle). Parmi les méthodes de résolution, on a choisi la méthode de Newton Raphson, nous avons présenté le principe, les étapes et l'algorithme de cette méthode.

A blue scroll graphic with a white border and rounded corners. The scroll is unrolled in the middle, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the white background of the scroll.

Chapitre 4

Simulation et résultats

IV. Simulation et résultats

IV.1 Introduction

Pour un bon fonctionnement d'un réseau électrique, on doit maintenir les tensions des différents jeux de barres dans les limites autorisées.

Ce chapitre est consacré d'abord à la présentation du logiciel PSAT et du programme ACLF réalisé au niveau du laboratoire LGEB. Deux réseaux de 14 et 6 accès ont été choisis pour simuler et étudier le problème du profil et de la stabilité de la tension.

L'étude du profil et de la stabilité de la tension en premier lieu des réseaux par PSAT et ACLF sans compensation permet de relever à partir des courbes de charges, les jeux de barres ayant les profils de tension les plus défavorables.

Un choix optimal du jeu de barre ou on a inséré le dispositif FACTS a été opéré sur les deux réseaux.

La simulation par PSAT et ACPF des deux réseaux avec compensation (FACTS) permettra d'évaluer l'amélioration des performances en tension des réseaux.

IV.2 Logiciel de simulation

Pour commencer nous allons donner un petit aperçu sur le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox). [50]

C'est un logiciel développé sous MATLAB par Dr. Fededico MILANO pour l'analyse des réseaux électriques. L'interface graphique de ce logiciel permet à l'utilisateur de calculer :

- L'écoulement de puissance PF (Power Flow).
- L'écoulement de puissance Optimal OPF (Optimal Power Flow).
- L'écoulement de puissance en continu CPF (Continuation Power Flow).
- L'Analyse de la stabilité de petites perturbations SSSA (Small Signal Stability Analysis).
- Simulation temporelle TDS (Time Domain Simulation).
- Intégration des systèmes FACTS dans les réseaux de transport.

ACLF ; c'est un programme réaliser sous l'environnement MATLAB au niveau du laboratoire LGEB, il permet de calculer l'écoulement de puissance continu (CPF) avant et après compensation. Il e compose d'un programme principale (ACLF) et de trois sous-programme (Acpf, LFYbus et print_rpp).

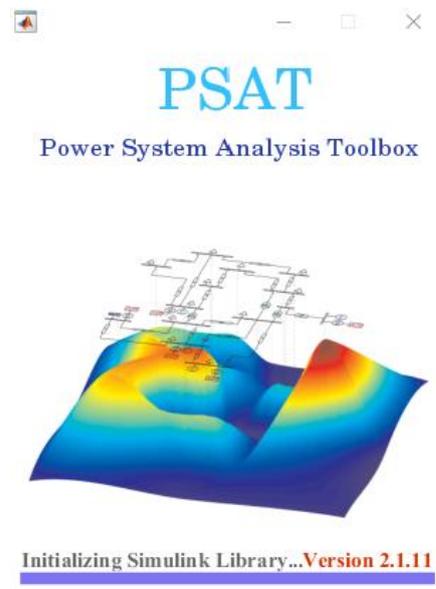


Figure IV-1 interface graphique du PSAT 2.1.11

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 IV-1 représente une comparaison entre quelques logiciels d’analyse des réseaux électriques

Tableau IV-1 comparaison entre différentes méthodes d'analyse d'un réseau électrique

| Fonction | PF | CPF | OPF | SSA | TD | EMT | GUI | GNE |
|-----------------|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| EST | + | | | + | + | | | + |
| MatEMTP | | | | | + | + | + | + |
| MatPower | + | | + | | | | | |
| PAT | + | | | + | + | | | + |
| PSAT | + | + | + | + | + | | + | + |
| PST | + | + | | + | + | | | |
| SPS | + | | | + | + | + | + | + |
| VST | + | + | | + | + | | + | |

Pour plus de détails sur PSAT consulter l’annexe [51]

IV.3 Etude du profil et de la stabilité de la tension d’un réseau de 14Jdb et du réseau 6Jdb

La figure IV-2 (réseau a) montre le réseau test montre le réseau test IEEE 6 nœuds (400kV). Il comprend 6Jdb,11 lignes, 3 générateurs et 3 charges.

La figure IV-3 (réseau b) montre le réseau test montre le réseau test IEEE 14 nœuds (69kV) . Il comprend deux générateurs installés aux nœuds 1 et 2, trois compensateurs synchrones installées aux nœuds 3, 6, et 8. Les générateurs sont considérés avec la limitation sur la puissance réactive. Des charges sont connectées aux accès 2 ,3,5,6,9,10,11,12,13et14.

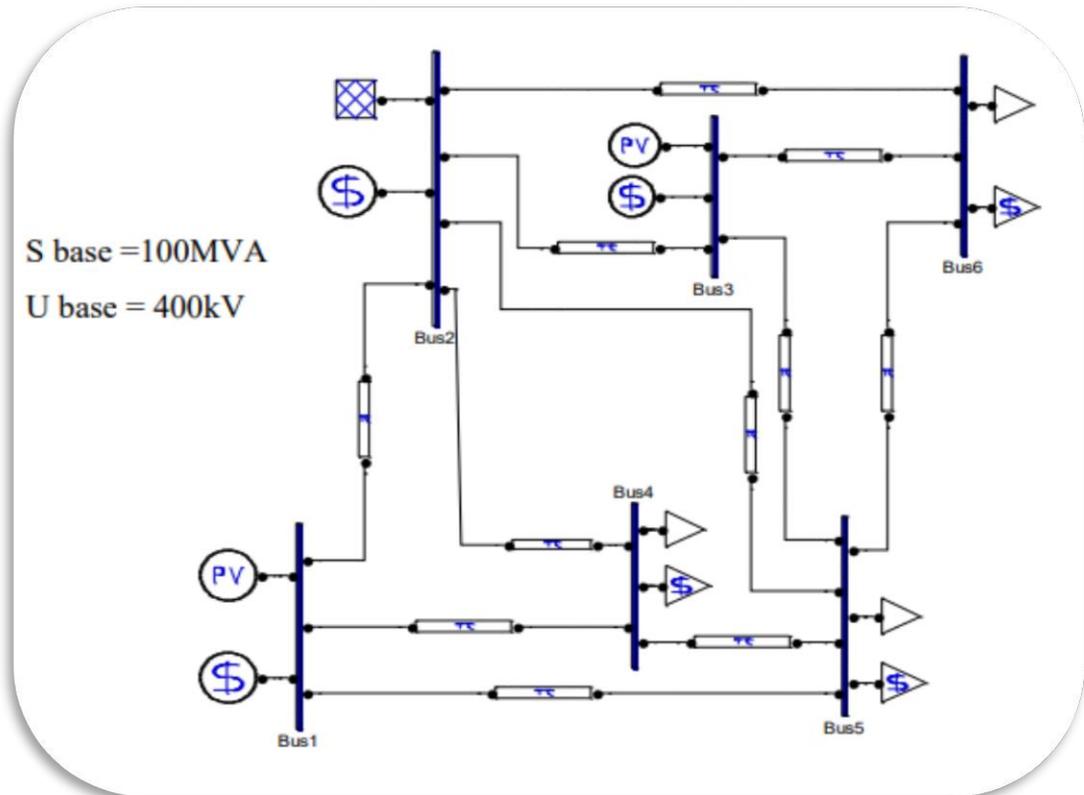


Figure IV-2 topologie du réseau 6 jeux de barres

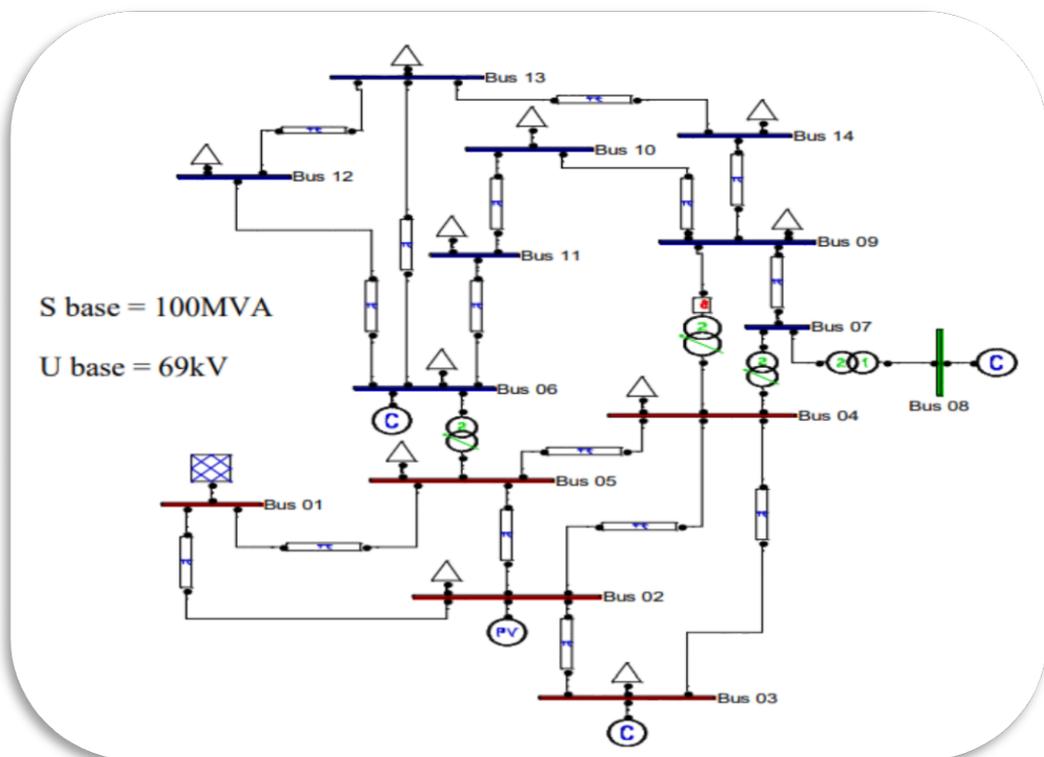


Figure IV-3 topologie du réseau 14 jeux de barres

Le calcul de l'écoulement de puissance est une étape nécessaire pour l'étude de la stabilité d'un réseau électrique. Il est effectué en premier lieu pour la détermination des conditions initiales du système avant l'insertion des compensateurs.

En effet, il permet de trouver les tensions aux différents nœuds et par la suite les puissances transmises et injectées. Les résultats du calcul de l'écoulement de puissance sont obtenus à partir d'un programme utilisant la méthode de Newton-Raphson avec une précision de $\varepsilon = 10^{-5}$.

En utilisant l'écoulement de puissance continu(CPF) on fait évaluer les profils de tension des jeux de barres des deux réseaux en fonction de la variation de la charge avant et après compensation. On a effectué l'étude d'abord sans compensation et on a prélevé les jeux de barres ayant le profil de tension le plus bas, puis on a inséré le dispositif FACTS dans le jeu de barre le plus faible en tension et on a réévalué les profils de tensions des jeux de barres.

L'écoulement de puissance continu(CPF) consiste à augmenter la charge par le facteur λ à partir d'un point de fonctionnement initiale stable jusqu'à atteindre un point de singularité.

L'organigramme de la stabilité de tension avec les FACTS en utilisant la méthode CPF est illustré par la figure (IV-4).

De la figure (IV-4) on peut observer que les équations des dispositifs FACTS sont ajoutées dans les équations de l'écoulement de puissance. Les nouvelles équations de l'écoulement de puissance sont ensuite utilisées dans le pas correcteur du processus CPF.

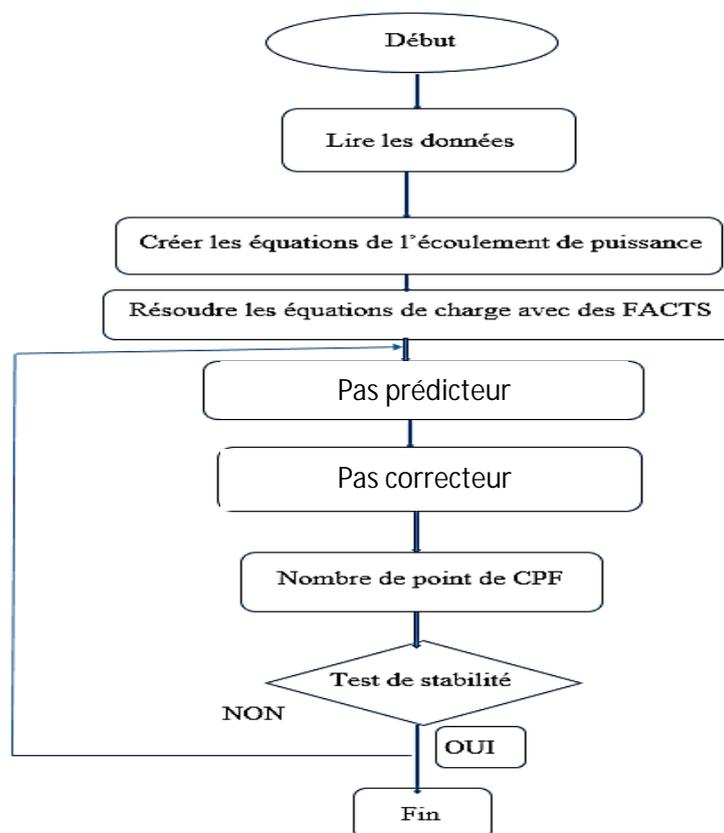


Figure IV-4 organigramme du processus CPF avec PSAT

IV.3.1 Calcul de l'écoulement de puissance continu(CPF)

Après le calcul de l'écoulement de puissance continu sur le réseau (a), on a prélevé les tensions et les déphasages dans chaque jeu de barre, les valeurs obtenues sont illustrées dans le tableau IV-2

Tableau IV-2 résultats du CPF (réseau a)

| N°bus | PSAT | | ACLF | |
|-------|--------|------------|-------|------------|
| | V(pu) | Phase(rad) | V(pu) | Phase(rad) |
| Bus 1 | 1 | 0.0454 | 1 | 0.036 |
| Bus 2 | 1.05 | 0 | 1.05 | 0 |
| Bus 3 | 1 | -0.1253 | 1 | -0.07 |
| Bus 4 | 0.8721 | -0.1747 | 0.873 | -0.166 |
| Bus 5 | 0.5401 | -0.2319 | 0.543 | -0.190 |
| Bus 6 | 0.7825 | -0.2997 | 0.775 | -0.198 |

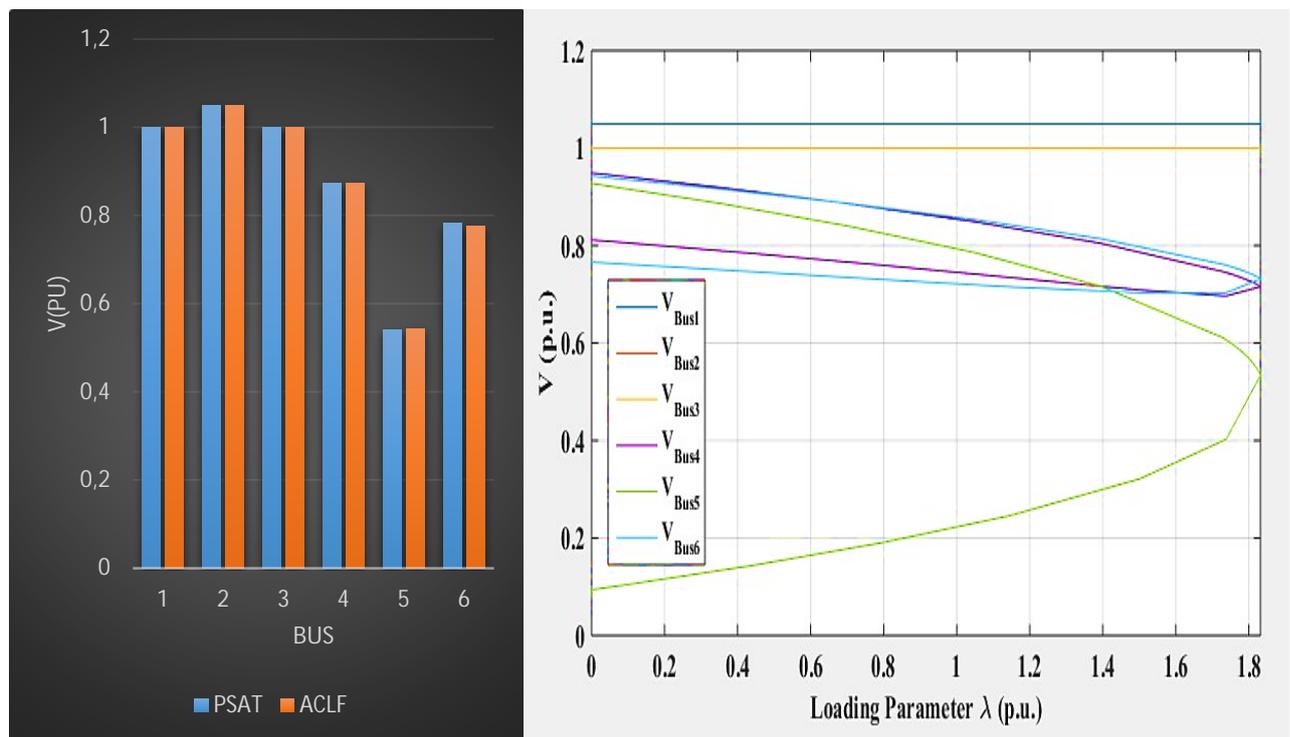


Figure IV-5 profil de tension (réseau a)

La stabilité de la tension dans l'accès (5) n'est pas stable.

Les pertes de puissances active et réactive obtenues après l'écoulement de puissance continu dans le réseau (a) sont énumérées dans le tableau IV-3.

Tableau IV-3 pertes de puissance dans les lignes (réseau a)

| Ni | Nr | PSAT | | ACLF | |
|----|----|--------|--------|--------|--------|
| | | P (pu) | Q (pu) | P (pu) | Q (pu) |
| 2 | 6 | 0.3101 | 0.8469 | 0.317 | 0.843 |
| 2 | 3 | 0.0145 | 0.2099 | 0.007 | 0.212 |
| 4 | 5 | 0.1085 | 0.1908 | 0.073 | 0.191 |
| 2 | 4 | 0.5712 | 1.1265 | 0.561 | 1.110 |
| 2 | 5 | 0.4959 | 1.4625 | 0.475 | 1.458 |
| 3 | 5 | 0.5761 | 1.2192 | 0.562 | 1.209 |
| 3 | 6 | 0.5336 | 1.1576 | 0.539 | 1.161 |
| 6 | 5 | 0.0828 | 0.2396 | 0.075 | 0.248 |
| 1 | 5 | 0.4255 | 1.5779 | 0.435 | 1.593 |
| 1 | 4 | 0.5234 | 0.7220 | 0.521 | 0.734 |
| 1 | 2 | 0.2645 | -0.365 | 0.266 | -0.364 |

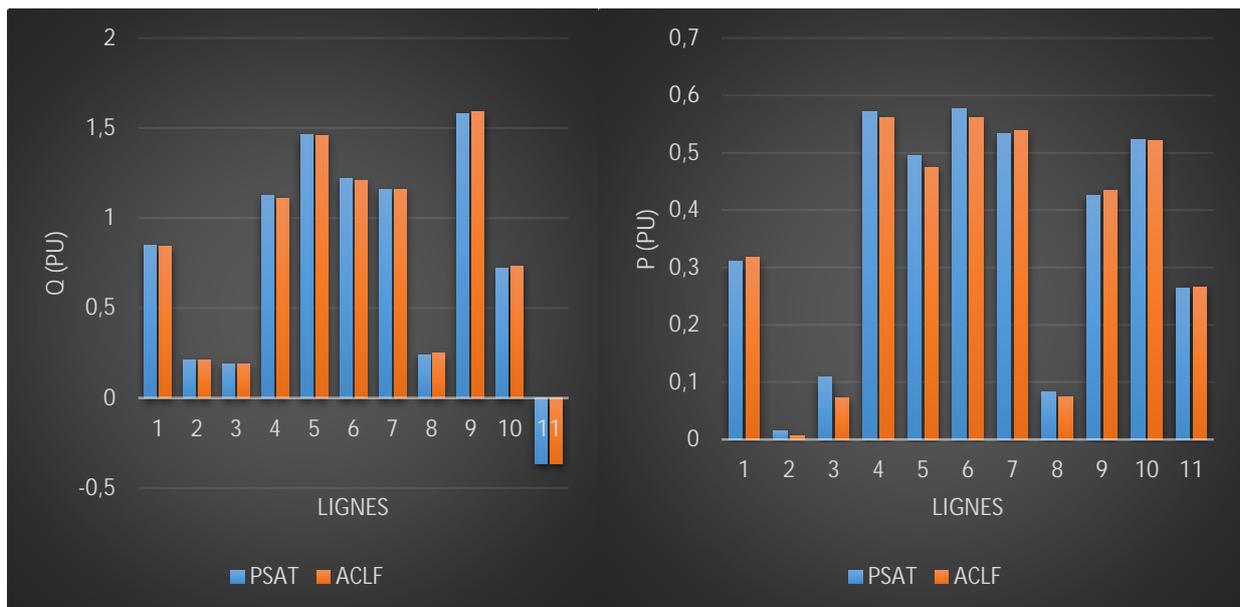


Figure IV-6 pertes de puissance dans les lignes (réseau a)

Après le calcul de l'écoulement de puissance continu sur le réseau (b), on a prélevé les tensions et les déphasages dans chaque jeu de barre, les valeurs obtenues sont illustrées dans le tableau IV-4.

Tableau IV-4 résultats du CPF (réseau b)

| N°bus | PSAT | | ACLF | |
|--------|--------|------------|--------|------------|
| | V(pu) | Phase(rad) | P (pu) | Phase(rad) |
| Bus 1 | 1.06 | 0 | 1.06 | 0 |
| Bus 2 | 1.045 | -0.6406 | 1.045 | -0.652 |
| Bus 3 | 0.91 | -1.5445 | 0.938 | -1.521 |
| Bus 4 | 0.6721 | -1.2748 | 0.669 | -1.273 |
| Bus 5 | 0.9550 | -1.0841 | 0.962 | -1.067 |
| Bus 6 | 0.87 | -1.9427 | 0.886 | -1.932 |
| Bus 7 | 0.8761 | -1.7048 | 0.871 | -1.706 |
| Bus 8 | 0.88 | -1.7048 | 0.876 | -1.706 |
| Bus 9 | 0.8668 | -1.9294 | 0.857 | -1.923 |
| Bus 10 | 0.8428 | -1.9694 | 0.853 | -1.965 |
| Bus 11 | 0.8659 | -1.9629 | 0.865 | -1.961 |
| Bus 12 | 0.9740 | -2.0124 | 0.967 | -2.015 |
| Bus 13 | 0.9616 | -2.3125 | 0.960 | -2317 |
| Bus 14 | 0.6643 | -2.1263 | 0.664 | -2.147 |

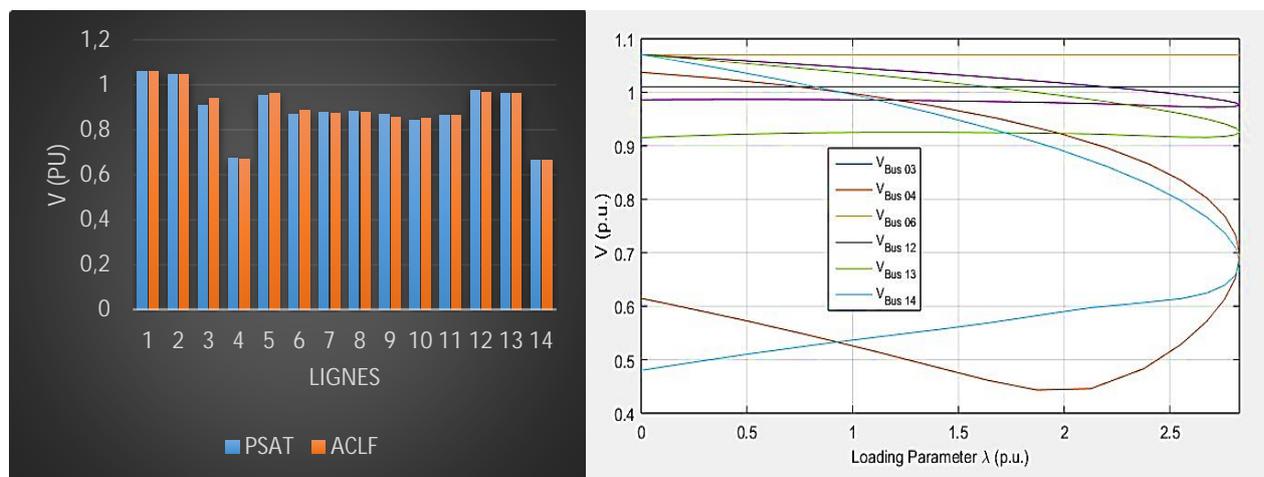


Figure IV-7 profil de tension (réseau b)

Les pertes de puissances active et réactive obtenues après l'écoulement de puissance continu dans le réseau (b) sont énumérées dans le tableau IV. 5.

Tableau IV-5 pertes de puissance dans les lignes (réseau b)

| Ni | Nr | PSAT | | ACLF | |
|----|----|---------|---------|--------|--------|
| | | P (pu) | Q (pu) | P (pu) | Q (pu) |
| 1 | 2 | 1.597 | 0.6494 | 1.596 | 0.646 |
| 1 | 5 | 0.9365 | 0.7767 | 0.943 | 0.775 |
| 2 | 3 | 0.9252 | 0.8599 | 0.933 | 0.877 |
| 2 | 4 | 0.6949 | 0.2698 | 0.679 | 0.266 |
| 2 | 5 | 0.4839 | 0.20 | 0.467 | 0.195 |
| 3 | 4 | 0.3240 | 0.8210 | 0.337 | 0.820 |
| 4 | 5 | -0.5827 | -0.3453 | -0.573 | -0.351 |
| 4 | 7 | 0.19 | 0.5022 | 0.183 | 0.505 |
| 4 | 9 | 0.22 | 0.3394 | 0.219 | 0.333 |
| 5 | 6 | 0.49 | 0.3228 | 0.485 | 0.324 |
| 6 | 11 | 0.0961 | 0.1710 | 0.099 | 0.170 |
| 6 | 12 | 0.0817 | 0.0456 | 0.082 | 0.047 |
| 6 | 13 | 0.1930 | 0.1632 | 0.192 | 0.1629 |
| 7 | 9 | 0.19 | 0.3284 | 0.185 | 0.3285 |
| 9 | 10 | 0.0295 | 0.0340 | 0.028 | 0.033 |
| 9 | 14 | 0.0825 | 0.0379 | 0.078 | 0.037 |
| 10 | 11 | -0.0580 | -0.0452 | -0.062 | -0.046 |
| 12 | 13 | 0.0268 | 0.0086 | 0.024 | 0.009 |
| 13 | 14 | 0.0828 | 0.1666 | 0.079 | 0.165 |
| 8 | 7 | 0 | 0.5570 | 0 | 0.556 |

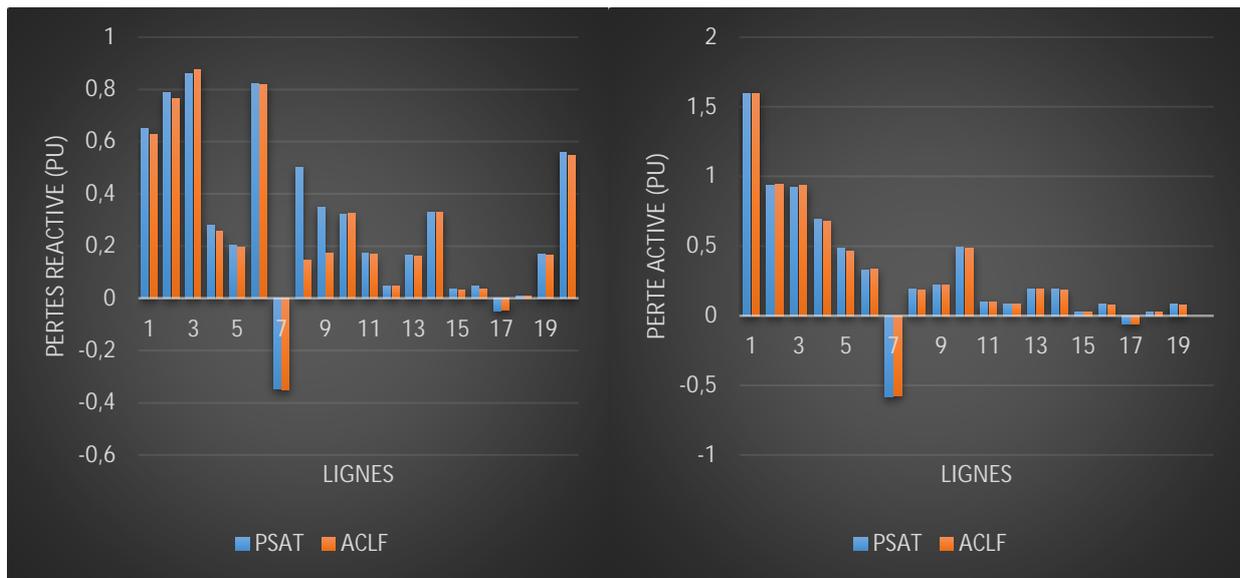


Figure IV-8 pertes de puissance dans les lignes (réseau b)

IV.3.2 Calcul de l'écoulement de la puissance avec compensateur (STATCOM)

Après avoir prélever le jeu de barre ayant le profil de tension le plus faible ou on a inséré un STATCOM,

On a effectué l'écoulement de puissance continu dans le réseau (a), les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau IV-6.

Tableau IV-6 résultats de l'écoulement de puissance après compensation (réseau a)

| N°bus | PSAT | | ACLF | |
|-------|--------|------------|--------|------------|
| | V(pu) | Phase(rad) | P (pu) | Phase(rad) |
| Bus 1 | 1 | 0.052 | 1 | 0.045 |
| Bus 2 | 1.05 | 0 | 1.05 | 0 |
| Bus 3 | 1 | 0.005 | 1 | 0.0037 |
| Bus 4 | 0.9806 | -0.140 | 0.984 | -0.136 |
| Bus 5 | 1.0402 | -0.136 | 1.025 | -0.148 |
| Bus 6 | 0.9986 | -0.125 | 0.990 | -0.095 |

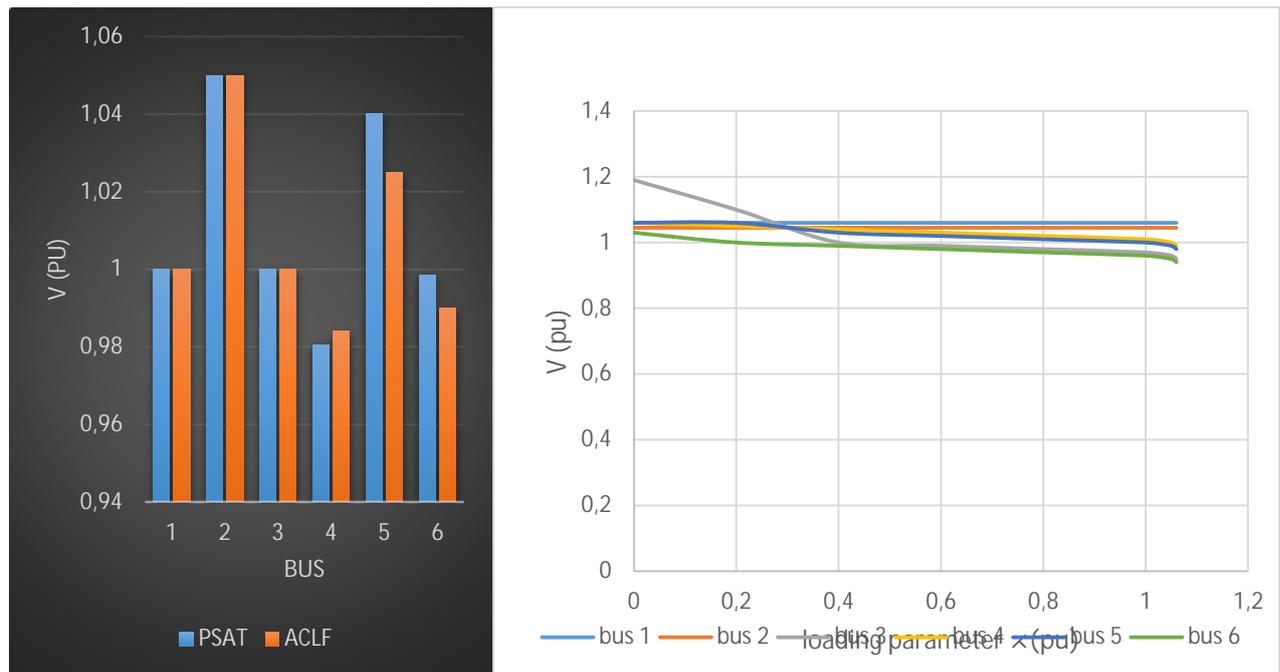


Figure IV-9 profil de tension après compensation (réseau a)

Après l’insertion du STATCOM, les pertes de puissances active et réactive obtenues après l’écoulement de puissance continu dans le réseau (a) sont énumérées dans le tableau IV. 7.

Tableau IV-7 pertes de puissance après compensation (réseau a)

| Ni | Nr | PSAT | | ACLF | |
|----|----|--------|--------|---------|---------|
| | | P (pu) | Q (pu) | P (pu) | Q (pu) |
| 2 | 6 | 0.303 | 0.274 | 0.3049 | 0.2801 |
| 2 | 3 | 0.004 | 0.135 | 0.0039 | 0.1333 |
| 4 | 5 | 0.050 | -0.123 | 0.0534 | -0.1324 |
| 2 | 4 | 0.476 | 0.454 | 0.4881 | 0.4567 |
| 2 | 5 | 0.248 | 0.036 | 0.0095 | 0.049 |
| 3 | 5 | 0.243 | 0.029 | 0.2316 | 0.0214 |
| 3 | 6 | 0.552 | 0.188 | 0.5539 | 0.1813 |
| 6 | 5 | -0.038 | 0.134 | -0.0222 | 0.1444ç |
| 1 | 5 | 0.459 | 0.169 | 0.4483 | 0.1840 |
| 1 | 4 | 0.505 | 0.112 | 0.5079 | 0.1128 |
| 1 | 2 | 0.242 | -0.354 | 0.2461 | -0.3182 |

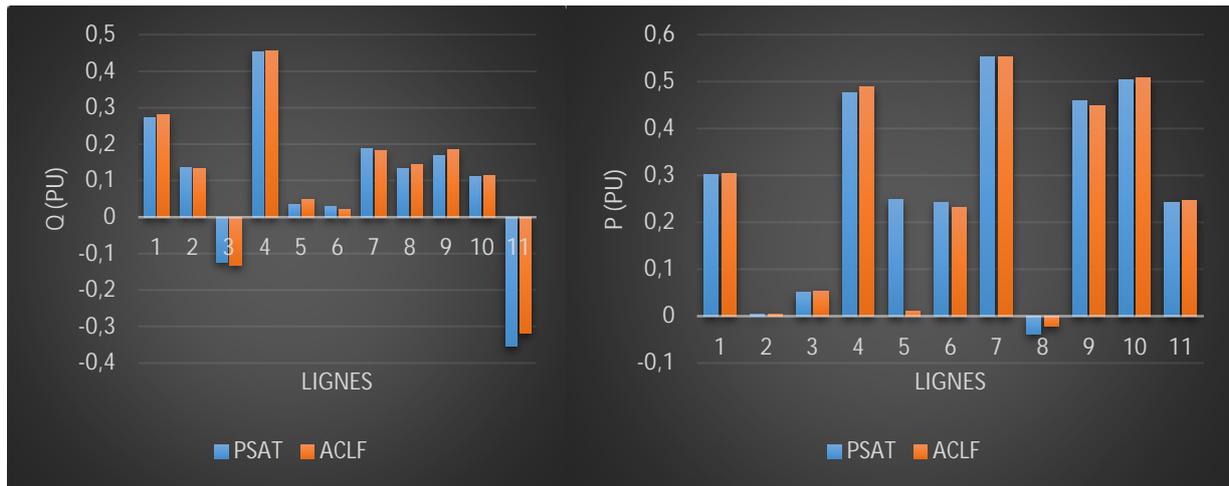


Figure IV-10 pertes de puissance après compensation (réseau a)

Après avoir prélever le jeu de barre ayant le profil de tension le plus faible ou on a inséré un STATCOM,

On a effectué l'écoulement de puissance continu dans le réseau (b), les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau IV-8.

Tableau IV-8 résultats de l'écoulement de puissance après compensation (réseau b)

| N°bus | PSAT | | ACLF | |
|--------|--------|------------|--------|------------|
| | V(pu) | Phase(rad) | V (pu) | Phase(rad) |
| Bus 1 | 1.06 | 0 | 1.06 | 0 |
| Bus 2 | 1.045 | 0.1118 | 1.045 | 0.106 |
| Bus 3 | 1.01 | 0.2443 | 1.015 | 0.236 |
| Bus 4 | 1.190 | 0.2263 | 1.194 | 0.225 |
| Bus 5 | 1.1833 | 0.2116 | 1.173 | 0.197 |
| Bus 6 | 1.07 | -0.2925 | 1.056 | -0.287 |
| Bus 7 | 1.0675 | -0.3126 | 1.046 | -0.309 |
| Bus 8 | 1.09 | -0.3126 | 1.078 | -0.309 |
| Bus 9 | 1.0667 | -0.3398 | 1.073 | -0.323 |
| Bus 10 | 1.0621 | -0.3347 | 1.060 | -0.320 |
| Bus 11 | 1.0658 | -0.3234 | 1.044 | -0.306 |
| Bus 12 | 1.0659 | -0.3289 | 1.055 | -0.308 |
| Bus 13 | 1.0627 | -0.3474 | 1.051 | -0.336 |
| Bus 14 | 1.0345 | 0.4217 | 1.028 | 0.419 |

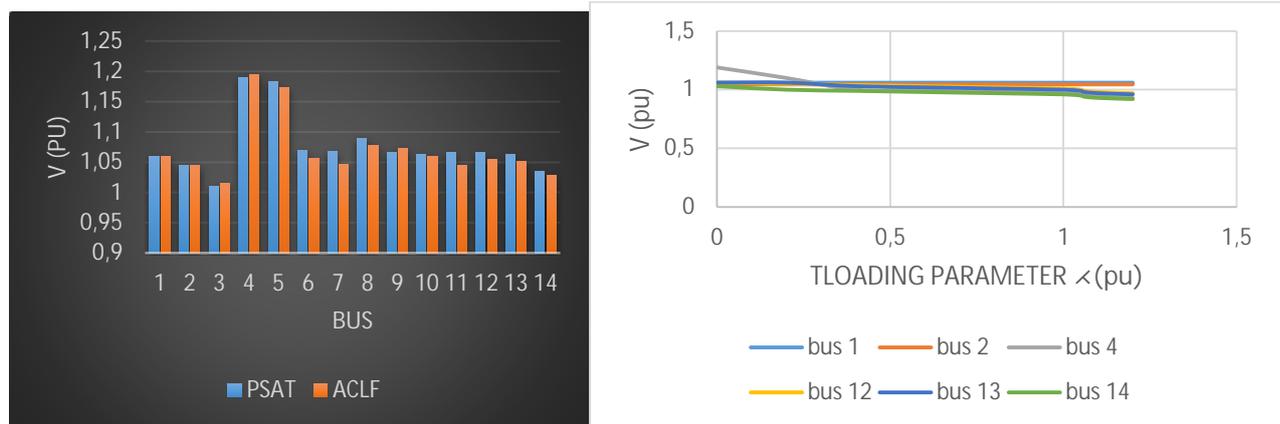


Figure IV-11 profil de tension après compensation (réseau b)

Après l’insertion du STATCOM, les pertes de puissances active et réactive obtenues après l’écoulement de puissance continu dans le réseau (b) sont énumérées dans le tableau IV. 9.

Tableau IV-9 pertes de puissance après compensation (réseau b)

| Ni | Nr | PSAT | | ACLF | |
|----|----|---------|---------|--------|--------|
| | | P (pu) | Q (pu) | P (pu) | Q (pu) |
| 1 | 2 | 1.4011 | -1.0750 | 1.421 | -1.081 |
| 1 | 5 | 0.9073 | -0.5508 | 0.903 | -0.534 |
| 2 | 3 | 0.7162 | -0.2202 | 0.732 | -0.233 |
| 2 | 4 | 0.6076 | -0.7592 | 0.629 | -0.767 |
| 2 | 5 | 0.4583 | -0.606 | 0.452 | -0.613 |
| 3 | 4 | 0.2288 | -0.423 | 0.233 | -0.422 |
| 4 | 5 | -0.005 | 0.8008 | -0.006 | 0.820 |
| 4 | 7 | 0.170 | 0.3092 | 0.173 | 0.310 |
| 4 | 9 | 0.20 | 0.362 | 0.209 | 0.371 |
| 5 | 6 | 0.409 | 0.708 | 0.405 | 0.708 |
| 6 | 11 | 0.05616 | 0.117 | 0.059 | 0.129 |
| 6 | 12 | 0.065 | 0.155 | 0.068 | 0.160 |
| 6 | 13 | 0.16305 | 0.637 | 0.162 | 0.644 |
| 7 | 9 | 0.170 | 0.366 | 0.173 | 0.370 |
| 9 | 10 | 0.020 | 0.208 | 0.022 | 0.213 |
| 9 | 14 | 0.06254 | 0.2164 | 0.06 | 0.218 |
| 10 | 11 | -0.046 | 0.157 | -0.044 | 0.153 |

| | | | | | |
|----|----|--------|--------|--------|-------|
| 12 | 13 | 0.0162 | 0.178 | 0.0152 | 0.180 |
| 13 | 14 | 0.0628 | 0.9254 | 0.063 | 0.921 |
| 8 | 7 | 0 | 0.0098 | 0 | 0.018 |

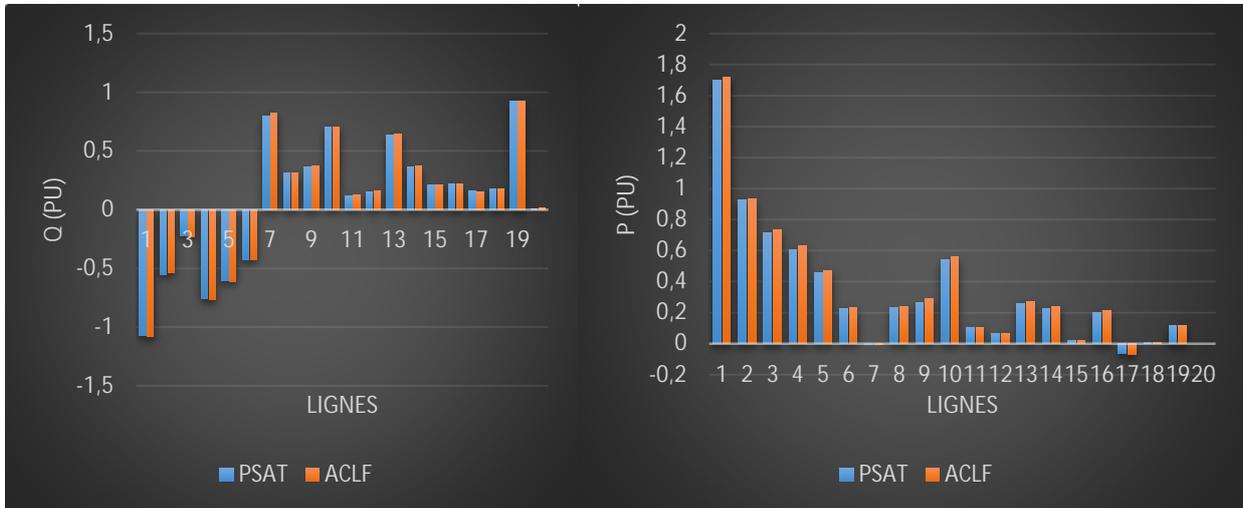


Figure IV-12 pertes de puissance après compensation (réseau b)

IV.4 Interprétation des résultats

On observe à travers les Tableaux(IV-2 jusqu’au IV-6) et les figures (IV-5 jusqu’au IV-8) obtenu avec le logiciel PSAT et le programme ACLF sous l’environnement MATLAB que le réseau test (a) IEEE 6 jeux de barres présente une forte chute de tension et particulièrement au niveau du jeu de barre 5 et le réseau (b) IEEE 14 jeux de barres au niveau des jeux de barre 4 et 14. Ce problème est dû à l’énergie réactive consommé par les charges.

Après intégration du dispositif FACTS sur les deux réseaux on constate une diminution des pertes de puissance active et réactive comme le montre les tableaux(IV-9 et 10), amélioration du point d’instabilité, les tension aux jeux de barres sont plus stable et enfin une augmentation de la capacité du transport de l’énergie active dans le réseau.

De ce fait, on peut conclure que la résolution du problème de la chute de tension ou de l’instabilité de la tension par la compensation de l’énergie réactive peut être faite que ce soit avec le logiciel PSAT ou par le programme ACLF sur MATLAB.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité deux réseaux test cités dans la littérature, pour lesquels on a relevé le profil de la tension dans les jeux de barres. Ensuite nous avons inséré une compensation de l'énergie réactive par le dispositif STATCOM dans le jeu de barre ayant le profil de tension le plus bas. Notre étude était réalisée sur PSAT dans l'environnement Matlab et un programme ACLF réalisé au niveau du laboratoire LGEB. Les résultats obtenus illustrés prouvent que la puissance réactive du réseau est optimisée et la tension au jeu de barre de raccordement est bien réglé, ils ont prouvé aussi la flexibilité, la sensibilité et la rapidité de dispositif utilisé.

Après la compensation nos résultats ont montré une amélioration du profil de la tension et une amélioration de la stabilité de la tension des deux réseaux. Elles montrent qu'on peut augmenter la charge ainsi que les courants de transit de puissance.

Conclusion générale

La demande de l'énergie électrique ne cesse d'augmenter et les structures existantes parviennent à peine à la combler. Avant de prévoir des investissements à moyen et à long terme sur les infrastructures, il faut d'abord optimiser et rentabiliser au maximum les équipements. Ce qui est rendu possible grâce à l'insertion des dispositifs de compensation d'énergie réactive.

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...).

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept comme les systèmes flexibles de transmission à courant alternatif appelés FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge des lignes sont atteints et performés. Des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes commandés tels que les GTO, IGBT présentent la nouvelle génération de ces systèmes FACTS.

Notre étude est portée sur la performance de la tension et la stabilité de la tension dans un réseau électrique. Nous avons fait un calcul d'écoulement de puissance sur un réseau à 14 jeux de barres et celui à 6 jeux de barres par l'utilisation de logiciel PSAT et le programme ACLF, afin de rétablir les transits de puissances ainsi que le plan de tension à leurs états normaux. Nous avons représenté les amplitudes des tensions au niveau de chaque accès, les puissances actives et réactives transitées dans les lignes et l'intégration des dispositifs de compensation de la puissance réactive dans un réseau électrique.

Afin d'améliorer l'indice de performance de la tension et l'indice de stabilité de la tension, un dispositif de compensation de la puissance réactive a été inséré, ce dispositif a montré son efficacité pour l'amélioration de la performance de la tension, la stabilité du réseau étudié et la capacité du réseau à transporter de l'énergie active.

Par cela on conclut que la compensation de l'énergie réactive présente des avantages pour le réseau électrique, à savoir :

- Économie sur le dimensionnement des équipements électriques car la puissance appelée diminue.
- Augmentation de la puissance active disponible au secondaire des transformateurs.
- Diminution des chutes de tension et des pertes en lignes.
- Économie sur la facture d'électricité, en supprimant la consommation excessive d'énergie réactive.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Toula, M. A. Rahmouni, "Prévision de la consommation d'énergie électrique en vue de la conduite et de la planification des réseaux électrique en Algérie", Mémoire Master 2, Université de Bejaia, 2016.
- [2] M. A. Ouakli, "Répartition optimale de la puissance dans les réseaux de transport électrique par la méthode des essaims de particules", MEMOIRE DE MASTER Université A. MIRA-BEJAIA, 2019.
- [3] M. Eremia, J. Treca et A. Germond, "Réseaux électriques, aspects actuels", Edition Technique, Bucarest, Roumanie, 2000.
- [4] E. Demeter, "Power Engineering Guide - Transmission and Distribution", these Doctorat université Saskatchewan, Canada juillet 2005.
- [5] J. M. DELBARRE, "Postes à HT et THT - Rôle et Structure", Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, D 4570, 2004.
- [6] M. C. Alvarez, "Architecteur de Réseau de Distribution du futur en présence de production décentralisée", thèse doctorat, institut de polytechnique de Grenoble, 2009.
- [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] M. Crappe, "Commande et régulation des réseaux électriques", Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER, 2003.
- [9] A. Bouzidi, "Conduite des réseaux électriques", cours master2 option réseaux électriques, faculté de technologie, université de Bejaïa, Année 2017/2018.
- [10] D. Souque, L. Chatonnet, E. Monnot, "Article 4.2.1 – Réglage de la tension et capacités constructives en puissance réactive des installations de production. Chapitre 4 – Contribution des utilisateurs aux performances du RPT", 2013.
- [11] J. C. Guillaume de Preville, J. L. Sanhet, " Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) ", Techniques de l'ingénieur, référence D4315, 2001.
- [12] B. Crappe, "Commande et régulation des réseaux électriques ", Hermes sciences, 2003.
- [13] H. Kouara, "Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension", mémoire de magister, université de Batna, 2006.
- [14] F. Laib et F. Amraoui, "élaboration d'outils de planification en vue de l'optimisation des investissements dans les réseaux électriques en Algérie", mémoire de master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2017.
- [15] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", IEEE transaction on Industry Application, vol. IA-20, N°3, May/Juin 1984.

- [16] Ph. Sarrand et J. Verseille, "Compensation de l'énergie réactive et tenue de tension dans les réseaux publics", Technique de l'ingénieur, D 4305, pp-1-10, 10 juin 1986.
- [17] Bulletin sur la qualité de l'électricité, "Le déséquilibre de tension et de courant", N° G1546F, Hydro Québec 2014
- [18] R. Benahid, M. Boudour, "Amélioration de la stabilité de tension dans les réseaux électrique", Ouvrage, édition universitaires européennes, 2014.
- [19] S. Boutaba, "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.
- [20] Y. Gong, "Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index Using Synchronized Phasor Measurement", PHD thesis, Mississippi State University, Mississippi, USA, December 2005.
- [21] A. Bounouira, "Etude de la stabilité transitoire des réseaux électriques", Mémoire de Master, Université Constantine I, 24 juin 2014.
- [22] L. Boumediene, "Placement Des Dispositifs FACTS et contrôle des tensions dans un réseau de distribution", Thèse de doctorat es-science, l'USTO, 04 Janvier 2010.
- [23] A. Boukadoum, "contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique", Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 21 octobre 2007.
- [24] CIGRE Working Group 14.05 Report, "Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Locations Having Low Short-Circuit Capacities", Part I: AC/DC Interaction Phenomena, CIGRE Guide No. 95, 1992.
- [25] S. Lemidani, "Importance et nécessité de l'étude de la compensation et de sa contribution à la gestion de l'exploitation des longues lignes de transport a extra haut tension", mémoire de magistère, soutenue en juin 2010.
- [26] Y. Besanger, " Etude des FACTS (Flexible AC Transmission System) et de leur comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion", Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 05 Juillet 1996.
- [27] S. Idri et F. Khaldi, "Amélioration des performances de la tension et la stabilité d'un réseau électrique par la compensation de la puissance réactive", mémoire de master, Université de Bejaia, 2018.
- [28] 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.
- [29] A. Chaghi, "documents pédagogiques et didactiques", thèse doctorat, université de Batna, 2001.
- [30] H. Dutrirux, "Techniques de l'ingénieur, Réseaux Electriques, Planification et Exploitation", thèse doctorat en génie électrique, école centrale de Lille, France, 2015.
- [31] G. Thomasset, "la conception des réseaux industriels en haute tension", cahier technique merlin Gerin N°169, Edition octobre 1988.

- [32] R. Haimour, "Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique", mémoire de magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran 2008-2009.
- [33] A. Kassou, M. Merzougui, "Impact d'un dispositif FACTS (Flexible AC Transmission Systems) sur l'écoulement de puissance", Mémoire de Master, Université de Saida, 28 octobre 2013.
- [34] S. Gerbex, "Méthodes heuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique", thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne 2003.
- [35] Ben Hakkoum Med abdelilah, Legougui Ali "Compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par système FACTS", Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ourgla, 2016.
- [36] Abd. Alibic, "Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS : (Flexible AC Transmission Systems)", mémoire de magister, Université de Batna 2009.
- [37] L. Kartobi, "Optimisation de la synthèse des FACTS par les algorithmes génétiques et les essais particuliers pour le contrôle des réseaux électriques", mémoire de magister, Université USTHB 2006.
- [38] A. Kerbaa, "Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique", Mémoire de Master, 02 Juin 2013.
- [39] Ay Abdelouahab, "Modélisation et Analyse d'un Compensateur Statique : SVC", Mémoire de Magister, Université Batna 1, 02 mai 2013.
- [40] A. Laoufi, A. Boumediène, "Répartition optimale des puissances actives d'un réseau électrique utilisant l'algorithme de colonies de fourmis", université de Bechar, 2011.
- [41] A. Ould Nagi, "Optimisation de l'écoulement de puissance Par algorithmes : AG et PSO-TVAC", Mémoire Master en Electrotechnique, Université Mohammed khider Biskra, juin 2014.
- [42] A. Bouzidi, "Modélisation et simulation des réseaux électriques", cours faculté Technologie, Université de Bejaia, 2015.
- [43] N. Mancer, "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique FACTS", Mémoire de magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [44] M. Mersel et K. Meklat, "Méthode de calcul rapide des répartitions de puissance dans les réseaux électriques", mémoire de master, Université de Bejaia 1989.
- [45] D. RABIA et T. CHABOU, "Calcul de l'écoulement de puissance probabilistique", Mémoire d'ingénieur, Université de Bejaia Septembre 1996.
- [46] R. Benabid, "Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Électriques", Thèse de Magister. Université Amar Telidji, Laghouat. 04/09/2007.

- [47] L. Baghli, "Réalisation d'un Environnement Graphique avec Base de Données pour l'Analyse et la Simulation de Réseaux Électriques", mémoire de master, Diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Electrique, Option : Electrotechnique, Promotion Juin 1994.
- [48] N. Merzougui, "Gestion de congestion dans les réseaux électriques", mémoire de master, Filière : électrotechnique, Option : réseaux électrique, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [49] A. Bergen et V. Vittal, "Power System Analysis", Butterworth-Heinemann second Edition 2000.
- [50] M. B. Oudaya et M. Drissi, "Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositifs FACTS", Mémoire de master, Spécialité : systèmes énergétiques, Université de Saïda 2017.
- [51] R. Benabid, "Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques", Mémoire de Magister en Electrotechnique/ Analyse, Conduite et Commande des Réseaux Electriques, Université Amar Telidji, Laghouat, 2007.

ANNEXE

1 PSAT

PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un logiciel destiné à l'analyse et l'étude des réseaux électriques, voir figure A.1. Il est développé sous MATLAB par Mr. Federico Milano ; Professeur, Docteur à l'université de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain.

PSAT bénéficie largement des remarques et observations des chercheurs spécialisés dans le réseau électrique via leurs contributions dans le forum de ce dernier <http://groups.yahoo.com/groups/psatforum>. Pour cela, il a connu des améliorations remarquables d'une version à une autre

PSAT est un logiciel, simple, intéressant, qui englobe plusieurs domaines de recherche dans l'étude et l'analyse des réseaux électriques. La manipulation de PSAT peut être effectuée, soit par l'interface graphique, soit par la programmation en ligne en utilisant leurs fonctions prédéfinies.

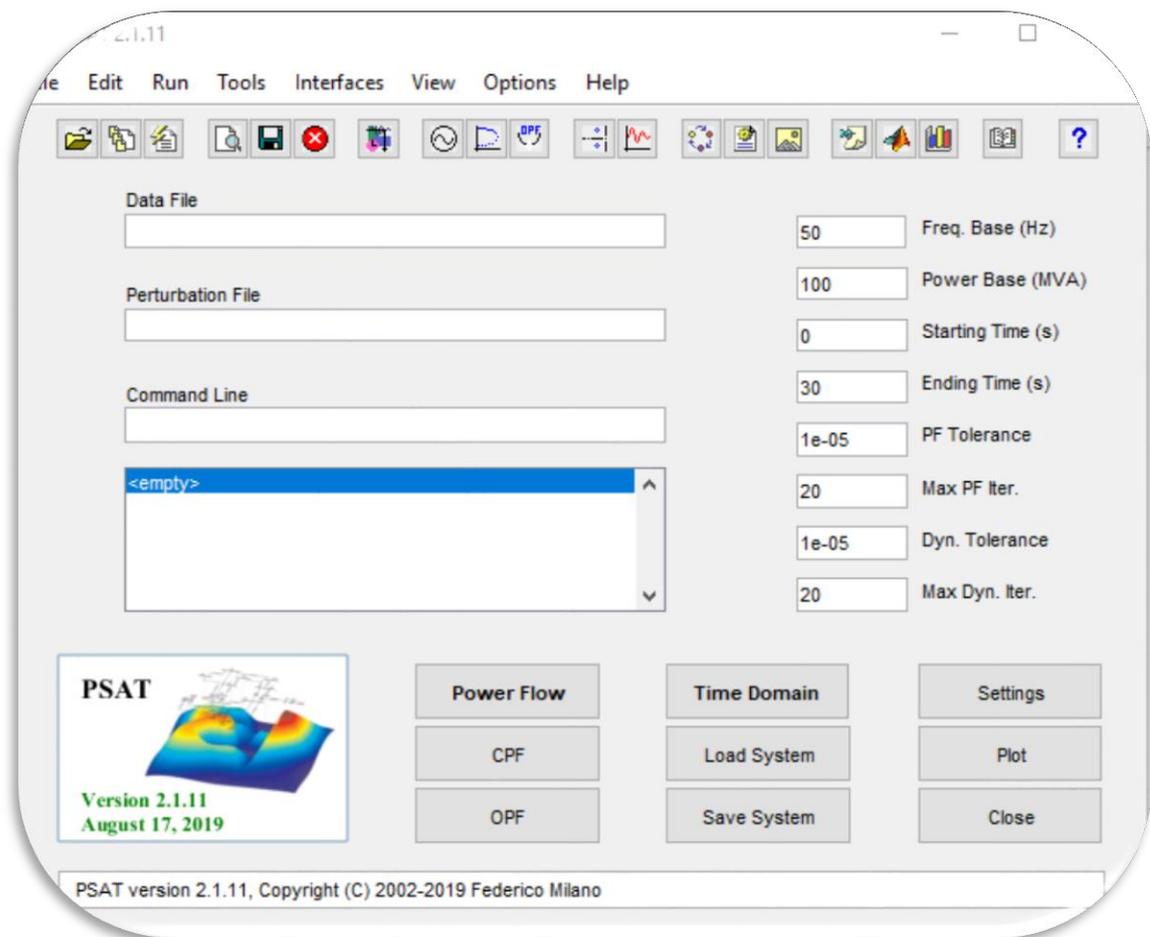


Figure A-1 interface graphique du PSAT 2.1.11

2 Format des structures du PSAT

PSAT est basé sur le concept des structures afin d'enregistrer les paramètres du réseau ainsi que les résultats de simulations. Chaque structure, englobe plusieurs champs des informations qui assurent une description détaillée du système. Les principales structures du PSAT sont présentées dans ce qui suit :

2.1 Bus

PSAT définit la topologie du réseau par la structure « Bus ». Cette dernière contient plusieurs champs présentés comme suit :

- Con : données des nœuds.
- n : nombre total de nœuds.
- int : indices des nœuds.
- Pg : puissance active injectée par le générateur.
- Qg : puissance réactive injectée par le générateur.
- Pl : puissance active absorbée par la charge.
- Ql : puissance réactive absorbée par la charge.
- island : indice des nœuds dans les régions

Les principales données des nœuds sont stockées dans le champ « Bus.con » présenté par le tableau

1

| Colonnes | Description | Unité |
|----------|--|-------|
| 1 | Nœud | int |
| 2 | Tension nominale | kV |
| 3 | Tension initiale | pu |
| 4 | Phase initiale de tension | rad |
| 5 | Numéro de secteur (n'a pas encore utilisé) | int |
| 6 | Numéro de région (n'a pas encore utilisé) | int |

Tableau A-1 format de la structure bus.con

2.2 Line

La structure « Line » définit les données des lignes ainsi que les transformateurs. Cette dernière contient plusieurs champs présentés comme suit :

- con : données des lignes du réseau.
- n : nombre total des lignes AC.
- bus1 : noeuds de départ des lignes.
- bus2 : noeuds d'arrivé des lignes.

Les principaux paramètres des lignes sont stockés dans le champ « Line.con » présenté par le tableau 2

| Colonnes | Description | Unité |
|----------|----------------------------------|-------|
| 1 | Nœud de départ | int |
| 2 | Nœud d'arriver | int |
| 3 | Puissance de base | MVA |
| 4 | Tension nominale | kV |
| 5 | Fréquence | Hz |
| 6 | Longueur de ligne | km |
| 7 | n'a pas utilisée | - |
| 8 | Résistance de la ligne | pu |
| 9 | Réactance de la ligne | pu |
| 10 | Susceptance de la ligne | pu |
| 11 | n'a pas utilisée | - |
| 12 | n'a pas utilisée | - |
| 13 | Limite du courant | pu |
| 14 | Limite de la puissance apparente | pu |
| 15 | Limite de la puissance active | pu |

Tableau A-2 format de la structure line.con

2.3 PQ

La structure « PQ » englobe tous les paramètres de la charge. Cette dernière contient plusieurs champs présentés comme suit :

- Con : données des charges PQ ;
- n : nombre total de charges PQ ;
- Bus : numéro des nœuds charges ;
- P₀: puissance active initiale (utilisée pour les charges non standard) ;
- Q₀: puissance réactive initiale (utilisée pour les charges non standard) ;
- Store : copie des données des nœuds charge (ce champ est utilisé dans le cas de programmation sous PSAT).

Le format des données de la charge est présenté par le tableau A-3

| Colonnes | Description | Unité |
|----------|--------------------------------------|---------|
| 1 | Numéro du Nœud de charge | int |
| 2 | Puissance de base | MVA |
| 3 | Tension nominale | kV |
| 4 | Puissance active | pu |
| 5 | Puissance réactive | pu |
| 6 | Tension minimale | pu |
| 7 | Tension maximale | pu |
| 8 | Permettre la conversion en impédance | booléen |

Tableau A-3 format de la structure PQ.con

2.4 SW

La structure SW présente les données du nœud bilan (slack bus). Elle contient plusieurs champs définis comme suit

- con: données de nœud bilan.
- n: nombre total des nœuds bilan.
- bus: numéro des nœuds bilan.
- store: copie des données de nœud bilan (ce champs est utilisé dans le cas de programmation sous PSAT).

Le format des données de nœud bilan est présenté dans le tableau.4.

| Colonnes | Description | Unité |
|----------|---------------------------------------|-------|
| 1 | Nœud bilan | int |
| 2 | Puissance de base | MVA |
| 3 | Tension nominale | kV |
| 4 | Amplitude de tension | pu |
| 5 | Angle de référence | pu |
| 6 | Puissance réactive maximale | pu |
| 7 | Puissance réactive minimale | pu |
| 8 | Tension maximale | pu |
| 9 | Tension minimale | pu |
| 10 | Puissance active | pu |
| 11 | Coefficient de participation de perte | int |

Tableau A-4 format de la structure SW.con

2.5 PV

La structure « PV » englobe tous les paramètres des nœuds générateurs présentés dans les champs suivants :

- Con : données de nœud générateur.
- n : nombre total des nœuds générateurs.
- bus : numéro des nœuds générateurs.
- pq : ce champ est utilisé lorsque la limite d'énergie réactive des générateurs est considérée
 - (a) con : donnée de nœuds de charge.
 - (b) n : nombre totale des nœuds de charge.
 - (c) bus : numéro des nœuds PQ.
- store : copie des données des nœuds générateurs. (Ce champ est utilisé dans le cas de programmation sous PSAT).

Les paramètres des nœuds générateurs sont présentés par le champ « PV.con » avec le format illustré dans le tableau suivant :

| Colonnes | Description | Unité |
|----------|---------------------------------------|-------|
| 1 | Nœud générateur | int |
| 2 | Puissance de base | MVA |
| 3 | Tension nominale | kV |
| 4 | Puissance active | pu |
| 5 | Amplitude de tension | pu |
| 6 | Puissance réactive maximale | pu |
| 7 | Puissance réactive minimale | pu |
| 8 | Tension maximale | pu |
| 9 | Tension minimale | pu |
| 10 | Coefficient de participation de perte | int |

Tableau A-5 format de la structure PV.con

2.6 Shunt

La structure Shunt présente les éléments shunt du réseau. Elle est constituée de plusieurs champs définis comme suit :

- con: données des impédances shunt.
- g: vecteur colonne des conductances à chaque nœud du réseau.
- b : vecteur colonne des susceptances à chaque nœud du réseau.

Les principaux paramètres des éléments shunt sont présentés dans la structure Shunt.con avec le format illustré dans le tableau.6.

| Colonnes | Description | Unité |
|----------|-------------------|-------|
| 1 | Numéro de noeud | int |
| 2 | Puissance de base | MVA |
| 3 | Tension de base | kV |
| 4 | Fréquence | Hz |
| 5 | Conductance | pu |
| 6 | Susceptance | pu |

Tableau A-6 format de la structure shunt.con

2.7 Svc

La structure « Svc » est allouée aux paramètres du SVC. Elle englobe plusieurs champs définis comme suit :

- con : données du SVC ;
- n : nombre total des SVC ;
- bus : numéro des nœuds qui contiens des SVC ;
- bcv : indice de variable d'état b_{SVC} ;
- alpha : indice de variable d'état α ;
- Vm : indice de variable d'état v_m ;
- Be : admittance équivalente b_{SVC} ;
- Vref: référence de tension V_{ref} .

Les principaux paramètres du SVC sont présentés dans la structure « Shunt.con » avec le format illustré dans le tableau 7.

| N° | Description | unité |
|----|--------------------------------|--------|
| 1 | Nœud | int |
| 2 | Puissance de base | MVA |
| 3 | Tension nominal | KV |
| 4 | fréquence | HZ |
| 5 | Type de SVC | Int |
| 6 | Constat de temps de régulation | second |
| 7 | Gain Kr | Pu/pu |
| 8 | Tension de référence | pu |
| 9 | Suseprance maximal bmax | pu |
| 10 | Suseprance minimal bmin | pu |

Tableau A-7 format de la structure SVC

Données des applications

Les données du réseau à 14 jeux de barres sont données dans les tableaux

| Bus | V(pu) | Phase (rad) | P(pu) |
|---------------|-------|-------------|-------|
| 1 (référence) | 1.06 | 0.00 | 2.324 |
| 6 | 1.07 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 1.045 | 0.00 | 0.40 |
| 3 | 1.010 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | 1.090 | 0.00 | 0.24 |
| 14 | 1.000 | 0.00 | 0.00 |

Tableau A-8 les données des jeux de barres PV

| Bus | P(pu) | Q(pu) |
|-----|-------|-------|
| 13 | 0.135 | 0.058 |
| 12 | 0.061 | 0.016 |
| 11 | 0.035 | 0.018 |
| 10 | 0.090 | 0.058 |
| 6 | 0.112 | 0.075 |
| 5 | 0.076 | 0.016 |

| | | |
|----|-------|-------|
| 9 | 0.295 | 0.166 |
| 14 | 0.149 | 0.050 |
| 2 | 0.217 | 0.127 |
| 3 | 0.942 | 0.190 |
| 4 | 0.478 | 0.039 |

Tableau A-9 les données des jeux de barres PQ

| 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 | 0.0346 |
| 2-3 | 0.04699 | 0.19797 | 0.0438 |
| 2-4 | 0.05811 | 0.17632 | 0.0340 |
| 3-4 | 0.06701 | 0.17030 | 0.0128 |
| 4-5 | 0.01335 | 0.04211 | 0.000 |
| 6-12 | 0.12291 | 0.25581 | 0 |
| 6-13 | 0.06615 | 0.13027 | 0 |
| 6-11 | 0.09498 | 0.19890 | 0 |
| 6-14 | 0.12711 | 0.27038 | 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 |

Tableau A-10 les données des lignes

| 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-11 données des transformateurs

Données du réseau à 6 jeux de barres

| N° bus | Type de bus | V (pu) | Phase (rad) | P (pu) | Q (pu) |
|--------|-------------|--------|-------------|--------|--------|
| 2 | Reference | 1 | 0 | - | - |
| 1 | PV | 1.05 | 0 | 0.9 | - |
| 3 | PV | 1 | 0 | - | - |
| 4 | PQ | 1 | - | 0.9 | 0.6 |
| 5 | PQ | 1 | - | 1 | 0.7 |

Les données des jeux de barres

| Line | R (pu) | X (pu) | B (pu) | I _{max} |
|------|--------|--------|--------|------------------|
| 2-6 | 0.07 | 0.2 | 0.05 | 0.9147 |
| 2-3 | 0.05 | 0.25 | 0.06 | 0.3082 |
| 2-5 | 0.1 | 0.3 | 0.04 | 0.7114 |
| 2-4 | 0.05 | 0.1 | 0.02 | 1.3740 |
| 2-1 | 0.1 | 0.2 | 0.04 | 0.2591 |
| 1-4 | 0.05 | 0.2 | 0.04 | 0.9193 |
| 1-5 | 0.08 | 0.3 | 0.06 | 0.8478 |
| 3-6 | 0.02 | 0.1 | 0.02 | 1.3973 |
| 3-5 | 0.12 | 0.26 | 0.05 | 0.6585 |
| 5-6 | 0.1 | 0.3 | 0.06 | 0.2 |
| 5-4 | 0.2 | 0.4 | 0.08 | 0.1796 |

Caractéristiques techniques des branches

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...).

Notre étude est portée sur l'amélioration des performances et la stabilité de la tension dans un réseau électrique. Nous avons fait un calcul d'écoulement de puissance sur un réseau à 14 jeux de barres et celui à 6 jeux de barres par le logiciel PSAT et le programme ACLF réalisé au laboratoire de génie électrique. L'amélioration de l'indice de performance de la tension et l'indice de stabilité de la tension des deux réseaux a été réalisé grâce à l'insertion d'un dispositif de compensation de la puissance réactive au niveau du JdB le plus faible. Ce dispositif, en plus de son efficacité pour l'amélioration de la performance de la tension, la stabilité du réseau étudié, il a montré l'amélioration de la capacité du réseau à transporter de l'énergie active.

Abstract

The reactive power transmission through power system lines negatively impacts voltage stability, especially when generators reach their reactive power production limit and lines reach their power transit limit. Reactive energy compensation is necessary because it increases the transit capabilities of the active power and improves and controls the voltage stability of the network.

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

Our study is focused on voltage performance and voltage stability in an electrical network. We performed a power flow calculation on a 14-busbar and a 6-busbar network using PSAT software and the ACLF program.

In order to improve the voltage performance index and the voltage stability index, a reactive power compensation device has been inserted. This device has shown its effectiveness in improving the voltage performance, the stability of the studied network and the capacity of the network to transport active energy.