الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université *Dr YAHIA FARES MEDEA*

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de mastère génie électrique / option :

Réseaux Electriques

Thème

Contrôle de L'écoulement de Puissance en Présence des D-FACTS (distributed AC transmission system)

Présenté par :

Mr: Ahmed srire Oussama

Mr: Cheriet Mohamed

Encadreur :

Mr: Dine Mohamed

Année universitaire : 2013 - 2014

Remerciements

Nous remercions en premier lieu "ALLAH" grand et puissant de nous avoir donné La santé tant physique que morale pour mener ce travail à terme.

Tous nos remercîments et reconnaissances les plus particulières à notre promoteur Mr. DINE Mohammed et pour nous avoir proposé et encadré ce sujet ,sans oublier leurs orientation et conseils tout le long de ce travail ainsi que la confiance qu'ils nous ont accordé

Nous remercions vivement présidente de jury et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Nos vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université, ainsi que mes collègues de la promotion 2014. Nous tenons à remercier toutes personnes qui nous ont aidés Dans notre cursus.

. Enfin, nous remercie ABASSI et nous tenons à remercie tout ceux qui nous aider de prés ou loin pour ce travail.

AHMED SERIER OUSSAMA

CHERIER MOHAMMED

Dédicaces

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et Tout mon amour.

Je dédie ce modeste travail à toute ma famille : ma sœur Nacera, petite ma sœur Hadjer et seul mon frère Hossin

à tous famille **Cheriet** et **Sanaini**

Mon partenaire de mémoire **Oussama**

Bon mon ami de quartée **Fayçal**. **Ayoub** et tout mes amis de l'université surtout le groupe de réseau électrique

Sincèrement je leur dis merci parce qu'il je vous aime tous

Mohamed

DÉDICACE

Je dédie ce travail :

A ma chère mère et mon cher père pour l'éducation et le grand

Amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance. Et

Pour leurs patiences et leurs sacrifices.

A mon cher frère ***Wassim***

A mes chères sœurs

A toute ma famille ***AHMED SERIER et MOHAMED ALI***

A Mr : ***DINNE Mohammed*** *surtout pour soutient moral*

A tous mes amis surtout de classe électrotechnique

A tous ce que j'aime.

Sommaire

REMERCIEMENT…….……I

Dédicaces .1……..……..II

Dédicaces .2……...…….……III

RÉSUMÉ……...IV

Sommaire…….…….....V

liste des figures……...VI

liste des tableaux……...VII

Liste des Symboles et abréviations……..VIII

Introduction générale…….…....1

Chapitre I : l'écoulement des puissances

I.1. Introduction……..4

I.2. modélisation du réseau et calcul de l'écoulement des puissances…….....4

I.2.1 modélisation des éléments du réseau électrique…….…5

I.2.1.1 générateurs ……...……..5

I.2.1.2 transformateurs de puissances……5

I.2.1.3 lignes de transports……6

I.2.1.4 charges électriques …….……...7

I .2.1.5 Eléments shunt ……..…7

I.2.2 calcul de l'écoulement des puissances……...……8

I.2.2.1 détermination de la matrice admittance……11

I.2.2.2 détermination des courants……13

I.2.2.3 détermination des puissances……14

I.3. classification des variables et des contraintes du système……..……14

I.3.1 classification des variables……..……14

I.3.2 classification des contraintes……...……15

I.3.2.1 contraintes sur les variables dépendantes……..……15

I.3.2.1.a contraintes équilibre entre la production et consommation……..…15

I.3.2.1.b contraintes sur les modules de la tension……..…..16

I.3.2.1.c contraintes sur la capacité de transit de la ligne…….……16

I.3.2.2 contraintes des variables indépendantes……..…..…17

I.3.2.2.a contraintes sur la production……...17

I.3.2.2.b contraintes sur les rapports de transformateur……...….…17

I.4. Conclusion……..…17

Chapitre II : Résolution du problème d'écoulement de puissances

II.1.Introduction.....20

II.2. Equations d'écoulement de puissance.....20

II.3. Résolution des équations d'écoulement de puissances.....22

II.3.1.1. Méthode de Gauss Seidel.....22

II.3.2.1. Méthode de Newton-Raphson.....23

II.3.2.1.a.Détermination des sous matrices de la Jacobienne J ……..…...24

II.3.3.1. Méthode découplée rapide (fast decoupled load flow)…….…..….25

II.4.Conclusion…….……..27

Chapitre III : Les dispositifs FACTS

III.1. Introduction……..….29

III.2.1 Puissance transmise par une ligne électrique…….….....30

III.2.2 La chute de tension …….…...31

III.2.3 Pertes actives …….……..…32

III.2.4. La compensation……....…33

III.2.4.1 Principe de la compensation shunts…….....34

III.2.4.2 Principe de la compensation séries ……....35

III.2.5. Moyens de compensation réactive ……37

III.2.5.1 Compensateurs synchrones ……37

III.2.5.2 Bancs de condensateurs ……..……37

III.2.5.3 Compensateurs statiques de puissance réactive ……..…..38

III.3. Les systèmes de transmission flexibles en courant……...…….…….39

III.3.1 Définition …….....39

III.3.2 Les différents types des systèmes FACTS :…….….40

III.3.3 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS …….……...42

III.4. Structure des Principaux Dispositifs FACTS……...….42

III.4.1 dispositifs de compensation dynamique shunts …….…..42

III.4.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC)……....43

III.4.1.1.1 Définition …….....43

III.4.1.2.1 Principe de fonctionnement ……...…..43

III.4.1.2 Le STATCOM (Static Compensator)…….….….45

III.4.1.2.1 Définition …….....45

III.4.1.2.2 Principe de fonctionnement…….….….45

III.4.2 Dispositifs de compensation dynamique série ……...…47

III.4.2.1 La capacité série commande par thyristor (TCSC) ……..…...48

III.4.2.1.1 Définition ……..……48

III.4.2.1.2 Principe de fonctionnement:…….....48

III.4.2.2 Compensateur statique série synchrone (SSSC) : ……...49

III.5. Modélisation des dispositifs FACTS…….51

III.5.1. Injection de puissance aux extrémités de la ligne…….....51

III.5.2. Création d'un nœud fictif……...…….52

III.5.3. Modification de la matrice d'admittance nodale…….53

III.5.4. Dispositifs FACTS shunt……..……..…54

III.5.4.1. Modèle du compensateur statique de puissance réactive (SVC)……54

III.5.4.2. SVC placé au milieu d'une ligne…….…55

Sommaire

III.5.4.3. Modèle du compensateur statique de puissance réactive (STATCOM)…….....56

III.5.5. Dispositifs de compensation série…….…57

III.5.5.1. Modélisation de TCSC ……..…58

III.5.6. Dispositifs de compensation shunt-série :…….59

III.5.6.1. Modélisation mathématique du compensateur universel 'UPFC'…….……..59

III.6. Conclusion……..60

Chapitre IV : Les Dispositifs D-FACTS

IV.1.Introduction ……..63

IV.2. Justification de l'utilisation des systèmes D-FACTS par rapport au system FACTS……..…64

IV.3. les dispositifs D-FACTS……...…….…..65

IV.3.1.Principe de fonctionnement l'impédance série distribué (DSI)…….…66

IV.3.2. Principe de fonctionnement de la réactance série distribué (DSR)…….....68

IV.3.3. Compensateur statique série distribué…….....70

IV.4.Avantages opérationnelle et économique du DSSC……..…...72

IV.5. L'impact des dispositifs DSSC sur l'écoulement de puissance……..….....73

IV.6. Application des D-FACTS…….…..75

IV.6.1.L'objet de D-FACTS……..75

IV.6.2.D-FACTS de profil opérationnel…….....75

IV.6.3.Ex.1 : réseaux a deux nœuds…….....75

IV.7.Exp.2 : réseaux a sept nœuds……...…..…....80

IV.8.Exp.3 : réseaux a six nœuds……..……....82

*IV.9.*Conclusion ……83

Conclusion Générale…….……...…..…..85

Bibliographies……...….……87

Bibliographies……...……..…88

Bibliographies……...……..…89

Liste des Figures

Chapitre I : l'écoulement des puissances

Figure I.1 : le modèle d'une génératrice……..…….....5

Figure I.2 : Transformateur de puissance avec prise réglable de charge……6

Figure I.3: Modèles-en π d'une ligne de transmission……..7

Figure I.4 : Schéma unifilaire d'une charge électrique…….……...7

Figure I.5 : Schéma unifilaire d'un SVC……..8

Figure I.6 : Schéma simplifiée d'un réseau électrique……8

Figure I.7 : représentations d'une ligne reliant deux nœuds……..……12

Chapitre III : Les dispositifs FACTS

Figure. III.1:ligne électrique alimentant une charge……..…30

Figure.III.2:ligne de charge du système…….……31

Figure.III.3:Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation……..……34

Figure. III.4: Principe de compensation Shunts…….....34

Figure. III.5: Diagramme vectoriel de Compensation shunt…….……34

Figure. III.6: Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission……...…35

Figure. III.7 : Principe de compensation série…….…..36

Figure. III.8: Diagramme vectoriel de compensation série…….…..36

Figure. III.9 : Courbe de puissance avec et sans compensation……36

Figure. III.10: Schéma de principe d'un FACTS……..……...…..39

Fig. III.11.Principaux Dispositifs FACTS……...……..40

Figure. III.12: Modèle mathématique de SVC…….……..……43

Liste des Figures

Figure. III.13: Fonctionnement du compensateur statique……...44

Figure. III.14: Schéma de base du STATCOM……..…….…45

Figure. III.15 : Présentation d'un compensateur…….....…46

Figure. III.16: Diagramme vectoriel de STATCOM…….....46

Figure. III.17 : Caractéristique statique du STATCOM……..47

Figure. III.18: Insertion d'un TCSC sur fonction Une ligne……...48

Figure. III.19: Impédance du TCSC en de l'angle…….……48

Figure. III.20 : Schéma de base du SSSC……50

Figure. III.21 : Statique du SSSC…….….50

Figure. III.22 : Modélisation par injection de puissances: a) ligne avec FACTS, b) ligne avec injections équivalentes…….…..…5

Figure. III.23 : Modélisation avec nœud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente…….52

Figure. III. 24 : Intégration du dispositif FACTS dans une ligne……..……...53

Figure. III.25 : Modélisation d'un SVC : a) SVC placé en un nœud: b) symbole,c) modèle……..54

Figure III.26 : Variation de la puissance réactive absorbée par un SVC en fonction de la tension nodale……...……..55

Figure. III.27 : SVC placé en milieu de ligne……...56

Figure. III.28 : Représentation schématique de STATCOM…….…56

Figure.III.29 : modèle mathématiques e de TCSC……..….58

Figure. III.30 : Modèle mathématique de l'UPFC et le système de transmission…….....59

Liste des Figures

Chapitre IV : Les Dispositifs D-FACTS

Figure VI.1 : Transmission Line Séries TCSC sur la plate-forme ……..…..…64

Figure VI.2 : D-FACTS distribués sur les lignes électriques……...66

Figue VI.3 : Circuit schématique de DSI……..….…67

Figure VI.4 : profil de l'impédance de la ligne que les modules sont mis…….67

Figure IV.5 :Circuit schématique de DSR…….…69

Figure IV.6 Augmentation de la ligne inductance de commutation dans des modules DSR……...…...69

Figure IV.7 **:** prototype de laboratoire de DSSC…….……..70

Figure IV.8 : Circuit schématique d'une DSSC……...……..71

Figure IV.9 : La variation de la puissance transmise par l'injection de la tension de carré……...….…...74

Figure VI.10 : Diagramme du Réseau Original……..……..76

Figure VI.11 : Insertion dispositif D-FACTS…….….…77

Figure IV.12 : La fenetre de dialog des dispositif D-FACTS...……...78

Figure VI.13: Reseau a deux nœuds avec D-FACTS inseré dans la premiere ligne en mode inactive (by-pass)...……..78

Figure VI.14: Reseau a deux nœuds avec D-FACTS inseré dans la premiere ligne en mode active……..…79

Figure IV.15: Reseau a sept nœuds avec D-FACTS en mode inactive (by-pass)……....80

Figure IV.16: La fenetre de dialog du D-FACTS…….….81

Figure IV.17: Reseau a sept nœuds avec D-FACTS entre le nœuds 2-5 en mode active…….....81

Figure IV.18: Reseau a six nœuds avec D-FACTS entre le nœuds 6-3 en mode inactive (by-pass) ……...82

Figure IV.19: Reseau a six nœuds avec D-FACTS entre le nœuds 6-3 en mode active…….……...……..83

Liste des Tableaux

Chapitre I : l'écoulement des puissances :

Tableau I.1 : Modélisation des paramètres du réseau……...……10

Tableau I.2 les caractéristiques des nœuds dans l'écoulement de puissance (les grandeurs marquées dans le tableau sont les grandeurs fixes du nœud)……11

Chapitre III : Les Dispositifs FACTS :

Tableau III.1. Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive……...……38

Chapitre IV : Les Dispositifs D-FACTS :

Tableau VI.1**.** Les paramètres des réseaux étudient de deux nœuds……..76

Liste des Symboles et abréviations

FACTS : Flexible alternatif curant (AC) transmission systèmes.

D-FACTS : Distribués flexibles (AC) Transmission systèmes.

DSSC : Compensateur statique série distribué**.**

STT : un seul transformateur tournant.

DSI : l'impédance série distribué.

DSR : la réactance série distribué

STATCOM : Statique Synchrones Compensateur.

TSR : Thyristor Switcher Réacteur.

TSC : Thyristor Switcher Capacité**.**

SVC : Statique Var Compensateur.

TCSC : Thyristor Contrôle Séries Capacités.

SSSC : Statique Synchrones Séries Compensateur.

UPFC : Unifié Power Flow Controller.

VSC : Voltage Source Convertir.

RCT : Réactances Commandées par Thyristor.

CCT : condensateur commandé par thyristor

CSERA : Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé

ASVC : Advanced Static Var Compensator

SVG : Static Var Generator

MLI :Modulation de largeur d'impulsion

IEEE : Insitute of Electrical and Electronics Engineers

ORPF : Répartition optimale de la puissance réactive (Optimal Reactive Power Flow).

Liste des Symboles et abréviations

L_index : Indice de stabilité de tension.

Vs : Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).

Vr : Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).

Ps : Puissance active fournie par la source

Qs : Puissance réactive fournie par la source

P_L : Puissance active demandée par la charge.

Q_L : Puissance réactive demandée par la charge.

P_{ij} : Puissance active transportée par la ligne.

Q_{ij} : Puissance réactive transportée par la ligne.

δ_{ij} : Angle de charge entre Vs et Vr

R_L : Résistance de la ligne de transport.

X_L : Réactance de la ligne de transport.

θ_{ij} : Déphasage du courant de al ligne.

δ_i et δ_k : Sont les angles de déphasage aux nœuds i et k, respectivement**.**

|Vi | |Vj | : Sont les amplitudes des tensions nodales.

V_{sh} : Tension (shunt) injectée par le STATCOM.

I_{sh} : Courant (shunt) injecté par le STATCOM.

R_{sh} : Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.

X_{sh} : Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.

P_{sh} : Puissance active délivrée par le STATCOM.

Q_{sh} : Puissance réactive délivrée par le STATCOM.

DP : Les pertes actives de transmissions.

DV : La déviation de tension.

RÉSUMÉ

RÉSUMÉ :

Les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) peuvent contrôler le flux d'énergie dans le système de transmission pour améliorer l'utilisation des puissances actifs, soulager la congestion, et limité les flux de boucle. Les coûts élevés et les problèmes de fiabilité ont limité leur utilisation dans ces applications. Le concept de systèmes de transmission flexibles en courant alternatif distribués (D-FACTS) est présenté comme un moyen de supprimer ces barriers. Ce travail introduit le concept de dispositifs D-FACTS comme une approche alternative à la réalisation de contrôle de flux d'énergie rentable. A titre d'exemple, le compensateur statique série distribué (DSSC). Ces dispositifs pouvant être inseré sur une ligne électrique existante et peut, dynamiquement et statiquement, changer l'impédance de la ligne de manière à commander le flux d'énergie. Détails de mise en œuvre et l'impact du système sont présentés dans le document, ainsi que les résultats des simulations.

Abstract :

Flexible AC transmission systems (FACTS) devices can control power flow in the transmission system to improve asset utilization, relieve congestion, and limit loop flows. High costs and reliability concerns have restricted their use in these applications. The concept of distributed (D-FACTS) is introduced as a way to remove these barriers. This work introduces the concept of Distributed (D-FACTS) as an alternative approach to realizing cost-effective power flow control. By way of example, a distributed static series compensator (DSSC) are shown that can be clipped on to an existing power line and can, dynamically and statically, change the impedance of the line so as to control power flow. Details of implementation and system impact are presented in the paper, along with simulation results.

RÉSUMÉ

ملخص :

يمكن للأجهزة أنظمة نقل التيار المتردد المرنة (FACTS) السيطرة على تدفق الطاقة في نظام النقل لتحسين استخدام الأصول، وتخفيف الازدحام، والحد من تدفقات و تقييد تكاليف عالية وموثوقية استخدامها في تطبيقات الأطروحة. وأدخلت مفهوم (D-FACTS) الموزعة باعتبارها وسيلة لإزالة الحواجز الأطروحة. هذا العمل يدخل في مفهوم (D-FACTS) الموزعة ك أنه نهج بديل لتحقيق التحكم في تدفق الطاقة الفعالة من حيث التكلفة. على سبيل المثال، يتم عرض موزعة ثابت سلسلة المعوض (DSSC) وهذا يمكن أن يثقب إلى خط السلطة القائمة، ويمكن، بشكل ثابت وحيوي، وتغيير مقاومة من خط وذلك للسيطرة على تدفق الطاقة. يتم عرض تفاصيل التنفيذ وتأثير النظام في شبكة، جنبا إلى جنب مع نتائج المحاكاة.

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter et à des conditions d'environnement très contraignantes, les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Le transport se fait, en outre, sur de longues distances en utilisant des lignes de grande capacité de transport. Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences. La difficulté de maintenir un profil de tension acceptable a substantiellement augmenté. La stabilité de tension du réseau est alors caractérisée par sa capacité de maintenir la tension aux bornes de la charge dans les limites spécifiées dans le fonctionnement normale.

L'étude du comportement de la tension dans les réseaux électriques est devenue une préoccupation majeure des exploitants et planificateurs de ces systèmes. En fait, plusieurs incidents généralisés survenus dans le monde ont été associés à des instabilités de tension. Ce mode d'instabilité n'est pas encore bien maîtrisé, comparé au mode d'instabilité angulaire (dynamique et transitoire). En effet, le mécanisme causant l'instabilité de tension semble l'un des plus importants problèmes à clarifier . Aujourd'hui encore, il n'y a pas une théorie disponible et largement acceptée pour l'analyse de la stabilité de tension. Les problèmes liés à ce type d'instabilité constituent alors, dans plusieurs pays, un axe de recherche très important .Des relevés sur les incidents survenus durant les dernières décennies ont montré que l'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes. Ce réseau s'affaiblit et sa consommation réactive s'accroît. Le phénomène est alors caractérisé par une baisse progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices, et qui va en s'accélérant au bout de quelques minutes . Dans cette situation, Les moyens classiques de contrôle des réseaux.

réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux problèmes d'instabilité du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes. Il faudra donc compléter leur action en mettant en oeuvre des dispositifs électroniques de puissance ayant des

temps de réponse courts, connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) pour le contrôle des réseaux. Le développement des dispositifs FACTS a ouvert de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux régulées, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité de tension ou de tendre vers les limites thermiques des lignes. Le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation nécessite alors une surveillance permanente du système afin d'assurer la qualité du service (problème de conduite), garantir sa sécurité (problème de protection) et sa stabilité (problème de réglage).

Dans la première chapitre une introduction sur le problème de l'écoulement de puissance connue. Ces études sont nécessaires pour la planification et les développements futurs des réseaux et aussi pour assurer un fonctionnement fiable de ces systèmes. et nous avons introduit en bref la modélisation des éléments du réseau à titre d'exemple les générateurs, les charges, les éléments shunts ainsi que les lignes et les transformateurs…etc.

Le second chapitre a été consacré à l'étude de calcul l'écoulement de puissance, où différentes Méthodes ont été exposées et nous avons opté pour la méthode de (GAUSS-SEIDEL, la methode de NEWTON-RAPHSON,et methode DECOUPLEE RAPIDE).

Le troisième chapitre nous avons étudié le dispositif FACTS ont un rôle important à jouer dans le contrôle des transits de puissance et dans le maintien de conditions d'exploitation sûres du réseau de transport.Le concept FACTS est ensuit présenté de manière générale et une classification des dispositifs est proposée, ainsi leurs placements dans les réseaux électriques.

Dans dernier chapitre, est dédié à l'application et la simulation du dispositif (D-FACTS). On trouve trois exmple : réseau a deux nœud,réseau a six nœud .et réseau a setp nœud. Appliqué sur le réseau par D-FACTS pour le contrôle de débit de la ligne sont déterminés. Ensuite, les réglages de l'appareil D-FACTS sont choisis pour atteindre les objectifs de flux de ligne souhaites [1].

I .1.Introduction :

Le calcul de répartition des puissances consiste à déterminer l'ensemble des transits de puissances et des tensions dans le réseau pour un cas de charge donné. Quatre grandeurs sont associées à chaque nœud du système : les puissances active et réactive ainsi que le module et la phase de la tension. Seules deux de ces quatre variables sont connues en un nœud, les deux autres étant déterminées lors du calcul. Trois combinaisons, définissant trois types de nœuds, sont généralement utilisées :

- Noeud de charge (P_Q) : c'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont considérées connues.
- Noeud générateur (P_V) : c'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. la puissance active et la tension sont considérées connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures, Q_g^{ming} et Q_g^{max} respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud (P_Q).
- Nœud de référence (Slack bus) : c'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant ; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud de référence, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus [2].

I .2. Modélisation du réseau et calcul de l'écoulement de puissance :

Pendant longtemps, l'analyse des réseaux électriques n'a pas été accessible au calcul par suite du nombre élevé de variables mises en jeu. Les ingénieurs ont dû, pour prévoir le comportement de ces réseaux, recourir à des modèles analogiques représentant le réseau véritable à une certaine échelle réduite de tension et de courant : table à courant continu ou à courant alternatif, analyseur transitoire, micro réseau, réseau pour l'essai des protections est des automatismes, etc. Le développement des ordinateurs tant en capacité de calcul que de mémoire permet à présent de traiter par le calcul les réseaux les plus étendus.Par analogie avec les modèles analogiques, on parle de modèle mathématique d'un élément que l'on définit comme le système d'équations linéaires ou non, algébriques dans le cas statique, différentielles dans le cas dynamique (ou aux dérivées partielles) qui

décrit mathématiquement le comportement de l'élément. Les modèles des différents éléments (le réseau).

I .2.1. Modélisation des composants du réseau électrique :

Un réseau de transport ou de distribution électrique contient un ensemble de composants qu'on doit modéliser afin d'établir les équations qui gouvernent le système électrique. Dans les sections qui suivent, on va exposer quelques modèles algébriques de base relatifs aux composants du réseau qui sont nécessaires pour le calcul de l'écoulement de puissance.

I.2.1.1. Générateurs :

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courants. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance active injectée au jeu de barres et la tension aux bornes de générateurs soient maintenues constantes. La puissance active délivrée par le générateur est réglée à travers le contrôle de la turbine, qui doit être dans les limites de la capacité du système turbine générateur. La tension est liée principalement à l'injection de la puissance réactive au jeu de barres de production, qui est contrôlée par le courant de l'excitation, et comme le générateur doit fonctionner dans les limites de sa courbe de capacité réactive Q(p), il n'est pas possible de régler la tension en dehors de certaines limites admissibles.

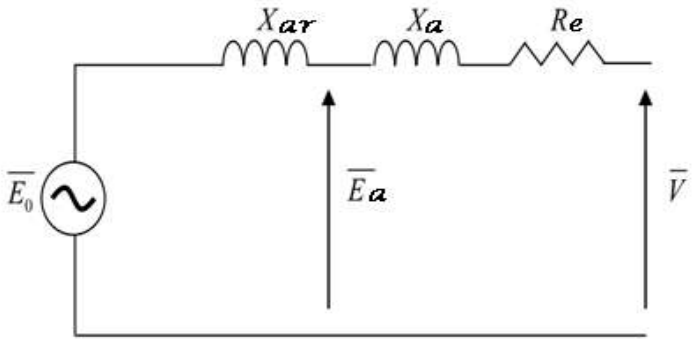


Figure I.1 : le modèle d'une génératrice.

I.2.1.2.Transformateurs de puissances :

Le transformateur de puissance jouent plusieurs rôle dans le fonctionnement du réseau électrique ils sont utilisés comme élévateurs de tension et ce au niveau de la source pour transporter l'énergie électriques avec minimum de pertes coté (HT-HT) ,il sont utilisés comme abaisseurs de tension au niveau des stations de transformation et

d'interconnexion pour alimenter les réseaux moyenne tension (HT-MT) à titre d'exemple réseau 60Kv, ils assurent aussi le maintient d'une tension fixe quelle que soit la fluctuation du profil de tension au niveau des connexion haute tension. (HT-HT).

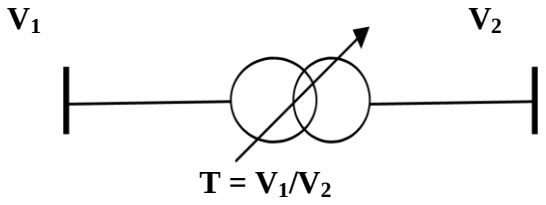


Figure I.2 : Transformateur de puissance avec prise réglable de charge.

I .2.1.3 Lignes de transports :

La ligne de transports est représentée par le modèle en à paramètres concentrés (Figure I.3). Ces paramètres spécifiques pour des lignes ou des câbles avec une configuration donnée, dépendent de la nature des conducteurs et de leurs géométries. Ce modèle est caractérisé par les paramètres suivants: l'impédance série par phase $\bar{Z}_{km}$ (en Ω) :

$$\bar{Z}_{km} = r_{km} + jx_{km} \qquad (I.1)$$

Où sont, respectivement, la résistance et la réactance série de la ligne entre les jeux de barres *k* et *m*. L'admittance shunt par phase Y_{km}^{sh} (en Siemens) :

$$Y_{km}^{sh} = g_{km}^{sh} + jb_{km}^{sh} \qquad (I.2)$$

Où g_{km}^{sh} , jb_{km}^{sh} sont, respectivement, la conductance et la susceptance shunts de la ligne entre les jeux de barres *k* et *m*.

Dans les études de l'écoulement de puissance, on a souvent besoin de l'admittance série des lignes .

$\bar{Y}_{km}$, qui est donnée par :

$$\overline{Y_{km}} = \frac{1}{r_{km} + fx_{km}} = g_{km} + jb_{km} \qquad (I.3)$$

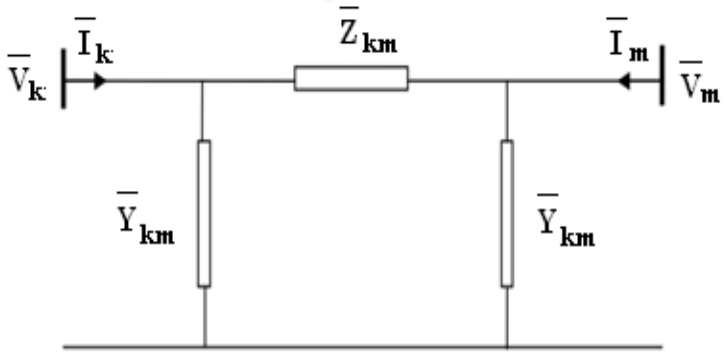


Figure I.3: Modèles-en π d'une ligne de transmission.

Où g_{km} , jb_{km} sont, respectivement, la conductance et la susceptance séries de la ligne entre les jeux de barres *k* et *m*. Dans la plupart des cas, la valeur de g_{km}^{sh} est si petite, qu'on peut la négliger [3].

I .2.1.4 Charges électriques :

Les charges électriques en haute tension reflètent souvent des postes de répartition (Sous-stations) qui alimentent des réseaux de distribution. Ces charges sont connectées au réseau à travers des transformateurs munis de prises réglables en charge , le niveau de tension de la charge est maintenu pratiquement constant elle s'écrit comme suit :

$$Z_{ch} = B_{ch} + jX_{ch} \qquad \text{(I.4)}$$

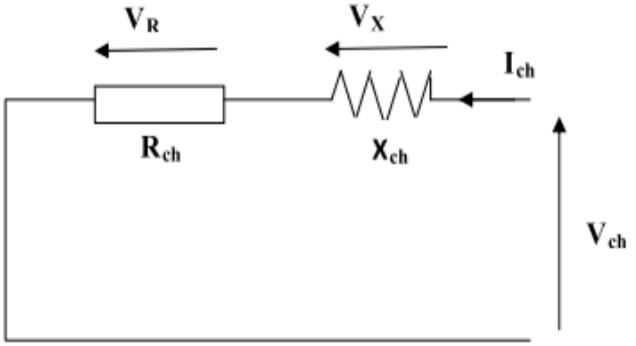


Figure I.4 : Schéma unifilaire d'une charge électrique

I .2.1.5 Eléments shunt :

Dans la plupart des cas, les éléments shunts sont des dispositifs destinés à la compensation de l'énergie réactive et la tenue de la tension, à savoir : batteries de condensateurs et inductances fixes, compensateurs synchrones ou compensateurs statiques

(SVC).[9][10] Chaque élément connecté au réseau sera modélisé, suivant le cas, par une admittance équivalente ou une injection de puissance.

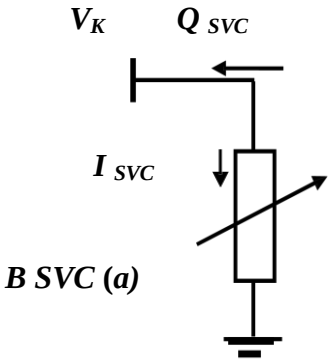


Figure I.5 : Schéma unifilaire d'un SVC

I .2.2 Calcule de l'écoulement de puissance :

Le calcul de l'écoulement de puissances dit aussi calcul de la répartition des charges permet de déterminer :

- Les tensions complexes aux niveaux des différents nœuds ;
- Les puissances transitées d'un nœud à autre ;
- Les puissances injectées à un nœud ;
- Les pertes actives et réactives dans le réseau électrique.

Soit le réseau électrique décrit par la forme simplifiée comme montre la figure ci-dessous

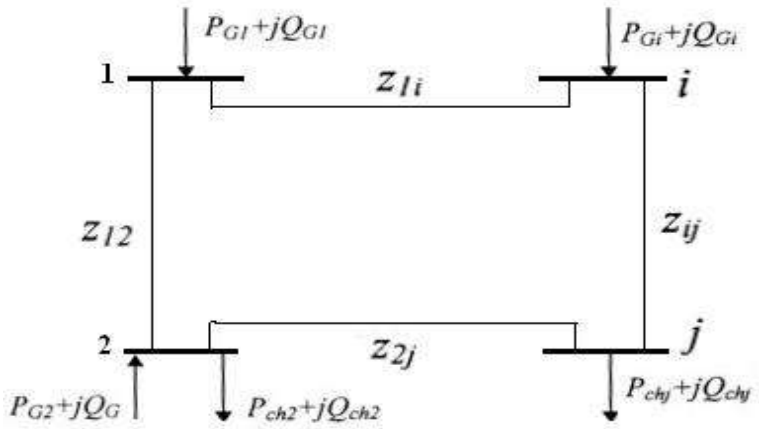


Figure I.6 : Schéma simplifiée d'un réseau électrique

Le calcul de l'écoulement de puissance en régime permanent établi se base sur le système d'équation linéaire suivant :

$$\bar{I} = \bar{Y} * \bar{V} \qquad (I.5)$$

$\bar{I}$: Vecteur complexe des courants nodaux injectés dans le réseau.

$\bar{Y}$: Matrice des admittances complexes.

$\bar{V}$: Vecteur complexe des tensions nodales.

Pour résoudre ce système d'équations linéaires, on doit imposer a chaque nœud soit la tension ou le courant injecté. Pratiquement ce problème est plus compliqué, car il faut définir les conditions de fonctionnement du réseau. Ces conditions affectent les grandeurs électriques relatives aux nœuds du réseau tel que : la puissance active *P*, la puissance réactive *Q*, le module $|V|$ et le déphasage δ de tension. Ceux-ci peuvent ainsi être définis suivant trois types de nœuds :

- **Nœuds producteurs (Nœuds *P-V* ou nœuds a tension contrôlée)**

Pour ce type de nœuds, on associe les centrales de production, on spécifie la puissance active P_G (consigne imposée par le dispatching) et le module de la tension $|V|$. Les variables à déterminer sont la phase δ de la tension et la puissance réactive Q_G .

- **Nœuds consommateurs (Nœuds *P-Q* ou nœuds de charge)**

Pour ce type de nœuds, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module $|V|$ et la phase δ de la tension.

- **Nœud de bilan (Nœuds $|V|$ – δ ou nœud de référence)**

Pour ce type de nœuds on associe le centrale de production la plus puissante. Dans un nœud i (nœud de référence ou slack bus), on spécifie la phase δ et le module de la tension $|V|$, les valeurs à déterminer sont les puissances actives et réactives.

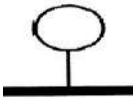
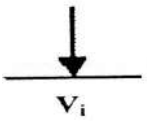
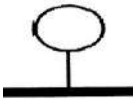
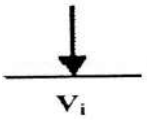
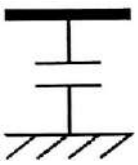
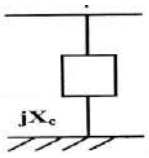
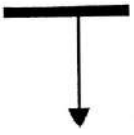
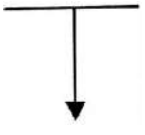
On est obligé de laisser varier la production de la puissance active de l'une des centrales, ceci pour satisfaire l'énergie qui définit que la production soit égale à la consommation plus les pertes : Production **= *consommation* + *pertes***

Le nœud associé à cette centrale est caractérisé par le module de sa tension et sa phase qui est souvent prise comme origine des phases et posée égale à zéro, donc il faut déterminer les inconnues qui sont les puissances actives P_G et réactives Q_G, en résumé, le problème se pose sous la forme suivante :

Nœuds paramétriques	données	Inconnues
Nœuds producteurs	P et |V|	Q et δ
Nœuds consommateurs	P et Q	|V| et δ
Nœuds de bilan	|V| et δ	P et Q

Dans notre travail la modélisation des différents paramètres du réseau et représentée dans le Tableau :

Tableau I.1 : Modélisation des paramètres du réseau.

composant	symbole	représentation	Observation
Générateurs	 **Nœud 1**	$P_{gi, Qgi}$  V_i	Puissance active et réactive
Compensateurs synchrone	 **Nœud 1**	$P_{gi} = 0$; Q_{gi}  V_i	Puissance réactive générée
Capacités shunts	**Nœud 1** 	V_i 	Considérées comme une impédance capacitive constante au nœud i, ou comme puissance réactive injectée
La charge	Nœud i  P_{ch} ,Q_{ch}	V_i  P_{ch} ,Q_{ch}	Les puissances actives et réactives sont fixes.

De ce fait, on constante que la forme des données du problème nous conduit à un système d'équation non linéaire et sa résolution fait appel à des méthodes numériques.

Tableau I.2 les caractéristiques des nœuds dans l'écoulement de puissance (les grandeurs marquées dans le tableau sont les grandeurs fixes du nœud).

Type de nœud	p	Q	$\|\mathbf{V}\|$	δ	commentaires
charge	✓	✓			Représentation habituelle de la charge.
Tension contrôlée (régulateur)	✓		✓		$\|V\|$ est maintenu constant et Q varie sans limite
Générateur ou condensateur synchrone	✓		✓ Si $Q^- < Q_G < Q^+$		Le générateur ou le condensateur synchrone (P = 0) a des limites sur la puissance réactive « Q_G » en (VAR) Q^- limite minimale. Q^+ limite maximale $\|V\|$ est maintenue tant que « Q_G » est dans limites
	✓	✓ Si $Q_G < Q^-$ $Q_G > Q^+$			
La référence (bilan)			✓	✓	Le nœud bilan ou balancier, doit régler la puissance nette pour maintenir la tension constante (indisponible pour la solution).

I.2.2.1 Détermination de la matrice admittance :

On considère le schéma d'une branche entre deux nœuds i et j

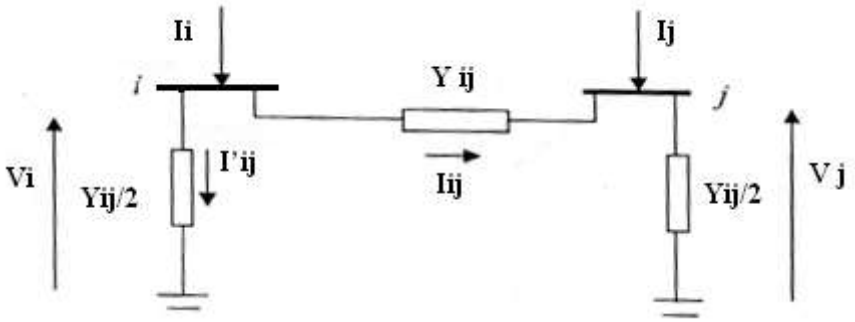


Figure I.7 : représentations d'une ligne reliant deux nœuds

Avec :

I_i : courant injecter au nœud i ;

I_{ij} : courant transitant du nœud i au nœud j ;

I_{ij} : courant de fuite au nœud i ;

Y_{ij} : admittance de la ligne i-j ;

$Y_{ij}/2$: admittance shunt des nœuds i et j ;

V_i, V_j : tensions aux nœuds i et j ;

L'utilisation de la méthode des nœuds nécessite la transformation des impédances des branches du réseau en admittances ; pour cela, nous posons :

$$\underline{Y_{ij}} = \frac{1}{\underline{Z_{ij}}} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} + j\,\frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \qquad \text{(I.6)}$$

Où:

$$\underline{Y_{ij}} = g_{ij} + j\, b_{ij} \qquad \text{(I.7)}$$

$$\text{Avec:} \begin{cases} gij = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \\ bij = \frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \end{cases} \qquad \text{(I.8)}$$

Ou : g_{ij} : Appelée conductance.

b_{ij} : Appelée susceptance.

L'admittance propre du nœud i donnée par :

$$\underline{Y_{ij}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{n} (Y\,ij + Y\,ij/2) \qquad \text{(I. 9)}$$

Et l'admittance mutuelle entre le nœud j :

$$\underline{Y_{ij}} = -\underline{y_{ij}} \qquad \text{(I.10)}$$

Les règles pour former la matrice Y sont :

S'il existe une ligne entre le nœud i et j

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (I.11)$$

$$Y_{ij} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} (Y_{ij} + Y_{ij}/2) \quad (I.12)$$

I.2.2.2 Détermination des courants :

Les équations qui régissent le réseau par l'application de la loi des nœuds peuvent être données par la formule suivante [4]:

$$I_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} (\underline{I_{ij}} + \underline{I_{ij}}) \quad (I.13)$$

L'expression du courant transmit du nœud i vers le nœud j :

$$\underline{I_{ij}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} \underline{y_{ij}} (\underline{V_i} - \underline{V_j}) \quad (I.14)$$

L'expression du courant de fuite a la terre :

$$\underline{I_{ij}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} (\underline{y_{ij}/2}\ \underline{V_i}) \quad (I.15)$$

On déduit donc l'expression du courant au nœud i :

$$I_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} \underline{y_{ij}} (\underline{V_i} + \underline{V_j}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} (\underline{y_{ij}/2} \cdot \underline{V_i}) \quad (I.16)$$

D'où

$$I_i = \underline{V_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} \left(\underline{y_{ij}} + \frac{\underline{y_{ij}}}{2}\right) - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} \underline{y_{ij}} \cdot \underline{V_j} \quad (I.17)$$

On trouve ainsi l'équation générale du courant :

$$\underline{I_i} = \underline{V_i} \cdot \underline{Y_{ii}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{n} \underline{y_{ij}} \cdot \underline{V_j} \quad (I.18)$$

D'une façon générale, on aura :

$$\underline{I_i} = \sum_{j=1}^{n} \underline{y_{ij}} \cdot \underline{V_j} \quad (I.19)$$

D'où la forme matricielle du courant :

$$[I] = [Y].[V] \quad (I.20)$$

I.2.2.3 Déterminations des puissances :

La puissance apparente injectée au nœud i est donnée par :

$$\underline{S_i^*} = P_i - j\,Q_i = \underline{V_i^*} \cdot \underline{I_i} \qquad (I.21)$$

En remplace l'Eq. (2-18) dans l'Eq. (2-20) on aura :

$$\underline{S_i^*} = P_i - j\,Q_i = \underline{V_i^*} \cdot \sum_{j=1}^{n} \underline{y_{ij}} \cdot \underline{V_j} \qquad (I.22)$$

Sachant que :

$$\begin{cases} \underline{Vi} = ei + j\,fi \\ \underline{Y_{ij}} = Gij + j\,Bij \\ \underline{S_i^*} = ei - j\,fi \end{cases} \qquad (I.23)$$

Et l'équation de la puissance apparente sera :

$$\underline{S_i^*} = P_i - j\,Q_i = (ei - j\,fi).\sum_{j=1}^{n}(ei - j\,fi).(Gij + j\,Bij) \qquad (I.24)$$

On en déduit les expressions des puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} Pi = \sum_{j=1}^{n} ei\,(ej\,Gij - fi\,Bij) + fi\,(fj\,Gij + ej\,Bij) \\ Qi = \sum_{j=1}^{n} fi\,(ej\,Gij - fi\,Bij) - ei\,(fj\,Gij + ej\,Bij) \end{cases} \qquad (I.25)$$

I.3. Classification des variables et des contraintes du système :

La complexité des systèmes électriques est proportionnelle aux nombres de nœuds Qui 'il contient. pour cela, afin de facilité les calcules et expliquer le fonctionnement correcte des grandes systèmes, il faut classifier les différents variables et contraintes

I.3.1 Classification des variables :

Généralement, le fonctionnement d'un réseau électrique peut être décret en fonction de six variables, pour chaque nœud considéré

- P_{chi} Q_{chi} **:** puissances actives et réactives consommée au nœud i ;
- P_{gi} Q_{gi} **:** puissances actives et réactives générée au nœud i ;
- V_i : module de tension au nœud i ;
- δ_i : Angle de phase au nœud i ;

Ces variables sont divisés en trois groupes

- **Les variables incontrôlables** : sont les puissances actives et réactives liées à la consommation.
- **Les variables indépendants ou de contrôle :** sont généralement les puissances actives et réactivés générés. dans certain cas, on peut considérer les tensions des nœuds producteurs ou les rapports de transformations de transformateurs avec régleur de charges. comme variables de contrôle.
- **Les variables dépendants ou d'état :** ce sont les tensions en mode et en phase représentant l'état du système.

I.3.2 Classification des contraintes :

Ces contraintes sont liées à la nature physique des éléments du réseau. On distingue les contraintes sur les variables dépendantes, dites contrainte de sécurité et contrainte et les variables indépendantes des limites .ces contraintes doivent être vérifiées à chaque repartions de charges ou optimisation [5].

I. 3.2.1 Contraintes sur les variables dépendantes :

Les contraintes liées à la sécurité des réseaux sont généralement comme suit :

I.3.2.1. a.Contraintes équilibre entre la production et consommation :

En régime normale et à tout moment, légalité entre la production et la consommation des puissances actives et réactives doit être assuré, soit :

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi} - \sum_{i=1}^{N_c} P_{chi} - P_l = 0 \qquad \text{(I.26)}$$

$$\sum_{i=1}^{N_g} Q_{gi} - \sum_{i=1}^{N_c} Q_{chi} - Q_l = 0 \qquad \text{(I.27)}$$

Avec :

P_l **:** Perte active totale ;

Q_l : Perte réactive de consommation ;

N_c : Nombre de nœuds de consommation ;

N_g : Nombre de nœuds de générations ;

I.3.2.1.b. Contraintes sur les modules de la tension :

Les contraintes d'exploitions des réseaux fixant les limites des tentions maximales par la tenus diélectrique du la martial et saturation des transformateurs et les limites minimale par l'augmentation des pertes et le maintien de stabilité des alternateurs. On aura pour tous les nœuds, la condition suffisante et nécessaire à savoir :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \qquad i = 1 \dots n \qquad (I.28)$$

Avec :

V_i : Module de la Tension au nœud i ;

V_i^{min} , V_i^{max} **:** Les limites minimales et maximales, respectivement, de la tension

Le respecte des contraintes de tension est d'une importance primordiale pour la sécurité d'exploitions et du martial. Une violation de la limite supérieur que l'on observe parfois, en faible charge, peut construire un danger pour l'isolation des materais. Par ailleurs, des tensions trop basses nuisent à l'exploitation rationnelle du réseau et peuvent conduire à son écoulement.

I.3.2.1.c. Contraintes sur la capacité de transit de la ligne :

La puissance transitée dans un linge ne doit, en aucun cas dépasser la limite maximale, soit :

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{max} \qquad (I.29)$$

Avec :

$$S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^{\,2} + Q_{ij}^{\,2}} \qquad (I.30)$$

Ou : S_{ij} : Puissance apparente transitée dans la ligne i-j ;

S_{ij}^{max} **:** Puissance apparente maximale transitée dans la ligne i-j ;

P_{ij} : Puissance active transitée dans la ligne i-j ;

Q_{ij} : Puissance réactive transitée dans la ligne i-j ;

En généralement à partir des contrainte des puissances transité .On détermine les contrainte de courant correspondent à la ligne et aux transformateurs. On limite les courants pour des raisons de surcharge st stabilité.

I.3.2.2 Contraintes des variables indépendantes :

Ces contraintes sont liées à la nature physique des clémentes du réseau :

I.3.2.2. a .Contraintes sur la production :

La puissance produit par charge groupe est bornée supérieurement par la puissance maximale qu'il peut fournir et inférieurement par le minimum, qui et conditionnée par le rendement de ce groupe et le contraintes sur la turbine .Pour tous les nœuds de production les contraintes actives et réactives sont :

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (I.31)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (I.32)$$

I.3.2.2. b .Contraintes sur les rapports de transformateur :

Le rapport de transformation des transformateurs avec régleur en charge, peut variée selon la position du régleur .ce dernier doit être limité entre deux borne, minimale et maximale, soit :

$$\alpha_k^{min} \leq \alpha_k \leq \alpha_k^{max} \qquad k = 1 \ldots\ldots N_t \quad (I.33)$$

Avec :

$\boldsymbol{N_t}$: $Nombre\ de\ transformateur$

I.4. Conclusion :

La connaissance de l'état de réseau est fondamentale pour sa planification et son exploitation. Les grandeurs dont on peut avoir besoin (par exemple : injection, transits, intensités de courant, pertes) s'expriment en fonction de déphasage δ et des module $|V|$ des tensions.

Malheureusement, lorsqu'on planifié ou on exploite un réseau, on ne connait pas a priori ces tensions, donc on calcule l'état du réseau en fonction des grandeurs que l'on appelle le calcul de répartition des charges [6].

II.1.Introduction :

Le problème de la réparation des charges est capitale pour celui qui exploite un réseau électrique .Ainsi au point de vue structure des réseaux, afin de renforcer, modifier et adapter le réseau suivant des consommations. L'exploitant doit connaitre parfaitement le comportement de sont réseau afin, au cas d'un incédant, de prendra la décision optimale. De plus, le problème de la répartition des charges est le problème fondamental de la conduite économique des réseaux d'énergie électrique.

La résolution du problème de la répartition des charges nous permet de déterminer, les valeurs des modules de la phase et de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement donnée, se qui permettra de calculer les valeurs des puissances actives et réactives qui transité dans chaque ligne ,le bilan des puissances injectées en chaque nœud peut donc être établi, ce qui nous fournit la valeur des pertes actives et réactives de réseau [7].

II.2. Equations d'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à calculer les tensions du réseau électrique pour des extrémités spécifiées, et des conditions données aux jeux de barres, telles que les charges capacitives ou inductives qui doivent être alimentées, les puissances générées et les modules de tensions dans tous les jeux de barres, qui à partir desquelles les courant dans les lignes de transport, les puissances et les pertes de puissances peuvent être obtenus .Les équations des tensions nodales d'un réseau électrique de N jeux de barres sont écrites sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{N1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{1N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{N1} \end{bmatrix} \quad \text{(II.1)}$$

$$\text{Où} \quad I_{BUS} = Y_{BUS} + V_{BUS} \quad \text{(II.2)}$$

$[I_{BUS} = [I_1, I_1 \ldots\ldots I_N]]^T$: Le vecteur des courants injectés dans chaque jeu de barre (courant de source extérieur) le courant écoulement du jeu de barre I vers le jeu de barres j est positif et négatif dans le sens inverse.

$[V_{BUS} = [V_1, V_1 \ldots\ldots V_N]]^T$: Le vecteur des tensions complexes de chaque jeu de barre Y_{BUS} c'est la matrice admittance nodale du système de taille (N*N).

Y_{II} : L'élément diagonal de la matrice admittance. C'est la somme de tous les composants connectés à ce jeu de barre, traduit par l'équation mathématique suivante :

$$Y_{ii} = -\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^{N} Y_{ik} \qquad \text{(II. 3)}$$

Y_{IJ} : L'élément hors diagonal (i, k). C'est la somme négative de tous les composants connectés entre les jeux de barres *i* et *j*, c'est-à-dire :

$$Y_{ik} = -\sum_{K \neq 1} Y_{ik} \qquad \text{(II. 4)}$$

D'après l'équation (II.1), le courant net à injecter à un jeu de barre *i* est écrit comme suit :

$$I_i = \sum_{K=1}^{N} Y_{ik} * V_k \qquad i = 1,2\ldots\ldots, N \qquad \text{(II. 5)}$$

Où : $$\overline{Y}_{ik} = G_{ik} + j * B_{ik} = Y_{ik}(\cos\theta_{ik} + j\sin\theta_{ik}) \qquad \text{(II.6)}$$

$$\overline{Y}_{ik} = R_{ek} + j * I_{mk} = V_k(\cos\theta_k + j\sin\theta_k) \qquad \text{(II.7)}$$

G_{ik} , B_{ik} : sont respectivement la conductance et la succeptance de $\overline{Y}_{ik}$

$R_{\text{réel } k}$, $I_{\text{imaginaire } k}$ **:** sont respectivement la partie réel et imaginaire de $\overline{V}_k$

θ_k *:* La phase de la tension au jeu de barres k ;

θ_{ik} : La phase de l'élément ik ;

L'expression de la puissance apparente $\overline{S}i$ injectée à un jeu de barres peut s'écrire comme suit:

$$S_i^* = P_i - Q_i = V_i^* * I_i = V_i^* * \sum_{K=1}^{N} \overline{Y}_{ik} * \overline{V}_k \qquad \text{(II. 8)}$$

P_i, Q_i : Sont respectivement les puissances active et réactive au jeu de barres *i*.

En remplaçant les équations (II.6) et (II.7) dans l'équation (II.8), on obtient:

$$P_i = \sum_{K=1}^{N} V_i\, V_k\, Y_{ik} \cos(\theta_{ik} + \theta_k - \theta) \quad i = 1,2,\ldots..,N \qquad \text{(II. 9)}$$

$$Q_i = \sum_{K=1}^{N} V_i\, V_k\, Y_{ik}\, \text{Sin}(\theta_{ik} + \theta_k - \theta_i) \quad i = 1,2,\ldots..,N \qquad \text{(II. 10)}$$

Les équations (II.9), (II.10) représentent les équations de l'écoulement de puissance tels que:

$$P_i = P_{Gi} + P_{Di} \qquad \text{(II.11)}$$

$$Q_i = Q_{Gi} + Q_{Di} \qquad \text{(II.12)}$$

Où :

Q_{Gi} : sont respectivement les puissances active et réactive générées

Q_{Di} : sont respectivement les puissances active et réactive demandées au jeu de barres i.

Dans le calcule de l'écoulement de puissance, un jeu de barre est défini par quatre paramètres: module de tension V_i, angle de tension θ_i, puissance active P_i et puissance réactive Q_i injectée.

II.3. Résolution des équations d'écoulement de puissances :

La méthode initialement utilisée était la méthode de Gauss-Seidel, qui a l'inconvénient de converger en un nombre d'itérations proportionnel à la taille du réseau. Actuellement, la méthode universellement adoptée est la méthode de Newton–Raphson ou la méthode découplée rapide, dont le nombre d'itérations requis pour obtenir une solution est indépendant de la taille du réseau étudié. Ces dernières sont décrites dans les sections suivantes.

II.3.1.1. Méthode de Gauss Seidel :

Cette méthode consiste à enlever séquentiellement chaque nœud et actualiser sa tension en fonction des valeurs disponibles de toutes les tensions. Pour le cas concret de l'écoulement de puissance, la résolution de l'équation nodale suivante :

$$I_i = Y_{i1} * V_1 + Y_{i2} * V_2 + \ldots\ldots\ldots Y_{in} * V_n = \sum_{K=1}^{N} Y_{ik} * V_k \qquad \text{(II. 13)}$$

En général, on calcule le vecteur V qui satisfait le système non linéaire est :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1}^{N} Y_{ik} * V_j \right] \qquad \text{(II. 14)}$$

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{Pi - JQi}{(V_i^k)^*} - \sum_{j=1}^{i=1} Y_{ik} * V_j^{k+1} \sum_{j=1}^{N} Y_{ik} * V_j \right] \quad (II.15)$$

Le processus itératif est obtenu quand l'expression suivante est satisfaite :

$$\max \left| V_i^{k+1} - V_i^k \right| \leq \varepsilon \quad (II.16)$$

Le convergence de la méthode est atteinte lorsque la différance entre la tension calculée et celle qui la procédé pour chaque nœud soit inférieur à une précision (ε) donnée par l'utilisateur [8]:

$$\max \left| V_i^{k+1} - V_i^k \right| = \max \Delta V^{(k)} \leq \varepsilon \quad (II.17)$$

II.3.2.1. Méthode de Newton-Raphson :

Cette méthode implique des résolutions répétées d'un système d'équations linéaires, qui sont une approximation linéaire du système original d'équations non linéaires. Cette approximation linéaire est obtenue par un développement en série de Taylor de ces deux expressions .On est ainsi conduit à formuler le système linéaire :

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^{N} |Y_{ij}||V_i||V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + Y_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i = \sum_{j=1}^{N} |Y_{ij}||V_i||V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + Y_{ij}) = F_{iq} \quad i = 1,2,\ldots..,N \end{cases} \quad (II.18)$$

Où :

$F_{ip}^{(0)}$ et $F_{iq}^{(0)}$: sont des fonctions de tension et de phase :

A partir de la relation de $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$

Avec :

- $\Delta P_i^{(0)} = P_i - F_{ip}^{(0)}$ (II.19)
- $\Delta Q_i^{(0)} = Q_i - F_{ip}^{(0)}$ (II.20)

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

On rappelle que :

$$\Delta \delta_i^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad (II.22)$$

$$\Delta |V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad (II.23)$$

L'adaptation de (II.21) avec (II.23) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i{}^{(k+1)} \\ |V_i|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i{}^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \delta_i{}^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \left[J^{(k)}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad \text{(II.24)}$$

D'une manière générale :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [\,J\,] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad \text{(II.25)}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad \text{(II.26)}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad \text{(II.27)}$$

J_1 , J_2 , J_3 , J_4 Sont les sous matrice de Jacobienne.

II.3.2.1.a.Détermination des sous matrices de la Jacobienne J :

A partir du système d'équations (II.1)on peut déterminer les éléments de J

Sous matrice J_1 :

$$\frac{\partial Pi}{\partial|Vi|} = -|Yij||Vi||Vj| \;\; \text{Sin}\,(\delta j - \delta i + Yij\,) \quad , i \neq J \quad \text{(II. 28)}$$

$$\frac{\partial Pi}{\partial|Vi|} = \sum_{j=1,i\neq j}^{N} |Yij||Vi||Vj| \,\text{Sin}\,(\delta j - \delta i + Yij\,) \;, i = J \quad \text{(II. 29)}$$

Sous matrice J_2 :

$$\frac{\partial Pi}{\partial|Vi|} = |Yij||Vj| \;\; \text{Cos}\,(\delta j - \delta i + Yij\,) \;, i \neq J \quad \text{(II. 30)}$$

$$\frac{\partial Pi}{\partial|Vi|} = 2|Vi||Yij| \,\text{Cos}\,(\,Yij\,) + \sum_{j=1,i\neq j}^{N} |Yij||Vj| \,\text{Cos}\,(\delta j - \delta i + Yij\,) \;, i = J \quad \text{(II. 31)}$$

Sous matrice J_3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |Yij||Vi||Vj| \;\; \text{Cos}\,(\delta j - \delta i + Yij\,) \quad , i \neq J \quad \text{(II. 32)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1,i\neq j}^{N} |Yij||Vi||Vj| \,\text{Cos}\,(\delta j - \delta i + Yij\,) \;, i = J \quad \text{(II. 33)}$$

Sous matrice J_4 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Yij||Vj| \;\; \text{Sin}\,(\delta j - \delta i + Yij\,) \quad , i \neq J \quad \text{(II. 34)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{j=1,i\neq j}^{N} |Yij||Vj| \,\text{Sin}(\delta j - \delta i + Yij\,) - 2|Vi||Yij| \,\text{Sin}\,(\,Yij\,) \;, i = J \quad \text{(II. 35)}$$

II.3.3.1. Méthode découplée rapide (fast decoupled load flow) :

La méthode de Newton–Raphson converge localement, c'est-à-dire que le point de départ de l'algorithme $V_i^{(0)}$ et $S_i^{(0)}$ doit se trouver suffisamment proche de la solution. Son intérêt réside dans sa grande précision et sa vitesse de convergence qui est quadratique. Par contre, le calcul du Jacobien et sa factorisation à chaque itération peuvent demander un temps important sur ordinateur. Diverses techniques ont été mises en œuvre pour réduire cet inconvénient. L'une de ces approches largement utilisées, connue sous le nom de méthode découplée rapide, a été proposée par Stott et Alsac en 1974 [9].

Cette méthode est extrêmement rapide, puisqu'elle réduit considérablement les efforts de calcul, sans pour autant affecter la précision de calcul. elle est une variante simplifiée de Newton–Raphson, et elle est basée sur quelques approximations qui sont souvent valides sur le plan pratique. En pratique, les puissances actives dépendent peu des modules des tensions et les puissances réactives dépendent peu des phases des tensions. Ceci est d'autant plus vrai que les phases restent petites (réseau peu chargé), et les rapports $\frac{\mathbf{Y_{km}}}{\mathbf{X_{km}}}$ faibles (réseaux à haute tension). Ce que réduit les dérivées à :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = -|V_i||V_k|\,|Y_{ik}| \qquad (II.36)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\frac{\partial |V_k|}{\partial |V_k|}} = -|V_i||V_k|\,|Y_{ik}| \qquad (II.37)$$

Si on exprimé les équations de réajustement de l'écoulement de puissance comme suivant :

$$\partial P_i = \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k}\right)\,\Delta\delta_k \qquad (II.38)$$

$$\partial Q_i = \left[\frac{\partial Q_i}{\frac{\partial |V_k|}{\partial |V_k|}}\right]\frac{\Delta |V_k|}{\partial |V_k|} \qquad (II.39)$$

Puis en substituant L'Eq (I.36) dans L'Eq (I.38), et L'Eq (I.37) dans L'Eq (I.39), on aura :

$$\partial P_i = -|V_i||V_k|\,|Y_{ik}|\,\Delta\delta_k \qquad (II.40)$$

$$\partial Q_i = -|V_i||V_k|\,|Y_{ik}|\,\frac{\Delta|V_k|}{\partial|V_k|} \qquad (II.41)$$

Une simplification supplémentaire peut être alors faite comme suivant :

- On divise L'Eq (II. 40) et L'Eq (II. 41) par $|V_i|$
- On suppose que $|V_k| \cong 1$ dans L'Eq (II. 40)

Il en résulte :

$$\partial P_i = -\,|Y_{ik}|\,\Delta\delta_k \qquad (II.42)$$

$$\partial Q_i = -\,|Y_{ik}|\,\Delta|V_k| \qquad (II.43)$$

On exprimé L'Eq (II. 42) et L'Eq (II. 43) avec deux équation matricielle :

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{|V_1|} \\ \frac{\Delta P_2}{|V_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{11} & -Y_{12} & \cdots \\ -Y_{21} & -Y_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \vdots \\ \end{bmatrix} \qquad (II.44)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_1}{|V_1|} \\ \frac{\Delta Q_2}{|V_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{11} & -Y_{12} & \cdots \\ -Y_{21} & -Y_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta|V_1| \\ \Delta|V_2| \\ \vdots \\ \end{bmatrix} \qquad (II.45)$$

Il faut noter que deux équations (II. 44) et (II. 45) sont en fonction de même matrice. Ces deux matrices seront différentes avec les simplifications suivantes [10] :

1) On simplifié la relation enter ΔP et $\Delta\delta$ dans L'Eq (II. 44) comme suivant :
   - Supposer que $r_{ik} << x_{ik}$ cela va changer -Y_{ik} à $\frac{1}{x_{ik}}$;
   - Négligé tout les réactances shuntées à la terre ;
   - Négligé tout les shunts avec la terre qui résultent des autotransformateurs ;
2) On simplifié la relation enter ΔQ et $\Delta|V|$ dans L'Eq (II. 45) comme suivant :

- Négligé tout effets de transformateurs déphaseurs ;

Les équations simplifiées sont :

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{|V_1|} \\ \frac{\Delta P_2}{|V_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = [Y'] \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{(II. 46)}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_1}{|V_1|} \\ \frac{\Delta Q_2}{|V_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = [Y''] \begin{bmatrix} \Delta|V_1| \\ \Delta|V_2| \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{(II. 47)}$$

Les éléments de matrice Y' et Y'' sont

$$Y'_{ik} = \begin{cases} \frac{1}{x_{ik}} & \text{supposant une branche entre les noeuds iet k ;} \\ 0 & \textit{pas des branche entre les noeuds i et k ;} \end{cases}$$

$$Y'_{ii} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{x_{ik}} \quad \text{(II. 48)}$$

$$Y''_{ik} = -Y_{ik} = -\frac{x_{ik}}{r^2_{ik} + x^2_{ik}} \quad \text{(II. 49)}$$

$$Y''_{ii} = \sum_{k=1}^{n} -Y_{ik} \quad \text{(II. 50)}$$

II.4.Conclusion :

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 : Puissance (Active et Réactive) Tension (Module et Angle). Parmi les méthodes de résolution, on a choisi la méthode de GAUSS-SEIDEL, la methode de NEWTON-RAPHSON et la methode DECOUPLEE RAPIDE.Cette dernière a été appliquée dans différents réseaux avec et sans incorporation des dispositifs FACTS [11].

III.1. Introduction :

Les dispositifs FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems)* peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par *Electric Power Research Institute* (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor GTO. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

Des études et des réalisations pratiques ont mis en évidence l'énorme potentiel des dispositifs FACTS. Avec leur capacité à modifier l'impédance apparente d'une ligne de transport, ils peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active que celui de la puissance réactive et de la tension. En régime permanent, les FACTS permettent d'utiliser les lignes plus prés de leur limite thermique en repoussant les limitations liées à la stabilité. Leur vitesse de commande élevée leur confère également un grand nombre d'avantages en régime transitoire ainsi qu'en cas de court-circuit. De manière générale, les dispositifs FACTS agissent en fournissant ou en absorbant de la puissance réactive, en augmentant ou en réduisant la tension aux nœuds, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les phases des tensions.

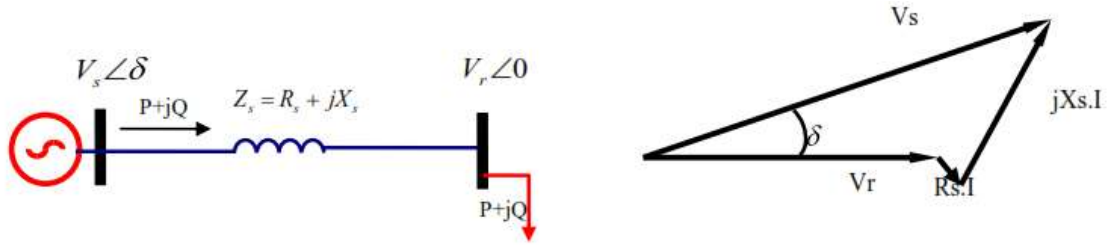
Un autre avantage des équipements FACTS réside dans le fait que cette technologie autorise une extension des limites du réseau d'une manière échelonnée en installant les FACTS pas à pas lorsqu'ils deviennent nécessaires. Il est ainsi possible de répartir les investissements dans le temps. De plus, avec les FACTS de la dernière génération**,** il est possible de déplacer une installation en l'espace de quelques mois, si les conditions d'exploitation venaient à changer en rendant le dispositif inutile dans son emplacement initial.

Plusieurs types de FACTS avec des architectures et des technologies différents, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (Static *Var Compensator*), le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), le STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), et l'UPFC (*Unified Power Flow Controller*). Chacun de ces dispositifs

possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. Le choix du dispositif approprié est donc essentiel et dépend des objectifs à atteindre. La position de l'installation dans le réseau est également un paramètre important pour son efficacité. Lorsque plusieurs dispositifs sont insérés dans un réseau, il convient que leurs effets soient coordonnés afin qu'ils n'agissent pas de façon opposée. Dans ce cas, la stratégie de contrôle revêt une importance toute particulière [12].

III.2.1. Puissance transmise par une ligne électrique :

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de L'angle de charge δ. Les puissances transmises par une ligne électrique radiale sont données par les formule qui suivent: Considérant la figure Fig. III.1 qui représente une ligne électrique alimentant une charge **(P+JQ)** en admettant que la résistance de la ligne est très faible vis-à-vis sa la réactance l'impédance donc: (Z_s = j X_s)



(a) schéma monophasé d'une ligne de transport (b) diagramme des tensions

Fig. III.1 ligne électrique alimentant une charge

En prenant la tension à la borne de la charge comme référence des phases Fig. III.1.(b) et en négligeant la résistance Rs, le courant sera en phase avec Vr, La puissance demandée par la charge sera donnée par les équations qui suivent: (S_r = P + JQ = V_r * I_r^* **;** avec $I_r = \frac{V_s - V_r}{Z_s}$)

$$P = \frac{V_s * V_r}{X_s} \sin\delta \qquad \text{(III.1)}$$

$$Q = \frac{V_s * V_r}{X_s} \cos\delta - \frac{{V_r}^2}{X_s} \qquad \text{(III.2)}$$

La relation entre la tension au jeu de barre de charge et le courant de charge I est décrite par la droite de Fig. III.2 appelée ligne de charge du système qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par Vs et de pente -Zs : $V_s - V_r = Z_s * I \Rightarrow V_r = Z_s * I + V_s$,

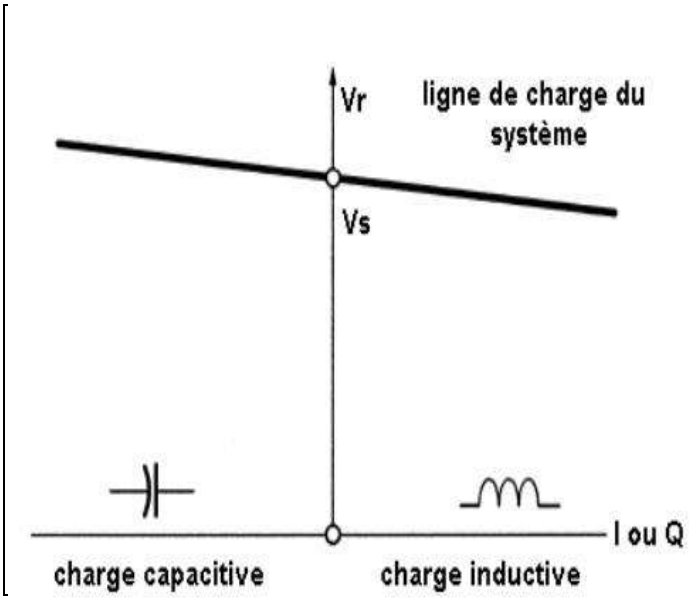


Fig. III.2 ligne de charge du système

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

Si la charge varie et aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension Vr égale à Vs alors depuis le diagramme de phase de la figure Fig.III.1 (b) : ($V_s = V_r \cos\delta$)

En remplaçant dans l'équation (III.1) en aura :

$$P = \frac{{V_s}^2}{X_s} \sin\delta * \cos\delta = \frac{{V_s}^2}{2X_s} \sin 2\delta \qquad \text{(III.3)}$$

Dans ce cas en ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle $\delta = 45^0$

Égale à :

$$P_{max} = \frac{{V_s}^2}{2X_s} \qquad \text{(III.4)}$$

Dans le cas où on maintient la tension Vr égale à Vs on peut avoir, depuis l'équation (III.1), une puissance maximale :

$$P_{max} = \frac{{V_s}^2}{X_s} \qquad \text{(III.5)}$$

III.2.2. La chute de tension :

La circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse au bout de ligne que son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante. La chute de tension ΔV ،à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure. III.1 (b) est donnée par la formulation suivante:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = Z * I \qquad \text{(III.6)}$$

La relation vectorielle s'écrite alors :

$$\bar{V_1} = \bar{V_2} + R\,\bar{I} + jL\omega\,\bar{I} = \bar{V_2} + R\,\bar{I} + jX\,\bar{I} \qquad \text{(III.7)}$$

Par projection selon les axes horizontal et vertical, nous obtenons deux équations réelles :

$$V_1 * \cos\delta = V_2 + RI\cos\varphi + XI\sin\varphi \qquad \text{(III.8)}$$

$$V_2 * \sin\delta = -RI\sin\varphi + XI\sin\varphi \qquad \text{(III.9)}$$

En élevant au carré puis en sommant ces deux expressions, nous obtenons :

$$V_1{}^2 = V_2{}^2 + R^2 I^2 + X^2 I^2 + 2(R\,V_2\,I\cos\varphi + X\,V_2\,I\sin\varphi) \qquad \text{(III.10)}$$

Il est possible alors de remplacer les différents termes de cette expression en faisant intervenir les puissances :

Avec : $P = V_2\,I\cos\varphi \equiv$ la puissance active monophasée consommée par la charge

$Q = V_2\,I\sin\varphi$, la puissance réactive monophasée appelée par la charge, $P_j = R\,I^2$ les pertes dans la ligne par effet Joule, $Q_L = X\,I^2$ la puissance réactive consommée par la réactance de ligne, il vient

$$V_1{}^2 - V_2{}^2 = R\,P_j + X\,Q_L + 2\,(RP + XQ) \qquad \text{(III.11)}$$

$$(V_1 - V_2)\,(V_1 + V_2) = R\,P_j + X\,Q_L + 2\,(RP + XQ) \qquad \text{(III.12)}$$

En notant : $V = V_1 + V_2/2$ et $\Delta V = V_1 - V_2$ *la chute* de tension, nous obtenons :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{1}{2}RP_j + \frac{1}{2}X\,Q_L + RP + XQ}{V^2} \qquad \text{(III. 13)}$$

Dans un réseau de transport d'énergie bien dimensionné, les pertes par effet Joule dans les lignes représentent habituellement quelques pour-cent de la puissance totale transitée. Si l'on considère un cas où la consommation de puissance réactive de la ligne par rapport à la puissance transitée est faible, nous obtenons la relation simplifiée suivante :

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{RP + XQ}{V^2} \qquad \text{(III. 14)}$$

III.2.3. Pertes actives :

Les pertes de puissance active sont calculées d'après la formule :

$$\Delta P = 3\,\mathrm{RI}^2 \qquad \text{(III.15)}$$

Le courant qui circule dans cet élément est :

$$\mathrm{I} = \underline{S/\sqrt{3}\,\mathrm{U}} \qquad \text{(III.16)}$$

$$\Delta U = \frac{R\,.\,(P^2 + Q^2}{(U^e)^2} = \frac{R\,.\,P^2\,\left(1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2\right)}{(U^e)^2} \Rightarrow \Delta P = \frac{R\,.\,P^2\,(1 + tg^2\,\varphi}{(U^e)^2} \qquad \text{(III. 17)}$$

φ: Angle de déphasage entre la puissance active et la puissance apparente, alors :

$$\mathrm{tg}\ \varphi = \mathrm{Q/P}$$

Remarque : le transit de puissance réactive entraîne une augmentation des pertes actives.

III.2.4. La compensation :

Le réseau électrique à pour but de véhiculer la puissance depuis la source jusqu'aux centres de consommation dans un réseau à courant alternatif. La puissance apparente **S** à deux composantes : La puissance active P et la puissance reactive Q liées par le déphasage.

$$\mathrm{S = P + JQ = UI\,[\cos\varphi + j\sin\varphi]} \qquad \text{(III.18)}$$

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

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{\mathrm{RP + XQ}}{V^2} \qquad \text{(III. 19)}$$

La répartition des moyens de production d'énergie réactive (alternateurs, bancs de condensateurs ou compensateurs statiques) à proximité des zones de consommation contribue donc à maintenir la tension constante sur le réseau. Il est à noter que les solutions peuvent reposer sur des moyens de compensation de puissance réactive

statiques (bancs de condensateurs, bancs de bobines) ou dynamiques (alternateurs, FACTS) [13].

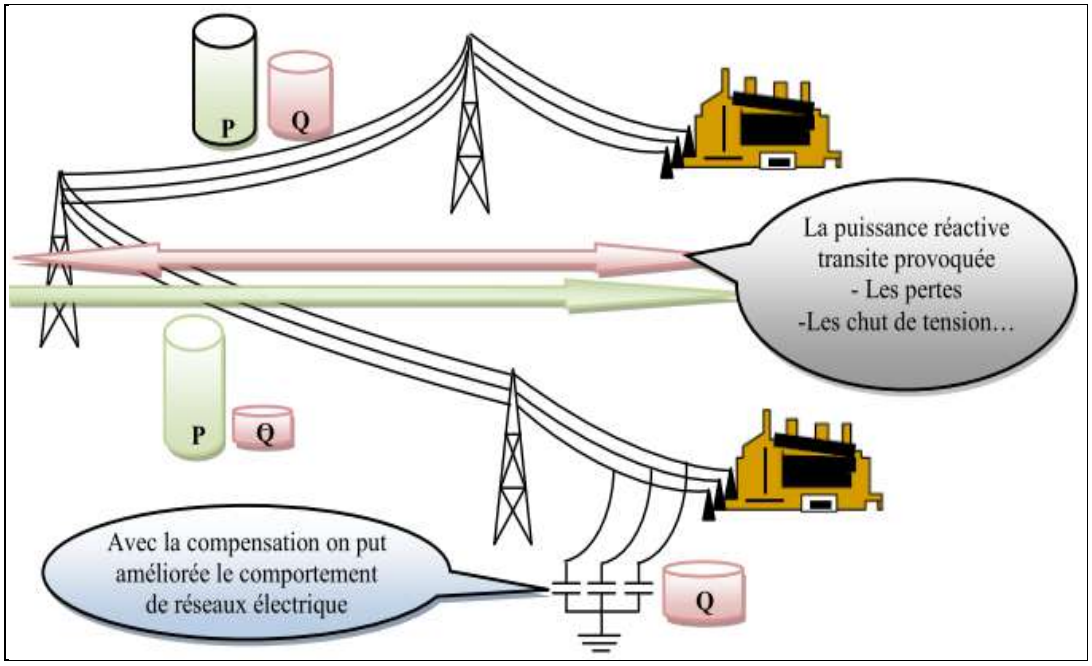


Figure. III.3 : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.

III.2.4.1. Principe de la compensation shunts :

On insère maintenant au milieu de la ligne un compensateur d'énergie réactive idéal. Ce dispositif permet de maintenir la tension V_m à la tension V_s , en contrôlant le flux de puissance réactive (Figure. III.4). En effet, la chute de la tension à travers une ligne est donnée par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne.

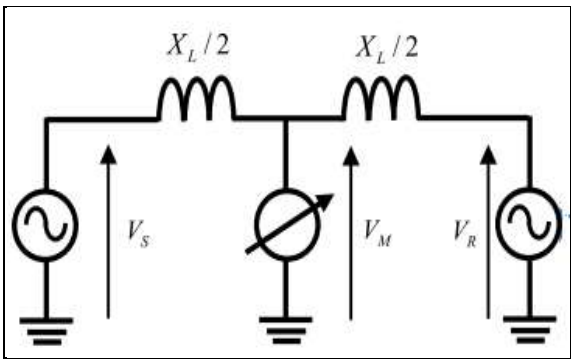


Figure. III.4: Principe de compensation Shunts

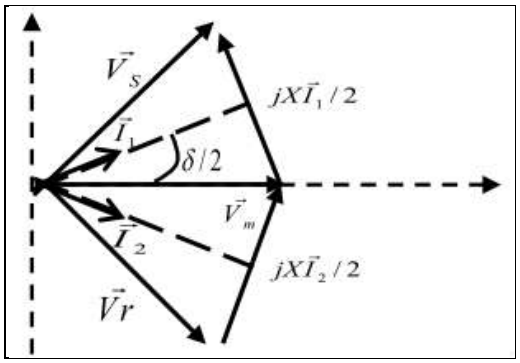


Figure. III.5: Diagramme vectoriel de Compensation Shunts

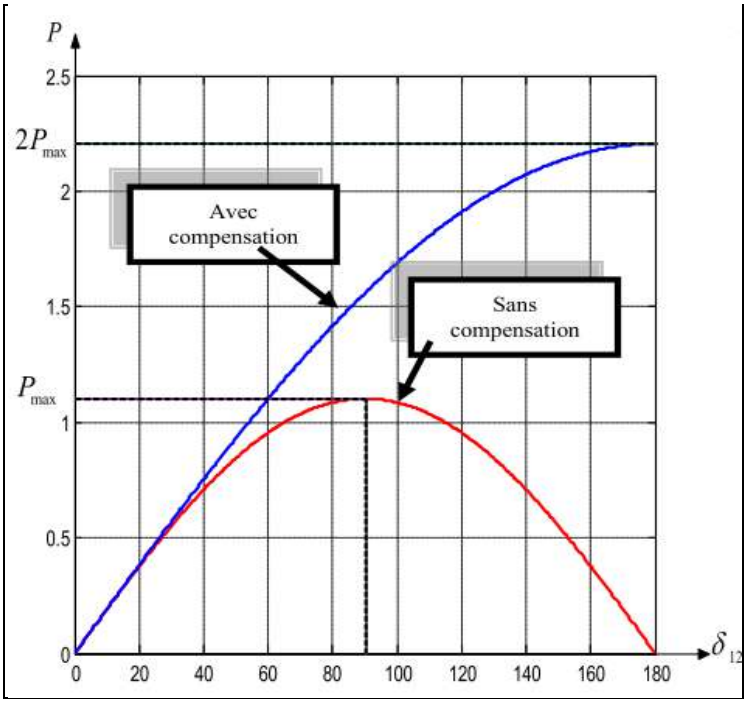


Figure. III.6: Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission

$$\Delta V = \frac{X_L \ Q}{V} \qquad \text{(III. 20)}$$

L'équation (III.21) donne l'expression de la puissance transmise par la ligne compensée. On remarque que la puissance maximale transitée est doublée et est obtenue pour un déphasage .$\delta_{12} = 180^0$ (Figure. III.6). Une compensation shunts permette donc de doubler le transit de Puissance maximal d'une ligne par la formule :

$$P = \frac{2\,V^2}{X_L} \sin\frac{\delta_{12}}{2} \qquad \text{(III. 21)}$$

III.2.4.2. Principe de la compensation séries :

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance capacitive sur la ligne toujours dans le but d'augmenter la puissance transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductive, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance en ajoutant une réactance de type capacitive .En conservant le même modèle de ligne. On obtient la compensation série donnée par la (Figure. III.7)

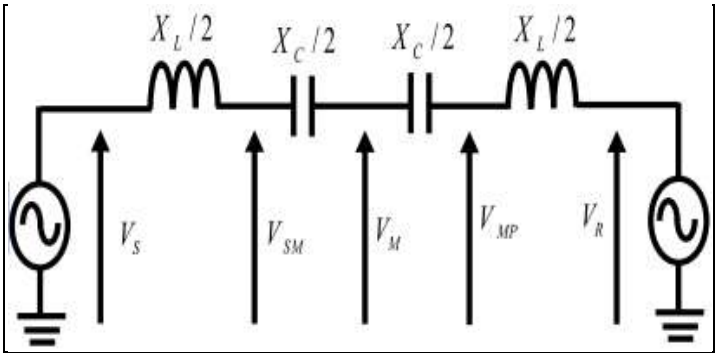


Figure. III.7 : Principe de compensation série

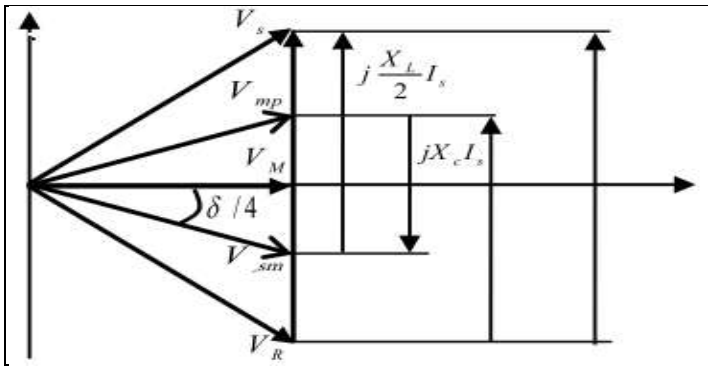


Figure. III.8: Diagramme vectoriel de compensation série

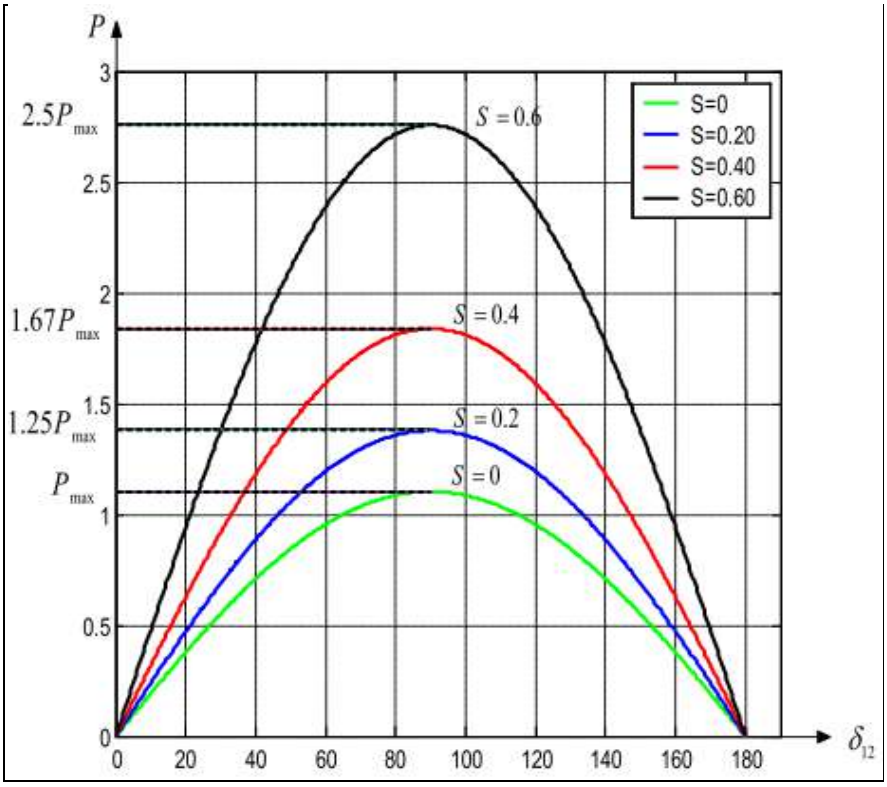


Figure. III.9 : Courbe de puissance avec et sans compensation

Une modification de X_L augmentera ou diminuera le flux de puissance active pour un angle de phase fixe. De même, la puissance réactive sera modifiée suite à une modification de X_L la réactance introduite aura la valeur X_c , donnée par l'équation $X_c = 2X_L$, S est le degré de compensation y compris entre $0 \leq S \leq 1$. Avec ce type de compensation, les condensateurs doivent échanger de l'énergie réactive en quantité importante. Les propriétés sont similaires à celles des compensateurs d'énergie réactive .

III.2.5. Moyens de compensation réactive :

Il existe plusieurs catégories de dispositifs de production de puissance réactive : compensateurs synchrones, les bancs de condensateurs et les compensateurs statiques de puissance réactive.

III.2.5.1. Compensateurs synchrones :

Les compensateurs synchrones sont des alternateurs synchrones connectés au réseau,qui sont pas entraînés par une turbine et ne fournissent donc pas de puissance active. Comme ils Fonctionnent en moteur, ils consomment la puissance active correspondant à la compensation de ces pertes mécaniques et électriques. A l'instar des générateurs synchrones, leur courant d'excitation est réglable, permettant ainsi de contrôler la tension à leur nœud de connexion.

III.2.5.2. Bancs de condensateurs :

Les bancs de condensateurs sont des dispositifs statiques de compensation de puissance réactive. Leur connexion sur les systèmes énergétiques permet d'injecter de la puissance réactive. Néanmoins leur fonctionnement en tout ou rien ne permet pas un pilotage de la tension, même s'ils peuvent être connectés par gradins. Les connexions ou déconnexions de condensateurs entraînent une diminution de leur durée de vie.

Un inconvénient supplémentaire de ces dispositifs est que la puissance réactive générée diminue avec le carré de la tension ; en effet la Puissance réactive générée par un banc de condensateur triphasé de capacité par phase C sous la tension composée U vaut Q c= - C w U². Une tension basse diminue l'efficacité du condensateur alors qu'il est nécessaire d'injecter plus de puissance réactive. Un autre paramètre important à

prendre en compte pour les bancs de condensateur est le niveau de tension auxquels ils sont connectés. Le coût de ces appareils dépend en partie de la qualité du diélectrique utilisé. Les condensateurs sont plus économiques pour des niveaux de tension de l'ordre de 20 kV, c'est-à-dire adaptés aux réseaux de distribution.

III.2.5.3. Compensateurs statiques de puissance réactive :

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

Tableau III.1. Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive.

Contrôles par génération de la puissance réactive					
	Ajustable en Continue	Capacité	Inducteur	Réponse rapide	Contrôl local
Générateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui, dépend du System d'excitation	Oui
Condensateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Batteries de condensateurs	Non, plusieurs gradins. (discret)	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Oui
Réactances	Non, (discret) Généralement une ou deux unités par ligne	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	Oui

III.3. Les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif :

Avec le développement rapide de l'électronique de puissance, les Systèmes Flexibles de Transport AC ont été crées et implémentés dans les réseaux électriques [14]. Les FACTS peuvent être utilisés pour contrôler l'écoulement de puissance et améliorer la stabilité du système. Particulièrement, avec le nouveau système de dérégulation du marché de l'énergie, il y a une augmentation de l'intérêt accordé aux FACTS dans l'exploitation et le contrôle des réseaux électriques et ceci est dû aux nouvelles contraintes de charge et aux nouvelles contingences. L'installation des FACTS est devenue indispensable pour augmenter la capacité et la contrôlabilité d'un réseau électrique.

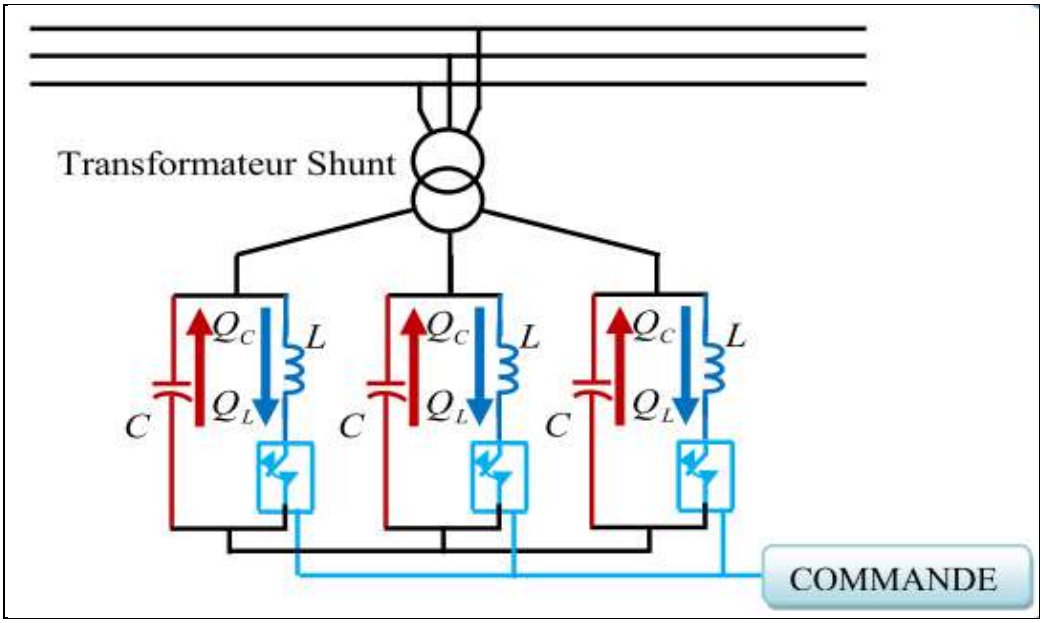


Figure. III.10: Schéma de principe d'un FACTS

III.3.1. Définition :

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante :Système de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basées sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau .Avec leurs aptitudes de modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS ne

peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport. En revanche, ils permettent d'utiliser les lignes plus proches de leurs limites en repoussant d'autres limitations, en particulier celles liées à la stabilité .Finalement, 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.

III.3.2. Les différents types des systèmes FACTS :

Le tableau de la figure III.11 représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitues de composant de base RLC et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécaniques. Les dispositifs FACTS continents également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

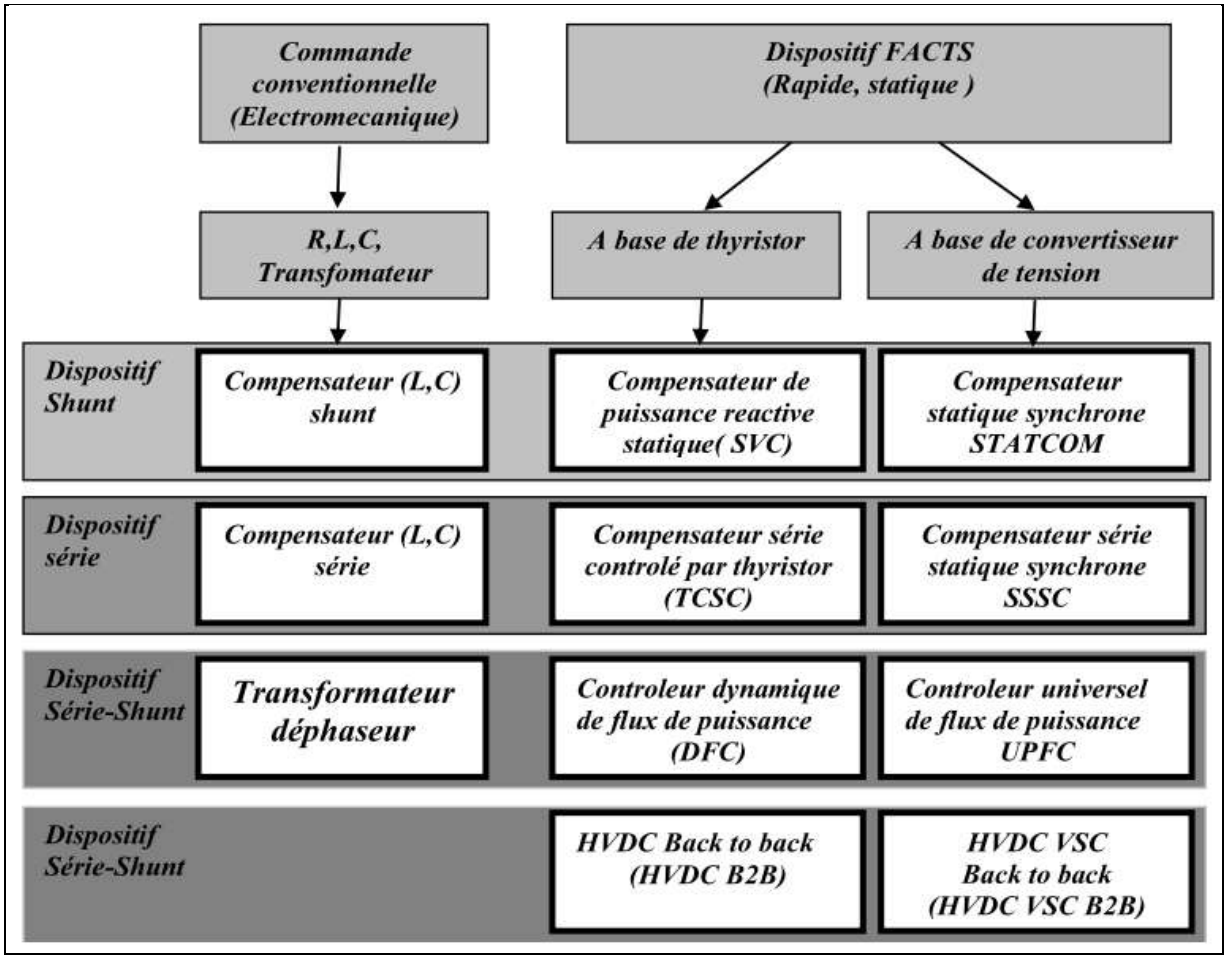


Fig. III.11.Principaux Dispositifs FACTS.

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI (Modulation de largeur d'impulsion) sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs. Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau, en général les FACTS sont devisé en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries**: ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission.
- **Compensateurs shunts**: Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont concu principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquence contrôler la tension des nœuds.
- **Compensateurs hybrides série-shunt**: c'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

III.3.3. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ofrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résulte par l'habilité des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équation (III.22) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que les impédances séries, impédances shunts, courant , tension angle de phase.

$$P = \frac{V_r\, V_s}{X} \sin \delta \qquad \text{(III.22)}$$

Par cette action les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir plusieurs bénéfices :

- contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. ce contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- L'amélioration de la stabilité transitoire et atténuation des oscillations.
- stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquence réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité de l'énergie.

III.4. Structure des Principaux Dispositifs FACTS:

II.4.1. Dispositifs de compensation dynamique shunts :

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de

raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne .

III.4.1.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC) *:*

III.4.1.1.1. Définition :

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. La puissance réactive d'un compensateur statique peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension.

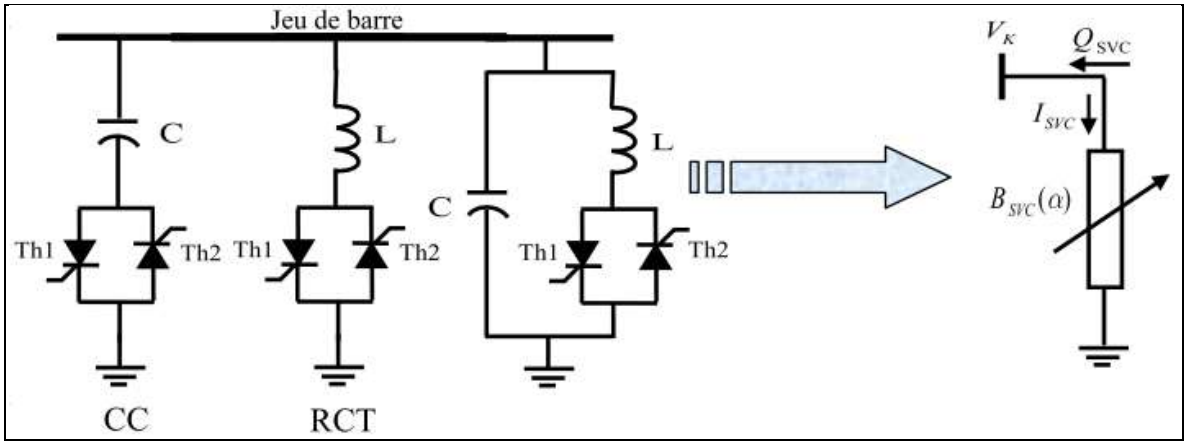


Figure. III.12: Modèle mathématique de SVC

III.4.1.2.1. Principe de fonctionnement :

La figure. III.13 donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive X_c et d'une bobine d'inductance avec la réactance X_L .

Ce système utilise l'angle d'amorçage α des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est

rapide et d'une façon continue .Le RCT ne peut absorbée que de l'énergie réactive, puisque il est constitue d'élément inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau).

Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies. Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés pour éliminer les harmoniques de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif à été installé en 1979 en Afrique du Sud.

La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure. III.13 Trois zone sont distinctes :

- Pour $V_{min} \leq V \leq V_{max}$: est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.

- Pour $V > V_{max}$: est une zone où le RCT donne son énergie maximale (bute de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V < V_{min}$: est une zone où les seules capacités sont connectées au réseau.

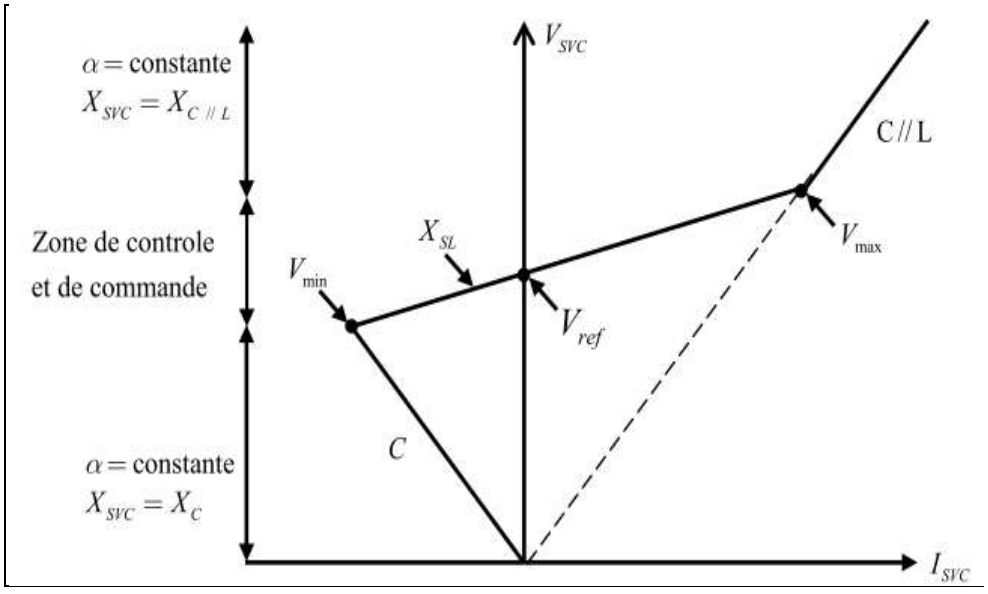


Figure. III.13: Fonctionnement du compensateur statique

Le SVC présente plusieurs avantages :

- ❖ Stabiliser la tension dans les systèmes faibles.
- ❖ Réduire les pertes de transmission.
- ❖ Augmenter la capacité de transmission.
- ❖ augmenter la limite de stabilité.
- ❖ Améliorer la commande et la stabilité de tension.
- ❖ Atténuer les oscillations de puissance.

III.4.1.2. Le STATCOM (Static Compensator):

III.4.1.2.1. Définition :

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé), ASVC (Advanced Static Var Compensator), SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser). Un STACOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant alternatif contrôlé en phase et en amplitude. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par la figure. III.14.

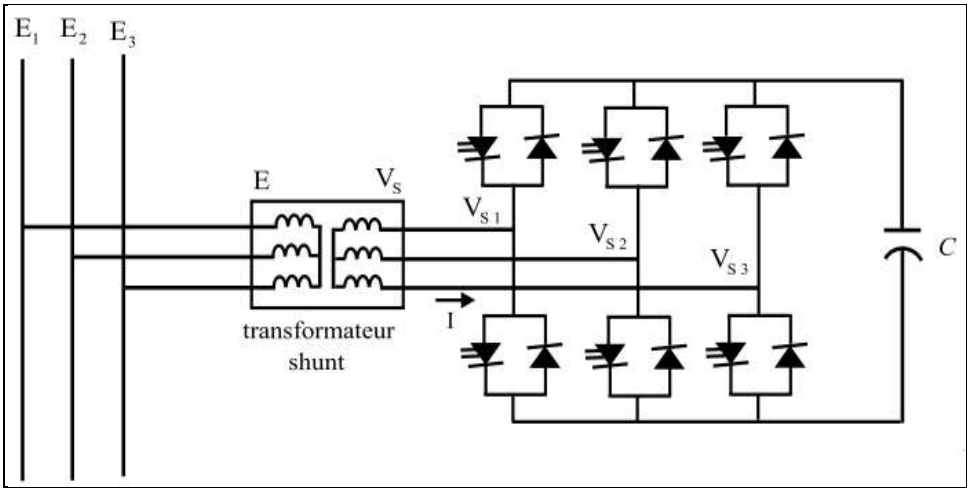


Figure. III.14: Schéma de base du STATCOM [32]

III.4.1.2.2. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir

créées par un groupe tournant. Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est -à –dire formés de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec les réseaux électriques. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_s, laquelle est en phase avec la tension du réseau E.

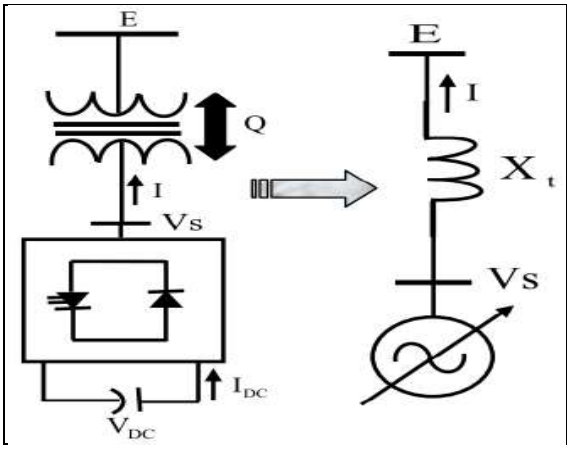


Figure. III.15 : Présentation d'un compensateur

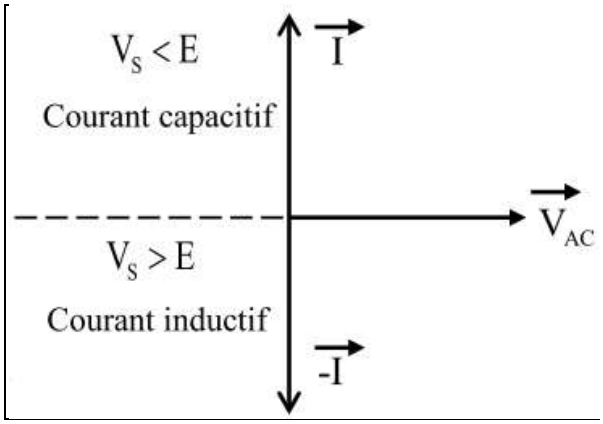


Figure. III.16: Diagramme vectoriel de STATCOM

Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

- Si V_s < E, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de + π /2 par rapport à la tension E ou le courant est capacitif.
- Si V_s < E, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de - π /2 par rapport à la tension E ou le courant est capacitif.

- Si V_s = E, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie. On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrée. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie V_s est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

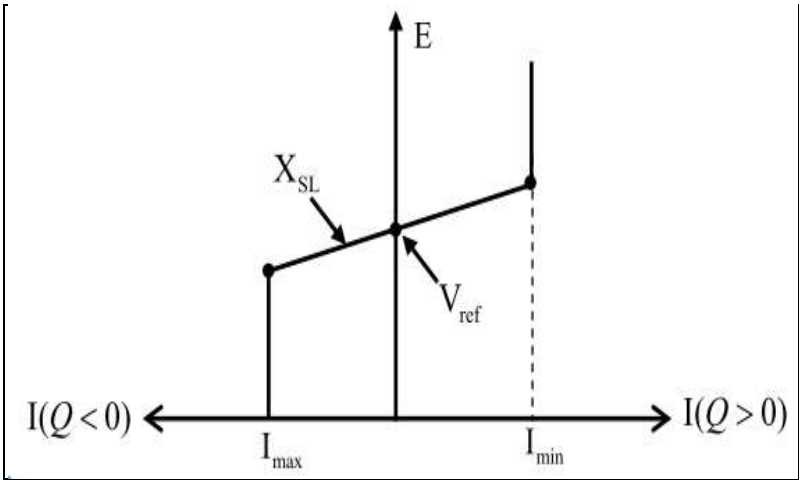


Figure. III.17 : Caractéristique statique du STATCOM.

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
- L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément Pendant les perturbations du système.
- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

III.4.2. Dispositifs de compensation dynamique série :

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

III.4.2.1. La capacité série commande par thyristor (TCSC) :

4.2.1.1. Définition :

La capacité série commande par thyristor (TCSC: Thyristors Controlled Séries Compensator) est constitue d'un : Th1 un dispositif de compensation série, Th2 elle utilise l'électronique de puissance comme élément de base .Elle est connectée en série avec le réseau pour contrôler le transit de puissance, l'amortissement de résonance subsynchrone et des oscillations de puissance. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80 [15].

III.4.2.1.2. Principe de fonctionnement :

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Le TCSC est inséré sur la ligne de transmission (Figure. III.18).

Où X_c : est l'impédance du condensateur du TCSC.

X_L : est l'impédance du l'inductance du TCSC.

X_{line} : est l'impédance de la ligne.

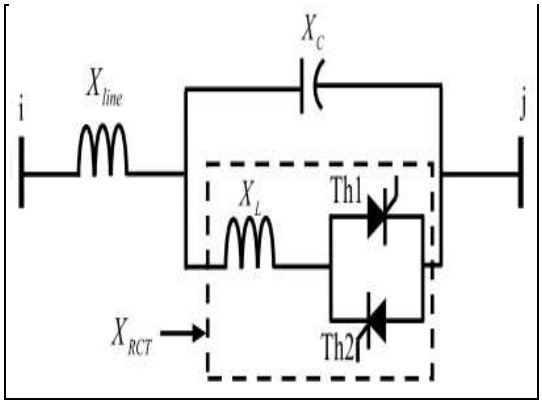


Figure. III.18: Insertion d'un TCSC sur fonction Une ligne

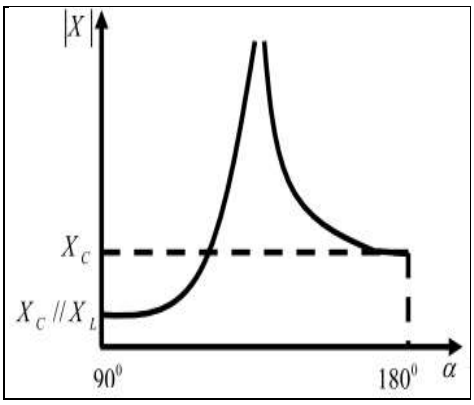


Figure. III.19: Impédance du TCSC en de l'angle

Le TCSC a une réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relier a travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de 180 degrés, le réacteur devient non condensateur et le condensateur en série a sa impédance normale. Pendant que l'angle est avancé de 180 degrés, l'impédance

capacitive augmentée. A l'autre extrémité, quand l'angle d'amorçage de RCT est de 90 degrés, le réacteur devient entièrement condensateur, et toute impédance devienne inductive, par ce que l'impédance du réacteur est conçue pour être beaucoup inférieure au condensateur en série impédance. Avec 90 degré, le TCSC aide en limitant le courant de défaut.

Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôlés du réacteur comme limiteur de courant de défaut. Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

a) Mode hors circuit : les thyristors sont en pleine conduction.

b) Mode bloqué : les thyristors sont bloqués.

c) Mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage et donc le TCSC a une réactance contrôlable dans les régions inductives et capacitives. Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de 90^0 jusqu'à une valeur maximale dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif. Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont :

- Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.
- Réduction des risques de résonance hypo-synchrone.

III.4.2.2. Compensateur statique série synchrone (SSSC) :

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Figure. III.20).

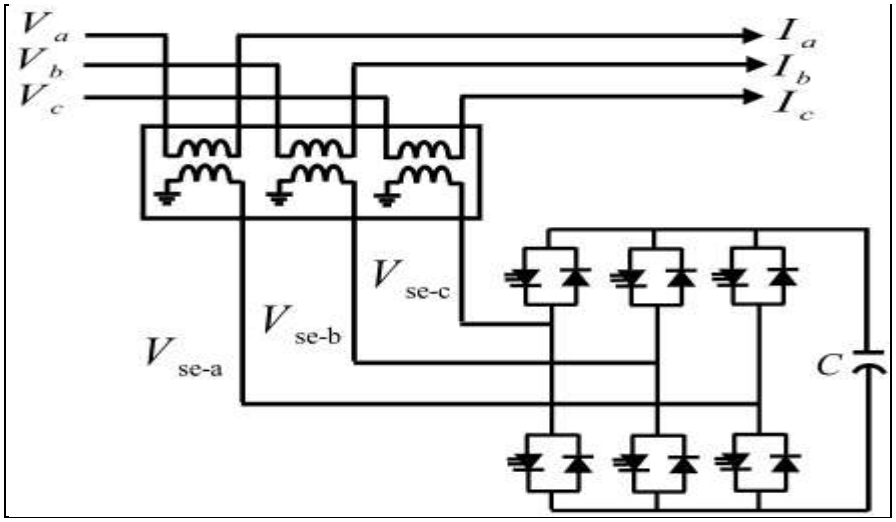


Figure. III.20 : Schéma de base du SSSC

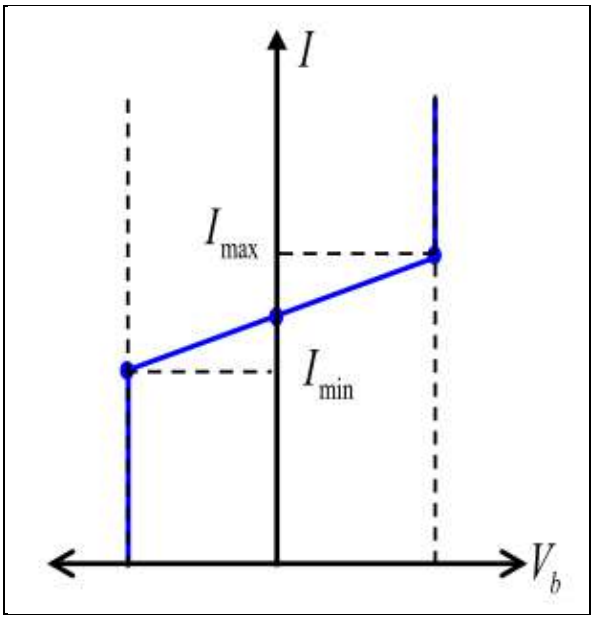


Figure. III.21 : Statique du SSSC

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau. La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure. III.21

III.5. Modélisation des dispositifs FACTS :

Différentes façons de modéliser les dispositifs FACTS ont été développées pour l'étude des régimes stationnaires. Elles se différencier principalement par la méthode utilisée pour intégrer les FACTS dans le calcul du l'écoulement de puissance. Les trois modélisations rencontrées le plus souvent dans la littérature sont basées respectivement sur l'injection de puissance équivalente, la création d'un nœud fictif ou encore la modification de la matrice d'admittance. Ces trois techniques sont présentées aux paragraphes suivants.

III.5.1. Injection de puissance aux extrémités de la ligne :

Une des méthodes les plus répandues consiste à représenter les dispositifs FACTS sous forme d'injections de puissances aux nœuds telles que représentées à la figure.III.22.Le principe consiste à remplacer l'effet dû au dispositif FACTS sur les transits de puissances dans la ligne (Figure. III.22 (a)), par des injections de puissances aux deux extrémités (Figure. III.22 (b)). Celles-ci sont calculées de manière à ce que l'effet produit soit équivalent à celui du dispositif en question.Les injections de puissances active et réactive au nœud i sont données par :

$$P_i^F = P_{ij} - P_{ij}^F \quad \text{(III.23)}$$

$$Q_i^F = Q_{ij} - Q_{ij}^F \quad \text{(III.24)}$$

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

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

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

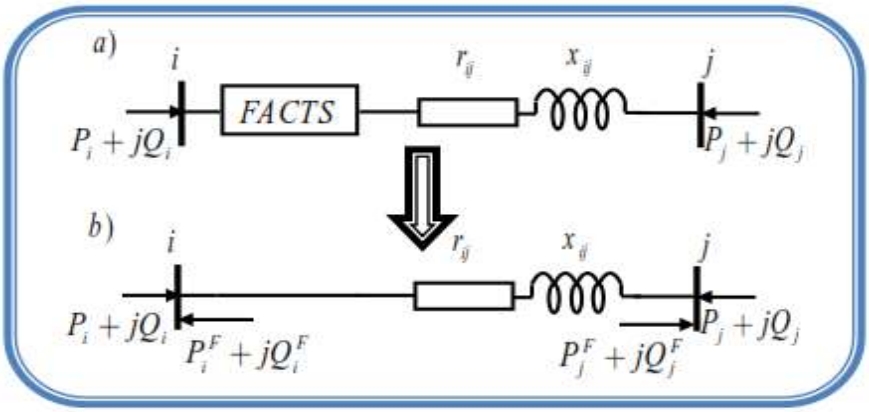


Figure. III.22 : Modélisation par injection de puissances: a) ligne avec FACTS, b) ligne avec injections équivalentes.

Deux relations similaires sont obtenues pour le nœud j. Ces quatre injections équivalentes, ainsi que le modèle standard de la ligne, sont utilisées dans les équations du l'écoulement de puissance. Elles sont traitées comme des charges ou des générations aux nœuds i et j .Les injections de puissances actives aux nœuds *PV* et *PQ* s'écrivent :

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{k=1}^{n} V_j [G_{ij} \cos (\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin (\delta_i - \delta_j)] \qquad \text{(III.25)}$$

Et les puissances réactives injectées aux nœuds PQ valent :

$$Q_i + Q_i^F = - V_i \sum_{k=1}^{n} V_j [G_{ij} \sin (\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \qquad \text{(III.26)}$$

Avec :

N : nombre de nœuds du système.

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

Des variantes de cette modélisation ont été proposées. Dans l'imitateur, un modèle des injections de puissances décomposées est proposé. Les effets des FACTS sur les transits de puissances dans les lignes et ceux sur le contrôle des tensions aux nœuds y sont traités séparément.

III.5.2. Création d'un nœud fictif :

Une modélisation de FACTS basée sur la création d'un nœud fictif est présentée dans .Le modèle d'un dispositif de type UPFC, permettant de contrôler les transits des puissances actives et réactives, est illustré à la figure. III.23.

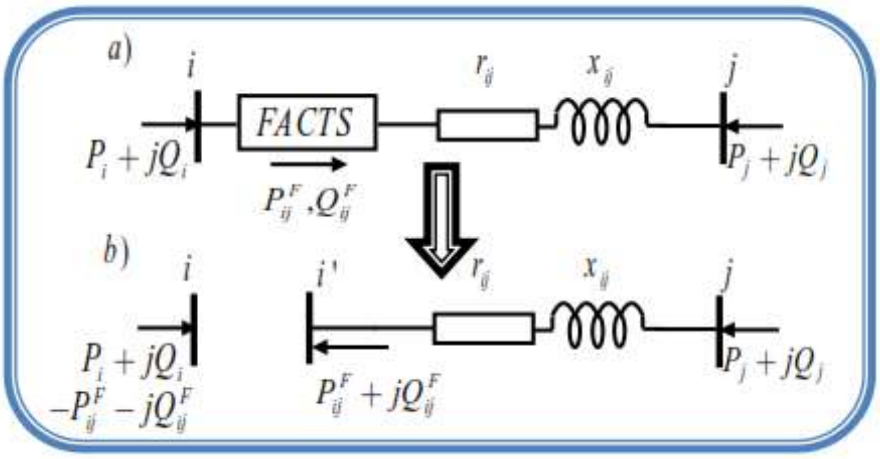


Figure. III.23 : Modélisation avec nœud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente.

Les valeurs de consigne des dispositifs sont directement exprimées en termes de

puissances circulant dans les lignes ou injectées aux nœuds (Figure. III.23 (a)). Un nœud fictif i' dans lequel la ou les puissances contrôlées sont injectées, est temporairement créé. Pour conserver le bilan de puissance, la puissance injectée au nœud i' est soustraite au nœud i (Figure. III.23 (b)). Le nouveau nœud est pris en compte dans le calcul de répartition des puissances en modifiant la structure de la matrice jacobéenne.

III.5.3. Modification de la matrice d'admittance nodale :

Les FACTS sont envisagés comme des éléments venant modifier directement la matrice d'admittance nodale du réseau.Ils sont insérés dans la ligne selon la représentation de la figure III.24. Selon le type de FACTS modélisé, le dispositif peut être placé au milieu ou à une extrémité de la ligne.

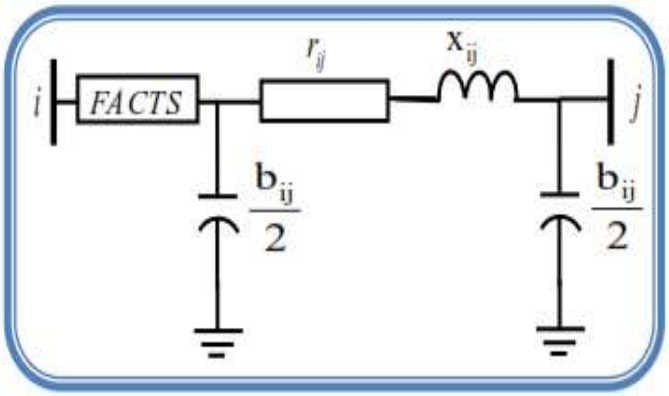


Figure. III. 24 : Intégration du dispositif FACTS dans une ligne.

Les paramètres d'une ligne équivalente sont déterminés et substitués à ceux de la ligne sans FACTS dans la matrice d'admittance nodale. Cette dernière est modifiée de la manière suivante:

$$Y_{mod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix}}_{\text{Ligne}} + \underbrace{\begin{bmatrix} Y^F_{ii} & Y^F_{ij} \\ Y^F_{ji} & Y^F_{jj} \end{bmatrix}}_{\text{FACTS}} \qquad \text{(III.27)}$$

Selon le type de FACTS et sa position dans la ligne, seule une partie des coefficients de la matrice Y subissent des modifications. Différentes méthodes sont possibles pour traiter les valeurs des dispositifs. Elles peuvent être utilisées comme grandeurs d'entrées dans un load flow classique ou alors comme variables à optimiser dans un calcul optimal de répartition des puissances.

III.5.4. Dispositifs FACTS shunt :

Plusieurs modèles de dispositifs FACTS shunt ont été développés, tant pour des

régimes de fonctionnement statique que dynamique. Certains modèles sont spécifiques à un type de dispositif alors que d'autres, plus généraux, sont utilisés pour présenter plusieurs FACTS. Nombreux modèles mathématiques du SVC et du STATCOM en régime permanent ont été proposés dans la littérature,la méthode de la puissance injectée est proposée.Les caractéristiques électriques des équipements sont traduites et remplacées par des puissances injectées. Cette modélisation est appliquée dans notre étude pour le STATCOM. Une autre méthode consiste à modéliser le SVC comme des réactances variables dont valeurs dépendent de l'angle d'amorçage des thyristors [16].

III.5.4.1 Modèle du compensateur statique de puissance réactive (SVC) :

La figure. III.25 représente la modélisation d'un SVC par une admittance shunt variable Y*R* SVC*R* dont la valeur est limitée selon l'équation (III.29). L'énergie réactive fournie (ou absorbée) par le SVC au nœud *i* est donnée par l'équation (III.30).

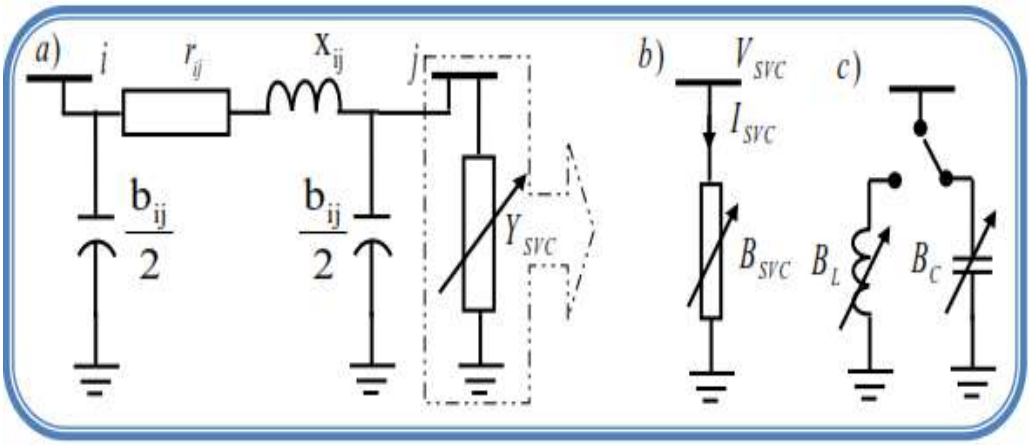


Figure. III.25 : Modélisation d'un SVC : a) SVC placé en un nœud: b) symbole, c) modèle.

$$Y_{SVC} = jB_{SVC} \quad \text{(III.28)}$$

$$B_{SVC}^{min} \leq B_{SVC} \leq B_{SVC}^{max} \quad \text{(III.29)}$$

$$Q_{SVC} = - V_i^2 * B_{SVC} \quad \text{(III.30)}$$

Le signe "moins" indique que le SVC fournit de la puissance réactive au système lorsqu'il est capacitif alors qu'il en consomme lorsqu'il est inductif. La variation de la puissance réactive injectée en fonction de la tension est représentée à la figure. III.26 Pour plusieurs valeurs de compensation

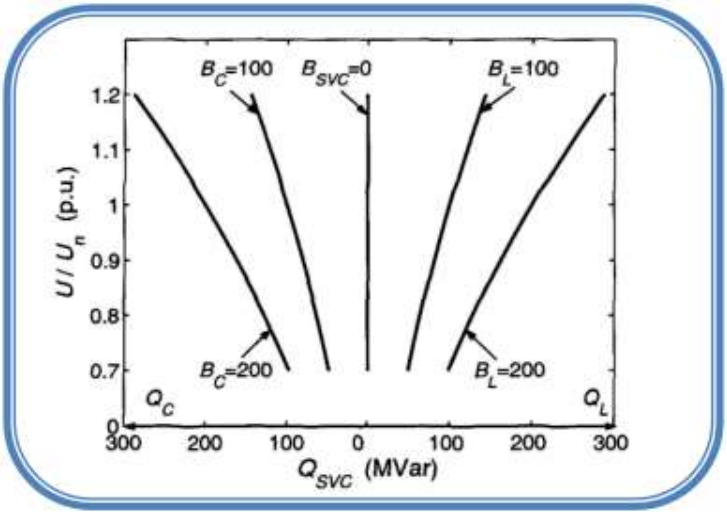


Figure. III.26 : Variation de la puissance réactive absorbée par un SVC en fonction de la tension nodale.

Lorsqu'ils sont connectés aux nœuds du réseau, les SVC sont généralement placés aux endroits où se trouvent des charges importantes ou variant fortement. Ils peuvent également être positionnés à des nœuds où le générateur n'arrive pas à fournir ou absorber suffisamment de puissance réactive pour maintenir le niveau de tension désiré.

Lorsqu'un SVC est présent aux nœuds *j*, seul l'élément Y_{jj} de la matrice d'admittance nodale et modifié, l'admittance du SVC lui étant additionnée :

$$Y'_{jj} = Y_{jj} + Y_{SVC} \qquad \text{(III.31)}$$

Dans ce cas, la matrice d'admittance est modifiée de la manière suivante :

$$Y_{mod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ij} + y_{ij\,0}/2 & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} + y_{SVC} + y_{ij\,0}/2 \end{pmatrix} \qquad \text{(III.32)}$$

III.5.4.2 SVC placé au milieu d'une ligne :

Lorsque le compensateur statique est inséré au milieu d'une ligne, cette dernière est divisée en deux tronçons identiques. Le SVC est relié au nœud médian additionnel m, Pour éviter d'avoir à changer le nombre de nœuds du réseau et donc la taille de la matrice d'admittance, une transformation étoile-triangle permet de réduire le système en supprimant le nœud m et en calculant les paramètres d'une ligne équivalente. La figure.III.27 illustre les étapes pour obtenir cette ligne équivalente.

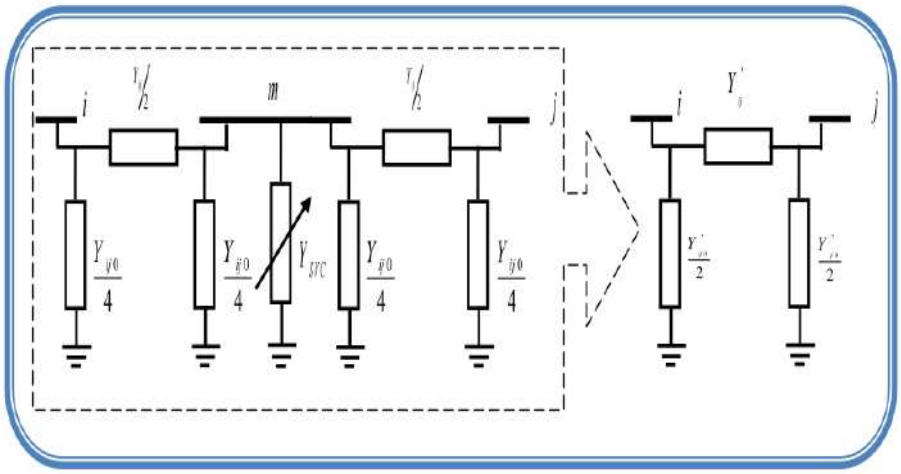


Figure. III.27 : SVC placé en milieu de ligne.

Tous les éléments de la matrice d'admittance d'une ligne avec un SVC en son milieu sont modifiés :

$$Y_{mod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y'_{ij} + y'_{ij\,0}/2 & -y'_{ij} \\ -y'_{ij} & y' + y'_{ij\,0}/2 \end{pmatrix} \qquad \text{(III.33)}$$

III.5.4.3 Modèle du compensateur statique de puissance réactive (STATCOM) :

STATCOM est une deuxième génération de dispositif FACTS. Selon l'IEEE, Le STATCOM est un moyen de compensation dynamique connecté en parallèle au système électrique, il est basé sur l'injection d'un courant AC contrôlé à travers un transformateur de couplage . La structure de base d'un STATCOM ayant le schéma qui est montré par la figure. III.28.

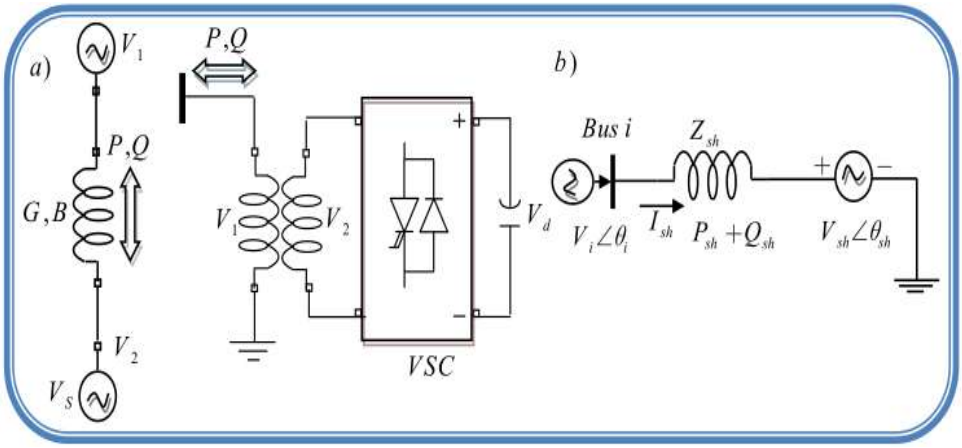


Figure. III.28 : Représentation schématique de STATCOM

En général la tension du STATCOM Vsh est injectée en phase avec la tension Vt de la ligne et dans ce cas il n y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais

seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM.

Le STATCOM a le même rôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif capable de délivrer la puissance réactive même si la tension de jeu de barre de connexion est faible. Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau. Le circuit STATCOM équivalent montré dans (Figure. III.29 (b)) .

La tension de STATCOM est donné par:

$$E_{sh} = V_{sh} (\cos \delta_{sh} + j \sin \delta_{sh}) \quad \text{(III.34)}$$

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$I_{sh} = \frac{V_i - V_i}{jX_i} \quad \text{(III.35)}$$

La puissance transmission entre de deux système peut être représentée par :

La puissance active transmis :

$$P = \frac{V_i\, y_{sh}}{X} \sin (\delta_i - \delta_{sh}) \quad \text{(III.36)}$$

La puissance réactive transmis :

$$Q = \frac{V_i^2}{X} - \frac{V_i\, y_{sh}}{X} \cos (\delta_i - \delta_{sh}) \quad \text{(III.37)}$$

Ou V_i ,V_{sh} est la tension aux nœuds, ($\delta_i - \delta_{sh}$) l'angle entre la tension et X impédance de la ligne. Après l'exécution de quelques opérations complexes, les équations de puissance actives et réactives sont obtenues comme suit:

$$P_{sh} = V_i^2\, g_{sh} - V_i\, V_{sh} (g_{sh} \cos (\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \cos (\theta_i - \theta_{sh})) \quad \text{(III.38)}$$

$$Q_{sh} = - V_i^2\, b_{sh} - V_i\, V_{sh} (g_{sh} \sin (\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \sin (\theta_i - \theta_{sh})) \quad \text{(III.39)}$$

Avec : $$g_{sh} + j\, b_{sh} = 1/Z_{sh} \quad \text{(III.40)}$$

g_{sh} *:* Conductance équivalent du STATCOM. ;

b_{sh} *:* Susceptance équivalent du STATCOM ;

Z_{sh}*:* Impédance équivalent du STATCOM ;

III.5.5 Dispositifs de compensation série :

La compensation série est parmi les meilleures techniques actuellement connue pour accroître la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Les compensateurs série à thyristors utilisés peuvent être de nature capacitive ou inductive. Ils s'apparentent donc à des dispositifs de type TCSC.

III.5.5.1 Modélisation de TCSC :

Les condensateurs séries Ils sont modélisés par des impédances variables insérées en série avec la ligne. Les dispositifs étant considérés comme idéaux, seule la partie réactive de l'impédance est prise en compte. Le modèle est formé de deux branches en parallèles formées respectivement d'une inductance et d'une capacité variable. Pour éviter les phénomènes de résonance, les branches sont enclenchées de manière exclusive à l'aide d'un interrupteur.Le modèle mathématique de TCSC est dans le schéma de la figure. III.29.

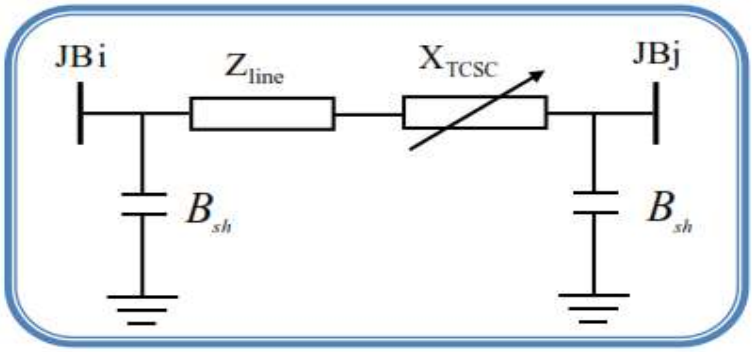


Figure. III.29 : modèle mathématiques e de TCSC

Le TCSC devient analogue à une impédance contrôlable, qui est le résultat de la mise en parallèle de la réactance équivalente d'un composant TCR et une capacité.

$$X_{rcsc}(\alpha) = j\frac{X_c\ X_l}{\frac{X_c}{\pi}(2(\pi-\alpha)+\sin 2\alpha)-X_l} \qquad \text{(III.41)}$$

La figure. III.29 présente l'implantation d'un TCSC dans une ligne électrique. La réactance totale est la somme algébrique de la réactance du TCSC et la réactance réelle de la ligne. Voir l'équation suivant :

$$X_{ij} = X_{line} + X_{TCSC} \qquad \text{(III.42)}$$

Afin d'éviter la surcompensation dans la ligne, la valeur de la réactance *TCSC X* dépend de la valeur de la réactance de la ligne X_{line} ; telle que : Les degrés de compensation maximum sont de 80% en mode capacitif et 20% en mode inductif , La valeur de la réactance du TCSC est donc donnée par :

$$-0.8\ X_{line} \leq X_{TCSC} \leq 0.2\ X_{line} \qquad \text{(III.43)}$$

La matrice d'admittance de la ligne est modifiée de la manière suivante :

$$Y_{mod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y'_{ij} + y'_{ij\,0}/2 & -y'_{ij} \\ -y'_{ij} & y'_{ij} + y'_{ij\,0}/2 \end{pmatrix} \qquad \text{(III.44)}$$

Avec :

$$y'_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + j\,(x_{ij} + x_{TCSC})} \qquad \text{(III.45)}$$

III.5.6 Dispositifs de compensation shunt-série :

Le contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC) permet de contrôler simultanément la tension au nœud ainsi que le transit de puissance active.

III.5.6.1 Modélisation mathématique du compensateur universel 'UPFC' :

Le modèle mathématique de l'UPFC est établi dans le but d'étudier les relations entre le réseau électrique et l'UPFC en régime stationnaire. Le schéma de base est donné sur la figure. III.30. Cette figure représente un schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un UPFC installé dans une ligne de transport. Du point de vu puissance, le fonctionnement de l'UPFC basé sur la compensation shunt et série de la puissance réactive et régulation de l'angle de charge.

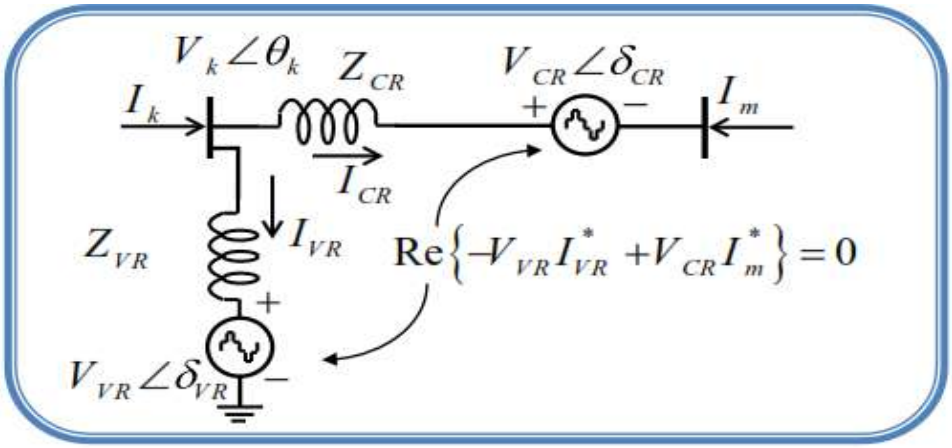


Figure. III.30 : Modèle mathématique de l'UPFC et le système de transmission

Afin de montrer comment les écoulements de puissance en ligne peuvent être affectées et exploité par l'UPFC est placé au début de la ligne de transmission connexion bus k et m, comme indiqué dans la figure. III.30.UPFC est représentée par deux sources de tension idéale est contrôlable les l'amplitude et angle de phase.
La tension de le UPFC donne par :

$$E_{VR} = V_{VR} (\cos \delta_{VR} + j \sin \delta_{VR}) \qquad \text{(III.46)}$$

$$E_{CR} = V_{CR} (\cos \delta_{CR} + j \sin \delta_{CR}) \qquad \text{(III.47)}$$

Avec :

V_{VR} , δ_{CR} sont l'amplitude contrôlable $V_{VR,min} \leq V_{VR} \leq V_{VR,max}$ et l'angle de phase $0 \leq \delta_{VR} \leq 2\pi$ De tension de la source de tension de la partie shunte, V_{VR} , δ_{CR} repesent l'amplitude et l'angle de phase de tension de la partie série .

III.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), ainsi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC, IPFC. Cette classification est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique.Le choix des contrôleurs particuliers cependant, dépend de la condition d'application et de l'exécution désirée. Les débuts d'analyse avec l'étude et les problèmes d'identification de système se sont associés au système existant.Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux [17].

IV.1.Introduction :

Au cours des dernières années, des nombreuses lignes de transmission à travers le monde ont connu une augmentation de puissance transférer en raison d'une demande croissante d'électricité. Tandis que la demande d'électricité augmente considérablement, la construction des lignes électriques supplémentaires sont souvent empêchées a couse des préoccupations environnementales et économique. En conséquence, le contrôle du flux d'énergie électrique dans les réseaux électriques est de venue l'un des facteurs principaux dans le développement des systèmes d'alimentation électrique. Donc, il est important d'améliorer l'utilisation du système existant en augmentant leur capacité de transfert, tout en ayant un contrôle fiable des flux de puissance.

Le concept des systèmes de transmission flexibles à courant alternatif (FACTS) a été proposé pour renforcer le contrôle dynamique des systèmes d'alimentation et d'améliorer leur utilisation. Les dispositifs FACTS sont fondées sur l'application de l'électronique de puissance et la haute puissance des convertisseurs à haute tension, qui peut être inséré en série ou en dérivation, ou une combinaison des deux, pour atteindre un grand nombre des fonctions contrôler telles que la régulation du débit de puissance, la tension de transmission et peut atténuer les perturbations dynamiques grâce à l'action de contrôle rapide. Bien que les dispositifs FACTS ont fait leurs preuves sur le plan technique et ont été disponibles plus d'une décennie, l'adoption de la technologie on point de vue commerciale été faible. Cela semble être en grande partie en raison de leurs énormes coûts d'investissement, faible retour sur investissement, ainsi que des problèmes de fiabilité.

Plus récemment, des systèmes de transmission flexible distribuée à courant alternatif (D-FACTS dispositifs), tels que les compensateurs statique série distribué (DSSC) ont été conçus pour répondre aux problèmes de contrôle de puissance. Les dispositifs D-FACTS se fixent directement sur les lignes de transmission et peuvent être utilisés pour contrôler dynamiquement l'impédance efficace de la ligne. En autre, les dispositifs D-FACTS sont plus petits et moins coûteux que les dispositifs FACTS traditionnelles, ces avantages peut les rendre les meilleurs candidats pour le déploiement à grande échelle. Du point de vue des systèmes de puissance, les dispositifs D-FACTS ont de nombreux avantages potentiels [18].

Dans ce chapitre on vat étudie certains principes du fonctionnement des dispositifs D-FACTS, puis on examine l'impact de l'utilisation de dispositifs D-FACTS dans un système d'alimentation. En particulier, ce document analyse les effets de l'évolution des impédances de la ligne de transmission et l'utilisation de dispositifs D-FACTS pour minimisation des pertes et le contrôle de tension.

IV.2. Justification de l'utilisation des systèmes D-FACTS par rapport au system FACTS :

Figure IV.1 représente une plate-forme d'une compensation série par systèmes FACTS (TCSC) situé dans le Brésil. Il fait partie de l'interconnexion Nord-Sud du réseau de 500 kV du Brésil. Le TCSC est évalué à 550kV, 1500A, 107 MVAR nominal avec un degré nominal de compensation de 5%. Ceci le rendre cher n' importe où pour l'installation et la mise en service.



Figure IV.1 : Transmission Line Séries TCSC sur la plate-forme.

En 2009, le coût de revient pour une installation FACTS en Inde est d'environ 234,78 $/KVA, tandis que pour une installation D-FACTS est d'environ 78,26 $/KVA. Cela indique que l'installation D-FACTS représente seulement un tiers du coût des FACTS. Le 107 MVAR, de l'installation TCSC coûte autour de 25,12 $ millions de dollars en Inde.

Si ce même TCSC devait être construit aux États-Unis, il couterait probablement plus a cause des taux élevés de main-d'œuvre aux États-Unis.

Les deux dispositifs FACTS et D-FACTS peuvent être placés presque n'importe où. Avec les dispositifs FACTS tels qu'un TCSC, une fois qu'ils sont installés, ils resteront probablement. Les dispositifs FACTS ont une grande masse et un seul point de contact avec le système. Si il ya des imprévus qui modifie le système les FACTS pourrait être limité dans ce qu'il peut faire dans le système. Par exemple, s'il existe deux lignes parallèles non équilibrées, le dispositif FACTS ne sera en mesure d'agir sur un seul des deux lignes. Sans une grande installation FACTS dans l'autre ligne électrique, le problème pourrait rester. Si l'une des lignes est à sa limite thermique, la ligne légèrement chargé pourrait être limitée. Tandis que les dispositifs D-FACTS peuvent être déplacés sur l'autre ligne sans avoir besoin de briser la ligne ou la nécessité d'une plate-forme. De plus, le poids et la taille du module D-FACTS sont petits et peuvent être suspendus le long de lignes électriques directement.

Ayant plusieurs modules D-FACTS peut assurer que la compensation est toujours disponible même si un ou plusieurs modules tombent en panne. Tandis que, si les dispositifs FACTS tombent en panne, le système perdrait sa compensation. Les dispositifs D-FACTS sont supérieurs à cet égard. L'introduction de D-FACTS est énorme dans la fabrication des réseaux de transmission plus efficace. Ils peuvent être placés partout dans le réseau pour le contrôle de flux d'énergie. Un FACTS a essentiellement un point d'impact unique sur une ligne de transmission telle que le montre la plate-forme du TCSC de Figure IV.1.

IV.3. les dispositifs D-FACTS :

Le concept du dispositif DSSC a été a l'origine basé sur les dispositifs FACTS, en particulier du modèle SSC mais dans une taille plus petite, à un prix inférieur et une plus grande capacité. Le mode distribuée du DSSC contribue plus de sécurité et améliore la contrôlabilité des installations électriques.

Fig. IV.2 représente un schéma de DSSC exploité dans une ligne électrique de façon à contrôler le flux de puissance par le changement de l'impédance de la ligne. Chaque module du DSSC est inséré en série directement sur la ligne. La commande de chaque module du DSSC individuellement fournit une possibilité d'augmenter ou de

diminuer l'impédance de la ligne ou de la laisser telle qu'elle est .L' injection en série de l'impédance à chaque module peut être accompli en utilisant un seul transformateur tournant (STT), qui utilise le conducteur de la ligne lui-même comme un enroulement du transformateur. En lançant le dispositif sur le fil, toutes les problèmes lie a la tension d'alimentation et l'isolation sont évités. Le STT permet la manipulation des niveaux élevés de courant de défaut, généralement un problème difficile pour les périphériques connectés en série. La puissance nominale de 10 KVA permet l'utilisation facilement des composants disponible à haut volume et faible coût pour réaliser le coût de module d'unité très bas. Les dispositifs peuvent être employés progressivement selon le besoin, fournissant un niveau sans précédent d'adaptabilité. Enfin, le dispositif DSI peut être inséré sur une ligne électrique existante, ce qui simplifie leur installation et mise en service. Ces propriétés démontrer un niveau unique de fonctionnalités pour les Dispositifs D - FACTS qui est radicalement différente de FACTS classiques.

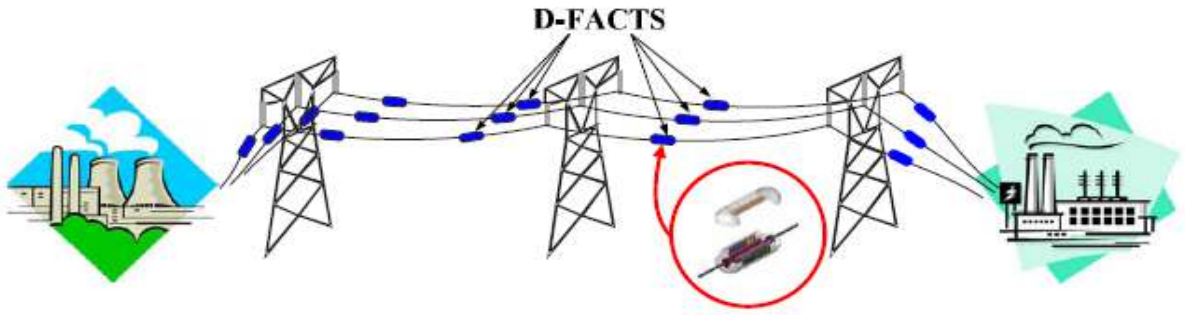
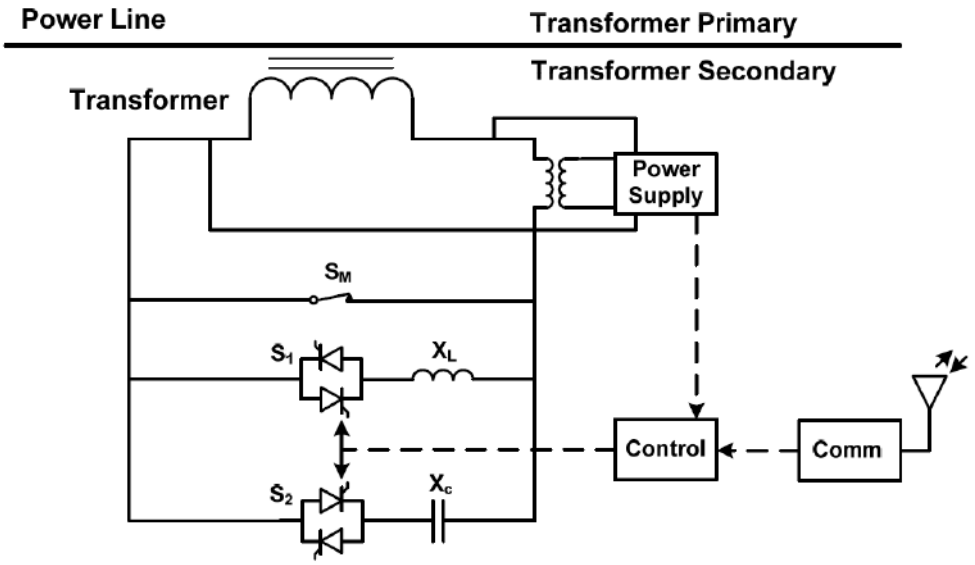


Figure IV.2 : Les dispositifs D-FACTS sur les lignes électriques.

IV.3.1.Principe de fonctionnement l'impédance série distribué (DSI) :

Une simple mise en œuvre d'un DSI utilise trois commutateurs, un condensateur et une inductance, en liaison avec le STT comme représenté sur la Fig.IV.3 .Les commutateurs statiques sont préférés à cause de leur réponse rapide en cas de défaut. Le STT est normalement court-circuité par la fermeture de l'interrupteur électromécanique S_M tandis que l'ouvrerai permet d'injecter l'impédance souhaitée. La fermeture de l'interrupteur S_1 permet d'injecter une inductance globale X_L, tandis que la fermeture de l'interrupteur S_2 permet d'injecter une capacité globale X_C. Ceci permet alors au DSI d'injecter une impédance nulle dans le mode by-pass, une inductance X_L dans le mode inductif et une capacité $-X_C$ dans le mode capacitif. Le STT est conçu avec un grand nombre de spires dans l'enrôlement secondaires, disant 1:50, afin de réduire la valeur du

courant secondaire pour permettre l'utilisation de masse des parties fabriquées. Le circuit de contrôle est hors tension de la ligne, et surveille le courant de ligne [19].



Figue. IV.3 : Circuit schématique de DSI.

La Figure IV.4 montre que, avec un nombre total de N modules DSI sur une seule ligne, l'impédance de ligne peut être modifiée de (N.XL) à (-N.XC) dans un nombre total de 2N étapes. Si le nombre N est suffisamment grand, par exemple 100, l'impédance peut être modifiée avec une résolution de 0,5%.

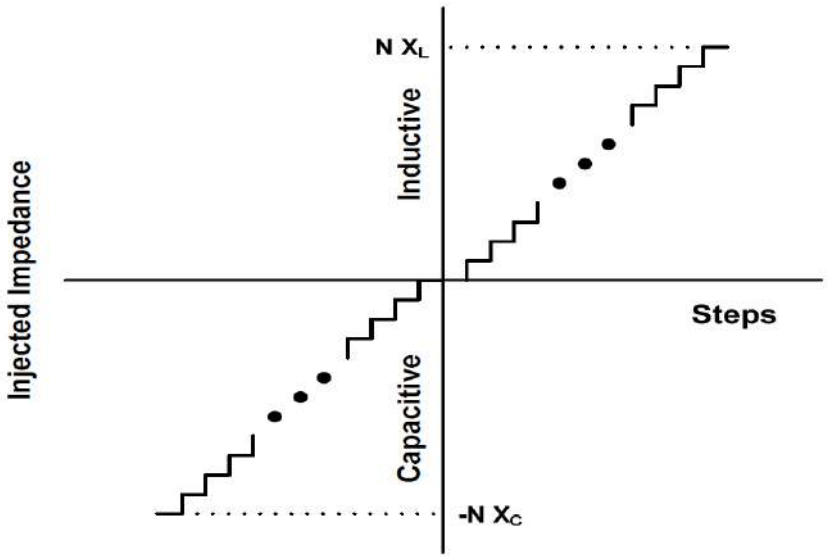


Figure IV.4 : profil de l'impédance injecté par les modules dans la ligne.

IV.3.2. Principe de fonctionnement de la réactance série distribué (DSR) :

La Figure IV.5 représente un schéma simple d'une réactance série distribué (DSR), qui peut être employé dans les réseaux électriques interconnecté ou maillés, et peut être commandé de manière autonome au niveau du chaque module individuellement, en utilisant une stratégie de contrôle simple avec aucun communications pour augmenter considérablement la capacité de puissance globale d'énergie. Comme dans le cas du DSI, le commutateur électromécanique normalement fermé (S_M) est utilisée pour court-circuiter le module quand il n'est pas excité. Avec S_M ouvert, l'interrupteur commande l'insertion de la réactance série. Avec S_1 fermé, un niveau minimum de la réactance, correspondant à la réactance de fuite du STT, est inséré dans la line tandis que l'ouvrerai permet de réglé l'inductance magnétisante du STT à la valeur désirée en réglant l'entrefer, est inséré dans la ligne.

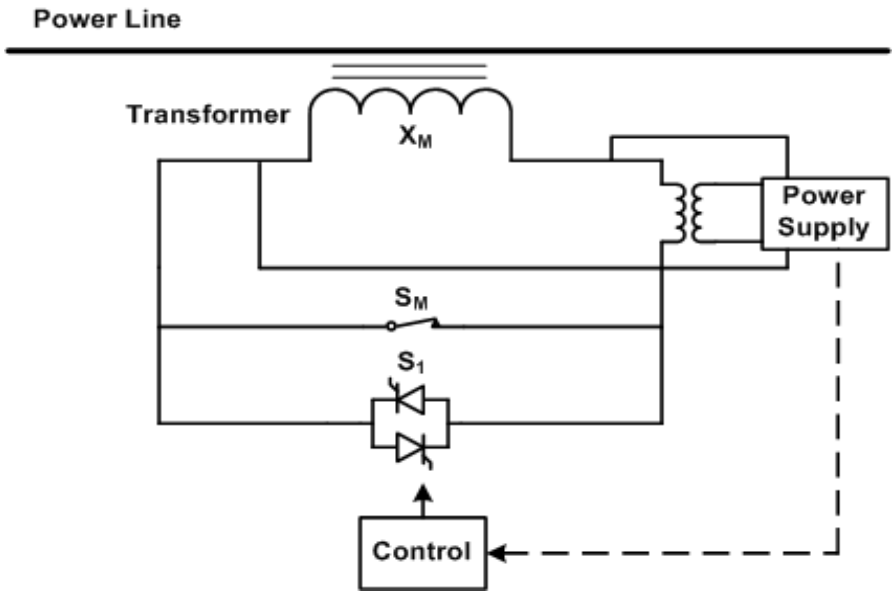


Figure IV.5 : Circuit schématique de DSR

Au niveau du système, quand le courant dans une ligne particulière dépasse une valeur prédéterminée, un nombre croissant de modules DSR sont commuté permettant d'augmenter graduellement l'impédance de la ligne et de détourner le courant vers les lignes sous-exploitées. Comme l'objectif global de contrôle est de maintenir la surcharge thermique des lignes, la stratégie de contrôle considérée est très simple. L'algorithme de commande pour le fonctionnement du module DSR est défini dans l'équation (IV. 1).

$$L_{inj} = L_f \frac{(I - I_0)}{(L_{thermique} - I_0)} \qquad (IV.1)$$

L_{inj} : est l'inductance injecté dans la ligne;

L_f : est la valeur finale de l'inductance avec tous les modules de DSR active sur la ligne;

I_0 : est la valeur du courant de déclenchement pour un module DSR;

$L_{thermique}$: est la limite thermique au-delà de laquelle il n'y a pas d'injection.

Différents modules des DSR sur une ligne ont des niveaux de commutation prédéterminé (basé sur le courant de la ligne) qui fournissent collectivement une inductance de ligne qui augmente à mesure que le courant de la ligne augmente au-dessus d'un seuil défini, comme on le voit dans la Figure IV.6. Les lignes présélectionnés qui sont susceptibles de voir des conditions de surcharge à certains moments de la journée ou dans des conditions d'urgence définies peuvent être modifiées avec des modules DSR pour gérer automatiquement la congestion quand il se produit, et d'avoir un impact minimum sur le système sous des conditions d'exploitation normale. L'emploi des modules DSR sur une ligne électrique peut donc aider à réaliser le concept de la limitation du courant dans le conducteur. Le contrôle des modules DSR, lorsqu'en mis œuvre sur plusieurs lignes, doit s'assurer qu'aucunes oscillations ou interactions se produisent.

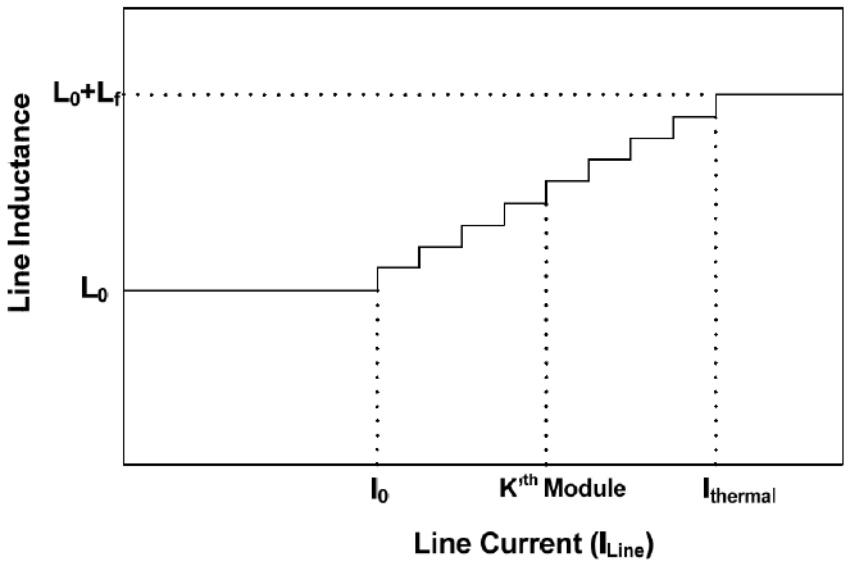


Figure IV.6 Augmentation de la ligne inductance de commutation dans des modules DSR.

IV.3.3. Compensateur statique série distribué DSSC:

Un système de transmission contrôlée peut être constitué des centaines ou des milliers de modules DSSC, chaque module contenant un onduleur monophasé (1-20 kW) , une liaison de communication et un transformateur à une seule spire (STT). Le STT utilise le conducteur de la ligne transmission comme un enroulement secondaire ce qui permet d'injecte directement la tension souhaitée dans le câble lui-même. L'onduleur est auto-alimenté par l'induction de la ligne, et peut être commandé pour injecter directement dans le conducteur une tension orthogonale au courant de la ligne. Le module peut être soit suspendu à partir du conducteur ou configuré en tant que remplacement pour l'étrier de support de conducteur sur un isolant. De plus, puisqu' il ne nécessite pas de support d'isolation phase-terre, le module peut facilement être appliqué à n'importe quel niveau tension de transmission. Figure IV.7 représente un schéma de conception électromécanique pour un module de DSSC cellules typique, alors que La Figure IV.8 représente sont circuit de puissance. La forme mécanique du module peut soit insérée directement sur le conducteur, comme le montre la Figure IV.8, ou peut être incorporée dans l'attache de suspension de l'isolateur, en évitant toute préoccupation au sujet du poids et des dégâts dans le conducteur dus aux vibrations.

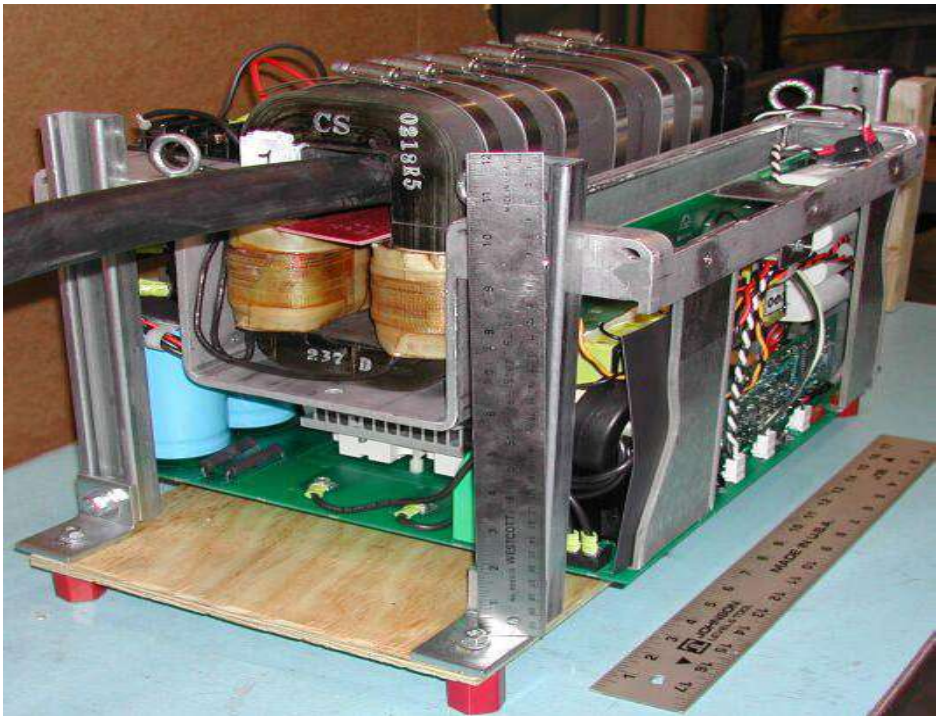


Figure IV.7 : prototype de laboratoire de DSSC

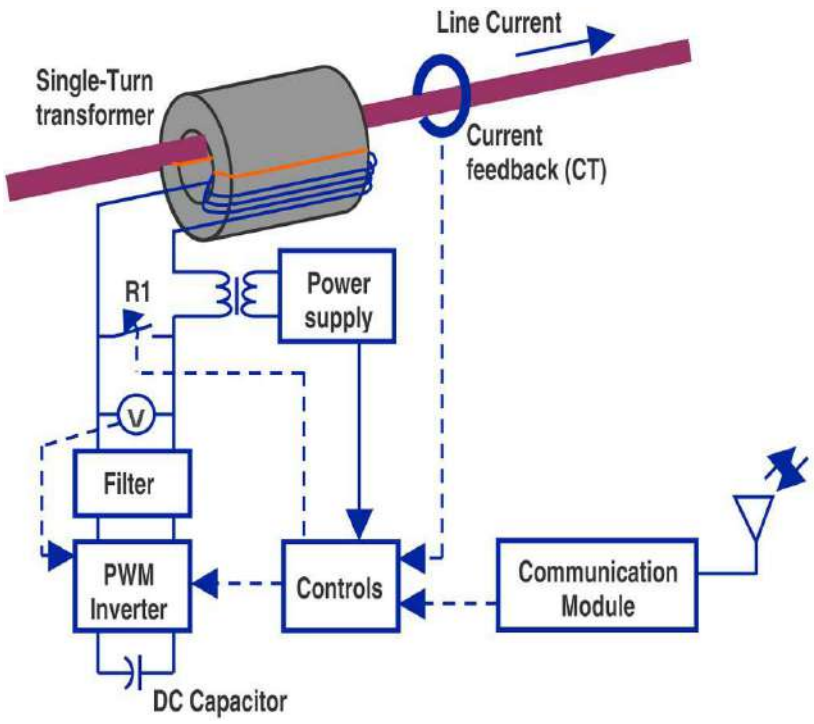


Figure IV.8 : Circuit schématique d'une DSSC.

Lorsque la ligne de transmission n'est pas alimentée, la STT est court-circuité par la fermeture du contact de relais (R1) qui s'ouvre une fois l'alimentation de commande est disponible. Un transformateur de courant est utilisé pour produire l'énergie nécessaire pour le fonctionnement des circuits de commande, permettant au module de DSSC de fonctionner aussi longtemps tant que le courant de la ligne est supérieur à un niveau minimal, disant 150 A. La ligne apparaît à l'onduleur comme une source inductif de courant. L'onduleur monophasé utilise quatre dispositifs IGBT avec un filtre LC de sortie et une capacité à courant continu. La tension de sortie de l'onduleur est commandée par la technique de la modulation de la largeur d'impulsion (MLI), et comporte deux composants. Le premier est en quadrature avec le courant de la ligne, et représente l'impédance désiré à injecter. Le second est en phase avec le courant de la ligne, et permet la compensation des pertes de puissance dans l'onduleur, et la régulation du bus de courant continu de l'onduleur. Les commandes des systèmes pour des changements progressifs sont reçues à partir d'un centre de contrôle central à l'aide d'un system de communication sans fil ou la technique (PLC). En cas de transitoires rapides ou des défauts les modules DSSC peuvent être programmés pour fonctionner de manière autonome. Avec le DSSC attaché et opérant au potentiel du conducteur, la capacité

potentielle de mesure de température du conducteur est facilement ajoutés et les lectures de température réels peuvent être communiqué au contrôleur de système central.

Le STT est un élément clé du module de DSSC. Il est conçu de telle sorte que le module peut être inséré sur une ligne de transmission existante. Le STT est conçu avec un rapport élevé de spires, disant 01:75. Ceci implique que, sous un courant de ligne normale par exemple de 1500 A, l'onduleur manipulerait seulement 20 ampères. La Conception de l'onduleur pour une tension de sortie de 500 volts permettre au module du DSSC d'injecter une tension de 7 volts en avance ou en retard, correspondant à injecter ± 10 kvar en série avec la ligne sous des conditions de fonctionnement normales. Il est prévu qu'un tel module pourrait être conçu pour peser moins de 45 kg, permettant du fixé directement sur le conducteur de la ligne de transmission.

Le STT permet également à l'onduleur de continuer à fonctionner en cas de défaut. Par exemple, pour un courant de défaut de 50 000 A, le courant de l'onduleur n'est encore que 667 A, ce courant est tout à fait en conformité avec la capacité des dispositifs IGBT utilisés dans le commerce. Cela augmente la possibilité d'utilisation des ces modules, contrairement au TCSC, le DSSC pourrait régler l'impédance de la ligne dans des conditions normales, commutant le passage dans un mode d'injection de l'inductance maximale en quelques microsecondes pour empêcher une augmentation des niveaux de courant de défaut.

Les évaluations de l'onduleur démontrent clairement que les semi-conducteurs et les composants utilisés sont disponibles dans le commerce en des volumes très élevés, validant ainsi le potentiel pour réaliser à faible coût.

IV.4.Avantages opérationnelle et économique du DSSC :

D'un point de vue opérationnel, les caractéristiques suivantes peuvent être réalisées pour les systèmes DSSC:

- Possibilité d'augmenter ou diminuer le courant de la ligne a l'état d'équilibre sous commande du contrôleur du système, ou de manière autonome
- Possibilité de surveiller la température réelle du conducteur et limiter les courants manuellement ou automatiquement en fonction de la température du conducteur

- Haute fiabilité du système en raison de la redondance massive, la défiance d'une unité a un impact négligeable sur les performances du système
- Robuste et résistant en cas de défaillance typiques
- Peut être utilisé avec n'importe type de conducteur
- la production massive des modules DSSC à l'usine et la possibilité de le remplace rapidement ne nécessite pas de personnel qualifié sur site
- Installation facile et rapide (peut-être possible en ligne en direct)

Ces avantages opérationnels à leur tour entraîné d'importants avantages économiques. Ceux-ci incluent :

- Outil évolutif simple pour la gestion de la congestion-Augmentation ATC et les revenus
- répondre aux besoins d'exploitation d'urgence sans construction de nouvelles lignes
- Réduit les coûts globaux de l'énergie
- Réduire l'impact environnemental
- La capacité d'intervention d'urgence
- Le contrôle de flux en boucle
- augmentation de la puissance active transmise
- équilibrage des phases
- Augmenter la marge de l'effondrement de tension
- Améliorer la réponse de la stabilité transitoire.

IV.5. L'impact des dispositifs DSSC sur l'écoulement de puissance :

Comme mentionné précédemment, le DSSC est connecté en série de la ligne de transmission, et permet ainsi d'injecter directement dans le conducteur de la ligne de transmission une tension fondamentale synchrone qui est en quadrature avec le courant de la ligne. En conséquent, la puissance transmis devient est une fonction paramétrique de la tension injectée et peut être exposé comme la suite [20]:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin - \frac{V_1 V_q}{X_L} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \left[\frac{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{V_1 + V_1}{2V_2}\right)^2 - \frac{V_1}{V_2} \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}} \right] \qquad (IV.2)$$

Où:

V1 et V2 : les amplitudes de tension dans les nœuds;

Vq : l'amplitude de tension série injectée;

δ : La différence de phase de tension;

et X_L : l'impédance de la ligne, supposé être purement inductive.

Le DSSC peut tout simplement augmenter la puissance transmissible ainsi que de la diminuer en inversant la polarité de la tension alternative injecté. C'est intéressant de noter que cette fonction est responsable de corroborer la capacité saillant du DSSC pour le contrôle de flux de puissance dans l'ensemble du système. La variation de la puissance transmis exprime l'angle de charge avec différents tension quadratique injecter, pour des grandeurs de tension égale est représenté sur la Figure IV.9.

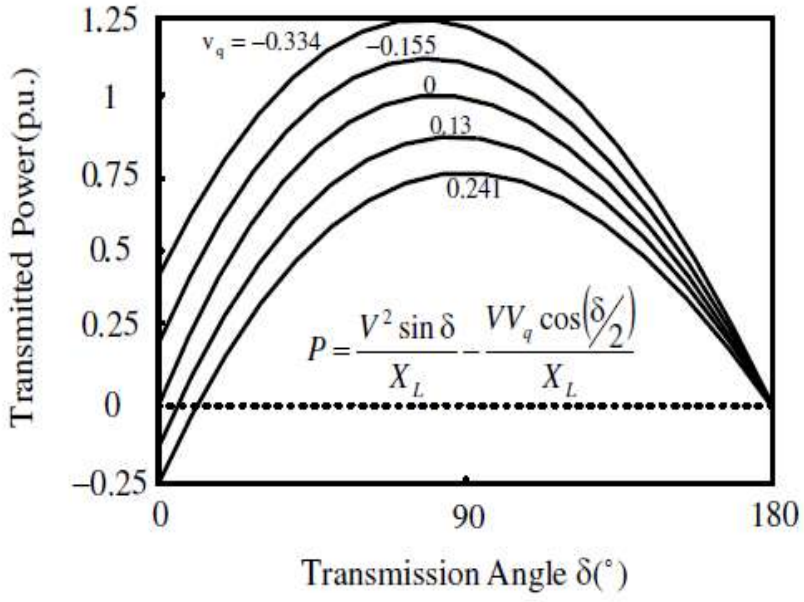


Figure IV.9 : La variation de la puissance transmise par l'injection d'une tension carrée

IV.6. Application des D-FACTS par le logiciel Power World :

IV.6.1.Support du D-FACTS dans le logiciel Power World :

- Un seul objet représente tous les périphériques D-FACTS sur une ligne ;
- Fixe à une ligne de transmission ;
- Toutes les quantités sont par phase ;
- Les caractéristiques de fonctionnement ;
- Typiquement 47 µH par module ;
- Indiquez la compensation max ou le nombre total de modules ;
- Indiquez minimum et maximum courant d'activation de la ligne.



Figure IV.9 : symbole de D-FACTS

IV.6.2. Profil opérationnel DU D-FACTS :

L'utilisation des dispositifs D-FACTS dans le logiciel power world est simple, l'utilisateur entre le nombre de modules et de l'impédance réactive par module. L'utilisateur spécifie également les valeurs du courant de déclenchement I_0 et l'amplitude de courant I_{lim} :

- En dessous I_0, les appareils D-FACTS sont inactifs ;
- Au-dessus I_{lim}, l'injection d'impédance cumulative des dispositifs D-FACTS sur la ligne est à son valeur maximale.

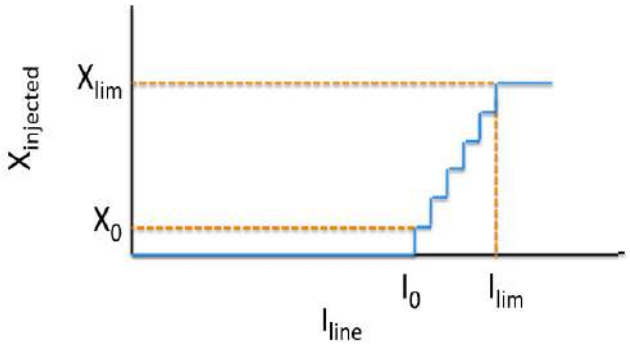


Figure IV.10 : mode inactive et active

IV.6.3.Exemple.1 : réseaux à deux nœuds :

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement du dispositif DSSC on vat utilisé un exemple simple comportant deux nœuds, une charge et deux lignes de longueurs inégales pour transférer la puissance du bus 1 au bus 2. Les paramètres de la ligne prés en charge sont répertoriés dans le Tableau IV.1 suivant [21] :

Tableau**.** Les paramètres des réseaux étudient de deux nœuds.

V1 = V2 = V	79.7 kV (138 kV L-L)
Line 1 impédance Z1=R1+jX1	(0.03 + j 0.2) ohms/km
Line 2 impédance Z2=R2+jX2	(0.036 + j0.26) ohms/km
Line 1 : S1 max	150 MVA
Line 2 : S2 max	200 MVA
Charge au bus 2	350 MW, 50MVAR

Après l'exécution du **Power World**, nous avons obtenus le diagramme du réseau original suivant :

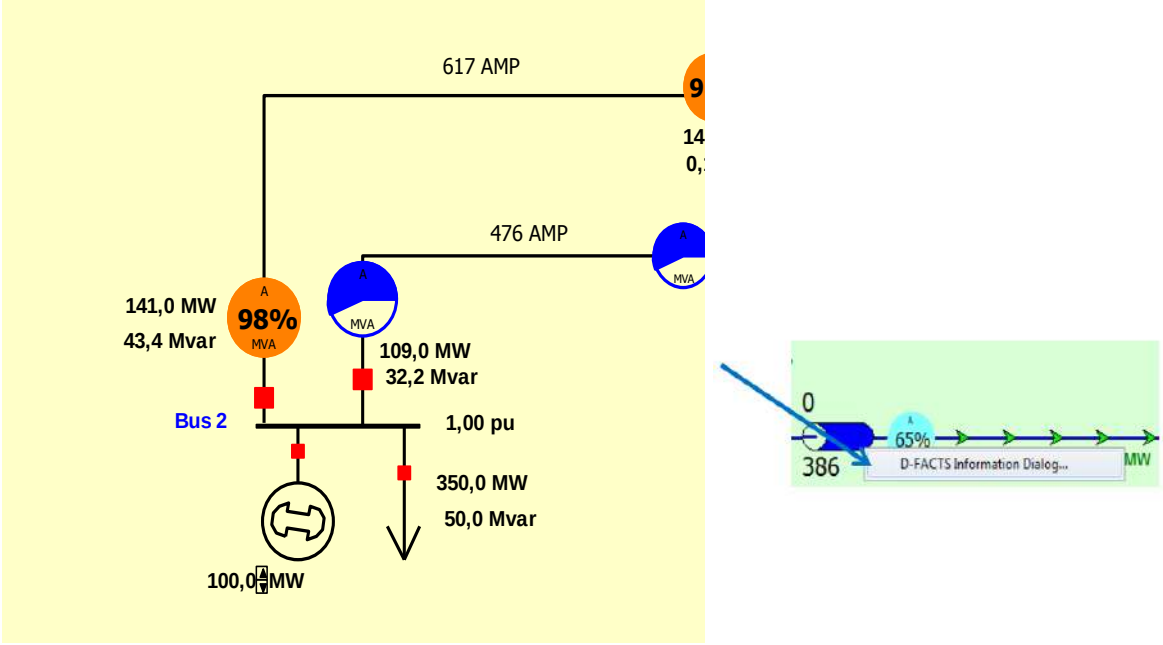
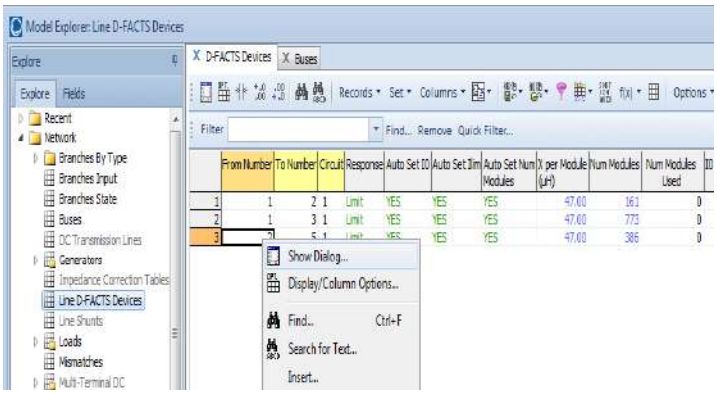


Figure IV.10 : Diagramme du Réseau Original

On remarque que la première ligne fonctionne presque a sa capacité maximale (98 % de sa capacité) , tandis que la deuxième ligne transport presque la moite de sa capacité (56 %), pour régler ce problème, on vat inséré un dispositif DSSC dans la première ligne.

Insertion D-FACTS :

Pour ajouté un dispositif D-FACTS dans le power world, il suffit d'ouvrière les paramètres D-FACTS directement par un clic droit sur objet D-FACTS et en choisissant "dialogue show".



De la boîte de dialogue de la ligne de transmission, cliquez sur "D-FACTS périphériques de la ligne" pour voir les paramètres D-FACTS.

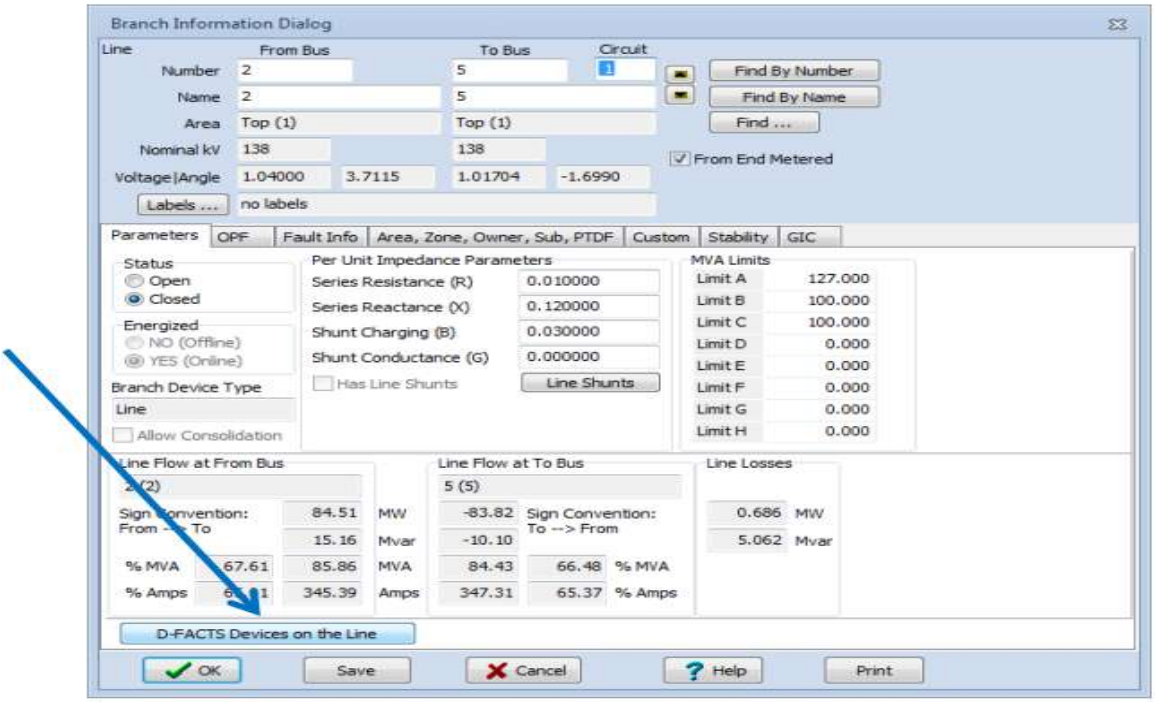


Figure IV.11 : Insertion dispositif D-FACTS

La figure IV.12 represente la fenetre de dialog des dispositif D-FACTS qui contient les informtion principale que l'utilisateur doit remplire comme le nombre totale du module par phase (Num modules per phase), l'inductance injecté par modules (present value of Xinj), le courant d'activation (activation current I_0) et le courant maximum (max curent I_{lim}) et deux mode de fonctionnement : soit en mode bypass (Xinj=0) ou le dispositif D-FACTS est inactive ou mode active ou en peut utilise soit l'option de la limitation du courant (limit based on current) ou d'utilisé une inductance injecté fixe (use fixed Xinj), ou encore l'utilisation de l'option du regulation de l'écoulement de puissance (regulate line flow).

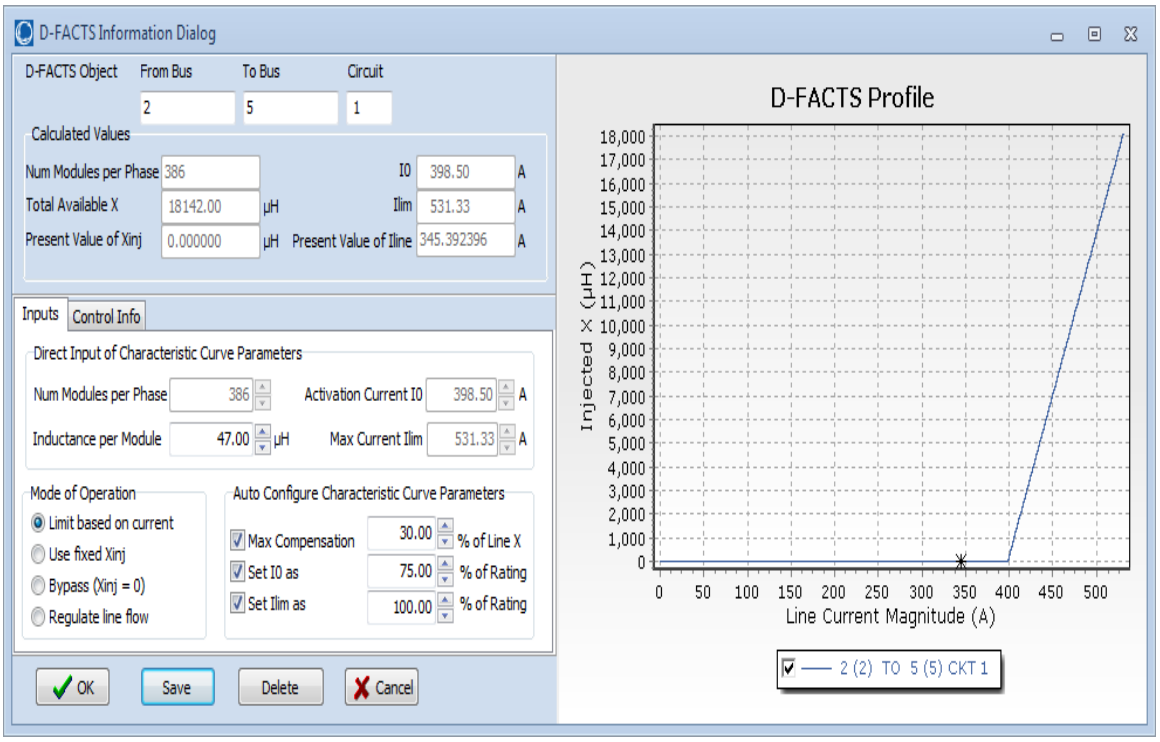


Figure IV.12 : La fenetre de dialog des dispositif D-FACTS

La figure VI.13 represente un reseau a deux nœuds avec D-FACTS inseré dans la premiere ligne en mode inactive (bypass).

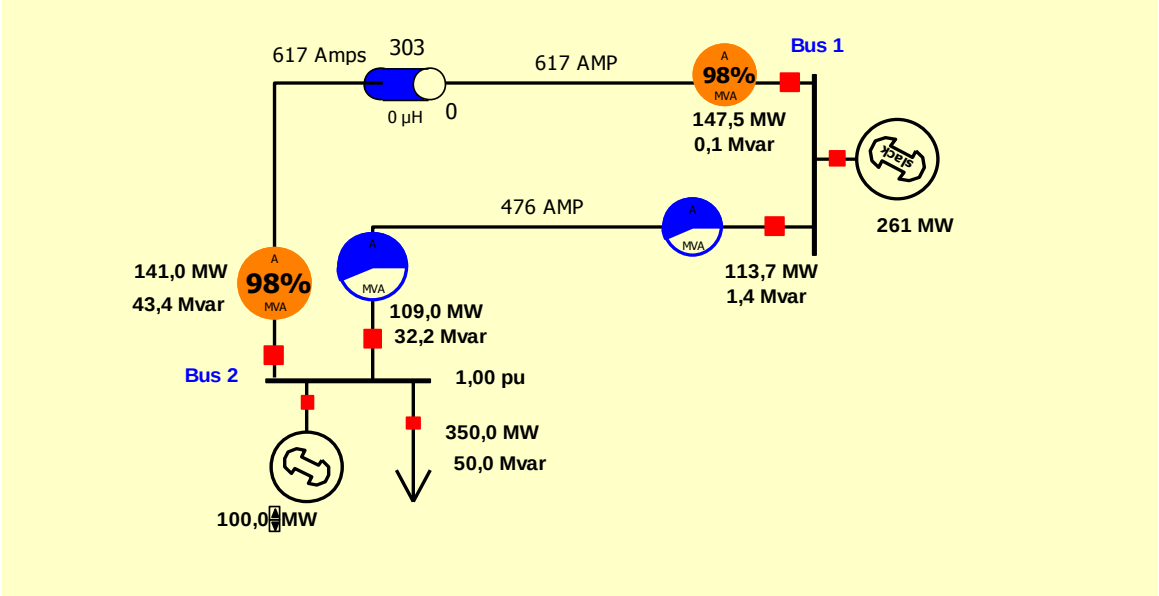


Figure VI.13: Reseau a deux nœuds avec D-FACTS inseré dans la premiere ligne en mode inactive (by-pass).

On remarque que rien a chage par rapport au premier reseau parce que le D-FACTS est inactive est n'insere aucune inductance .

Activation du dispositif D-FACTS

Pour activé le dispositif D-FACTS il suffit de basculé du mode bypass en mode operationnelle, comme montre la figure suivantes :

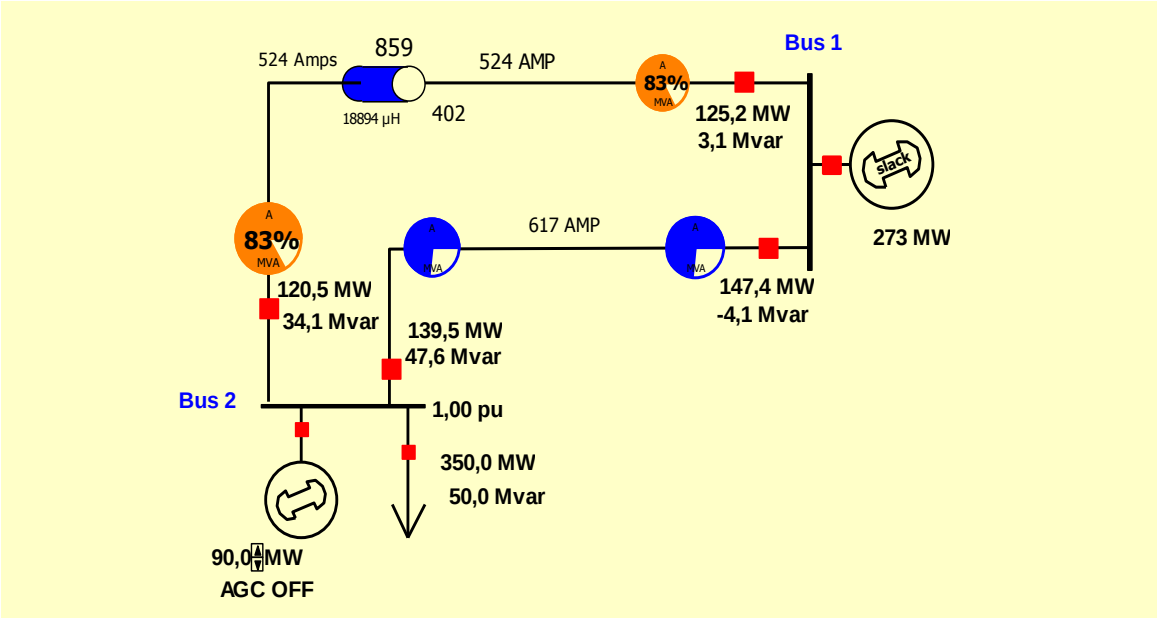


Figure VI.14: Reseau a deux nœuds avec D-FACTS inseré dans la premiere ligne en mode active .

En ajoutant un DSSC dans la premiere ligne et precisant un taux de copensationde 40%,permet au logiciel power world de calculé le nombre des modules totale (859)et le nombre des modules active (452) et l'inductance injecter (18894 µH). On remarque que la puissance transmise par la premiere ligne a passé de 147.5 MW a 125.2 MW et le courant de 617 A a 524 A, tandis que pour la deuxieme ligne la puissance a passé de 113.7 MW a 147.4 MW et le courant de 476 A a 617, pour une puissance totale transferer de 272.6 MW entre les bus au lieux de 261.2 MW.

La puissance transférée par la ligne 2 a augmenté de près de 30%, tandis que la ligne 1 a été contrôlé à bien dans sa limite thermique. Environ 452 modules D-FACTS active réparties sur la lignes transmission 1 ont donné lieu à 11,4 MW du flux de puissance supplémentaire entre les bus. Ce nombre serait encore plus avantageux pour des tensions de système plus elevé.

Ce simple exemple confirme la capacité du D-FACTS pour contrôler les flux de boucle, de gérer la congestion, et à augmenter la capacité de traitement de puissance de lignes de transmission [22].

IV.7.Exemple.2 : réseaux a sept nœuds :

On Prenons l'exemple simple d'un reseaux a 7- nœuds representer sur la figure ci-dessous. Les dispositifs D-FACTS sont inserie sur trois lignes, tous en mode "bypass" . Après l'exécution du **Power World**, nous avons obtenus le diagramme du réseau original suivant :

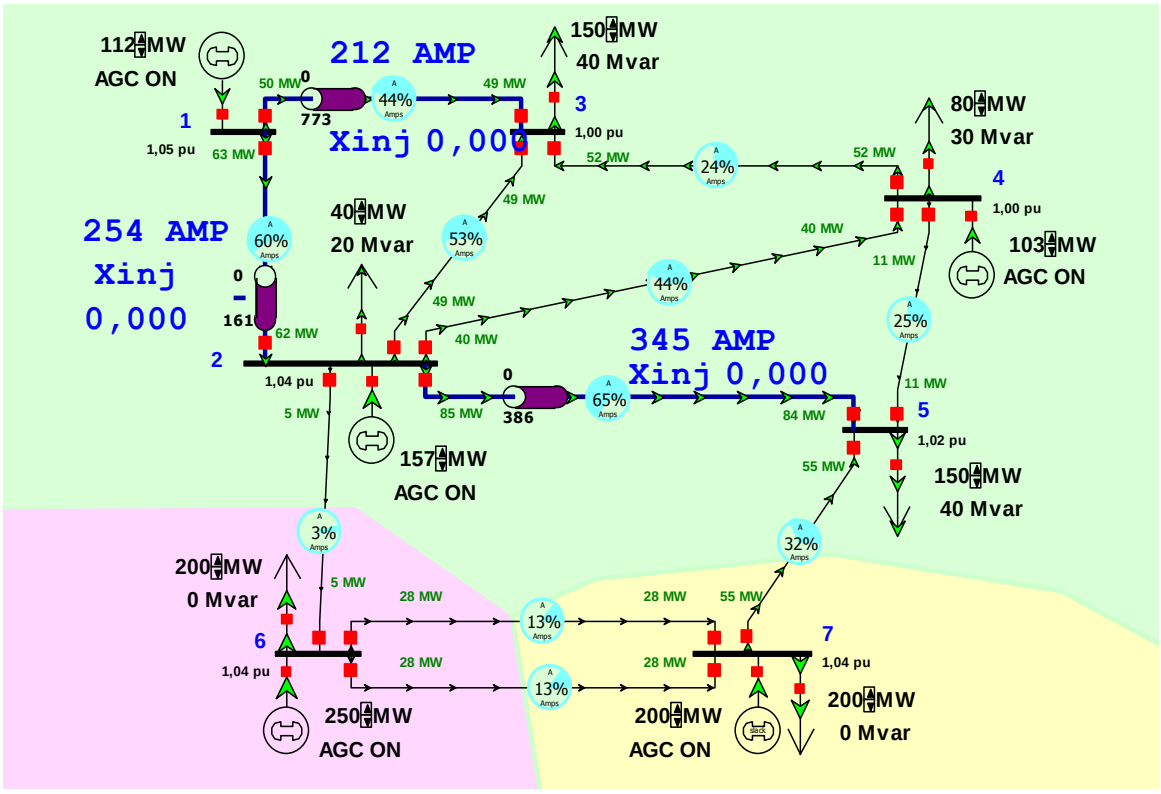


Figure IV.15: Reseau a sept nœuds avec D-FACTS en mode inactive (by-pass).

On augmente la charge au noeuds 5 de 150 MW a 210 MW, puis on ouvre la fenetre de dialog du dispositif D-FACTS inserie entre le nœud 2 et 5 est on regle les parametre comme le montre la figure VI.16.

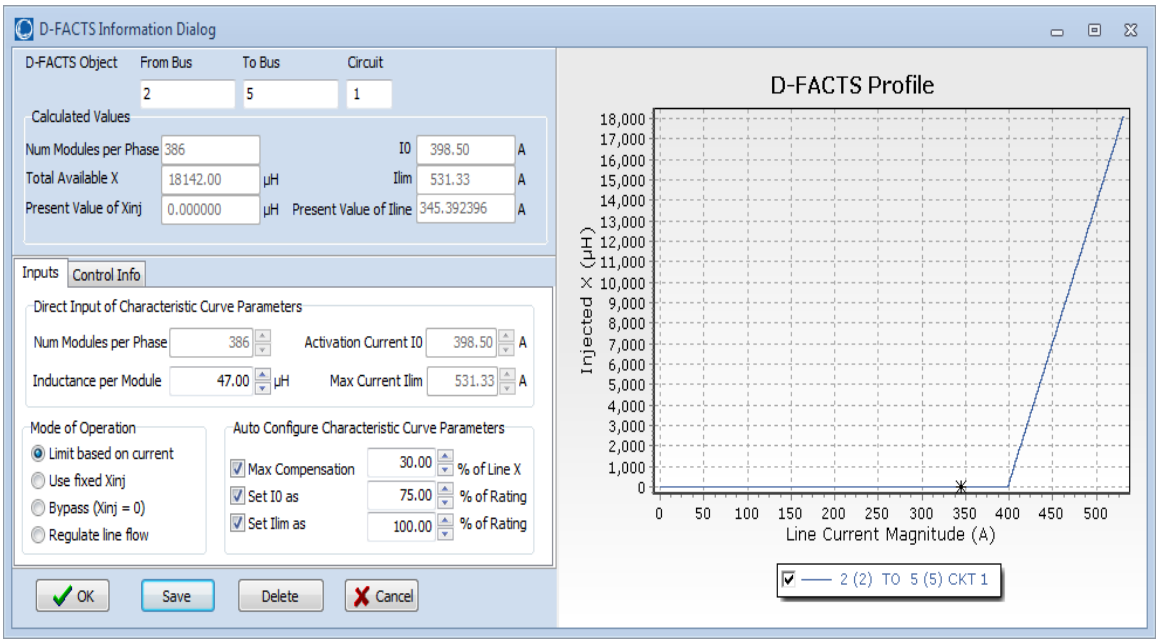


Figure IV.16: La fenetre de dialog du D-FACTS.

Après l'exécution du **Power World**, nous obtenant les resultats suivantes :

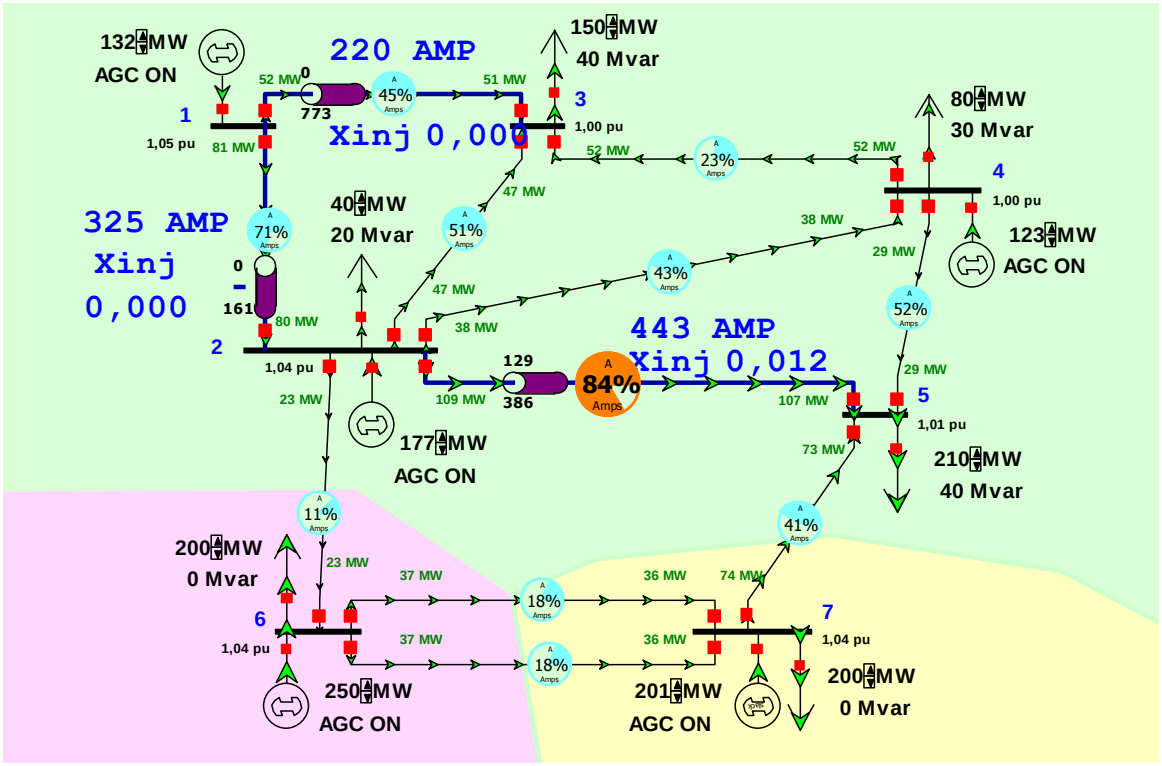


Figure IV.17: Reseau a sept nœuds avec D-FACTS entre le nœuds 2-5 en mode active .

On remaque que le dispostif D-FACTS entre le nœuds 2-5 devient active est injecte une inductane de 0.012 H qui permet de maintenire le fonctionnement de la ligne autour de sa limite.

IV.8.Exemple.3 : réseaux a six nœuds :

Ce dernier exemple est utilisé essentiellement pour testé l'option de la regulation de l'ecoulement de puissance (regulate line flow) dans la fenetre de dialog du dispositifs D-FACTS qui permet d'ajuster les parametres du D- FACTS automatiquememt pour un meilleur ecoulement de puissances.Pour cela on vat utilisé un réseaux de 6 nœuds avec un dispositif D- FACTS inseré entre le nœud 6-3 comme le montre la figure IV.18.

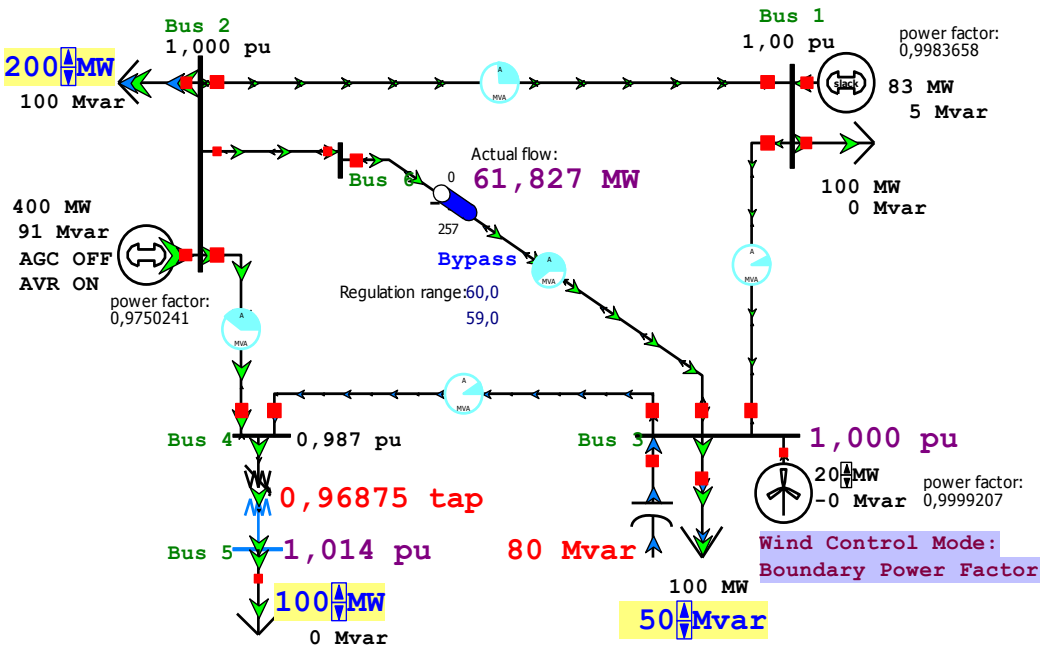
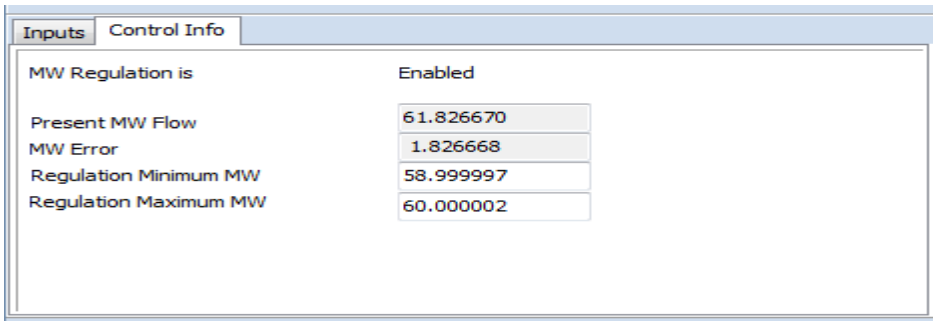


Figure IV.18: Reseau a six nœuds avec D-FACTS entre le nœuds 6-3 en mode inactive (by-pass) .

Initialement le D- FACTS est inactive pour l'activé il suffit d'ouvrire la fenetre du dialog du D- FACTS et de basculé du mode bypass vers le mode regulate line flow, puis on ouvre l'onglet info control et on définie la plage de régulation comme montre la figure suivantes.



Après l'exécution du **Power World**, nous obtenant les resultats suivantes :

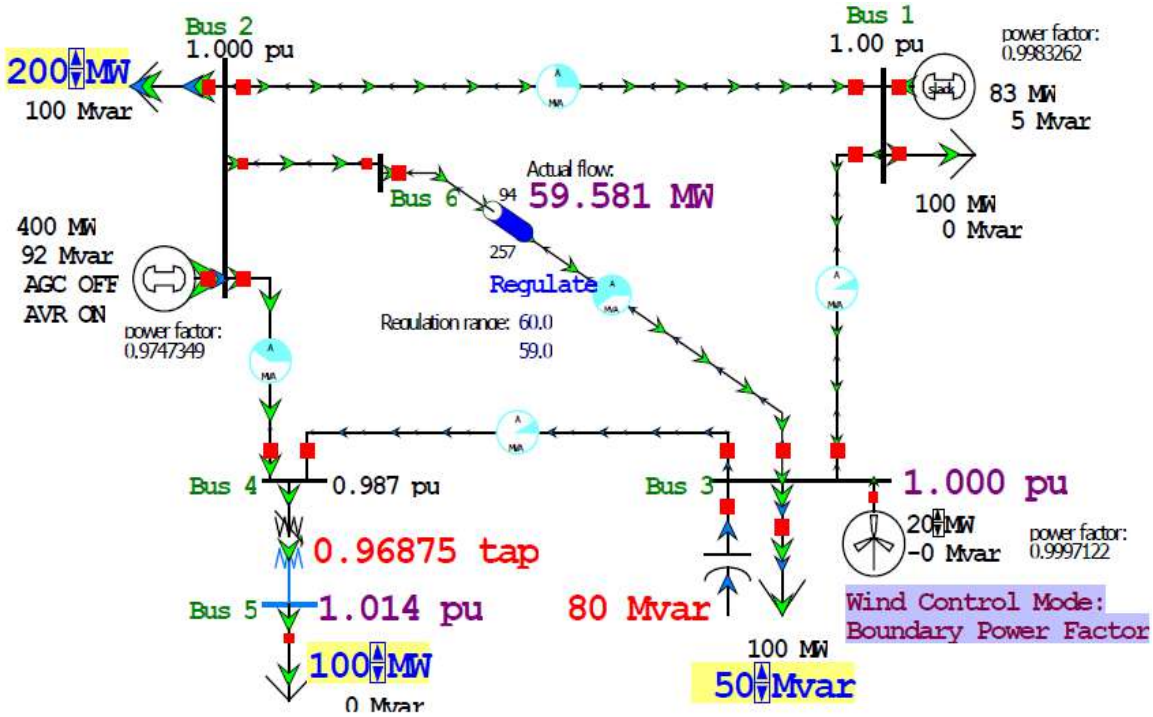


Figure IV.19: Reseau a six nœuds avec D-FACTS entre le nœuds 6-3 en mode active.

D'apre les resultat obtenue on remarque que le D-FACTS a ramenue l'ecooulement de puissance entre le noeud 6-3 a la plage de regulation demande précedament (59.581 MW) c'est-à-dire entre 58.999997 MW et 60.000002 MW ce qui confirme la haute performance de ce logiciel.

IV.9.Conclusion :

Dispositifs D - FACTS ont le potentiel de réaliser un contrôle complet des flux de puissance .Ce travail démontre l'utilité des dispositifs D- FACTS pour le contrôle de débit de la ligne , la minimisation des perte , et le contrôle de la tension .

Régulation de débit de ligne semble être le plus réussi, suivie par minimisation des pertes et par le contrôle de la tension . la solution techniques sont basées sur les sensibilités et l'optimisation ; ces procédés sont présentés à titre général et peut être utilisé pour identifier d'autres applications D- FACTS appropriées et à résoudre les réglages d'impédance de ligne [23] .

Le concept des systèmes de transmission flexibles à courant alternatif distribués (D-FACTS) a été mis en place afin de fournir une solution rentable pour le contrôle des flux d'énergie. Distribué statique série Compensateur (DSSC) est le premier dispositif de la famille D-FACTS réaliser. Ce dernier dispositif utilise des appareils de faible puissance disponible dans le commerce, offre la possibilité de réduire considérablement le coût de l'écoulement de puissance. La compensation série en utilisant D-FACTS aiderait les utilitaires à atténuer la congestion du réseau, reporter la construction des nouvelles lignes de transmission, et d'améliorer la capacité du système. Les dispositifs D-FACTS ne nécessitent pas de changement dans l'infrastructure du réseau et fonctionnent de manière autonome, avec ou sans communication. La fiabilité élevée, faible coût et longue durée de vie de ces dispositifs les rend d'autant plus attractifs.

L'adoption répandue de cette technologie nécessite une analyse approfondie de certaine des limitations pratiques. Certaines des questions tels que l'exploitation dans des conditions normales et de défaut, coordonnés commutation, le transfert de chaleur et le poids total du système ont été abordées dans le présent document. Bien que les avantages des dispositifs D-FACTS examinés dans notre mémoire constituent des arguments solides pour leur utilisation, il ya du travail à faire pour comprendre les effets des dispositifs D-FACTS sur la stabilité du système et sécurité correspondant pour le contrôle.

Bibliographies

[1]-Mr : Rabah BENABID,“Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par lesParticules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tensiondes Réseaux Electriques, Magister en Electrotechnique’’,Université Amar Telidji, Laghouat,2007.

[2]-Mr : TebaniWissame, ‘‘Compensation optimale de l’énergie réactive dans les réseaux de distribution’’Magister En Électrotechnique de l’Université Ferhat Abbas – Sétif 2012.

[3]-Mr : Nabil MANCER,‘‘Contribution à l’optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)’’Magister en :ElectrotechniqueUniversité Mohamed Khider – Biskra,2012.

[4]-Mr : Oussama MAMMERI,‘‘Differentesmethodes de calcul de la puissance reactivedans une nœud a charge non lineaire en presence d'un systeme de compensation de l'energie’’Magister en :Electrotechnique, Université de Batna,2012.

[5]-Mr : Mostefa HAMED“Dispatching Economique Dynamique par Utilisation de Méthodes d’Optimisation globales’ ’Magisteren:Electrotechnique,Université Mohamed Khider – Biskra 2013.

[6]-G.SANDOU :‘‘Modélisation et optimisation robuste de systèmes complexes: application aux réseaux énergétiques’ ’Thèse de Doctorat. Supelec-Département d'automatique – Gif-sur-Yvette. Octobre 2006.

[7]-Mr : SEDDIKI ZAHIRA : ‘‘optimisation de l’ecoulement de puissancesdans un systeme d’énergieélectriquepar la méthode du point intérieur’ ’Magister en :Electrotechnique, Université H.B.Chlef,2009.

[8]-M. RAHLI.‘‘Contribution a l'étude de la répartition optimale des puissances actives dans un réseaud'énergie électrique’’.Thèse de Doctorat, 06 Janvier 1996, Université des sciences technologiques USTOran–Algérie- Département d’Electrotechnique.

[9]-Mr : SEDDIKI ZAHIRA : ‘‘optimisation de l’ecoulement de puissancesdans un système d’énergieélectriquepar la méthode du point intérieur’’,Magister en :Electrotechnique, Université H.B.Chlef,2009.

[10]-Mr : Mostefa HAMED“Dispatching Economique Dynamique par Utilisation de Méthodes d’Optimisation globales’’Magisteren:Electrotechnique,Université Mohamed Khider – Biskra 2013.

[11]-Mr : Oussama MAMMERI,‘‘Differentesmethodes de calcul de la puissance reactivedans une nœud a charge non lineaire en presence d'un systeme de compensation de l'energie’’Magister en :Electrotechnique,Université de Batna,2012.

[12]-Mr :Sayeh Samir “Application de l’Intelligence Artificielle pour le Fonctionnement Optimal des Systèmes Electriques Thèse de doctorat université de Sétif Algérie.2011.

[13]-Mr : Mostefa HAMED“Dispatching Economique Dynamique par Utilisation de Méthodes d’Optimisation globales’’Magisteren:Electrotechnique,Université Mohamed Khider – Biskra 2013.

[14]-Mr : Abdelaàli ALIBI, “Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)’’Magister en Electrotechnique, UNIVERSITE DE BATNA,2009.

[15]-Mr : Nabil MANCER,‘‘Contribution à l’optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)’’Magister en :ElectrotechniqueUniversité Mohamed Khider – Biskra,2012.

[16]-Mr : Nabil MANCER,‘‘Contribution à l’optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)’’Magister en :ElectrotechniqueUniversité Mohamed Khider – Biskra,2012.

[17]-Rabah Benabid ‘’ Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques’’Université Amar Telidji, Laghouat 2007.

[18]-Divan, Deepak and Johal, Harjeet. “Distributed FACTS – A New Concept for Realizing Grid Power Flow Control.” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 6, November 2007.

[19]-Hingorani, N.G. “Facts – Flexible AC Transmission System.” Electric Power Research Institutes, Palo Alto, CA, Sep. 1991.

[20]-D.M :Divan, W. Brumsickle, and R. Schneider, "Distributed Floating Series Active Impedance for Power Transmission Systems," U.S. Patent Application #10/679.966.2009.

[21]-Mr :Davidalankrieger « power flow control with distributed flexible ac transmission system (d-facts) devices**.**2010**.**

[22]-Mr :Katherinemargaret rogers « power system control with distributed flexible ac transmission system devices.2012

[23]-Mr :Harjeetjohal « distributed series reactance: a new approach to realize grid power flow control.2008.