



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SIENTIFIQUE

Centre Universitaire d'El Oued

Département d'Electrotechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT
EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

**Compensation statique de
l'énergie réactive dans
les réseaux électriques
(FACTS)**

Proposé & dirigé par :

Dr : Ben Attous Djilani
Mr : Labbi Yacine

Réalisé par :

Briki Naima
Haba Djahida

PROMOTION : 2008

Remerciement

Nous Tenons à remercier avant tout Dieu tout puissant qui nous a donné la volonté , la force et la patience pour élaborer notre travail .

Nos vifs remerciements particulièrement à notre encadreur

Dr :Ben Attous Djilani, pour son aide précieuse , ses conseils constructifs et ses orientations bénéfiques et objectives et surtout sa confiance durant les moments d'efforts pour la réalisation de notre projet.

*Nos exprimons notre profonde reconnaissance et gratitude à :
Monsieur **Labbi Yacine** pour son encouragement pendant toute la période du projet malgré toutes les difficultés .*

Nous remercions également tous les enseignants de l'électrotechnique en particulier :

*Monsieur **Chamssa Ali***

*Monsieur **Gaboussa Seddik***

*Monsieur **Zagab Abou Baker***

Mes remerciement vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur coùtions.

Sommaire

Introduction générale

Problématique

Chapitre I

Compensation Classique

Introduction.....	1
I-1. Limite de la puissance transmissible sur un réseau.....	2
I-2. Compensation de l'énergie réactive.....	5
I-3. Les moyens de compensation.....	6
I-3-1. Les moteurs synchrones.....	7
I-3-2. Les batteries de compensateurs.....	7
I-3-3. Les avantages des batteries.....	11
I-3-4. Les inconvénients des batteries.....	11
Conclusion.....	11

Chapitre II

Technologie FACTS

Introduction.....	12
II-1. Le projet FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System).....	13
II-1-1. Principe de fonctionnement de FACTS.....	14
II-1-2. Réalisation technique des compensateurs.....	19
II-1-3. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS.....	32

Chapitre III

Modélisation des dispositifs de compensation FACTS

Introduction.....	33
III-1. Caractéristique d'un compensateur statique.....	34
III-1-1. Caractéristique en V d'un compensateur statique.....	34
III-1-2. Caractéristique $Q_{svc}(I)$ d'un SVC.....	35
III-2. Modélisation des compensateurs statique.....	36
III-2-1. Introduction.....	36
III-2-2. Modélisation de SVC.....	37

III-2-3. Modélisation de TCR.....	37
III-2-4. Modèle du compensateur shunt SVC.....	39
III-3. Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance....	42
III-4. Control des transits de puissances par dispositifs série TCSC.....	44
III-4-1. Modélisation du TCSC.....	44
III-4-2. Implantation de TCSC dans le problème de l'écoulement de puissance.....	49
III-5. Compensateur universel UPFC (The Unified Power Flow Controller).....	51
III-5-1. Modèle mathématique.....	51
Conclusion.....	54

Chapitre IV

Applications

IV-1.Partie un : Programmation.....	55
IV-1-1.compensation avec SVC.....	55
IV-1-2. Compensation shunt avec TCSC.....	56
IV-2. Partie deux : simulation.....	57
IV-2-1. Compensation sans SVC.....	58
IV-2-2.Compensation avec SVC.....	59

Conclusion générale

Annexe

Bibliographie

PROBLEMATIQUE

L'objectif principal de cette étude est la compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques en utilisant les avantages des dispositifs de compensation dynamiques (FACTS- Flexible Alternative Current transmission system). En partant d'une configuration initiale qui se caractérise par une mauvaise exploitation, c'est-à-dire :

- chute de tension élevée.
- Perte de puissance élevée.
- Surcharge des lignes électriques.

Notre objectif est d'appliquer la technique de compensation dynamique sur les dispositifs FACTS, afin d'assurer une exploitation efficace, c'est-à-dire :

- ❖ Assurer une meilleure stabilité du réseau électrique.
- ❖ Meilleure maîtrise des flux d'énergie.
- ❖ Minimiser les chutes de tensions.
- ❖ Minimiser les pertes de puissances.

INTRODUCTION GENERALE

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs.... etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de l'énergie électrique, pour arriver à augmenter la continuité de service, actuellement les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans la production et le transport d'un réseau électrique.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises 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 perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux.

Les systèmes FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) sont des systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la microélectronique de commande ont été récemment étudiés et réalisés, et sont actuellement pour certains en application normale.

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Généralement, le rôle principal des dispositifs FACTS est la compensation de l'énergie électrique à l'intérieur d'un réseau basée sur les trois domaines de recherche suivants :

- ✓ Le Problème des pertes de puissance, des chutes de tension.
- ✓ L'optimisation de l'écoulement de puissance (Dispatching).
- ✓ La stabilité des tensions.

Dans ce projet, on va étudier la modélisation et l'intégration efficace des dispositifs de compensation dynamique (FACTS) pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

* Le premier chapitre : Nous avons donné dans ce chapitre généralité sur la compensation classique, les moyens de ce compensation et quelques définitions .

* Le deuxième chapitre : Vise à introduire la nouvelle technologie basée sur l'électronique de puissance comme un moyen flexible et dynamique pour mieux gérer le flux de puissance et le contrôle efficace de la tension.

* Le troisième chapitre : Donné une modélisation des dispositifs FACTS (SVC-TCSC-UPFC).

* Le quatrième chapitre : On a exposé en détails les résultats de simulation selon le programme développé sous l'environnement MATLAB.

Introduction :

La question qui a été toujours posé par les ingénieurs particulièrement ceux chargé de l'exploitation des réseaux électrique. Pourquoi compenser l'énergie réactive ? Comment réaliser cette compensation ? Quel est l'emplacement efficace ? Quel type de compensation le mielleux adapté à un problème bien déterminer ? et quel sont les avantages et les inconvénients de cette compensation ?.

Dans ce chapitre on répond en détaille sur ces questions.

I-1. Limite de la puissance transmissible sur un réseau : [1] , [2]

Le transport d'énergie réactive occasionne des chutes de tension qui peuvent atteindre une valeur critique de tension, lorsque un réseau est très chargé, c'est ainsi qu'on prévoit une instabilité de tension.

Cette notion de limite peut être mise en évidence de manière assez simple dans le cas d'un dipôle représenté par la figure (1.1).

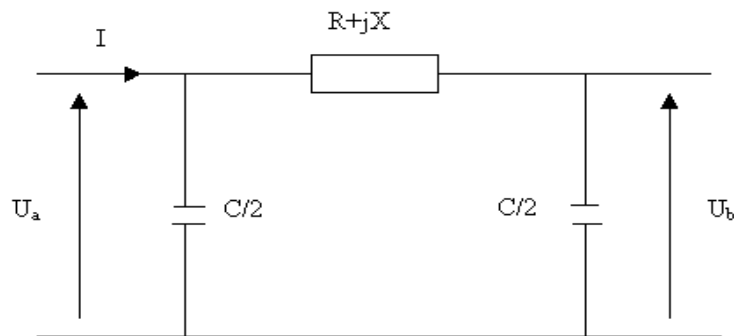


Figure (1.1) :schéma de ligne HT ou THT en π

Nous considérons une impédance :

$$\overline{Z_{ch}} = Z \angle \varphi = Z(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (\Omega) \dots \dots \dots (I.1)$$

Alimentée à travers un réseau assimilable à une impédance :

$$\overline{Z_l} = jX \quad (\Omega) \dots \dots \dots (I.2)$$

Et une tension de source :

$$\overline{V_s} = |V_s| \angle 0^\circ$$

Le courant traversant le dipôle est égale à :

$$\overline{I} = \frac{\overline{V_s}}{\overline{Z_l} + \overline{Z_{ch}}} = \frac{\overline{V_s}}{jX(Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi)}$$

$$\overline{I} = \frac{\overline{V_s}}{Z \cos \varphi + j(X + Z \sin \varphi)}$$

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{Z^2 \cdot \cos^2 \varphi + (X + Z \sin \varphi)^2}}$$

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{Z^2 + X^2 + 2Z \cdot X \cdot \sin \varphi}} \dots\dots\dots (I.3)$$

La tension aux bornes la charge est :

$$\overline{V_{ch}} = \overline{Z_{ch}} \cdot \overline{I} \Rightarrow V_{ch} = Z \cdot \frac{V_s}{\sqrt{Z^2 + X^2 + 2Z \cdot X \cdot \sin \varphi}}$$

$$V_{ch} = \frac{V_s}{\sqrt{1 + \frac{X^2}{Z^2} + \frac{2X}{Z} \sin \varphi}} \dots\dots\dots (I.4)$$

et la puissance active absorbée par la charge est :

$$P_{ch} = V_{ch} \cdot I \cdot \cos \varphi$$

D'après l'équation (I.3) et (I.4) on peut écrire :

$$P_{ch} = \frac{V_s^2 \cdot \cos \varphi}{\frac{1}{Z} (Z^2 + X^2 + 2Z \cdot X \sin \varphi)}$$

$$P_{ch} = \frac{V_s^2 \cdot \cos \varphi}{Z + \frac{X^2}{Z} + 2 \cdot X \sin \varphi} \text{ (W)} \dots\dots\dots (I.5)$$

En cherchant la valeur maximale de la puissance transmissible vers la charge, l'impédance de cette dernière ($Z(\Omega)$) est variable avec conservation du déphasage φ (rad) constant.

$$P_{ch} = P_{\max} \quad \text{si} \quad \frac{dP_{ch}}{dZ} = 0$$

La valeur de Z qui vérifie cette dernière équation est X ce qui donne :

$$P_{MAX} = \frac{V_s^2 \cos \varphi}{2 \cdot X (1 + \sin \varphi)} \text{ (W)} \dots\dots\dots (I.6)$$

Les valeurs réduites des trois grandeurs (courant I^* , tension V_{ch}^* et puissance P_{ch}^*) sont données comme suit :

- $I^* = \frac{I}{I_{cc}} \quad \text{avec} \quad I_{cc} = \frac{V_s}{X}$

$$\text{alors : } I^* = \frac{X}{\sqrt{Z^2 + X^2 + 2X \cdot Z \cdot \sin \varphi}} \dots\dots\dots (I.7)$$

$$\bullet \quad V_{ch}^* = \frac{V_{ch}}{V_s} = \frac{V_s}{V_s \sqrt{1 + \frac{X^2}{Z^2} + \frac{2X}{Z} \sin \varphi}}$$

$$V_{ch}^* = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X^2}{Z^2} + \frac{2X}{Z} \sin \varphi}} \dots\dots\dots (I.8)$$

$$\bullet \quad P^* = \frac{P_{ch}}{P_{\max}} = \frac{V_s^2 \cdot \cos \varphi}{Z + \frac{X^2}{Z} + 2X \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{2X \cdot (1 + \sin \varphi)}{V_s^2 \cdot \cos \varphi}$$

$$P_{ch}^* = \frac{2X(1 + \sin \varphi)}{Z + \frac{X^2}{Z} + 2X \sin \varphi} \dots\dots\dots (I.9)$$

On peut tracer la variation de courant I^* , la tension V_{ch}^* et la puissance active P_{ch}^* en fonction de l'admittance de la charge ($Y_{ch}(\Omega^{-1})$) qui égale à : $Y_{ch}^* = \frac{1}{Z_{ch}}(\Omega^{-1})$, pour une valeur $\varphi(\text{rad})$ constante et $X(\Omega)$ constante.

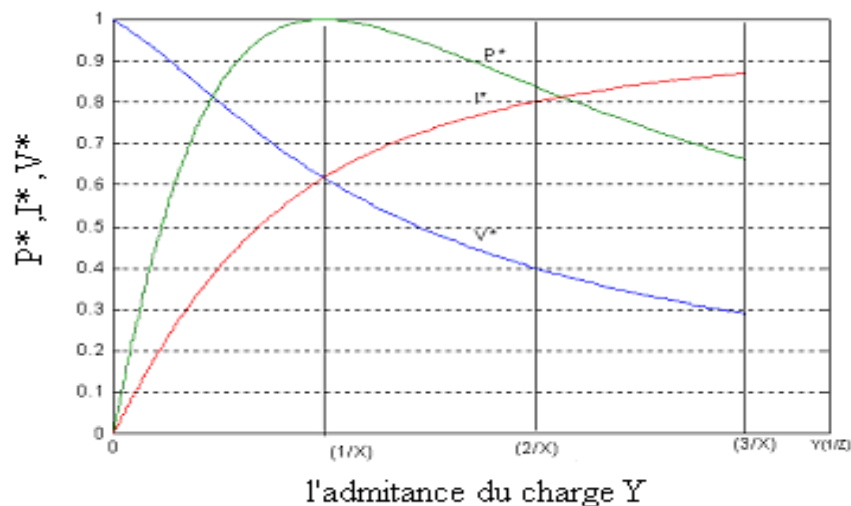


Figure (1.2) Variation des grandeurs électriques aux bornes de la charge

Lorsque la charge croît, on a une augmentions l'admittance $Y_{ch}(\Omega)$, on constate qu' au début la puissance active croît avec le courant, elle augmente ensuite de moins de moins, passe par maximum puis diminue au-delà du maximum, en effet la chute de tension dans le

réseau provoquée par l'appel de courant devient très importante et l'augmentation de courant ne suffit plus à compenser la diminution de tension de charge dans l'expression de P_{ch} (W).

I-2. Compensation de l'énergie réactive : [3] (figure (1.3.a.b))

Pour limiter les courants en ligne et donc l'énergie réactive absorbée par l'installation, on doit donc installer des sources d'énergie réactive en parallèle sur notre installation. On appelle cette technique " *Compensation de l'énergie réactive* ". Cette compensation permet d'améliorer le facteur de puissance ($\cos \varphi$) .Soit un appareil ou groupe d'appareils appelant une puissance active P (W) et une puissance réactive (VAR). On souhaite réduire la $\tan \varphi$ à une valeur plus faible $\tan(\varphi')$.

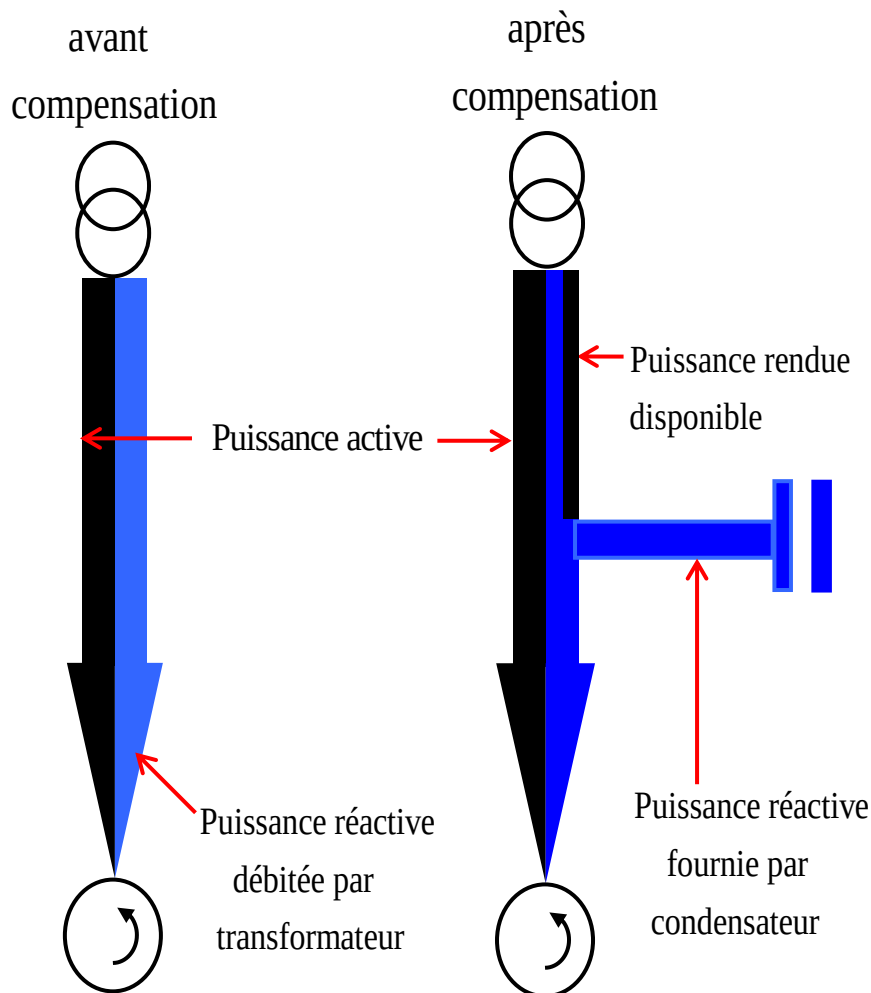
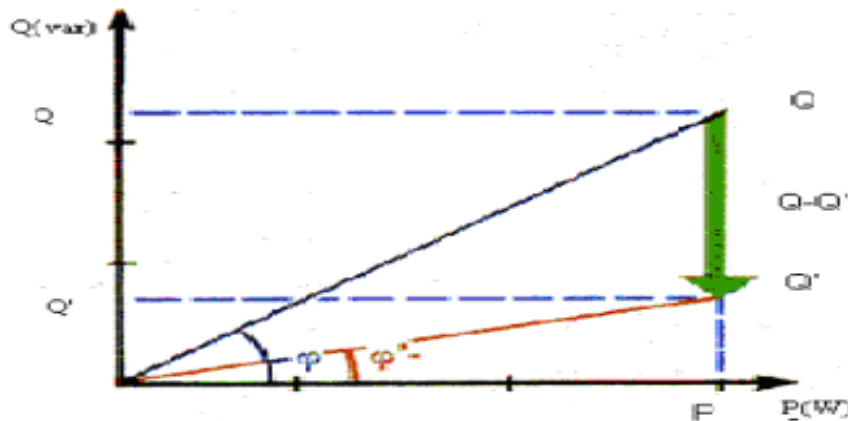


Figure (1.3.a) : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.



Figure(1.3.b):Diagramme vectoriel représentant l'importance de la compensation

Q : la puissance réactive appelée par la charge seul.

$Q-Q'$: la puissance réactive fournie par la source supplémentaire.

Q' : la puissance réactive transitée par la source principale.

P : la puissance active appelée par la charge.

$$Q = P \cdot \tan \varphi \quad \text{et} \quad Q' = P \cdot \tan \varphi'$$

La puissance des condensateurs à installer sera égale à :

$$Q_b = Q - Q' \dots\dots\dots (I.10)$$

$$Q_b = P(\tan \varphi - \tan \varphi') \dots\dots\dots (I.11)$$

les valeurs de $\cos \varphi$ et de $\tan \varphi$ évoluent avec le temps il convient d'utiliser des valeurs moyennes de ces dernières pour l'utilisation de la formule (I.11).

I-3. Les moyens de compensation :

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

- Les compensateurs rotatifs : qui sont les moteurs synchrones.
- Les compensateurs statiques : qui sont les batteries de condensateurs.

I-3-1. Les moteurs synchrones :[4]

On appelle compensateur synchrone, un moteur synchrone qui tourne à vide et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport ou sur un réseau. Pour régulariser la tension d'un réseau, on doit lui fournir une puissance réactive pendant les heures de pointe. Inversement, pendant les périodes creuses, on doit absorber l'excès de puissance réactive générée par les lignes. Le compensateur synchrone permet de compenser ces fluctuations de puissance réactive en ajustant l'excitation selon les besoins.

Le compensateur agit alors comme une énormes capacitance ou inductance variable dont la valeur est réglable en faisant varier le courant d'excitation de son rotor.

I-3-2. Les batteries de condensateurs :[5] [6]

La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance de la charge et de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

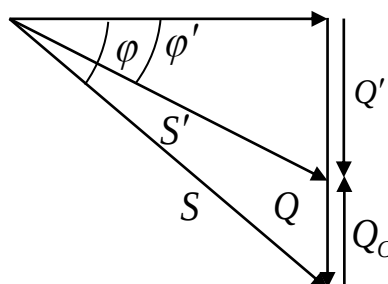
I-3-2-1. La puissance réactive d'une batterie de condensateurs :

Sur une installation de puissance réactive Q , et de puissance apparente S , on installe une batterie de condensateurs de puissance Q_C .

- La puissance réactive passe de Q à Q' : $Q' = Q - Q_C$
- La puissance apparente passe de S à S' .
- La puissance apparente après compensation S' est donc diminuée.

La quantité d'énergie réactive fournie par un condensateur est $Q_C = U^2.C.\omega$ avec :

- U : tension aux bornes du condensateur.
- C : capacité du condensateur.
- $\omega = 2.\pi.f$: pulsation du réseau d'alimentation.



Si nous avons un couplage triangle alors trois condensateurs :

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U^2 \text{ (VAR)} \dots\dots\dots (I.12)$$

avec :

— Q_{Δ} : la puissance réactive du montage (Δ) en (VAR).

— U : tension composé en (V).

— ω : la pulsation de tension en (rad/s).

— C : la capacité d'un condensateur en (farad).

Si nous avons un couplage étoile :

$$Q_Y = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot V^2 \text{ (VAR)} \dots\dots\dots (I.13)$$

avec :

— Q_Y : la puissance réactive du montage étoile en (VAR).

— V : la tension simple en (V) avec $U = \sqrt{3}V$ (V).

donc d'après (I.12), (I.13) on peut déduire:

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot Q_Y \text{ (VAR)} \dots\dots\dots (I.14)$$

De cette dernière formule (I.14), on remarque que l'énergie réactive fournit par le montage triangle est trois fois que l'énergie réactive fourni par le montage étoile et pour ça l'utilisation du montage triangle est très vaste pour la compensation de l'énergie réactive.

I-3-2-2. Types de batteries : [7] [5]

On distingue deux types de batteries suivant leur raccordement :

- le branchement en dérivation pour les batteries shunt .
- le branchement en série entre la source et la charge pour les batteries en série.

I-3-2-2-1. Batterie shunt :

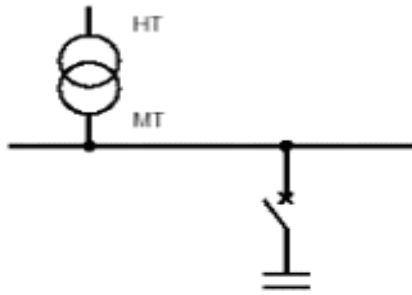
Une batterie de condensateurs shunt est une installation en dérivation du réseau. Elle est raccordée entre phases, ou entre phase et neutre, ou entre phase et terre.

Les batteries peuvent être installées en simple étoile ou en double étoile (figure 1.6) quand elles sont raccordées entre phase et neutre ou terre. Elles sont installées en triangle (figure 1.7) quand elles sont entre phases.

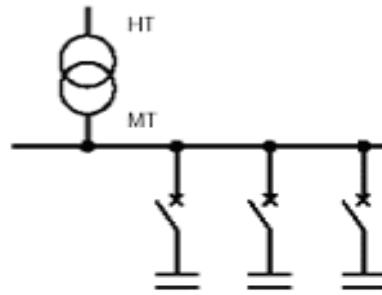
Les batteries shunts sont le plus souvent utilisées sur les réseaux.

Elles peuvent être :

- Uniques (figure 1.4) : Lorsque leur puissance réactive est faible et la charge relativement stable.
- Multiples ou fractionnées (figure 1. 5) : Ce type de compensation est communément appelé en « gradins » (condensateur+disjoncteur). Ce type de batterie est très utilisé par certaines grosses industries (forte puissance installée) et les distributeurs d'énergie (dans les postes sources). Il permet une régulation pas par pas de l'énergie réactive.



Figure(1.4): batterie de condensateur unique



Figure(1.5): batterie de condensateur multiple

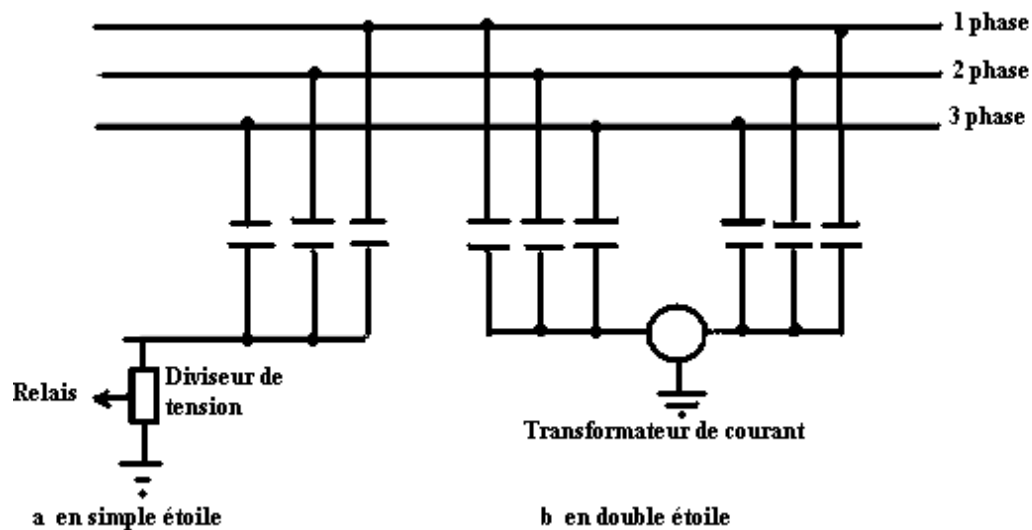
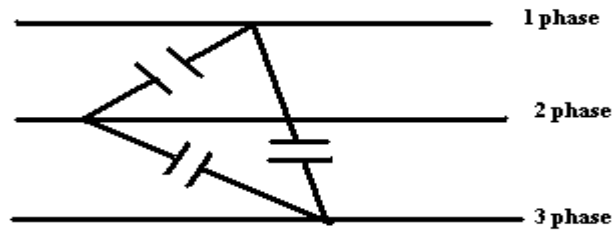


Figure (1.6) :batterie shunt en étoile



Figure(1.7) : batterie shunt en triangle

I-3-2-2-2. Batteries en série :

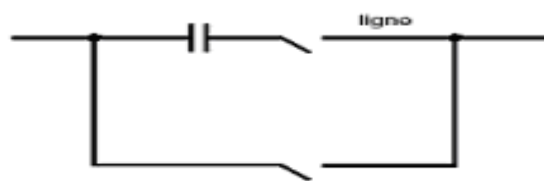
On peut réduire $X = jL$, en insérant en série sur la ligne électrique une capacitance $1/C$; l'impédance de la ligne devient alors d'où $Z < X$.

Les batteries en série sont peu utilisées sur les réseaux, surtout à moyenne et basse tension. Par contre, sur les lignes de transport à grande distance, sous des tensions supérieures à 220kV, leur utilisation est fréquente et leur puissance réactive est toujours importante.

Ces batteries jouent, en plus de l'amélioration de la capacité de transport d'énergie du réseau d'autres rôles :

- maintien de la tension d'un réseau à facteur de puissance normal.
- répartition des charges, dans le cas de lignes fonctionnant en parallèle.

Les puissances des batteries en série atteignent quelques centaines de méga vars. Elles comportent des plates-formes isolées, à la même tension que la ligne (figure 1.8) .



Figure(1.8): batterie série

La mise sous tension de ces batteries est assurée suivant les moyens :

- soit manuelle par disjoncteur ou interrupteur.
- soit semi-automatique par contacteur commandé à distance.

I-3-3. Les avantages des batteries : de tous les équipements statiques :

- l'absence d'usure mécanique et un entretien réduit ;
- de faibles pertes ;
- __un faible volume et une installation facile ;
- __Peuvent être fractionnés suivant les besoins ;
- __Soit leur prix est moins élevé que les compensateurs rotatifs, qu'elle que soit la puissance ;

I-3-4. Les inconvénients des batteries :

- la puissance réactive fournie n'est pas réglable simplement ;
- la puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation ;
- la mise sous tension provoque un violent appel de courant ;
- si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source est proche de celle d'un harmonique existant, cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux ;
- __ l'inconvénient le plus important c'est le régime transitoire après l'enclenchement et déclenchement parce que :

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs destinée à fonctionner en dérivation sur un réseau est accompagné d'un régime transitoire résultant de la charge de la batterie.

Conclusion :

La difficulté de bien évaluer les problèmes liés à la circulation d'énergie réactive, en particulier dans les réseaux électriques, pourrait conduire à envisager, à partir de centrale électrique, la solution **définitive** qui serait capable de résoudre, par nature, tous ces problèmes est les compensateurs statiques.

Mais tous les types de compensateurs statiques ne présentent pas les mêmes possibilités.

La nouvelle technologie de compensation dynamique (FACTS) utilisées pour résoudre le problème de la compensation seront traitées dans le suivant chapitre.

Introduction :

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques.

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui Permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (Interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux.

II-1. Le projet FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) :

Si à l'heure actuelle les dispositifs électromécaniques ou purement passifs sont largement utilisés [2]. Ils répondent de moins en moins aux contraintes nouvelles imposées par les développements des réseaux.

Le projet FACTS a pour ambition de dépasser les limites actuelles des équipements.

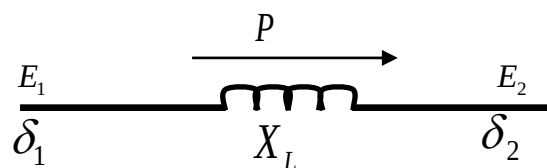
Pour cela il est mis à profit les possibilités offertes par l'électronique de puissance (rapidité et faible maintenance).

Les systèmes FACTS peuvent être par exemple :

- Les compensateurs d'énergie réactive qui soutiennent la tension du réseau au point de connexion en contrôlant le flux de puissance réactive.
- Les condensateurs séries réglables qui modifient l'impédance de la ligne et permettent alors de contrôler la puissance qui transite sur celle-ci.
- Les déphaseurs qui modifient la puissance transite sur une ligne en changeant la phase de la tension à un nœud donné.

Nous allons nous intéresser aux principes de fonctionnement des principaux dispositifs FACTS. Les compensateurs d'énergie réactive, les compensateurs séries réglables et les déphaseurs. C'est -à- dire uniquement les dispositifs qui permettent de contrôler le transit de puissance sur une ligne et sa tenue en tension.

L'exemple qui suit illustre le transport de puissance sur une ligne à courant alternatif, suppose sans pertes et modélisée par une réactance X_L .



La puissance qui transite dans cette ligne est donnée en fonction des tensions aux extrémités de la ligne E_1 et E_2 . Du déphasage entre ces tensions δ_{12} et l'impédance de la ligne X_L .

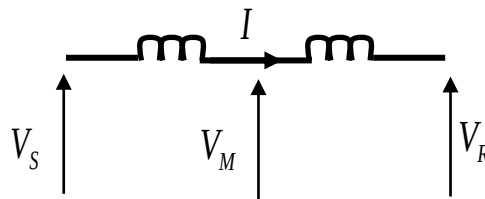
$$P = \frac{E_1 E_2}{X_L} \sin \delta_{12} \dots \dots \dots (II.1)$$

II-1-1. Principe de fonctionnement des FACTS :

Nous nous intéressons qu'aux principaux dispositifs FACTS cités plus haut, ces derniers sont des compensateurs shunt, série et des déphaseurs. Pour cela nous prendrons l'exemple d'une ligne de transport dans laquelle sont insérés ces dispositifs. [8]

II-1-1-1. Ligne de transport seule :

On considère une ligne de transport, que l'on peut décomposer en deux demi ligne d'impédance $\frac{X_L}{2}$.



V_S : Tension aux bornes de la source.

V_R : Tension aux bornes du récepteur.

V_M : Tension aux milieu de la ligne.

X_L : Impédance (réactance) de la ligne.

I : Courant de ligne.

On considère que les tensions à chaque extrémité de la ligne sont égale à V et que le déphasage entre elles est δ_{12} . La puissance transmise sur la ligne, est alors donnée par l'équation (II.2) :

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta_{12} \dots \dots \dots (II.2)$$

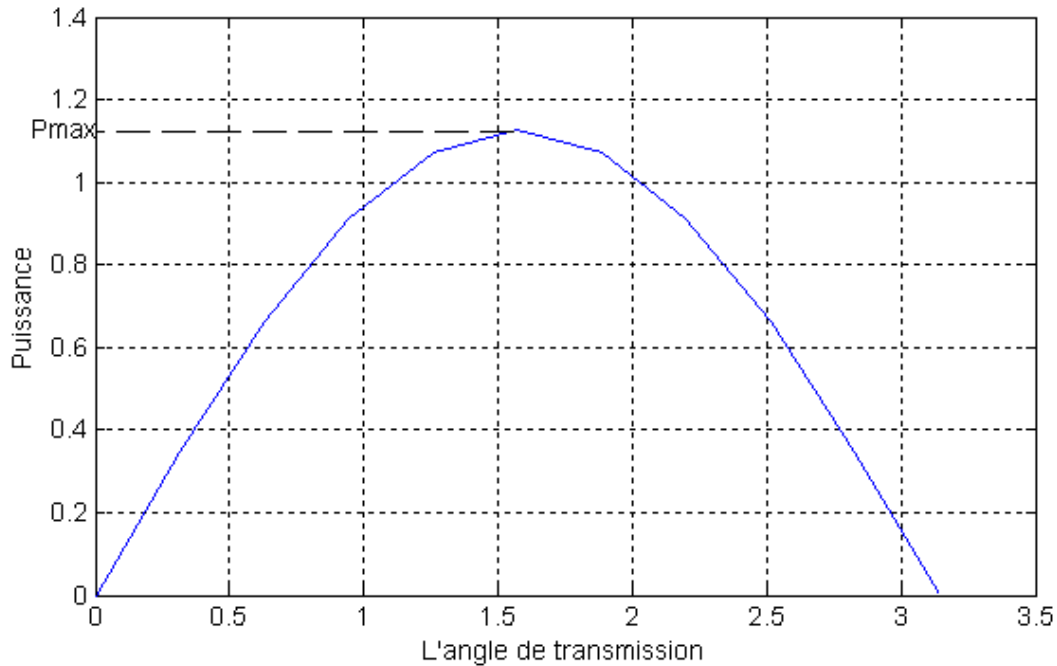


Figure (2.1) : Courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission

Le transfert maximal de puissance transmissible sur la ligne est alors obtenu pour un déphasage δ_{12} de $\frac{\pi}{2}$ (Figure 2.1).

II-1-1-2. Compensation shunt par un compensateur d'énergie réactive :

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 , en contrôlant le flux de puissance réactive (Figure 2.2). En effet, la chute du tension à travers une ligne est donnée par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne.

$$\Delta V = \frac{X_L Q}{V} \dots\dots\dots (II.3)$$

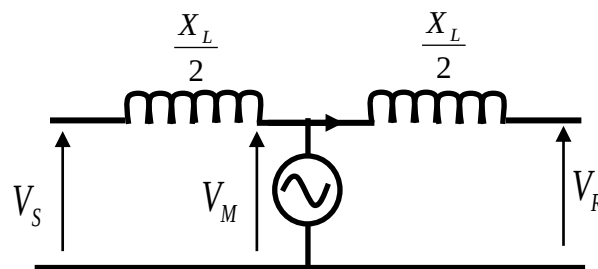


Figure (2.2) : Compensation shunt d'une ligne

L'équation (II.4) donne l'expression de la puissance transmise par la ligne compensée. On remarquera que la puissance maximal transite est doublée et est obtenu pour un déphasage $\delta = \pi$ (Figure 2.3). Une compensation shunt permet donc de doubler le transit de puissance maximal d'une ligne.

$$P = \frac{2V^2}{X_L} \sin \frac{\delta_{12}}{2} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

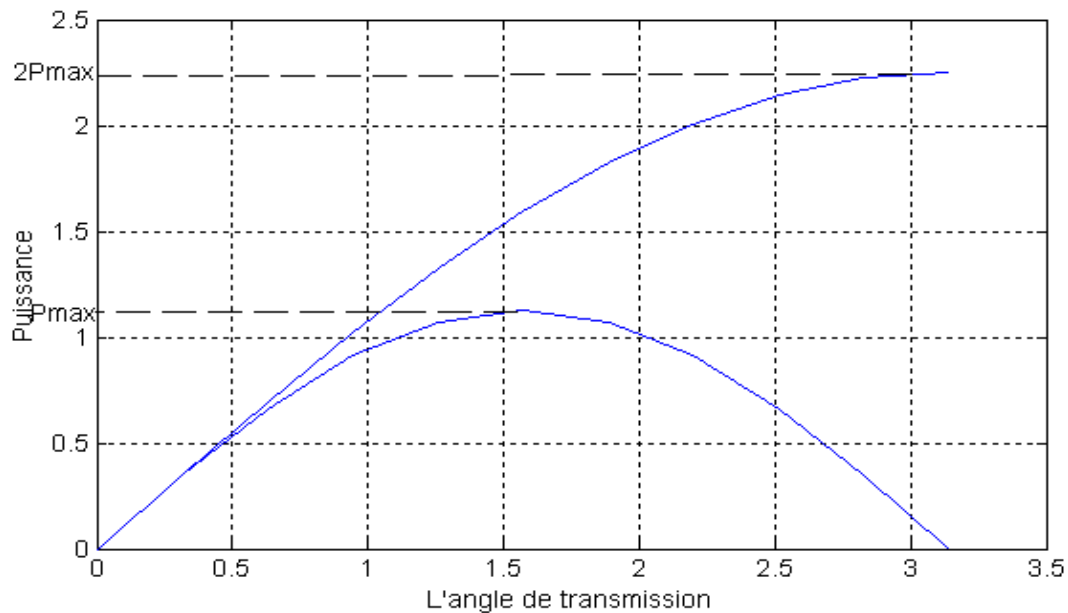


Figure (2.3) : courbes de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission

II-1-1 -3. Principe de la compensation séries :

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductif, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance en ajoutant une réactance de type capacitif. En conservant le même modèle de ligne. On obtient la compensation série donnée par Figure (2.4)

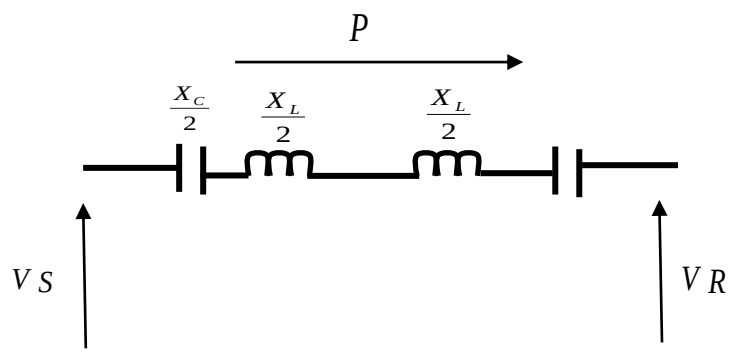


Figure (2.4) : Principe de la compensation

La réactance introduite aura la valeur X_C , donnée par l'équation (II.5)

$$X_C = SX_L \dots \dots \dots (\text{II.5}), S \text{ est degré de compensation } 0 \leq S \leq 1$$

L'impédance total entre le récepteur et la source est maintenant donné par l'équation (II.6).

La puissance transmise, exprimée par l'équation (II.7), est alors fonction du degré de compensation S (Figure 2.5).

$$X_{TOTAL} = X_L - X_C = (1 - S)X_L \dots \dots \dots (\text{II.6})$$

$$P = \frac{V^2}{X_L(1 - S)} \sin(\delta_{12}) \dots \dots \dots (\text{II.7})$$

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.

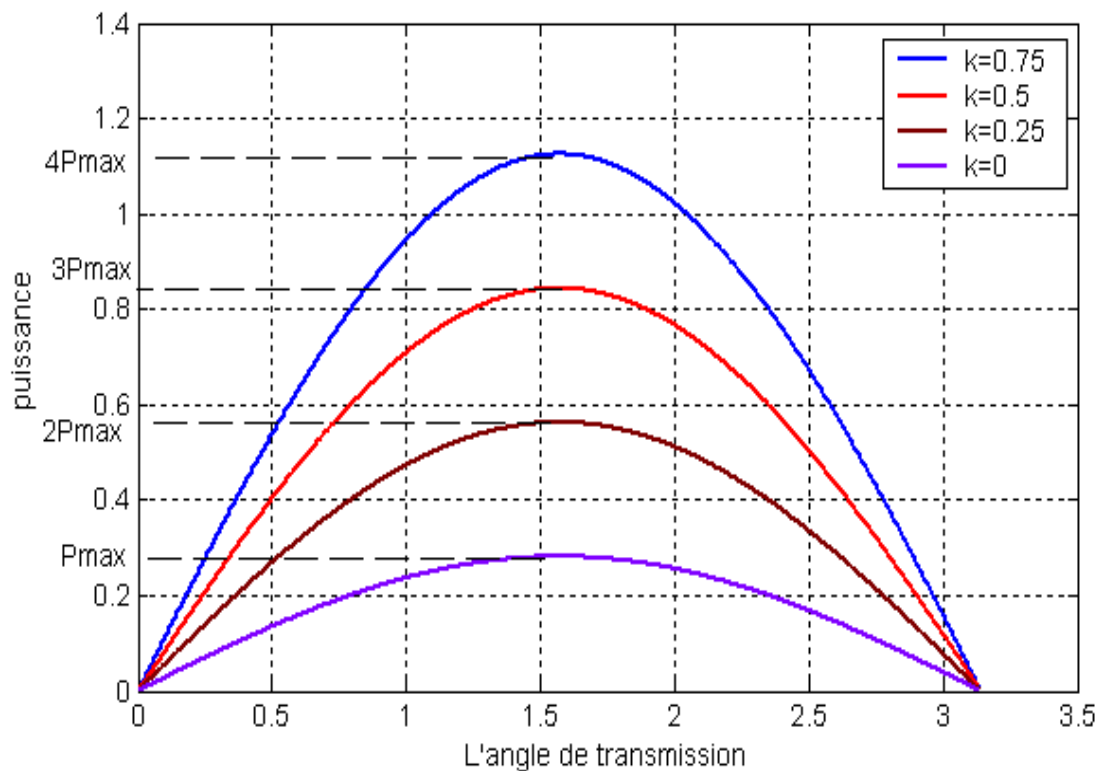


Figure (2.5) : courbe de puissance avec et sans compensation série

II-1-1 -4. La compensation par déphasage :

Le principe de cette compensation est basé sur l'insertion d'un déphaseur sur la ligne. Ce dispositif est modélisé par une source de tension, d'amplitude et phase variables. On peut alors avoir en sortie du déphaseur une tension V_S de même amplitude qu'à l'entrée V_G mais déphasée de l'angle α (Figure 2.6)

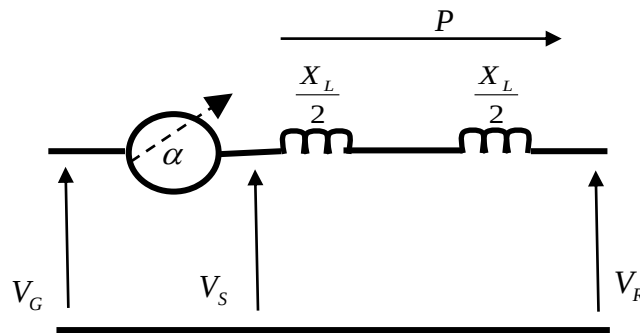


Figure (2.6) : Principe de compensation par déphasage

La puissance transmissible sur la ligne est alors fonction de l'angle déphasage α (équation (II.8)).

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta + \alpha) \dots \dots \dots (II.8)$$

Pour ce type de compensation, la puissance maximale n'est pas augmentée, mais le réglage de α permet le réglage transit de puissance. Ce dispositif fonctionne finalement comme une vanne électronique.

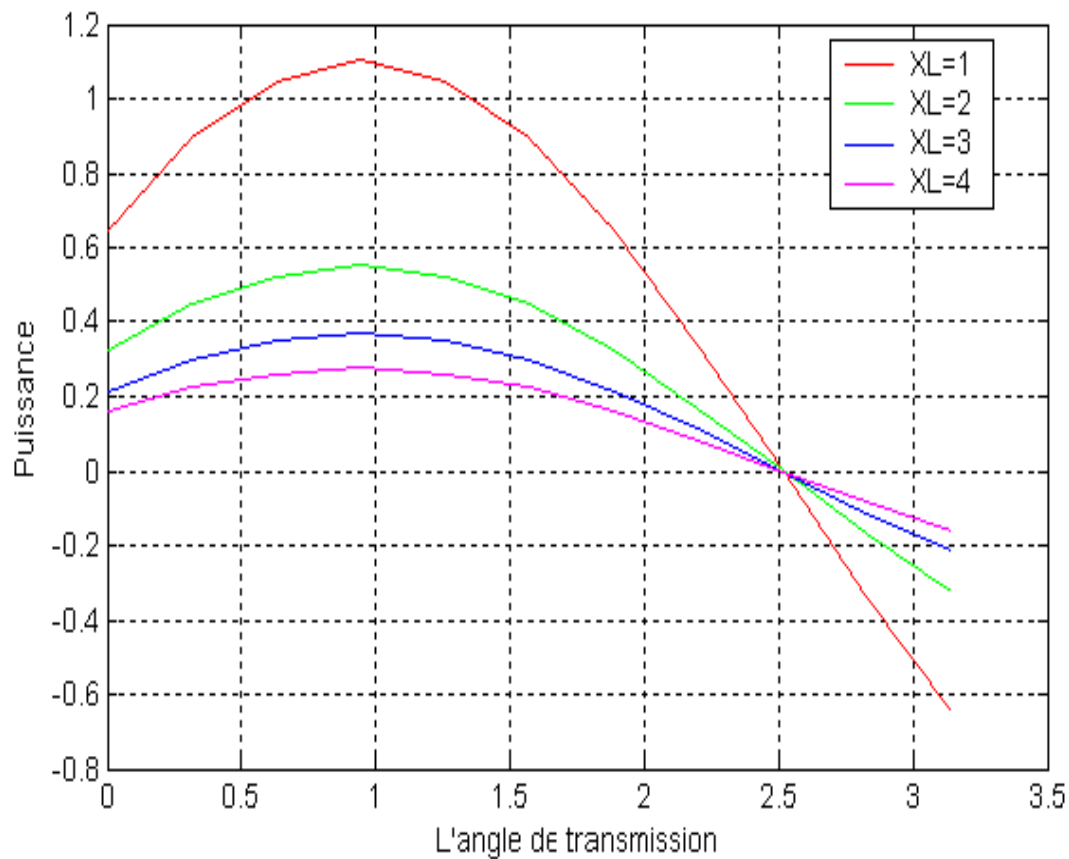


Figure (2.7) : compensation par déphasage pour $\alpha = \frac{\pi}{5}$

II-1-2. Réalisation technique des compensateurs :

Les principaux compensateurs présentés nous montrent maintenant les moyens techniques de réalisation. Diverses méthodes existaient bien avant le lancement du projet FACTS, mais l'évolution des composants de l'électronique de puissance tel que les GTO (Gate turned-off : thyristor à ouverture par la gâchette), permis d'une rapidité de cette technologie.

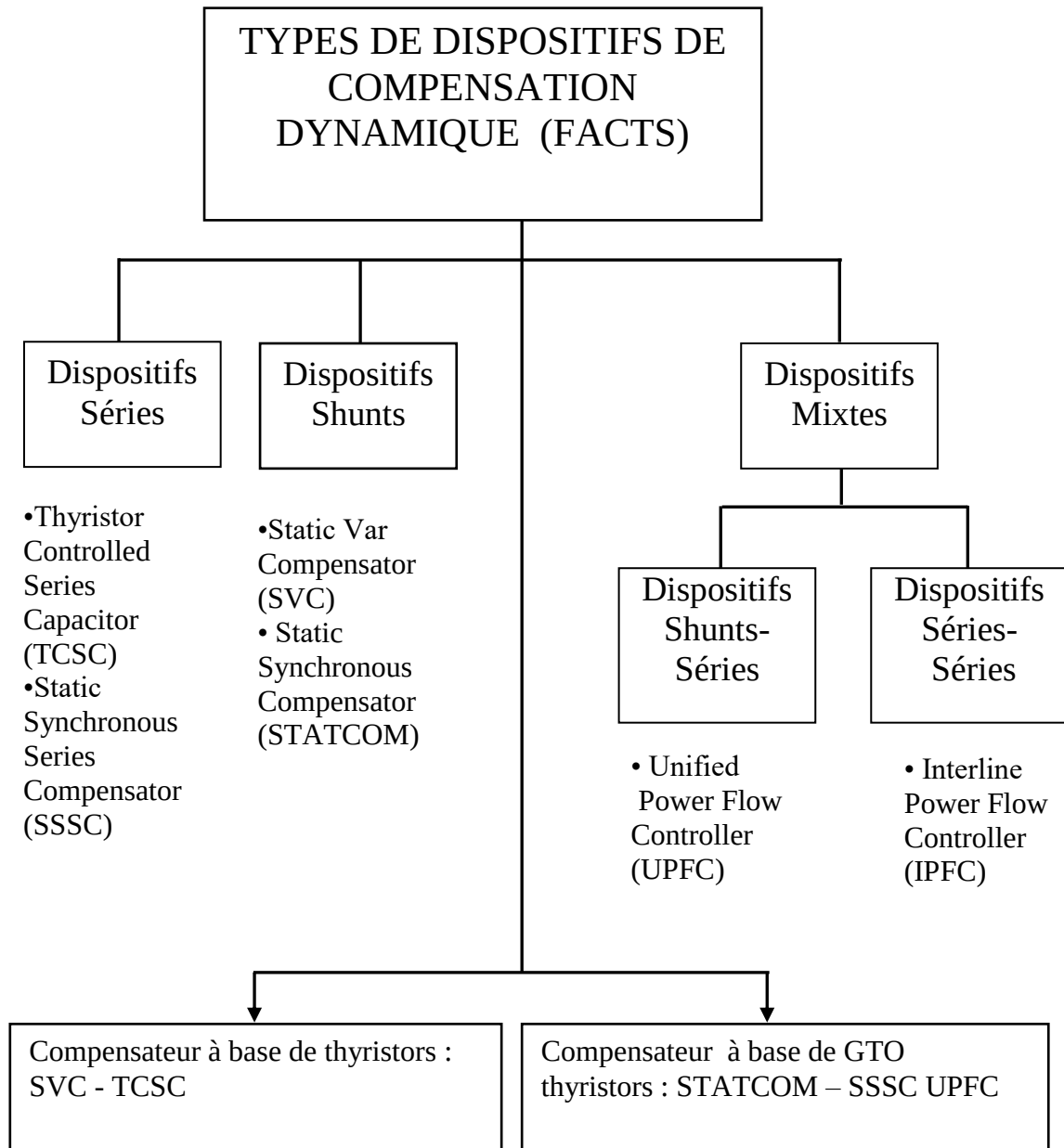


Figure (2-8): Classification des dispositifs FACTS

II-1-2-1. Compensateurs parallèles :

Le compensateur d'énergie réactive a déjà fait ses preuves sous la forme d'une machine synchrone couplée au réseau et fonctionnant à vide. La puissance active alors consommée est uniquement liée aux pertes des machines. Le réglage du transfert d'énergie réactive se fait par le biais de l'excitation de la machine.

Ce principe de réglage, outre les nuisances sonores, nécessite un coup d'investissement initial et d'entretien non négligeables. Par ailleurs, l'inertie de la machine implique des temps de réponse conséquents.

Des inductances et des condensateurs commandés par des interrupteurs mécaniques ont été largement utilisés et le demeurent encore. Ce sont tout simplement des l'inductances ou des batteries condensateurs qui sont connectées au réseau en fonction de l'énergie réactive que l'on veut absorber ou fournir. Cette technique ne permet pas un réglage fin, et n'a pas un temps de réponse suffisamment rapide pour compenser de fortes variations d'énergie, de plus, les parties mécaniques demandent une importante.

II-1-2-1-1. Compensateurs parallèles à base de thyristors :

Il s'agit de :

• TCR (Thyristor Controlled Reactor) :

Dans le TCR (ou RCT : Réactances Commandées par Thyristors), la valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors .

• TSC (Thyristor Switched Capacitor) :

Dans le TSC (ou CCT : Condensateurs Commandés par Thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction.

• SVC (Static Var Compensator) :

Compensateur statique de puissance réactive rapide peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différentes régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation d'un compensateur statique de puissance réactive en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profile de tension régulier sous différents régimes. De

surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension.

Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques les RCT (Réactances commandées par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin des années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristors tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins d'une demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

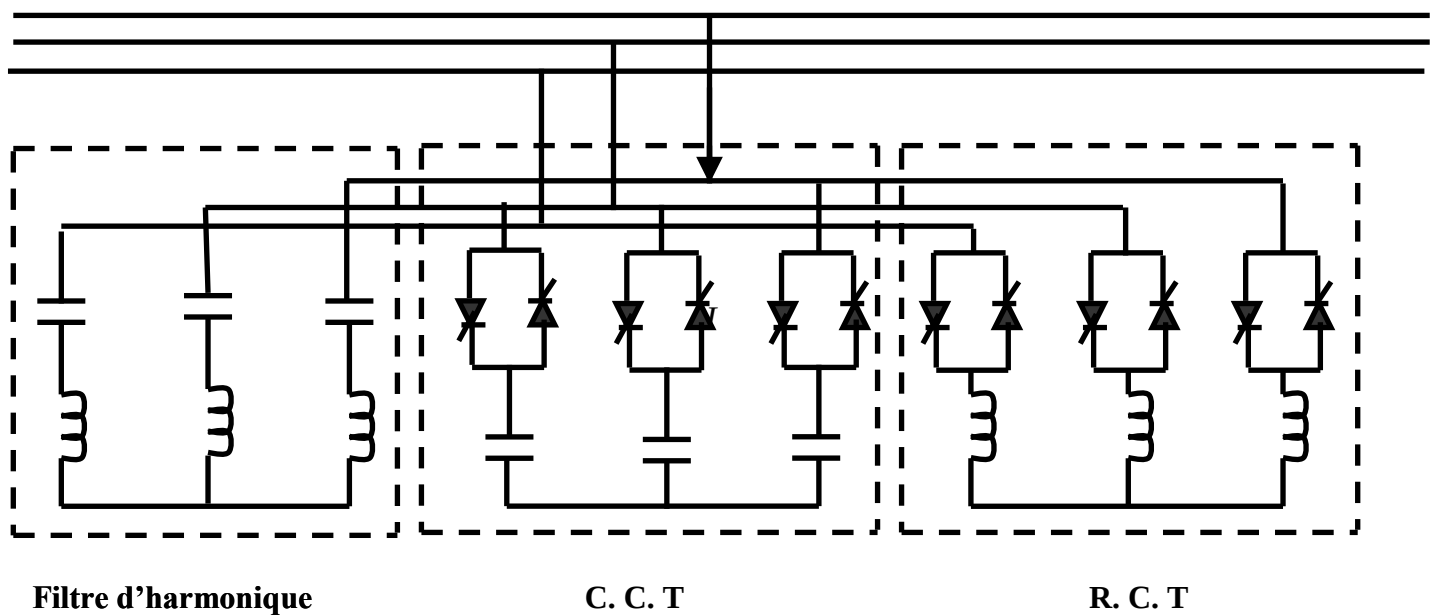


Figure 2.9:schéma du SVC

❖ Principe de fonctionnement :

La figure (2.10) donne une représentation schématisée 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.

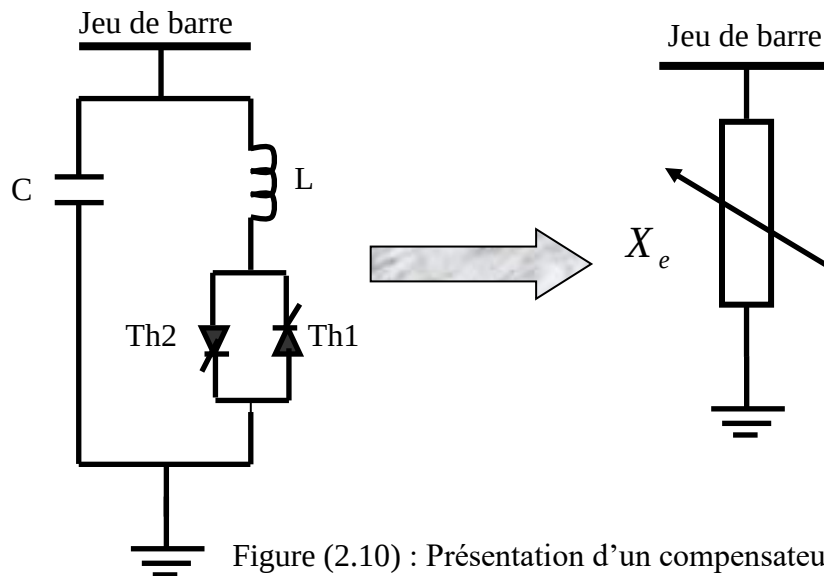


Figure (2.10) : Présentation d'un compensateur SVC

Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'éléments inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateurs commandés par thyristor (CCT) qui fournissent de l'énergie réactive au réseau. Dans son fonctionnement, cette fois-ci 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 sur les harmoniques à éliminer. L'association 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 a été installé en 1979 en Afrique du Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (2.11) : trois zones 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 (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V < V_{MIN}$: est une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.

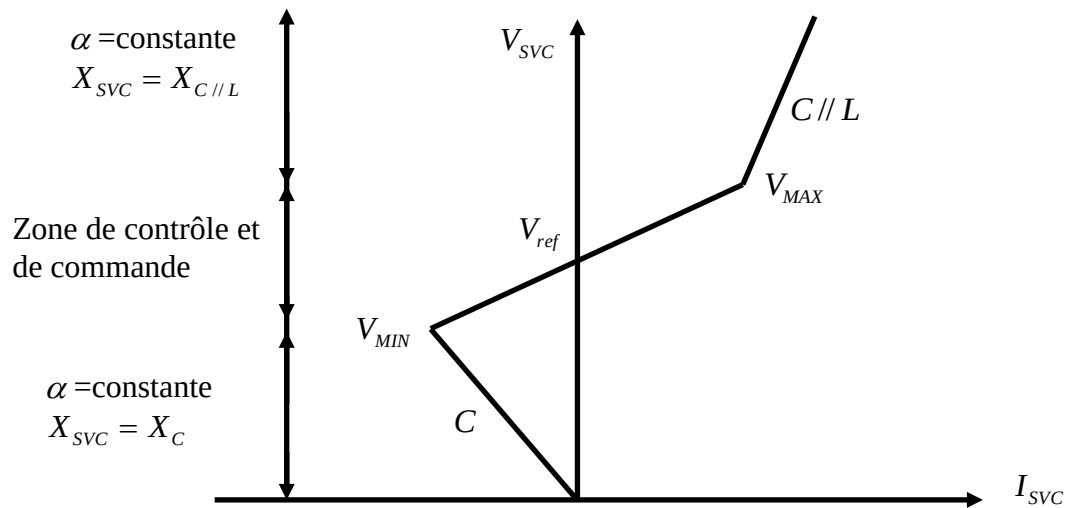
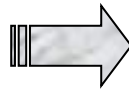


Figure (2.11) : fonctionnement du compensateur statique

Exemple de SVC:

- 160 SVC utility inst. since 1975
- In service today > 32 000 MVA
- 500 MVA in manufacturing

**• TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)**

Ce type de compensateur connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations.

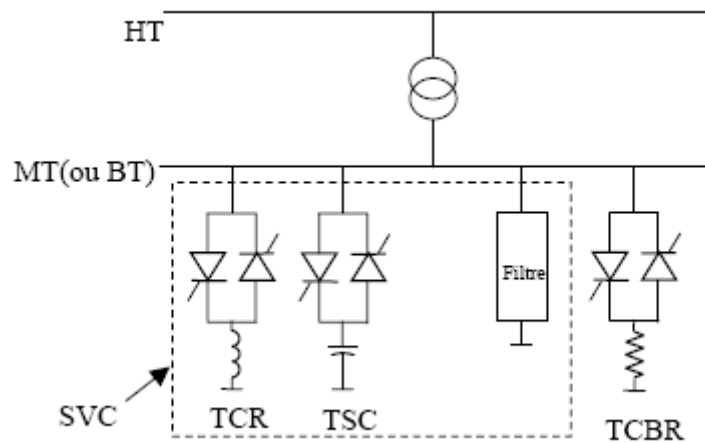


Figure (2.12) : Schéma du SVC et TCBR

II-1-2-1-2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

Il s'agit du STATCOM (STATic COMpensator) qui a connu jusqu'à présents différents appellations:

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (STATic CONDenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVClight
- SVCplus

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance.

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.

Le STATCOM peut être conçu pour agir également en tant que filtre active pour absorber les harmoniques du système.

Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est -à -dire formés de GTO et de diodes en antiparallèle.

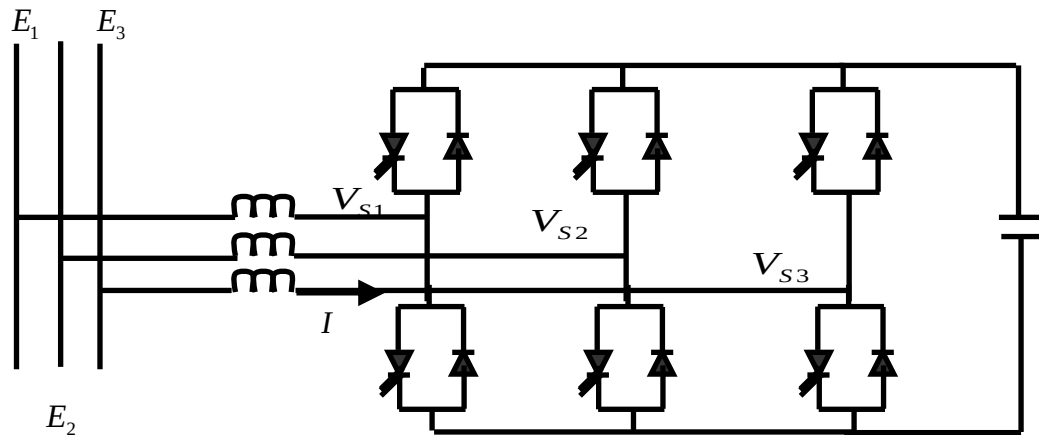


Figure (2.13) : Structure de STATCOM

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau.

Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

L'échange d'énergie réactive se fait par le control de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau E .

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

- Si $V_s < E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est capacitif (Figure 2.14-a).
- Si $V_s > E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est inductif (Figure 2.14-b).
- Si $V_s = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

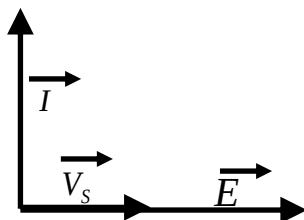


Figure (2.14a) : Courant capacitif

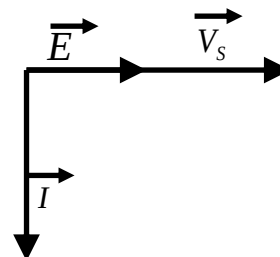


Figure (2.14b) : Courant inductif

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.

D'avantage de ce dispositif est pouvoir échange de l'énergie avec un comportement inductif et capacitif uniquement à l'aide d'une inductance.

Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui peut entraîner des résonances avec les éléments inductifs. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (2.15) ce dispositif à l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension E diminue, contrairement au SVC.

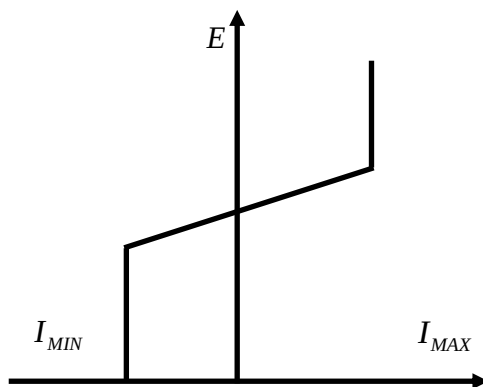
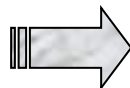


Figure (2.15) : Caractéristique statique du STATCOM

Exemple de STATCOM :

- 19 VSCs installed since
- In service today >1500
- >300 MVA in



II-1-2-2.Compensation série :

Le principe de ces compensateurs est de modifier l'impédance de la ligne de transport en insérant des éléments en série avec la ligne. Pour modifier l'impédance d'une ligne

essentiellement inductive. On insère de éléments capacitifs. On va bien sur chercher à contrôler l'impédance de la ligne, en utilisant des condensateurs séries réglables.

II-1-2-2-1. Compensateurs séries à base de thyristor :

Les plus connus sont :

• TCSC (thyristors controlled Série compensator) :

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Cet ensemble est inséré sur la ligne de transmission (Figure 2.16).

Où

X_C : est l'impédance du condensateur du TCSC.

X_I : est l'impédance de l'inductance du TCSC.

X_L : est l'impédance de la ligne.

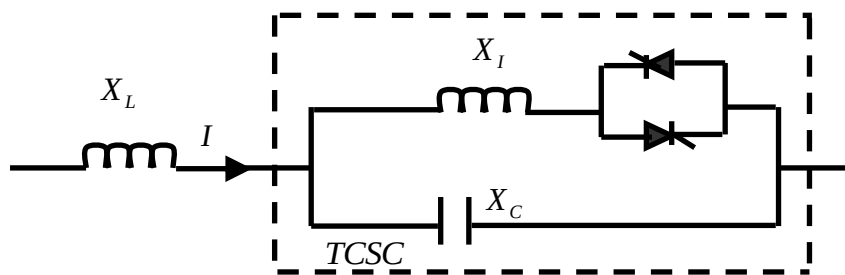


Figure (2.16) : Insertion d'un TCSC sur une ligne

Ce dispositif a trois modes de conduction :

- 1- Les thyristors ne sont pas commandés, l'impédance du dispositif est alors X_C
- 2- Les thyristors sont commandés en pleine conduction, l'impédance équivalente est égale à l'impédance du condensateur X_C en parallèle avec l'impédance de l'inductance X_I .
- 3- Les thyristors sont en conduction partielles, l'impédance du dispositif est donc fonction de l'angle de retard à l'amorçage α (Figure 2.17).

On remarque qu'il y'a une zone où l'impédance n'est pas déterminée.

L'avantage du TCSC est d'obtenir une impédance variable avec un temps de réponse intéressant. Mais il peut engendrer des instabilités s'il est commandé près de la résonance. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.

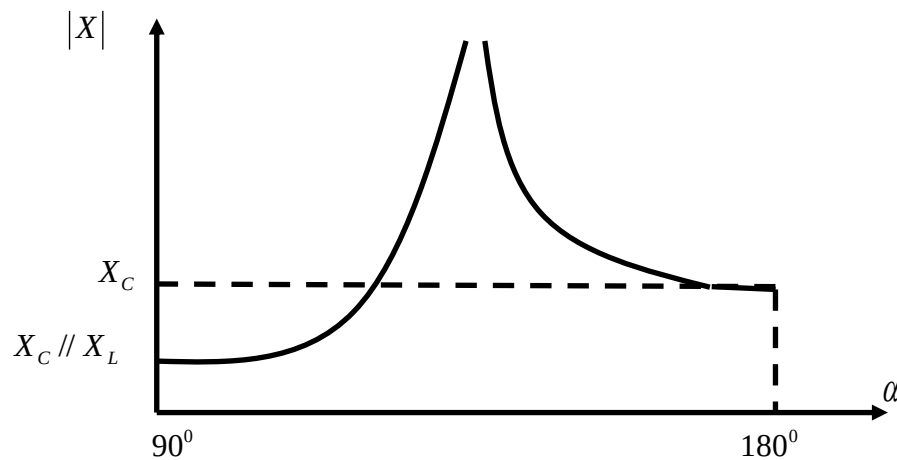


Figure (2.17) : Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors

A la réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relié à travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de 180 degrés, le réacteur devient non conducteur 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 conduisant, et toute impédance devient inductive, par ce que l'impédance de réacteur est conçue pour être beaucoup inférieure au condensateur en série impédance. Avec 90 degré, le TCSC aide en limitant le courant de défaut.

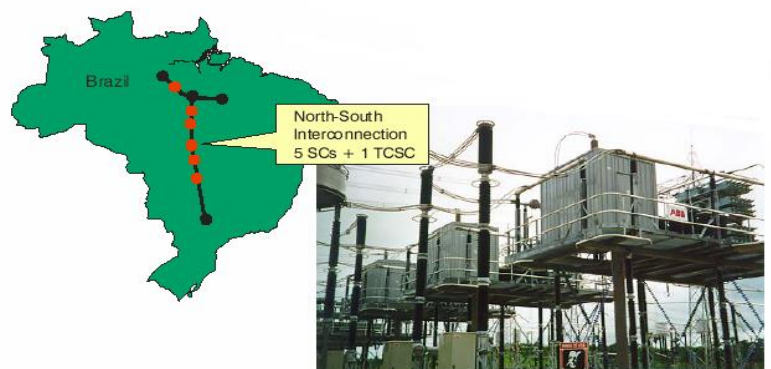
Inductive de série sans a –coup variable.

Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôlés de réacteur comme limiteur de courant de défaut.

Exemple de TCSC :

Location Rating Voltage

- Maraba 348 Mvar SC 500 kV
- Miracena 161 Mvar SC 500 kV
- Colinas 2x161 Mvar SC 500 kV
- Imperatriz 161 Mvar SC 500 kV
- 107 Mvar TCSC 500 kV



- **TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) :**

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° .

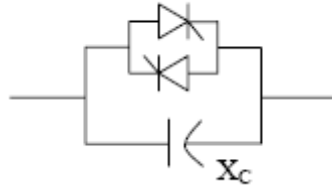


Figure (2.18): Structure du TSSC

- **TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) :**

TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable.

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180° , il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut.

Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180° , la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90° , où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

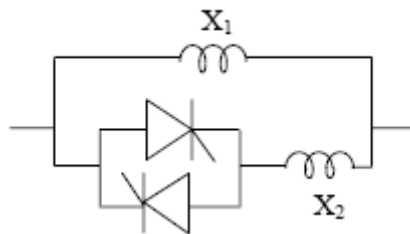


Figure (2.19): Structure du TCSR

- **TSSR (Thyristor Switched Series Reactor) :**

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° .

II-1-2-2-2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors :

- **SSSC (Static Synchronous Series Compensator) :**

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 (Fig. 2.20).

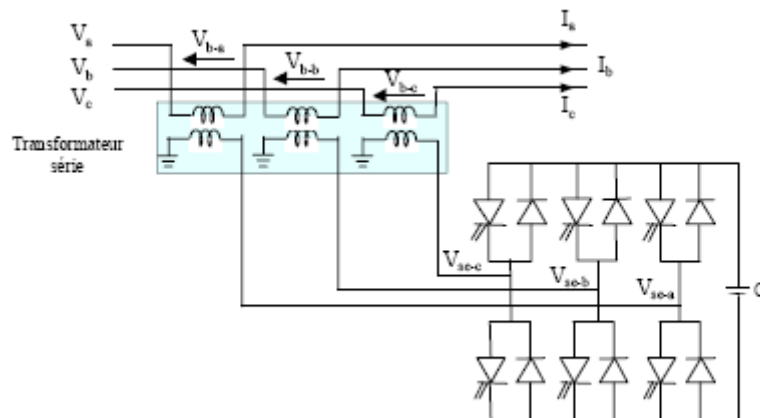


Figure (2.20) : Schéma de base du SSSC

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.

$$V_b = -KXI$$

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 suivante :

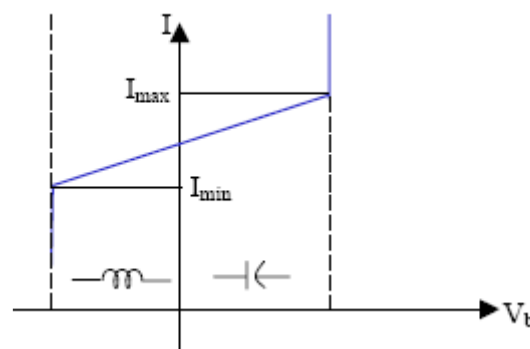


Figure (2.21) : Caractéristique statique du SSSC

II-1-2-3. Compensateurs hybrides série – parallèle :

- **UPFC (Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance) :**

Le contrôleur unifié d'écoulement de puissance (UPFC) est un dispositif FACTS qui combine à la fois les avantages de contrôle de la compensation série et shunt, par son ajustement simultané ou séparé des paramètres clés du réseaux électrique.

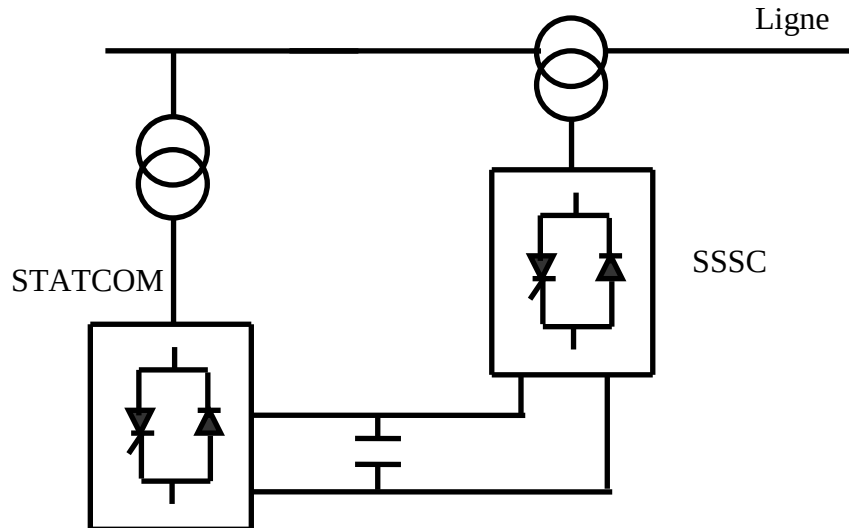


Figure (2.22) : Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow controller)

II-1-3. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

Introduction :

Les dispositifs de transmission à courant flexible (FACTS) sont des moyens de contrôle rapide et flexibles qui peuvent être insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins, tels que la régulation optimale des puissances actives, la compensation de la puissance réactive et le renforcement de la stabilité des réseaux électriques.

Les dispositifs FACTS sont capables de réaliser plusieurs fonctions, telles que : l'augmentation de la capacité de transfert, le renforcement de la stabilité et la réduction du coût de production de l'énergie électrique.

L'implantation de ces dispositifs nécessite de nouvelles méthodes d'études et d'analyses ainsi que des modèles efficaces.

Dans ce chapitre, on expose d'une manière générale les principaux modèles des dispositifs de compensation dynamique (SVC, TCSC, UPFC) permettant leur implantation dans les réseaux électriques afin d'améliorer les indices de qualité de l'énergie électrique.

III-1. Caractéristique d'un compensateur statique :

III-1-1. Caractéristique en V d'un compensateur statique :

Ajustons l'angle α des thyristors commandant la branche inductive à 90° , de façon à obtenir la pleine conduction. Le courant est alors à sa valeur maximal, la droite $L//C$ (figure(3.1))

montre la relation entre la tension U et le courant I_{SVC} .

$$I_{SVC} = \frac{U}{X_L // X_C} (A) \dots \dots \dots (III.1)$$

$$Q = \frac{U^2}{X_L} - \frac{U^2}{X_C} (\text{var}) \dots \dots \dots (III.2)$$

Lorsque l'inductance est débranchée alors l'angle des thyristors est 180° et que le condensateur

est en service, le courant total par phase sous une tension U est égale $\frac{U}{X_C}$.

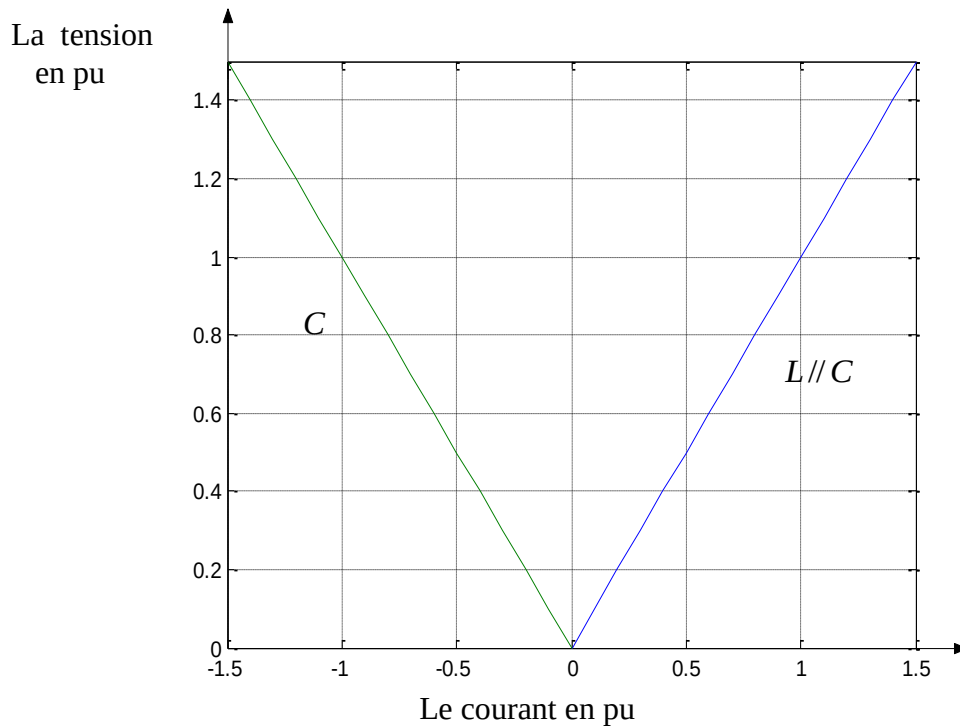
La coutume est d'apposer un signe (-) à ce courant capacitif pour le distinguer du courant inductif. La relation entre le courant et la tension est alors une nouvelle droite, désignée C (figure(3.1)).

$$I_{SVC} = \frac{U}{X_C} \dots \dots \dots (III.3)$$

$$Q = -\frac{U^2}{X_C} \dots \dots \dots (III.4)$$

Les droites $L//C$ et C forment ensemble une « courbe en V » qui correspond aux limites inductive et capacitive du compensateur statique.

Cette figure pour $X_C = 2 * X_L$.



Figure(3.1) : la caractéristique en V d'un SVC

D'après cette courbe, on a un courant capacitif lorsque le condensateur est en service et l'inductance est débranchée donc le montage génère une puissance réactive et cette puissance est en fonction du capacité du condensateur et de la tension. Lorsque les deux sont en service le montage génère ou consomme une puissance réactive.

III-1-2. Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC :

pour fixer le signe de la puissance réactive Q . Le compensateur est considéré comme un consommateur. La puissance réactive Q est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Si par contre le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), cette dernière est considérée comme étant négative, aussi bien un courant I . Ces relations sont prises en compte sur la figure(3.2). Par conséquent, suivant les exigences imposées par les consommateurs et les lignes de transmission dans une sous-station, la puissance réactive Q doit varier entre une certaine valeur inductive Q_L et une certaine valeur capacitive Q_C , avec

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \dots\dots\dots (III.5)$$

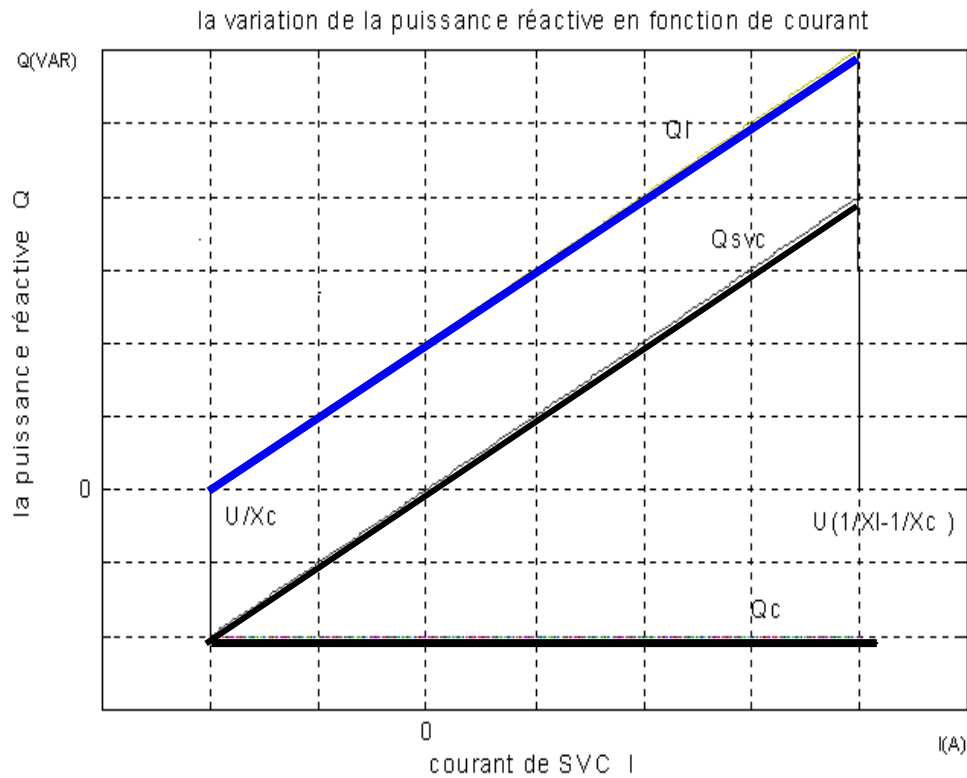


Figure (3.2) : Variation de la puissance réactive en fonction du courant

III-2. Modélisation des compensateur statique :

III-2-1. Introduction :

Les modèles de SVC les plus courants sont des modèles statiques, car conçus pour des logiciels de répartition de charges [2]. Lesquels sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, susceptance, nœuds, etc...

Le modèle statique est constitué d'une susceptance B_e reliée entre le nœud de charge et le potentiel nul. La susceptance est définie comme la partie imaginaire de l'admittance.

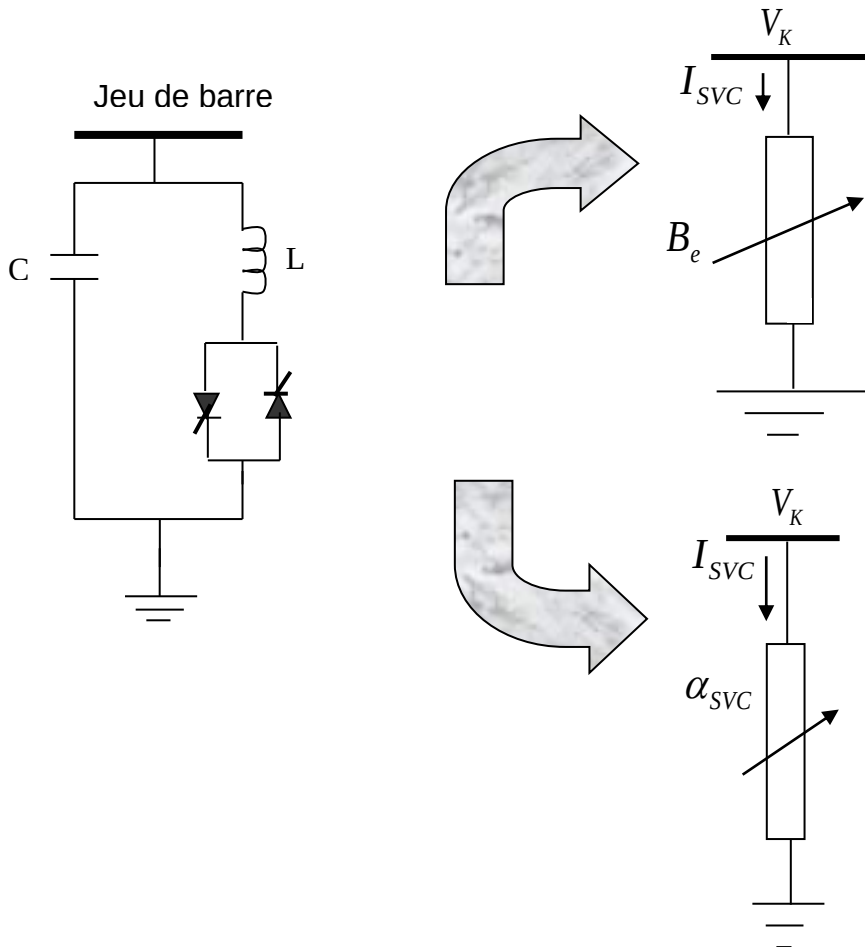
III-2-2. Modélisation de SVC :

Figure (3.3) :Présentation d'un compensateur SVC

V_K : est la tension du réseau où est connecté le SVC.

B_e : est la susceptance.

I_{sVC} : est le courant dans le SVC.

V_{ref} : est la tension de référence dans le SVC.

III-2-3. Modélisation de TCR :

On peut faire varier le courant dans l'inductance L en ajustant l'angle de retard α entre 90° et 180° , la figure(3.4) montre la forme d'onde du courant pulsé, la valeur du courant instantané est donnée par la forme :

$$i_{tcr} = \frac{1}{L} \int v(t) dt \dots \dots \dots (III.6)$$

Si l'allure de la tension une forme sinusoïdale

$$v(t) = U * \sin(\omega t) \quad (V) \dots\dots\dots (III.7)$$

$$i_{tcr} = \frac{U}{\omega L} \left(\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (A) \dots\dots\dots (III.8)$$

i_{tcr} : Courant du réactance qui contrôlé par thyristor

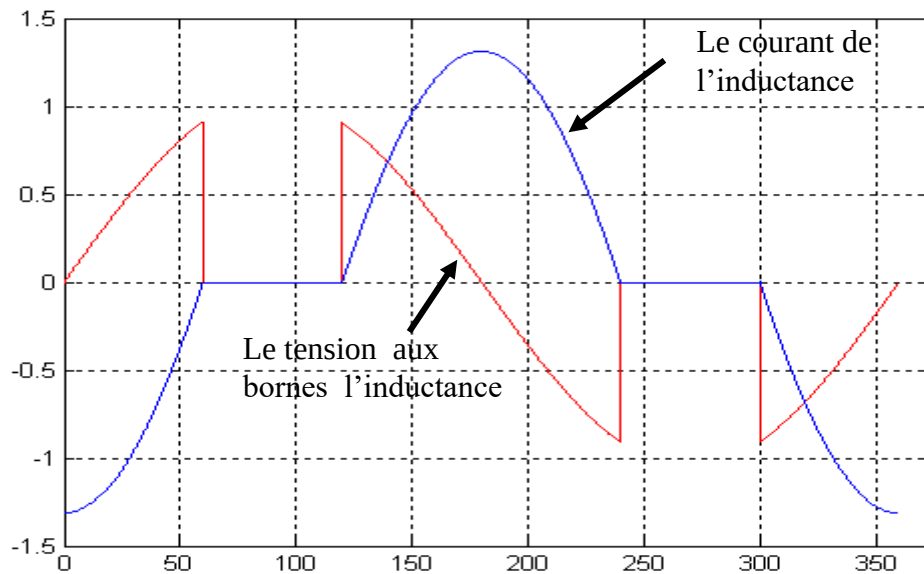


Figure (3.4) : La forme de la tension et du courant de l'inductance

Le courant pulsé comprend une composante fondamentale et des harmoniques. C'est la composante fondamentale du courant pulsé qui est de première importance. Elle est donnée par l'expression :

$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{X_L} \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right) \dots\dots\dots (III.9)$$

I_{eff} : courant efficace de la composante fondamentale.

U_{eff} : la tension efficace appliquée à l'inductance.

On constate que le courant fondamental diminue à mesure que l'angle d'amorçage augmente au-delà de 90° . C'est comme si la réactance de l'inductance augmentait avec α . La réactance effective X_e est donnée par l'expression :

$$X_{tcr} = \frac{X_L}{2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{\pi}} \dots\dots\dots (III.10)$$

Mais on a un montage du SVC composé par une inductance contrôlée par thyristors en parallèle avec une capacité de réactance X_C , donc la réactance de montage est :

$$X_e = X_C // X_L$$

$$\frac{1}{X_e} = -\frac{1}{X_C} + \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi X_L} \dots\dots\dots (III.11)$$

III-2-4. Modèle du compensateur shunt SVC :

On définit B_e la susceptance de SVC $B_e = \frac{1}{X_e}$

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \Rightarrow \dots\dots\dots (III.12)$$

$$X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}$$

$$\text{Avec } V = V_{ref} + X_{SL} I \dots\dots\dots (III.13)$$

Et $X_{SL} = \{\pm 5\% \text{ où } \pm 2\%\}$ de la valeur de V_{ref} [9].

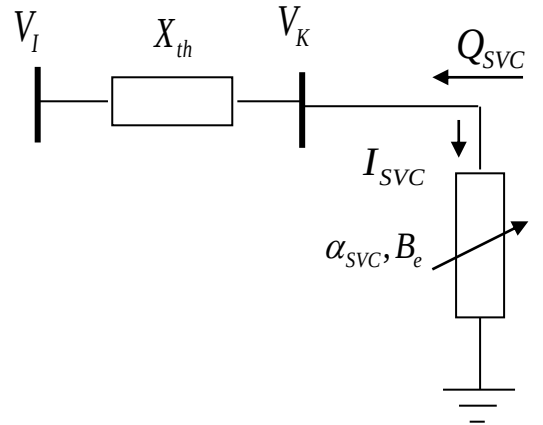
III-2-4-1. Les équations de SVC :

Les équations qui décrivent le comportement du SVC dans le réseau sont :

$$V_I - V_{REF} + X_{SL} V_K B_e = 0$$

$$Q_{SVC} - V_K^2 B_e = 0$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C} \right) = 0$$



Représentation du circuit de base pour le compensateur SVC

Avec α représente la variation de l'angle d'amorçage des thyristors : α compris entre $[90^\circ \text{ et } 180^\circ]$.

la figure(3.5) représente le Schéma bloc du compensateur SVC.

la figure(3.6) représente l'organigramme de la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler .

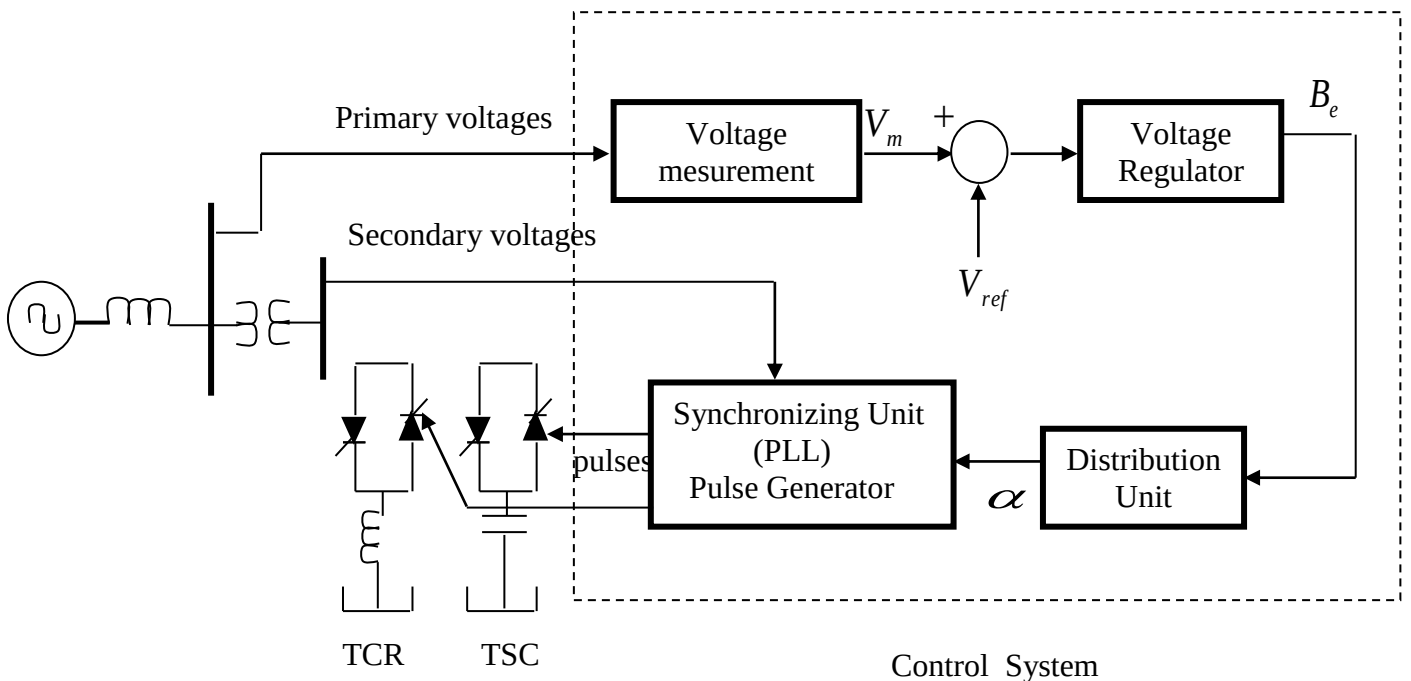


Figure (3.5) : Schéma bloc du compensateur SVC

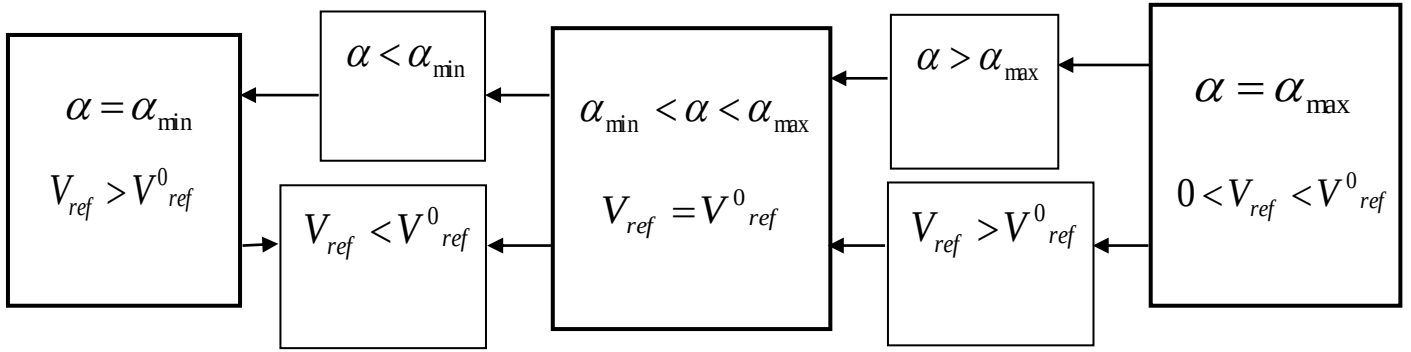


Figure (3.6) : Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler

La réactance contrôlée par les thyristors est en fonction de X_L, X_C, α . On peut tracer la courbe de $B_e = f(\alpha)$, si $X_C = 1(pu)$, $X_L = 0.5(pu)$.

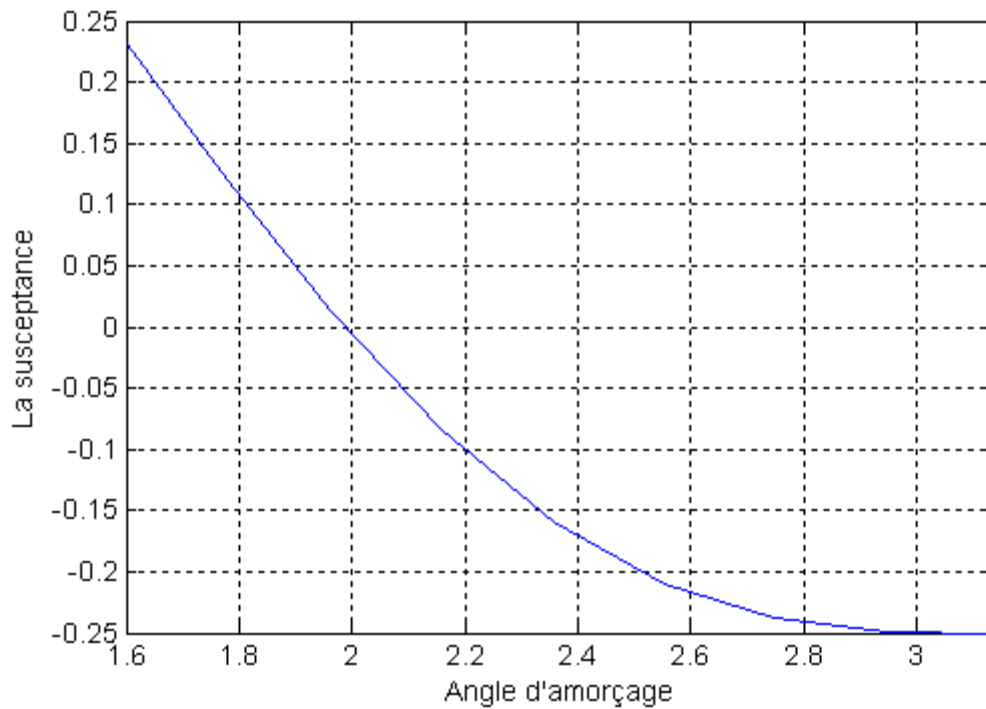


Figure (3.7) : la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage

On remarque que B_e change de signe lorsque α varie (Figure(3.7))

- ✓ Pour certaines valeurs de α , B_e est positif, donc le montage fonctionné en mode inductif.

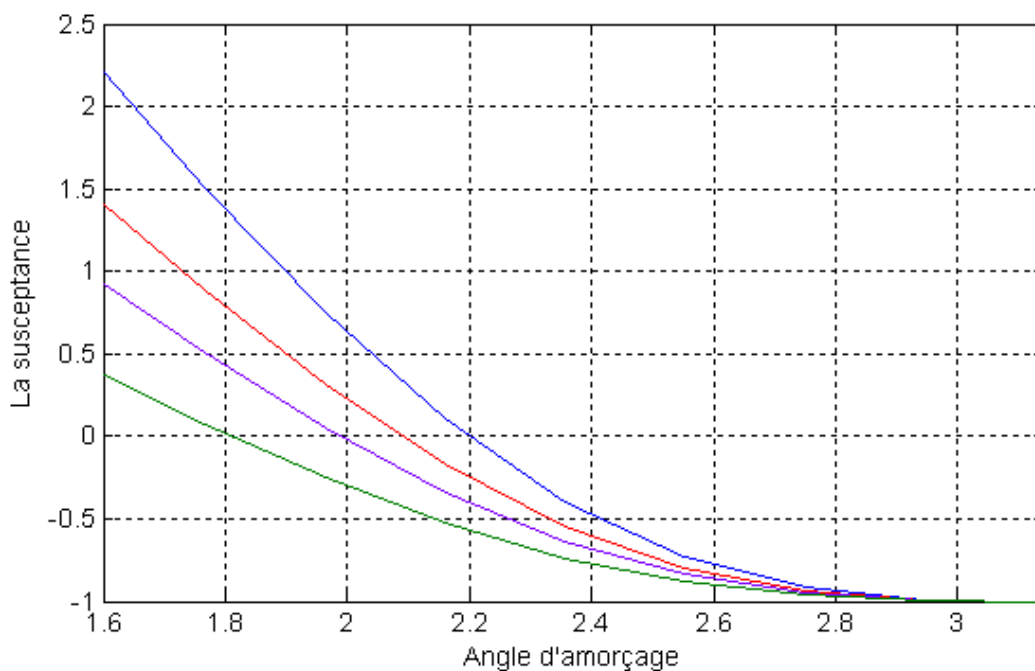
- ✓ Pour les autres valeurs, B_e est négatif, donc le montage fonctionné en mode capacitif.
- ✓ Pour $\alpha = \alpha_0$, B_e est nulle donc le montage est représenté par une charge infinie.

Pour chaque valeur de X_L (X_C fixe), on obtient une caractéristique de B_e et pour choisir la première valeur il faut tenir compte de la nature de la charge à compenser et le type de ligne.

Par exemple :

Pour $X_L = 1(pu) = B_e \leq 0$, donc le SVC est toujours en mode capacitive .

Par contre $X_L \leq 1(pu)$, le SVC fonctionne en mode capacitive ou inductive, d'après l'angle α .



Figure(3.8) : Variation de la susceptance en fonction de l'angle α

III-3.Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance :

L'étude de l'écoulement de puissance coordonne l'exploitation de toutes les ressources d'énergie et la répartition de la production entre les différents usagers [2], dont le but est

d'obtenir l'exploitation la plus économique qui conduit à la meilleure utilisation de toutes les ressources.

Les tensions des jeux de barres sont symbolisées par $V_1, V_2, \dots, V_n$ respectivement. Pour ce réseau la puissance de chaque jeu de barres est donné par :

$$P_i + jQ_i = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \dots \dots \dots (III.14)$$

La puissance apparente S_i injectée au jeu de barres i est donnée par l'équation

$$S_i = V_i \cdot I_i^* \Rightarrow I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = \left(\sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) V_i^*$$

I_i : le courant qui entre dans le jeu de barres i .

$$V_i = \frac{1}{Y_{i,i}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \left(\sum_{K=1, K \neq i}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) \right) \dots \dots \dots (III.15)$$

Pour le jeu de barres de contrôle :

$$Q_i = Q_{SVC} - Q_D \Rightarrow Q_{SVC} = Q_i + Q_D \dots \dots \dots (III.16)$$

Pour le réglage flexible de la tension au niveau des jeux de barres, on calcule la valeur de l'énergie réactive Q_i nécessaire pour ramener la tension V_i à la tension désiré V_{ref} puis on calcule la susceptance en aboutissant enfin à la valeur de l'angle α .

Cette tension varie suivant une pente de régulation du compensateur statique.

On peut donner un organigramme qui décrit les étapes de fonctionnement du SVC dans un réseau électrique.

Le système de commande est basé sur les équations du tension, susceptance et l'énergie réactive fournie par le compensateur.

Le compensateur statique SVC permet de stabiliser très rapidement la tension de réseau à la valeur de consigne. Le système de commande lit en permanence la tension mesurée au primaire

du transformateur de couplage. Cette tension est comparée avec la valeur de consigne. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau.

L'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, et l'angle α de l'inductance.

La susceptance du SVC vue du primaire du transformateur :

$$B_P = \frac{1}{X_T + X_e} \dots\dots\dots (III.17)$$

Les limites de B_p sont déterminées à partir $B_{e(\min)}$ et $B_{e(\max)}$

La tension est réglée suivant la caractéristique représentée par l'équation (III.17).

III-4. Control des transits de puissances par dispositif serie TCSC :

Les capacités séries contrôlées par thyristor (TCSC), utilisant l'électronique de puissance comme élément de base, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, dans tous les cas où il est nécessaire de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances ou lors de la mise en place de liaisons entre pays ou entre régions [11]. C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnemental.

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.
- ❖ Interconnexion des réseaux.

III-4-1. Modélisation du TCSC :

La compensation série est parmi les la meilleures techniques actuellement connue pour accroître la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Les condensateurs séries fonctionnent en insérant une source de tension en série avec la ligne de transmission avec une polarité inverse à celle de la chute de tension à travers la ligne.

L'effet apparent est la diminution de la réactance apparente de la ligne de transmission.

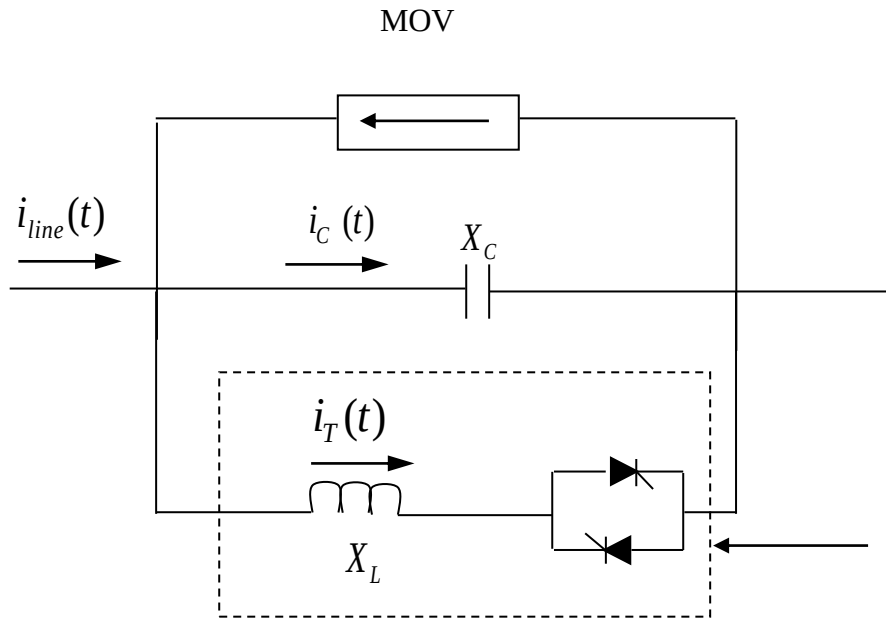


Figure (3.9) :Schéma de base d'un TCSC

$u_c(t)$: est la tension au borne du condensateur .

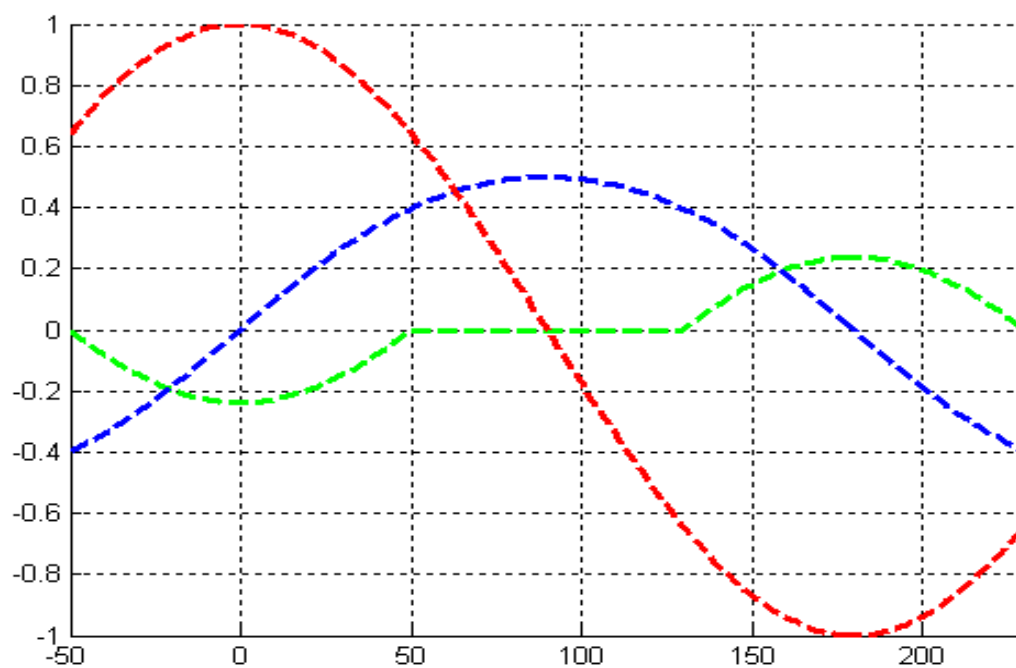
$i_T(t)$: est le courant a travers le thyristor .

$i_{line}(t)$: est le courant transité dans la ligne .

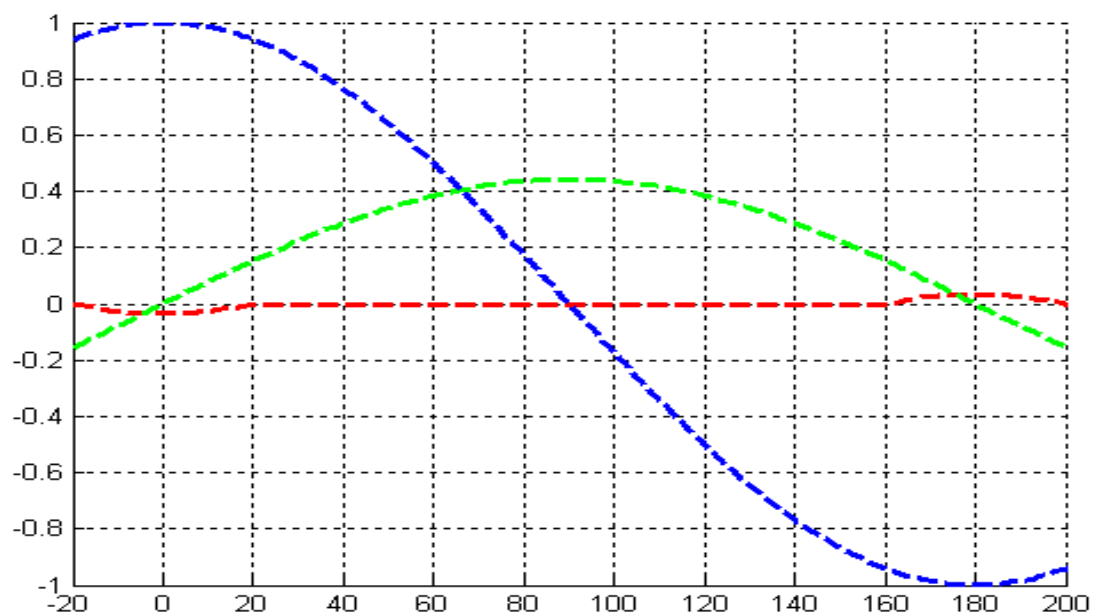
$i_T(\omega t), u_c(\omega t)$ pour $\pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma$ est donne par l'expression analytique suivant :

$$i_T(\omega t) = \begin{cases} A(\cos(\omega t) - \frac{\cos \sigma}{\cos \rho \sigma} \cos(\rho \omega t)) & \text{for } -\sigma \leq \omega t \leq \sigma \\ 0 & \text{for } \sigma \leq \omega t \leq \pi - \sigma \dots \dots \dots (III.18) \\ A(\cos(\omega t) + \frac{\cos \sigma}{\cos \rho \sigma} \cos(\rho(\omega t - \pi))) & \text{for } \pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma \end{cases}$$

$$u_c(\omega t) = \begin{cases} -AX_L \sin \omega t + \frac{A\rho X_L \cos \rho}{\cos \rho \sigma} \sin \rho \omega t & \text{for } -\sigma \leq \omega t \leq \sigma \\ X_C (\sin \omega t - \sin \sigma) - AX_L (\sin \sigma - \rho \cos \sigma \tan \rho \sigma) & \text{for } \pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma \\ -AX_L \sin \omega t - \frac{A\rho X_L \cos \sigma}{\cos \rho \sigma} \sin \rho(\omega t - \pi) & \text{for } \sigma \leq \omega t \leq \pi - \sigma \dots \dots (III.19) \end{cases}$$



$$\alpha = 130^\circ$$



$$\alpha = 150^\circ$$

Figure (3.10) : Courant- thyristor-ligne et la tension au borne du condensateur

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.

Notons par :

$$Z_{TCSC} = jX_{TCSC}$$

L'impédance équivalente du TCSC.

$$Z_{TCR} = jX_{TCR} = j \frac{X_L \pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}$$

L'impédance équivalente du TCR.

$$Z_C = -jX_C$$

L'impédance de la capacité

On peut écrire :

$$\begin{aligned} Z_{TCSC} &= Z_C // Z_{TCR} = \frac{jX_C \cdot jX_{TCR}}{-jX_C + jX_{TCR}} \\ &= j \frac{X_C X_L}{X_C - X_{TCR}} \\ &= j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L} \end{aligned}$$

D'où

$$X_{TCSC}(\alpha) = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L} \Rightarrow$$

$$X_{TCSC} = X_C - (X_C + X_{LC}) \frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi} + \frac{4X_{LC}^2 \cos^2 \sigma}{X_L} \left(\frac{\rho \tan \rho \sigma - \tan \sigma}{\pi} \right) \dots \dots \dots (III.20)$$

$$\sigma = \pi - \alpha, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \rho = \frac{\omega_0}{\omega}, X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$$

X_C : la réactance capacitive nominal ;

X_L : la réactance inductive;

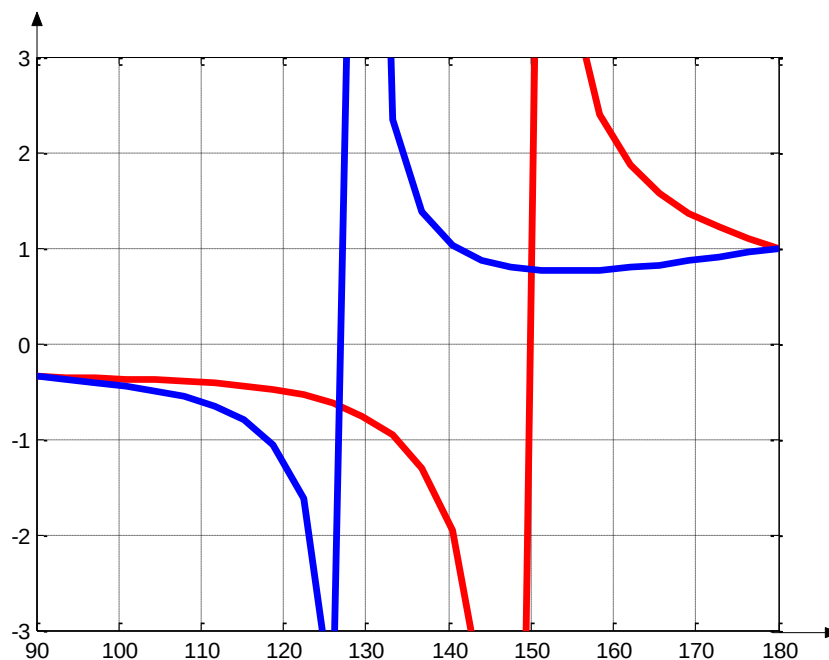
α : angle d'amorçage;

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

- a) Mode hors circuit : les thyristors sont en conduction pleine
- 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 contrôlables dans les régions inductives et capacitives. Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de 90° jusqu'à une valeur maximum dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

La valeur maximale de l'impédance inductive et la valeur minimale de l'impédance capacitive devraient être prises en compte dans la conception du dispositif pour empêcher une résonance parallèle entre le condensateur et le TCR .à la fréquence fondamentale . Fig. (3 -10) montre l'impédance caractéristique de l'état d'équilibre du TCSC à la fréquence fondamentale .

On peut observer dans cette figure la caractéristique non linéaire du dispositif et de sa région de résonance.



Figure(3.11) : Variation de l'impédance de TCSC en fonction de l'angle d'amorçage avec différent valeur de ρ

III-4-2. Implantation de TCSC dans le problème de l'écoulement de puissance :

Le modèle d'injection de TCSC sans et avec pertes est dans le schéma de la Figure(3.9)

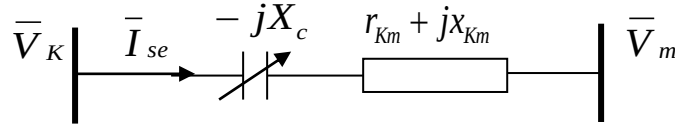


Figure (3.12) :Model d'injection du TCSC

Situé entre les jeux de barres K et m dans le système de transmission.

du schéma 2, nous avons :

$$\bar{I}_{se} = \frac{\bar{V}_K - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_c)} \dots\dots\dots(III.21)$$

L'influence du condensateur est équivalent à une source de tension ce qui dépend des tensions $\bar{V}_k$ et $\bar{V}_m$. Le modèle d'injection est obtenu en remplaçant la source de tension par une source de courant équivalente $\bar{I}_s$, dans la figure(3-13).

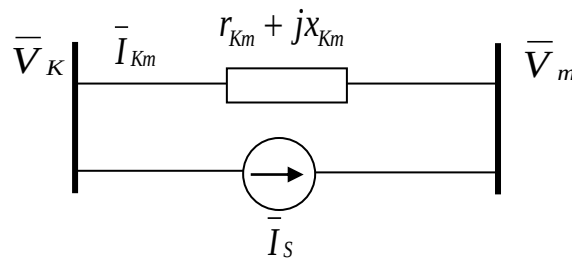


Figure (3.13) :Remplacement $\bar{V}_s$ par $\bar{I}_s$

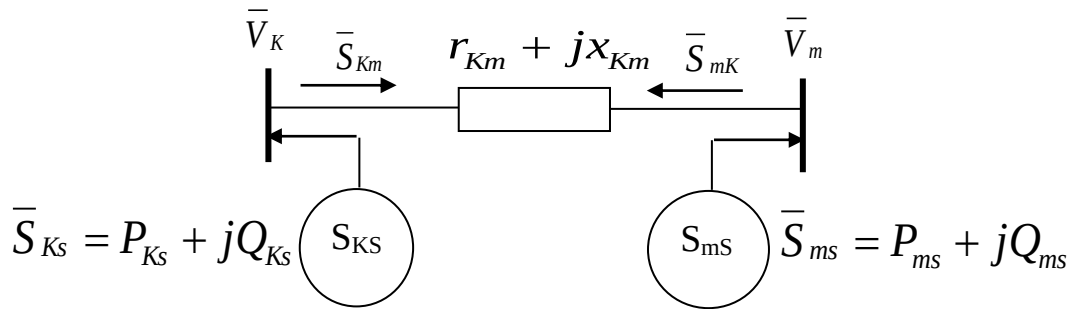
Dans la figure (3-10), $\bar{V}_s = -jX_c I_{se}$ et de figure (3-11), nous avons

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{r_{Km} + jX_{Km}} = \frac{-jX_c \bar{I}_{se}}{r_{Km} + jX_{Km}} \dots\dots\dots(III.22)$$

Le source de courant correspond aux puissances injectées $\bar{S}_{Ks}$ et $\bar{S}_{ms}$ montré dans figure(3-14), ce qui sont définis par:

$$\bar{S}_{Ks} = \bar{V}_K (-\bar{I}_S)^* = \bar{V}_K \left(\frac{jx_c}{r_{Km} + jx_{Km}} \frac{\bar{V}_K - \bar{V}_m}{r_{Km} + j(x_{Km} - x_c)} \right)^* \dots\dots\dots(\text{III.23})$$

$$\bar{S}_{ms} = \bar{V}_m (-\bar{I}_S)^* = \bar{V}_m \left(\frac{-jx_c}{r_{Km} + jx_{Km}} \frac{\bar{V}_K - \bar{V}_m}{r_{Km} + j(x_{Km} - x_c)} \right)^* \dots\dots\dots(\text{III.24})$$



Figure(3.14) : les puissances $\bar{S}_{Ks}$ et $\bar{S}_{ms}$ injectes au niveau des jeux de barres

Si ($r_{Km} = 0$)

$$P_{Ks} = -B_e V_K V_m \sin(\theta_K - \theta_m) \dots\dots\dots(\text{III.25})$$

$$P_{ms} = -P_{Ks} \dots\dots\dots(\text{III.26})$$

$$Q_{Ks} = -B_e (V_K^2 - V_K V_m \cos(\theta_K - \theta_m)) \dots\dots\dots(\text{III.27})$$

$$Q_{ms} = -B_e (V_m^2 - V_m V_K \cos(\theta_m - \theta_K)) \dots\dots\dots(\text{III.28})$$

$$B_e = \frac{-x_c}{x_{Km} - x_c} \frac{1}{x_{Km}} \dots\dots\dots(\text{III.29})$$

Si la résistance $r_{Km} \neq 0$, puis on définit :

$$g'_{Km} + jb'_{Km} = \frac{jx_c}{r_{Km} + jx_{Km}} \frac{1}{r_{Km} + j(x_{Km} - x_c)} \dots\dots\dots (III.30)$$

Dans ce cas nous avons un model avec des pertes des composants actifs et réactifs peuvent être calculées comme :

$$P_K = -g'_{Km}(V_K^2 - V_K V_m \cos(\theta_K - \theta_m)) - b'_{Km} V_K V_m \sin(\theta_K - \theta_m) \dots\dots\dots (III.31)$$

$$Q_a = -V_K^2 (b'_{Km} / b_{sh}) / (V_K V_m b'_{ab} \cos(\theta_K - \theta_m)) - V_K V_m g'_{Km} \sin(\theta_K - \theta_m) \dots\dots\dots (III.32)$$

$$P_m = -g'_{Km}(V_m^2 - V_m V_K \cos(\theta_K - \theta_m)) - b'_{Km} V_K V_m \sin(\theta_K - \theta_m)$$

$$Q_m = -V_m^2 (b'_{Km} / b_{sh}) / (V_K V_m b'_{Km} \cos(\theta_K - \theta_m)) - V_K V_m g'_{Km} \sin(\theta_K - \theta_m) \dots\dots\dots (III.33)$$

III-5. Compensateur universel UPFC(The Unified Power Flow Controller):

Le systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) sont des moyens de contrôle rapides et flexibles capables de faciliter le transit des puissances et d'améliorer la stabilité des réseaux électriques [13]. Le contrôleur unifié d'écoulement de puissance (UPFC) est un dispositif FACTS qui combine à la fois les avantages de control de la compensation série et shunt, par son ajustement simultané ou séparé des paramètres clés du réseau électrique.

III-5-1. Modèle Mathématique :

L'UPFC est composé de deux transformateurs, un connecté en shunt et l'autre connecté en série. Comme le montre la Figure(3.15), chaque transformateur est connecté à un convertisseur, ces deux convertisseurs sont liés par une liaison en courant continu, représentée par un condensateur. Cette liaison agit comme une source d'énergie .certainement, chaque puissance active injectée au système par la branche série est prise du système par la branche parallèle et elle est transmise à la branche série à travers la liaison en courant continu. Celle-ci est représentée par le courant $\bar{I}_T$. En plus, le courant réactif $\bar{I}_q$ est

aussi contrôlable de façon à ce que la branche parallèle se comporte comme une susceptance réactive shunt contrôlable. La Figure(3.16) illustre le diagramme vectoriel de l'UPFC. Vue à partir de $\bar{U}_1$, L'argument de la tension $\bar{U}_T$ varie de 0° à 360° et son amplitude est limitée par $U_{T\max}$ qui est un paramètre de conception de l'UPFC . Les paramètres contrôlables de l'UPFC sont la phase et l'amplitude de $\bar{U}_T$ et l'amplitude de $\bar{I}_q$.

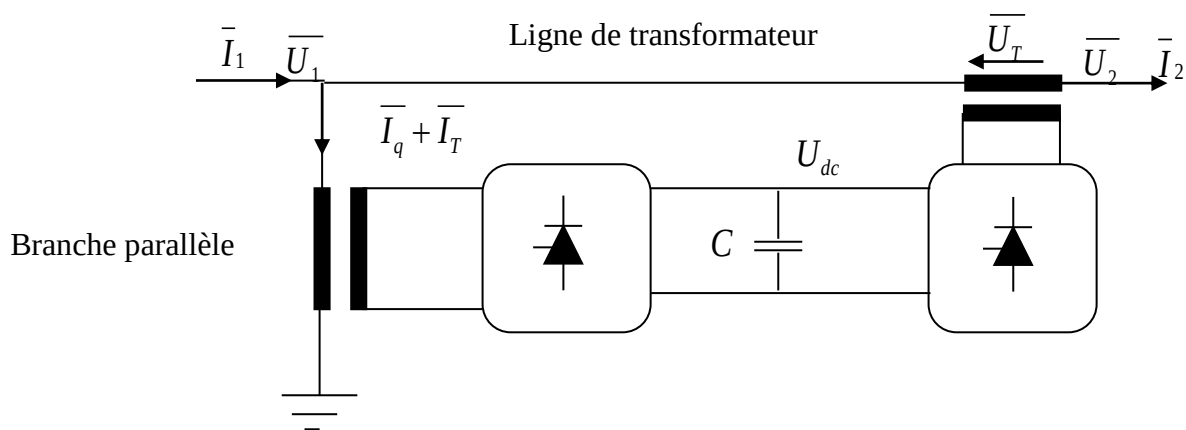


Figure (3.15) : Schéma de base de l'UPFC

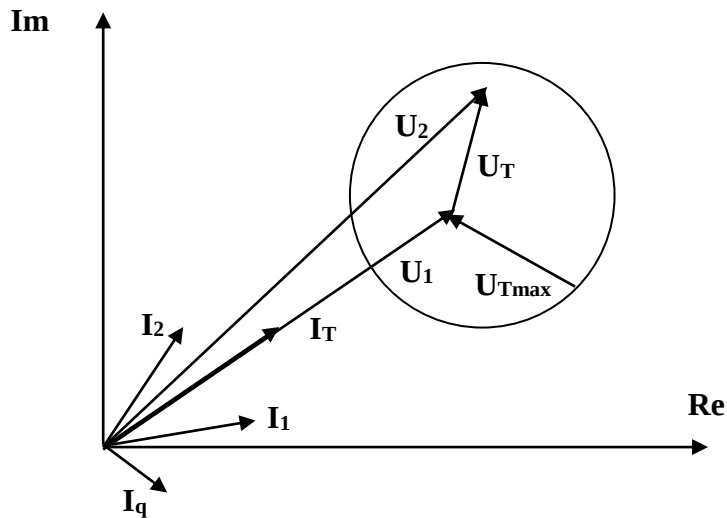


Figure (3.16) : diagramme vectoriel de l'UPFC

La Figure (3.17) montre le schéma équivalent de l'UPFC qui est localisé dans le système de transmission entre le JdB_i et le JdB_j . L'UPFC injecte une tension $\bar{U}_s$ en série avec celle de la ligne de transmission à travers le transformateur série, comme le montre la Figure(3.17)

la puissance active P_{se} impliquée dans l'injection série est prise de la ligne de transmission par le transformateur shunt (appelé P_{sh}). L'UPFC génère ou absorbe la puissance réactive nécessaire (appelées Q_{se} et Q_{sh} respectivement) localement par l'action de la commutation de ses deux convertisseurs. Dans la Figure (3.18), X_s représente la réactance effective de l'UPFC vue dans la ligne de transmission du cote du transformateur série. On considère, en premier lieu, la partie série d'un UPFC sans pertes. La puissance échangée est équilibrée avec le réseau et égale à zéro comme il est illustré dans la Figure (3.18).

La source de tension série est modélisée par une source de tension idéal $\bar{U}_s$ qui est contrôlable en amplitude et en phase tel que $\bar{U}_s = r\bar{V}_i e^{j\phi}$ avec $0 < r < r_{\max}$ et $0 < \phi < 2\pi$.

la tension $\bar{V}'$ représente la tension fictive derrière la réactance série tel que :

$$\bar{V}' = \bar{U}_s + \bar{V}_i \dots \dots \dots (III.34)$$

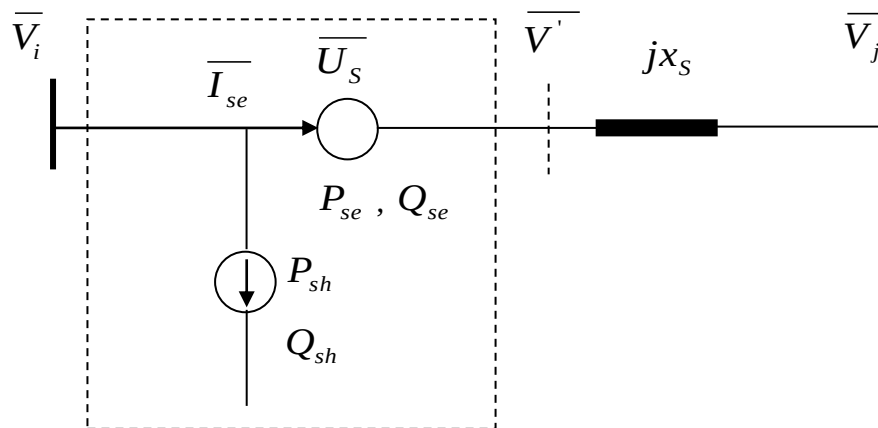


Figure (3.17) : Schéma Equivalent de l'UPFC

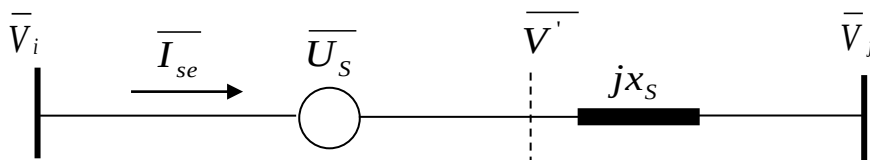


Figure (3.18) : Schéma Equivalent de la partie série de l'UPFC

Conclusion

Dans ce chapitre On a démontré que chaque dispositif peut influencer d'une manière ou d'une autre sur les paramètres des réseaux électriques. Le modelé du dispositif SVC est utilisé principalement comme un moyen de réglage de la tension, le modèle d'injection de la puissance active et réactive est utilisé principalement pour contrôler le transit de la puissance active dans la ligne de transport. Le modèle d'injection du dispositif UPFC qui appartient à la dernière génération des dispositifs FACTS, permet de contrôle des différents indices de qualité de l'énergie (tension, puissance active, puissance réactive).

IV-1. PARTIE UN : PROGRAMMATION

IV-1-1. Compensation shunt avec SVC :

IV-1-1-1. Réseau électrique de 9 jeux de barres : (IEEE Bus 9JB)

Au départ, un simple réseau électrique de 9 jeux de barres est utilisé juste pour illustrer l'effet du dispositif de compensation dynamique (FACT). Ce réseau test est constitué de 6 lignes électriques, 3 générateurs, 3 transformateurs et 3 charges (figure (4.1)).

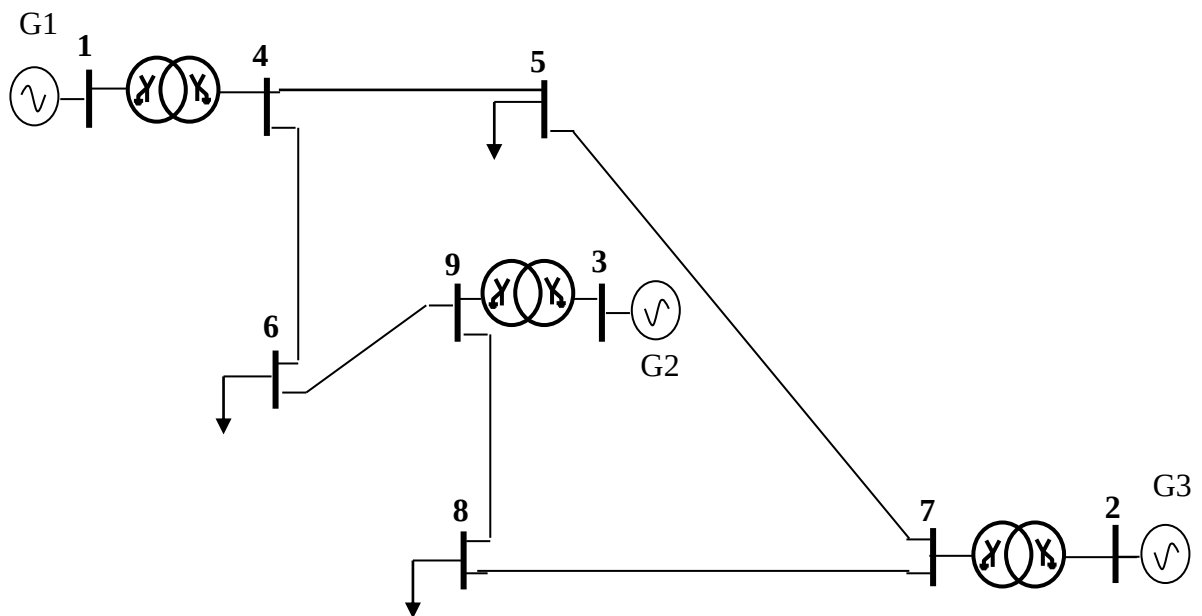


Figure (4.1): Schéma d'un réseau test 9 jdb

Le tableau (IV-1), (la Figure 4.2) montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l'intégration du dispositif shunt SVC dans la méthode de Newton–Raphson. On remarque une amélioration des tensions au niveau des jeux de barres due à la présence de ce dispositif shunt. Alors que le tableau (IV-3) visualise les résultats du réseau 9 bus obtenu avec et sans l'SVC (Les résultats de programmation).

L'organigramme général de l'intégration de l'SVC cité en annexe A.

Tableau (IV-1) : Résultats des tensions du réseau électrique –Cas normale.

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V (p.u)	V (p.u)
1	1.0600	1.0600
2	1.0244	1.0244
3	1.0091	1.0125
4	0.9973	1.0015
5	0.9817	0.9817
6	0.9813	0.9872
7	0.9662	0.9809
8	0.9699	0.9700
9	0.9593	0.9873

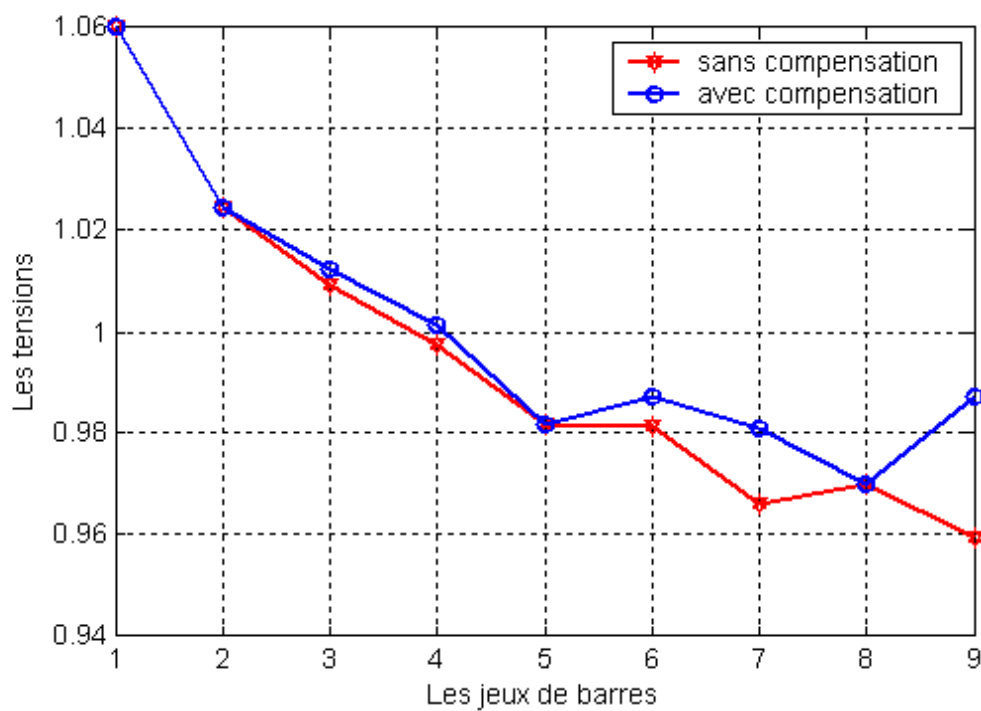


Figure (4.2) : Variation de la tension - Cas normale

Tableau (IV-2) : Résultats des tensions du réseau électrique – Cas rupture de la ligne 3 et 4 :

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V (p.u)	V (p.u)
1	1.0600	1.0600
2	1.0168	1.0169
3	1.0608	1.0609
4	0.9681	0.9733
5	0.9754	0.9754
6	0.9595	0.9660
7	0.9441	0.9595
8	0.9536	0.9537
9	0.9371	0.9662

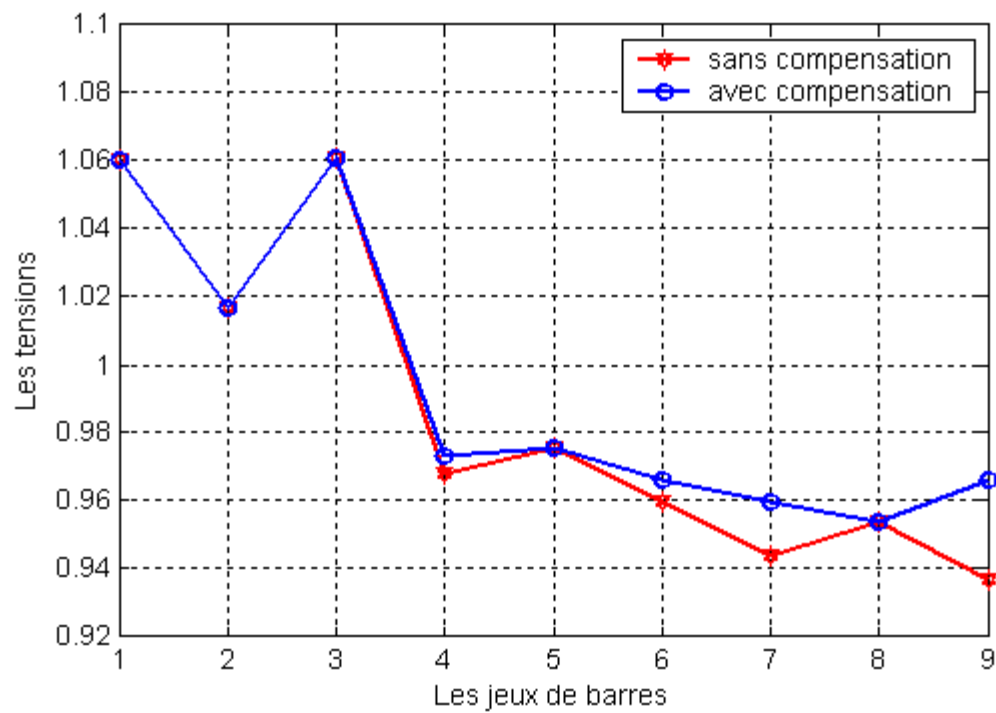


Figure (4.3) : Variation de la tension - Cas rupture de la ligne 3 et 4 :

Tableau (IV-3) : Comparaison des résultats du test 9 bus obtenus avec et sans SVC.

* Les jeux de barres le plus sensible sont : 9 et 7.

* La puissance demandée active est : 203.70 MW.

* La puissance demandée réactive est : 90.40 MVAR.

Résultats	Sans Compensation		Avec Compensation	
	Cas normale	Cas Rupture(3-4)	Cas normale	Cas Rupture(3-4)
Tension 9 (pu)	0.9593	0.9371	0.9873	0.9662
Tension 7 (pu)	0.9662	0.9441	0.9809	0.9595
Puissance active générée (MW)	212.2730	215.3106	212.1113	215.1199
Puissance réactive générée (MVAR)	101.1197	109.3236	100.4573	108.5764
Pertes actives (MW)	8.5730	11.6106	8.4113	11.4199
Pertes réactives (MVAR)	10.7197	18.9236	10.0573	18.1764
Be jeu de barre 9	-----	-----	0.1027	0.1072
Be jeu de barre 7	-----	-----	0.1040	0.1087
α jeu de barre 9	-----	-----	111.1182	111.0004
α jeu de barre 7	-----	-----	111.0887	110.9681
Puissance réactive injectée (MVAR)	-----	-----	10.2	10.2

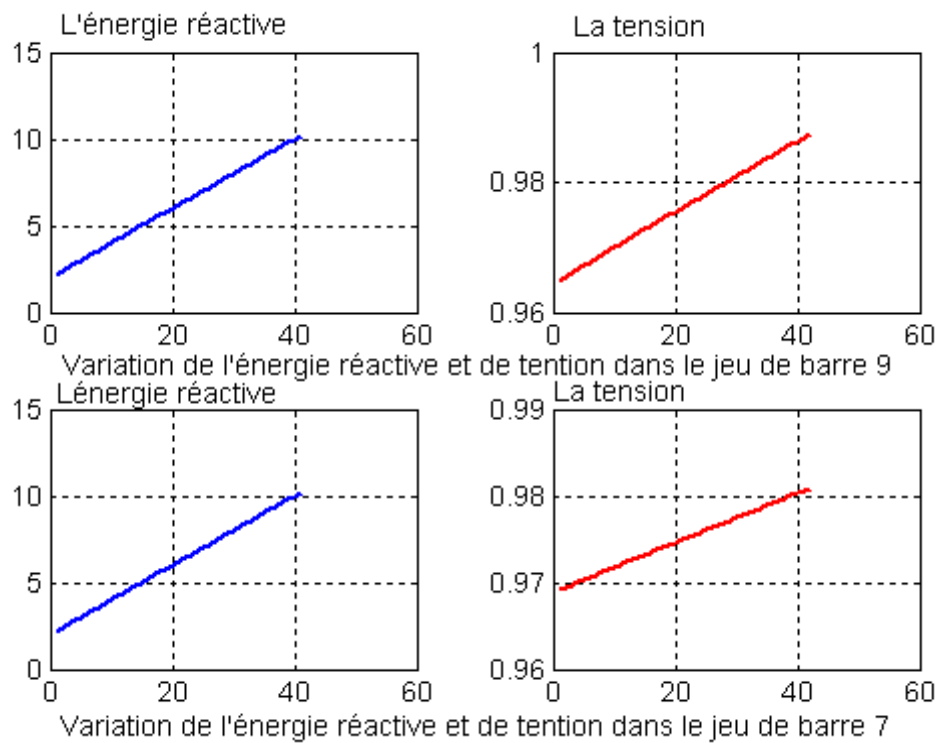
*** Cas normale :**

Figure (4.4) : Variation de la puissance réactive injectée (Q_{svc}) et de tension dans les deux jeux de barres sensibles

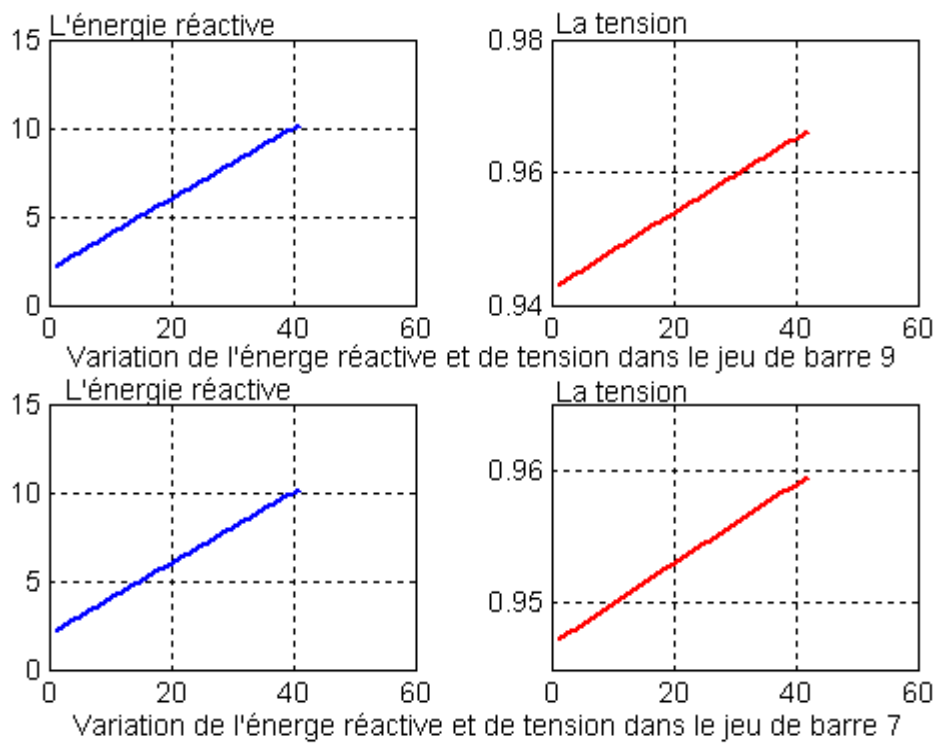
***Cas rupture de la ligne 3 et 4 :**

Figure (4.5) : Variation de la puissance réactive injectée (Q_{svc}) et de tension dans les deux jeux de barres sensibles

Tableau (IV-4) : L'augmentation de la charge avec : 10% 20% 60%

Résultats	Sans Compensation			Avec Compensation		
	KK=1	KK=1.2	KK=1.6	KK=1	KK=1.2	KK=1.6
Tension 9 (pu)	0.9593	0.9450	0.9146	0.9692	0.9570	0.9311
Puissance active générée (MW)	212.2730	257.4666	353.0394	212.1996	257.3473	352.8107
Puissance réactive générée (MVAR)	101.1197	137.3868	224.7177	100.6971	136.7333	223.3708
Pertes actives (MW)	8.5730	13.0266	27.1194	8.4996	12.9073	26.8907
Pertes réactives (MVAR)	10.7197	28.9068	80.0777	10.2971	18.2533	78.7308
Be jeu de barre 9	-----	-----	-----	0.1033	0.1262	0.1751
α jeu de barre 9	-----	-----	-----	111.1049	110.5140	109.2717
Puissance réactive injectée SVC (MVAR)	-----	-----	-----	10.1000	12.100	16.100

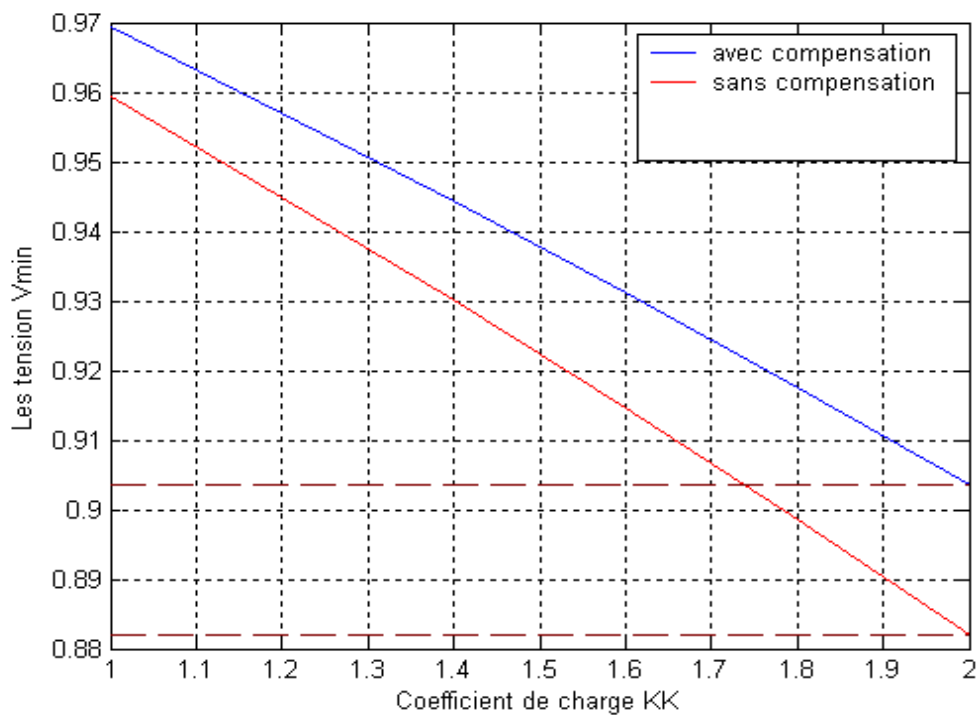


Figure (4.6) : variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge

IV-1-1-2. Réseau électrique de 25 jeux de barres :

Les réseaux électriques actuellement implantés sont caractérisés par leurs charges électriques qui sont nombreuses et distantes des centres de production d'énergie.

Dans un deuxième exemple, on propose un réseau électrique de moyen taille, constitué de 25 jeux de barres, 5 générateurs, 24 charges et 35 lignes de transport. La figure (4.7) montre un schéma unifilaire de ce réseau test. [14]

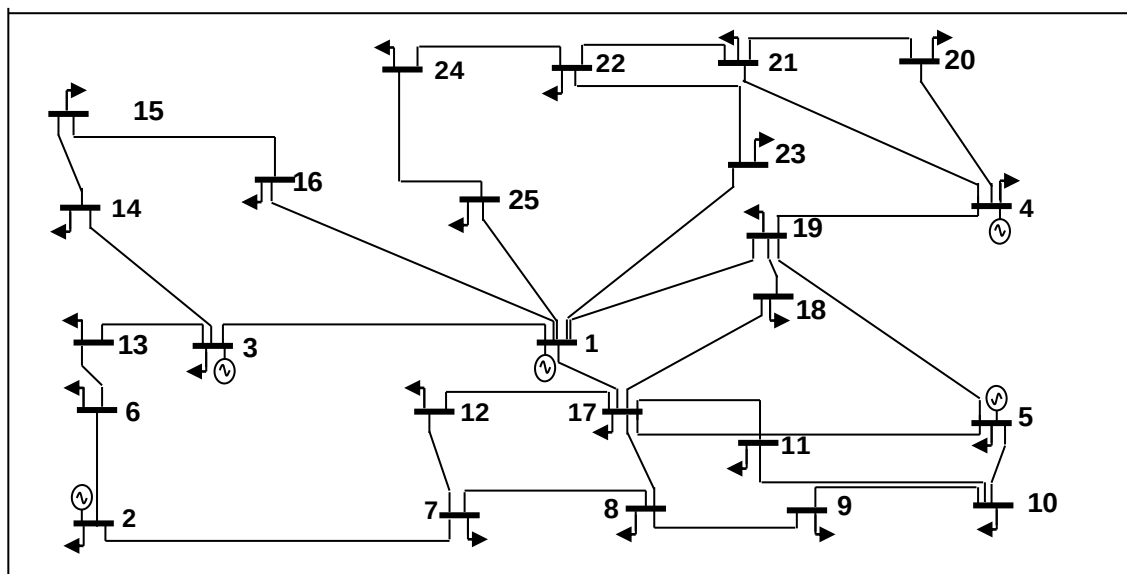


Figure (4.7) : Schéma unifilaire du réseau électrique de test 25 jeux de barre

Tableau (IV-5) : Comparaison des résultats du test 25 bus obtenus avec et sans SVC

* Les jeux de barres le plus sensible sont : 15 et 14

* La puissance demandée active est : 530 MW.

* La puissance demandée réactive est : 165 MVAR.

Résultats	Sans Compensation		Avec Compensation	
	Cas normale	Cas Rupture(2-6)	Cas normale	Cas Rupture(2-6)
Tension 15 (pu)	0.9696	0.9678	0.9884	0.9868
Tension 14 (pu)	0.9718	0.9692	0.9919	0.9895
Puissance active générée (MW)	541.6310	542.2727	541.4674	542.1700
Puissance réactive générée (MVAR)	20.0461	29.6818	19.0472	28.5925
Pertes actives (MW)	11.6310	12.2727	11.4679	12.1700
Pertes réactives (MVAR)	-144.9539	-135.3182	-145.9528	-136.4075
Be jeu de barre 15	-----	-----	0.0697	0.0699
Be jeu de barre 14	-----	-----	0.0692	0.0695
α jeu de barre 15	-----	-----	111.9800	111.9736
α jeu de barre 14	-----	-----	111.9908	111.9821
Puissance réactive injectée (MVAR)	-----	-----	7	7

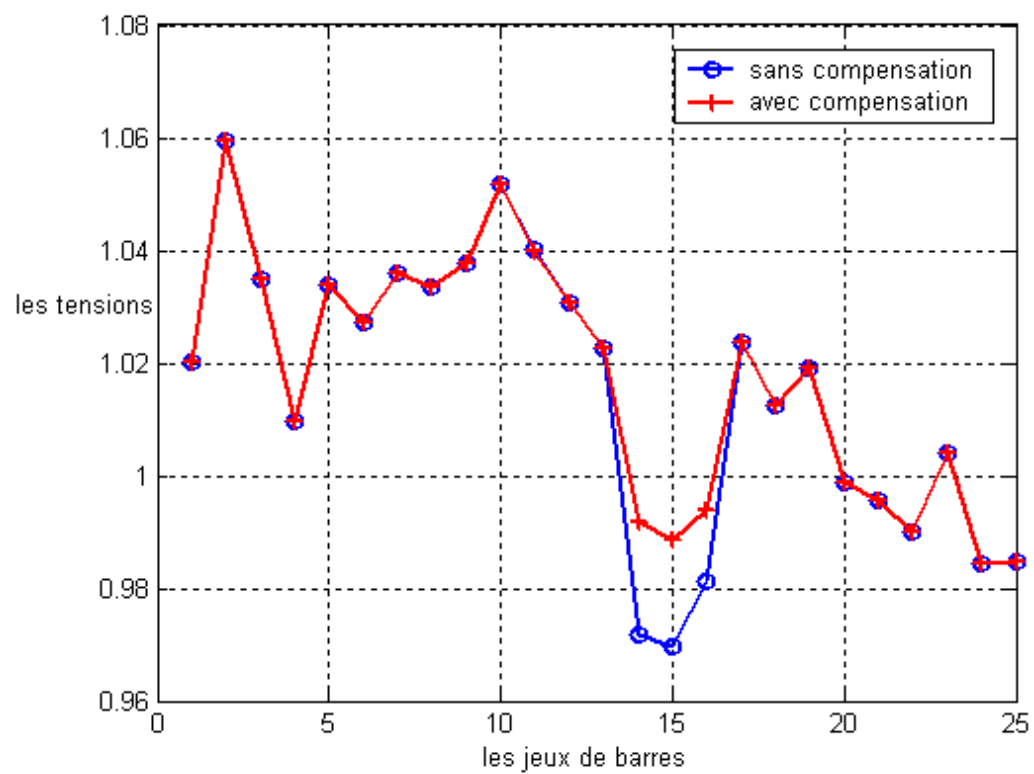


Figure (4.8) : Variation de la tension- Cas normale

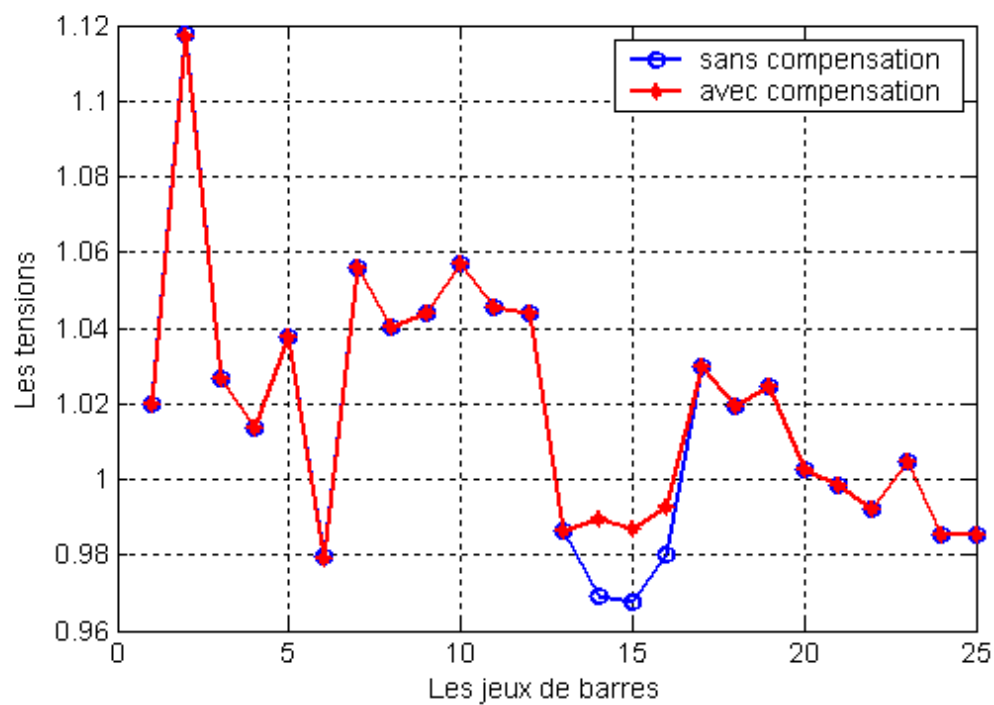


Figure (4.9) : Variation de la tension - Cas rupture de la ligne 2 et 6

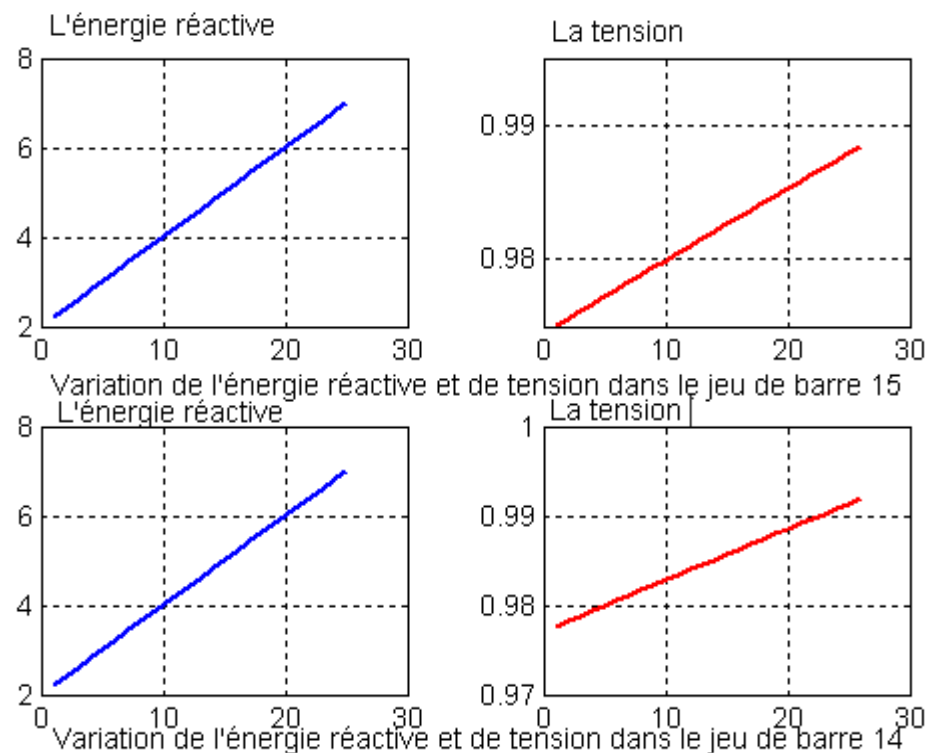
*** Cas normale :**

Figure (4.10) : Variation de la puissance réactive injectée (Q_{svc}) et de tension dans les deux jeux de barres sensibles

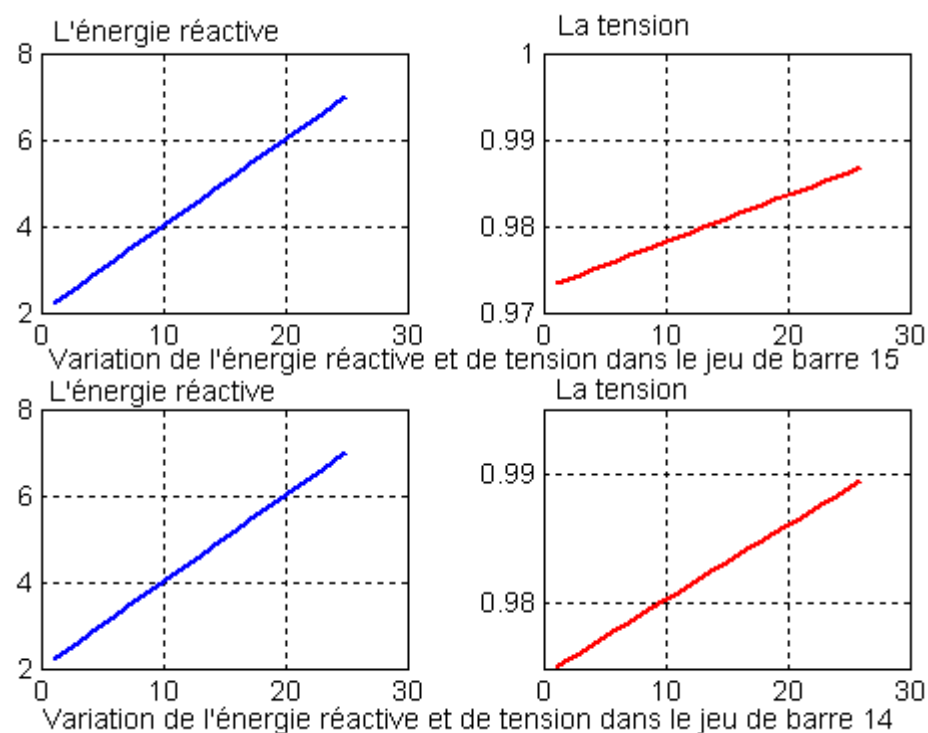
***Cas rupture de la ligne 2 et 6 :**

Figure (4.11) : Variation de la puissance réactive injectée (Q_{svc}) et de tension dans les deux jeux de barres sensibles

Tableau (IV-6) : L'augmentation de la charge avec : 20% 100%

Résultats	Sans Compensation			Avec Compensation		
	KK=1	KK=1.2	KK=2	KK=1	KK=1.2	KK=2
Tension 15 (pu)	0.9696	0.9514	0.7899 JdB (24)	0.9842	0.9579	0.8142 JdB (24)
Puissance active générée (MW)	541.6310	643.8770	1208.6	541.5307	643.6704	1204.500
Puissance réactive générée (MVAR)	20.0461	64.3351	437.0350	19.2708	63.2104	429.5412
Pertes actives (MW)	11.6310	7.8770	148.6511	11.5307	7.6704	144.5033
Pertes réactives (MVAR)	-144.9539	-133.664	107.0350	-145.729	-134.789	99.5412
Be jeu de barre 15	-----	-----	-----	0.1032	0.1276	0.1469 JdB (24)
α jeu de barre 15	-----	-----	-----	111.1072	110.4784	109.9860 JdB (24)
Puissance réactive injectée SVC (MVAR)	-----	-----	-----	10.1000	12.100	10.1

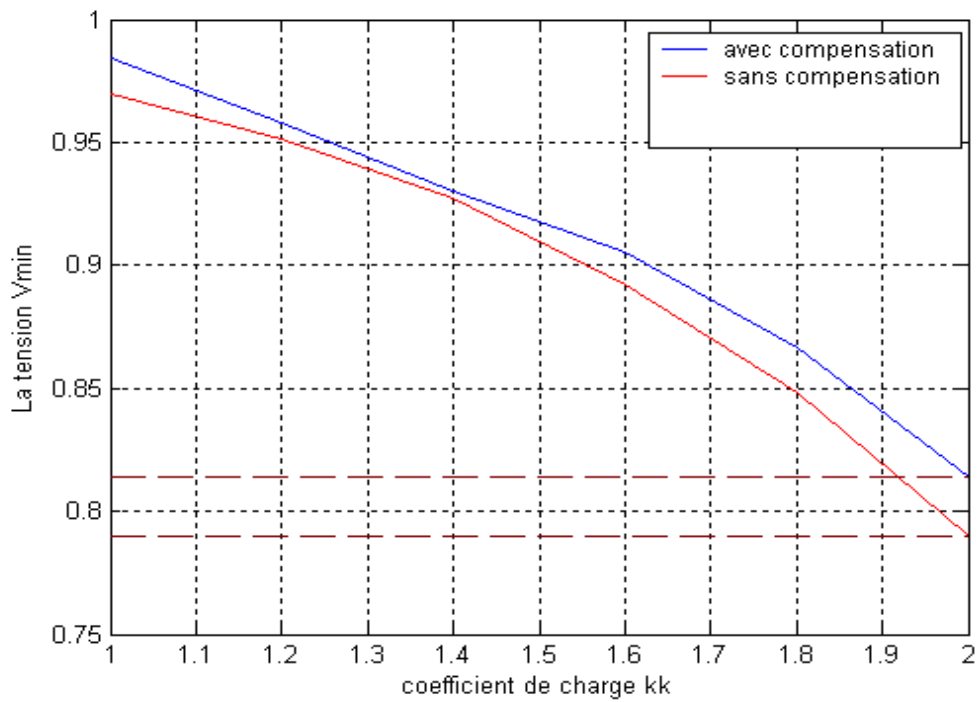


Figure (4.12) : variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge

Tableau (IV-7) : Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jdb – 25 jdb) :

	Réseau 9 jeux de barres		Réseau 25 jeux de barres	
	Cas normal	Rupture ligne 3 - 4	Cas normal	Rupture ligne 2 - 6
Sans compensation	Jdb9 $\Delta V=4.07\%$	Jdb9 $\Delta V=6.29\%$	Jdb15 $\Delta V=3.04\%$	Jdb15 $\Delta V=3.22\%$
Avec compensation	Jdb9 $\Delta V=1.27\%$	Jdb9 $\Delta V=3.38\%$	Jdb15 $\Delta V=1.16\%$	Jdb15 $\Delta V=1.32\%$

$$\Delta V = \frac{V_{ref} - V}{V_{ref}} \quad \text{et } V_{ref} = 1.00(pu)$$

Interprétation :

D'après les résultats de programmation du compensateur dynamique shunt SVC ,il y a une amélioration sur les indices de qualité de l'énergie , en particulier la tension . Le jeu de barre le plus sensible est le jeu de barre 9 dans le réseau test 9 jeux de barres.

Le jeu de barre le plus sensible est le jeu de barre 15 dans le réseau test 25 jeux de barres.

Donc on remarque que :

- La tension est améliorée.
- Réduction faible des pertes de la puissance active.
- Amélioration de coût de production.

IV-1-2. Compensation série avec TCSC :**IV-1-2-1. Réseau électrique de 30 jeux de barres : (IEEE Bus 30JB)**

Les réseaux électriques actuellement implantés sont caractérisés par leurs charges électriques qui sont nombreuses et distantes des centres de production d'énergie.

On propose un réseau électrique de moyen taille, constitué de 30 jeux de barres, 6 générateurs, 24 charges et 40 lignes de transport.

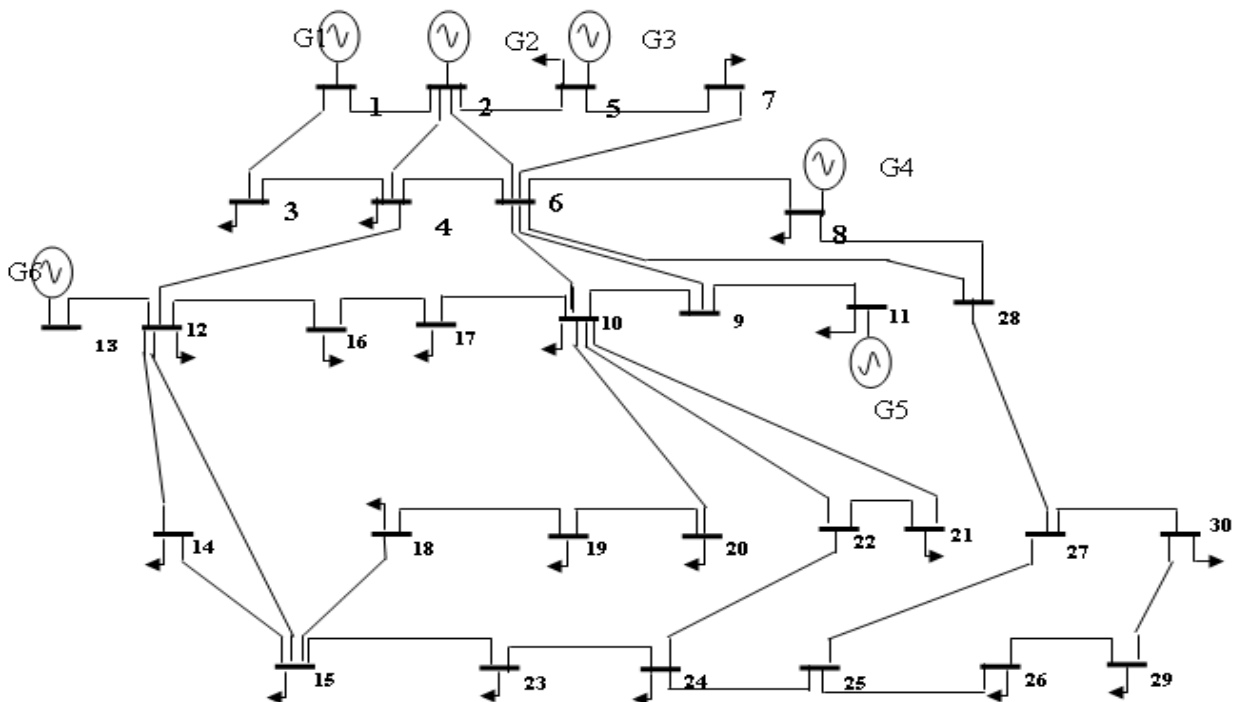


Figure (4.13): Schéma général d'un réseau électrique 30jdb

Comme mentionnée dans les chapitres précédents, il est parfois intéressant de pouvoir agir non seulement sur la puissance réactive mais sur la puissance active afin de pouvoir augmenter la stabilité ou de gérer les flux qui transitent sur les lignes. Le modèle du dispositif série TCSC a été intégré dans l'algorithme de Newton-Raphson qui a été testé sur le réseau 30 jdb.

L'organigramme général de l'intégration de TCSC est cité en annexe B.

Tableau (IV-8) : Comparaison des résultats du test 30 bus obtenus avec et sans TCSC (KK=1.5):

La puissance demandée active et réactive : 425.10 MW et 204.30. MVAR.

La ligne la plus sensible est la ligne : 2-5.

Le jeu de barre le plus sensible est: 30.

Résultats	Sans Compensation	Avec Compensation
Tension 2 (pu)	0.9997	0.9983
Tension 5 (pu)	0.9220	0.946
Tension 30 (pu)	0.8320	0.8384
Pertes active 2-5 (MW)	8.3999	3.434
Pertes réactive 2-5 (MVAR)	31.419	10.497
Puissance active générée total (MW)	473.661	466.321
Puissance réactive générée total (MVAR)	332.795	295.072
Pertes active total (MW)	50.405	41.221
Pertes réactive total (MVAR)	128.599	90.772
K	-----	0.700
Xtcsc (pu)	-----	0.042
α (degré)	-----	279.101

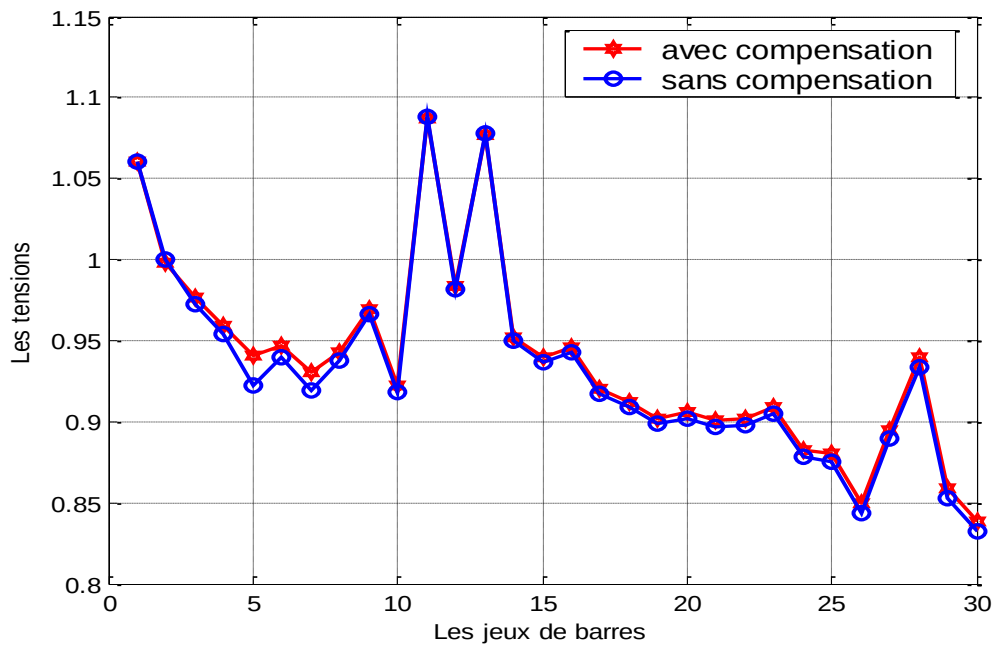


Figure (4.14): Variation de la tension pour l'augmentation de la charge 50%

Tableau (IV-9) : L'augmentation de la charge : 30 % et 40 % - sans compensation-

Résultats	Sans Compensation	
	KK=1.3	KK=1.4
Tension 2 (pu)	1.0081	1.0040
Tension 5 (pu)	0.9347	0.9283
Tension 30 (pu)	0.8692	0.8512
Pertes active 2-5 (MW)	6.073	7.175
Pertes réactive 2-5 (MVAR)	21.566	26.234
Puissance active générée total (MW)	402.331	437.628
Puissance réactive générée total (MVAR)	256.477	293.173
Pertes active total (MW)	35.818	42.690
Pertes réactive total (MVAR)	79.444	102.627

Tableau (IV-10) : L'augmentation de la charge : 30 % et 40 % - avec compensation-

Résultats	Avec Compensation	
	KK=1.3	KK=1.4
Tension 2 (pu)	1.0068	1.0026
Tension 5 (pu)	0.9518	0.9462
Tension 30 (pu)	0.8742	0.8569
Pertes active 2-5 (MW)	2.488	2.934
Pertes réactive 2-5 (MVAR)	6.440	8.354
Puissance active générée totale (MW)	397.659	431.649
Puissance réactive générée total (MVAR)	229.327	261.107
Pertes active total (MW)	29.239	34.889
Pertes réactive total (MVAR)	52.267	70.427
K	0.700	0.700
Xtcsc (pu)	0.040	0.040
α (degré)	259.073	259.073

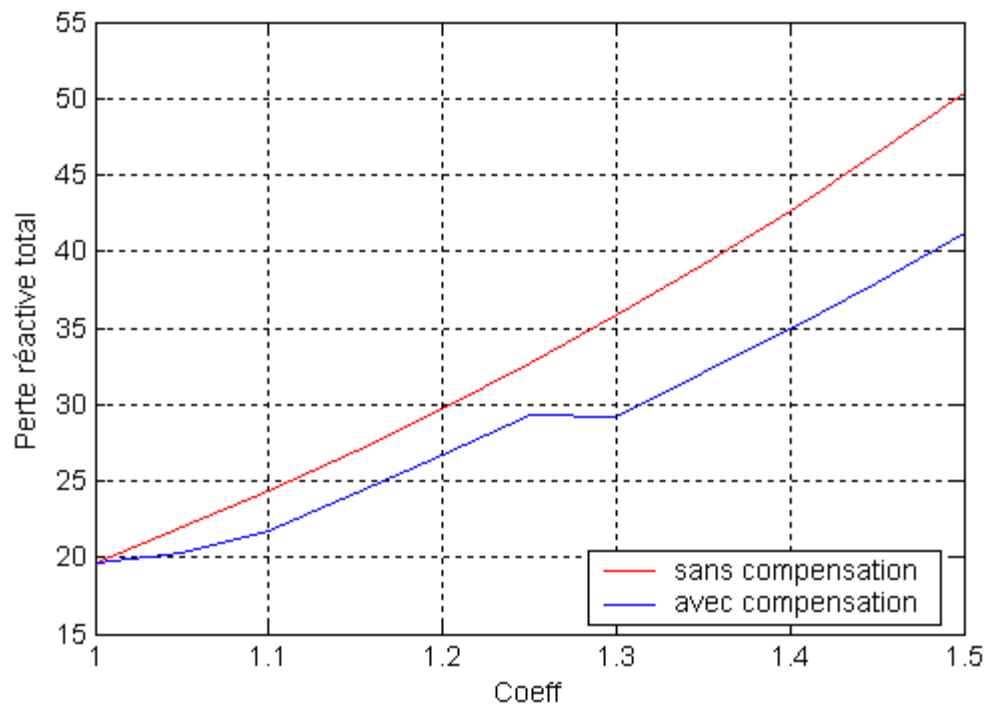


Figure (4.15): Variation des pertes active totale en fonction de l'augmentation de la charge

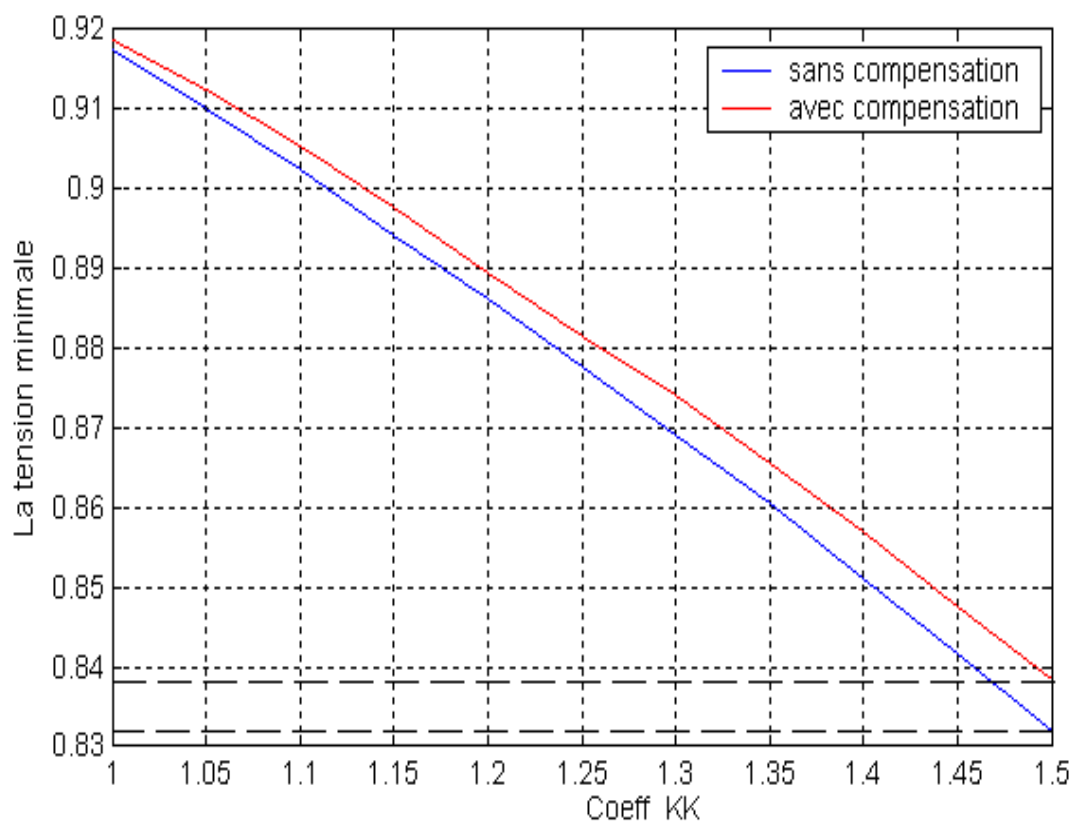


Figure (4.16): Variation de la tension minimale en fonction de l'augmentation de la charge

Interprétation :

Nous remarquons que les pertes du système compensé réduites avec un emplacement optimal du TCSC , qui sont d'après nos résultats relatif à la ligne sensible 2-5 pour le réseau 30 jeux de barres .

IV-2. PARTIE DEUX : SIMULATION

Cette partie présente une analyse générale de la stabilité transitoire en présence d'un dispositif FACTS (SVC). Cette étude a été testée sur un réseau standard de 'Hydro Quebec Canada', constitue de 3 jeux de barres et de 2 générateurs (turbine hydraulique). Afin de comprendre l'impact de SVC sur la marge de stabilité transitoire un modèle simplifié a été employé. Les résultats de calculs ont été obtenus par une simulation sous l'environnement MATLAB (SIMULINK) dans les deux cas : sans compensation et avec compensation.

Les courbes qui ont été exposé dans cette partie correspond à :

La tension de SVC, la susceptance B, l'angle de charge δ et la puissance transité.

Pour les différents types de court-circuit : monophasée, biphasée et triphasée.

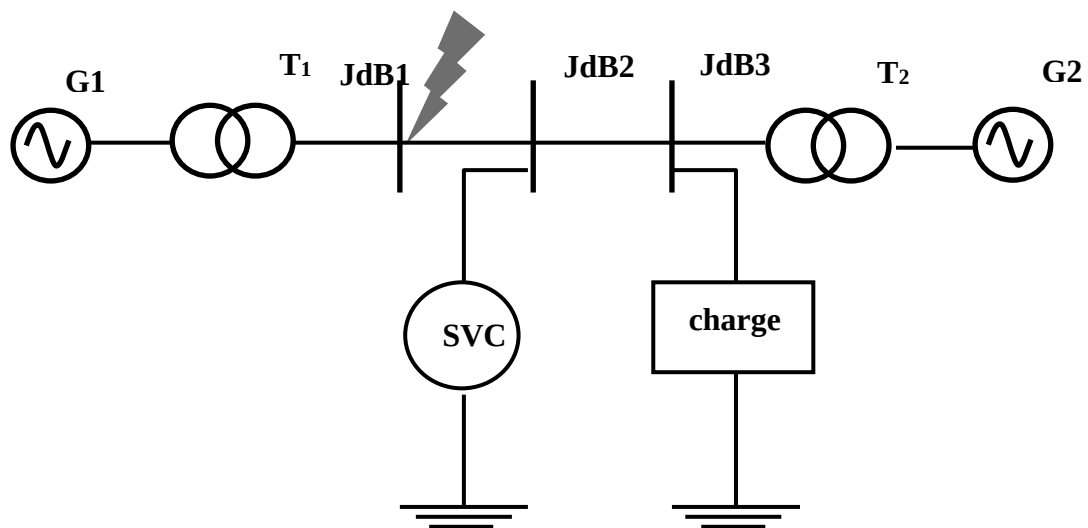


Figure (4.17) : Schéma unifilaire du réseau test de simulation Hydro-Quebec- Canada

IV-2-1. Compensation sans SVC:

IV-2-1-1. Court-circuit monophasé a la terre:

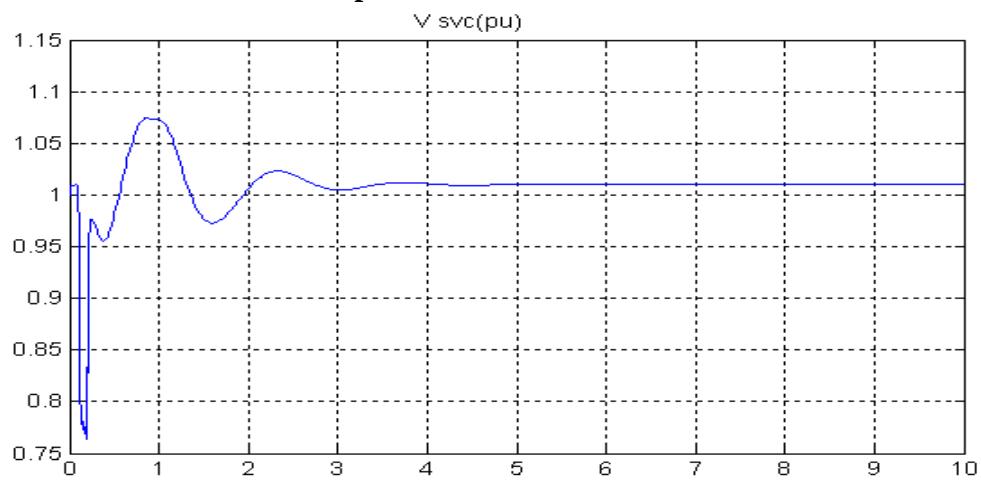


Figure (4.18) : Variation de la tension

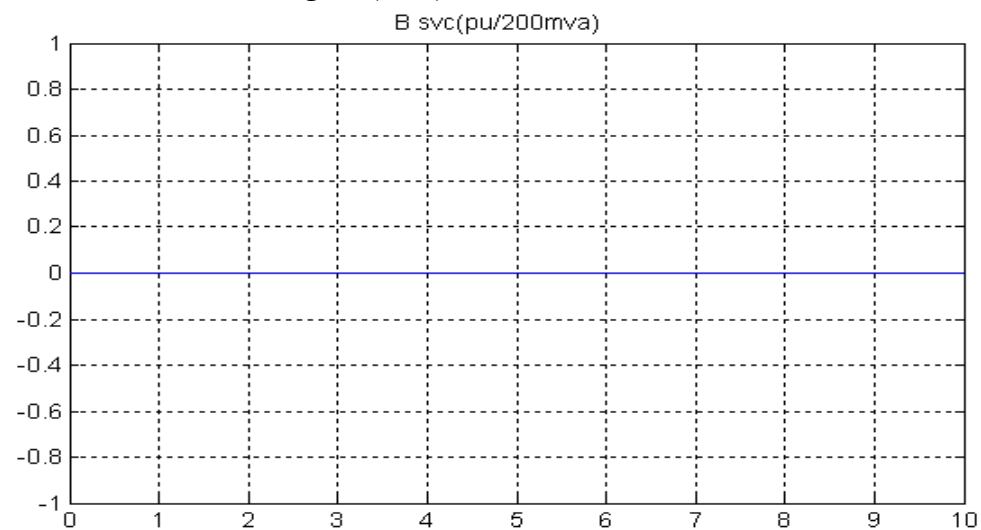


Figure (4.19) : Variation de la susceptance

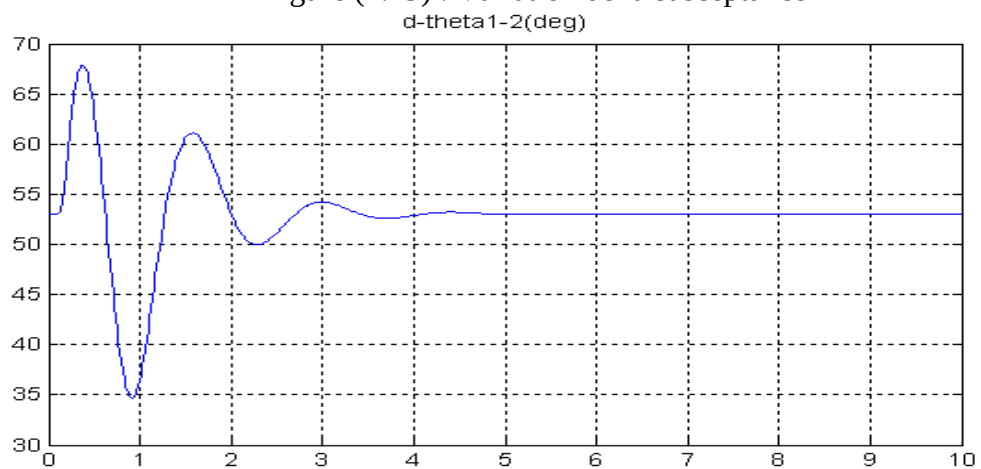


Figure (4.20) : Variation de l'angle de charge

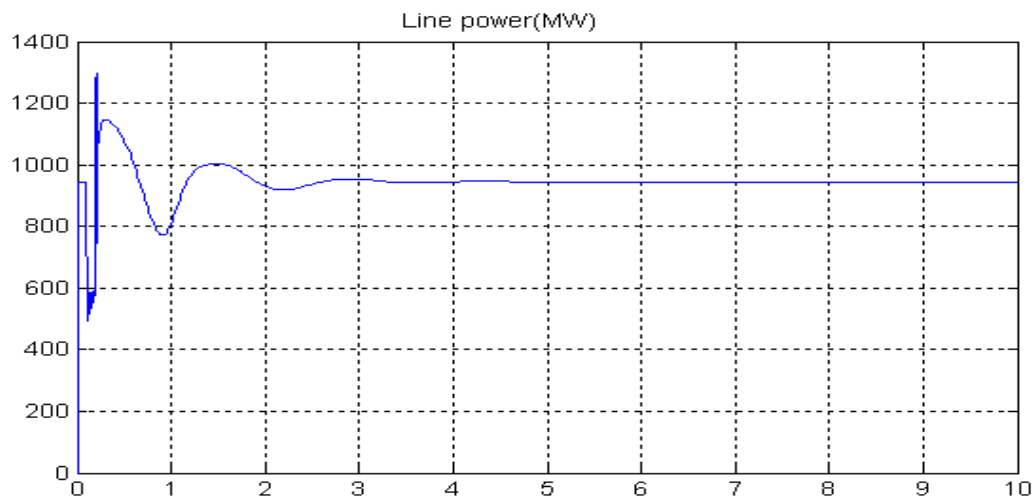


Figure (4.21) : Variation de la puissance maximal transitée

IV-2-1-2.Court-circuit biphase à la terre:

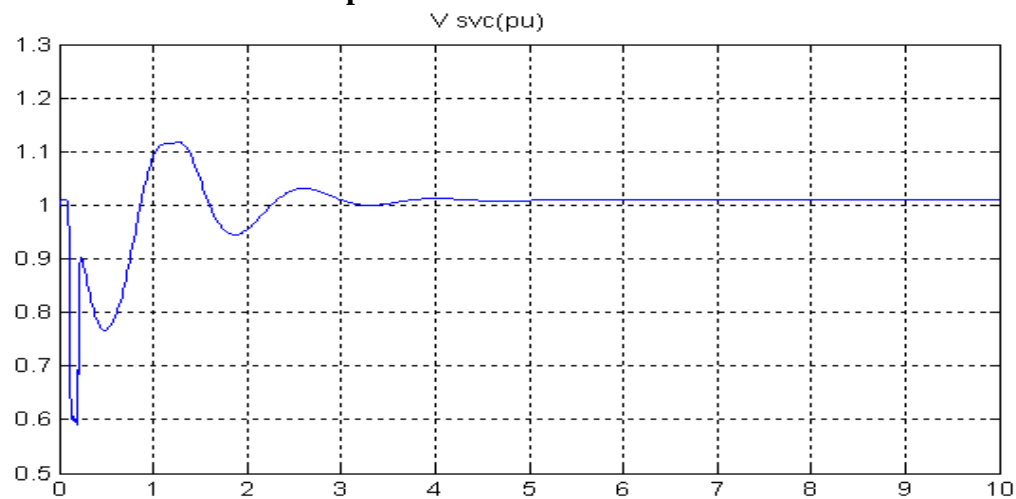


Figure (4.22) : Variation de la tension

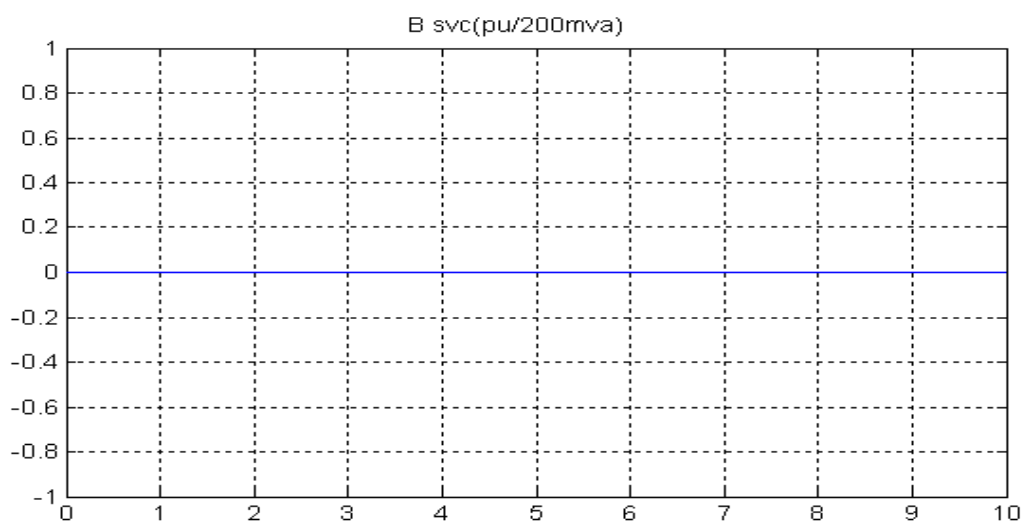


Figure (4.23) : Variation de la susceptance

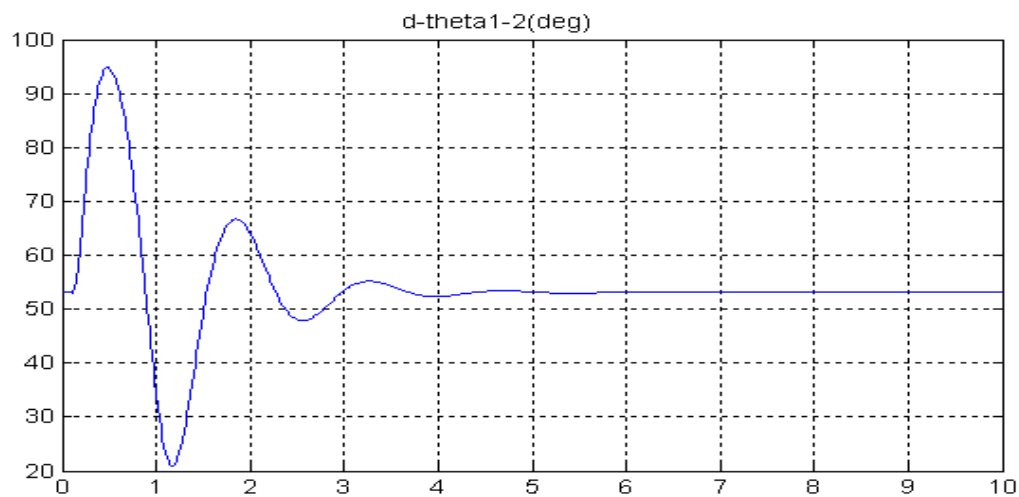


Figure (4.24) : Variation de l'angle de charge

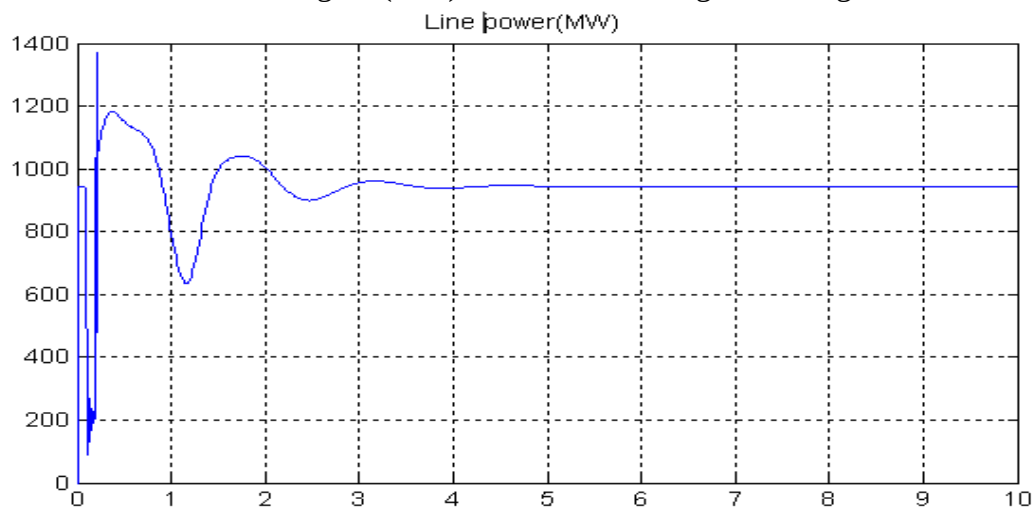


Figure (4.25) : Variation de la puissance maximal transitée

IV-2-1-3. Court-circuit triphasé a la terre:

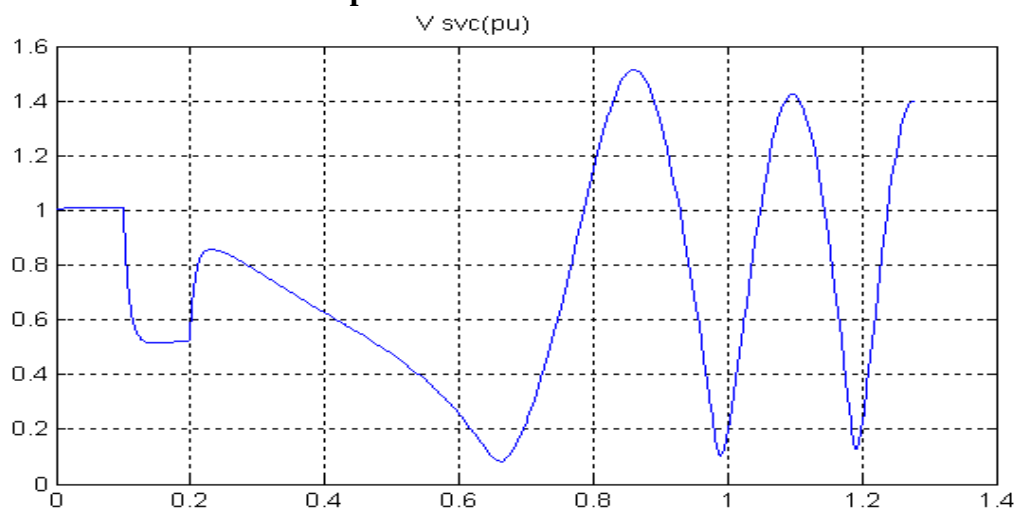


Figure (4.26) : Variation de la tension

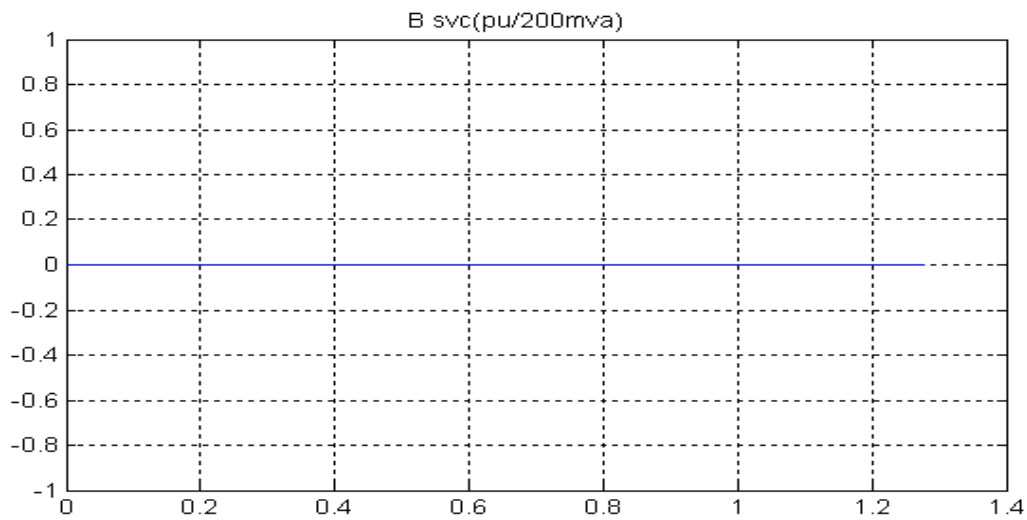


Figure (4.27) : Variation de la susceptance

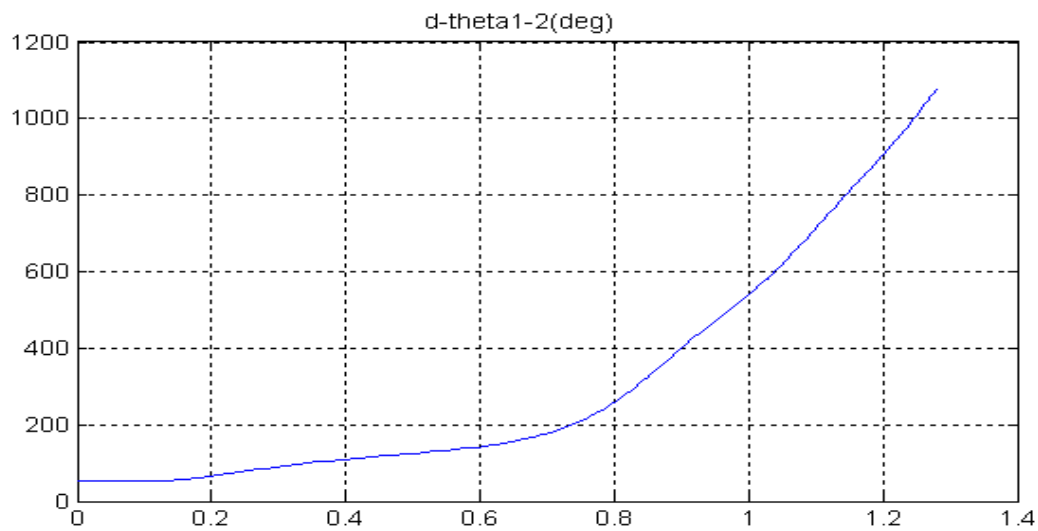


Figure (4.28) : Variation de l'angle de charge

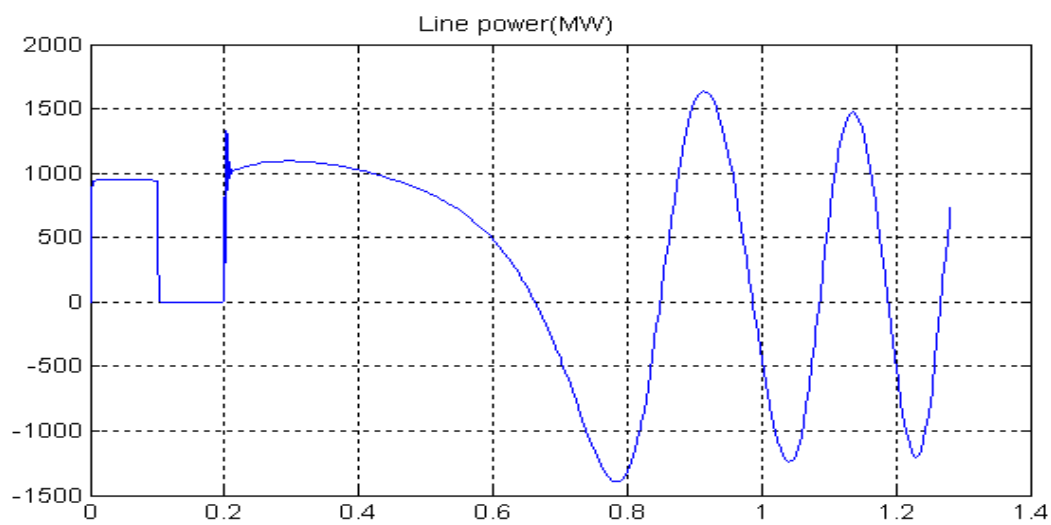


Figure (4.29) : Variation de la puissance maximal transitée

IV-2-2.Compensation avec SVC:

IV-2-2-1.Court-circuit monophasé a la terre:

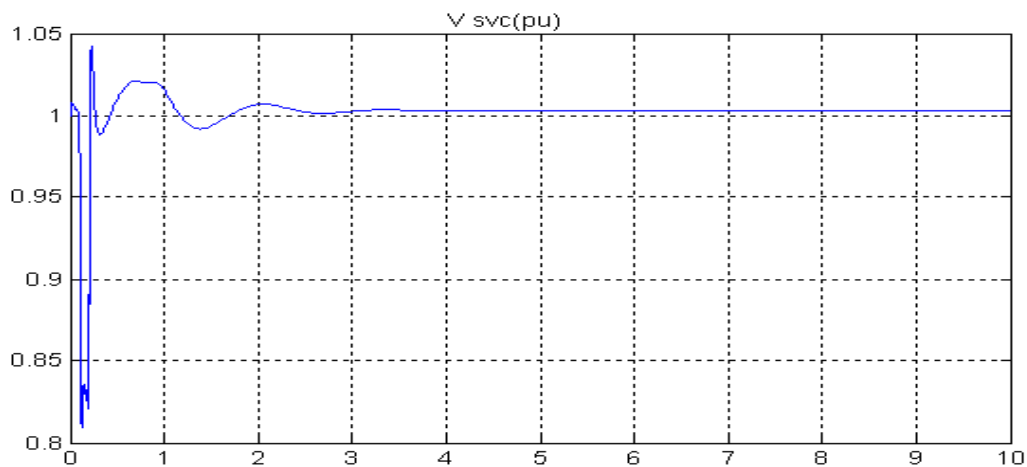


Figure (4.30) : Variation de la tension

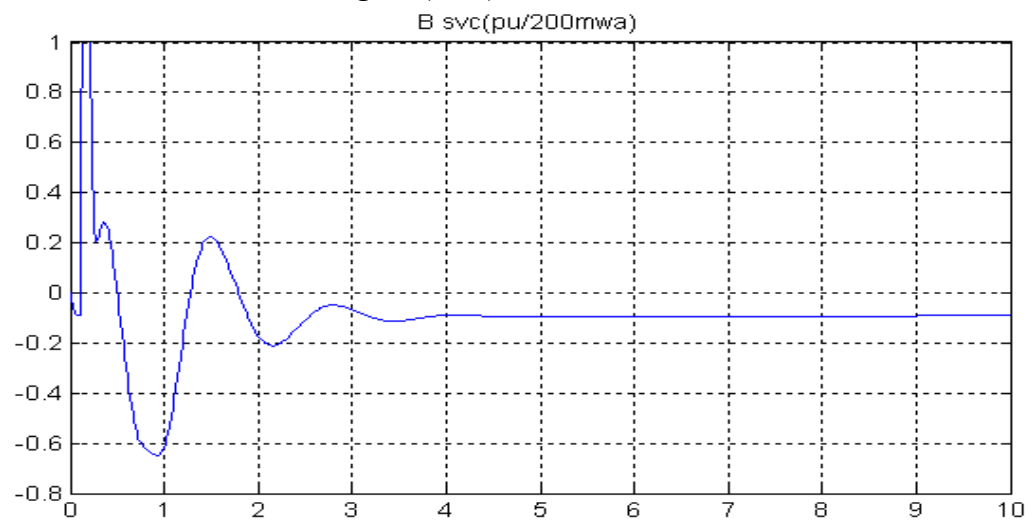


Figure (4.31) : Variation de la susceptance

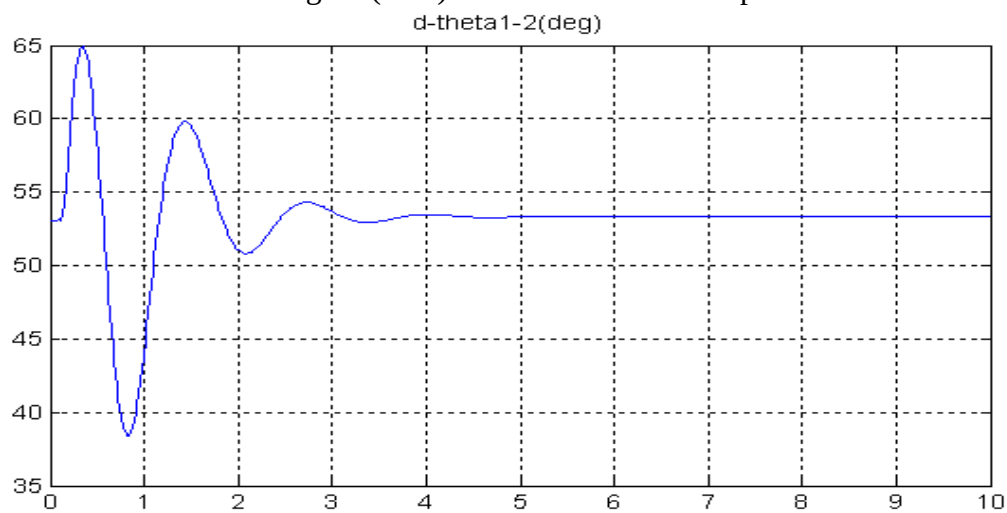


Figure (4.32) : Variation de l'angle de charge

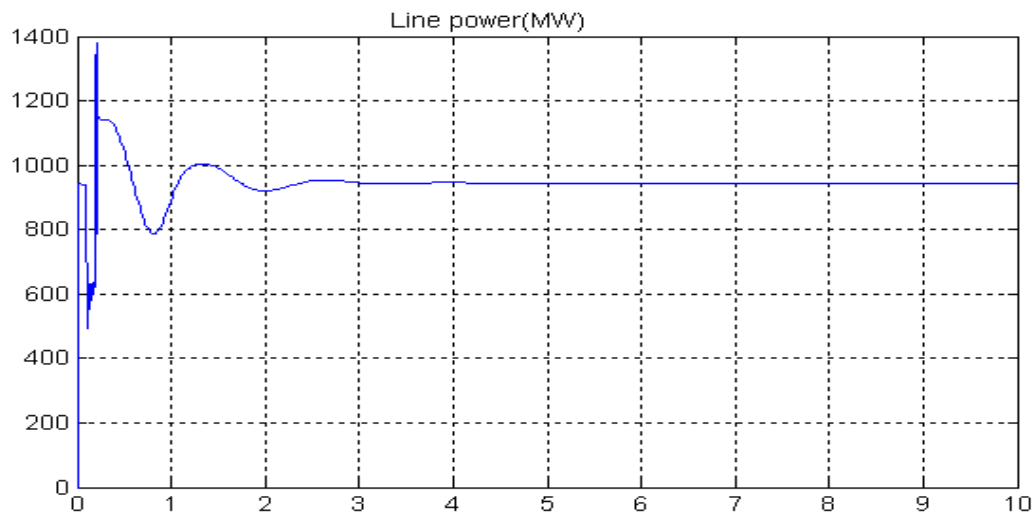


Figure (4.33) : Variation de la puissance maximale transitée

IV-2-2-2.Court-circuit biphasé a la terre:

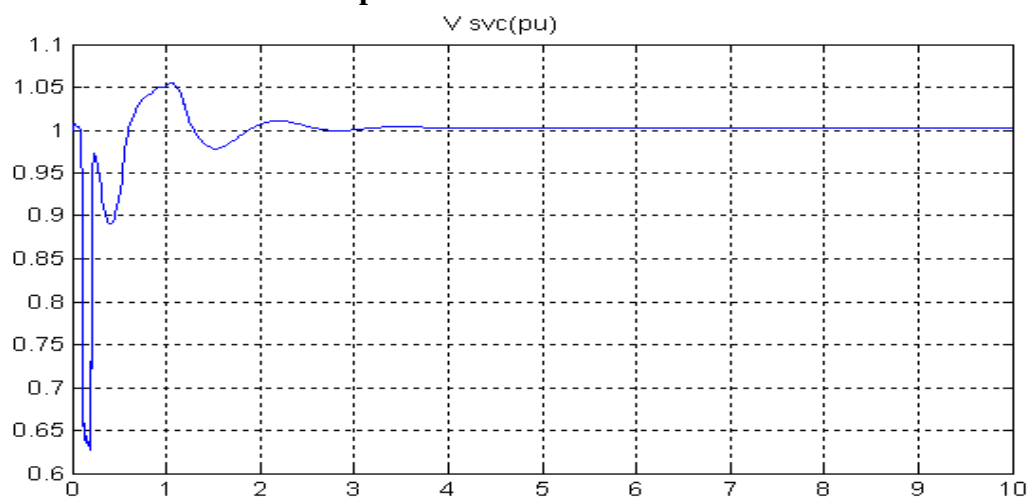


Figure (4.34) : Variation de la tension

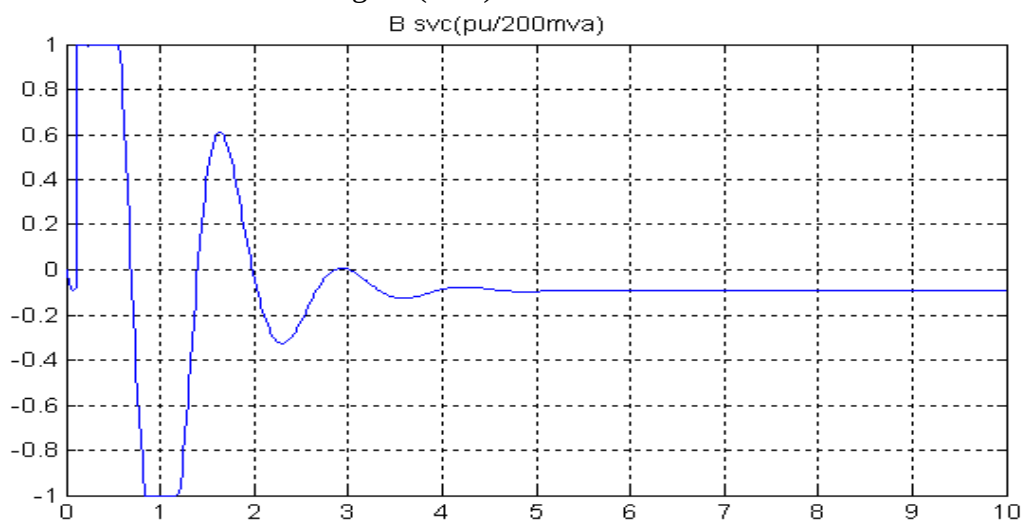


Figure (4.35) : Variation de la susceptance

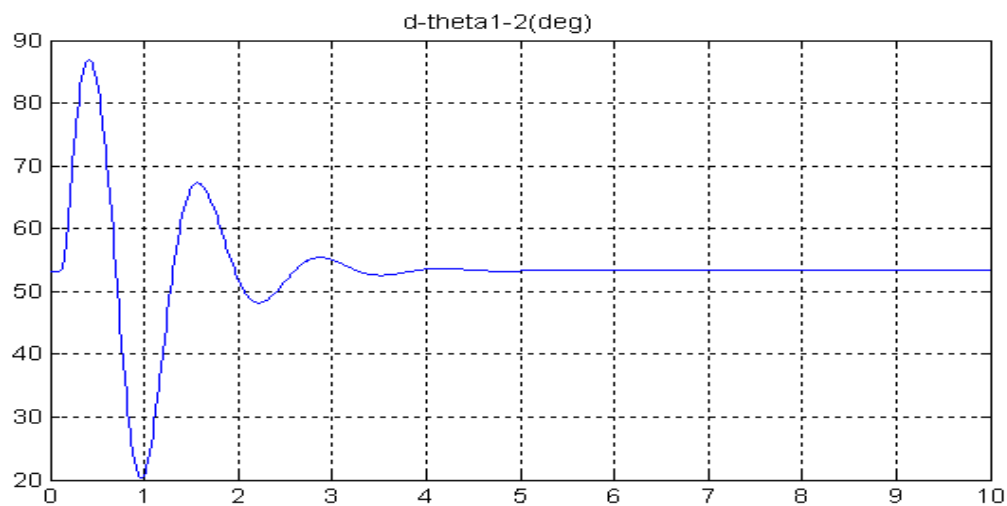


Figure (4.36) : Variation de l'angle de charge

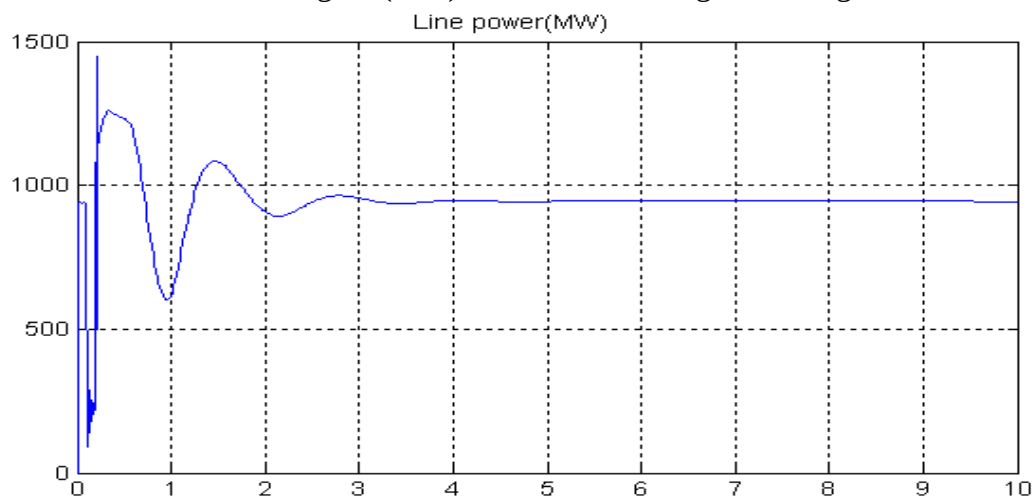


Figure (4.37) : Variation de la puissance maximal transitée

IV-2-2-3.Court-circuit triphasé a la terre:

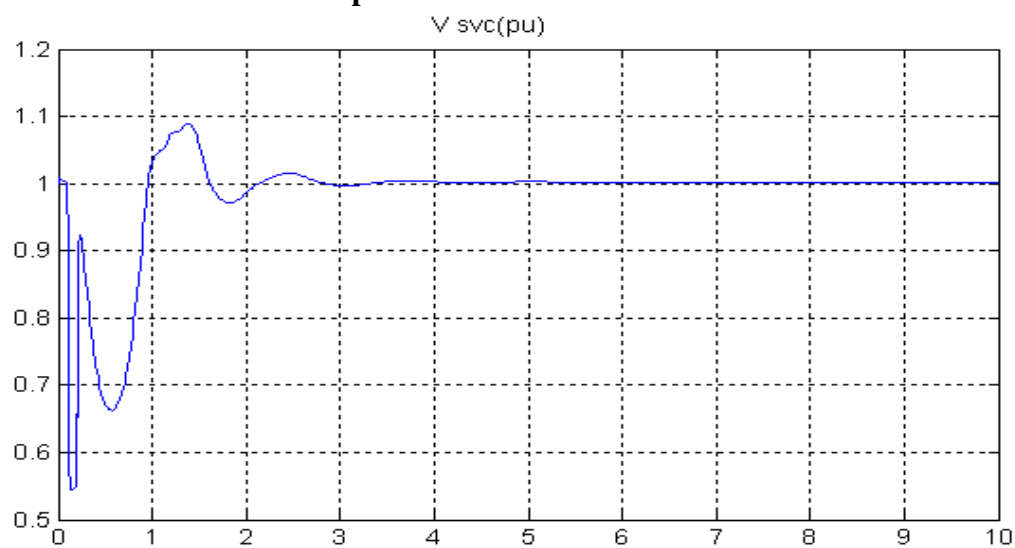


Figure (4.38) : Variation de la tension

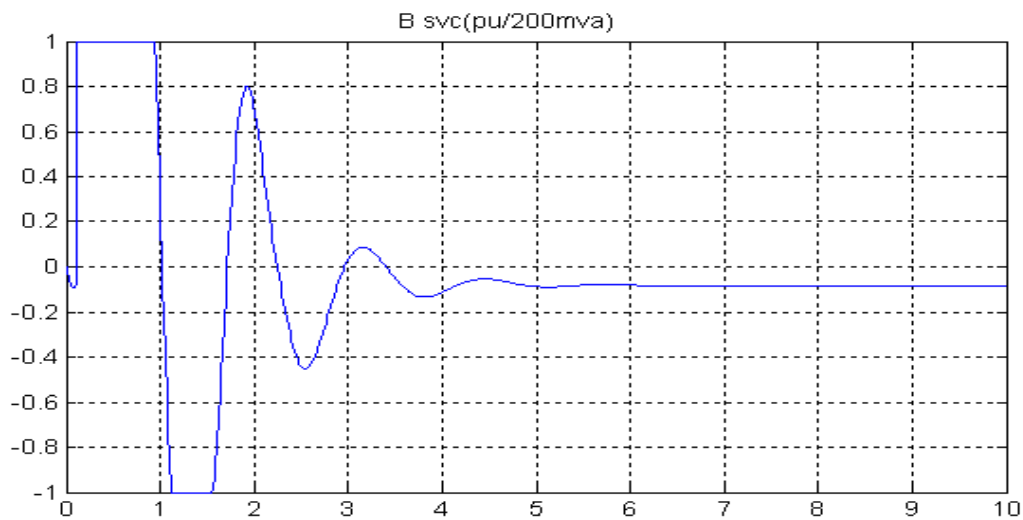


Figure (4.39) : Variation de la susceptance

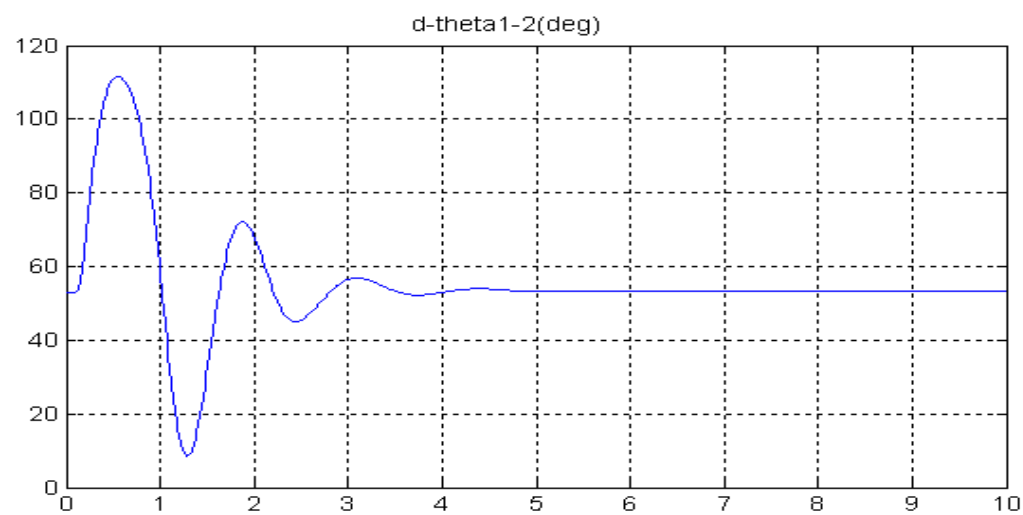


Figure (4.40) : Variation de la susceptance

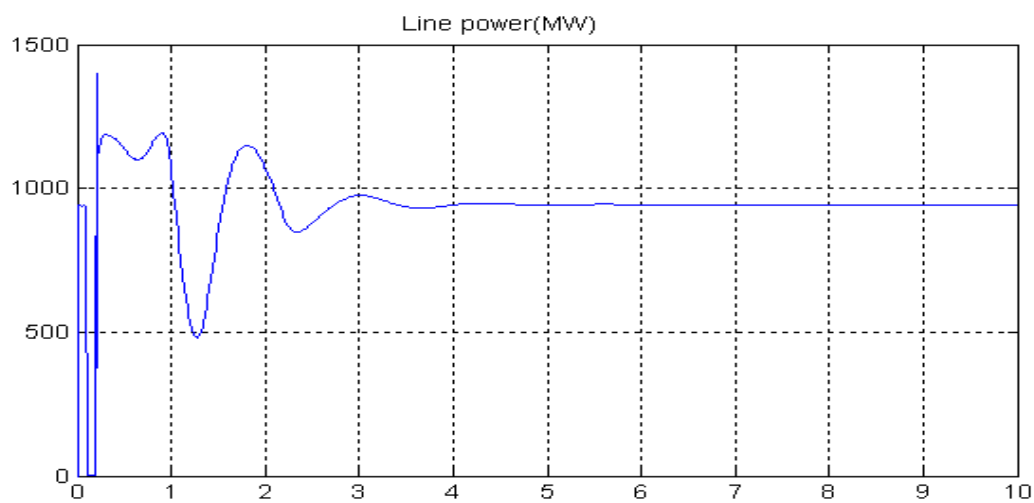


Figure (4.41) : Variation de la puissance maximal transité

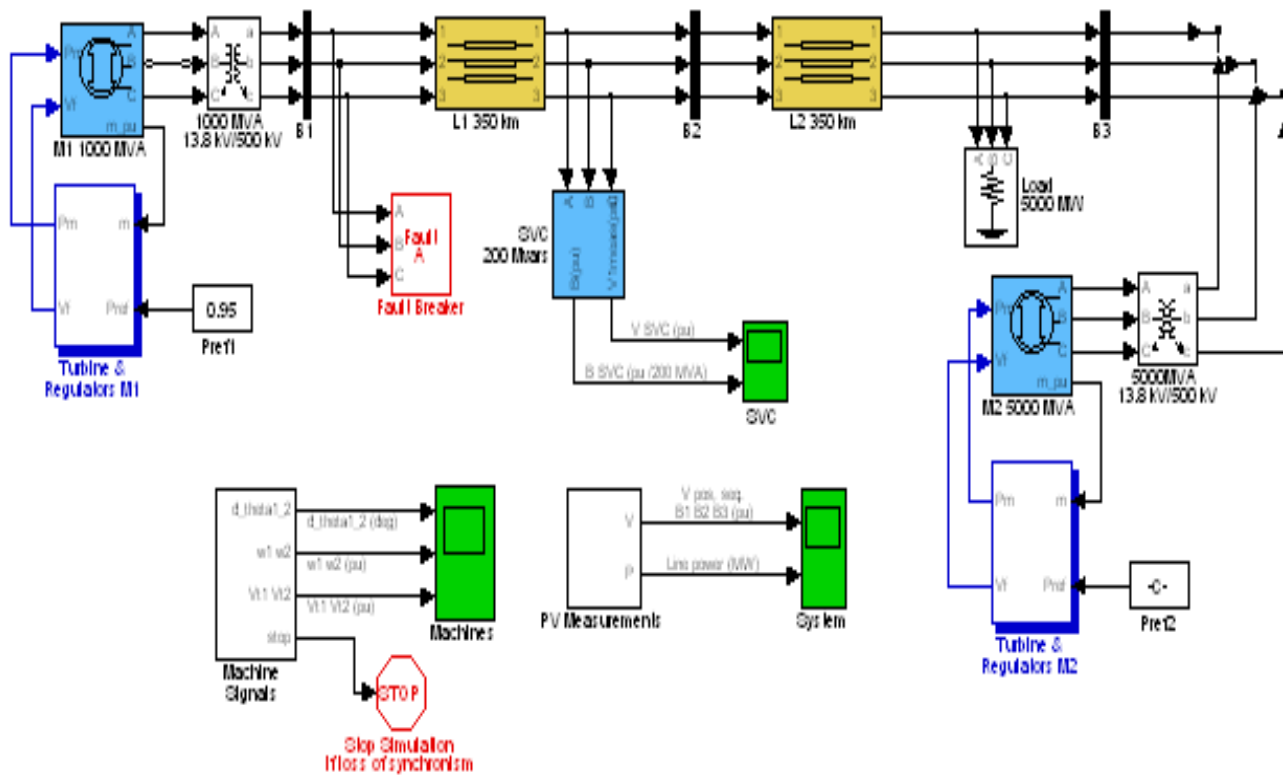
Interprétation :

La difficultés du point de vu stabilité apparaissent lors de court-circuit triphasé, celui-ci entraîne une brusque chute de tension, et par conséquent la liaison entre les alternateurs, devient si faible que souvent, ce qui entraîne une rupture de la stabilité. Lors du court-circuit monophasé et biphasé, la chute de tension est moindre et les alternateurs se trouvent dans des meilleurs conditions de fonctionnement celle du court-circuit triphasé.

L'utilisation de ce dernier a permis d'améliorer d'une remarquable la marge de stabilité transitoire. Le comportement transitoire d'un réseau test soumis à un défaut (monophasé, biphasé et triphasé), près du jeux de barres du source de production a été investi par simulation pour les cas suivant: sans SVC, avec SVC. Le changement apporté par les SVC en terme d'amélioration du temps critique d'élimination du défaut ainsi que l'influence de leurs emplacements et leurs paramètres ont été étudiés.

On peut conclure d'après les résultats obtenus que les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) peuvent contribuer a l'amélioration des indices de qualités d'énergie, par le choix efficace de l'emplacement et le contrôle flexible de leurs paramètres.

Bloc de simulink représente l'installation de SVC dans le réseau test :



CONCLUSION GENERALE

Après l'étude accompli dans ce mémoire concernant la modélisation et l'intégration des dispositifs de compensation dynamique dans les réseaux électrique, on peut conclure que l'intégration de cette nouvelle technologie (FACTS) dans la structure des réseaux électriques, permet le réglage des tensions, le contrôle du transit de la puissance active et réactive, ce qui permet une meilleure gestion de l'énergie et une amélioration des indices de qualité de l'énergie électrique.

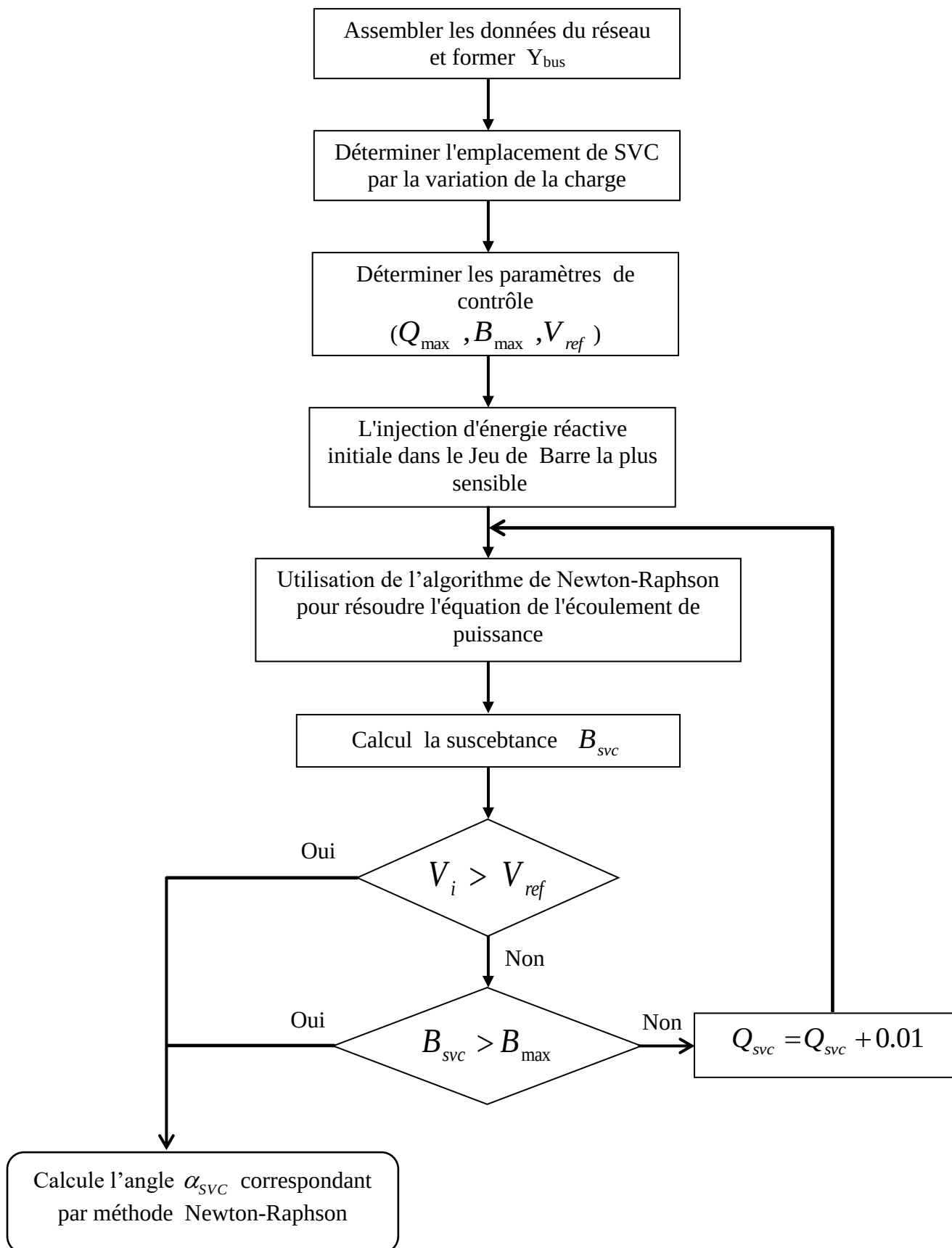
Les résultats obtenus par notre programme développé dans ce travail sous l'environnement (MATLAB), montre clairement l'avantage d'intégrer des dispositifs, un contrôle flexible de l'énergie réactive est réalisé par un emplacement efficace du dispositif shunt "SVC", un contrôle flexible de la puissance active au niveau des lignes avec un emplacement adéquat de l'un des dispositifs séries, le TCSC a permis dans les deux cas d'améliorer les indices de qualité de l'énergie. Il faut noter que chaque dispositif a sa particularité, pour le dispositif SVC, son rôle principal est le contrôle dynamique de la tension. Tandis que le dispositif série TCSC, a pour rôle principal le contrôle de la puissance transmise.

Enfin, les résultats de simulation nous ont permis d'aboutir à une constatation que l'installation d'un compensateur statique avec un emplacement efficace permet d'accroître la capacité de transit et de réduire les pertes tout en maintenant un profil réglage de la tension sous différents régimes .

Comme perspective nous proposons à la nouvelle promotion d'élargir l'étude du problème de l'énergie réactive en utilisant ces nouvelles techniques.

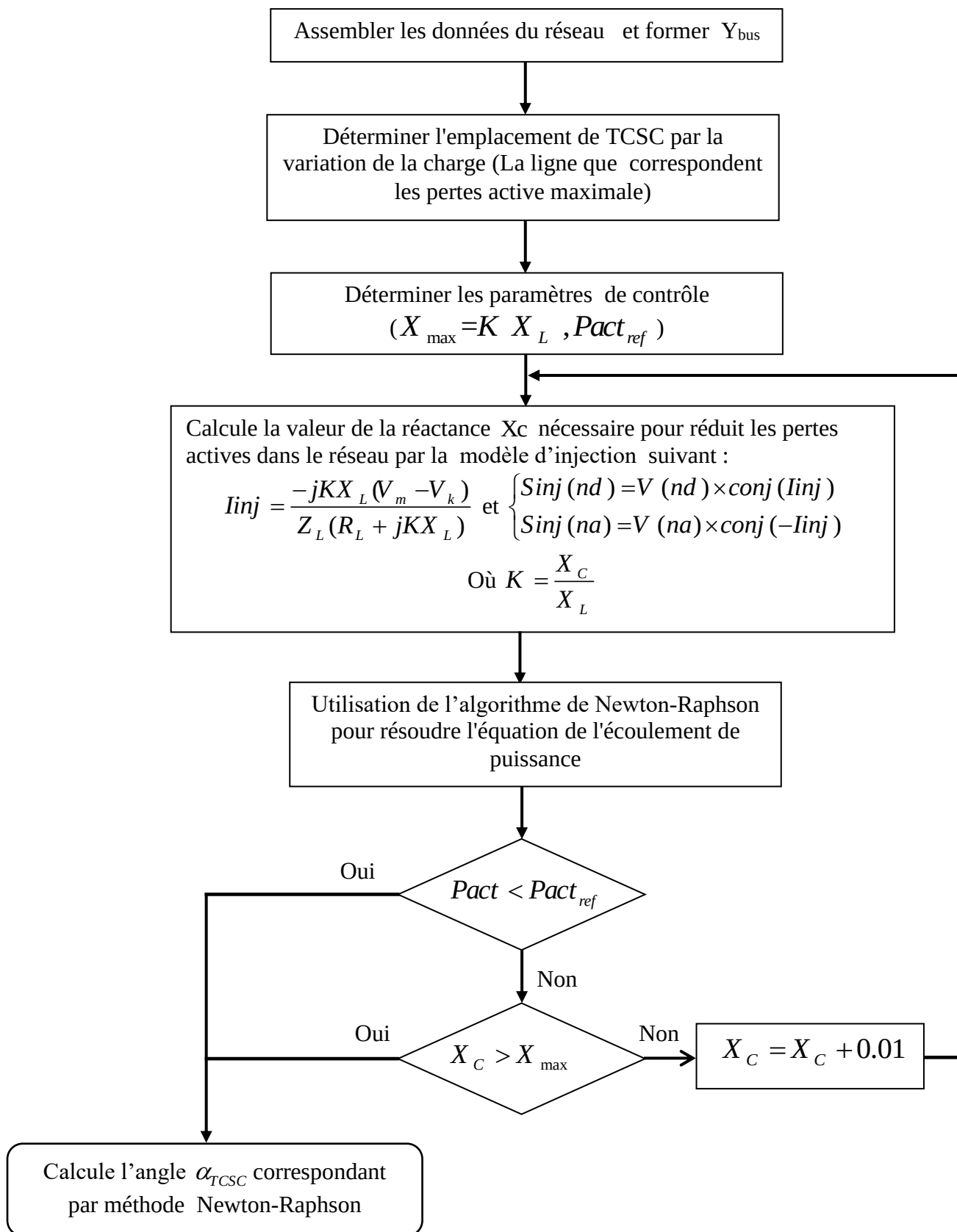
Annexe A :

Organigramme de la compensation shunt par SVC:



Annexe B :

Organigramme de la compensation série par TCSC:



Annexe:

Annexe C :

*Données des jeux de barres du réseau 9 jeux de barres :

% [baseMVA, bus, gen, branch, area, gencost] = case9

% IEEE 9-BUS TEST SYSTEM (American Electric Power)

Bus Bus Voltage Angle -Load-----Generator-----Static Mvar

```
busdata=[ 1  1  1.06  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0  0
           2  2  1.043  0.0  21.70  12.7  40.0  0.0  -40  50  0
           3  3  1.0  0.0  2.4  1.2  0.0  0.0  0  0  0
           4  3  1.06  0.0  17.6  1.6  0.0  0.0  0  0  0
           5  2  1.01  0.0  94.2  19.0  0.0  0.0  -40  -40  0
           6  3  1.0  0.0  5.0  5.0  0.0  0.0  0  0  0
           7  3  1.0  0.0  22.8  10.9  0.0  0.0  0  0  0
           8  2  1.0  0.0  30.0  30.0  0.0  0.0  -30  40  0
           9  3  1.0  0.0  10.0  10.0  0.0  0.0  0  0  0];
```

*Données des lignes de transport du réseau 9 jeux de barres :

```
Bus bus  R      X      1/2 B = 1 for lines
nl nr    p.u.   p.u.   p.u.  > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
linedata=[1 2  0.0192  0.0575  0.02640  1
           1 3  0.0452  0.1852  0.02040  1
           2 4  0.0570  0.1737  0.01840  1
           3 4  0.0132  0.0379  0.00420  1
           2 5  0.0472  0.1983  0.02090  1
           2 6  0.0581  0.1763  0.01870  1
           4 6  0.0119  0.0414  0.00450  1
           6 7  0.0267  0.0820  0.00850  1
           6 8  0.0120  0.0420  0.00450  1
           6 9  0.0      0.2080  0.0      1];
```

Annexe:

*Données des jeux de barres du réseau 25 jeux de barres :

Bus Bus Voltage Angle -Load-----Generator-----Static Mvar

No	Code	Mag	Degré	Mw	Mvar	MW	Mvar	Qmin	Qmax
1	1	1.02	0.0	00	0	0	0	-150	250
2	2	1.00	0.0	10	3	100	17	-80	150
3	2	1.0	0.0	50	17	150	4	-80	150
4	2	1.0	0.0	30	10	50	-4	-80	150
5	2	1.0	0.0	25	8	200	-47	-80	150
6	3	1.00	0.0	15	5	0	0	0	0
7	3	1.00	0.0	15	5	0	0	0	0
8	3	1.00	0.0	25	0	0	0	0	0
9	3	1.00	0.0	15	5	0	0	0	0
10	3	1.00	0.0	15	5	0	0	0	0
11	3	1.00	0.0	5	00	0	0	0	0
12	3	1.00	0.0	10	00	0	0	0	0
13	3	1.00	0.0	25	08	0	0	0	0
14	3	1.00	0.0	20	07	0	0	0	0
15	3	1.00	0.0	30	10	0	0	0	0
16	3	1.00	0.0	30	10	0	0	0	0
17	3	1.00	0.0	60	20	0	0	0	0
18	3	1.00	0.0	15	5	0	0	0	0
19	3	1.00	0.0	15	5	0	0	0	0
20	3	1.00	0.0	25	8	0	0	0	0
21	3	1.00	0.0	20	7	0	0	0	0
22	3	1.00	0.0	20	7	0	0	0	0
23	3	1.00	0.0	15	7	0	0	0	0
24	3	1.00	0.0	15	5	0	0	0	0
25	3	1.00	0.0	25	8	0	0	0	0

*Données des lignes de transport du réseau 25 jeux de barres :

Bus nl	bus nr	R p.u.	X p.u.	B/2 p.u.	Bus nl	bus nr	R p.u.	X p.u.	B/2 p.u.
1	3	0.072	0.2876	0.0179	7	8	0.0529	0.1465	0.0078
1	16	0.029	0.1379	0.0337	7	12	0.0364	0.1736	0.011
1	17	0.1012	0.2799	0.0144	8	9	0.0387	0.1847	0.0118
1	19	0.1407	0.0097	0.0379	9	17	0.0407	0.2075	0.0118
1	23	0.1015	0.2245	0.0873	9	10	0.097	0.2091	0.09
1	25	0.0759	0.3593	0.0186	10	11	0.089	0.2859	0.0137
2	6	0.0617	0.2935	0.0155	11	17	0.1068	0.2807	0.0161
2	7	0.0511	0.2442	0.0175	12	17	0.046	0.2196	0.0139
3	8	0.0579	0.2763	0.0185	14	15	0.0281	0.0764	0.0044
3	13	0.0564	0.1478	0.0185	15	16	0.0256	0.0673	0.0148
3	14	0.1183	0.3573	0.0113	17	18	0.0806	0.2119	0.0122
4	19	0.0196	0.0514	0.022	18	19	0.0872	0.2294	0.0132
4	20	0.0382	0.1007	0.0558	20	21	0.0615	0.1613	0.0354
5	21	0.097	0.2547	0.00577	21	22	0.0414	0.1087	0.0238
5	10	0.0497	0.2372	0.1335	22	23	0.225	0.3559	0.0169
5	17	0.0144	0.1269	0.014	22	24	0.097	0.2595	0.0567
5	19	0.0929	0.2442	0.014	24	25	0.0472	0.1458	0.0317
6	13	0.0263	0.0691	0.004	0	0	0	0	0

Annexe:

*Données des jeux de barres du réseau 30 jeux de barres : IEEE-Bus 30

Bus		Bus Voltage	Angle	---Load---		-----Generator-----		Static Mvar		
No	code	Mag.	Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	Qmin	Qmax	+Qc/-Ql
1	1	1.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
2	2	1.043	0.0	21.70	12.7	40.0	0.0	-40	50	0.0
3	3	1.0	0.0	2.4	1.2	0.0	0.0	0	0	0.0
4	3	1.06	0.0	7.6	1.6	0.0	0.0	0	0	0.0
5	2	1.01	0.0	94.2	19.0	0.0	0.0	- 40	40	0.0
6	3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
7	3	1.0	0.0	22.8	10.9	0.0	0.0	0	0	0.0
8	2	1.01	0.0	30.0	30.0	0.0	0.0	-30	40	0.0
9	3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
10	3	1.0	0.0	5.8	12.0	0.0	0.0	-6	24	0.0
11	2	1.082	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
12	3	1.0	0.0	11.2	7.5	0.0	0.0	0	0	0.0
13	2	1.071	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-6	24	0.0
14	3	1	0.0	6.2	1.6	0.0	0.0	0	0	0.0
15	3	1	0.0	8.2	2.5	0.0	0.0	0	0	0.0
16	3	1	0.0	3.5	1.8	0.0	0.0	0	0	0.0
17	3	1	0.0	9.0	5.8	0.0	0.0	0	0	0.0
18	3	1	0.0	3.2	0.9	0.0	0.0	0	0	0.0
19	3	1	0.0	9.5	3.4	0.0	0.0	0	0	0.0
20	3	1	0.0	2.2	0.7	0.0	0.0	0	0	0.0
21	3	1	0.0	17.5	11.2	0.0	0.0	0	0	0.0
22	3	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
23	3	1	0.0	3.2	1.6	0.0	0.0	0	0	0.0
24	3	1	0.0	8.7	6.7	0.0	0.0	0	0	0.0
25	3	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
26	3	1	0.0	3.5	2.3	0.0	0.0	0	0	0.0
27	3	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
28	3	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
29	3	1	0.0	2.4	0.9	0.0	0.0	0	0	0.0
30	3	1	0.0	10.6	1.9	0.0	0.0	0	0	0.0

Annexe:

*Données des lignes de transport du réseau 30 jeux de barres :

Bus bus		R	X	1/2 B
nl	nr	p.u.	p.u.	p.u.
1	2	0.0192	0.0575*35	0.02640
1	3	0.0452	0.1852	0.02040
2	4	0.0570	0.1737	0.01840
3	4	0.0132	0.0379	0.00420
2	5	0.0472	0.1983	0.02090
2	6	0.0581	0.1763	0.01870
4	6	0.0119	0.0414	0.00450
5	7	0.0460	0.1160	0.01020
6	7	0.0267	0.0820	0.00850
6	8	0.0120	0.0420	0.00450
6	9	0.0	0.2080	0.0
6	10	0.0	0.5560	0.0
9	11	0.0	0.2080	0.0
9	10	0.0	0.1100	0.0
4	12	0.0	0.2560	0.0
12	13	0.0	0.1400	0.0
12	14	0.1231	0.2559	0.0
12	15	0.0662	0.1304	0.0
12	16	0.0945	0.1987	0.0
14	15	0.2210	0.1997	0.0
16	17	0.0824	0.1923	0.0
15	18	0.1073	0.2185	0.0
18	19	0.0639	0.1292	0.0
19	20	0.0340	0.2090	0.0
10	17	0.0324	0.0845	0.0
10	21	0.0348	0.0749	0.0
10	22	0.0727	0.1499	0.0
21	22	0.0116	0.0236	0.0
15	23	0.1000	0.2020	0.0
22	24	0.1150	0.1790	0.0
23	24	0.1320	0.2700	0.0
24	25	0.1885	0.3292	0.0
25	26	0.2544	0.3800	0.0
25	27	0.1093	0.2087	0.0
28	27	0.0	0.3960	0.0
27	29	0.2198	0.4153	0.0
27	30	0.3202	0.6027	0.0
29	30	0.2399	0.4533	0.0
8	28	0.0636	0.2000	0.0214
6	28	0.0169	0.0599	0.065

Annexe:

*Les valeurs de la limite de puissance générée :

1/ réseau 9 jeux de barres :

	Pgmin	Pgmax	
Pg (MW) = [	10	250	
	10	300	
	10	270	];

2/ réseau 25 jeux de barres :

	Pgmin	Pgmax	
Pg (MW) = [	100	300	
	80	150	
	80	200	
	20	100	
	100	300	];

3/ réseau 30 jeux de barres :

	Pgmin	Pgmax	
Pg (MW) = [	50	200	
	20	80	
	15	50	
	10	35	
	10	30	
	12	40	];

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Sarrand J Verseille « Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension dans les réseaux publics».
- [2] Glaudio A. Canizares, et Zeno T. Faur « Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse », IEEE Trans power systems, Vol . 14 , No-1 February 1999, pp.158.164.
- [3] R.Wierda « Flicker ouxintillement des sources lumineuse».
- [4] B. Khaled et Z. Hakim « Etude des compensateurs statique de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique ».
- [5] Chantouche « Condensateurs de puissance ».
- [6] R. Founie, JCPELLE « Condensateurs de puissance ».
- [7] D ROCK « Manœuvre et protection des batteries de condensateur MT».
- [8] Philip Moore , Peter Ashmole « Flexible AC transmission systems part 2 methods of transmission line compensation » , Power engineering journal December 1996.
- [9] L. Belkacem et Salem « Compensation dynamique de l'énergie reactive dans les réseaux électrique » , Université de Biskra promotion juin 2005.
- [10] Eshandar Gholipour Shahraki « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » , Université Henri Poincaré , Nancy-I , promotion octobre 2003.
- [11] Stéphane Gerbex « Métaheuristique appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique » , Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne , promotion 2003.
- [12] Gaboussa seddik et Dob Med Lakhdar « L'impact des dispositifs de compensation dynamique –FACTS- sur les réseaux de transport » , Université Biskra, promotion juin 2006.
- [13] D. Salah Sabry. L. Salah, B. Ahcen « Amélioration de la marge de la stabilité transitoire par l'utilisation des controleurs unifies d'écoulement de puissance –UPFC-» , Second International conference on Electrical systems ICES'06, May 08-10-2006, Oum El Bouaghi Algeria.
- [14] T. Bouktirm « *Application de la méthode du gradient à l'optimisation de l'écoulement des puissances* » , mémoire de magistère, université d'Annaba, Algérie, 2004.