

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

*Contribution à l'étude des systèmes
de compensation FACTS pour le
contrôle du transit de puissance
dans un réseau de transport*

Diriger par

M^{er}. LABBI Yacine

Réalise par:

* FRIDJAT Mohammed Seghir
* MEHDA Amara

Soutenu Juin 2014



(FACTS)

الشبكات الكهربائية

هذه المذكرة تعرض نماذج وطرق إدماج مثلى لأنظمة خطوط النقل المتقاربة المطواعة (FACTS) لمراقبة سيران القدرة و التقليل من ضياعات الطاقة ورفع التوتر الكهربائي والحصول على كلفة إنتاج طاقة أقل. واعتمدنا على خوارزمية نيوتن رافسون (RN) و غوص سيدال (GS) التقليدية لحل مشكلة سيران القدرة. وسنتطرق لدراسة نموذجين أساسيين المتمثلين في: نظام تعديل القدرة الغير فعالة (SVC) و نظام التحكم في السعة الخطية (TCSC). ثم اقتراح مقارنة جديدة تعتمد على المنطق الغامض للتحكم الأمثل في القدرة الغير فعالة. إضافة إلى ذلك قمنا بإجراء عدد من المحاكات على شبكات اختبار كهربائية مختلفة وذلك لاختبار الطرق المعتمدة في هذا البحث وقد توصلنا إلى أن هذه الأنظمة لديها تأثيرات على سيران القدرة في الشبكات الكهربائية حسب نوعها و طريقة إدماجها، وأن طريقة المنطق الغامض تعمل لغرض إبراز أهمية التوزيع الأمثل للطاقة الغير فعالة في الشبكات الكهربائية.

Résumé :

Dans ce mémoire, on va étudier et analyser la modélisation et l'intégration des dispositifs de compensation dynamiques dans les réseaux électriques pour un objectif principal le réglage flexible de la tension ainsi que une réduction des pertes totale dans les réseaux électriques. Le model de dispositif shunt (SVC) utilisé comme un régulateur efficace de l'énergie réactive, le model série (TCSC), utilisé comme un régulateur de la puissance active transitée ont été intégré dans la méthode de NEWTON RAPHSON et GAUSS_SIEDAL, l'algorithme a convergé avec un nombre minimal d'itération. Afin de prouver l'importance et les avantages d'intégrer ces dispositifs dans les réseaux électriques, et de valider nos résultats obtenus par programmation sur des réseaux test (9JB ,14JB).



Remerciements



● Nous Tenons à remercier avant tout Dieu le tout puissant, pour notre avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour notre avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures conditions.

● Au terme de cette modeste étude, je tiens à exprimer nos profonde gratitude et nos vifs remerciements à notre promoteur Mr: **LABBI YACINE** pour le soutien, l'aide et les conseils qu'il nous a dispensé pour l'élaboration de ce présent mémoire et à nos formation durant les années d'étude.

● Nous voudrions aussi remercier notre très chers les enseignants Mr **OSAAMA MAAMRI** et **BEKAKRA YOUSSEF** pour les conseils qu'il nous a dispensé pour l'élaboration de ce mémoire.

● Nous remercions fortement de département d'électrotechnique qui nous a beaucoup aidés durant la réalisation de notre mémoire.

Un grand merci pour toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.



FRIDIAT * MEHDA**



Dédicace

*Je remercie infiniment « DIEU » tout puissant de
m'avoir accordé le courage.
A mon très très très chère et incomparable mère qui
est l'insigne de la tendresse ;
Je te suis reconnaissant pour ton amour, ton
affection, ta tendresse et ton aide morale.
A mes très très très cher et adorable père pour tout le
sacrifice qu'il consenti a fin de m'assurer de sa totale
et constante présence durant tous les cycles
A mes chers frères :
Fathi , Hachani , Mohemmed Laid, Abd
Elouoïhed, ElAbbas et Adam
A mes chères sœurs :
Nacira, Naïma , Fahla et Khaoula
A mon camarade de travail: Mohammed Seghir
A mes amies particulière à T_DJABARIA
A tous mes amies : T_Elhadî , M _Mohammed ,
B_ Tarek , F _Mohammed Djemoui , B_Abd Errazak,
F _Salah , F_Kamal , F_Zineddîn, B_Radhia et
B.A_HASSIBA.
A tous la promotion d'Électrotechnique 2013/2014*

Amara





Dédicace

*Je remercie infiniment « DIEU » tout puissant de
m'avoir accordé le courage.*

*A mon chère et incomparable mère qui est l'insigne de
la tendresse ;*

*Je te suis reconnaissant pour ton amour, ton
affection, ta tendresse et ton aide morale.*

*A mes cher et adorable père pour tout le sacrifice qu'il
consenti a fin de m'assurer de sa totale et constante
présence durant tous les cycles*

Je dédie Mes grand-mère : SALHI Djabaria

A mes chers frères :

*Kamal , Zenddine, Mohemmed Tahar et Sohaib et
Abed El Aali .*

A mes chères soeurs :

Sara , Asma, Zoubaida ,Sabrina et Wiam

A mon camarade de travail: Amara

A mes amies particulière à B.A_HASSIBA et T_DJABARIA

*A tous mes amies : Salah , Elhadi , Mohammed ,Tarek
, Mohammed Djemoui ,Abd'Erazzak et Radhia*

A tous la promotion d'Électrotechnique 2013/2014

Mohammed Seghir

Sommaire

- ✓ Résumé
- ✓ Remerciement
- ✓ Dédicaces
- ✓ Sommaire
- ✓ Liste des figures
- ✓ Liste des tableaux

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Compensation Classique

I.1	Introduction :	5
I.2	Limite de la puissance transmissible sur un réseau :	5
I.3	Compensation de l'énergie réactive :	9
I.4	Les moyens de compensation :	10
I.4.1	Les moteurs synchrones :	11
I.4.2	Les batteries de condensateurs :	11
I.4.2.1	La puissance réactive d'une batterie de condensateurs :	11
I.4.2.2	Types de batteries :	12
I.4.2.2.1	Batterie shunt :	12
I.4.2.2.2	Batteries en série :	14
I.4.3	Les avantages des batteries : de tous les équipements statiques :	15
I.4.4	Les inconvénients des batteries :	15
I.5	Conclusion :	15

Chapitre II : Technologie FACTS

II.1	Introduction :	17
II.2	Le projet FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System)	17
II.2.1	Principe de fonctionnement des FACTS :	18
II.2.1.1	Ligne de transport seule :	18
II.2.1.2	Compensation shunt par un compensateur d'énergie réactive :	19
II.2.1.3	Principe de la compensation séries :	21
II.2.1.4	La compensation par déphasage :	22
II.2.2	Réalisation technique des compensateurs :	23
II.2.2.1	Compensateurs parallèles :	24
II.2.2.1.1	Compensateurs parallèles à base de thyristors :	25
II.2.2.1.2	Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors.....	28

II.2.2.2 Compensation série :	31
II.2.2.2.1 Compensateurs séries à base de thyristor :	31
II.2.2.2.2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors :	34
II.2.2.3 Compensateurs hybrides série – parallèle :	35
II.2.3 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :	35
II.3 Conclusion :	36

Chapitre III : Le compensateur statique de puissance réactive SVC

III.1. Introduction.....	38
III.2. Principes de fonctionnement de SVC :	38
III.2.1. Réactances de compensation :	38
III.3. Compensation shunt par un compensateur d'énergie réactive.....	39
III.4. La compensation par déphasage.....	40
III.5. Réalisation technique des compensateurs :	41
III.5.1. Compensation shunt :	42
III.5.1.1. Compensateur par SVC (Static Var Compensator) :	42
III.6. Partie Application : (compensation shunt avec SVC).....	44
III.6.1. 1 ^{er} test : réseau électrique de 9 jeux de barres :	44
III.6.2. L'organigramme globale de l'intégration de SVC	45
III.6.3. Organigramme détaillée.....	46
III.6.4. les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres)	48
III.6.5. Interprétation.....	51
III.7. Conclusion :	52

Chapitre IV : Compensation série par un compensateur d'énergie réactive (TCSC)

IV.1. Introduction.....	54
IV.2. Les systèmes de compensation série.....	54
IV.2.1. Le compensateur série commandé par thyristor (TCSC).....	54
IV.3. Condensateurs série contrôlés par thyristors (TCSC) :	55
IV.4. Implémentation des TCSC dans la gestion de l'écoulement de puissance :	57
IV.5. Application.....	58
IV.6. Conclusion.....	64

Conclusion générale.....	65
--------------------------	----

✓ Bibliographie	
-----------------	--

Liste de figure

Figure (1.1) : schéma de ligne HT ou THT en π	5
Figure (1.2) : Variation des grandeurs électriques aux bornes de la charge.....	8
Figure (1.3.a) : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.....	9
Figure (1.3.b) : Diagramme vectoriel représentant l'importance de la compensation.....	10
Figure (1.4) : batterie condensateur unique.....	13
Figure (1.5) : batterie condensateur multiple.....	13
Figure (1.6) : batterie shunt en étoile.....	13
Figure (1.7) : batterie shunt en triangle.....	14
Figure (1.8) : batterie série.....	14
Figure (2.1) : Courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission.....	19
Figure (2.2) : Compensation shunt d'une ligne.....	20
Figure (2.3) : courbes de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission.....	20
Figure (2.4) : Principe de la compensation série.....	21
Figure (2.5) : courbe de puissance avec et sans compensation série.....	22
Figure (2.6) : Principe de compensation par déphasage.....	22
Figure (2.7) : compensation par déphasage pour $\alpha = \frac{\pi}{5}$	23
Figure (2-8): Classification des dispositifs FACTS.....	24
Figure (2.9): schéma du SVC.....	26
Figure (2.10) : Présentation d'un compensateur SVC.....	26
Figure (2.11) : fonctionnement du compensateur statique.....	27
Figure (2.12) : Schéma du SVC et TCBR.....	28
Figure (2.13) : Structure de STATCOM.....	29
Figure (2.14a) : Courant capacitif.....	30
Figure (2.14b) : Courant inductif.....	30
Figure (2.15) : Caractéristique statique du STATCOM.....	30
Figure (2.16) : Insertion d'un TCSC sur une ligne.....	31
Figure (2.17) : Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors...	32
Figure (2.18): Structure du TSSC.....	33

Liste de figure

Figure (2.19): Structure du TCSR.....	33
Figure (2.20) : Schéma de base du SSSC.....	34
Figure (2.21) : Caractéristique statique du SSSC.....	35
Figure (2.22) : Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow controller).....	35
Figure (3.1): Compensation shunt d'une ligne.....	39
Figure (3.2) : courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission.....	40
Figure (3.3) : principe de la compensation par déphasage.....	41
Figure (3.4): compensation par déphasage pour $\alpha=\pi/4$	41
Figure (3.5): Schéma du S.V.C.....	43
Figure (3.6): Forme d'onde du courant dans un RTC.....	43
Figure (3.7) : Caractéristique d'un SVC.....	44
Figure (3.8) : Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres.....	44
Figure (3.9) : Variation de la tension –cas normale–.....	48
Figure (3.10) : Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2).....	49
Figure (3.11) : Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge	
Interprétation	51
Figure (4.1) : Insertion d'un TCSC sur une ligne.....	55
Figure (4.2) : impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors.....	55
Figure (4.3) : Schéma d'un TCSC.....	56
Figure (4.4) : L'effet de TCSC sur la réactance de la ligne de transmission.....	57
Figure (4.5) : Modèle du TCSC dans un écoulement de puissance.....	57
Figure (4.6) : Schéma unifilaire de réseau Ouest Algérien.....	58
Figure (4.7) : la tension entre jeu de barres sans et avec TCSC.....	59
Figure (4.8) : la puissance active transit entre jeu de barres sans et avec TCSC.....	60
Figure (4.9) : la puissance réactive transit entre jeu de barres sans et avec TCSC.....	61
Figure (4.10) : Argument de tension entre jeu de barres sans et avec TCSC.....	62

Liste des tableaux

Tableau (3-1): Résultats des tensions du réseau électrique –cas normal–.....	48
Tableau (3-2): Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2).....	49
Tableau (3-3.a) : cas sans compensation.....	50
Tableau (3-3.b) : cas avec compensation.....	50
Tableau (3- 4) : cas de l'augmentation de la charge avec :20 % , 100%.....	51
Tableau (4-1) : Résultat de calcul de tension sans et avec TCSC.....	59
Tableau (4-2) : Résultat de calcul de transit de puissance active avec et sans TCSC...	60
Tableau (4-3) : Résultat de calcul de transit de puissance réactive avec et sans TCS...	61
Tableau (4-4) : Résultat de calcul de argument de tension avec et sans TCSC.....	62
Table (4-5) : Résultats de différente de la puissance totale sans et avec TCSC.....	63

Introduction générale

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.

Introduction générale

Les systèmes FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) sont des systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la micro-électronique 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.

PLAN DE TRAVAIL:

Ce projet est composé de quatre chapitres qui sont les suivants:

Le chapitre 1 ; commence avec une introduction qui donne une motivation sur la philosophie de compensation et le but d'intégrer le système de compensation dans les réseaux électriques.

Le chapitre 2 ; montre explicitement les différentes structures de FACTS (parallèle, série et hybride) basées sur les Thyristors ou les IGBT/GTO, utilisées pour le contrôle des trois paramètres qui sont : la tension, la puissance active transitée la puissance réactive transitée. Afin d'exploiter les performances de ces dispositifs, une modélisation mathématique de compensateur shunt (SVC), et le dispositif série (TCSC) a été analysée.

Le chapitre 3 ; dans ce chapitre, on a étudié fait l'objet du traitement de méthode de calcul de l'écoulement de puissance pour nous faire faciliter la tâche de l'analyse des réseaux électriques d'une façon générale.

Introduction générale

Et proposé d'appliquer un programme en Matlab a été développé pour l'intégration de l'énergie réactive injectée par le dispositifs shunt SVC.

Le chapitre 4 ; ce représente notre modeste contribution, un programme en Matlab a été développé pour l'intégration des dispositifs de compensation dynamiques dans des réseaux électriques, le but est d'analyser l'impact des différents dispositifs de compensations dynamiques série (TCSC) sur les indices de qualité de l'énergie électrique , et exposé en détails les résultats de simulation selon le programme développé sous l'environnement MATLAB.

Enfin une conclusion générale.

Chapitre I

Compensation Classique

I.1 Introduction :

La question qui a été toujours posée par les ingénieurs particulièrement ceux chargés de l'exploitation des réseaux électriques. Pourquoi compenser l'énergie réactive ? Comment réaliser cette compensation ? Quel est l'emplacement efficace ? Quel type de compensation le meilleur adapté à un problème bien déterminé ? Et quel sont les avantages et les inconvénients de cette compensation ?

Dans ce chapitre on répond en détail sur ces questions.

I.2 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).

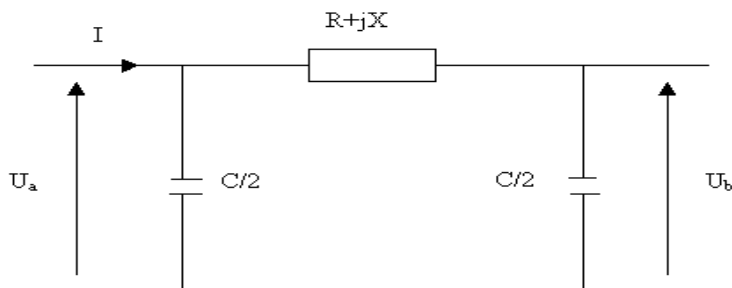


Figure (1.1) : schéma de ligne HT ou THT en π

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 :

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

Et une tension de source :

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

Le courant traversant le dipôle est égale à :

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

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

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

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

La tension aux bornes de charge est :

$$\overline{V_{ch}} = \overline{Z_{ch}} \cdot \bar{I}$$

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

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

et la puissance active absorbée par la charge est :

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

D'après le 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 :

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad P^* &= \frac{P_{ch}}{P_{\max}} = \frac{V_s^2 \cdot \cos \varphi}{Z + \frac{X^2}{Z} + 2X \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{2X \cdot (1 + \sin \varphi)}{V_s^2 \cdot \cos \varphi} \\
 P_{ch}^* &= \frac{2X(1 + \sin \varphi)}{Z + \frac{X^2}{Z} + 2X \sin \varphi} \dots \dots \dots (I.9)
 \end{aligned}$$

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 $\varphi(rad)$ constante et $X(\Omega)$ constante.

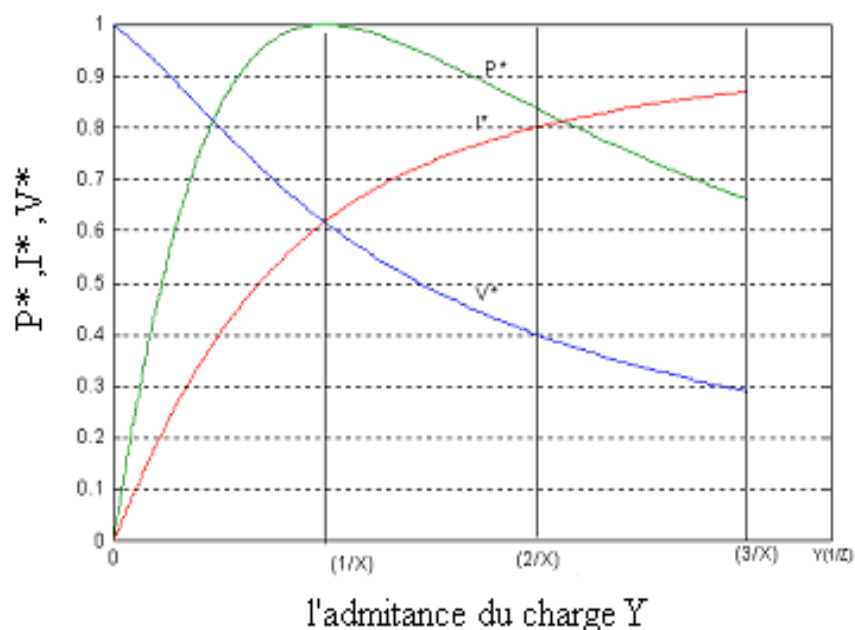


Figure (1.2) Variation des grandeurs électriques aux bornes de la charge

Lorsque la charge croît, on a une augmentation l'admittance $Y_{ch}(\Omega)$, on constate qu'au début la puissance active croît avec le courant, elle augmente ensuite de moins en 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.3 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 $\tan(\varphi')$.

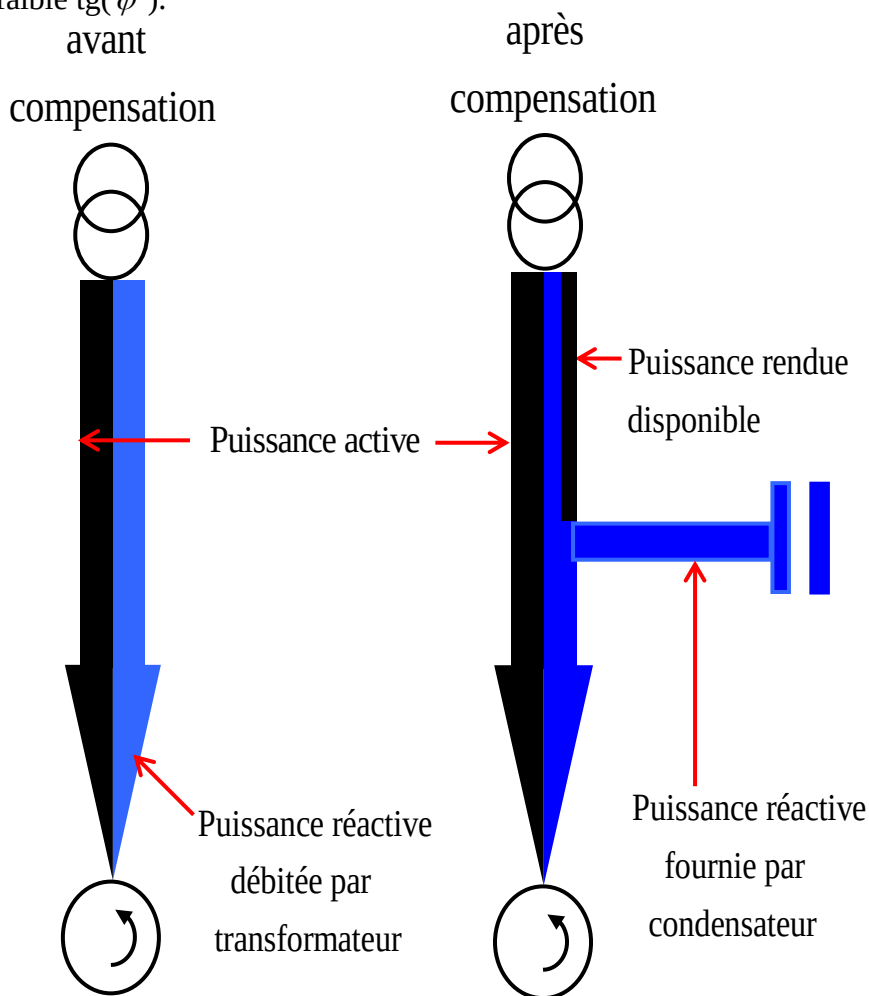


Figure (1.3.a) : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.

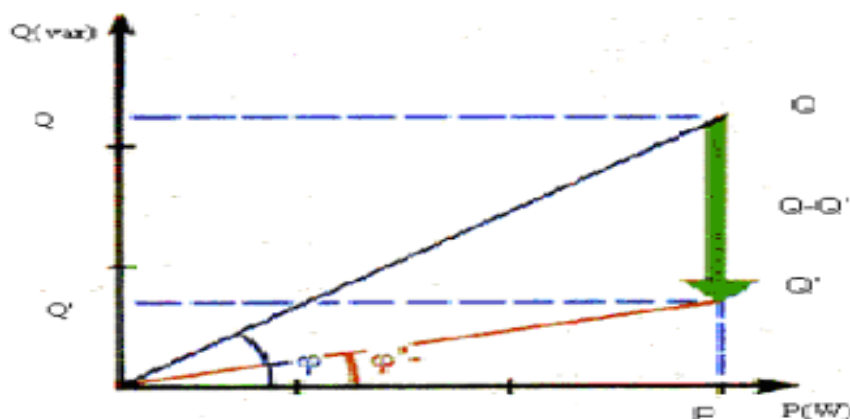


Figure (1.3.b) : Diagramme vectoriel représentant l'importance de la compensation.

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.4 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.4.1 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.4.2 Les batteries des 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.

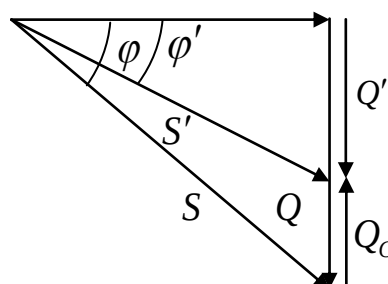
I.4.2.1 La puissance réactive d'une batterie de condensateur :

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 $Q_C = U^2 \cdot C \cdot \omega$ avec :

- U : tension aux bornes du condensateur.
- C : capacité du condensateur.
- $\omega = 2\pi \cdot f$: 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.4.2.2 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.4.2.2.1 Batterie shunt :

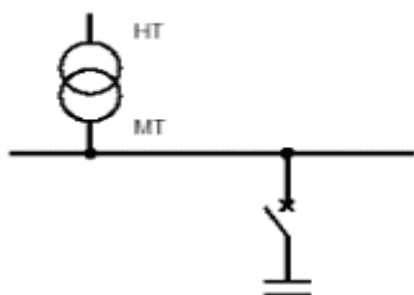
Une batterie de condensateurs shunt est une installation en dérivation du réseau. Elle est raccordée entre phases, ou entre phase et neutre.

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.

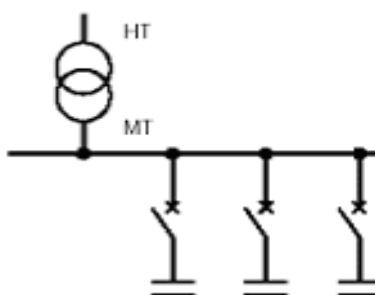
Les batteries shunts sont le plus souvent utilisées sur les réseaux.

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

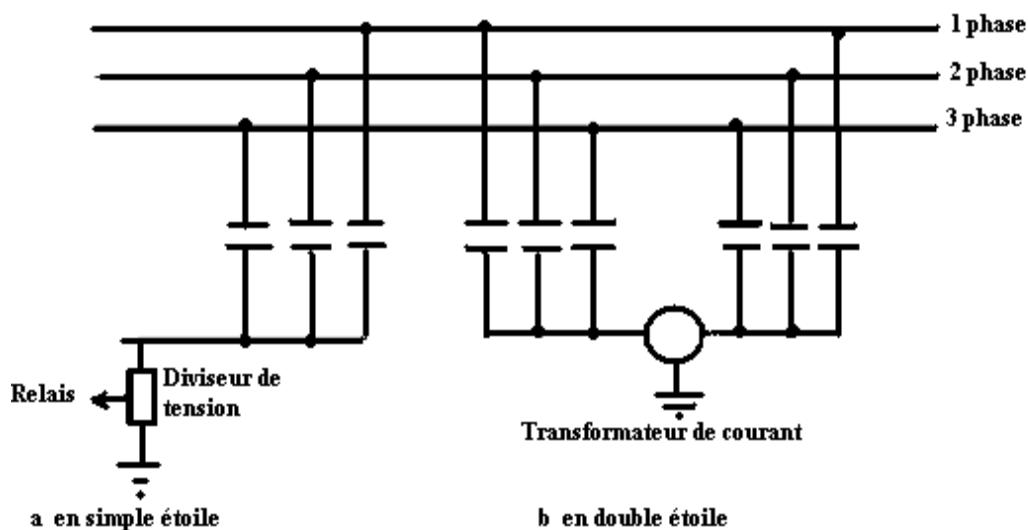


Figure (1.6) : batterie shunt en étoile

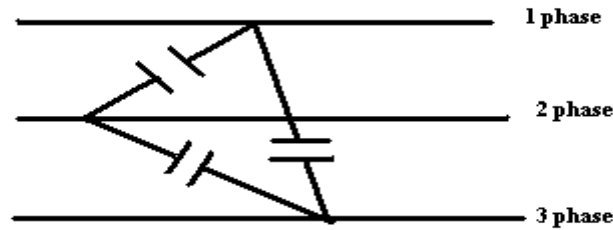


Figure (1.7) : batterie shunt en triangle

I.4.2.2 Batteries en série :

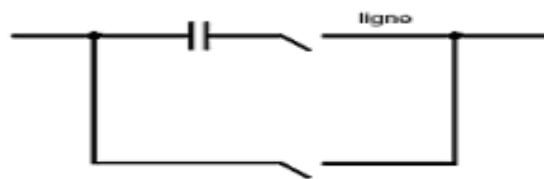
On peut réduire $X = jL$, en insérant en série sur la ligne électrique une capacitance $1/C$; l'impédance de la ligne devient alors d'où $Z < X$.

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.4.3 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.4.4 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.

I.5 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.

Chapitre II

Technologie FACTS

II.1 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.2 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.

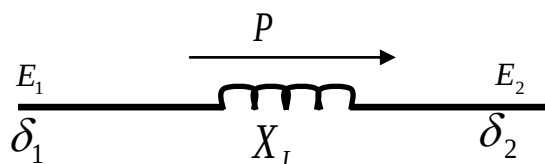
Pour cela il est mis à profit les possibilités offertes par l'électronique de puissance (rapidité et faible maintenance).

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 .

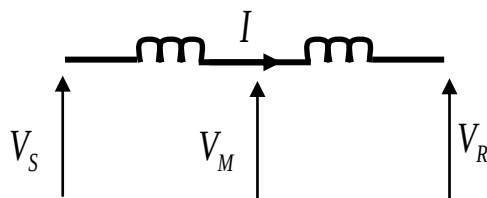
$$P = \frac{E_1 E_2}{X_L} \sin \delta_{12} \dots \dots \dots (II-1)$$

II.2.1 Principe de fonctionnement des FACTS :

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

II.2.1.1 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 milieux 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 égales 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) :

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

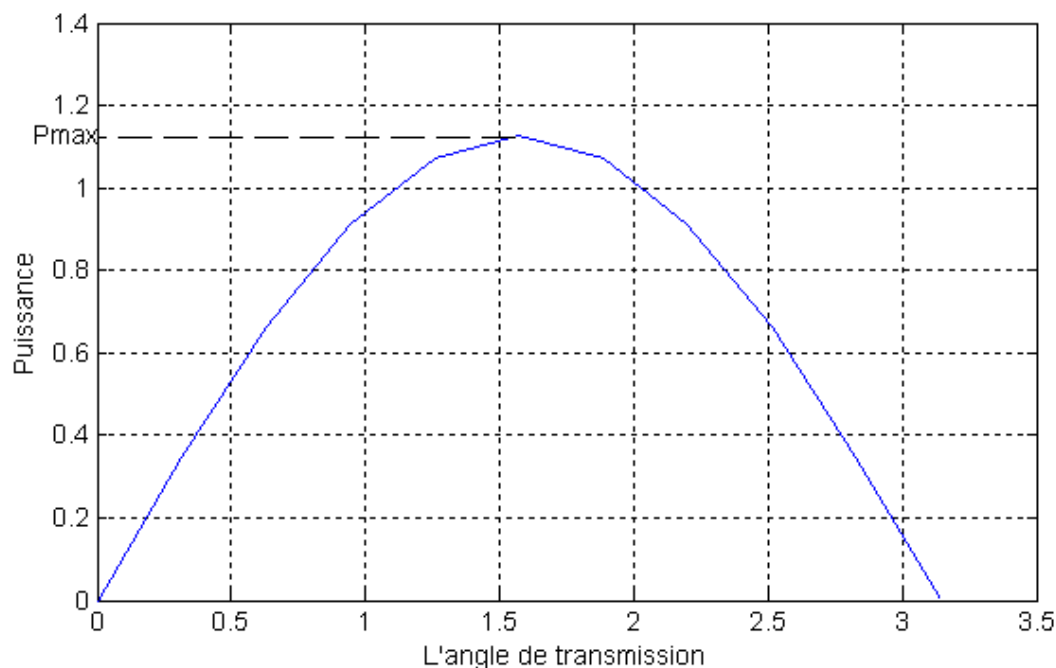


Figure (2.1) : Courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission

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.2.1.2 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 de tension à travers une ligne est donnée par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne.

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

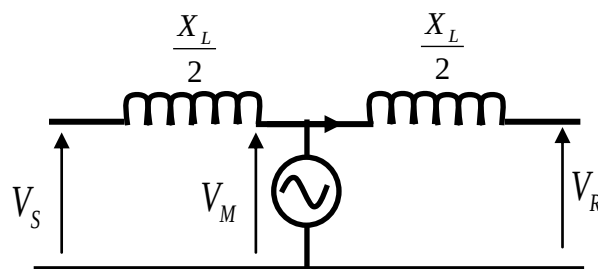


Figure (2.2) : Compensation shunt d'une ligne

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

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

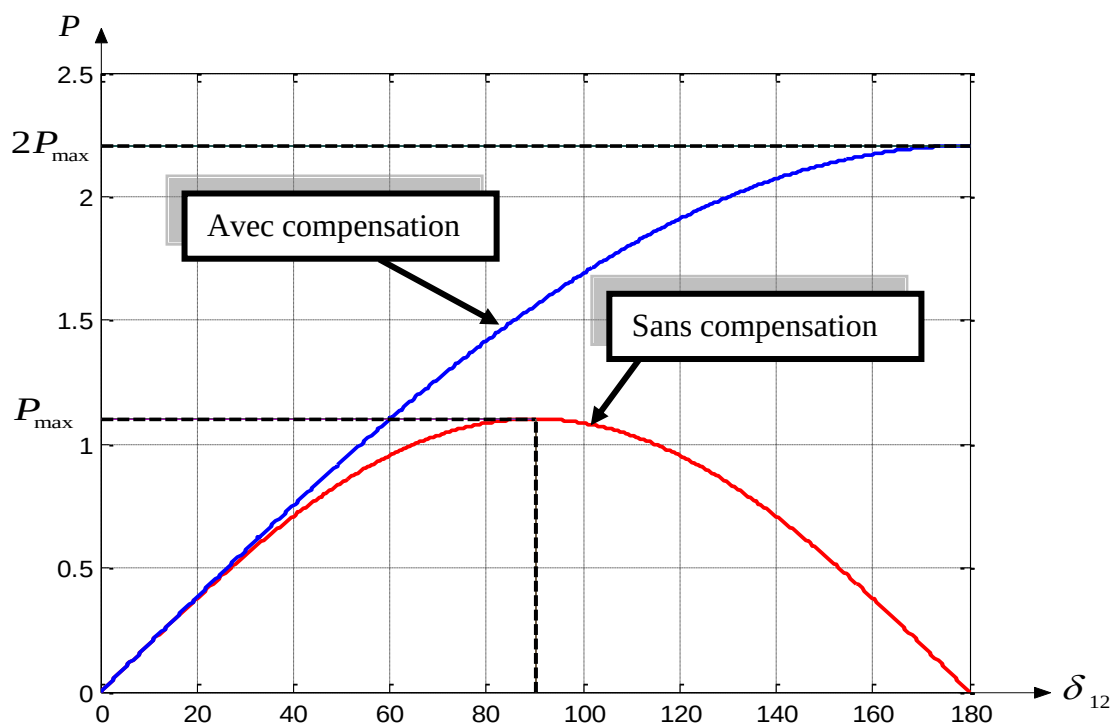


Figure (2.3) : courbes de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission

II.2.1.3 Principe de la compensation série :

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 donne par Figure (2.4).

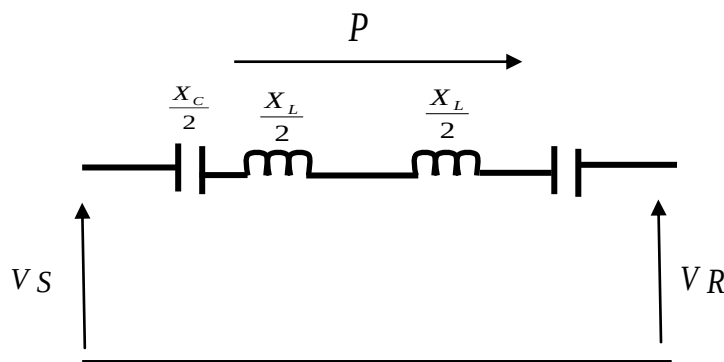


Figure (2.4) : Principe de la compensation

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

$$X_C = SX_L \dots \dots \dots (II - 5)$$

S est degré de compensation $0 \leq S \leq 1$

L'impédance totale 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).

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

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

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.

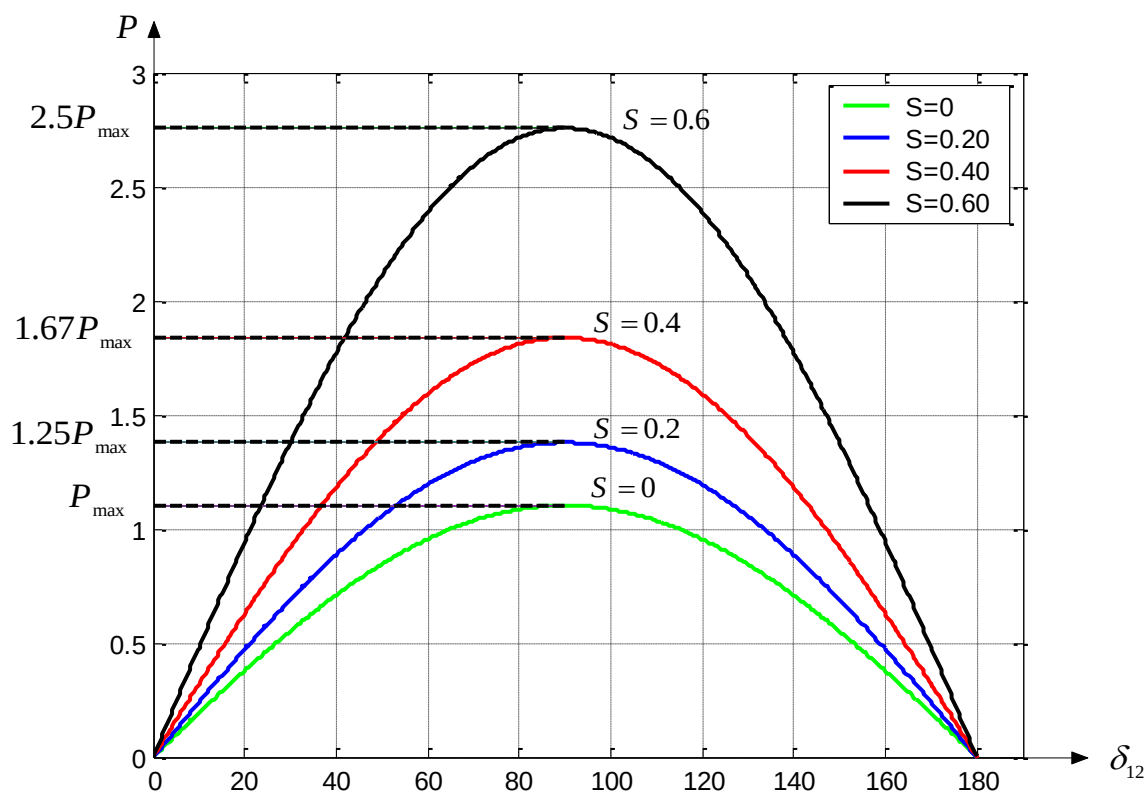


Figure (2.5) : courbe de puissance avec et sans compensation série

II.2.1.4 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)

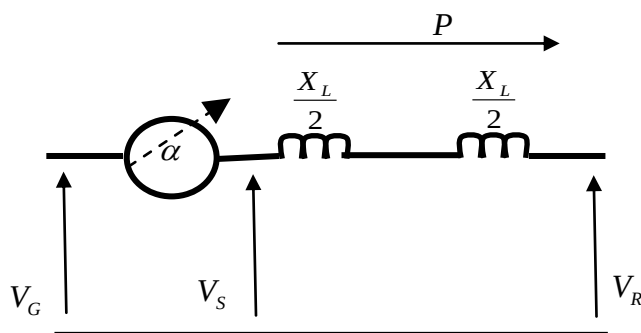


Figure (2.6) : Principe de compensation par déphasage

La puissance transmissible sur la ligne est alors fonction de l'angle déphasage α équation (II.7).

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta + \alpha) \dots \dots \dots (II-7)$$

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.

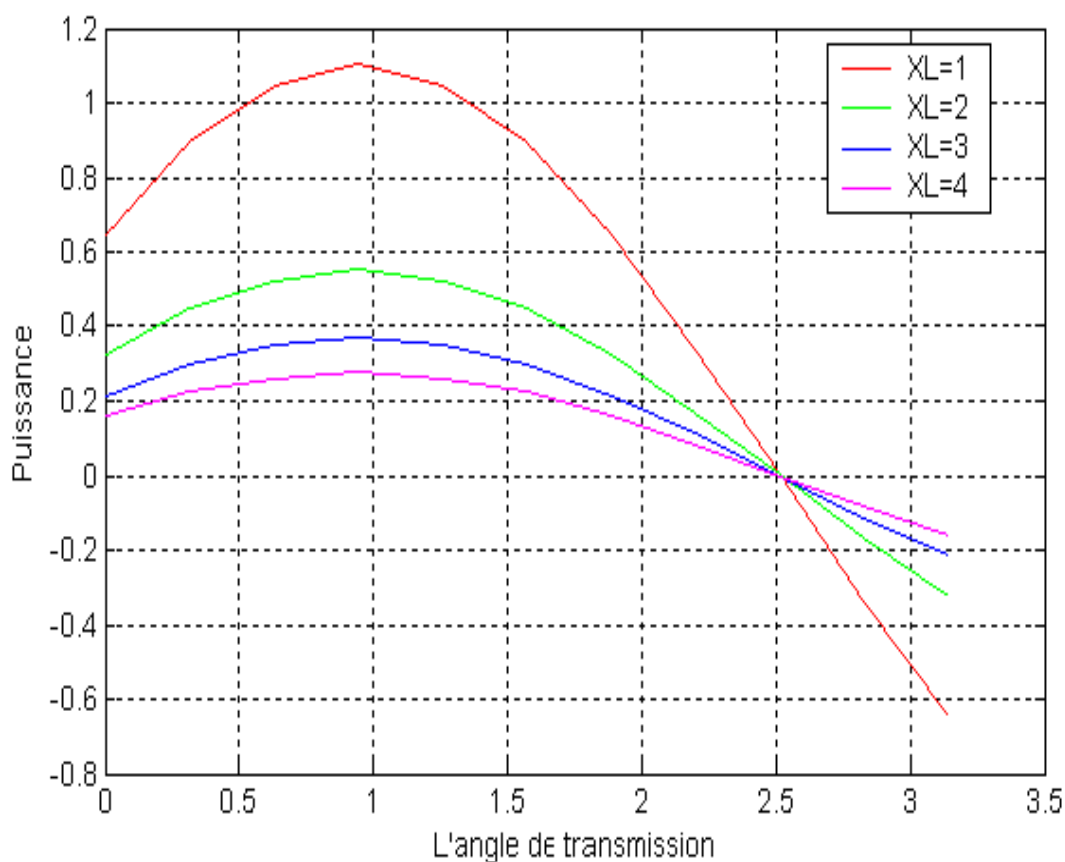


Figure (2.7) : compensation par déphasage pour $\alpha = \frac{\pi}{5}$

II.2.2 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.

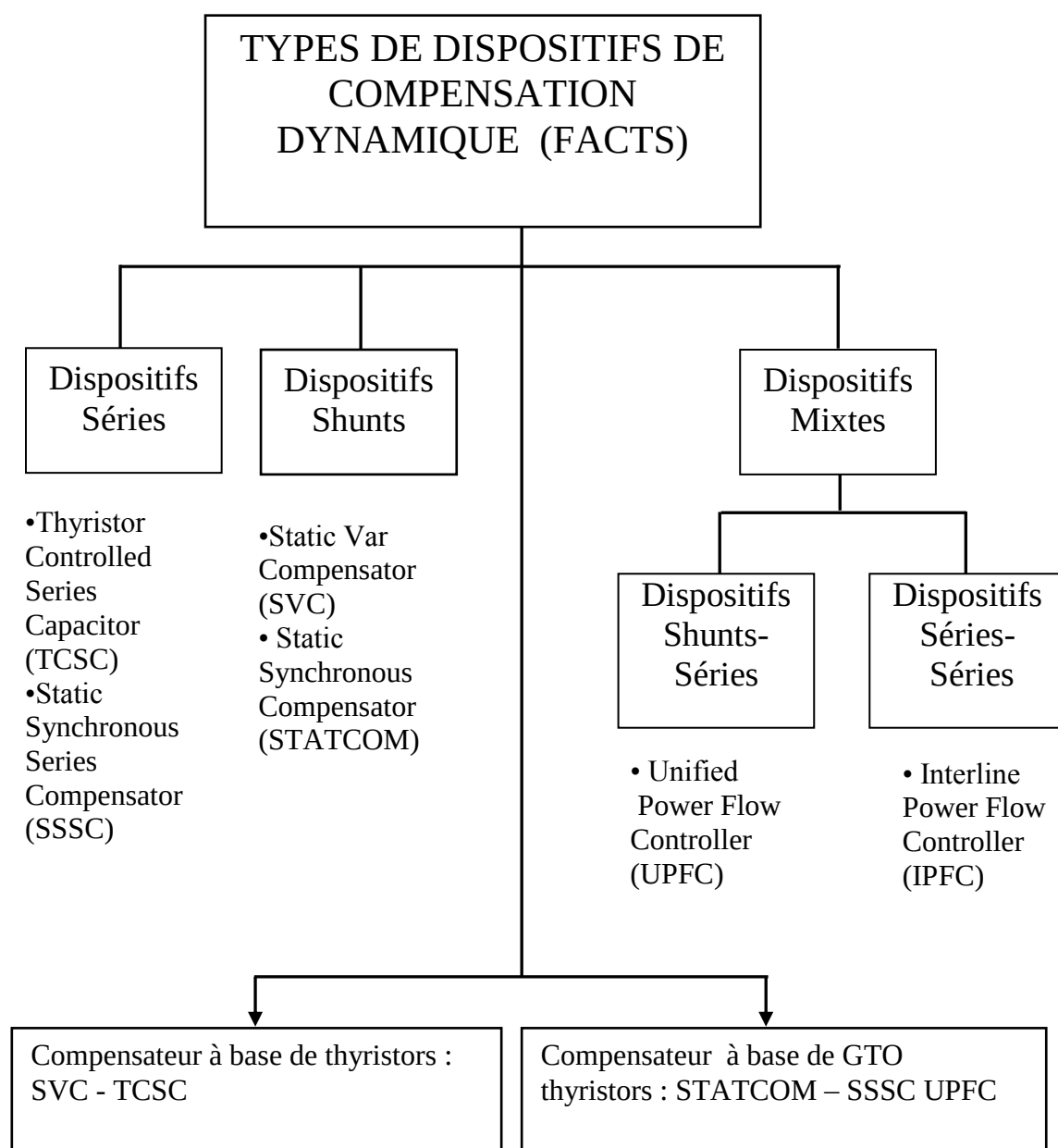


Figure (2-8): Classification des dispositifs FACTS

II.2.2.1 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.2.2.1.1 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 oscillation des amplitudes de tension.

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

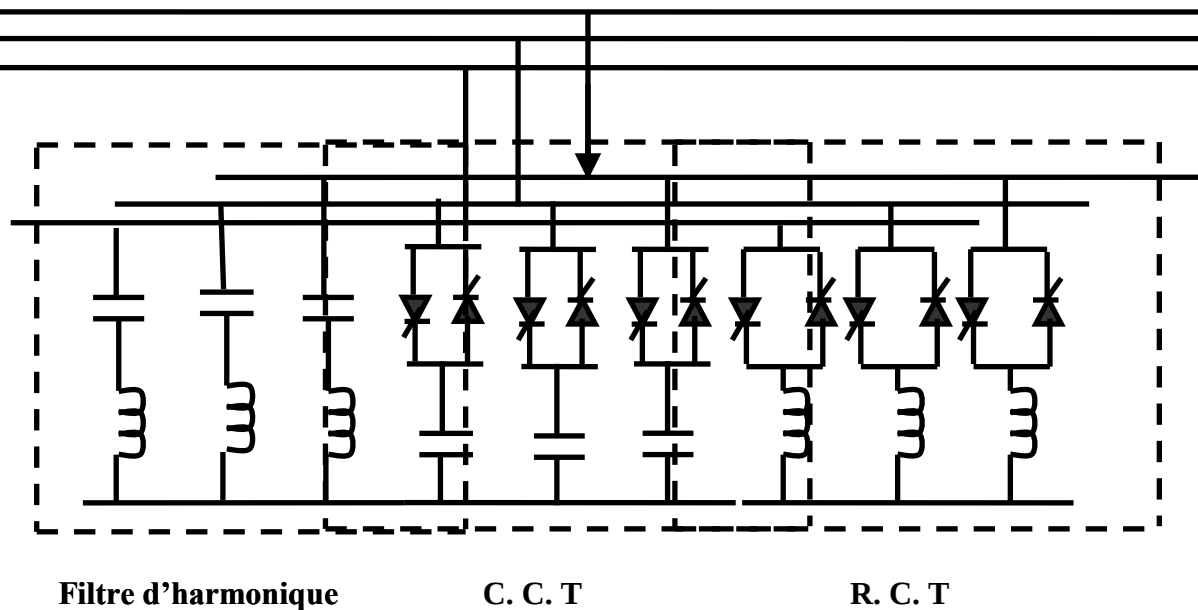


Figure (2.9):schéma du SVC

❖ 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 continu.

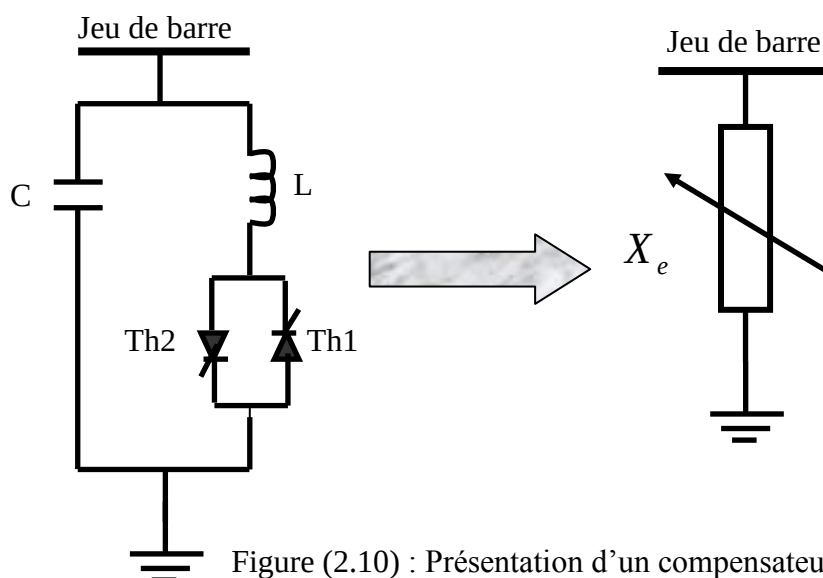


Figure (2.10) : Présentation d'un compensateur SVC

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 condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies.

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés 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 de 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 seule les capacités sont connectées au réseau.

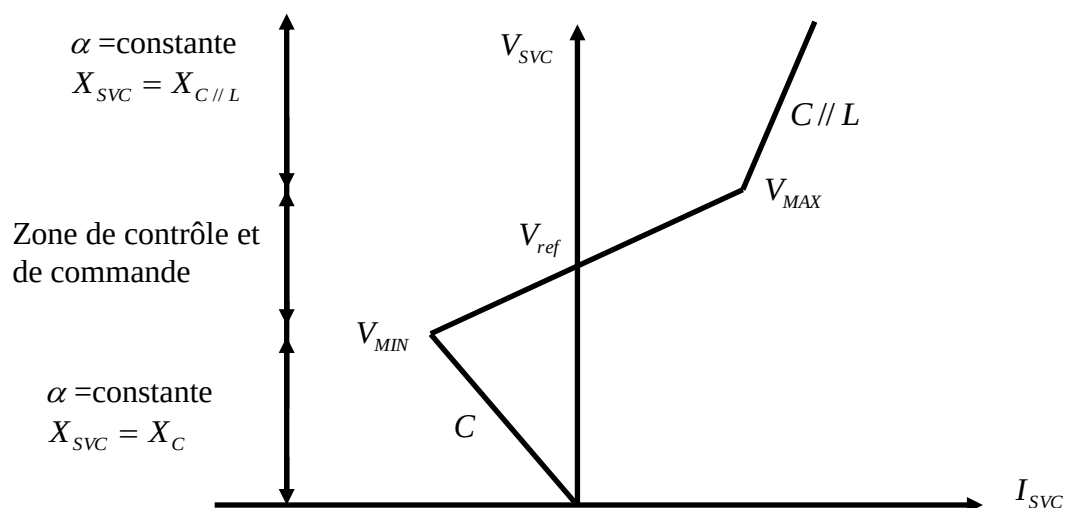
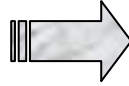


Figure (2.11) : fonctionnement du compensateur statique

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.

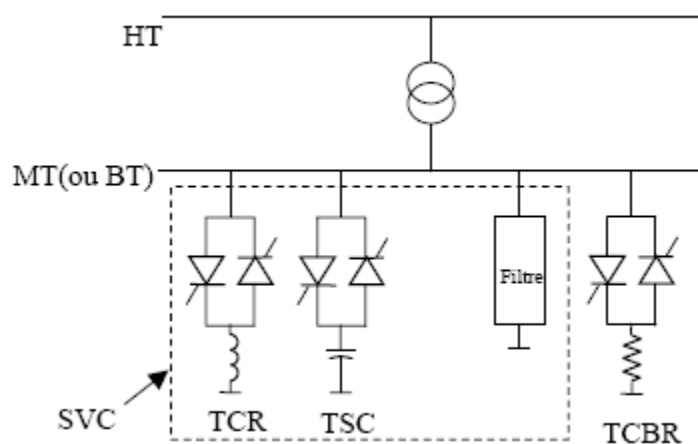


Figure (2.12) : Schéma du SVC et TCBR

II.2.2.1.2 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)
- SVC light
- SVC plus

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.

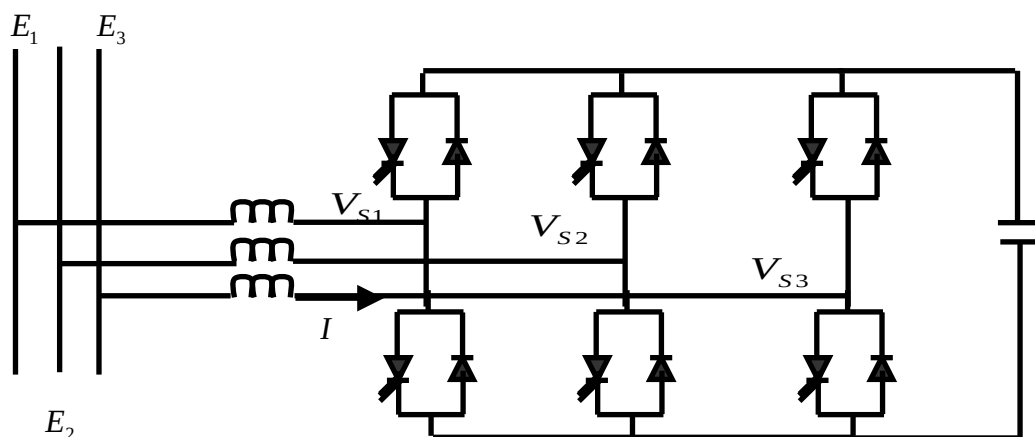


Figure (2.13) : Structure de STATCOM

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.

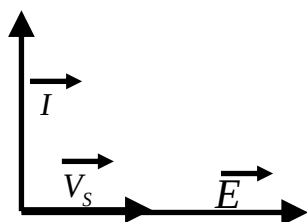


Figure (2.14a) : Courant capacitif

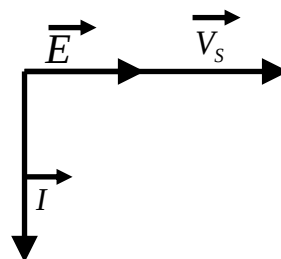


Figure (2.14b) : Courant inductif

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. 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 échanger 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 a l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension E diminue, contrairement au SVC.

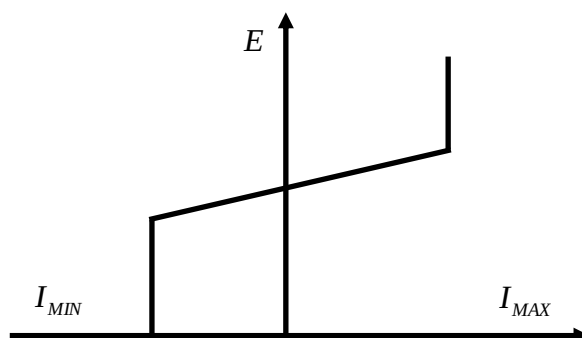
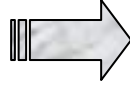


Figure (2.15) : Caractéristique statique du STATCOM

Exemple de STATCOM :

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

**II.2.2.2 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.2.2.2.1 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.

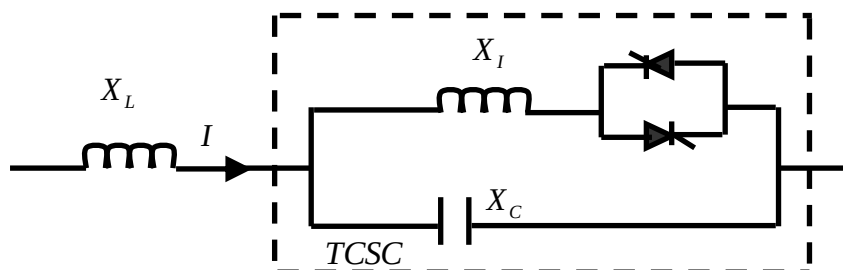


Figure (2.16) : Insertion d'un TCSC sur une ligne

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_L .
- 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.

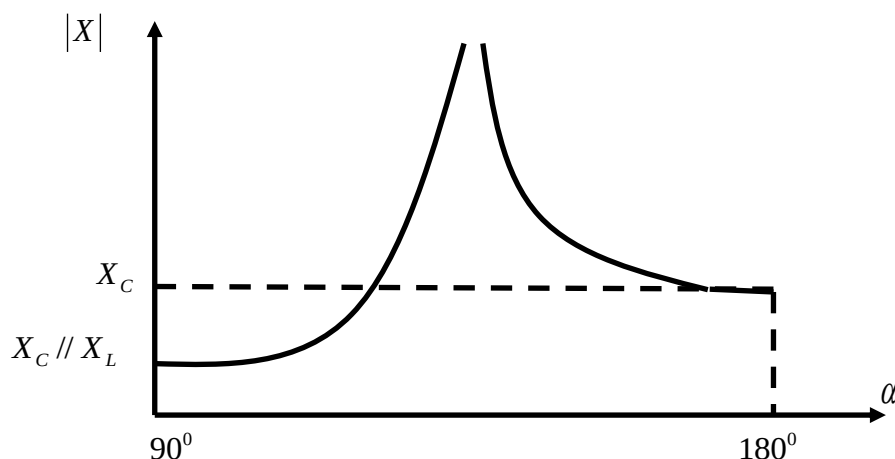


Figure (2.17) : Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors

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° , le réacteur devient non conducteur et le condensateur en série a sa impédance normale. Pendant que l'angle est avancé de 180° , l'impédance capacitive augmentée. A l'autre extrémité, quand l'angle d'amorçage de RCT est de 90° , 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° , le TCSC aide en limitant le courant de défaut.

Inductive de série sans à-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° .

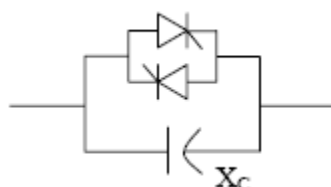


Figure (2.18): Structure du TSSC

• 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 degrés, 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 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

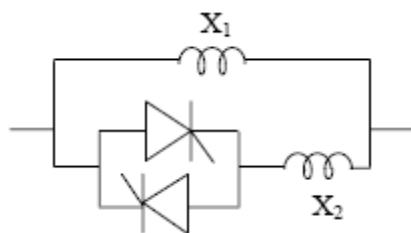
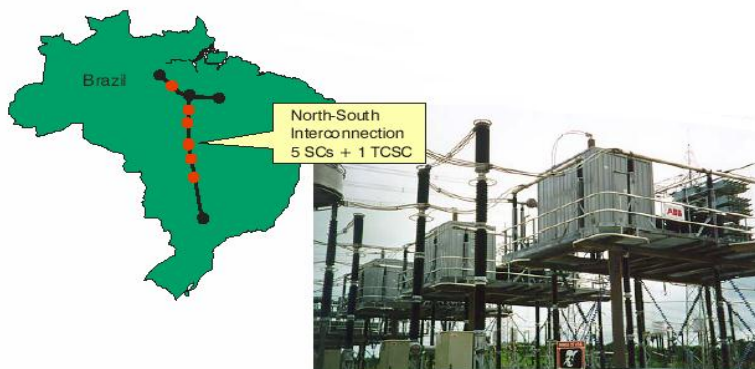


Figure (2.19): Structure du TCSR



- **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.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).

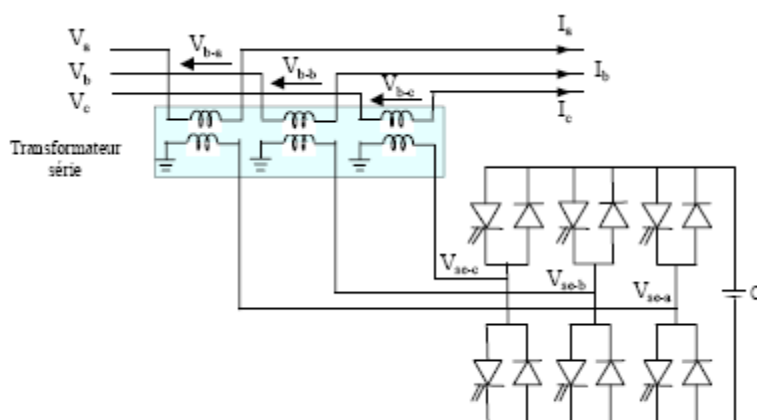


Figure (2.20) : Schéma de base du SSSC

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.

$$V_b = -KJXI$$

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 :

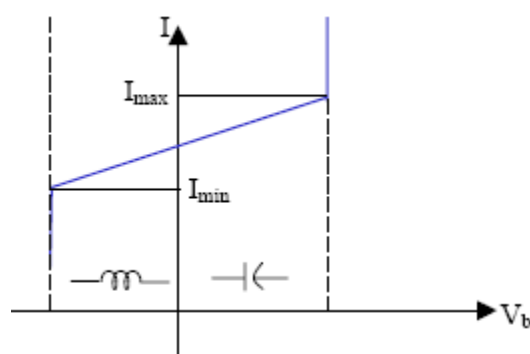


Figure (2.21) : Caractéristique statique du SSSC

II.2.2.3 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 réseau électrique.

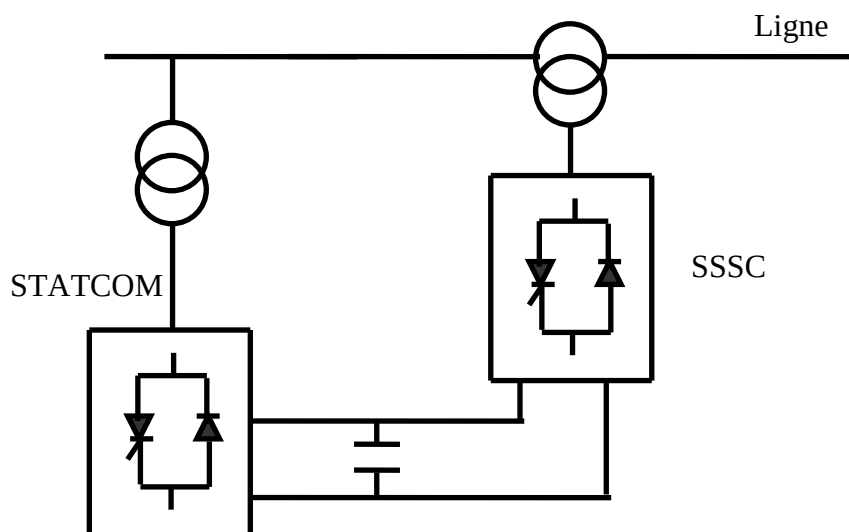


Figure (2.22) : Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow controller)

II.2.3 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.

II.3 Conclusion :

Après l'étude et l'analyse des différents modèles des dispositifs FACTS, on peut conclure que chaque dispositif impose un modèle bien déterminé d'une part, d'autre part la modélisation de ces dispositifs dynamique (shunt, série) facilite leur intégration dans les méthodes numériques tel que la méthode NEWTON- RAPHSON et GAUSS_SIEDAL qu'on a utilisé comme un outil de base dans notre travail.

Chapitre III

Le compensateur statique de puissance réactive SVC

III.1. 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 réparation optimale des puissances actives, la compensation de la puissance réactive et le renforcement de la stabilité des réseaux électriques.

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, Fr : le compensateur statique de puissance réactive, En: Static VAR Compensator) permettant leur implantation dans les réseaux électriques afin d'améliorer les indices de qualité de l'énergie électrique,

Ce chapitre représente notre modeste contribution, un programme en MATLAB a été développé pour l'intégration des dispositifs de compensation dynamiques dans des réseaux pratiques. L'algorithme général basé sur la méthode de calcul d'écoulement de puissance, deux indices ont été proposés, le premier indice basé sur l'incrément continue de la charge (Stabilité de tension) pour le choix de l'emplacement du dispositif shunt 'SVC'.

III.2. Principes de fonctionnement de SVC :

Les 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. Le contrôleur dynamique shunt SVC est un dispositif FACTS qui permet de régler la tension et d'amortir les oscillations dues à des perturbations dans les réseaux électriques..

III.2.1. Réactances de compensation :

Dans tous les réseaux de transport, il est nécessaire de maintenir la tension aux différents nœuds dans des limites acceptables. La tension ne doit pas être trop haute, pour des

raisons de tenue diélectrique des équipements de transport et de préservation du matériel alimenté, ni trop basse, afin d'alimenter correctement les consommateurs. Il existe toute fois une certaine souplesse dans le réglage de la tension (entre 0,95 et 1,05 pu).

Pour mieux comprendre le principe de la compensation, étudions tout d'abord la caractéristique de la tension en un nœud (V) du réseau en fonction du transit de puissance réactive (Q).

III.3. Compensation shunt par un compensateur d'énergie réactive

On insère au milieu d'une 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 3.1). En effet, la chute de tension à travers une ligne est donnée par la relation (III-1) en négligeant le terme résistif de la ligne.

$$\Delta V = \frac{X_l Q}{V} \dots\dots\dots (III-1)$$

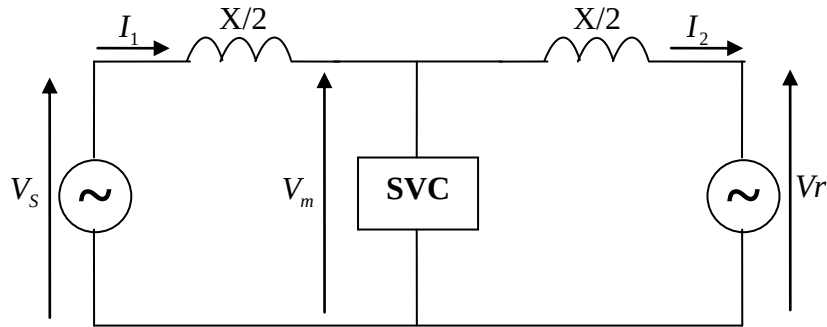
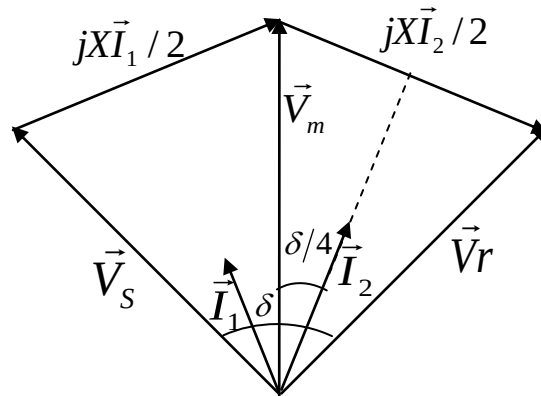


Figure (3.1): Compensation shunt d'une ligne



$$|V_s| = |V_r| = |V_m| = V$$

$$\bar{V}_r = V \cdot \bar{V}_s = V e^{j\delta} - \bar{V}_m = V e^{j\delta/2}$$

Dans ce cas :

$$\bar{I}_2 = \frac{4V}{X} \sin \frac{\delta}{4} \cdot e^{j(\delta/4)}$$

Après les transformations :

$$\begin{aligned} P &= \text{Re}[\bar{V}_s \cdot \bar{I}_1^*] = \text{Re}[\bar{V}_r \cdot \bar{I}_2^*] \\ &= \text{Re}\left[\frac{4V^2}{X} \sin(\delta/4) (\cos(\delta/4) - j \sin(\delta/4))\right] \\ &= \frac{2V^2}{X} \sin(\delta/2) \end{aligned}$$

L'équation (III-2) donne l'expression de

la puissance transmise par la ligne compensée. On remarque que la puissance maximale est doublée et est obtenue pour un déphasage de $\delta = \pi$ (figure 3.2). Une compensation shunt permet donc de doubler le transport de puissance maximale d'une ligne.

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

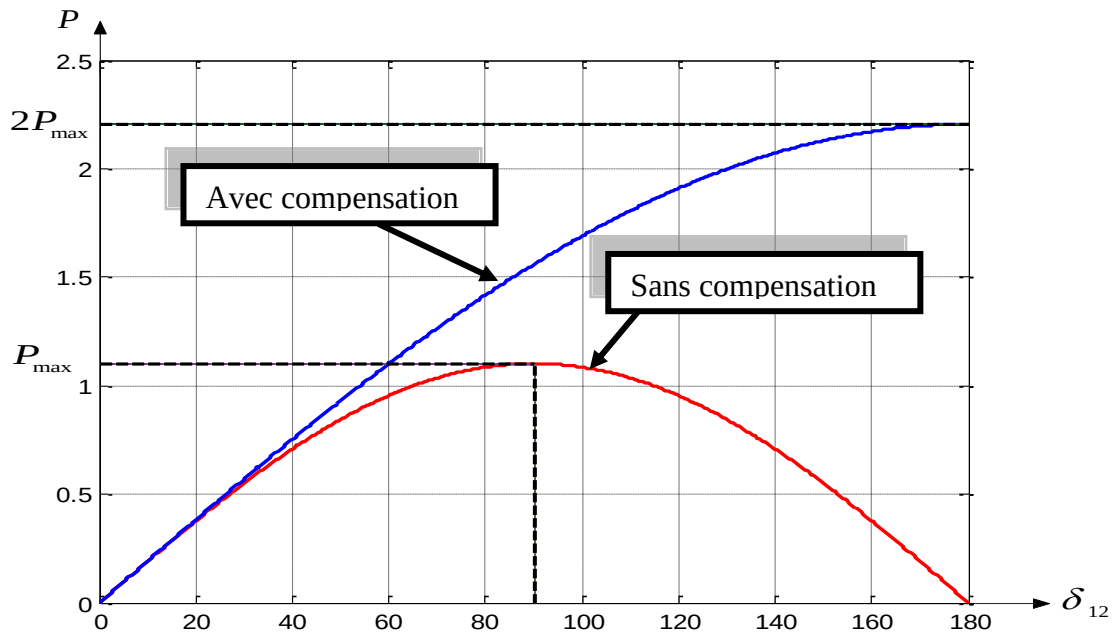


Figure (3.2) : courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission

III.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 de 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 3.3).

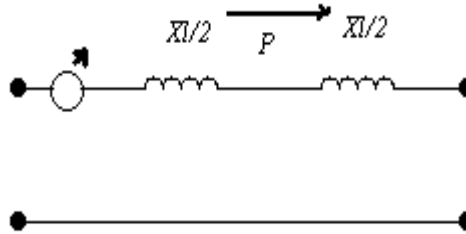


Figure (3.3) : principe de la compensation par déphasage

La puissance transmissible sur la ligne est alors fonction de l'angle de déphasage α équation (III-3) :

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta + \alpha) \dots\dots\dots (III-3)$$

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

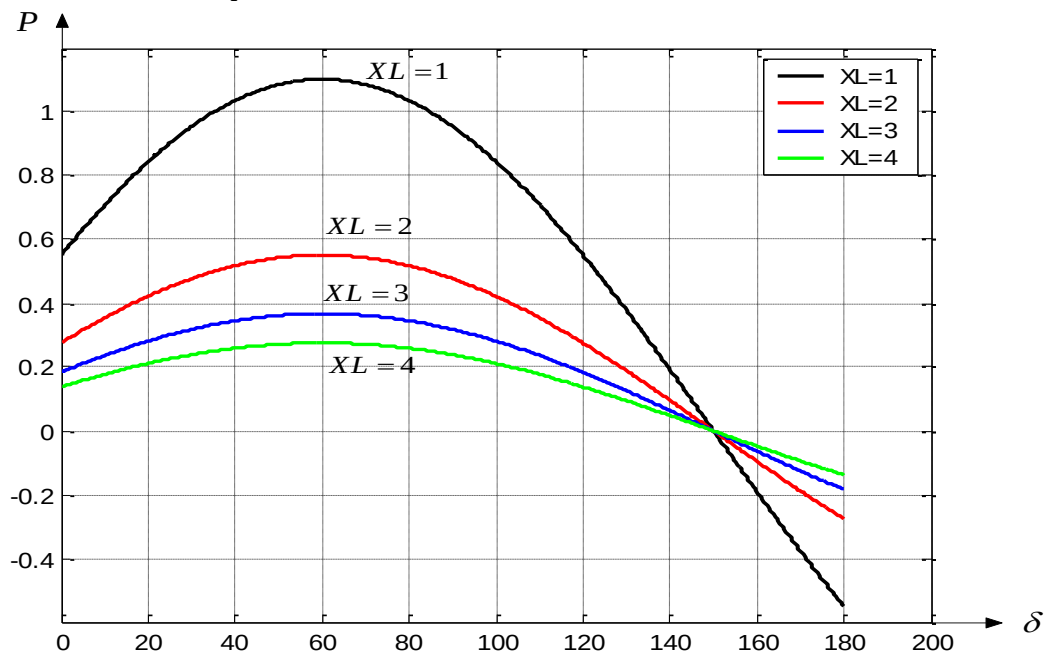


Figure (3.4): compensation par déphasage pour $\alpha + \delta$

III.5. Réalisation technique des compensateurs :

Les principaux compensateurs présentés, nous montrons maintenant les moyens techniques de leur réalisation. Diverses méthodes existaient bien avant le lancement du projet FACTS,

mais l'évolution des composants de l'électronique de puissance tels que les GTO (Gâtes à Tension – Off: Thyristor à ouverture par la gâchette), ont permis d'introduire de nouvelles structures que nous développerons ci-dessous, en particulier les solutions technologiques de la compensation shunt.

III.5.1. Compensation shunt :

Le compensateur d'énergie réactive a déjà fait ses preuves sous la forme d'une machine synchrone couplée au réseau fonctionnant à vide.

A puissance active ou consommée est uniquement liée aux pertes de la machine. Le réglage du transfert d'énergie réactive se fait par le biais de l'excitation de la machine.

Ce principe de réglage, outre la nuisance sonore.

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.

Ces sont tout simplement des inductances ou des batteries de condensateurs qui sont connectées au réseau en fonction de l'énergie réactive qu'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 maintenance importante.

III.5.1.1. Compensateur par SVC (Static Var Compensator) :

Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques, les RCT (réactance commandées par thyristor) (figure 3.5) ont fait apparition vers la fin des années soixante.

Elles sont constituées d'une inductance 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 l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

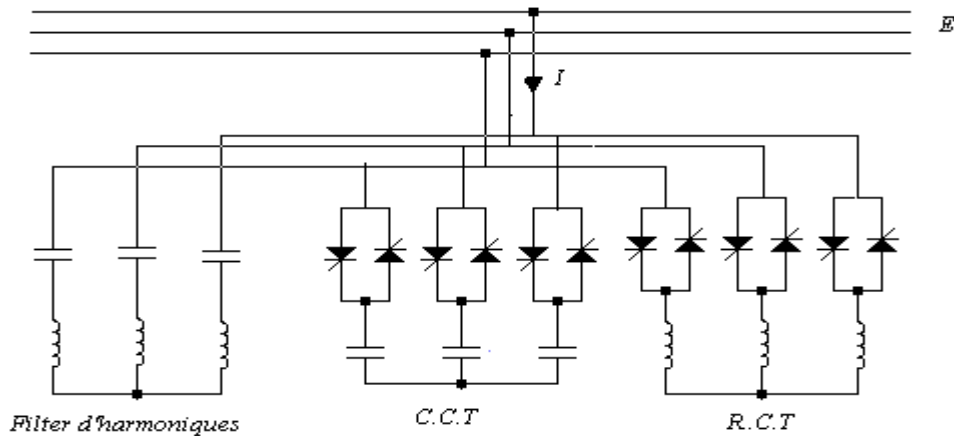


Figure (3.5): Schéma du S.V.C

La (figure 3.6) donne la forme d'onde du courant. Le schéma de la (figure 3.5) est en étoile mais pour éliminer les harmoniques du réseau, on peut encore éliminer les harmoniques de rang 5, 7, 17, 19 en connectant deux RCT aux secondaires d'un transformateur, ceux-ci décalés de trente degrés.

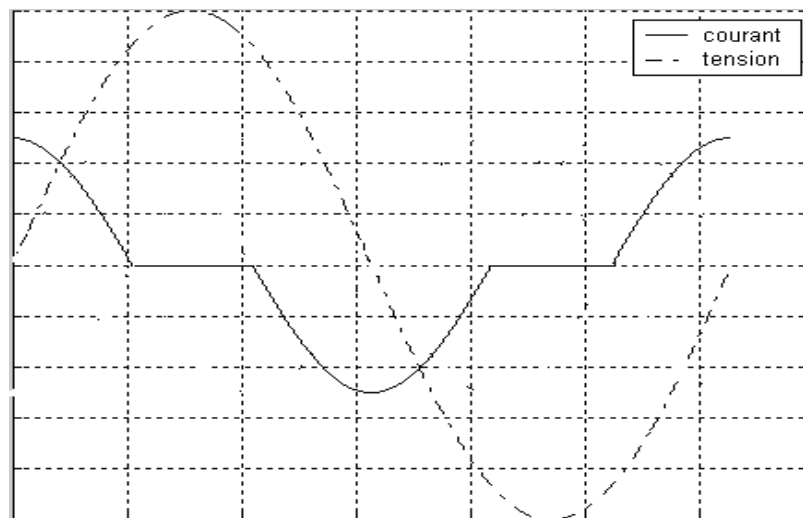


Figure (3.6): Forme d'onde du courant dans un RTC

Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisqu'il est constitué d'éléments inductifs. C'est pour cela que l'on associe ces dispositifs avec des bancs de condensateurs commandés par thyristors (CCT), qui fournissent de l'énergie réactive au réseau. Les thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie réactive se fait en réglant l'énergie absorbée par le RCT, le bilan

globale est la somme des deux énergies. Ce dispositif associé à des filtres LC accordés sur les harmoniques à éliminer.

L'association de ces dispositifs RCT, CCT, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue un compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (Static Compensator), dont le premier dispositif a été installé en 1979 en AFRIQUE DU SUD. La caractéristique statique du SVC est donnée par la (figure 3.6). Trois sont distincts :

- une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et des RCT.

- une zone où le RCT donne son énergie maximale (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés. [4]

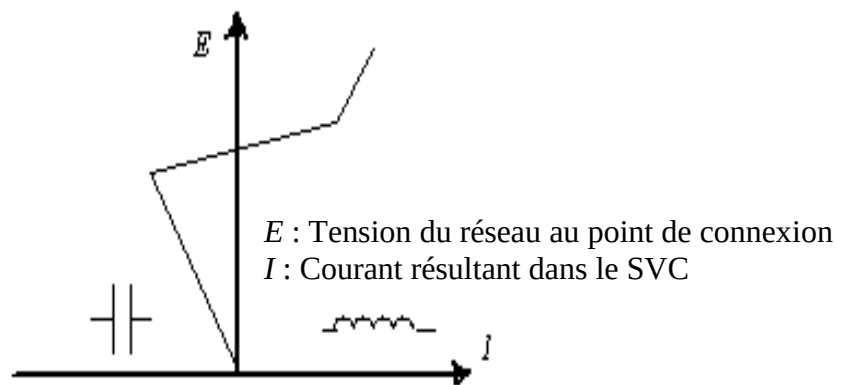


Figure (3.7) : Caractéristique d'un SVC

III.6. Partie Application : (compensation shunt avec SVC)

III.6.1. 1^{er} test : réseau électrique de 9 jeux de barres :

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

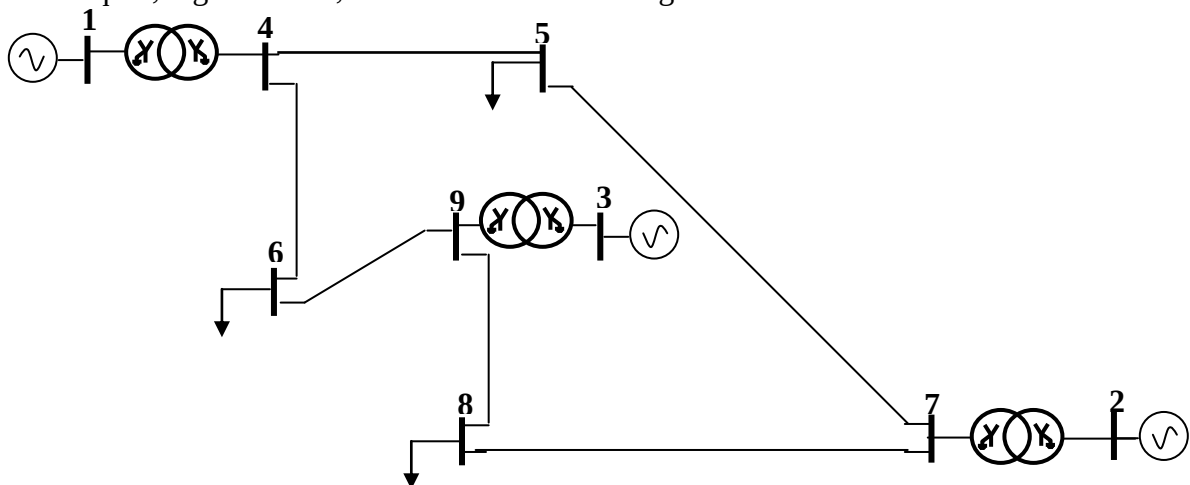
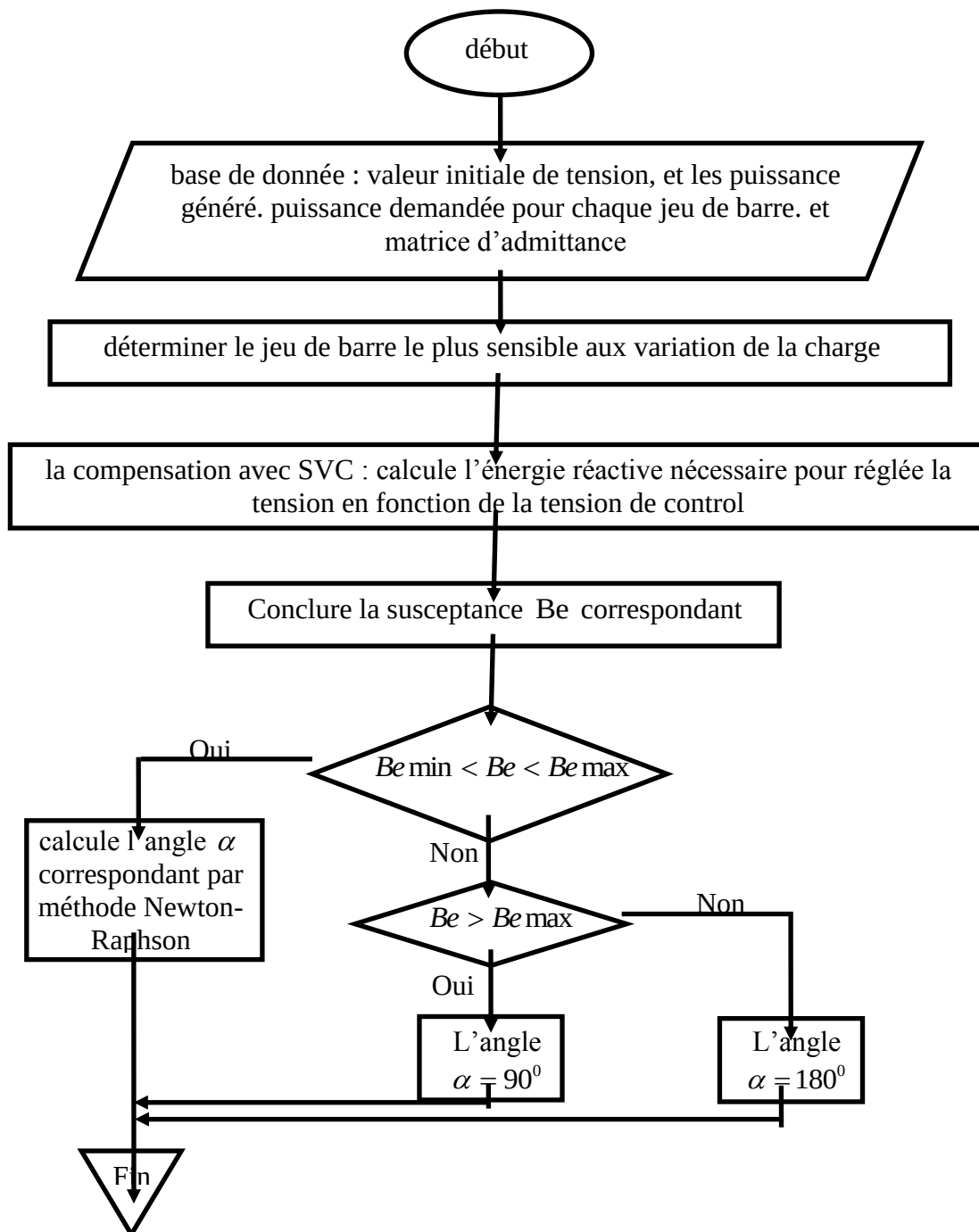


Figure (3.8) : Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres

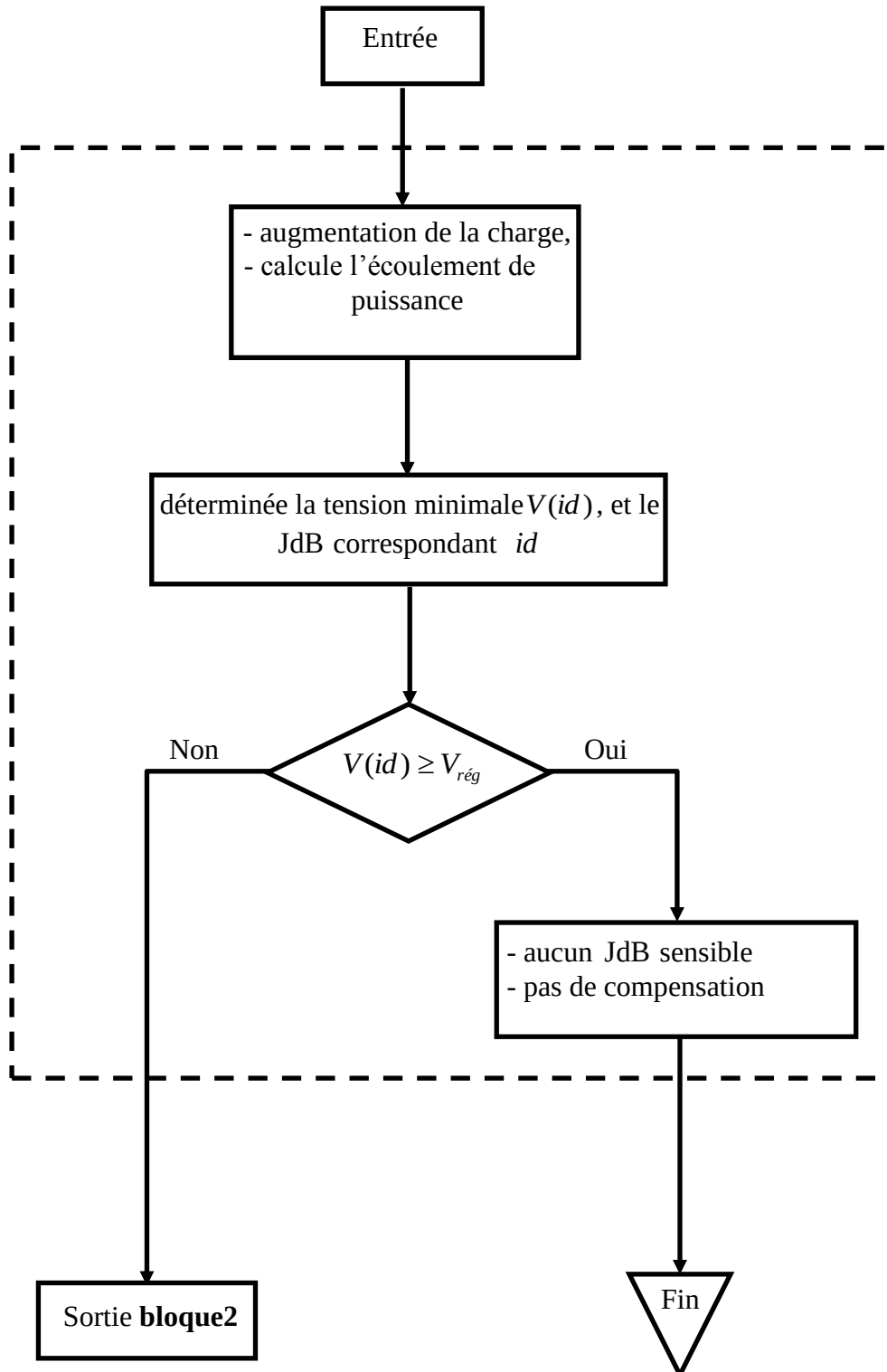
Le tableau (3-1) , la Figure(3.9) montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l' intégration du dispositif shunt avec SVC dans la méthode de calcul de l' écoulement de puissance (méthode de GAUSS-SEIDEL).On remarque une amélioration des tensions au niveau des jeux de barres due à la présence de ce dispositif shunt. Alors que le tableau (3-3.a.b) visualise les résultats du réseau 9 bus obtenu avec et sans l' SVC,(les résultats de programmation).

III.6.2. L'organigramme globale de l'intégration de SVC

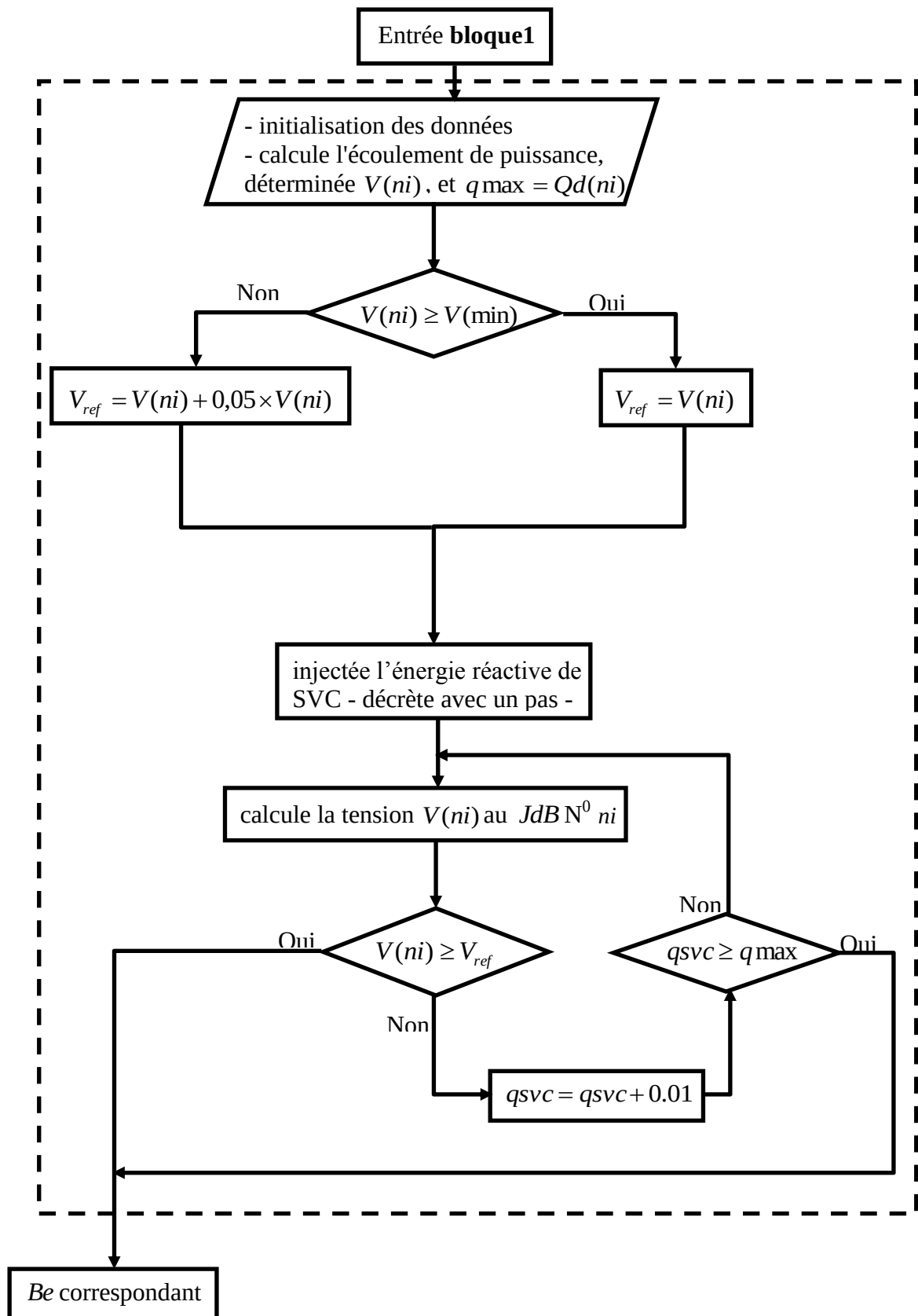


III.6.3. Organigramme détaillée

Bloque 1 : déterminer le jeu de barre le plus sensible aux variation de la charge.



Bloque 2 : la compensation avec SVC : calcule nécessaire l'énergie réactive pour réglée la tension en fonction de la tension de control.



III.6.4. les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres)

a-

Tableau (3-1):Résultats des tensions du réseau électrique –cas normal–
- Méthode de GAUSS-SEIDEL-

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.06	1.0600
2	1.025	1.0251
3	1.009	1.0129
4	0.998	1.0019
5	0.987	0.9871
6	0.982	0.9877
7	0.967	0.9819
8	0.970	0.9703
9	0.960	0.9874

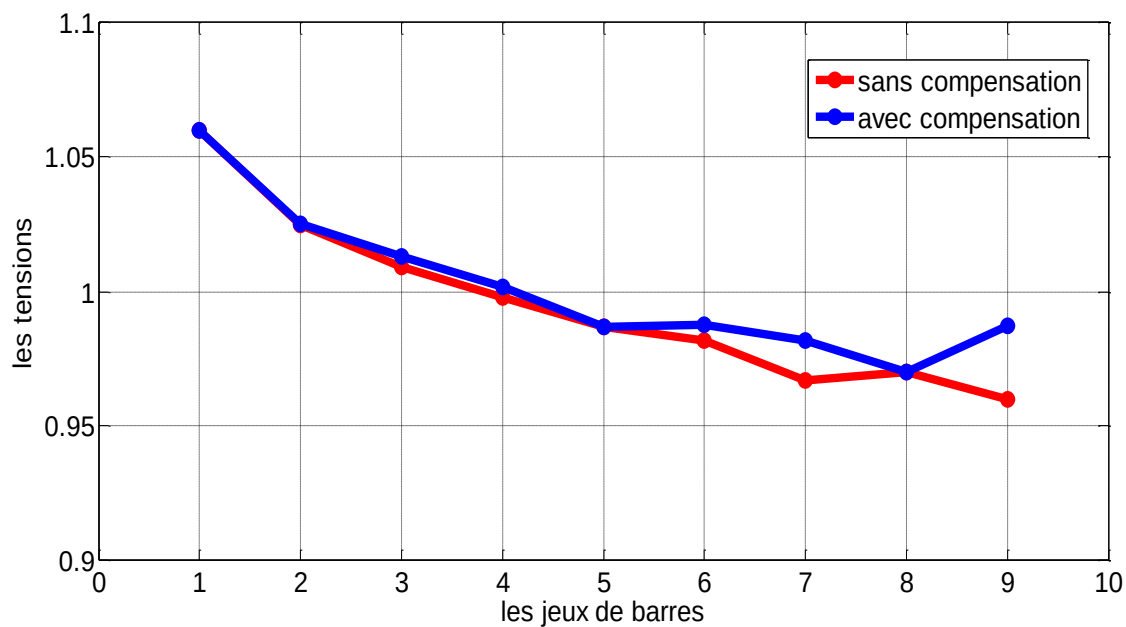


Figure (3.9) : Variation de la tension –cas normale–

b-

Tableau (3-2):Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2)

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.06	1.0600
2	0.890	0.8920
3	0.908	0.9130
4	0.885	0.8913
5	0.867	0.8686
6	0.872	0.8798
7	0.854	0.8732
8	0.872	0.8730
9	0.847	0.8795

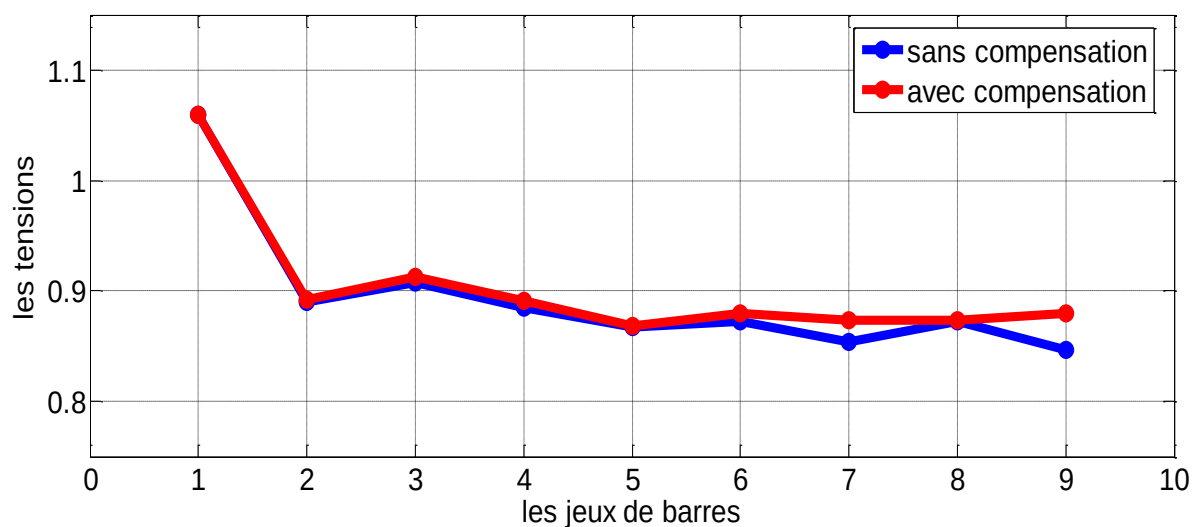


Figure (3.10) :Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2)

c- Les résultats de programmation (Puissance générée, Pertes, Coût optimal.....) de réseau 9 jeux de barres:

Les jeux de barres le plus sensible c'est : 9 et 7

La puissance demandée active: 203.700 MW .

La puissance demandée réactive: 90.400 MVAR .

c-1.

Tableau (3-3.a) :*cas sans compensation*

Résultats	Sans Compensation	
	Cas normale	Cas rupture de la ligne (1-2)
Tension 9 (pu)	0.960	0.847
Tension 7 (pu)	0.967	0.854
Puissance active générée (MW)	212.452	236.595
Puissance réactive générée (MVAR)	101.046	197.649
Pertes active (MW)	9.939	33.831
Pertes réactive (MVAR)	10.770	107.498
Coût optimal (\$/h)	3132.924	3560.155
Susceptible B _e J.d.B 9	/	/
Susceptible B _e J.d.B 7	/	/
α J.d.B 9	/	/
α J.d.B 9	/	/
Puissance réactive injectée (SVC) (MVAR)	00	00

c-2.**Tableau (3-3.b) :***cas avec compensation*

Résultats	Avec Compensation	
	Cas normale	Cas rupture de la ligne(1-2)
Tension 9(pu)	0.9874	0.8795
Tension 7(pu)	0.9819	0.8732
Puissance active générée(MW)	213.540	236.840
Puissance réactive générée(MVAR)	89.545	185.142
Pertes active (MW)	9.846	33.148
Pertes réactive(MVAR)	10.147	104.742
Coût optimal(\$/h)	3120.347	3542.077
Susceptible B _e J.d.B9	0.1032	0.1305
Susceptible B _e J.d.B7	0.1130	0.1430
α J.d.B9	110.90	90
J.d.B9	110.87	90
Puissance réactive injectée(SVC) (MVAR)	11	10

d-

Tableau (3- 4) : cas de l'augmentation de la charge avec :20 %, 100%

Résultats	Sans Compensation			Avec Compensation		
Coefficient de charge KK	KK=1	KK=1.2	KK=2	KK=1	KK=1.2	KK=2
Tension 9 j. d. B	0.960	0.946	0.884	0.9874	0.9793	0.9353
Puissance active générée (MW)	212.452	259.3	455.154	213.540	259.122	455.39
Puissance réactive générée (MVAR)	101.046	137.394	335.045	89.545	123.359	309.566
Pertes active (MW)	9.939	14.860	48.780	9.846	14.682	47.990
Pertes réactive MVAR	10.770	29.122	154.562	10.147	28.079	150.666
Susceptible Be J.d.B	////////	////////	////////	0.1032	0.1261	0.1891
α J.d.B	////////	////////	////////	110.90	110.83	110.65
Puissance réactive injectée (SVC)	00	00	00	11	13.2	21.9
Coût optimal (\$/h)	3132.924	3983.685	9297.443	3120.347	3980.086	9270.775

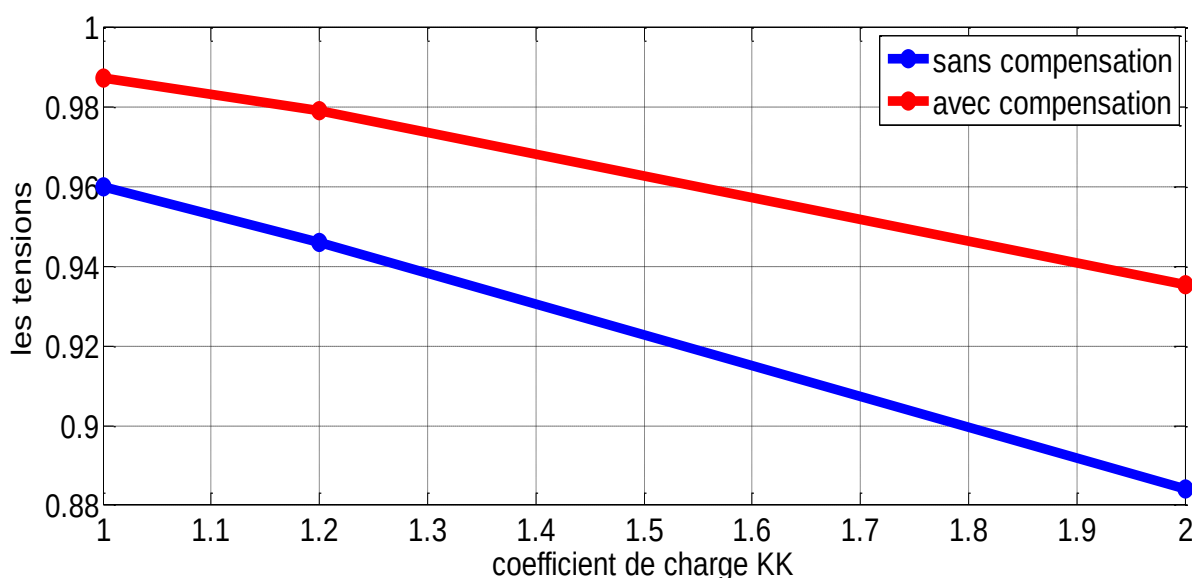


Figure (3.11) : Variation de la tension en fonction de l'incrémentation de la charge

III.6.5. Interprétation

D'après les résultats de programmation, le J.d.B le plus sensible si les jeux de barres 9 et 7 dans le réseau test 9 jeux de barres.

Donc on remarque que :

- Pour cet situation, nous avons montrée la possibilité d'améliorée la niveau de tension en utilisant le dispositif SVC.
- Le compensateur dynamiqueshuntSVC qui a été injectédans le réseau,ainflué positivement sur le réseau qu' 'on a étudié.

- Donc 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

Donc on remarque que :

- La tension est améliorée.
- Réduction faible des pertes de l'énergie active.
- Amélioration du coût de production.

Le dispositif de contrôle SVC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds .

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

III.7. Conclusion:

Dans ce chapitre on a pu montrer que l'intégration des dispositifs de compensation dynamiques permettant un contrôle efficace de la tension, et de réduire les pertes totales. On a pu intégrer les modèles des deux types de compensateurs dynamiques, le dispositif shunt "SVC", dans la méthode de calcul d'écoulement de puissance d'une manière efficace, l'algorithme a convergé après plusieurs itérations, pour les deux réseaux tests (9 jeux de barres).

Chapitre IV

Compensation série par un compensateur d'énergie réactive (TCSC)

IV.1.Introduction

Les dispositifs FACTS permettent donc un contrôle amélioré des systèmes électriques déjà en place. Ces dispositifs font en général appel à de l'électronique de puissance notamment ceux disposant d'une branche le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) fait partie. Ces éléments agissent en fait comme des impédances dont la valeur change en fonction de l'angle d'allumage des thyristors. Cet angle d'allumage constitue donc une variable de commande du système.[6]

Notre contribution dans ce travail est de réaliser plusieurs stratégies de positionnements du dispositif de contrôle TCSC qui sont principalement liées au contexte de la dérégulation et plus particulièrement en vue d'une utilisation plus efficace du réseau de transport. L'objectif ultime est la création d'un outil d'optimisation pouvant être utilisé comme aide à la planification par les exploitants du réseau.

IV.2.Les systèmes de 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 de la ligne essentiellement inductive, on insère des éléments capacitifs. On va bien sûr chercher à contrôler l'impédance de la ligne, en utilisant des condensateurs séries réglables.

IV.2.1. Le compensateur série commandé par thyristor (TCSC):

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. L'ensemble est inséré dans la ligne de transmission (figure 4.1).

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.

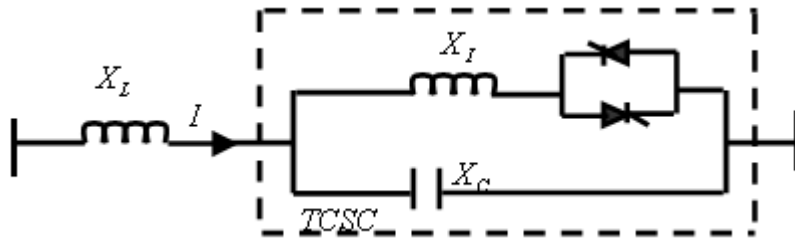


Figure (4.1) : Insertion d'un TCSC sur une ligne

Ce dispositif a trois modes de conduction :

- Les thyristors ne sont pas commandés. L'impédance du dispositif est alors X_C .
- ✓ 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_L .
- ✓ Les thyristors sont en conduction partielle, l'impédance du dispositif est donc fonction de l'angle de retard à l'amorçage α (figure 4.2). On remarque qu'il y a une zone où l'impédance n'est pas déterminée.

L'avantage du TCSC est d'obtenir une impédance de ligne 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.

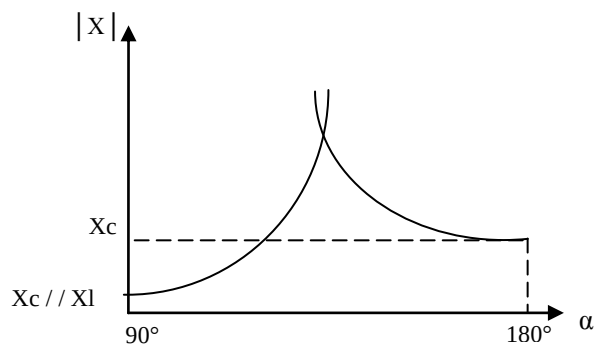


Figure (4.2) : impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors

IV.3. Condensateurs série contrôlés par thyristors (TCSC) :

Le banc de condensateurs est monté avec un TCR qui fait circuler des impulsions de courant en phase avec le courant de la ligne. Ceci augmente la tension des condensateurs au-delà de la tension qui peut être obtenue par le courant de ligne tout seul. Chaque thyristor est amorcé une fois par cycle et avec un temps de conduction inférieur à un demi-cycle de la fréquence fondamentale appliquée.

Si la tension ajoutée, créée par la circulation des impulsions de courant, est contrôlée pour être proportionnelle au courant de ligne, le réseau électrique voit le TCSC comme une réactance qui augmente au-delà de la réactance physique des condensateurs. A cause des intervalles de conduction des thyristors, des harmoniques de courant seront injectés dans les condensateurs. Les harmoniques de courant augmentent avec l'augmentation du degré de surtension. [7]

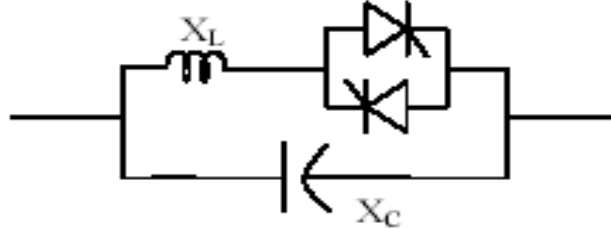


Figure (4.3) :Schéma d'un TCSC

A. L'analyse du circuit d'un TCSC et ses principales fonctionnalités

Comme les composantes fondamentales de la tension et du courant sont contrôlés, 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 :

$$Z_{TCSC} = jX_{TCSC} \quad \text{.....(IV-1)}$$

L'impédance équivalente du TCSC.

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

L'impédance équivalente du TCR.

$$Z_C = -jX_C \quad \text{.....(IV-3)}$$

L'impédance de la capacité

Puis que :

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

D'où

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L} \quad \text{.....(IV-4)}$$

Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissance et d'élèver la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance X_{TCSC} qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné par l'équation (IV-5). [8].

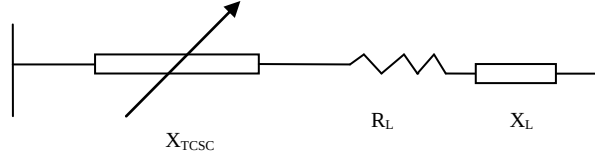


Figure (4.4) : L'effet de TCSC sur la réactance de la ligne de transmission

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jLw}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) - LCw^2} \dots \dots \dots (IV-5)$$

La réactance de la ligne quand le TCSC est donnée par :

$$X_{ij} = X_L + X_{TCSC} \dots \dots \dots (IV-6)$$

Où X_L est la réactance de la ligne et X_{TCSC} est la réactance de TCSC.

IV.4. Implémentation des TCSC dans la gestion de l'écoulement de puissance :

Supposons qu'un dispositif TCSC est placé entre deux nœuds k et m Figure(4.5). Si on néglige les pertes, la puissance P injectée dans le TCSC à partir du nœud de génération k est égale à celle injectée par le TCSC au nœud de charge m . Le modèle du TCSC représenté par la figure.4 est dérivé par le système d'équations (IV.6) [9]:

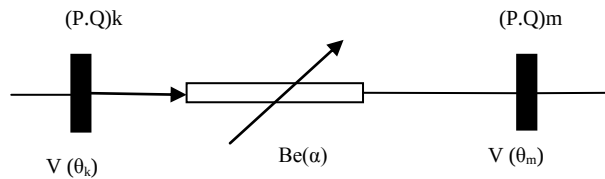


Figure (4.5) : Modèle du TCSC dans un écoulement de puissance

$$P = -V_k V_m B_e \sin(\theta_k - \theta_m) \quad Q_k = V_k V_m B_e \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k^2 B_e \dots \dots \dots (IV-7)$$

$$Q_m = V_k V_m B_e \cos(\theta_k - \theta_m) - V_m^2 B_e$$

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = IV_k$$

$$\theta_k = \theta_m + \delta_t$$

Après avoir ajouté le TCSC sur la ligne entre le nœud k et le nœud m d'un système d'énergie électrique, la nouvelle matrice d'admittance Y' bus peut être mise à jour comme [9]:

$$\bar{Y}_{bus} = Y_{bus} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta(Y_{km}) & 0 & 0 & -\Delta(Y_{km}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta(Y_{km}) & 0 & 0 & \Delta(Y_{km}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV-8)$$

IV.5.Application

A. Réseau Ouest Algérien 14 J.B

L'objectif de cette partie est d'appliquer le calcul de l'écoulement des puissances par la méthode de Newton-Raphson pour un modèle de réseau électrique de 14 nœuds d'IEEE, en lui insérant le contrôleur de transit de puissance TCSC en utilisant:

Ce réseau est constitué de 17 lignes de transport, 3 générateurs au niveau des jeux de barres n° 1, 3 et 4 et 11 charges figure (4-6). La puissance et la tension de base sont respectivement, 100 MVA et 230 KV. Les données de ce réseau sont montrées dans les tableaux ci-dessous.

Le réseau représenté par la figure(4-6) comprend :

- 14 nœuds;
- 3 nœuds de production (générateurs) et consommation ;
- 11 nœuds de production (compensateurs) et consommation
- 17 lignes ;

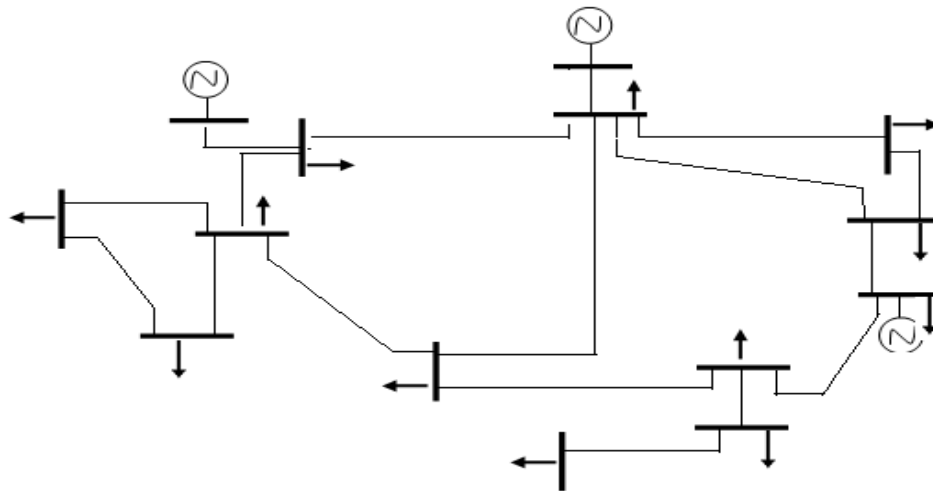


Figure (4.6) : Schéma unifilaire de réseau Ouest Algérien

B. Analyse du réseau sans dispositif TCSC

L'analyse de notre réseau est réalisée à l'aide de logiciel. Ce dernier, nous permet le calcul d'écoulement de puissance. Il inclut aussi le fonctionnement et la commande des dispositifs TCSC.

Le calcul de l'écoulement de puissances est une étape nécessaire pour pouvoir comparer nos résultats. Il est effectué en premier lieu pour la détermination des conditions initiales du système avant la compensation. En effet il permet de trouver les tensions aux différents nœuds et par la suite les puissances transmises, injectées et les pertes. Tableau (4-1).

Tableau (4-1): Résultat de calcul de tension sans et avec TCSC

N° J.d.B	tension	
	Sans TCSC	Avec TCSC
1	1.0600	1.0600
2	1.0450	1.0450
3	1.0100	1.0100
4	1.0365	1.0486
5	1.0471	1.0554
6	1.0700	1.0700
7	1.0402	1.0448
8	1.0850	1.0850
9	1.0173	1.0424
10	1.0177	1.0387
11	1.0385	1.0494
12	1.0551	1.0580
13	1.0422	1.0483
14	1.0089	1.0387

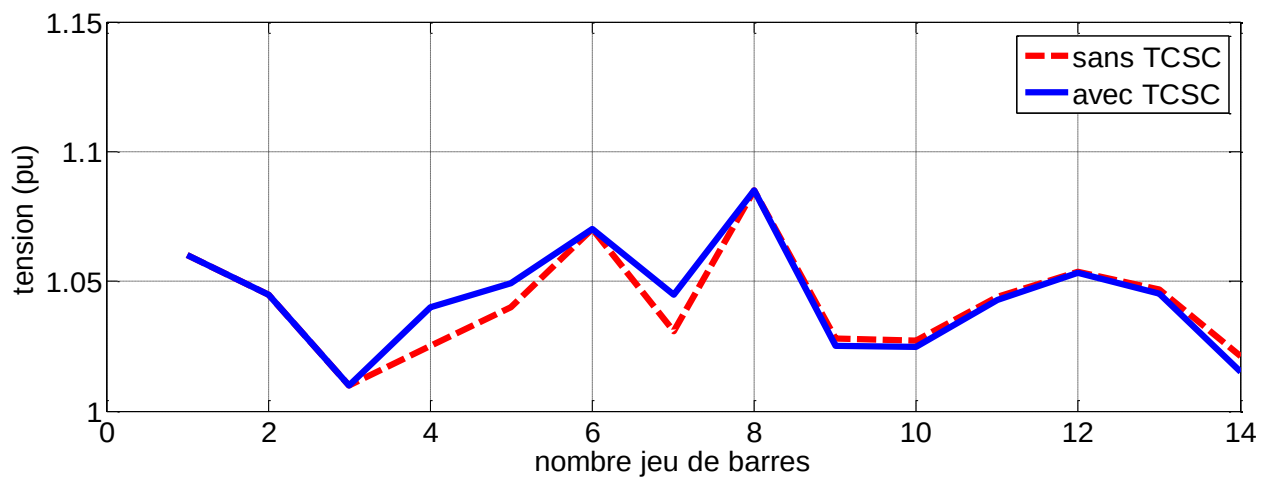


Figure (4.7) : la tension entre jeu de barres sans et avec TCSC

Tableau (4-2) : Résultat de calcul de transit de puissance active avec et sans TCSC

BRANCHES			Puissances active transmises			
			sans TCSC		avec TCSC	
N°	AU	DU	P(I J)	P(J I)	P(I J)	P(J I)
1	1	2	44.094	-43.730	96.670	-95.057
2	1	5	18.134	-17.976	48.027	-46.918
3	2	3	38.142	-37.468	48.725	-47.669
4	2	4	16.330	-16.185	38.095	-37.319
5	2	5	7.558	-7.515	26.537	-26.156
6	3	4	-26.732	27.232	-16.531	16.731
7	4	5	-37.363	37.549	-49.996	50.318
8	4	7	-20.008	20.008	-0.010	0.010
9	4	9	-1.476	1.476	9.794	-9.794
10	5	6	-19.658	19.658	12.156	-12.156
11	6	11	17.125	-16.845	26.330	-25.699
12	6	12	9.153	-9.055	23.805	-23.164
13	6	13	22.864	-22.516	30.821	-30.228
14	7	8	-50.000	50.000	-50.000	50.000
15	7	9	29.992	-29.992	49.990	-49.990
16	9	10	-4.190	4.197	3.847	-3.842
17	9	14	3.206	-3.188	5.437	-5.400
18	10	11	-13.197	13.345	-5.158	5.199
19	12	13	2.955	-2.936	-6.936	7.050
20	13	14	11.953	-11.712	9.677	-9.500

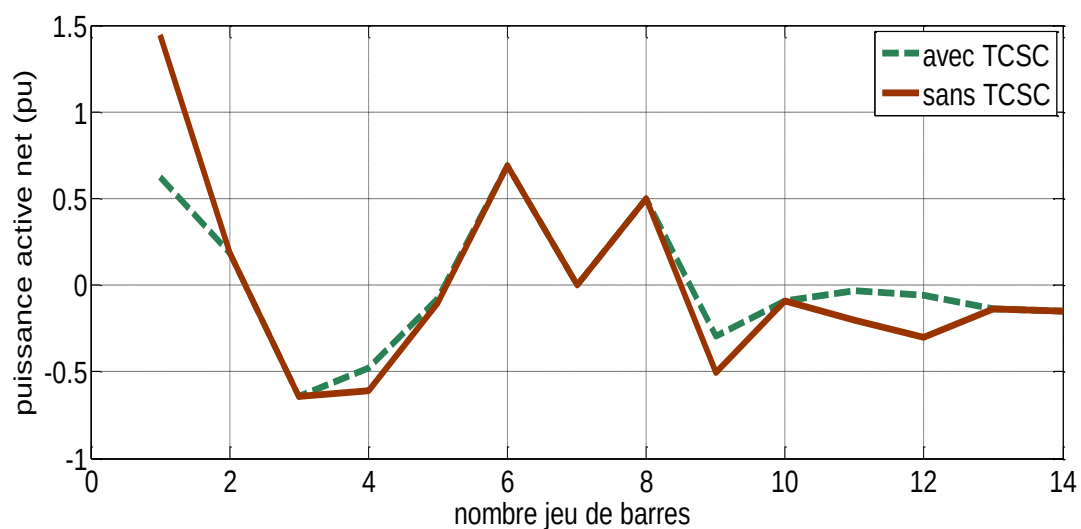


Tableau (4-3) : Résultat de calcul de transit de puissance réactive avec et sans TCSC

BRANCHES			Puissance transmises			
			sans TCSC		avec TCSC	
N°	AU	DU	Q(I J)	Q(J I)	Q(J I)	Q(J I)
1	1	2	6.922	-17.509	6.704	-17.261
2	1	5	-4.492	-5.798	-0.799	-9.359
3	2	3	5.830	-12.239	5.768	-12.128
4	2	4	-5.955	-0.998	0.359	-7.218
5	2	5	-8.742	1.284	-4.137	-3.294
6	3	4	-8.136	6.722	-1.847	0.352
7	4	5	-10.532	11.119	-17.911	18.540
8	4	7	-1.924	2.705	6.290	-5.338
9	4	9	2.832	-2.780	7.587	-7.266
10	5	6	-8.205	9.244	-11.487	12.496
11	6	11	6.627	-6.042	22.601	-21.128
12	6	12	2.714	-2.510	9.810	-9.421
13	6	13	8.918	-8.232	16.369	-15.396
14	7	8	-21.931	26.741	-36.999	43.582
15	7	9	19.226	-17.946	27.337	-25.652
16	9	10	1.922	-1.905	3.983	-3.948
17	9	14	2.204	-2.165	-1.665	1.689
18	10	11	-3.895	4.242	-6.852	7.328
19	12	13	0.910	-0.893	-2.179	2.200
20	13	14	3.325	-2.835	7.396	-6.689

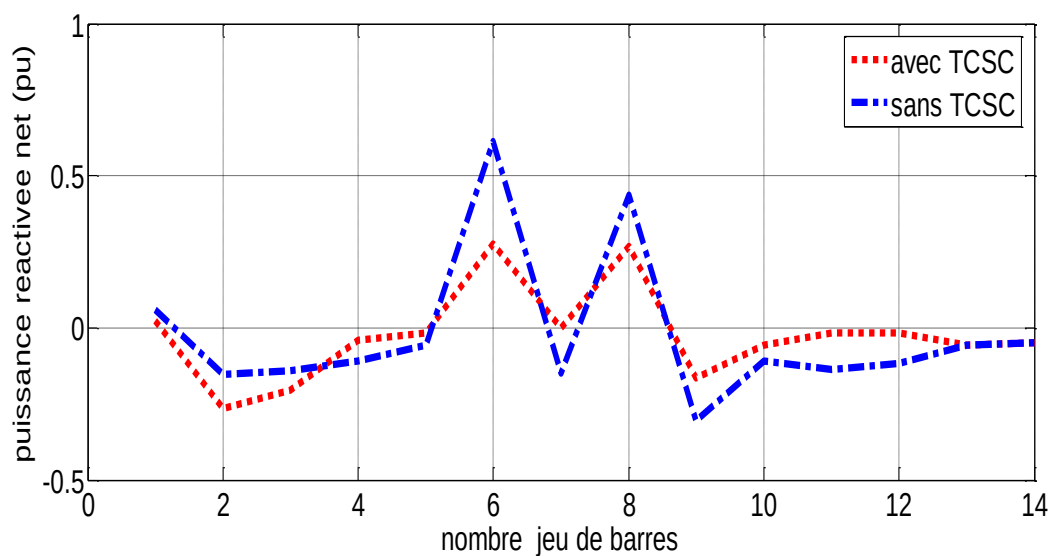


Tableau (4-4) : Résultat de calcul de argument de tension avec et sans TCSC

N°	Argument de tension	
	sans TCSC	avec TCSC
1	0	0
2	-1.2208	-1.4113
3	-5.0520	-0.6181
4	-2.8074	-2.0893
5	-2.0552	-1.5740
6	0.4739	1.2192
7	-0.6007	-1.4115
8	3.8556	3.1052
9	-2.3663	-1.6733
10	-2.1398	-1.4389
11	-0.9520	-0.2317
12	-0.5471	0.2443
13	-0.7499	0.0743
14	-2.6894	-1.5690

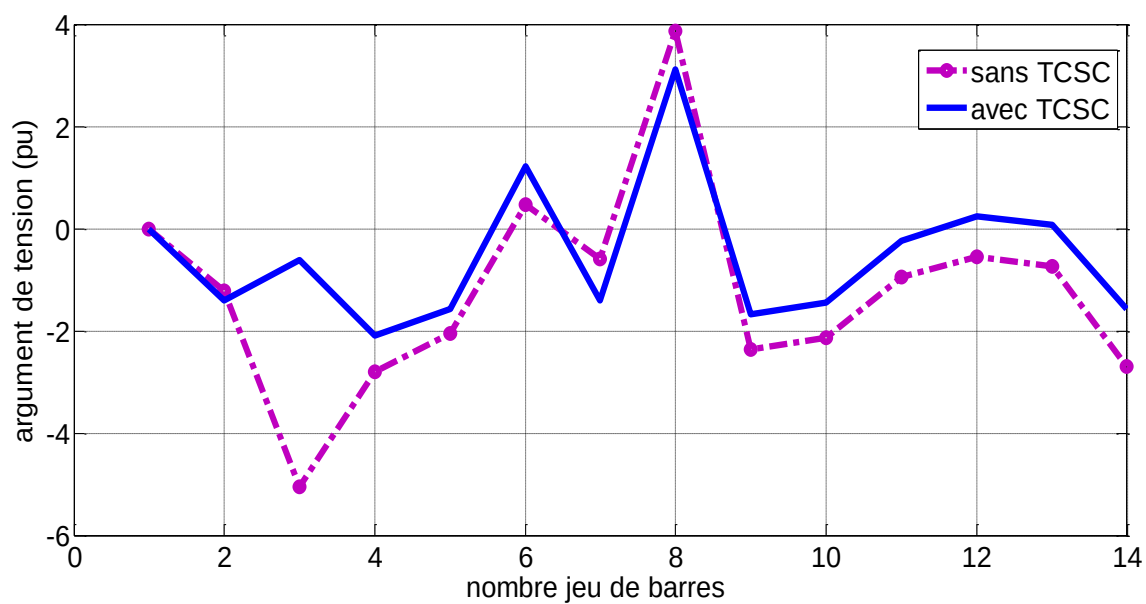


Figure (4.10) : Argument de tension entre jeu de barres sans et avec TCSC

C. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenues, nous remarquons que certaines lignes de transmissions avant insertion du contrôleur TCSC sont assez chargées et d'autres faiblement chargées, comme exemples : la ligne (1-2) et les lignes (6-11) et (7-8). Après insertion du dispositif, nous remarquons que les résultats montrent que les charges des lignes sont presque proportionnelles l'une par rapport à l'autre par exemple les lignes (1-2) et (1-5) et cela pour équilibrer le chargement des lignes.

Concernant les pertes totales actives du système tableau (4-5), sont nettement améliorées après l'insertion du TCSC. C'est à dire, qu'elles sont diminuées de 3.228 MW par rapport à l'état initial qui

est 5.787 MW, Cette diminution est obtenue grâce à l'emplacement du dispositif TCSC entre les nœuds (2-3) qui est un emplacement optimal. Cet emplacement n'est pas arbitraire car, nous l'avons opté parmi d'autres longues lignes.

Finalement les résultats obtenus valident la théorie d'emplacement des FACTS série.

Table (4-5) : Résultats de différence de la puissance totale sans et avec TCSC

Résultats de différence de la puissance totale	sans TCSC	avec TCSC
La puissance active générée Totale(MW) est:	262.228	264.787
La puissance réactive générée Totale(MVAR) est:	49.123	45.875
La Puissance active demandée Totale(MW) est:	259.000	259.000
La puissance réactive demandée Totale(MVAR) est	81.300	81.300
Les Pertes Actives Totale(MW) est:	3.228	5.787
Les Pertes Réactives Totale(MVAR) est:	-32.177	-35.425
Le Facteur de Puissance est:	0.983	0.985

IV.6.CONCLUSION

Cette étude présente et explique le contrôle de l'écoulement de puissance active dans une ligne de transport par un système FACTS, le dispositif choisi pour ce contrôle est le TCSC (thyristor Controller série capacitor). Ce dispositif est capable de contrôler la puissance active et, il peut contrôler un seul paramètre associé au transit de puissance, à savoir, l'impédance de la ligne, pour améliorer les performances du réseau électrique.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle TCSC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances actives et la réduction des pertes dans les lignes électriques.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des réseaux électriques et en particulier la compensation de l'énergie réactive.

On peut faire sortir un ensemble de réalisations telle que :

- Comment choisir les sections des conducteurs
- Calcul des paramètres du réseau électrique.
- Etude complète d'un réseau électrique réel.
 - Calcul des puissances transitées dans les lignes
 - Calcul des puissances capacitives des lignes
 - Calcul des puissances des nœuds
 - Détermination des chutes de tension
 - Détermination des tensions au niveau de chaque nœud
 - Détermination des écarts des tensions
- Etude de la probabilité dans la future.
- Etude du plan de tension dans le régime actuel et future.
- Comment améliorer le plan de tension.
- Compensation de l'énergie réactive.

On a pu intégrer les modèles de type de compensateur dynamique, le dispositif shunt "SVC", dans la méthode de calcul d'écoulement de puissance (N-R ou G-S) d'une manière efficace.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle TCSC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances actives et la réduction des pertes dans les lignes électriques.

En fin notre travail s'inscrit dans le cadre global de l'amélioration de la qualité d'énergie électrique, il a particulièrement pour objet d'étude les problèmes de chute de tension et comment résoudre ce problème avec l'utilisation des condensateurs du réactif « condensateurs ».

En plus ce travail montre aussi la quantité exacte et le lieu optimal d'implantation des condensateurs pour que notre réseau soit exploitable donc minimums de coût.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Sarrand J Verseille (Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension dans les réseaux publiques)juin 1986.
 - [2] Glaudio A. Canizares,et Zeno T. Faur (Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage callapse), IEEE Trans power systems, Vol . 14 , No-1 February 1999, pp.158.164.
 - [3] R.Wierda (Flicker ouxintillement des sources lumineuse).1989
 - [4] B. Khaled et Z. Hakim (Etude des compensateurs statique de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique).2012
 - [5] Chantouche (Condensateurs de puissance).juin 1996
 - [6] R. Founie, JCPELLE (Condensateurs de puissance).2012
 - [7] D ROCK (Manœuvre et protection des batteries de condensateur MT).2003
 - [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.
-