

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique



Université Mouloud Mammeri
De Tizi-Ouzou

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : RESEAU ELECTRIQUE

Thème

ETUDE DES CARACTERISTIQUES STATIQUES
ET DYNAMIQUES D'UN SVC
(STATIC VAR COMPENSATOR)

Dirigé par :

Mr. K. HADJ.SAID

Réalisés par :

M.BETTACHE NOUREDDINE

M.AIT MESSAOUD BRAHIM

PROMOTION 2012-2013

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique



Université Mouloud Mammeri
De Tizi-Ouzou

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Thème

ETUDE DES CARACTERISTIQUES STATIQUES
ET DYNAMIQUES D'UN SVC
(STATIC VAR COMPENSATOR)

Dirigé par :

Mr. K. HADJ.SAID

Réalisés par :

M.BETTACHE NOUREDDINE

M.AIT MESSAOUD BRAHIM

PROMOTION 2012-2013

Remerciements

Dieu merci tu nous as donné la force, le courage et la foi de mener ce modeste travail jusqu'au bout.

Nous tenons à remercier vivement tout ce qui de près ou de loin a apporté leur contribution à notre mémoire fin d'études.

Ainsi, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadreur Mr Hadj Said pour sa disponibilité, son aide. Merci pour le temps que vous avez passé avec nous, et pour toutes les informations, et conseils que vous nous avez apporté au cours de ce stage.

Nous remercions tous l'ensemble du personnels de département électrotechnique (enseignants et administratifs) qui nous ont fais preuve d'une bonne volonté et beaucoup de sacrifices pour nous assurer une bonne formation.

Enfin, pour leur soutien sans faille, et permanent, nous tenons à remercier nos parents de tout cœur nos parents.

Dédicaces

Je voudrais dédier ce modeste travail à ma chère maman, et mon cher père qui nous ont quittés à jamais, vous qui m'avez donné le courage tout le long de mes études.

*Papa, maman..... vous êtes tout le temps présent dans mon esprit.....
Je vous aime énormément.*

A mes frères et sœurs pour leurs soutiens moraux.

*A mes amis de **KDL.p** Della.abdelkader, Saifi.zahir, Benzaid.said,
Khelfaoui.sidahmed, Khelfaoui.samir, Kadour.mounir, Bouraba.youcef,
Oumitouche.linda, Tar.nora, Tahar.hayat d'avoir été à mes cotés à chaque instant.*

B.noureddine

Dédicaces

Je dédié ce modeste travail à :

Mes très chers **parents** qui ont toujours souhaités ma réussite dans la vie et que dieu les protèges, aussi je dédié ce travail

A mes très chères **SŒURS** et leurs maries et leurs enfants

A mes **FRERES** et leurs femmes et leurs enfants

A tous mes amis surtout :

Naoual, Zahra, Mouhand, Zahir et Seddik

A tous ce qui me connais de prés au de loin

Brahim

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction Général..... | 1 |
| Chapitre I : | |
| COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE. | |
| Introduction..... | 2 |
| I.1.1-Energie active, réactive , apparente..... | 3 |
| I.1.2-Composants active et réactive du courant..... | 3 |
| I.1.3-Composante active et réactive de la puissance..... | 3 |
| I.1.4-Puissance dans un récepteur monophasé..... | 4 |
| I.1.5-Puissance dans récepteur triphasé..... | 5 |
| I.1.6-Facteur de puissance..... | 6 |
| I.1.6.1-Définition de facteur de puissance..... | 6 |
| I.1.6.2-Causes du mauvais facteur de puissance..... | 7 |
| I.2-Transit de la puissance réactive et ses effets..... | 8 |
| I.2.1-Pertes joule..... | 8 |
| I.2.2- Chute de tension..... | 9 |
| I.2.3-Coté économique..... | 10 |
| I.3-Principe de la compensation de l'énergie réactive..... | 10 |
| I.4-Compensation de l'énergie réactive des réseaux de transport..... | 11 |
| I.4.1-Tension de service et limites de tensions admissibles..... | 11 |
| I.4.1.1-Tension de service..... | 11 |
| I.4.1.2-Limites de tensions admissibles..... | 13 |
| I.4.2-Description de l'instabilité en réseau..... | 14 |
| I.4.2.1-Puissance maximale transmissible et tension critique..... | 14 |
| I.4.2.2-Phénomène d'écroulement de la tension..... | 16 |
| I.4.3-Origine des fluctuations de la demande d'énergie réactive..... | 17 |
| I.4.3.1-Consommation des charges..... | 17 |
| I.4.3.2-Pertes réactives dans les réseaux de transport..... | 18 |
| I.4.4-Dispositifs de compensation de l'énergie réactive..... | 20 |
| I.4.4.2-Batteries de condensateurs..... | 20 |
| I.4.4.3-Inductances..... | 27 |
| I.4.4.4-Compensation synchrones..... | 27 |
| I.4.4.5-Groupe thermique et hydraulique..... | 30 |
| I.4.4.6-Compensation statiques d'énergie réactive (dispositifs FACTS) | 31 |
| I.4.4.6.1- Concept FACTS : Un projet EPRI..... | 31 |
| I.4.4.6.2-Quelques dispositifs de type FACTS | 32 |
| Conclusion | 33 |

Chapitre II :

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ET COMPENSATEURS STATIQUE DE LA PUISSANCE REACTIVE.

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 35 |
| II.1- Convertisseur d'électronique de puissance | 36 |
| II.1-3 -Le gradateur | 36 |
| II.1.1.1- Gradateur monophasé | 36 |
| II.1.1.2-Gradateur triphasé..... | 38 |
| III.2-Schéma de principe et fonctionnement du SVC | 40 |
| III.2.1- Condensateur commandé par thyristors (CCT)..... | 40 |
| III.2.2-Inductance commandée par thyristors (LCT)..... | 41 |
| II.3- Calculs des compensateurs shunt..... | 44 |
| II.3.1- Capacitance shunt commandée par thyristors (CCT)..... | 45 |
| II.3.2- Inductance commandé par thyristors..... | 46 |
| II.3.3 – Caractéristique V-I d'un SVC (LCT+CCT) | 49 |
| II.3.4- Système de commende et temps de réponse du compensateur statique..... | 50 |
| II.4. – Calculs des compensateurs series | 51 |
| II.4.1- Capacitance série commandée par thyristors à contrôle direct..... | 51 |
| Conclusion..... | 52 |

Chapitre III :

MODELISATION DU COMPENSATEUR STATIQUE DE L'ENERGIE REACTIVE (SVC).....

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 54 |
| III.1- Modélisation du SVC..... | 55 |
| III.1.1-Modèle statique du SVC | 55 |
| III.1.1.1-Zone de surcharge capacitive..... | 57 |
| III.1.1.2- : Zone de surcharge inductive..... | 58 |
| III.1.1.3- : Zone de régulation..... | 58 |
| III.2-Modélisation dynamique de SVC | 59 |
| III.3-Analyse du SVC | 60 |
| III.4-Modèles standards..... | 60 |
| III.5-Inconvénients des SVC..... | 63 |
| Conclusion..... | 64 |

Chapitre IV :

MODELISATION COMPENSATEUR STATIQUE DE L'ENERGIE REACTIVE

| | |
|---|-----|
| Introduction..... | 64 |
| IV.1- présentation du réseau..... | 65 |
| IV.1.1-Modèle de base | 65 |
| IV.1.2- Valeur de base et valeur limites | 67 |
| IV.2-Fonctionnement normale | 68 |
| IV.3. : Action d'un TCR | 70 |
| IV.3.1-Avant la connexion du TCR..... | 73 |
| IV.3.2-Après la connexion du TCR | 75 |
| IV.3.3-Comparaison graphique | 77 |
| IV.4-Action d'un TSC | 78 |
| IV.4.1- Avant la connexion du TSC..... | 81 |
| IV.4.2 : Après la connexion du TSC | 83 |
| IV.4.3-Comparaison graphique | 85 |
| IV.5-Action d'un TCR suivie d'une action d'un TSC | 87 |
| IV.5.1- Avant la connexion de SVC | 89 |
| IV.5.2- Après la connexion du SVC | 91 |
| IV.5.3- Comparaison graphique..... | 93 |
| IV.6-Action d'un TSC suivie d'une action d'un TCR | 95 |
| IV.6.1-Avant la connexion du SVC | 98 |
| IV.6.2-Après la connexion du SVC | 100 |
| IV.6.3-Comparaison graphique..... | 102 |
| Conclusion | 104 |
| Conclusion générale | 105 |
| Référence bibliographique | 106 |

Introduction générale

Le transport d'énergie électrique s'accompagne d'une importante consommation de puissance réactive. Des premiers dispositifs de type FACTS (Flexible Alternative transmission Systems) ont été réalisés pour contrôler la tension, ce sont les compensateurs statiques.

L'étude du comportement des systèmes et la synthèse des lois de commandes nécessitent la construction de modèles adéquats. Ces derniers vont du modèle fin dit topologique à des modèles de comportement moyens ou encore statiques, la précision du modèle allant de paire avec sa complexité.

Dans notre travail nous avons reparti l'étude en quatre chapitres dont chacun traite la partie suivante :

Le premier chapitre est l'étude générale de la compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques en évoquant les principales sources de puissance réactive aussi les différents dispositifs de compensation.

Le second chapitre traite les compensateurs statiques de puissance réactive SVC en illustrant notre étude par un calcul des compensateurs shunts et série.

Dans le troisième chapitre nous avons donné un aperçu sur la modélisation statique et dynamique d'un SVC.

Le quatrième chapitre est consacré à une simulation d'un système de puissance consommant ou produisant de la puissance réactive pour illustrer l'effet d'un SVC dans le système pour différents modèles de fonctionnement.

Cette étude est achevée par une conclusion mettant en évidence le rôle important des SVC dans le contrôle de la tension dans un système de puissance de transport de l'énergie réactive.

Chapitre I :

Compensation d'énergie réactive

Introduction :

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant et d'une tension alternative par des réseaux en haute, moyenne et basse tension.

L'énergie consommée est composée d'une partie active, transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie réactive transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques.

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie active, la partie réactive ne peut pas être éliminée, mais compensée par des dispositifs appropriés. Ces dispositifs de compensation sont très utiles car il faut disposer à chaque instant de la puissance active nécessaire augmentée des pertes entraînée par son transport. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite.

Les économies d'énergie réalisées sont d'une grande importance vue les efforts humains et matériels qui sont investis quotidiennement pour garantir la continuité et la qualité de service.

Dans ce chapitre, nous allons parler du principe de la compensation de l'énergie réactive en évoquant les différentes techniques entreprises pour sa concrétisation.

I.1.1- Energie active, réactive, apparente :

Toute machine électrique utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active, et l'énergie réactive.

L'énergie active consommée (kWh) résulte de la puissance active P (kW) des récepteurs. Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail), et en chaleur (pertes).

L'énergie réactive consommée (kVARh) sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive Q (k VAR) des récepteurs.

L'énergie apparente (kVAh) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente S (kVA) des récepteurs, somme vectorielle de P (kW) et Q (kV).

I.1.2- composantes active et réactive du courant :

A chacune des énergies active et réactive, correspond un courant. Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau. Le courant réactif (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, soit en retard (récepteur inductif). Soit en avance (récepteur capacitif).

Le courant apparent (I_t) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel. Ces courants se composent alors vectoriellement comme représenté à la figure 1 :

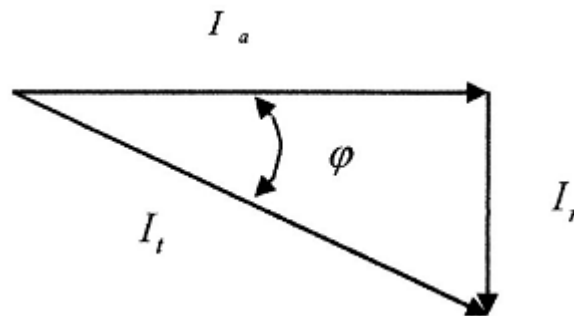


Figure I.1 : Composition vectorielle des courants

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad [\text{I-1}]$$

$$I_a = I \cos \varphi \quad [\text{I-2}]$$

$$I_r = I \sin \varphi \quad [\text{I-3}]$$

I.1-3: Composante active et réactive de la puissance :

Le digramme précédent (figure I.1) établi pour les courants est aussi valable pour les puissances, en multipliant chacun des courants par la tension commune U. On définit ainsi la figure I.2 où :

$$S = U \cdot I \quad : \text{ Puissance apparente en (k VA)} \quad [\text{I-4}]$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad : \text{ Puissance active en (k W)} \quad [\text{I-5}]$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad : \text{ Puissance réactive en (k Var)} \quad [\text{I-6}]$$

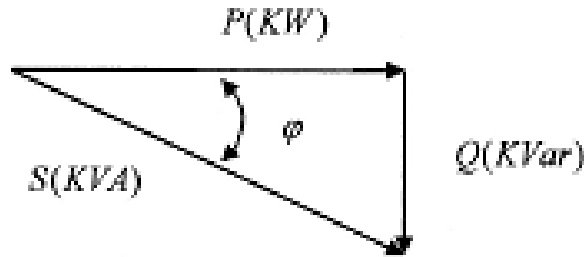


Figure I.2 : Composition vectorielle de puissances.

P, Q, S et φ sont reliés par les relations suivantes :

$$P=S \cos\varphi \quad [I.7]$$

$$Q=S \sin\varphi \quad [I.8]$$

$$Q=P \tan\varphi \quad [I.9]$$

I.1-4 : Puissance dans un récepteur monophasé :

Sur la figure I.3 on a représenté un récepteur monophasé soumis à une tension alternative v et dans lequel circule un courant alternative i . φ est le déphasage entre la tension et le courant.

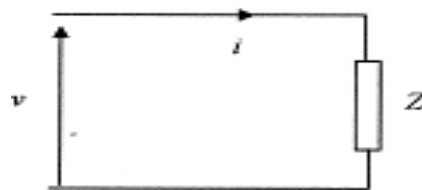


Figure. I.3 : Récepteur monophasé

$$v = V \sqrt{2} \sin\omega t \quad [I-10]$$

$$i = I\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi) \quad [I-11]$$

Avec V : valeur efficace de la tension ; I : valeur efficace du courant.

La puissance instantanée consommée par le récepteur Z est donnée par la relation suivante :

$$P = vi \quad [I-12]$$

En remplaçant v et i par leurs expressions respectives on obtient :

$$P =V \sqrt{2} \sin\omega t . I\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi) = 2 VI \sin\omega t .\sin(\omega t - \varphi) \quad [I-13]$$

Après développement à l'aide de relations trigonométriques, on obtient l'expression finale de la puissance installée qui est composée de deux termes :

$$P = \underbrace{VI\cos\varphi (1-\cos 2\varphi)}_1 - \underbrace{VI\sin\varphi\sin 2\omega t}_2 \quad [I-14]$$

La valeur moyenne du terme (1) représente la puissance active fournie par la source au récepteur.

Le deuxième terme a une valeur moyenne nulle ; c'est la composante qui caractérise par son amplitude l'échange de puissance réactive entre le récepteur et la source. Cet échange est

de nature fluctuante et s'effectue à la pulsation 2ω . Cette notion de puissance réactive apparaît lorsqu'il y a un déphasage entre la tension et le courant qui traverse le récepteur, c'est le cas des récepteurs comportant des condensateurs ou des inductances en régime sinusoïdale. L'apparition de la puissance réactive est due à la circulation d'un courant réactif qui ne donne lieu à aucun échange de puissance moyenne, ce courant peut être l'origine de pertes et de chutes de tension. En régime sinusoïdal, les puissances réactives produites et consommées se conservent au même titre que les puissances actives.

En ce qui concerne la puissance apparente, elle est surtout utilisée pour le dimensionnement des appareils et des machines. Contrairement aux puissances active et réactive, la puissance apparente ne se conserve pas.

I.1.5- Puissance dans un récepteur triphasé :

Sur la figure I.4 on a un récepteur triphasé symétrique qui est alimenté par un système de tensions triphasées équilibrées.

- Puissance active, égale à la valeur moyenne de la puissance instantanée soit :

$$P = 3VI\cos\varphi = \sqrt{3}UI\cos\varphi \quad [I-15]$$

Avec :

$$U = \sqrt{3}V : \text{tension composée.} \quad [I-16]$$

Puissance réactive : la somme des puissances fluctuantes des trois phases des systèmes est nulle, mais chaque phase séparément fait circuler une puissance réactive de valeur moyenne nulle et d'amplitude $VI\sin\varphi$. Donc il faut tenir compte de cette puissance qui est l'ensemble du système d'expression :

$$Q = \sqrt{3}UI\sin\varphi \quad [I-17]$$

$$Q = 3VI\sin\varphi \quad (\text{soit 3 fois la puissance d'une phase}) \quad [I-18]$$

Puissance apparente : A partir des deux autres puissances déjà vues on définit cette troisième puissance d'expression :

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [I-19]$$

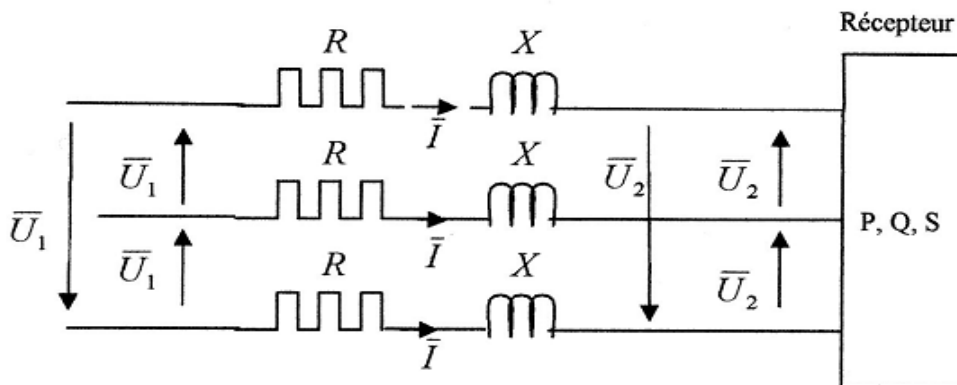


Figure I.4 : Elément de réseau triphasé symétrique.

Le tableau I.1 récapitule toutes les notions qu'on vient d'évoquer. Pour mieux comprendre, on a appliqué une même tension de forme $V_e^{j\theta}$ à des récepteurs de comportements différents (résistance, inductance et capacité). C'est l'impédance \bar{Z} du récepteur qui détermine la nature et le sens de la puissance.

Tableau I.1 : Bilan de puissance pour les différents récepteurs de base [ths I]

| Impédance (Z) en Ω | Puissance active (P) en kW | Puissance réactive (Q) en KVA | Energie (W) | Déphasage (φ) et facteur de puissance $\cos\varphi$ | Observation |
|--|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--|--|
| $\bar{Z} = R$ (résistance) | $P = RI^2$ | $Q = 0$ | $W = \frac{U^2 t}{R}$ | $\varphi = 0 \Rightarrow \cos\varphi = 1$ | Energie active dissipée |
| $\bar{Z} = jL\omega$ (inductance) | $P = 0$ | $Q = L\omega I^2$ | $W = \frac{1}{2} LI^2$ | $\varphi = +\frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos\varphi = 0$ | Energie réactive emmagasinée |
| $\bar{Z} = \frac{1}{jC\omega}$ (capacité) | $P = 0$ | $Q = -\frac{I^2}{C\omega}$ | $W = -\frac{1}{2} CU^2$ | $\varphi = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos\varphi = 0$ | Energie réactive fournie (par la charge) |

[Tableau I.1]

On constate que l'énergie réactive n'existe que lorsque le courant est déphasé par rapport à la tension. Le sens de l'échange de cette énergie dépend uniquement de la nature de l'impédance Z,

C'est à dire :

- La puissance réactive est nulle : aucun échange de puissance réactive entre la source et le récepteur. C'est le cas d'une impédance résistive qui consomme uniquement de la puissance active ; la tension et le courant sont en phase.
- Puissance réactive inductive : le récepteur absorbe une puissance réactive fournie par la source. C'est le cas d'une impédance purement inductive qui ne consomme aucune puissance active ; le courant est en retard de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension.
- Puissance réactive capacitive : le récepteur fournit une puissance réactive à la source. C'est le cas d'une impédance purement capacitive qui ne donne lieu à aucune puissance active; le courant est en cas avance de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension.

I.I.6-facteur de puissance :

I.I.6.1-Définition du facteur de puissance :

Le facteur de puissance est égal par définition à :

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{Puissance active}}{\text{puissance apparente}} \quad [\text{I-20}]$$

$$F_p = \frac{P(\text{kW})}{S(\text{kVA})} \quad [\text{I-21}]$$

Si les courants et tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal à \cos , c'est adire :

$$F_p = \cos \varphi = \frac{P(kW)}{S(kVA)} \quad [I-22]$$

On utilise également la variable tg , dans les mêmes conditions, nous avons également la relation:

$$F_p = tg \varphi = \frac{Q(kVar)}{p(kW)} = \frac{\text{Puissance réactive}}{\text{puissance active}} \quad [I-23]$$

On définit un facteur de puissance moyen dans un intervalle donné dans le cas où les grandeurs P et S ne sont pas constantes. On obtient alors le facteur de puissance en effectuant le rapport énergétique des puissances mesurées dans l'intervalle de temps correspondant :

$$F_{p_{moy}} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = (\cos \varphi)_{moy} \quad [I-24]$$

Ou

$$tg \varphi_{moy} = \frac{Q}{P} \quad [I-25]$$

Le facteur de puissance est une grandeur très utile qui permet d'évaluer la consommation ou l'apport en puissance réactive de l'élément mis en jeu. En effet, si le facteur de puissance est proche de 1, cette donnée nous permet de constater que l'élément étudié ne consomme pratiquement aucune puissance réactive, il ne consomme que de la puissance active. Contrairement, si le facteur de puissance est proche de 0, cela nous permet de constater que cet élément consomme uniquement de la puissance réactive. Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus grande qu'il se rapproche de 0.

Citons les valeurs approximatives de $\cos \varphi$ des principaux actionneurs consommateurs d'énergie réactive :

- moteur asynchrone à 100 % de charge : $\cos = 0.85$.
- moteur asynchrone à 50 % de charge : $\cos = 0.73$
- Lampe à incandescence : $\cos = 1$
- lampes à fluorescence : $\cos = 0.5$.
- chauffage par induction : $\cos = -0.5$.

Ces quelques exemples montrent l'importance de la partie réactive de la consommation énergétique des actionneurs qui comportent des circuits magnétiques.

I.I.6.2- Causes du mauvais facteur de puissance :

Dans une installation bien dimensionnée, un bon facteur de puissance est obtenu lorsque chaque machine consomme une puissance active proche de sa valeur nominale. Mais il reste toujours que cette installation consomme une certaine puissance réactive due au courant magnétisant des transformateurs et des moteurs asynchrones. Cette puissance est indépendante de la puissance active consommée par les éléments de l'installation. Maintenant, le mauvais facteur de puissance est obtenu lorsque la puissance active absorbée diminue, c'est - a - dire que les éléments de l'installation consomment des puissances actives loin de leurs valeurs nominales. Donc $\cos \varphi$ diminue, ce qui risque de pénaliser le consommateur.

En pratique, un mauvais facteur de puissance est souvent le résultat d'une mauvaise utilisation du matériel. C'est le cas des exemples suivant :

- Un fonctionnement à faible charge ou à vide d'un transformateur.
- Un fonctionnement à niveau de tension d'alimentation élevé ou à des marches à vide ou à faibles charges pour les moteurs asynchrones.
- Une mauvaise conception de l'éclairage fluorescent.

I.2- Transit de la puissance réactive et ses effets :

La puissance réactive transite entre la source (générateurs) et les récepteurs (charges) à travers les réseaux de transport d'énergie électrique. Les effets de transit de la puissance réactive à travers les lignes de transmission peuvent se manifester sous forme de pertes joule et de chutes de tension. Donc, il faut tenir compte de ce phénomène qui peut rendre le rendement médiocre et causer des augmentations d'investissements.

I.2.1- Pertes joule :

Pour déterminer les pertes joule (P_j) engendrées par le transit d'une puissance réactive Q , on se propose d'étudier le réseau monophasé figurant sur le schéma de la figure I.5.

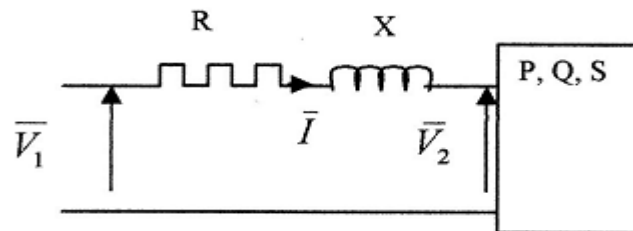


Figure I.5 : réseau monophasé

Le réseau considéré est représenté par une résistance R en série avec une inductance X . L'ensemble fournit une puissance active P et échange une puissance réactive Q avec un récepteur monophasé. Le courant qui circule dans le réseau est de valeur efficace I égale :

$$I = \frac{S}{V_2} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V_2} \quad [I.26]$$

V_2 : Valeur efficace de la tension aux bornes du récepteur.

S : Puissance apparente consommée par le récepteur.

La puissance absorbée par la résistance R est transformée en chaleur. C'est par définition les pertes joule engendrées par le transport de la puissance à travers cette résistance. Ces pertes sont d'expression :

$$P_j = R \cdot I^2 = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2 \varphi)}{V_2^2} \quad [I.27]$$

$$P_j = \frac{RP^2}{V_2^2} + \frac{RP^2 tg^2 \varphi}{V_2^2} \quad [I.28]$$

Une partie des pertes joule $\left(\frac{RP^2 tg^2 \varphi}{V_2^2} \right)$ est occasionnée par le transit de la puissance réactive.

Le même principe appliqué à un réseau triphasé va donner les résultats suivants :

$$P_j = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad [I.29]$$

En remplaçant la valeur efficace du courant par :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_2} \quad [I-30]$$

On obtient alors :

$$P_j = 3.R. \left[\frac{S}{\sqrt{3}U_2} \right]^2 = \frac{3.R(p^2+Q^2)}{3U_2^2} = \frac{RP^2(1+tg^2\varphi)}{U_2^2} \quad [I-31]$$

$$P_j = \frac{3.RP^2}{U_2^2} + \frac{RP^2tg^2\varphi}{U_2^2} \quad [I-32]$$

La partie des pertes joules qui est occasionnée par le transit de la puissance réactive est le terme $\left(\frac{RP^2tg^2\varphi}{U_2^2} \right)$.

Visiblement, le transit de la puissance réactive engendre des pertes joules considérables, d'où la nécessité de réduire au mieux le transport de cette puissance indispensable pour le fonctionnement des machines.

I.2.2- Chute de tension :

Considérant maintenant sur la figure I.6 le schéma équivalent d'une ligne de transmission, d'impédance complexe $\underline{Z} = R+jX$, et destinée à alimenter la charge \underline{Z}_C . La tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance :

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad [I-33]$$

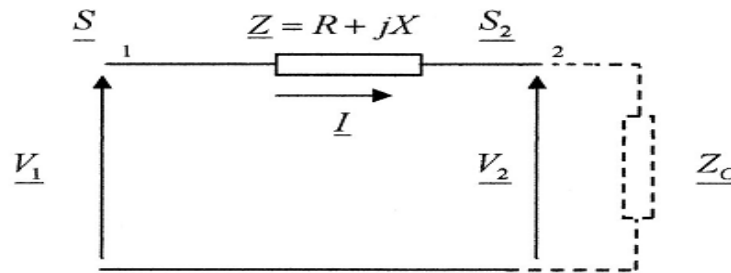


Figure I.6- schéma équivalent d'une ligne de transport.

Les puissances apparentes :

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 \quad [I-34]$$

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad [I-35]$$

La relation qui relie les tensions est donnée par :

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_2 + R\underline{I} + jX.\underline{I} \quad [I-36]$$

Le diagramme vectoriel des tensions est représenté sur la figure I.7.

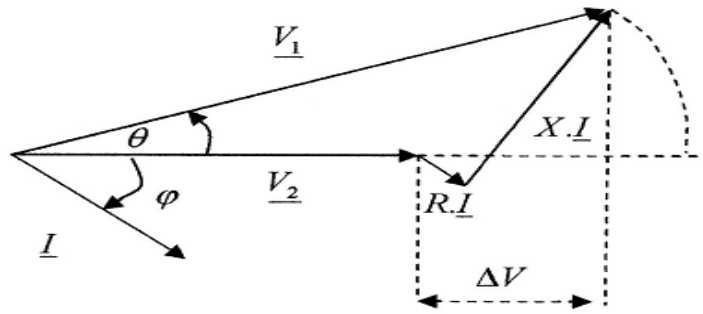


Figure I.7 : Diagramme vectoriel des tensions.

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme des tensions conduit à assimiler la chute de tension ΔV à :

$$\Delta V = V_1 \cos \varphi - V_2. \quad [I-37]$$

L'angle de transport étant petit (réseau peu chargé), si φ désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité réceptrice 2, on peut écrire, pour un réseau monophasé :

$$\Delta V = R.I \cos \varphi + X.I \sin \varphi \quad [I-38]$$

$$\Delta V = R.I \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + X.I \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi \quad [I-39]$$

$$\Delta V = \frac{R.P_2 + X.Q}{V_2} \quad [I-40]$$

En considérant pour un réseau triphasé, un réseau, U , la tension composée correspondante à V , P et Q les transits triphasés de puissances, on obtient l'écart relatif de tension :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2} \quad [I-41]$$

Pour les lignes de transport (THT et HT), nous pouvons supposer que $R \ll X$ ($R \rightarrow 0$). L'écart de tension entre deux points de réseau sera réduit à :

$$\Delta V = \frac{X.Q}{U} \quad [I-42]$$

Cette dernière relation montre bien que la chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par la charge.

I.2.3-Coté économique :

Le transit de l'énergie réactive à travers les réseaux de transport n'arrange pas les investisseurs. Etant donné que le courant admissible traversant le réseau est limité par les échauffements thermiques, tout transit de puissance réactive conduira à une diminution du transport de la puissance active. Pour satisfaire une même consommation de puissance active, il faut donc augmenter la capacité des matériaux utilisés ou leurs nombre, ce qui conduira inévitablement à une augmentation des investissements.

I.3- Principe de la compensation d'énergie réactive :

Les réseaux de transport et d'interconnexion en très haute tension (THT) et haute tension (HT) assurent la liaison entre les centres de production d'énergie électrique et les grandes

zones de consommation. Ils permettent d'acheminer l'énergie électrique là où elle est consommée à tout instant.

Nous avons vu précédemment [paragraphe I.2] que le transit de la puissance réactive est à l'origine des pertes joules et des chutes de tension occasionnées lors du transport de l'énergie électrique. Ce qui impose de réduire le transport de la puissance réactive. Mais d'autre part, cette puissance est indispensable pour faire fonctionner les machines et les transformateurs.

Donc, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près de la demande et en conséquence, compenser l'énergie réactive permet de :

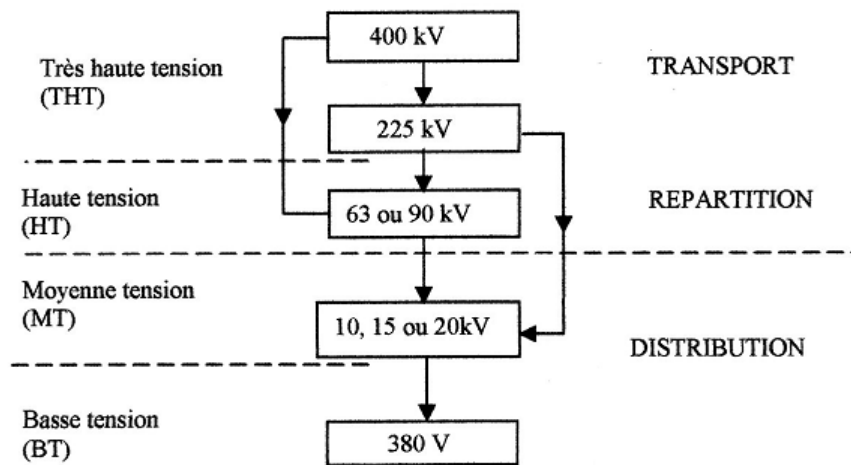
- Réduire les chutes de tension.
- Réduire les pertes joules.
- Éviter le surdimensionnement des réseaux.
- Permettre de transporter plus de puissance.

I.4- Compensation de l'énergie réactive des réseaux de transport :

I.4.1- Tension de service et limites de tensions admissibles :

I.4.1.1- Tensions de service :

Différents niveaux de tension caractérisent les réseaux de transport et de distribution. L'alimentation de la clientèle en énergie électrique se fait en général à travers quatre niveaux de tension comme le montre la figure I.8 représentant les différentes plages de tension de service du réseau EDF.



- La chaîne 400KV-250KV- HT-MT-BT est la plus répandue à EDF.
- La transformation 400KV-HT se rencontre dans quelques postes.
- La transformation 250KV-MT est réservée aux zones à forte densité de consommation (zones urbaines).

Figure I.8 : Plages de tension de service des réseaux d'EDF

Les niveaux de tension requis pour de tels réseaux sont :

- 400 ou 225 kV, pour les réseaux de transport à très haute tension THT.
- 90 ou 63 kV, pour les réseaux de répartition à haute tension HT.

- 10,20 ou 15 et exceptionnellement jusqu'au 33 kV, pour les réseaux de distribution à moyenne tension MT.
- 220 ou 380 V, pour les réseaux de distribution à basse tension.

Les réseaux de transport et de répartition présentent des niveaux de tension très élevés et leurs caractéristiques seront forcément différentes de celles qui caractérisent les réseaux de distribution qui ont des niveaux de tension relativement bas. On distingue alors :

Caractéristiques des réseaux de transport et de répartition :

- Présence de groupes de production, raccordés pour la plus part au réseau THT, et qui constituent les sources de tension grâce aux forces électromotrices des alternateurs.
- Absence de clients raccordés directement au réseau HT, uniquement à travers des transformateurs propres, ce type de consommateur dispose souvent de moyens de réglage de la tension sur leurs installations.
- Les réseaux THT et HT sont caractérisés par une structure maillée.
- Pertes et chutes de tension occasionnées essentiellement par le transit de la puissance réactive.
- Sur les réseaux de transport et de répartition, on fait la compensation afin de réduire au minimum le transit de la puissance réactive et d'avoir un plan de tension aussi haut que possible ce qui va limiter les pertes joule tout en tenant compte de la tenue des matériaux (lignes, câbles, transformateurs)

Caractéristiques des réseaux de distribution :

- Absence de groupes de production.
- Présence de clientèle raccordée directement au réseau basse tension.
- Les réseaux de distribution sont caractérisés par une structure arborescente.
- Les pertes et les chutes de tension sont essentiellement occasionnées par le passage de la puissance active.
- Sur les réseaux de distribution, l'objectif de la compensation est de maintenir la tension aussi proche que possible de la valeur admissible en vue des réaliser une bonne utilisation des équipements électriques.

Sur les réseaux haute tension (HT), il existe des sommets à tension tenue, et c'est le cas des sommets comportant des postes ou sont raccordés des groupes de production, qui en effet peuvent maintenir la tension constante aux bornes des alternateurs ; c'est le cas des secondaires des transformateurs THT/HT dont la tension peut être maintenue sensiblement constante grâce à l'action des régulateurs en charge.

La tension en tout autre sommet du réseau n'est autre que du sommet à tension tenue, diminue des chutes de tension à travers les lignes de transmission. Sur les réseaux THT et HT, ces chutes de tension sont principalement dues au transit de la puissance réactive. Donc pour contrôler la tension en ces sommets, il faut contrôler la cause qui donne naissance aux variations de cette tension.

C'est à dire, contrôler le transit de l'énergie réactive, ce qui s'obtient par une localisation et une utilisation appropriée des moyens de compensation de cette énergie qui sont essentiellement des condensateurs et des inductances. Ainsi grâce à des condensateurs installés dans les postes HT/MT, le transit de la puissance réactive sur les réseaux de transport sera réduit par une compensation d'une grande partie de la consommation des charges. D'autre part grâce aux groupes ou inductances raccordées aux réseaux THT, les pertes ou productions réactives dans les ouvrages (lignes, câbles, transformateurs) seront compensées.

I.4.1.2- Limites de tensions admissibles :

En chaque point du réseau, il existe certaines valeurs de tension dites admissibles qui ne doivent pas être franchies, c'est le principe de la tenue en tension qui doit être sérieusement respecté. Ces valeurs limites de tension sont fixées à partir des caractéristiques des matériels utilisés, des conditions contractuelles d'alimentation des consommateurs raccordés au réseau HT et du domaine de fonctionnement des régleurs en charges des transformateurs THT/HT et HT/MT.

-a – Limites dues aux caractéristiques des équipements :

La tension est parmi les paramètres les plus importants pris en compte lors du dimensionnement des matériels constituant le réseau (lignes, câbles, transformateurs.....).

Ces matériels sont conçus pour fonctionner uniquement dans une plage de tension bien déterminée :

- Pour les réseaux THT 400 kV la limite est fixée à 420 kV.
- Pour les réseaux THT 225 kV la limite est fixée à 245kV.
- Pour les réseaux HT 90 kV la limite est fixée à 100 kV.
- Pour les réseaux HT 63 kV la limite est fixée à 72.5 kV.

Ces tensions admissibles doivent être respectées car elles sont imposées par la tenue diélectrique des isolants, et le non respect de ces limites conduira à un vieillissement accéléré des équipements.

- b- Limites dues au cahier des charges de la concession du réseau d'alimentation général en énergie électrique :

Lors des livraisons de contrats d'exploitation d'énergie électrique, il existe des valeurs limites de tension qui sont imposées par le cahier des charges. Si nous prenons le réseau français pour exemple on trouve que dans le cahier des charges, la tension de service mesurée en un point donné ne doit pas s'éloigner de la valeur contractuelle de $\pm 8\%$ pour les réseaux de tension entre 60 KV à 90 KV.

- c- Limites dues au domaine de fonctionnement des régleurs en charge des transformateurs THT/HT et HT/MT :

Compte tenu des plages de variations du rapport de transformation des transformateurs et des valeurs admissibles des tensions coté secondaire, les tensions cotés primaire doivent être compatibles avec ces limites. C'est pour cette raison que dans les réseaux français, les limites

inferieures de tension sont fixées à 225 kV et 200 kV respectivement pour les réseaux de tension nominale de 400 kV et 300 kV [doc II]

- d- Limites dues aux contraintes techniques d'exploitation :

Ces limites doivent satisfaire les contraintes techniques d'exploitation. Pour les réseaux français, ces limites sont formulées en plages de tensions admissibles comme suit :

- Réseaux de 400 kV, la plage de tension admissible est [365,450] kV.
- Réseaux de 225 kV, la plage de tension admissible est [200,245] kV.
- Réseaux de 90 kV, la plage de tension admissible est [83,97] kV.
- Réseaux de 63 kV, la plage de tension admissible est [58,68] kV.

En pratique :

Pour les réseaux de transport, l'exploitant doit maintenir la tension dans la plage admissible en s'efforçant d'obtenir une tension élevée, afin de réduire les pertes et d'augmenter la marge de sécurité de fonctionnement du réseau.

Pour les réseaux de distribution, on cherche à maintenir la tension le plus près possible de la tension nominale pour la majorité des consommateurs car d'autant plus on s'en éloigne des valeurs nominales, le rendement est plus faible. Pour y parvenir, on équipe les transformateurs abaisseurs qui alimentent les réseaux de distribution de régleurs en charge.

I.4.2- Description de l'instabilité en réseau :

On dit qu'un réseau d'énergie électrique est stable en tension dans des conditions d'exploitation données, lorsque suite à une perturbation petite, les tensions près des points de consommateurs après perturbation sont assimilables aux tensions d'avant perturbation.

Tout état différent de l'état stable est dit instable. L'instabilité en tension est due au fonctionnement des régleurs en charge lorsque la tension du réseau diminue au-dessous d'une certaine valeur critique. Ce phénomène se produit lorsque le réseau est très chargé, en raison des chutes de tension occasionnées par le transit des puissances active et réactive.

I.4.2.1- Puissance maximale transmissible et tension critique.

En plus des limites en tension imposées lors de l'exploitation de l'énergie électrique, il existe une limite de puissance maximale transmissible qui doit être respectée convenablement. Dans le cas du non respect de cette limite, les chutes de tension provoquée par le transit de cette puissance seront si importantes que le réseau ne pourra plus satisfaire la demande.

Pour permettre en évidence ce phénomène, on se propose de faire une représentation par dipôle du réseau électrique.

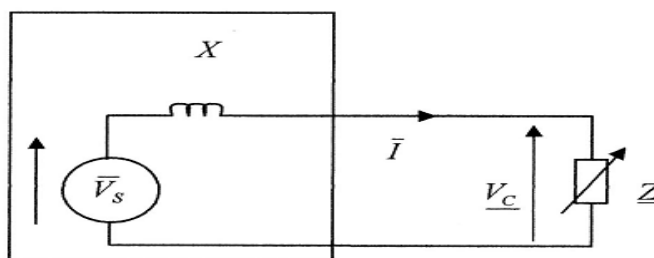


Figure I.9- représentation par un dipôle d'un réseau électrique

Le système considéré sur la figure I.9 a une impédance de charge $\underline{Z} = Z|\varphi$, de déphasage φ raccordée à une source de tension V_s à travers un réseau assimilable à une réactance X .

En appliquant la loi d'ohm, les équations électriques de la charge s'écrivent alors :

- Courant :

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{X^2 + Z^2 + 2XZ \sin \varphi}} \quad [I-43]$$

- Tension :

$$V_c = \frac{V_s}{\sqrt{\frac{X^2}{Z^2} + 1 + 2\frac{X}{Z} \sin \varphi}} \quad [I-44]$$

- Puissance :

$$P_c = V_c I \cos \varphi = \frac{V_s^2 \cos \varphi}{\frac{X^2}{Z} + Z + 2X \sin \varphi} \quad [I-45]$$

En supposant que le déphasage φ et la réactance X , Z_c étant une charge variable. On peut alors avoir, le maximum de puissance active transmise par la source à la charge pour $Z = X$, ce qui donne :

$$P_{max} = P_c (z=x) = \frac{V_s^2 \cos \varphi}{2X(1 + \sin \varphi)} \quad [I-46]$$

Sur la figure I-10, les équations de tension, courant et puissance active de la charge sont représentées par leurs courbes respectives en fonction de l'admittance $Y = \frac{1}{Z}$ [I-47]

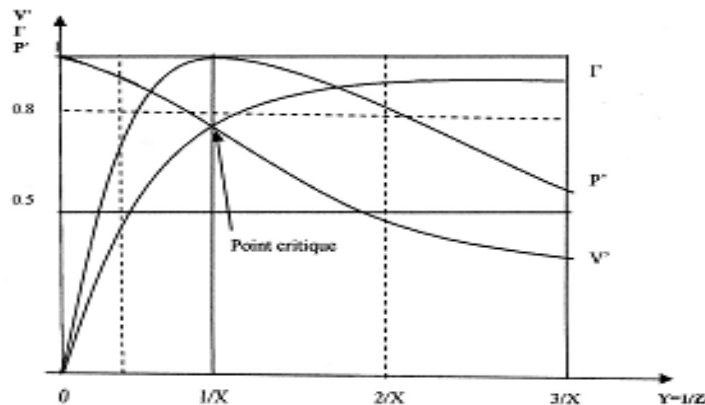


Figure I.10 : variation des grandeurs I , V et P de la charge en fonction de Y [docII]

A première vue, on remarque qu'au départ, l'évolution de la courbe de puissance est croissante, le courant aussi croît en même temps par l'augmentation de l'admittance, ce qui fait diminuer l'impédance Z . après, on constate que la courbe de puissance est de moins en moins croissante et qu'elle atteint son maximum pour $Y = \frac{1}{X}$. A partir de ce maximum, la courbe de puissance décroît en raison des importantes chutes de tension dans le réseau, et qui sont dues au fort appel de courant, cela veut dire que la diminution de V_c ne peut plus être compensée par l'augmentation du courant dans l'expression de P_c .

Pour le point maximum de puissance active, la tension aux bornes de la charge est dite critique d'expression :

$$V_{crit} = \frac{V_s}{\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \quad [I-52]$$

La puissance maximale peut s'écrire alors en fonction de cette tension :

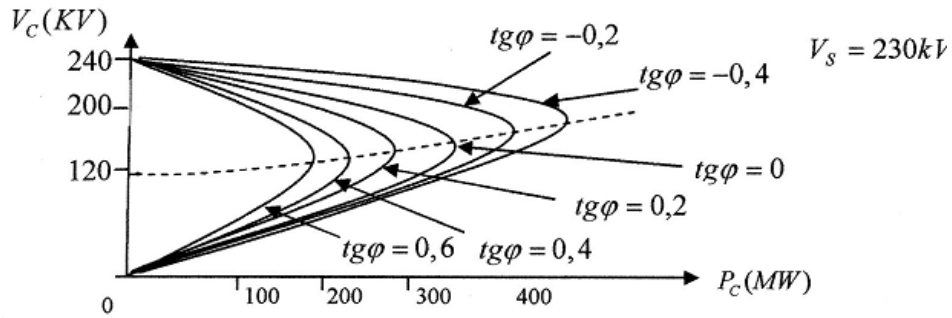
$$P_{max} = P_c (z=x) = \frac{V_s^2 \cos\varphi}{2X(1+\sin\varphi)} = \frac{V_{crit}^2}{X} \cos\varphi \quad [I-53]$$

I.4.2.2- phénomène d'écroulement de la tension :

En pratique, la diminution de l'impédance de charge peut être le résultat soit d'une augmentation de la consommation de puissance, soit après la mise en action du régleur en charge du transformateur pour modifier le rapport de transformation afin d'élever la tension de la charge. En effet, quand la tension aux bornes de la charge baisse, pour la relever, le régleur en charge entre en action pour changer le rapport de transformation ; cette baisse d'impédance engendre des chutes de tension supplémentaires du côté primaire. Au côté secondaire, deux actions à effets inverses arrivent en même temps : La première a l'effet d'une augmentation de tension provoquée par le changement de prise du régleur et la deuxième a l'effet d'une baisse de tension coté primaire provoquée par les chutes de tension.

Si la tension du primaire, malgré la diminution reste supérieure à la tension critique, l'effet du changement de prise prédomine et la tension de la charge sera augmentée. Par contre, si cette tension inférieure à la tension critique, l'action du régleur ne pourra pas compenser la baisse de tension du côté primaire ; le régleur continu, alors à agir entraînant des chutes de tension de plus en plus importantes ; c'est le phénomène d'écroulement du plan de tension.

Les grandeurs, tension et de la puissance transmissible, peuvent également être représentées par les courbes des figures I.11, qui donnent l'évolution de la tension de la charge en fonction de la puissance transmise.



a- Courbes de tension de charge pour des $tg\phi$ différents en fonction de la puissance transmise.

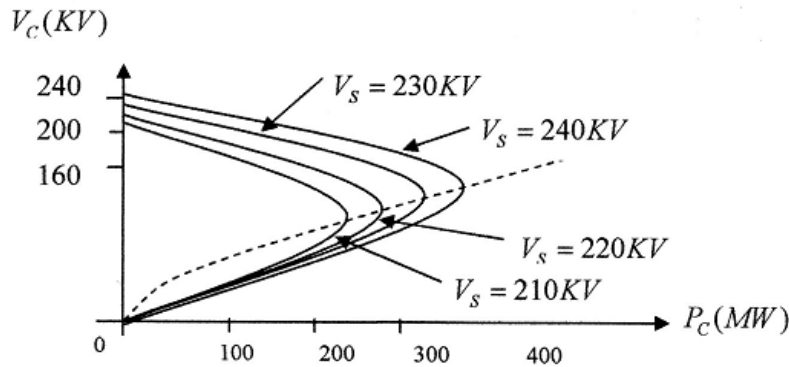


Figure I.11 : Tension de charge à l'extrémité d'une ligne 225 kV en fonction de la puissance active transmise.

Les courbes (b) de la figure I.11 montrent bien l'intérêt de transporter la puissance active à tensions élevées, et les courbes (a) mettent en évidence l'intérêt d'une compensation sa $tg\phi < 0$ des charges afin d'augmenter la puissance maximale transmissible. Sur les deux figures, seules les parties des courbes situées en haut des points critiques tracés en tirés correspondent au fonctionnement stable du réseau.

I.4.3- Origine des fluctuations de la demande d'énergie réactive :

A cours du temps, la circulation d'énergie réactive sur les lignes THT et HT est de nature fluctuante. Cette consommation irrégulière de puissance réactive est due, d'une part à la nature même des charges connectées aux réseaux HT/MT, et d'autre part à la participation des ouvrages (lignes, câbles, transformateurs) constituant le réseau à l'absorption ou à la production de la puissance réactive. Cela défavorise l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie réactive et rend difficile le respect des contraintes techniques d'exploitation.

Les origines de ces fluctuations sont récapitulées en ce qui suit :

I.4.3.1- Consommation des charges :

Les fluctuations de charge peuvent être classées en trois catégories de variations :

- a- **Variations périodiques** : Ces variations sont dues à la consommation de la puissance active par charges et de leur $tg\phi$ qui varie sensiblement dans la journée. Ces fluctuations périodiques sont nombreuses et de différentes fréquences : on peut citer

les variations saisonnière (été, hiver), hebdomadaire (jour ouvrables ou de repos) ou journalières (matin, heure de pointe, soir).

Exemple :

En France, $\text{tg}\varphi$ vue du réseau 250 kV est de l'ordre de 0,5 à 0,6 à l'heure de pointe, tandis qu'aux heures creuses il est de l'ordre de 0,3 à 0,4, ce qui se traduit par l'écart de consommation de 14000 MVAR entre la pointe et le creux d'un jour d'hivers à l'horizon 1990.[doc II]

- b- **Variations aléatoires lentes :** Ce sont les résultats des connexions ou déconnexions des charges alimentées par le réseau. Comme la mise en marche des charges dépend uniquement des consommateurs, ce type de variations est très aléatoire et peu prévisible.
- c- **Variations brusques :** Elles sont dues au fonctionnement irrégulier de certains appareils comme le four à arc et les machines de traction ferroviaire alimentés par le réseau HT.

I.4.3.2- Pertes réactives dans les réseaux de transport :

Sur la figure I.11 on a représenté un élément AB d'un réseau électrique par une impédance \underline{Z} en parallèle avec une capacité C. Ces deux paramètres sont les équivalents des éléments (transformateurs, lignes, câbles) constituant ce segment du réseau.

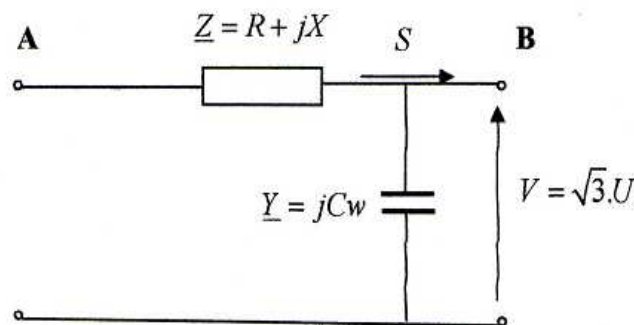


Figure I.11 : Représentation schématique d'un élément AB de réseau. [doc II]

Le bilan de puissance réactive pour le segment AB de réactance $X = Lw$ et de capacité C donne

$$Q = CwU^2 - Lw \frac{S^2}{U^2} \quad [\text{doc II}] \quad [\text{I-54}]$$

Avec : S puissances apparente transportée.

U tension composée.

- Les transformateurs absorbent toujours de l'énergie réactive, donc $C \approx 0$.
- Les lignes et les câbles ont une certaine valeur caractéristique de puissance apparente transportée pour laquelle le bilan réactif s'annule, elle s'écrit alors :

$$S_c = U^2 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad [\text{doc II}] \quad [\text{I-55}]$$

Cette quantité marque la limite entre un ouvrage consommateur ou producteur de puissance réactive, c'est-à-dire que si la puissance transporté est supérieure à S_c , l'ouvrage absorbe de l'énergie réactive. Contrairement, si la puissance transportée est inférieure à S_c , l'ouvrage fournit du réactif.

Pour les câbles, le terme $C_w U^2$ est dominant dans l'expression de [I-54], donc ils fournissent toujours de l'énergie réactive. Pour les lignes, la puissance caractéristique S_c , correspond à une charge moyenne comme c'est montré sur le tableau I.2 et la figure I.12.

Tableau I.2 : Pertes réactive et puissance caractéristique de quelques lignes et câbles. [ths I]

| Liaisons : | Puissance réactive fournie à vide en KVAR/Km | Puissance réactive absorbée à puissance maximale en K VAR/Km | Puissance maximale admissible en régime permanent l'hiver en MVA | Puissance Caractéristique en MVA |
|---------------|--|--|--|----------------------------------|
| Aériennes : | | | | |
| 63 kV | 12 | 400 | 85 | 10 |
| 225 kV | 130 | 1 400 | 425 | 130 |
| 400 kV | 600 | 9 000 | 2 350 | 550 |
| Souterraines: | | | | |
| 63 kV | 320 | 400 | 120 | 100 |
| 225 kV | 4 500 | 140 | 240 | 1 500 |

On voit que l'énergie réactive dans les réseaux subie des variations lors de son transport, elle peut être fournie ou absorbé, ces deux actions dépendent en fait des transits de puissance. Pour le cas des réseaux THT 400 et 225 kV, ces variations de puissances sont :

- Variations périodiques : Elles sont dues aux variations de la consommation et de la localisation des centrales utilisées pour répondre à la demande. Elles sont en relation directe avec les transits de puissance dans les ouvrages, tel que : pour un réseau français de 400 et 250 kV, les pertes en énergie réactive représentent une absorption de 2400 MVAR en heure pointe et une fourniture de 600 M VAR en heure creuses pour un jour ouvrable de l'hiver 1990. [doc II]
- Variations aléatoires brusques : Elles sont le résultat d'importantes modifications imprévues des transits causées par des incidents sur le réseau. Lors de ces modifications, les écarts en énergies réactive peuvent atteindre 1200 M VAR en cas de pertes d'un groupe et 500 M VAR en cas de perte d'une ligne. [doc II]

La figure I.12 met en évidence l'état d'absorption ou de fourniture d'énergie réactive d'une ligne de transport en fonction de la puissance apparente transmise. On voit que une puissance transitée supérieure à la puissance caractéristique, la ligne absorbe de l'énergie réactive et pour une puissance transitée inférieure à la puissance caractéristique, elle fournit de l'énergie réactive.

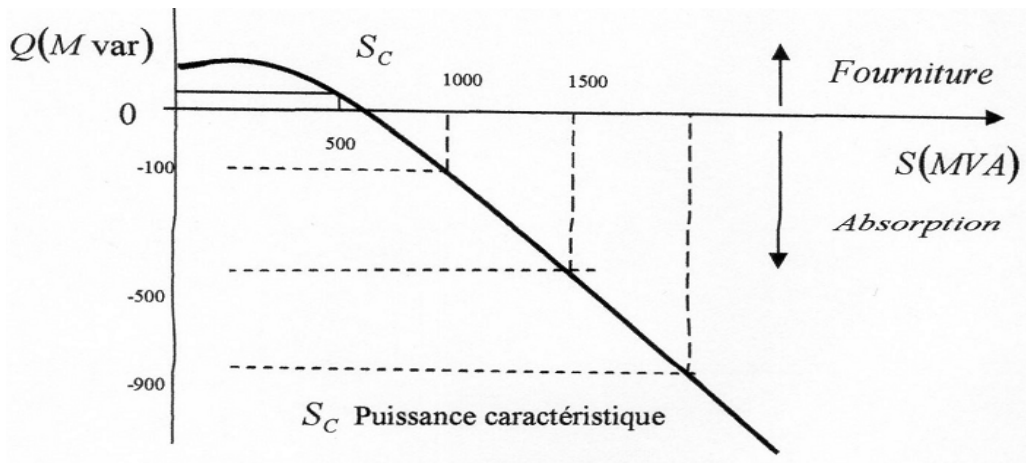


Figure I.12 : Pertes réactives d'une ligne 400 kV de 100 km de longueur. [doc II]

I.4.4- Dispositifs de compensation de l'énergie réactive :

L'irrégularité de la consommation d'énergie réactive par les charges provoque des fluctuations de tension qui peuvent être très nuisibles. Ces variations de la demande d'énergie réactive montrent que le problème d'adaptation de l'offre à la demande présente deux aspects qui nécessitent l'utilisation de deux types de moyens différents :

- Un moyen à action discontinue, ayant un temps de réponse relativement long pour faire face aux fluctuations périodiques, telles les batteries de condensateurs et les inductances.
- Un moyen à temps de réponse très court pour faire face aux variations brusques et aléatoires, tels les compensations statiques ou synchrones.

I.4.4.2- Batteries de condensateurs :

a- Présentation :

Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans les réseaux publiques. Les moteurs synchrones peuvent également fournir de l'énergie réactive mais leur fonction principale, la force motrice, n'est pas toujours compatible avec la demande instantanée de puissance réactive.

Les batteries de condensateurs fournissent une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels :

- **Batteries de condensateurs HT** : raccordées aux jeux de barres HT/MT des postes THT/HT, leur rôle essentiel est de compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT .mais une partie d'entre elles participent également à la compensation des charges ; leur puissance est de l'ordre de 20 à 30 MVAR et représente environ 20% du parc de condensateurs installés [doc II]
- **Batteries de condensateurs MT**, raccordées aux jeux de barres HT/MT des postes ou HT/MT ou THT/MT ; leur rôle principal est de compenser l'appel total de l'énergie

réactive fait par les réseaux de distribution aux réseaux de transport ; en fonction du réglage de la tension de la MT, leur installation et dimensionnement sont fait individuellement pour chaque cas. En pratique, les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins de 2,4 ou 3 M Var , chaque gradin à sa propre commande et l'ensemble dépend de la puissance des transformateurs HT/MT auxquels ils sont raccordés. Le dimensionnement de la taille des gradins est fait de manière à limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barres MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt. Dans ce qui suit, nous allons donner ces deux types d'installation :

b - Installation série :

L'installation des batteries de condensateurs en série permet de compenser les chutes de tension sur les longues lignes de transport d'énergie réactive (THT et HT). En diminuant la réactance effective de la ligne, la capacité de transit de la puissance active peut être augmentée en diminuant les chutes de tension.

Considérons les calculs de la puissance de la batterie de condensateur à installer afin de compenser la chute de tension sur un réseau. La figure I.13 montre un modèle de réseau sur lequel un condensateur série est installé.

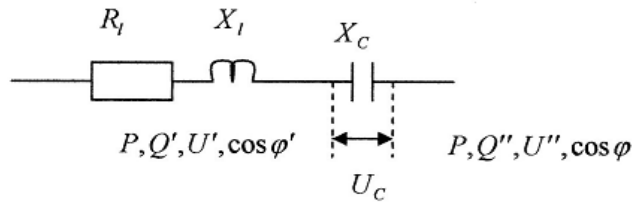


Figure I.13. Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur série

La puissance active P est considérée constante avant et après le condensateur, par contre les paramètres Q', U' et $\cos \varphi'$ sont considérés à l'amont, Q'', U'' et $\cos \varphi$ à l'aval du condensateur.

Nous avons alors :

$$P = \sqrt{3}U'.\cos \varphi'.I \text{ de l'amont.} \quad [I.56]$$

$$P = \sqrt{3}U''.\cos \varphi.I \text{ de l'aval.} \quad [I.57]$$

$$\frac{p}{P} = \frac{U'.\cos \varphi'}{U''.\cos \varphi} \Rightarrow \cos \varphi = \frac{U'}{U''} \cos \varphi' \quad [I.58]$$

$$\operatorname{tg} a = \frac{\sqrt{1-\cos^2 a}}{\cos a} \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi' = \frac{\sqrt{1-\cos^2 \varphi'}}{\cos \varphi'} = \frac{\sqrt{U'^2-U''^2 \cos \varphi}}{U'' \cos \varphi} \quad [I.59]$$

Avec a , angle quelconque

La puissance compensée est de :

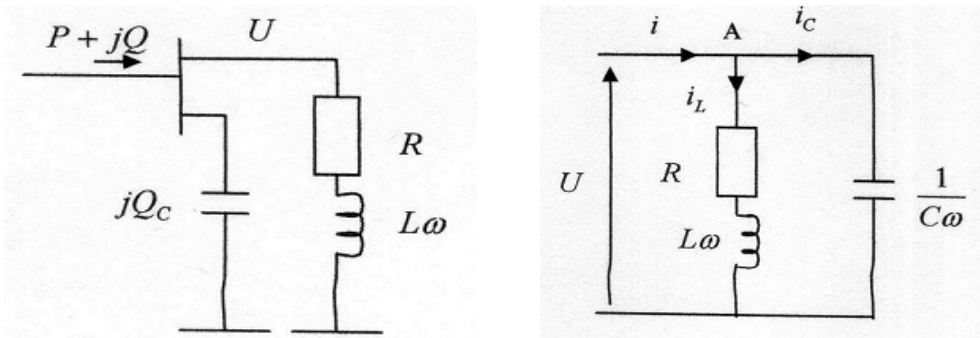
$$Q_c = Q' - Q'' = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \quad [\text{I.60}]$$

$$= P \left[\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} - \frac{\sqrt{U'^2 - U''^2 \cos^2 \varphi}}{U' \cos \varphi} \right] \quad [\text{I.61}]$$

$$Q_c = \frac{P}{\cos \varphi} \left[\sin \varphi - \sqrt{1 - \left(\frac{U''}{U'}\right)^2 \cos^2 \varphi} \right] \text{ (puissance apparente)} \quad [\text{I.62}]$$

c – Installation shunt :

Considérons maintenant le schéma de la figure I.14 qui représente un jeu de barres de puissance ($P+jQ$) alimentant une charge à travers une ligne, les deux sont représentées par une seule impédance ($R+jL\omega$). La charge est supposée de mauvais facteur de puissance, d'où l'installation d'une batterie de condensateurs shunt de puissance (jQ_c)



Jeu de barres alimentant une charge
Composée par un condensateur shunt

b- schéma équivalent du système (a)

Figure I.14 : Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre.

L'objectif voulu par l'installation du condensateur est d'alimenter le facteur de puissance de la charge. Pour vérifier, calculons le facteur de puissance d'avant et d'après compensation :

- Avant compensation :

Nous avons au nœud A de la figure I.14.b :

$$i = i_L + i_c \quad [\text{I.63}]$$

Avant compensation, le condensateur n'est pas encore entré en action, donc :

$$i_c = 0 \quad [\text{I.64}]$$

Et

$$I = i_L = I_m \angle -\varphi_1 \quad [\text{I.65}]$$

$$= I_m \cos\varphi_1 - j I_m \sin\varphi_1 \quad [\text{I.66}]$$

D'où

$$\varphi_1 = -\arctg \left(\frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1} \right) \quad [\text{I.67}]$$

Le facteur de puissance d'avant compensation vaut alors :

$$\cos\varphi_1 = \cos \left[-\arctg \left(\frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1} \right) \right] \quad [\text{I.68}]$$

- **Après compensation :**

$$i = i_L + i_C \quad [\text{I.69}]$$

avec:

$$i = I_m \angle -\varphi_2 ; \quad i_L = I_{mL} \angle \varphi_1 \quad i_C = I_{mC} \angle +\frac{\pi}{2} \quad [\text{I.70}]$$

Donc :

$$I_m \angle -\varphi_2 = I_{mL} \angle -\varphi_1 + I_{mC} \angle +\frac{\pi}{2} \quad [\text{I.71}]$$

$$I_m \cos\varphi_2 - j I_m \sin\varphi_2 = I_{mL} \cos\varphi_1 - j I_{mL} \sin\varphi_1 + j I_{mC} \quad [\text{I.72}]$$

$$= I_{mL} \cos\varphi_1 + j(I_{mC} - I_{mL} \sin\varphi_1) \quad [\text{I.73}]$$

$$\varphi_2 = -\arctg \left(\frac{\sin\varphi_2}{\cos\varphi_2} \right) = \arctg \left[\frac{I_{mC} - I_{mL} \sin\varphi_1}{I_{mL} \cos\varphi_1} \right] \quad [\text{I.74}]$$

$$= \arctg \left[\frac{I_{mC} - I_{mL} \sin\varphi_1}{I_{mL} \cos\varphi_1} \right] \quad [\text{I.75}]$$

$$= -\arctg \left[\frac{\sin\varphi_1 - \frac{I_{mC}}{I_{mL}}}{\cos\varphi_1} \right] \quad [\text{I.76}]$$

Le facteur de puissance après compensation vaut alors :

$$\cos \varphi_2 = \cos \left\{ \arctg \left[\frac{\sin \varphi_1 - \frac{I_{mC}}{I_{mL}}}{\cos \varphi_1} \right] \right\} \quad [I.77]$$

On voit bien que :

$$\varphi_2 (\text{après comp}) < \varphi_1 (\text{avant comp}) \Rightarrow \cos \varphi_2 (\text{après comp}) > \cos \varphi_1 (\text{avant comp}) \quad [I.78]$$

Donc, le facteur de puissance est amélioré par l'installation du condensateur shunt.

Pour déterminer la puissance du condensateur, référent – nous à la figure I.15 représentant les diagrammes vectoriels des différents courants.

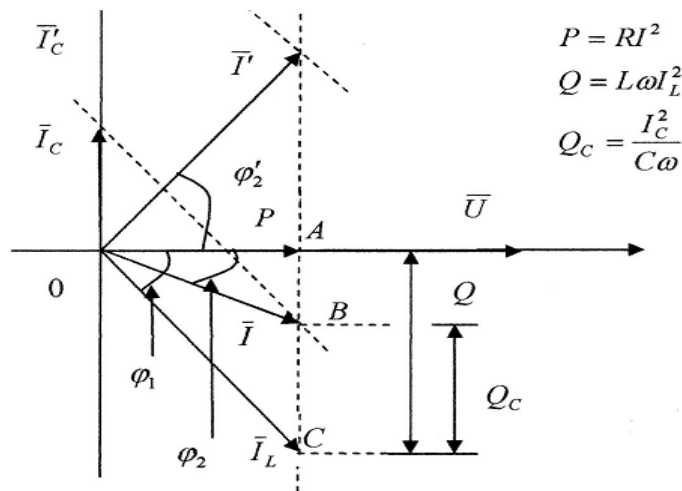


Figure I.15 : Diagramme vectoriel du schéma de la figure I.15.b.

Nous avons :

$$\frac{P}{Q} = \operatorname{tg} \varphi_1 \quad [I.82]$$

Du triangle (AOC) on déduit :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{AC}{OA} \quad [I.83]$$

Du triangle (OAB) on déduit :

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{AC-AB}{OA} = \frac{Q-Q_C}{P} = \frac{Q}{P} - \frac{Q_C}{P} \quad [I.84]$$

Donc

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{Q_C}{P} \quad [I.85]$$

Finalement, la puissance du condensateur est :

$$Q_C = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad [I.86]$$

Connaissant la puissance active du réseau aux points de connexion, ainsi que la valeur du facteur puissance que nous voulons atteindre et en calculant le facteur de puissance à corriger, nous pouvons déterminer la puissance de condensateur à installer.

d- Raccordement des condensateurs au réseau :

La figure I.16 représente le schéma de branchement d'un condensateur série à travers des disjoncteurs. P étant un parafoudre pour assurer la protection et le transformateur TT permet la mise à la terre des charges partielles après le débranchement du condensateur

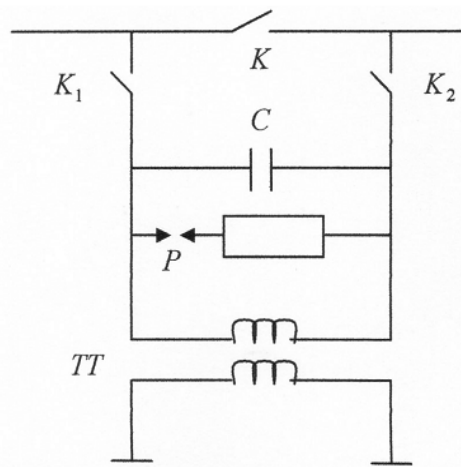


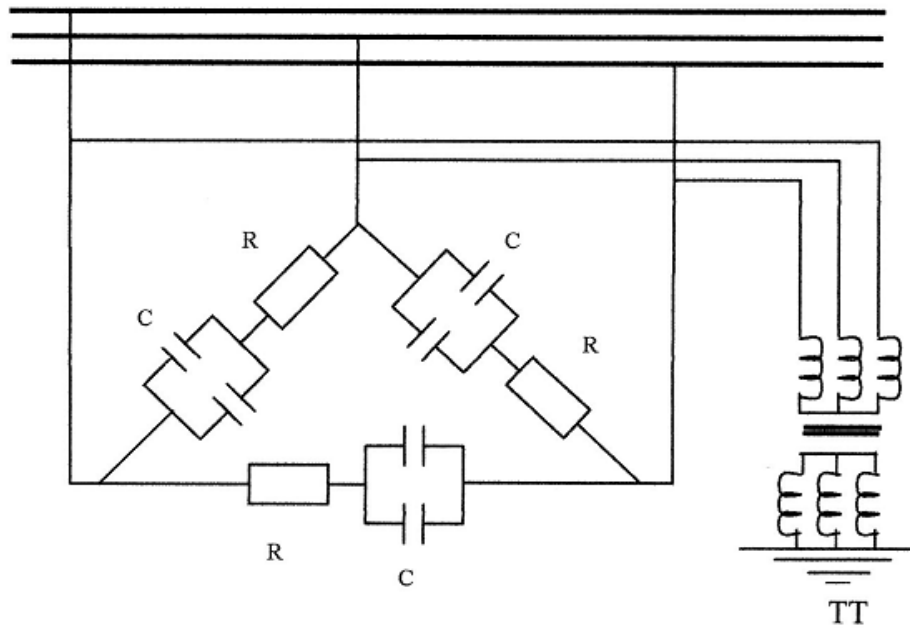
Figure I.16 : schéma de branchement d'un condensateur série et parallèle [ths I]

Les condensateurs shunt sont habituellement couplés en triangle avant d'être raccordés au réseau. Le choix du système triangle est fait pour des raisons économiques ; la puissance produite par des condensateurs en triangle (Q_Δ) est trois fois plus importante que la puissance produite par les mêmes condensateurs couplées en étoile ($\left(\frac{Q_\Delta}{3}\right) = Q_Y$). Le tableau I.3 donne les différents couplages des condensateurs shunt.

Tableau I.3 : Différents couplages des condensateurs shunt (~) :

| Couplage | Etoile (Y) | Triangle (Δ) | Comparaison |
|--|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Impédance $3 \sim (X_C)$ des condensateurs | $X_{CY} = \frac{V}{I}$ | $X_{C\Delta} = \frac{3V}{I}$ | $X_{C\Delta} = 3X_{CY}$ |
| Puissance (Q) des condensateurs | $Q_Y = 3VI \sin \varphi$ | $Q_\Delta = \sqrt{3}UI \sin \varphi$ | $Q_Y = Q_\Delta$ |

La figure I.17 représente un gradin de condensateurs couplés en étoile sur une ligne triphasé :



Transformateur de tension

Figure I.16 : Schéma de couplage de condensateur shunt [ths I]

- En cas de claquage d'un condensateur sur la figure I.17, la résistance R connectée en série, permet d'éviter le court circuit des autres condensateurs. le transformateur de tension, TT, permet l'alimentation des charges résiduelles après la mise hors service des condensateurs.
- Les batteries de condensateurs peuvent être raccordées en étoile, mais dans ce cas, le problème de surtension survient en cas d'une phase.

Avantage des batteries de condensateurs :

Les batteries de condensateurs présentent les avantages de tous les éléments statiques :

- Absence d'usures mécaniques.
- Entretien réduit.
- pertes faibles.
- Elles occupent un faible volume.
- Installation facile.

Inconvénients des batteries de condensateurs :

Les inconvénients que présentent les batteries de condensateurs peuvent être résumés comme suit :

- Le contrôle de la puissance fournie par le condensateur ne se fait qu'en pas discret.
- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, ce qui peut résulter d'un vieillissement prématuré et parfois de claquage.
- Les condensateurs n'ont pas la rapidité de réponse nécessaire pour répondre aux phénomènes transitoires.

I.4.4.3- Inductances :

Les inductances ont un rôle complémentaire au rôle des batteries de condensateurs pour réaliser la stabilité de la tension. En effet, comme nous l'avons signalé au paragraphe [I.3.2.1], lors des heures creuses, en régime surchargé, la puissance réactive produite n'est pas consommée totalement par les charges. C'est pour cette raison que les inductances sont installées sur les lignes THT ou HT, pour emmagasiner cet excédant d'énergie réactive et l'empêcher de transiter à travers les lignes. Ainsi les surtensions seront atténuées et en cas de besoin cette énergie sera restituée au réseau. Pour comprendre cette technique, nous avons choisis l'exemple prit du réseau EDF (figure I.18).

Exemple : On dispose d'éléments de 100 MVar raccordés au réseau de 400 kV et d'éléments de 64 kV raccordés à 20 kV [ths I]

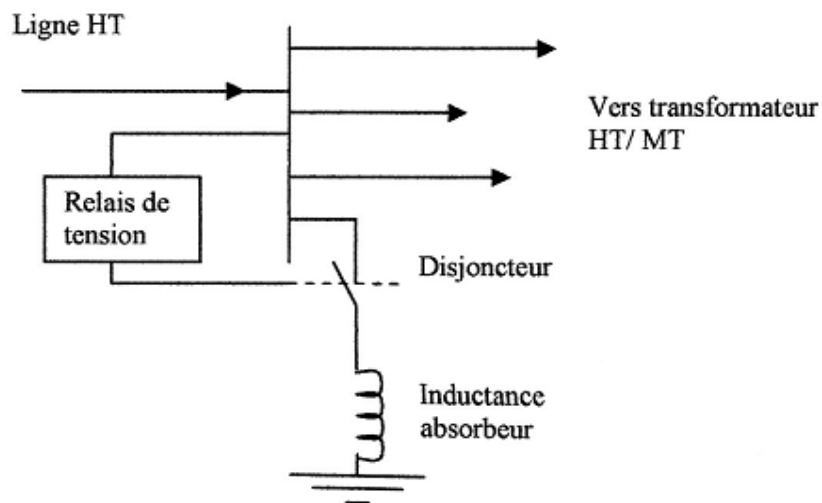


Figure II.18 : Schéma de montage d'un absorbeur sur jeu de barres HT. [ths I]

Le relais de tension connecte l'inductance au réseau dans le cas suivant :

En cas de tension supérieure à la tension maximale de service sur le jeu de barres, le relais qui est consigné à cette valeur exacte, détecte cette surtension qui est aussitôt absorbée par l'inductance après la fermeture du disjoncteur. Le passage du courant dans l'inductance crée une chute de tension qui fait diminuer la tension au niveau de jeu de barre à la tension de consigne. Le disjoncteur ne s'ouvrira que lorsque la tension revienne à une valeur de service.

I.4.4.4- Compensateurs synchrones :

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

D'après la théorie de potier, le modèle simplifié d'une machine synchrone est représenté sur la figure I.19 par une source de tension E en série avec une inductance X_d ($R \ll X_d$).

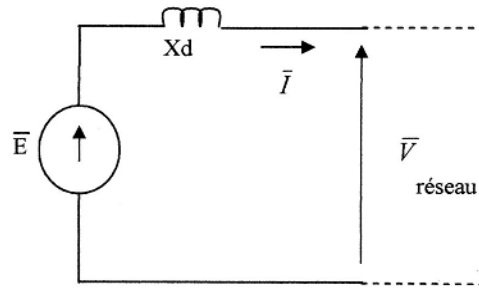


Figure I.19 : Schéma équivalent de la machine synchrone [ths I]

De la figure I.19, on tire l'équation des tensions suivante :

$$\bar{E} = \bar{V} + jX_d \bar{I} \quad [I-87]$$

Avec :

- E , fem due à l'excitation du compensateur synchrone ;
- V, tension du réseau ;
- X_d ; Réactance de fuite de compensateur synchrone ;
- I, courant échangé avec le réseau ;

La puissance active consommée par le condensateur est :

$$P = 3VI \cos \varphi \quad [I-88]$$

La puissance réactive aussi est :

$$Q = 3VI \sin \varphi \quad [I-89]$$

La puissance vectorielle de l'équation [I-87] donne :

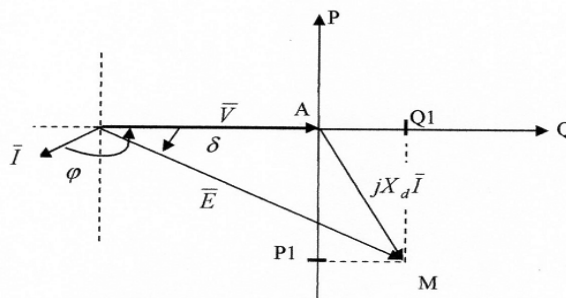


Figure I.20 : Représentation vectorielle des tensions du compensateur synchrone

Par projection sur l'axe (P) on obtient :

$$AP_1 = X_d I \cos \varphi = E \sin \delta \quad [I-90]$$

$$[I-88] \Rightarrow I \cos \varphi = \frac{P}{3.V} = \frac{AP_1}{X_d} \quad [I-91]$$

$$\Rightarrow P = \frac{3.V}{X_d} . AP_1 \quad [I-92]$$

En remplace AP_1 par $E . \cos \delta$ à partir de [I-90] , on trouve :

$$P = \frac{3.V}{X_d} . E \sin \delta \quad [I-93]$$

Avec une projection sur l'axe (Q) on obtient :

$$AQ_1 = X_d I \sin \varphi \quad [I-94]$$

$$[I-89] \Rightarrow I \sin \varphi = \frac{Q}{3.V} = \frac{AQ_1}{X_d} \quad [I-95]$$

$$\Rightarrow Q = \frac{3.V}{X_d} . AQ_1 \quad [I-96]$$

En remplaçant AQ_1 par $E \cos \delta - V$ à partir de [I-94], on obtient :

$$Q = \frac{3EV}{X_d} \cos \delta - \frac{3V^2}{X_d} \quad [I-97]$$

Comme le compensateur synchrone fonctionne à vide, donc la puissance active qu'il absorbe est nulle, c'est à dire $P = 0$, $\delta = 0$, $\cos \delta = 1$ et $\sin \delta = 0$. L'expression de la puissance réactive est alors :

$$P = 0 \Rightarrow Q = \frac{3.(E-V).V}{X_d} \quad [I-98]$$

Le sens de transit de la puissance réactive, du compensateur vers le réseau ou du réseau vers le compensateur dépend de la quantité $(E-V)$. Ainsi :

- Si $E-V > 0 \Rightarrow E > V$, le compensateur est dit capacitif. Il fonctionne en régime surexcité, donc il fournit de l'énergie réactive.
- Si $E-V < 0 \Rightarrow E < V$, le compensateur est dit inductif. Il fonctionne en régime sous-excité, donc il absorbe de l'énergie réactive.

Le raccordement du compensateur synchrone au réseau se fait à travers un transformateur survolteur comme le montre la figure I.21 ; le compensateur est branché à coté de la charge pour réduire la portée du transit de la puissance réactive.

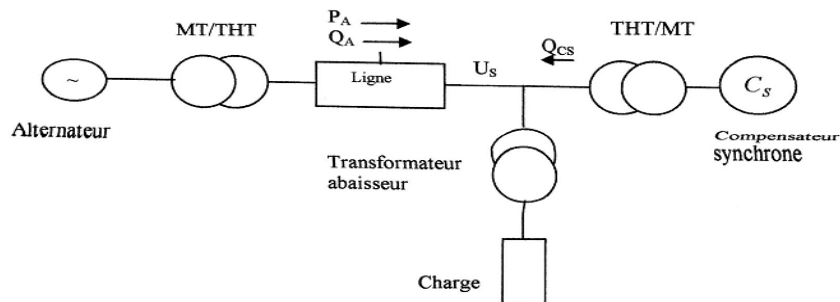


Figure I.21 : Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau [ths I]

I.4.4.5- Groupe thermique et hydraulique :

Les groupes thermiques et hydrauliques peuvent également participer à la compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques. Grâce aux performances de leurs alternateurs notamment sur le plan dynamique, ces groupes qui constituent les sources de tension du réseau, peuvent contrôler la tension en absorbant ou en fournissant de l'énergie réactive, ce qui dépend des courants d'excitation des rotors des alternateurs.

Comme on va le voir sur la figure I.22, plusieurs zones de limitation de fonctionnement sont à prendre en considération en raison de :

- L'échauffement des conducteurs du rotor et des tôles des circuits magnétiques, c'est une limitation de quantité de puissance fournie (limite de courant du rotor).
- Des contraintes dues au courant du stator et à l'angle interne δ qui doit être inférieur à $\frac{\pi}{2}$ pour un fonctionnement stable à excitation constante et à tension du rotor fixe, c'est une limitation de puissance absorbée.

Les potentialités d'un groupe à absorber ou à fournir de l'énergie réactive dépendent également de la puissance active qu'il fournit, de la tension aux bornes de son alternateur et de la prise du transformateur le reliant au réseau.

La modification de la production d'énergie réactive dans un groupe s'effectue en quelques dixièmes de seconde seulement. Il peut donc faire face aux fluctuations brusques de la demande. Cette performance dynamique fait du groupe un moyen accompli de compensation d'énergie réactive dans les réseaux de transport. Mais il reste qu'il ne peut compenser les chutes de tension importantes créées par les transits de l'énergie réactive dans les réseaux.

L'alternateur étant une machine synchrone, on a donc utilisé le schéma équivalent de la figure I.19.

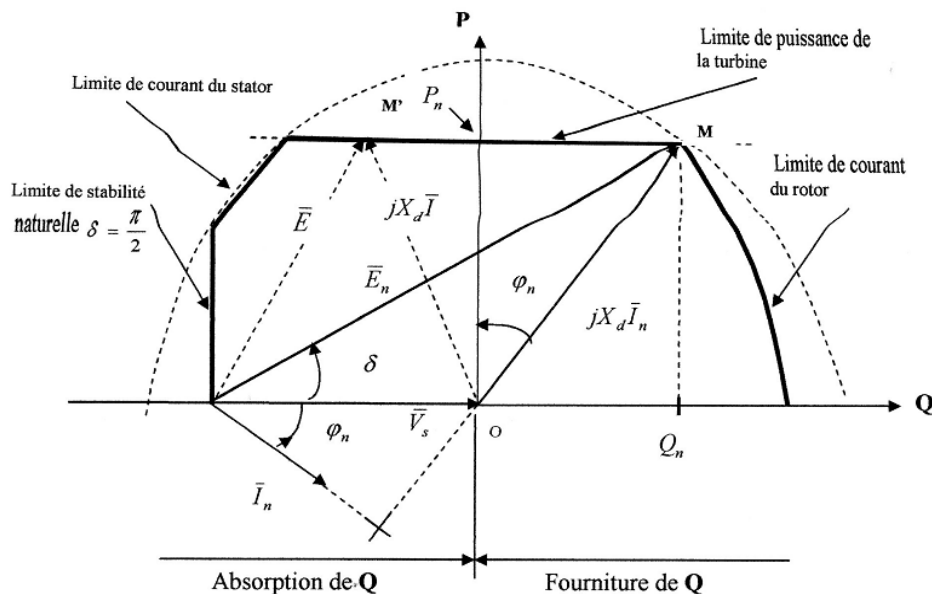


Figure I.22 : Domaine de fonctionnement d'un alternateur dans le plan puissance active - réactive [doc I]

L'expression de la force électromotrice interne de l'alternateur est la même que l'expression [I-87] :

$$\underline{E} = \underline{V}_s + jX_d \underline{I}$$

L'expression de la puissance active produite par l'alternateur est la même que l'expression [I-93]:

$$P = \frac{3.V_s}{X_d} E \sin \delta$$

L'expression de la puissance réactive absorbée ou fournie par l'alternateur est la même que l'expression [I-97] :

$$Q = \frac{3.V_s}{X_d} E \cos \delta - \frac{3.V_s^2}{X_d}$$

Avec :

E : Force électromotrice interne.

I : Courant statorique.

P : Puissance active fournie par l'alternateur.

Q : Puissance réactive absorbée ou fournie par l'alternateur.

V_s : Tension aux bornes du stator.

δ : Angle interne.

X_d : Réactance de l'alternateur.

φ : Angle de phase.

P_m, Q_n, E_n, φ_n : Valeurs nominales.

En fonction de l'angle de phase φ , l'alternateur absorbe ou fournit de l'énergie réactive :

$$\begin{cases} \text{Si } 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \text{ l'alternateur fournit de la puissance réactive.} \\ \text{Si } -\frac{\pi}{2} < \varphi < 0, \text{ l'alternateur absorbe de la puissance réactive.} \end{cases}$$

I.4.4.6- Compensateurs statiques d'énergie réactive (dispositifs FACTS) :

I.4.4.6.1- Concept FACTS : Un projet EPRI.

FACTS (flexible AC Transmission System), système flexibles de transmission à courant alternatif. C'est un projet lancé en 1988 par EPRI (Electric Power Research Institute), qui est un consortium dédié à la recherche dans le domaine de l'exploitation de l'énergie et regroupe un certain nombre de compagnies. Ce projet vise surtout à trouver des moyens capables d'améliorer les capacités des réseaux de transport en augmentant leur flexibilité.

La technologie FACTS utilise l'électronique de puissance et particulièrement les thyristors à ouverture par gâchette, GTO, qui permettent d'atteindre des temps de réponses nettement inférieurs à ceux obtenus pour les systèmes mécaniques, et leur état statique réduit largement leur maintenance.

Nous avons vu au paragraphe [I.2] que les transits de la puissance réactive ont des effets directs sur le niveau de tension dans le réseau. Un transit de puissance non contrôlé, peut

causer une instabilité en tension en raison des chutes de tension des pertes joule occasionnées (expressions [I.42], [I.32]).

Les dispositifs FACTS ont pour objectifs de contrôler la tension et le transit de la puissance dans les réseaux afin d'augmenter leur capacité de charge jusqu'à leurs limites thermiques maximales.

Pour comprendre comment agissent ces dispositifs, prenons l'exemple suivant :

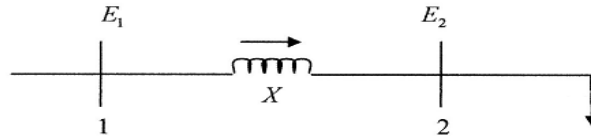


Figure I.23 : Ligne de transport à courant alternatif. [ths II]

On suppose que les pertes sont négligeables lors du transit de la puissance du nœud (1) au nœud (2). La puissance active, transmise s'écrit alors en fonction des tensions aux deux extrémités, du déphasage entre elle δ_{12} et de la réactance de la ligne X comme le montre l'expression [I.99].

$$P = \frac{E_1 - E_2}{X} \cdot \sin \delta_{12} \quad [\text{ths II}] \quad [\text{I.99}]$$

Cette équation nous montre que si l'on trouve un moyen de contrôler un, deux, voir trois des paramètres qui caractérisent son l'expression, c'est-à-dire tension, déphase et impédance, nous pouvons alors contrôler la puissance transmissible par la ligne.

Le contrôle de ces paramètres se fait par les moyens de la compensation statique que nous allons voir au chapitre II. Le mot statique est relatif à l'absence d'éléments tournants parmi ces dispositifs qui sont constitués d'ensemble de condensateurs et d'inductances commandés par thyristors. Parmi les dispositifs FACTS les plus utilisés on peut citer :

I.4.4.6.2-Quelques dispositifs de type FACTS :

- Les compensateurs série contrôlés par thyristors (**TCSC** : thyristors Controlled Series Compensators), permettant de modifier l'impédance de la ligne avec une grande flexibilité.
- les déphaseurs statiques (**SPS** : Static Phase Shifter), permettant le contrôle de l'Angle de transmission.
- Les compensateurs statique d'énergie réactive (**SVC** : Static Compensator), permettant le contrôle de la tension et de l'énergie réactive.
- Les compensateurs statique d'énergie réactive de type avancé (**STATCOM** : STATic COMPensateur), permettant le contrôle rapide de la tension .
- L'**UPFC** (Unified Power Flow Controller), ce compensateur réunit les fonctions du SVC, du compensateur série et du déphaseur.

Donc l'idée est de remplacer les disjoncteurs mécaniques par ces moyens statiques, plus rapides et plus efficaces pour permettre un meilleur contrôle de la tension.

Conclusion :

Pour maintenir la tension dans les plages admissibles sur les réseaux de transport (THT et HT) en s'assurant que les valeurs limites sont respectées au mieux, il est nécessaire de réduire les transits de l'énergie réactive. Il faut donc produire l'énergie réactive au plus près de la demande, c'est le principe de la compensation.

Dans les réseaux HT, cet objectif est atteint grâce à l'installation de batteries de condensateurs situées dans le poste HT/MT pour couvrir une grande partie de la consommation des charges. La tension est alors ajustée à l'aide des régulateurs en charge des transformateurs. Dans le cas des réseaux THT, le contrôle des transits de la puissance réactive est assuré par les groupes de production, les inductances ainsi que les condensateurs installés dans les postes THT/HT.

Pour résoudre les problèmes d'instabilité en tension dans les réseaux de transport, des moyens de compensation d'énergie réactive sont installés afin de limiter les chutes de tension et les pertes joules en réduisant le transport de l'énergie réactive.

Les moyens utilisés pour la compensation de l'énergie réactive sont différents dans leur conception et leurs performances. L'évolution technique des charges et l'accroissement du niveau de consommation énergétique des abonnés, imposent plus de rapidité lors des échanges de l'énergie réactive. D'où, l'application de moyen à performances dynamiques avancées tel le SVC qui va être l'objet de notre étude au chapitre II.

Chapitre II:

Electronique de puissance et compensateurs
statique de puissance réactive

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons parler des compensateurs statique de l'énergie réactive (SVC : Static Var Compensator). Comme nous l'avons déjà souligné au chapitre précédent, le SVC fait partie des dispositifs FACTS qui sont conçus pour améliorer la stabilité dans les réseaux électriques.

Le SVC est connecté en shunt à un nœud de réseau électrique en vue d'absorber ou de générer de l'énergie réactive. Sa commande fait appel à de l'électronique de puissance. En effet, des thyristors sont montés de telle façon à avoir un double transit de puissance réactive, réciproquement de réseau vers le SVC : fonctionnement inductif, et du SVC vers le réseau : fonctionnement capacitif.

Le SVC à l'avantage de faire des échanges d'énergie réactive de manière rapide de façon à anticiper les transient de puissance réactive pour les stopper. Ses performances dynamiques lui permettent de maintenir la tension proche de des valeurs de consigne au nœud de connexion et d'améliorer la stabilité statique dans les réseaux de transport.

Selon le besoin de réseau en énergie réactive, le SVC peut avoir plusieurs dispositions différentes. On suppose dans ce chapitre de faire une étude de différentes applications du compensateur statique d'énergie réactive SVC. Entre autre ses avantages et inconvénients

II.1- Convertisseur d'électronique de puissance :

Les convertisseurs à base de composants d'électronique de puissance permettent le contrôle du flux de puissance et sa conversion d'une forme à une autre suivant les besoins.

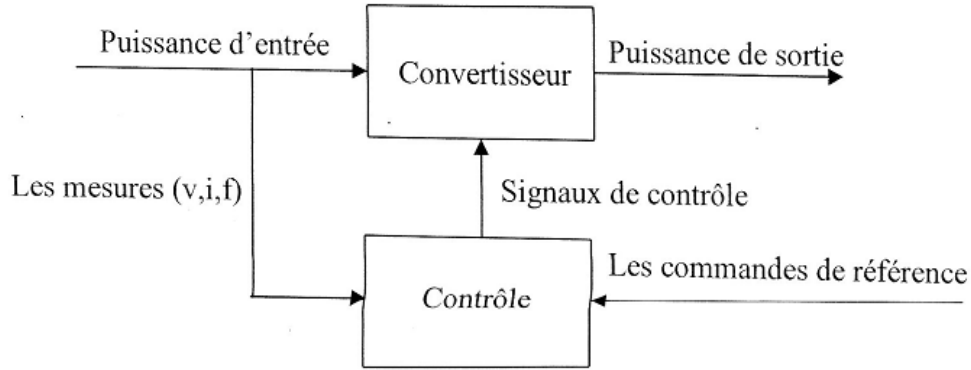


Figure II-1 : diagramme de fonctionnement des convertisseurs [ih II]

II-1-3 : Le gradateur :

II-1.1.1- Gradateur monophasé :

Le schéma de montage de la figure II-2 représente le schéma d'un gradateur monophasé représenté par une tension alternative sinusoïdale fixe v reliée à l'impédance Z par l'intermédiaire de deux thyristors montés en tête-bêche. V_L est la tension alternative variable obtenue aux bornes de la réactance.

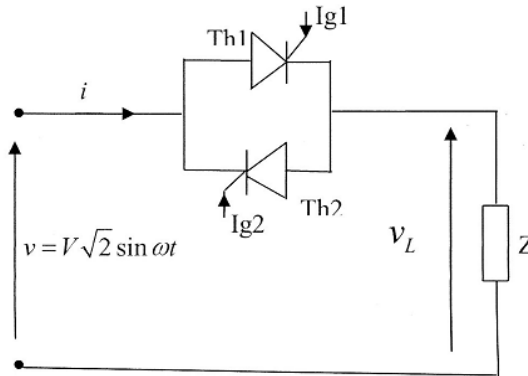


Figure II.2 : Schéma de montage d'un gradateur monophasé [ths I]

Pour une impédance :

$$Z = R + jX_L$$

L'argument $\varphi = \arctg \frac{R}{X_L}$ pour $(\alpha \geq \varphi)$.

-Debit du courant inductive pure »

Dans ce cas, le module de $|Z| = X_L$

Calcul du courant de source $i(t)$:

Quand l'un des thyristors conduit :

$$L \frac{di(t)}{dt} = V\sqrt{2} \sin \omega t \quad [\text{II.1}]$$

$$\Leftrightarrow di(t) = \frac{V\sqrt{2} \sin \omega t}{L} \quad [\text{II.2}]$$

Après l'intégration de l'expression [II.2], nous obtenons :

$$i(t) = -\frac{V\sqrt{2} \cos \omega t}{L\omega} + A \quad [\text{II.3}]$$

Où A est une constante qu'on détermine à partir de la condition $i(\omega t = \alpha)$

$$A = \frac{V\sqrt{2}}{L\omega} \cos(\alpha) \quad [\text{II.4}]$$

Résultat qu'il suffit de reporter dans l'équation [II.3] et finalement :

$$i(t) = \begin{cases} \frac{V\sqrt{2}}{L\omega} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t)) & \text{pour } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \text{pour } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad [\text{II.5}]$$

$$[\text{II.6}]$$

La figure II.3 représente les formes d'ondes de tension et du courant de source du gradateur pour un angle d'amorçage : $\alpha > \frac{\pi}{2}$

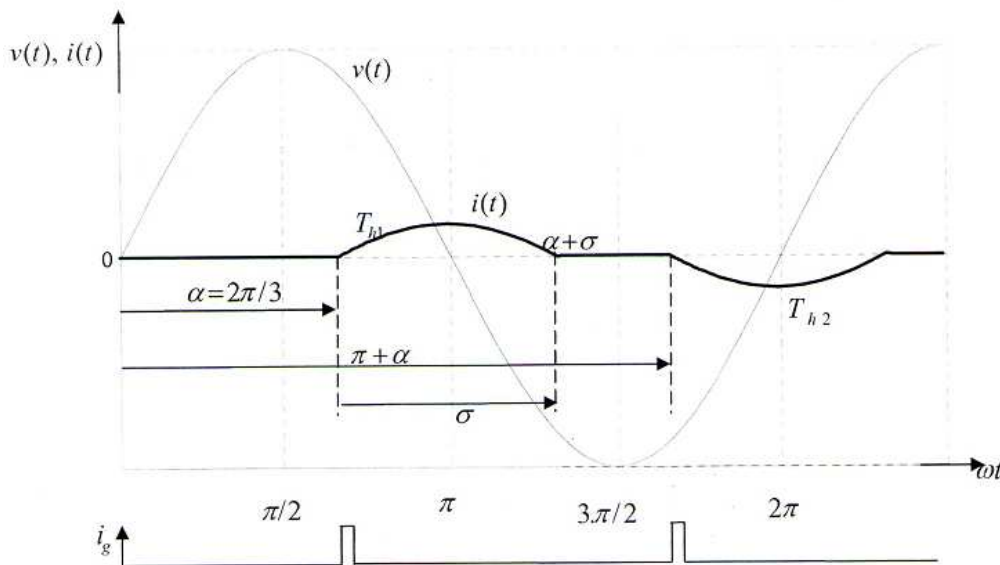


Figure II.3: Allure de la tension et du courant d'un gradateur monophasé pour $\alpha > \frac{\pi}{2}$ [ths II]

Pour obtenir la forme d'onde du courant symétrique par rapport à π avec alternance de séquences positives et négatives comme sur la figure II.3, il faut amorcer les thyristors à un angle α tel que : $\alpha > \varphi$. (Pour une inductance pure, $\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \alpha \geq \frac{\pi}{2}$).

Les deux thyristors mis en antiparallèle agissent comme des interrupteurs bidirectionnels ; ils conduisent chacun une demi-période : T_1 pour la demi-période positive T_2 pour la demi-période négative.

L'angle d'amorçage (α) est mesuré du point duquel la tension passe par le point zéro, il peut varier de 90° à 180° . Pour un amorçage à 90° la conduction est totale, pour un amorçage qui se situe entre 90° et 180° la conduction est partielle.

Cette conduction est exprimée par un angle (σ) et il est défini par :

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad \text{[II.7]}$$

$$\text{-Pour } \alpha = 90^\circ \Rightarrow \sigma = 2(180^\circ - 90^\circ) = 180^\circ \text{ pleine conduction} \quad \text{[II.8]}$$

$$\text{-Pour } 90^\circ < \alpha < 180^\circ \Rightarrow \sigma \in]0^\circ, 180^\circ[\text{ conduction partielle} \quad \text{[II.9]}$$

Après la décomposition en série de FOURIER en aura la fondamentale I_1 s'écrire sous la forme suivante :

$$I_1 = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \quad \text{[II.10]}$$

Pour savoir comment varie ce courant en fonction de l'angle de conduction σ , prenons certaines valeurs particulières.

$$\sigma = 90^\circ \Rightarrow I_1 = \frac{\frac{\pi}{2} - \sin \frac{\pi}{2}}{\pi} \cdot \frac{V}{X_1} = 0.18 \cdot \frac{V}{X_1} \quad \text{[II.11]}$$

$$\sigma = 120^\circ \Rightarrow I_1 = \frac{\frac{\pi}{3} - \sin \frac{\pi}{3}}{\pi} \cdot \frac{V}{X_1} = \frac{V}{X_1} \quad \text{[II.12]}$$

$$\sigma = 180^\circ \Rightarrow I_1 = \frac{\pi - \sin \pi}{\pi} \cdot \frac{V}{X_1} = 1 \cdot \frac{V}{X_1} \quad \text{[II.13]}$$

On voit bien que la variation de fondamental du courant est proportionnelle à l'angle de conduction σ . (Inversement proportionnelle à l'angle d'amorçage α).

II.1.1.2-Gradateur triphasé :

Il existe trois types de montages :

- Le gradateur en étoile avec ou sans accès au neutre.
- Le groupement en triangle de trois gradateurs monophasés.
- Le gradateur mixte à trois thyristors et trois diodes.

La figure II.4 représente le montage de type gradateur.

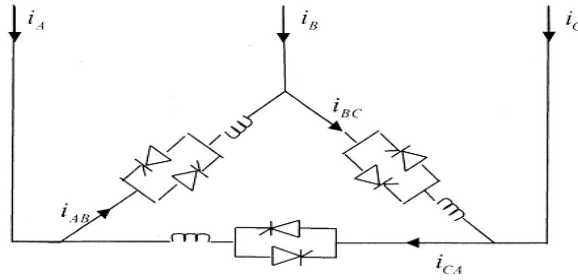


Figure II.4 : Schéma de montage d'un gradateur triphasé en triangle [thsII]

Cette structure permet d'éliminer l'harmonique de rang 3 et ses multiples.

Les figures II.5 montrent les formes d'onde des courants de lignes et du courant de phase d'un gradateur triphasé couplé en triangle.

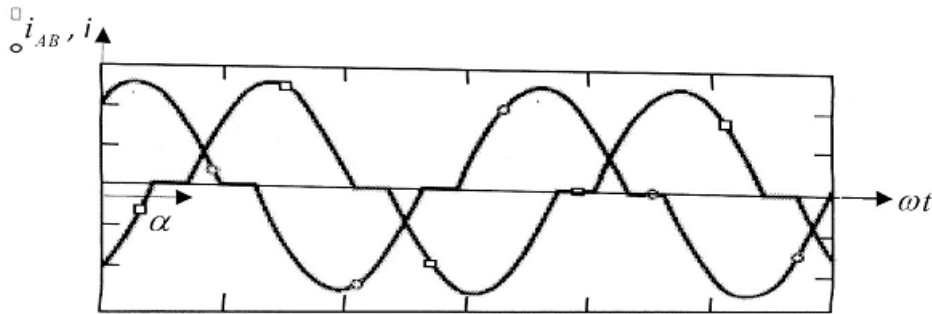


Figure II.5 : Allure des courants de phases pour $\alpha=105^\circ$ [thsII]

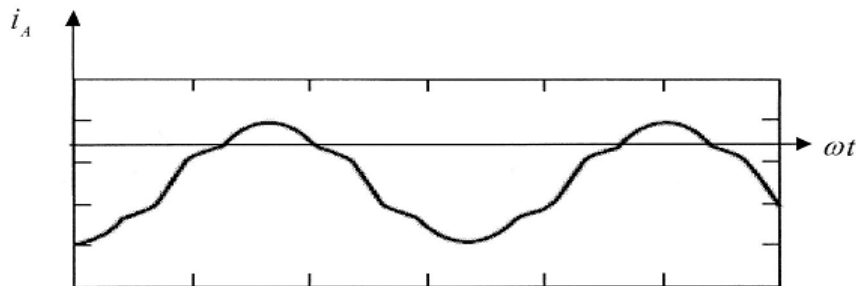


Figure II.5 : Allure du courant de ligne pour $\alpha=105^\circ$ [thsI]

Les compensateurs statique d'énergie réactive (SVC =Static Var Compensator) sont des dispositifs du type FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission System*), le concept de FACTS permet une association des systèmes d'électronique de puissance pour augmenter l'efficacité, la vitesse et la fiabilité des réseaux électriques.

Les compensateurs statiques sont des équipements utilisés pour l'injection/absorption rapide de puissance réactive en un nœud du réseau ayant pour objectifs de maintenir la tension proche de la valeur de consigne ; améliorer la stabilité statique (par l'augmentation de la puissance transmissible à longue distance et par l'amortissement des oscillations) ; améliorer la stabilité dynamique. En plus de ces applications de caractère réseau le SVC peut être utilisé pour compenser une charge déséquilibrée.

Le SVC est connecté en shunt à un nœud du réseau électrique ; par son moyen de contrôle du courant par thyristors il peut soit générer soit absorber de la puissance réactive selon le besoin du réseau.

Ces éléments réactives (SVC) peuvent se présenter sous plusieurs formes de circuit ou de dispositifs, chacun de ces procédures sont de type FACTS, dans ce chapitre, nous allons parlés entre autre des CCT (Condensateurs commandé par thyristors), les LCT (inductance commandée par thyristors) et même d'une combinaison de CCT et de LCT (ce qui correspond au SVC conventionnel) ensuite on s'intéresse à d'autres types de SVC. Et aussi des utilisations, inconvénients et de la protection des SVC

II.2-SCHEMA DE PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DU SVC :

II.2.1- Condensateur commandé par thyristors (CCT) :

Le CCT est principalement structuré d'un banc de condensateur commandé par thyristors (Figure II.6) on remarque la présence d'une petite inductance en série avec le condensateur qui sert à limiter les surtensions transitoires (violant appel de courant provoquer par la mis en service du condensateur) et prévoirai des effets de résonance avec le réseau.

Pour mieux faire face à la fluctuation de la demande de puissance réactive la susceptance à installer est répartie sur plusieurs CCT connectés en parallèles.

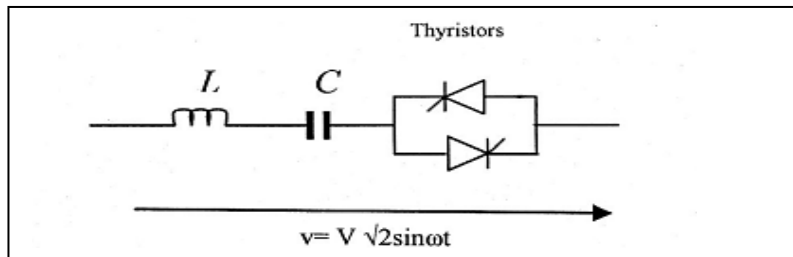


Figure II.6 : Schéma de principe d'un CCT [ths II]

Lorsque la tension connaît une variation non désireuse pour une raison ou une autre, le système de commande des CCT connecte ou déconnecte un ou plusieurs bancs de condensateurs. Ce qui est représenté par la figure II.7 la caractéristique V-I des CCT.

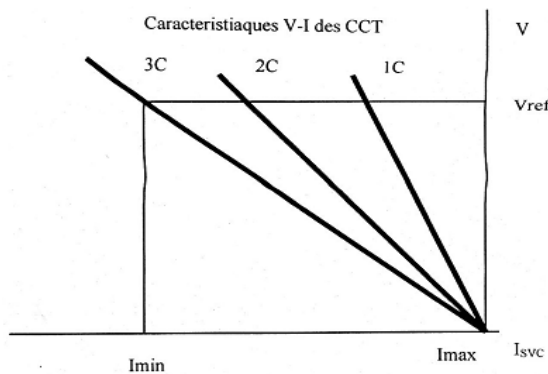
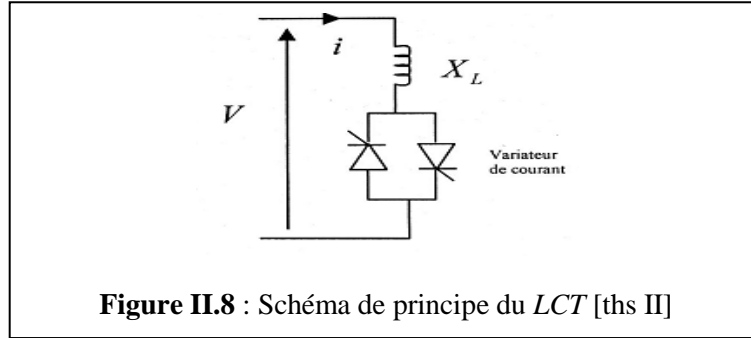


Figure II.7 : Caractéristique V-I des CCT

II-2.2-Inductance commandée par thyristors (LCT) :

Le schéma de principe d'un LCT comprend une réactance en série avec deux thyristors montés en tête-bêche, comme le montre la figure II.8

Si l'on désire obtenir la conduction totale l'angle de commande doit être $\alpha=90^\circ$. Chaque thyristor est commandé une demi-période et l'angle de commande α est mesuré à partir du point de passage par zéro de la tension. La conduction est obtenue pour α variant entre 90° et 180° .



L'angle de conduction (σ) est donné par :

$$\sigma=2(\pi-\alpha)$$

Supposant qu'on applique une tension $v=V\sqrt{2} \sin(\omega t)$ aux bornes du LCT, d'après la loi d'ohm on a :

$$\frac{Ldi}{dt} = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad [\text{II-14}]$$

On intégrant on a :

$$i = -\left(\frac{\sqrt{2}V}{L\omega}\right) \cos \omega t + C \quad [\text{II-15}]$$

la constante d'intégration C est déterminée par la condition :

$$\begin{aligned} \omega t = \alpha, i(\alpha) &= 0 \\ C &= \frac{\sqrt{2}V \cos \alpha}{L\omega} \end{aligned}$$

La valeur instantanée du courant, valable entre $\omega t = \alpha$ et $\omega t = 2\pi - \alpha$ est :

$$i = \frac{\sqrt{2}V(\cos \alpha - \cos \omega t)}{X_L} \quad [\text{II-16}]$$

Où :

V=valeur efficace de la tension

$X_L=L\omega$ =réactance de l'inductance pour le fondamental

$\omega=2\pi f$

α =angle d'allumage des thyristors.

La composante fondamentale du courant correspond à une absorption variable de puissance réactive en fonction de l'angle d'allumage (on détermine par la décomposition en série de FOURIER)

$$I_1 = \frac{(\sigma - \sin \sigma)V}{\pi X_L} \quad [\text{ths II}] \quad [\text{II-17}]$$

Respectivement la puissance réactive consommée par inductance :

$$Q_L = \frac{(\sigma - \sin \sigma)V^2}{\pi X_L} \quad [\text{II-18}]$$

On peut établir la susceptance effective en fonction de l'angle α :

$$B_L = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad [\text{ths II}] \quad [\text{II-19}]$$

Il est visible que le courant (i) dépend de l'angle d'allumage des thyristors ; c'est à travers cela que l'on contrôle la susceptance B_L pour assurer un éventuel contrôle de la tension.

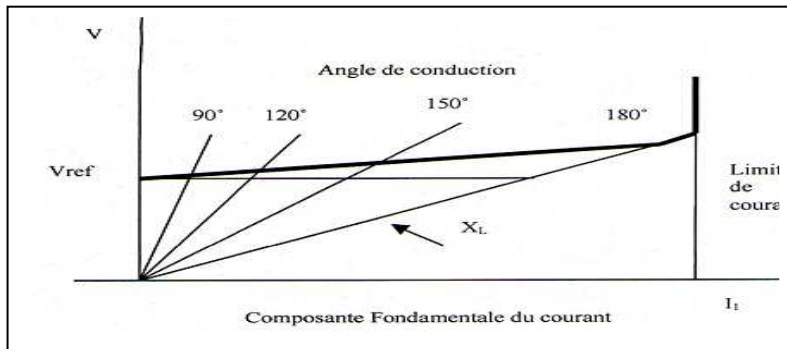


Figure II.9 : Caractéristique V-I du LCT [ths II]

Pour faire face au problème d'harmonique (le maximum de l'harmonique 3 est obtenue à $\alpha=30^\circ$, celle de l'harmonique 5 à $\alpha=20^\circ$, et celle de l'harmonique 7 à $\alpha=10^\circ$ [ths II]) générer par le SVC pour un système triphasé on procède par un branchement en triangle de trois LCT monophasés (Fig.II.10).

Quand le système est équilibré les harmonique d'ordre 3 circule dans le triangle est sont absents de la ligne électrique.

Les harmoniques d'ordre 5 et 7 sont éliminés en utilisant deux systèmes triphasés de meme puissance, connectés aux enroulements secondaires d'un transformateur à trois enroulements, l'un étant en triangle et l'autre en étoile.

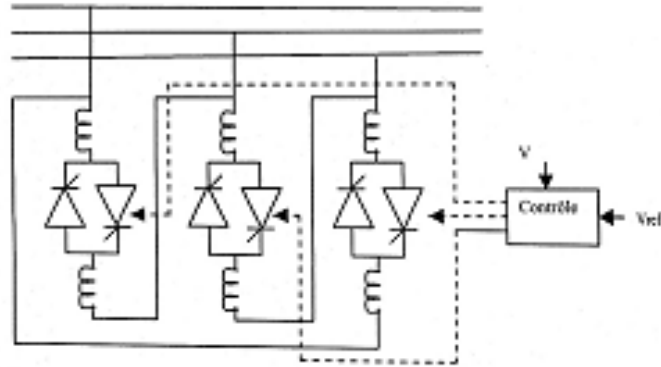


Figure II.10 : Connexion triphasé en triangle d'un LCT [ths II]

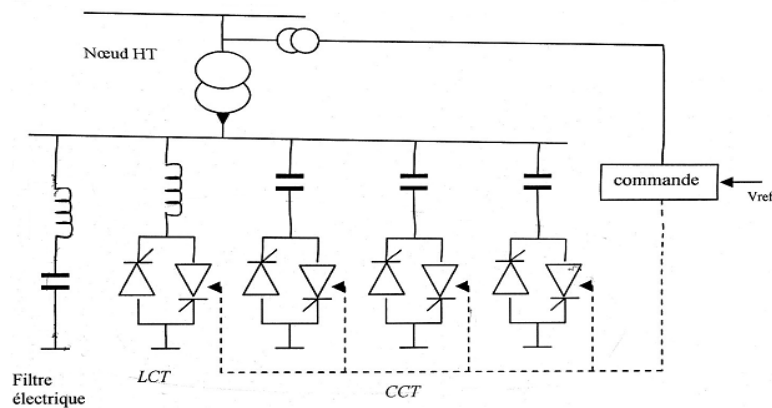


Figure II.11 : Schéma d'un compensateur statique de type LCT+CCT [ths II]

La figure II.11 représente le SVC conventionnel, composé d'une LCT et de trois (03) CCT plus un filtre d'harmonique. Le système de commande compare à tout instant la valeur de la tension au nœud à la valeur de référence et met en service une ou plusieurs CCT ou bien la LCT en fonction du réglage désiré (augmentation ou diminution de tension).

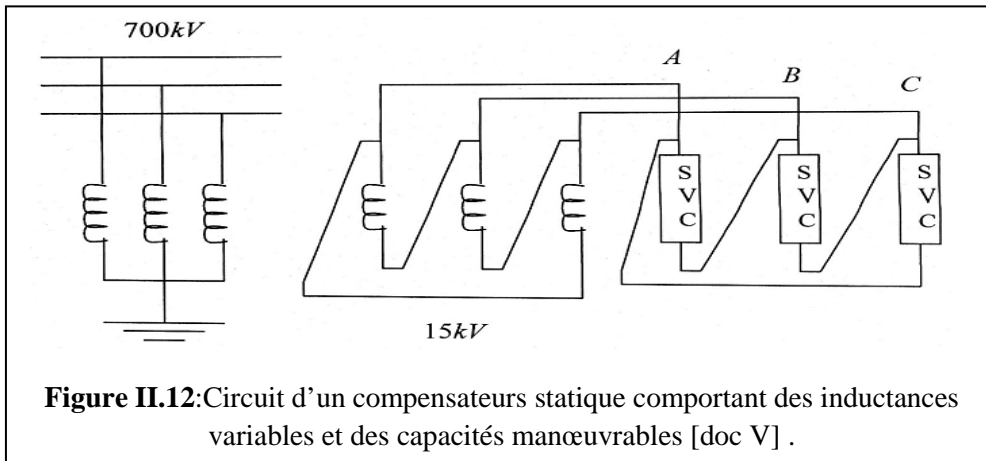
Nous avons parlé des compensateurs statiques de puissance réactive (SVC) et on sait que le but de ces genres d'installations est de réaliser avec le réseau un échange dynamique de puissance réactive en vue d'attribuer au réseau une fiabilité marquée. Les SVC permettent d'assurer d'une part un plan de tension requis sur le réseau et d'autre part augmenter la capacité de transit des lignes de transports.

Dans ce chapitre nous allons essayer de bien détailler le mode d'action des SVC par des calculs numériques et développés certain points qui n'ont pas été détaillés au préalable. Nous ferons en premier des calculs sur les compensateurs shunts (dit SVC), il assure un plan de tension rigoureux en agissant par absorption de puissance réactive (LCT) en cas de surtension, ou par génération de puissance réactive (LCT) en cas de chute de tension anormale. Nous finirons par, des calculs sur le compensateur shunt séries (TCSC) qui peuvent augmenter considérablement la capacité de transit d'une ligne par action sur la réactance effective (X_{eff}) de la ligne.

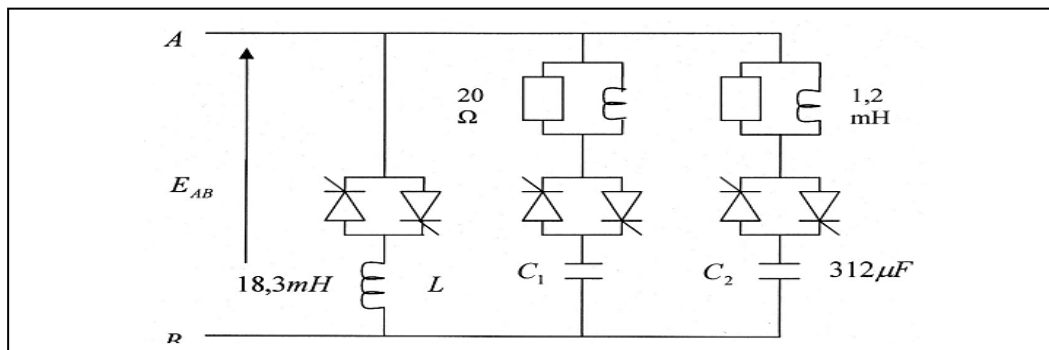
II.3- CALCULS DES COMPENSATEURS SHUNT :

Le compensateur statique shunt est constitué d'un transformateur abaisseur de tension connecté à une inductance variable L et un condensateur C (fig. II.12). Ces charges réactives sont respectivement branchées et débranchées par des compensateur composés de thyristors tête-bêche (les contacteurs n'apparaissent pas sur le schéma).

Pour mieux saisir le comportement du (SVC), considérons le schéma de la figure II.12, sur ce réseau à 700kV, 50Hz, les premières sont accordés en étoile alors que le secondaire à 15kV sont en triangle.



La figure II.12 montre en détail la branche AB de la charge réactive triphasée branchée au secondaire du transformateur du couplage. Cette branche est composée d'une inductance et de deux condensateurs. L'inductance L de 18,3mH en série avec les thyristors, l'angle d'amorçage varie de 90° à 180° pour faire varier le courant inductif c'est-à-dire la quantité de puissance réactive consommée.



Le condensateur C_1 de $312\mu F$ est connecté en série avec les thyristors et un circuit d'amortissement composé d'une inductance de $1,2mH$ en parallèle avec une résistance de 20Ω . Contrairement à la branche inductive ou le courant peut être ajusté de façon entre zéro et sa valeur nominale, la branche capacitive est commandée en tout ou rien c'est-à-dire soit il produit le maximum de puissance réactive ou il ne produit rien.

Le condensateur C_2 est identique à C_1 avec cela on augmente la puissance réactive à installer.

II.3.1- Capacitance shunt commandée par thyristors (CCT) :

Exemple numérique 1 :

La capacité C_1 de la figure II.13 est de $312\mu F$, calculer la valeur du courant et de la puissance réactive totale.

Résultat 1 :

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi f C} \quad [\text{II.20}]$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{10^2}{2 \times 50 \times 312} = 10,2\Omega$$

Courant capacitif :

$$I_C = \frac{E_{AB}}{X_C} = \frac{15000V}{10,2\Omega} = 1470A$$

Puissance réactive par phase :

$$Q_C = X_C I_C^2 \quad [\text{II-21}]$$

$$Q_C = X_C I_C^2 = 10,2 \times 1470^2 = -22MVar/\text{phase}$$

Puissance réactive capacitive des trois (03) phases :

II.3.2- Inductance commandé par thyristors :

Considérons le calcul pour l'inductance absorbeur inductif.

Exemple numérique 2 :

Sachant que l'inductance L de la figure II.13 est de $18,3 mH$ et que la tension est de $15kV$, $50Hz$, calculer la valeur du courant efficace maximale et de la puissance réactive totale.

Résultat 2 :

Réactance inductive de L :

$$X_L = L\omega = 2\pi f L \quad [\text{II-22}]$$

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 18,3 \times 10^{-3} = 5,74 \Omega$$

Courant efficace maximale ($\alpha=90^\circ$)

$$E_{AB}=X_L \cdot I_L$$

De cette relation on déduit l'expression du courant absorbé par l'inductance, on trouve :

$$I_L = \frac{E_{AB}}{X_L} = \frac{15000V}{5,74\Omega} = 2613 A$$

Puissance réactive par phase :

$$Q=X_L I_L^2 \quad \text{[II.23]}$$

$$Q=X_L I_L^2 = 5,74 \times 2613^2 = 39,2 \text{MVar /phase}$$

Puissance réactive inductive des trois (03) phases :

$$Q_{L \text{ total}} = 3 \times 39,2 = 117,6 \text{MVar}$$

a-Fonctionnement de l'inductance commandée par thyristors :

On peut faire varier le courant dans l'inductance en ajustant l'angle de retard α entre 90° et 180° . La valeur du courant instantané est donnée par la formule :

$$I_{L(t)} = A/L \quad \text{[doc V]} \quad \text{[II-24]}$$

Où A est le nombre de volts-secondes appliqués aux bornes de l'inductance L depuis le début de la conduction. Le nombre de volts-secondes atteint un maximum à 180° car, passer cet angle, la tension E_{AB} appliquée devient négative.

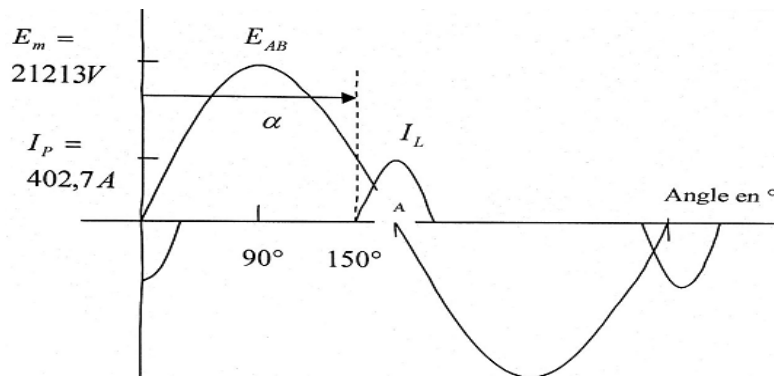


Figure II.14 : Forme d'onde de tension et du courant circulant dans l'inductance lorsque la conduction est amorcée à 150° .

Exemple numérique 3 :

En se référant sur le schéma de la figure II.14, l'angle de retard $\alpha=150^\circ$, l'inductance $L=18,3mH$ et la tension efficace est de $15kV$, $50Hz$. Calculer la valeur crête approximative du courant.

Résultat 3 :

Valeur crête de la tension :

$$E_m = 1500 \cdot \sqrt{2} = 21213 \text{ V}$$

$$E_\theta = E_m \sin \theta \quad [\text{II-25}]$$

La tension à 150° :

$$E_{150^\circ} = E_m \sin 150^\circ = 21213 \times 0,5 = 10606 \text{ V}$$

Durée de l'intervalle de 150° à 180° :

$$\Delta t = \frac{30^\circ}{360^\circ} \times \frac{1}{60} = 1,39 \text{ ms} \quad [\text{doc V}]$$

Nous allons considérer la surface A comme un triangle presque parfait, le nombre de volts-secondes est donné par :

$$A = \frac{10606 \text{ V} \times 1,39 \times 10^{-3}}{2} = 7,37 \text{ V.s}$$

Courant crête I_p dans l'inductance :

$$I_p = \frac{A}{L} = \frac{7,37}{18,3 \times 10^{-3}} = 402,7 \text{ A}$$

b- composante efficace du courant fondamental :

La valeur exacte du courant crête est donnée par l'expression :

$$I_p = \frac{E_{AB} \sqrt{2}}{2\pi f L} (1 + \cos \alpha) \quad [\text{doc V}] \quad [\text{II-26}]$$

I_p = courant crête dans l'inductance [A]

E_{AB} = tension efficace aux bornes de l'inductance [V]

α = angle d'amorçage [$^\circ$]

f = fréquence du réseau [Hz]

L = valeur de l'inductance [H]

Si l'on applique cette expression à l'exemple numérique 2, on obtient :

$$I_p = \frac{15000 \sqrt{2}}{2\pi \times 50 \times 18,3 \times 10^{-3}} (1 + \cos 150^\circ) = 494,6 \text{ A}$$

La valeur approximative du courant crête (402,7A) que nous avons calculée est compatible avec sa valeur exacte.

Le courant pulsé comprend une composante fondamentale et des harmoniques, et en particulier un 3^e harmonique. Celui-ci circule dans la triangle formé par les éléments L,C de la figure II.12.

Par conséquent la 3^e harmonique ainsi que tous les harmoniques multiples de trois (03) n'apparaissent pas dans les enroulements du transformateur, ni sur le réseau.

C'est la composante fondamentale du courant pulsé qui est de première importance. Elle est donnée par la relation :

$$I_F = \frac{E_{AB}}{2\pi f L} \left(2 - \frac{\alpha}{90} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right) \quad [\text{doc V}] \quad [\text{II-27}]$$

On constate que le courant fondamentale diminue à mesure que l'angle d'amorçage augmente au delà de 90°. C'est comme si la réactance inductive de l'inductance augmente avec α . En fait, la réactance effective $x_{(eff)} = E_{AB}/I_F$ est donné par l'expression :

$$x_{(eff)} = \frac{2\pi f L}{\frac{E_{AB}}{2\pi f L} \left(2 - \frac{\alpha}{90} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right)} \quad [\text{II-28}]$$

En ce référant sur la figure II-14, d'amorçage $\alpha=150^\circ$, l'inductance $L=18,3\text{mH}$ et la tension efficace est de 15kV, 50Hz. Calculer :

La valeur du courant fondamentale dans l'inductance.

La puissance réactive totale absorbée par le compensateur statique.

La valeur efficace de la réactance.

Résultat 4 :

$$I_F = \frac{15000}{2\pi \times 50 \times 18,3 \times 10^{-3}} \left(2 - \frac{150}{90} + \frac{\sin(2 \times 150)}{\pi} \right)$$

$$= 2610 \left(2 - 1,67 + \frac{(-0,866)}{\pi} \right) = 141,47 \text{ A}$$

Puissance réactive totale absorbée par le SVC :

$$Q = 3EI \quad [\text{II-29}]$$

$$Q = 3 E_{AB} I = 3 \times 15000 \times 141,47 = 6,36 \text{ MVar}$$

Réactance effective :

$$x_{(eff)} = \frac{2\pi \times 50 \times 18,3 \times 10^{-3}}{\left(2 - \frac{150}{90} + \frac{\sin(300)}{\pi} \right)} = \frac{5,74}{2 - 1,667 - 0,275} = 98,96 \Omega$$

Lorsque $\alpha=150^\circ$, la réactance effective de l'inductance est 17 fois supérieur à sa réactance intrinsèque (5,74 Ω s)

II.3.3 – caractéristique V-I d'un SVC (LCT+CCT) :

Considérons la figure II.13, supposons que les condensateurs sont débranchés et que la tension aux bornes du SVC soit de 15 KV. Ajustons l'angle α des thyristors commandant la branche inductive à 90° , de sorte à avoir une conduction totale. Le courant des inductances est alors à sa valeur maximale, soit 2613 A. La puissance réactive totale est alors de 117,6 MVAR. Bien que la tension nominale soit de 15 KV, celle-ci peut fluctuer considérablement lors d'une contingente de réseau. La droite (L) (fig IV.4) montre la relation entre la tension E_{AB} et le courant I_L . Par exemple, si la tension baisse à 10 KV, le courant décroît à :

$$I_{10kV} = \left(\frac{10kV}{15kV} \right) \times 2613A = 1742A$$

Le courant a baissé de 33 % mais la puissance a chuté de $3 \times 10 \text{ KV} \times 1742 \text{ A} = 52,26 \text{ M var}$. Cela représente une diminution de 55,56 % par rapport à sa valeur nominale 117,26 Mvar.

Il est visible qu'une baisse de tension réduit de beaucoup la puissance réactive que le compensateur peut absorber.

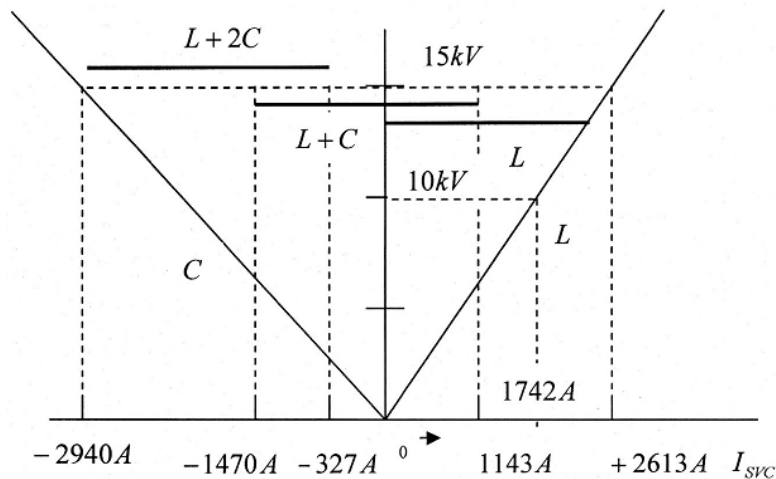


Figure II.15: Plage de conduction du condensateur statique [ths II]

Lorsque l'inductance est débranchée et les deux condensateurs sont en service, le courant totale par phase sous une tension de 15 kV est de $2 \times 1470 \text{ A} = 2940 \text{ A}$. La coutume est d'apposer un signe (-) à ce courant capacitif pour lui distinguer du courant inductif la relation entre le courant et la tension est alors une nouvelle droite, désignée (C) (fig.II.15).

Les droite (L) et (C) forme ensemble une courbe « courbe en V » qui correspond aux limites inductive et capacitive du compensateur statique. A la tension nominale elle s'étend de -2940 A à 2613 A

Au voisinage de la tension nominale, le compensateur doit pouvoir tirer un courant réactif compris entre $+2613 \text{ A}$ et -2940 A . On réalise cette variation en jouant sur le nombre de condensateurs en service et en faisant varier le courant inductif entre zéro et $+2613 \text{ A}$.

On réalise les combinaisons suivantes :

- L seul en service : courant réglable de 0 à $+2613 \text{ A}$
- L et C_1 en service : courant réglable de -1470 A à $+1143 \text{ A}$
- L et C_1 en service, courant réglable de -2940 A à $+327 \text{ A}$ (fig.IV.4)

On notera que les plages de fonctionnements se recouvrent. Ce chevauchement est requis pour assurer une transition stable lors des manœuvres des branches capacitatives. Noter aussi que la largeur des plages diminue en proportion avec la tension du réseau.

II.3.4- Système de commande et temps de réponse du compensateur statique :

Le compensateur statique permet de stabiliser très rapidement la tension de réseau à la valeur de consigne. Le système de commande lit en permanence la tension mesurée au primaire du transformateur de couplage (fig.II.12). Cette tension est comparée avec la valeur de consigne. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une stabilité de réseau, l'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci automatiquement la puissance réactance absorbée ou générée, en sélectionnant approprié de condensateurs mettre en service et angle α de l'inductance.

Comparativement à un compensateur synchrone rotatif du compensateur statique est au moins cent (100) fois plus rapide. La vitesse de réponse est due à l'action rapide des thyristors [doc V].

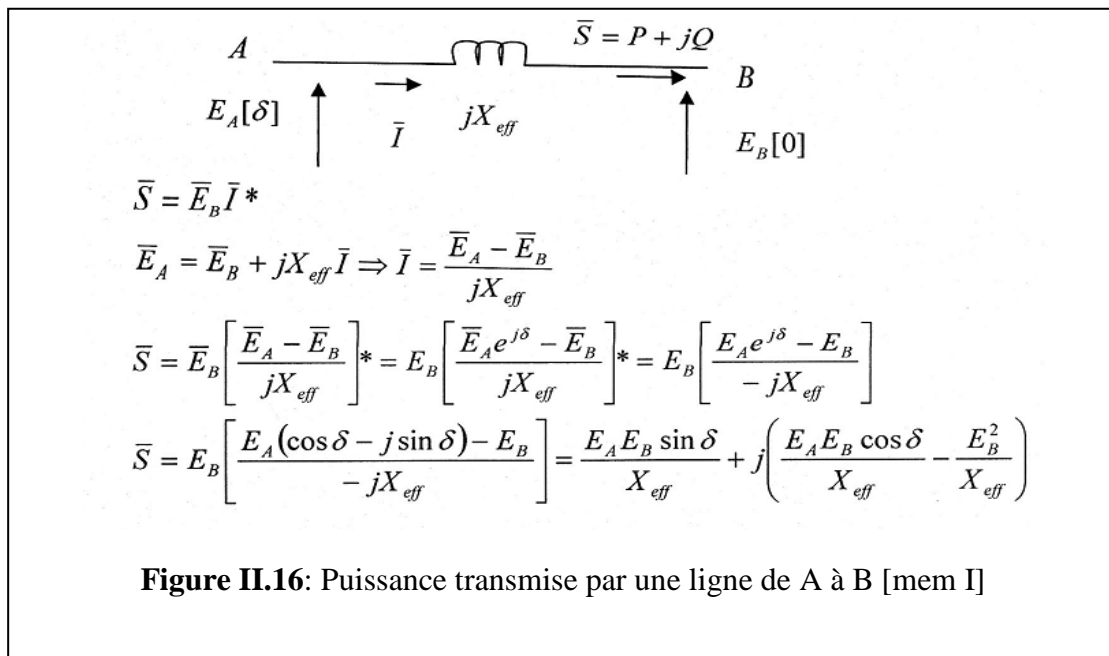
II.4. – CALCULS DES COMPENSATEURS SERIES :

II.4.1- Capacitance série commandée par thyristors à contrôle direct :

(TCSC: thristor controlled sreies capacitor)

Pour augmenter la capacité de transit en puissance d'une ligne on procède par installer un condensateur en série sur la ligne afin de diminuer la réactance de la ligne.

La puissance active totale transportée entre deux régions A et B est donné par l'expression :



Conclusion :

Les résultats qu'on vient de trouver montrent qu'il est possible de contrôler le niveau de tension sur un point de réseau en contrôlant les transits de puissances réactive. On a vu que les fluctuations de l'énergie réactive s'accompagne de variation de la tension.

En effet, une consommation importante d'énergie réactive par les charges produit des chutes de tensions et une fourniture importante d'énergie réactive des charges au réseau engendre des surtensions.

En appliquant des dispositifs de compensation d'énergie réactive comportant des capacités et des inductances, nous avons pu rétablir la tension dans la plage admissible à chaque perturbation importante. Donc la compensation dans l'énergie réactive est un moyen de contrôle de la tension.

Si des calculs bien précis son faits, on peut déterminer la valeur de l'inductance à rajouter en shunt pour diminuer les surtensions ou la valeur de la capacité en shunt qui va soutenir la tension au point de sa connexion lors des chutes de tension. La compensation de l'énergie réactive peut donc participer de manière efficace à stabiliser la tension sur les réseaux électrique.

Chapitre III:

Modélisation du compensateur statique de l'énergie réactive (SVC)

Introduction

Tout système, électrique, mécanique, hydraulique, peut être représenté par un modèle qui regroupe l'ensemble des paramètres qui caractérisent son fonctionnement et synthétise les lois de commandes reliant les grandeurs de sortie aux grandeurs d'entrées.

Pour les systèmes électriques la modélisation est une technique très utilisée. Elle sert à étudier mathématiquement un système en établissant un modèle mathématique se basant sur des équations qui rendent compte des phénomènes physiques et qui lient les différentes parties du système. Ainsi, on peut résoudre des systèmes électriques à plusieurs paramètres (tension, courant,...) par des modèles qui remplacent les relations physiques entre ces paramètres par des relations mathématiques équivalentes.

Dans ce chapitre, nous allons voir quelque modèle utilisée pour l'étude du compensateur statique d'énergie réactive SVC.

III.1- Modélisation du SVC:

Il existe plusieurs modèles de SVC, nous allons choisir le schéma de figure (III.17) pour construire son modèle.

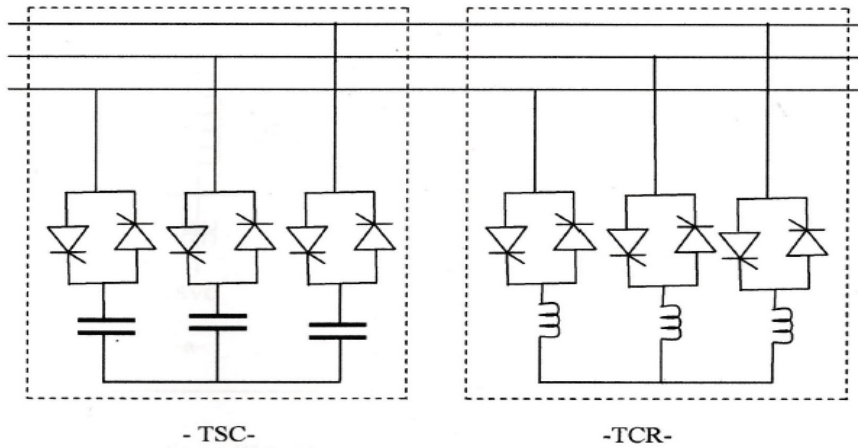


Figure III.1-: Schéma de principe de SVC [thsV]

D'après ce schéma de fonctionnement, nous allons construire les trois modèles du compensateur statique d'énergie réactive ; à savoir le modèle statique, le modèle généralisé ou standard et le modèle dynamique.

III-1.1-Modèle statique du SVC :

On propose un modèle pour des études statiques des réseaux, il est constitué d'éléments classiques : des nœuds PV, des nœuds PQ, des réactances, des susceptance, comme on le remarque sur la figure suivante :

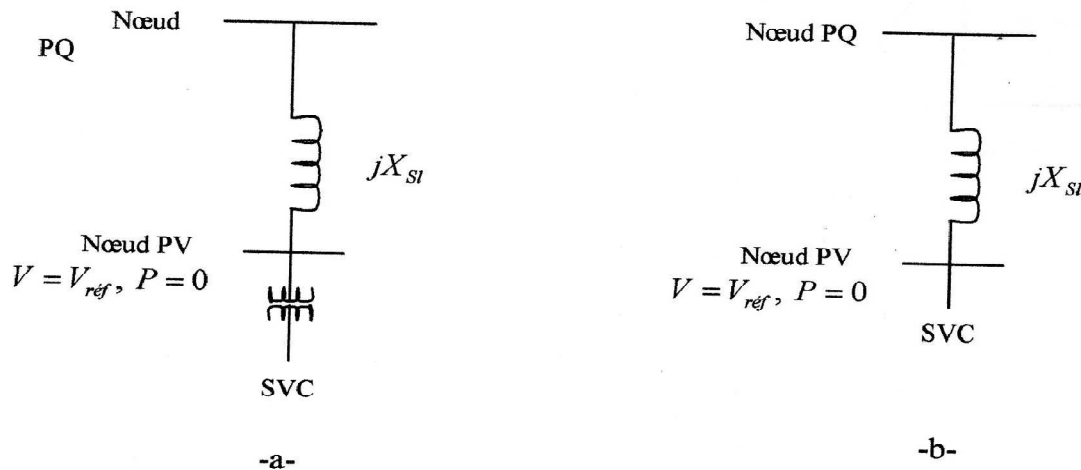


Figure.III.2 : Modèle statique du SVC [ths III]

Ce modèle décrit le fonctionnement du SVC dans la zone de régulation avec la pente X_{SL} de 1 à 5% [docIII]

Figure-a : le modèle prend en considération le transformateur de connexion du SVC en rajoutant sa réactance à la réactance totale.

Figure-b : le modèle ignore l'existence du transformateur de connexion.

Pour des raisons de normalisation, un modèle statique standard a été recommandé par la CIGRE et ensuite par IEEE.

Le modèle standard est représenté par sa caractéristique courant-tension sur la figure III-3

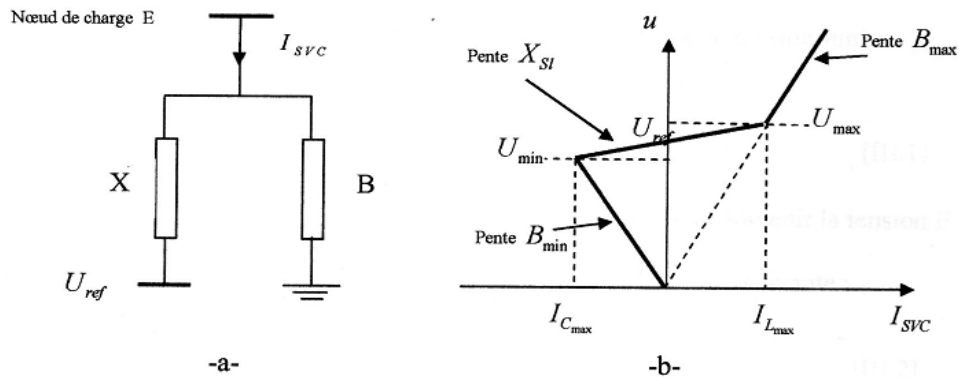


Fig III.3- : modèle et caractéristique du SVC [ths III]

Avec :

E : tension au nœud de charge où est connecté le SVC.

I_{SVC} : Courant de sortie du SVC.

X, B : Impédance et susceptance permettant de reproduire la caractéristique statique.

U_{ref} : Tension de référence autour de laquelle on veut asservir U .

I_{Lmax} : Courant inductif maximal.

I_{Cmax} : Courant capacitif maximal.

U_{max} : Tension maximal de fonctionnement en régulation.

U_{min} : Tension minimal de fonctionnement en régulation

X_{SI} : Pente de la caractéristique statique dans la zone de régulation.

B_{min} : Pente de la caractéristique statique dans la zone de surcharge capacitive.

B_{max} : Pente de la caractéristique dans la zone de surcharge inductive.

Ce modèle représenté sur la figure III.3 est constitué d'un nœud de charge du réseau E et d'un nœud à tension fixe U_{ref} , les deux nœuds sont reliés par une impédance fixe X , une susceptance relie le nœud de charge et le potentiel nul, la susceptance est par définition la partie imaginaire de son admittance.

L'avantage principal de ce modèle, c'est qu'il représente de manière exacte les zones de fonctionnement portées sur la caractéristique statique du SVC à savoir la zone de régulation. La zone de surcharge capacitive et la zone de surcharge inductive.

Les paramètres X et B représentent les caractéristique statiques vont changer d'une zone à une autre ; ils sont spécifiques pour chaque zone .Si le SVC échange de l'énergie réactive entre $-Q_{\min}$ et $+Q_{\max}$, nous aurons les trois cas suivants :

III.1.1.1-Zone de surcharge capacitive:

Si la tension de nœud de charge E diminue en dessous de la tension limite U_{\min} C'est-à-dire

$$E < U_{\min}$$

Dans ce cas, le SVC doit connecter un banc de condensateur pour soutenir la tension E.

La pente BBC de la caractéristique sera donnée par l'équation suivante :

$$B_C = \frac{Q_{\min}}{U_{\min}^2}$$

Le courant généré par le SVC est de l'expression :

$$I_{SVC} = -B_C \cdot E$$

Modèle correspondant pour ce cas de figure est de mettre sur la figure III.3-a :

$$B = B_{BC}$$

X sera déconnectée

On obtient le modèle suivant :

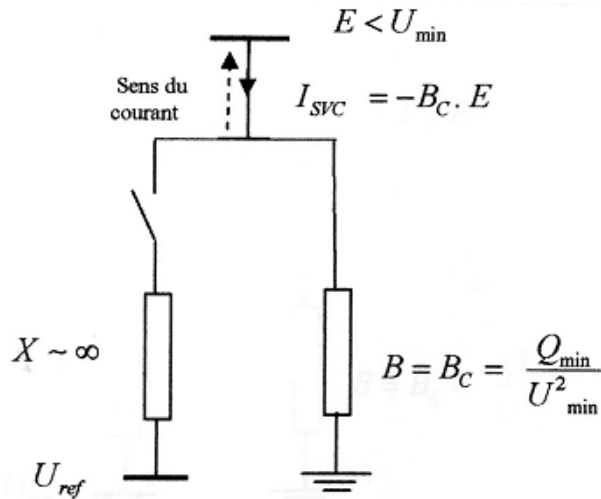


Figure III.4 modèle statique pour la zone de surcharge capacitive

III.1.1.2: Zone de surcharge inductive : $E > U_{\max}$

Si la tension de nœud de charge E dépasse la tension limite U_{\max}

C'est- à-dire

$$E > U_{\max}$$

Dans ce cas, le SVC doit absorber de l'énergie réactive par la connexion des inductances .

La pente B_L de la caractéristique statique correspond à la caractéristique des inductances qui est donnée par l'expression suivante :

$$B_L = \frac{Q_{max}}{U_{max}^2}$$

Le courant absorbé par le SVC est d'expression :

$$I_{SVC} = +B_L \cdot E$$

Le modèle correspond pour ce cas de figure est sur la figure III.3-a :

$$B = B_L$$

X sera toujours déconnectée.

On obtient le modèle suivant :

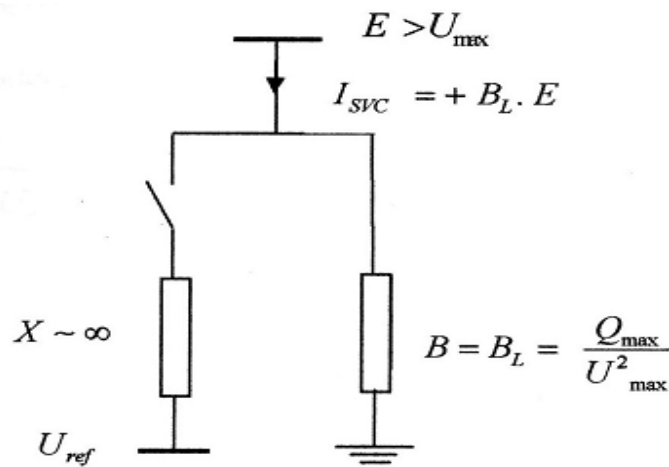


Fig III.5-modèle statique pour la zone de surcharge inductive .

III.1.1.3- Zone de régulation : $V_{min} < E < V_{max}$

La zone de régulation est située entre les deux zones de surcharge (inductive et capacitive)

C'est-à-dire : $V_{min} < E < V_{max}$

Dans cette la caractéristique statique du SVC est régie par l'équation suivante

$$U_{ref} + X_{SI} \cdot I_{SVC} = E$$

La régulation se fait par le contrôle de paramètre X_{SI} qui représente la pente de la caractéristique .cette zone est limitée par les deux valeurs maximales de courant :
-courant maximal capacitif :

$$I_{Cmax} = -\frac{Q_{max}}{U_{max}}$$

-courant maximal inductif :

$$I_{Lmax} = +\frac{Q_{max}}{U_{max}}$$

Dans ce cas, le SVC échange l'énergie réactive entre Q_{min} et $+Q_{max}$. Le modèle statique correspondant est sur la figure III.3-a :

$$X = X_{SI}$$

B sera déconnecté

On obtiendra le modèle suivant :

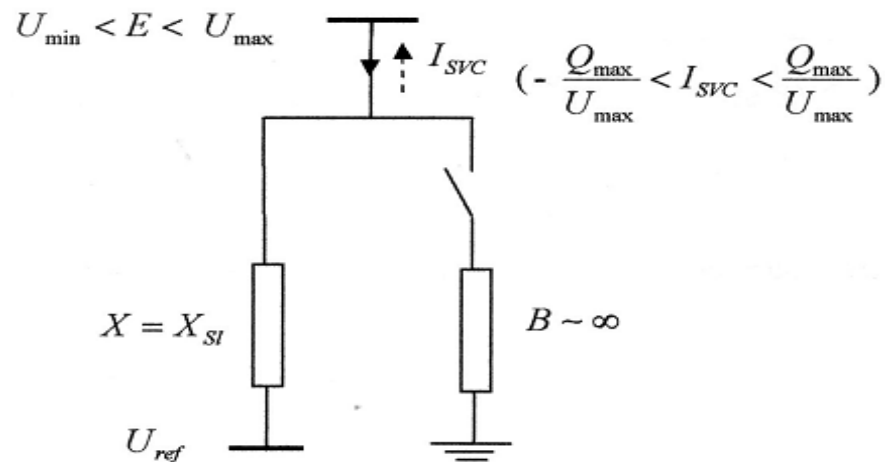


Fig.III .6-Modèle statique pour la zone de régulation.

Ainsi les trois zones de fonctionnement sont représentées par ces modèles statiques qu'on vient de voir, le modèle statique est facile à introduire dans les logiciels de calculs de répartition de charge, cette facilité est un avantage mais sa diminue sa précision car il ne tien pas en considération les pertes actives dues aux éléments constitutif du SVC.

III .2-Modélisation dynamique de SVC :

Le SVC fonctionne en mode de régulation de la tension, tel que sa vitesse de réaction a une variation de tension du réseau, c'est la réponse dynamique du SVC. Dans l'étude dynamique des réseaux, on ne peut utiliser les modèles statiques vus précédemment, donc il est nécessaire de construire des modèles dynamiques qui facilitent le traitement du comportement dynamique des réseaux dans les logiciels d'application.

La construction des modèles dynamiques est basée sur des modèles statiques en tenant compte de diverses boucles de régulation.

III.3-Analyse du SVC :

Pour une analyse dynamique du SVC dans le domaine temporel, les modèles de SVC doivent représenter son comportement uniquement en séquence directe pour des analyses de stabilité transitoire et de stabilité dynamique (rapide et long terme).

Pour des analyse électromagnétiques et de résonance sous synchrone, il est nécessaire d'utiliser des modèles plus élaborés, comme les modèles triphasés. Les modèles dynamiques intéressantes pour cette étude sont ceux qui suivent la modélisation classique du système de régulation de s générateurs, c'est-à-dire, des fonctions de transfert par modules.

L'objectif principal du SVC est de commander la tension au nœud de connexion. Ainsi le SVC utilise un système de commande en boucle fermée.

III.4-Modèles standards

Des modèles de bases appropriés à des études à caractère général ont été recommandées par la CIGRE [2,3,6] . La figure III-7 présente deux modèles recommandés par la CIGRE pour la modélisation du SVC, qui ont comme différence les systèmes de régulation.

Ces modèles sont appropriés pour réaliser des études générales de stabilité dans lesquelles les caractéristiques spécifiques spéciales des SVC n'affectent pas des analyses de stabilité. Ces modèles peuvent être aussi utilisés pour faire des études préliminaires sur des nouvelles installations de SVC. Pour des études détaillées qui reflètent les particularités du SVC, les modèles utilisées dépendront de chaque type de SVC.

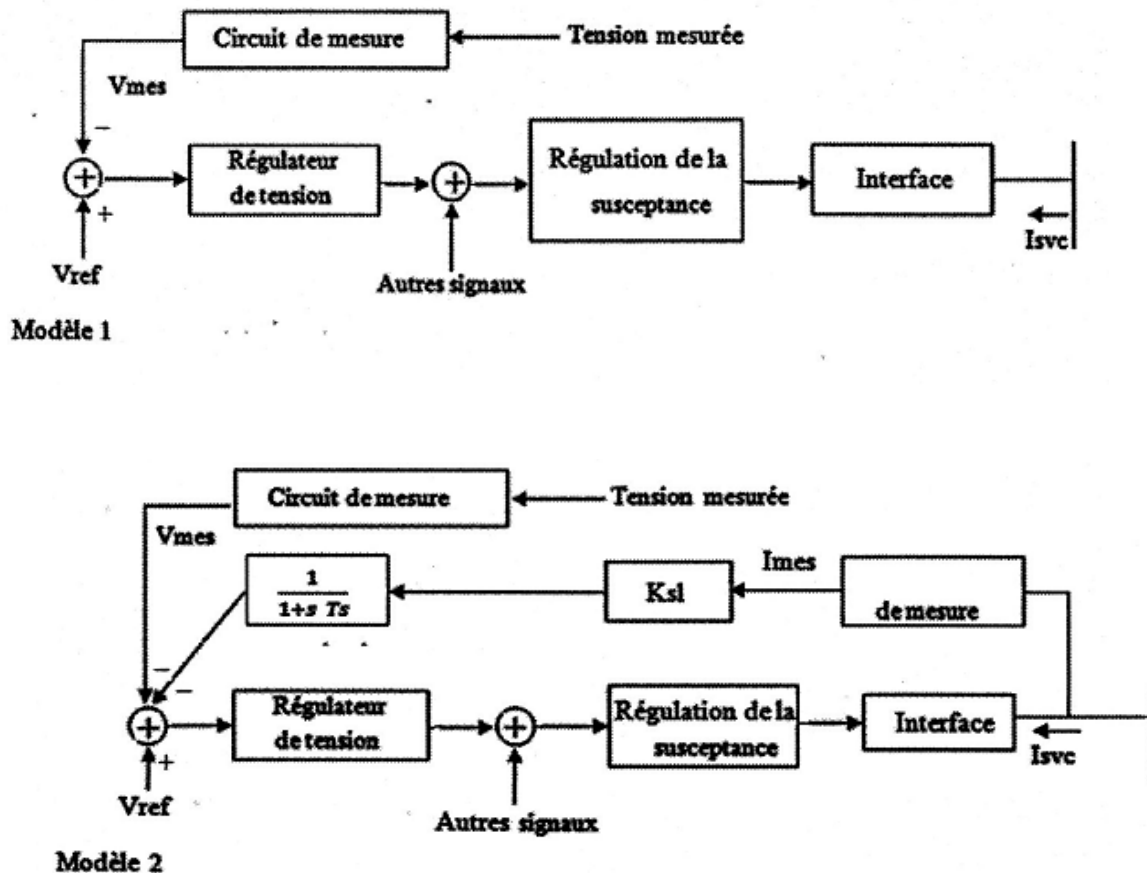


Fig III.7- Modèles dynamique de SVC recommandés par la CIGRE

Fondamentalement, les modèles standards sont constitués des modules suivants :

Module du système de mesure

Module de régulation de tension

Module de régulation de la susceptance

Module de l'interface avec le réseau

- **Module de mesure :**

L'équipement de mesure converti la tension et le courant triphasés en signaux quasi continus proportionnels à l'amplitude de la variable mesurée. Ce module est modélisé par un filtre passe-bas ayant la fonction de transfert suivante :

$$H_{mes} = \frac{1}{1+sT_m} \quad , H_{mes} = \frac{V_{mes}}{V_{reseau}} \quad \text{Ou} \quad H_{mes} = \frac{I_{mes}}{I_{reseau}}$$

Où

T_m : La constante de temps du système de mesure, avec une valeur typique comprise entre 1 et 8 ms .

● **Module de régulation de tension :**

Ce module réalise la commande de tension en comparant la tension mesurée avec la tension de référence. Si on utilise un régulateur de type proportionnel (figure III....), l'inverse du gain K_r sera égal à la caractéristique V-I désirée pour le SVC (X_{SL}), c'est-à-dire :

$$K_r = \frac{1}{X_{SL}}$$

La constant du temps (T_r) est typiquement comprise entre 20 et 150ms . Le bloc $\frac{1+sT_1}{1+sT_2}$ permet d'obtenir une marge de phase appropriée et d'améliorer l'amortissement de l'oscillation.

Si on utilise un régulateur de type intégral (Figure III.7-1) il est nécessaire d'introduire une boucle de courant telle qu'elle est représentée en figure III.7-2.

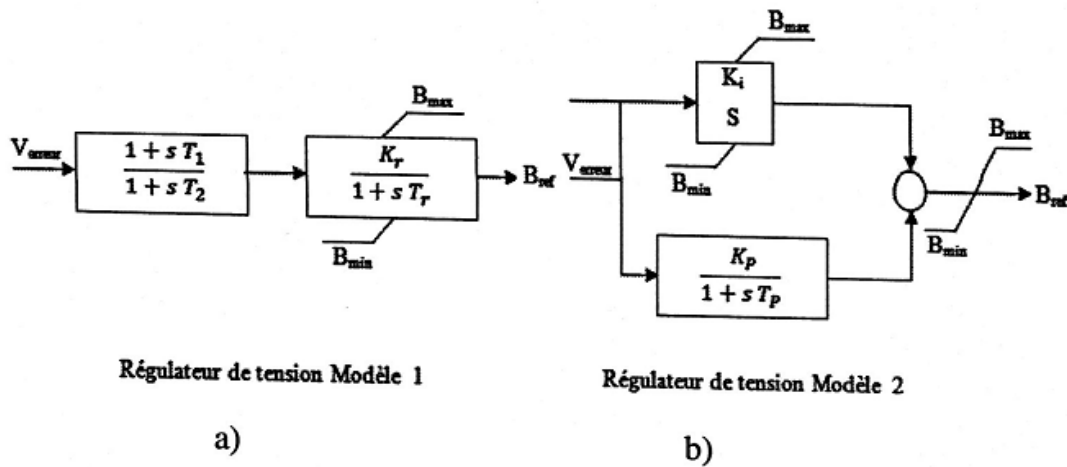


Figure III.8 : Type de régulateur de tension du SVC

Fig III.8.b: Type de régulateur de tension du SVC

Pour des études préliminaires, on peut choisir les constantes

$T_m=T_1=T_2=T_p=T_d= T_b=T_s=K_p=0$, de telle manière que l'on puisse relier les deux modèles par les équations :

$$K_r = \frac{1}{K_p} = \frac{1}{X_{sl}} \quad \text{et} \quad T_r = \frac{1}{K_{sl}K_t}$$

Où K_p est le gain proportionnel et K_i est le gain intégral du régulateur du module 2, XSI est la pente de la caractéristique V-I du SVC.

Ainsi, les réponses des correcteurs seront les mêmes avec les deux modèles. La différence pratique de l'utilisation de l'un ou de l'autre régulateur est basée sur le type de signaux mesures. La plupart des SVC installés le régulateur intégral, qui élimine l'erreur d'état stable.

La tension mesurée est utilisée pour calculer V_{erreur} , qui est aussi bien pour le régulateur proportionnel que pour le régulateur intégral, correspond à la tension primaire de transformateur de connexion du SVC au réseau, c'est-à-dire, à la tension à réguler. Alors que le courant employé est mesuré au secondaire du transformateur et il correspond au courant du SVC.

- **Module de régulation de la susceptance :**

Sa fonction de transfert est donnée par l'expression suivante :

$$H_B = \frac{e^{-sT_d}}{1+sT_b}$$

T_d : représente le temps de réponse de fonctionnement des thyristors («Gating Transport Delay »)- typiquement autour de 1ms) et T_b représente la constante de temps de la séquence de régulation (« Firing Séquence control »)- typiquement autour de 5ms).

En outre, il existe une relation non linéaire entre la sortie du SVC (B) et l'angle d'action.

III .5- Inconvénients des SVC :

Une forte dépendance des systèmes électriques de la compensation par SVC laisse prévoir des risques d'effondrement en tension des réseaux, étant donné qu'ils fonctionnent déjà à leur limite d'exploitation. Ceci est le résultat de la relation $Q=f(V^2)$ (expressions [1] , [2]) reliant la puissance réactive générée hors de la zone de régulation à la tension que le SVC doit maintenir proche de la valeur de consigne . Le SVC fonctionne comme une susceptance reliée en shunt sur le nœud de connexion hors de régulation

Conclusion

L'insertion d'un SVC dans un système de puissance nécessite l'établissement d'une commande pour assurer son fonctionnement, cette commande est élaborée après avoir réalisé un modélisation aussi bien en régime statique que dynamique des SVC.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des SVC ainsi que les différents modes de fonctionnement.

Chapitre IV:

Simulation d'un systeme de compensation par
SVC

Introduction:

Dans cette partie nous allons essayer de montrer de manière qualitative l'apport d'une compensation statique d'énergie réactive par SVC à un réseau électrique. Nous avons vu au chapitre III que le SVC peut avoir plusieurs modes d'action , selon le besoin du réseau en énergie réactive . Il peut être en TSR , en TSC et les deux à la fois forment le SVC .

Une bonne exploitation des réseaux électriques est conditionnée par le respect des valeurs limites de tension. Dans certains cas défavorables lors des variations brusques de charges importantes, il est utile de recourir à la compensation d'énergie réactive pour éviter des fonctionnements hors des plages de tensions admissibles.

Nous considérons un réseau électrique modélisé par un générateur alternatif monophasé en séries avec une ligne en PI , le tout est connecté à un ensemble de charges . En premier lieu nous allons voir l'apport d'un TCR pour éviter les surtensions , puis l'apport d'un TSC pour éviter les des sous-tension et enfin , l'apport des deux en un seul système .

IV.1- présentation du réseau :

Nous avons choisi de faire toutes les simulations sur un réseau monophasé alternatif pour faciliter l'étude. Pour avoir le système réel en triphasé et en considérant que le système est équilibré, il suffit de mettre trois réseaux monophasés en seul système.

IV.1.1-Modèle de base :

La figure IV.1 montre le modèle de réseau monophasé en question. Il comporte les éléments suivants :

-Un générateur de tension alternatif de valeur de tension maximale $V_{\max}=400\text{KV}$

La tension de la source est alors

$$V_s(t)=400.10^3 \cdot \cos(314t) .$$

-Une ligne en PI modélisée par :

- Une résistance de $0.2568\Omega/\text{km}$
- Une inductance de $0.002 \text{ H}/\text{km}$
- Une capacité de $8,6.10^{-9} \text{ F}/\text{km}$
- Une longueur de 100 km
- Nombre de sections =1.

-Une charge principale caractérisée par :

- Une tension nominale de 4.10^2 kV .
- Une puissance active de 100 MW .
- Une puissance réactive inductive de 5 kVar .
- Une puissance réactive capacitive 1 kVar .

-Les grandeurs alternatives fonctionnant à la fréquence de 50Hz .

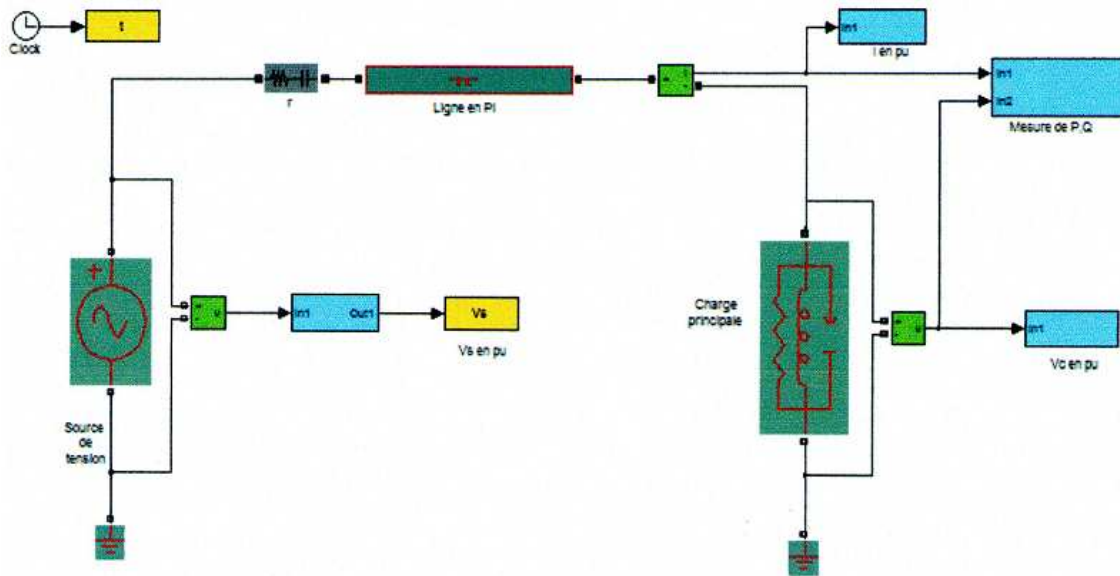


Figure IV.1 : Modèle de bases

Liste des blocs du système :

- Bloc de la source de tension alternative : Il modélise le générateur monophasé de tension alternative.
- Bloc de RLC séries : Il comporte uniquement une charge purement résistive très faibles (0.0001Ω) entre la source et la ligne , elle est rajoutée par ce qu'on peut pas mettre en parallèle deux sources de tension (générateur et capacité de la ligne).
- Bloc de la ligne en PI : Il modélise la ligne de transport d'énergie électrique.
- Bloc de charge RLC parallèle (charge principale) : C'est la charge connectée au réseau en fonctionnement normal.
- Bloc de mise à la terre : Il modélise un point de potentiel nul.
- Bloc de mesure de tension : Ce bloc mis en parallèle avec un élément du réseau permet de mesurer la tension à ses bornes.
- Bloc de mesure de courant : Ce bloc est connecté en série sur le réseau et permet de mesurer le courant.
- Bloc de mesure de puissance P et Q : Ce bloc permet de mesurer simultanément la puissance active et réactive consommée ou produit par un élément.
- Bloc de temps : Désigne la base de temps en fonction de laquelle varient les différentes grandeurs.
- Bloc de workspace : Relatif à l'espace de travail dans le logiciel Matlab.

IV.1.2- Valeur de base et valeur limites :

Pour faciliter les calculs, nous avons choisi des valeurs de bases pour la tension et le courant, celle de la puissance en sera déduite. Nous alors :

-Tension de base :

$$V_b=400 \text{ kV} \quad [\text{IV.2}]$$

-courant de base :

$$I_b=250 \text{ A} \quad [\text{IV.3}]$$

-Puissance de base :

$$S_b=V_b \cdot I_b \quad [\text{IV.4}]$$

$$S_b=400000 \cdot 250=100 \cdot 10^6 \quad [\text{IV.5}]$$

$$=100 \text{ MVA} \quad \text{et} \quad Q_b=100 \text{ MVar} \quad [\text{IV.6}]$$

Dans la suite de chapitre, toutes les courbes seront représentées en valeurs réduites. Nous avons choisi aussi deux tensions admissibles, l'une supérieure et l'autre inférieure et ont pour valeur respectives :

-Tension maximale admissible :

$$V_{\max}=420 \text{ kV} \quad [\text{IV.7}]$$

$$V_{\max}(\text{pu})=420/400=1.05 \text{ pu} \quad [\text{IV.8}]$$

$$V_{\max}(\text{pu})=1.05 \text{ pu} \quad [\text{IV.8}]$$

-Tension minimale admissible :

$$V_{\min}=380 \text{ kV} \quad [\text{IV.9}]$$

$$V_{\min}(\text{pu})=380/400=0.95 \text{ pu} \quad [\text{IV.10}]$$

$$V_{\min}=0.95 \text{ pu}$$

Toute tension en dehors de la plage limitée par ces deux valeurs extrémales (0.95 et 1.05) est considérée comme une perturbation qui doit être soit augmentée dans le cas d'une chute de tension ou diminuée dans le cas d'une surtension.

Les tensions limites admissible seront représentées par deux droites horizontales de valeurs 0.95 pu et 1.05 pu respectivement minimale et maximale. Nous allons voir après, que les variations brusques de la charge peuvent diminuer ou augmenter le niveau de tension dans le réseau .A chaque cas correspond un dispositif de SVC particulier qui sera connecté en shunt avec la charge à l'instant de l'apparition de la perturbation .L'utilisation des interrupteurs commandés par des signaux extérieurs permet une action instantanée des SVC. Mais il se peut que des pics de tension apparaissent. Pour atténuer ces pics, nous avons

installe des inductances qui empêchent les variations brusques de courant en série avec ces interrupteurs.

Nous allons faire les simulations suivantes.

- En premier lieu, un fonctionnement en régime normal, c'est-à-dire que la plage de tension admissible est respectée.
- Le premier cas de perturbation consiste à connecter des charges à des instants différents en shunt avec la charge principale de façon à faire augmenter la tension au-dessus de 1.05 pu. A l'instant de l'apparition de la perturbation, un TCR sera connecté en shunt pour faire baisser la tension.
- Le deuxième cas de perturbation consiste à connecter des charges de façon à faire baisser la tension au-dessous de 0.95 pu. Un TSC sera connecté en shunt pour rétablir la tension à un niveau acceptable.
- Le troisième cas de perturbation consiste à faire baisser la tension au-dessous de 0.95 pu puis l'augmenter progressivement jusqu'à ce qu'elle dépasse 1.05 pu. L'action appropriée est celle d'un TSC en premier, suivie de l'action d'un TCR qui va annuler l'action du TSC.
- Le quatrième cas est l'inverse du troisième, nous allons faire augmenter la tension jusqu'à ce qu'elle dépasse 1.05 pu, puis nous la ferons diminuer progressivement au-dessous de 0.95 pu. l'action appropriée est celle d'un TCR en premier, suivie de l'action d'un TSC qui va annuler l'action du TCR.

IV.2-Fonctionnement normale

La première simulation consiste à faire fonctionner le réseau dans des conditions qui donnent des tensions proches des valeurs nominales. C'est un cas de fonctionnement dans la plage de tension admissible fixée et ne nécessite aucune action de compensation d'énergie réactive.

Les figures suivantes donnent les courbes des grandeurs tensions, courant et puissances en valeurs réduites.

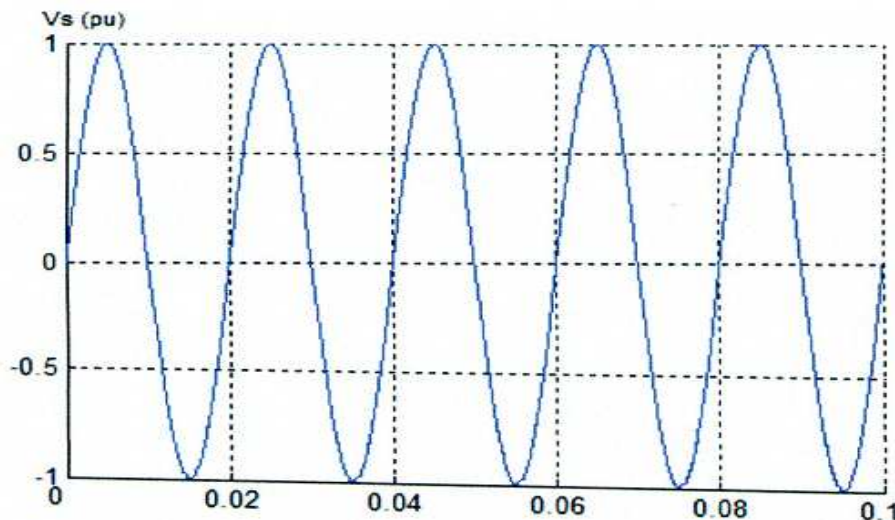


Figure IV.2-Tension de la source

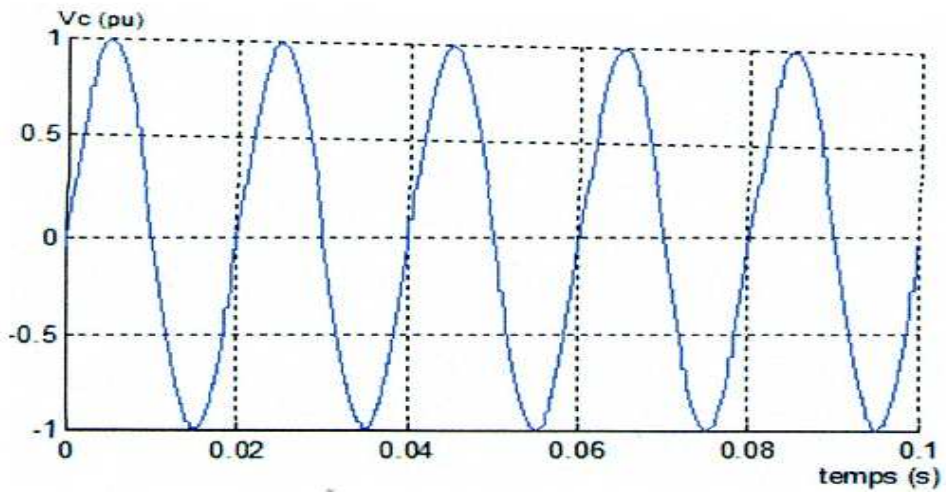


Figure IV.3- Tension de la charge

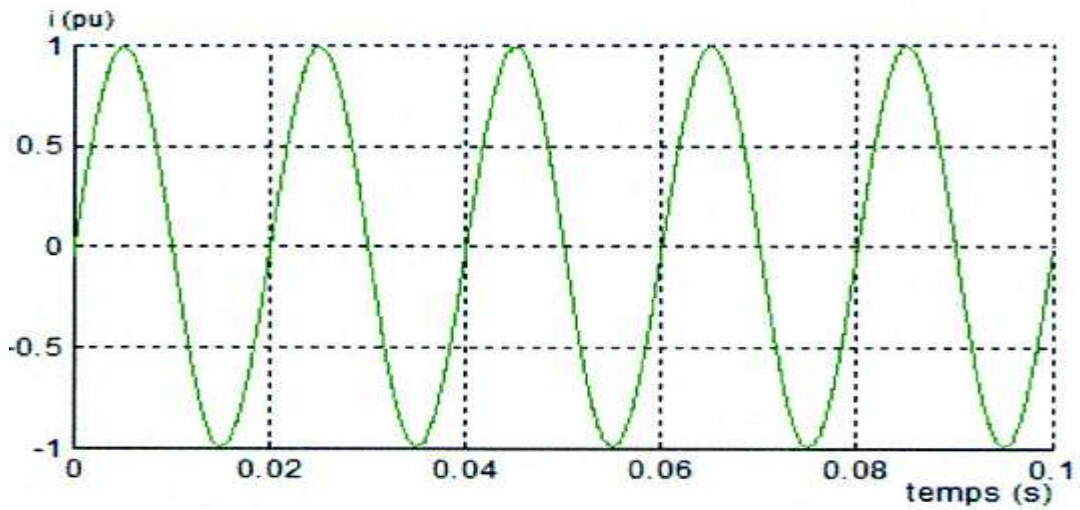


Figure IV.4-Courant dans la ligne

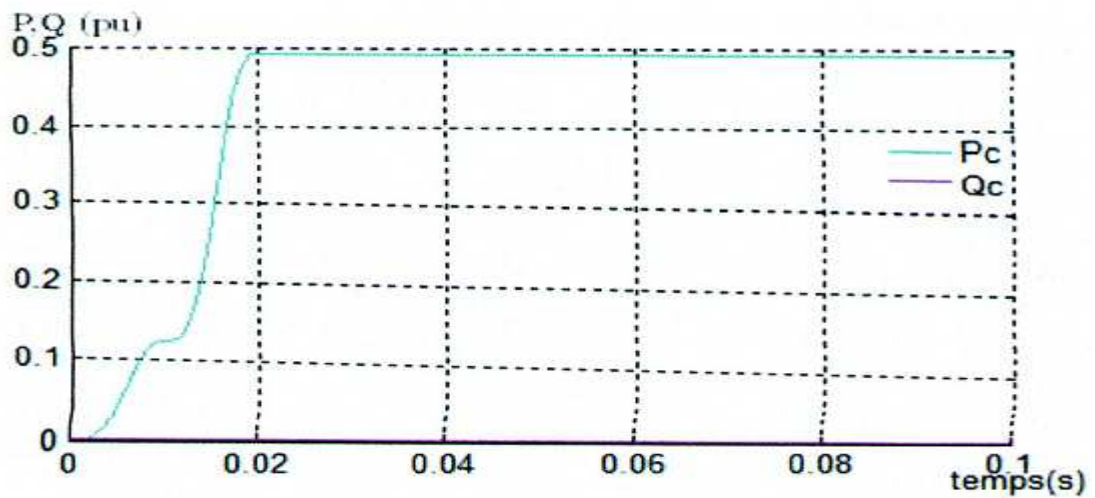


Figure IV.5 : Puissances active et réactive de la charge.

On remarque que sur la figure IV.3 la tension est de valeur maximale 1 pu, donc il est situé au milieu de la plage de tension admissible [0.95, 1.05] pu .On peut dire alors que le système fonctionne correctement et ne nécessite aucune compensation de l'énergie réactive.

Sur la figure IV.4, le courant de la ligne est représenté par une courbe sinusoïdale de valeur maximale 1 pu.

Sur la Figure IV.5, la courbe de puissance réactive est une droite confondue avec l'axe du temps, donc il n y a aucun échange d'énergie réactive (ou échange faible) entre la source et la charge. Cela veut dire que la charge principale connectée au réseau est résistive. Quand à la puissance active consommée par la charge, elle a une valeur 0,49 pu.

IV.3 : Action d'un TCR :

Contrairement au précédent où la tension de la charge était maintenue dans la plage admissible, nous avons dans ce cas trois charges perturbatrices qui vont faire augmenter la tension au-dessus de la limite 1.05 pu. Nous allons considérer des temps de connections différents pour les trois charges.

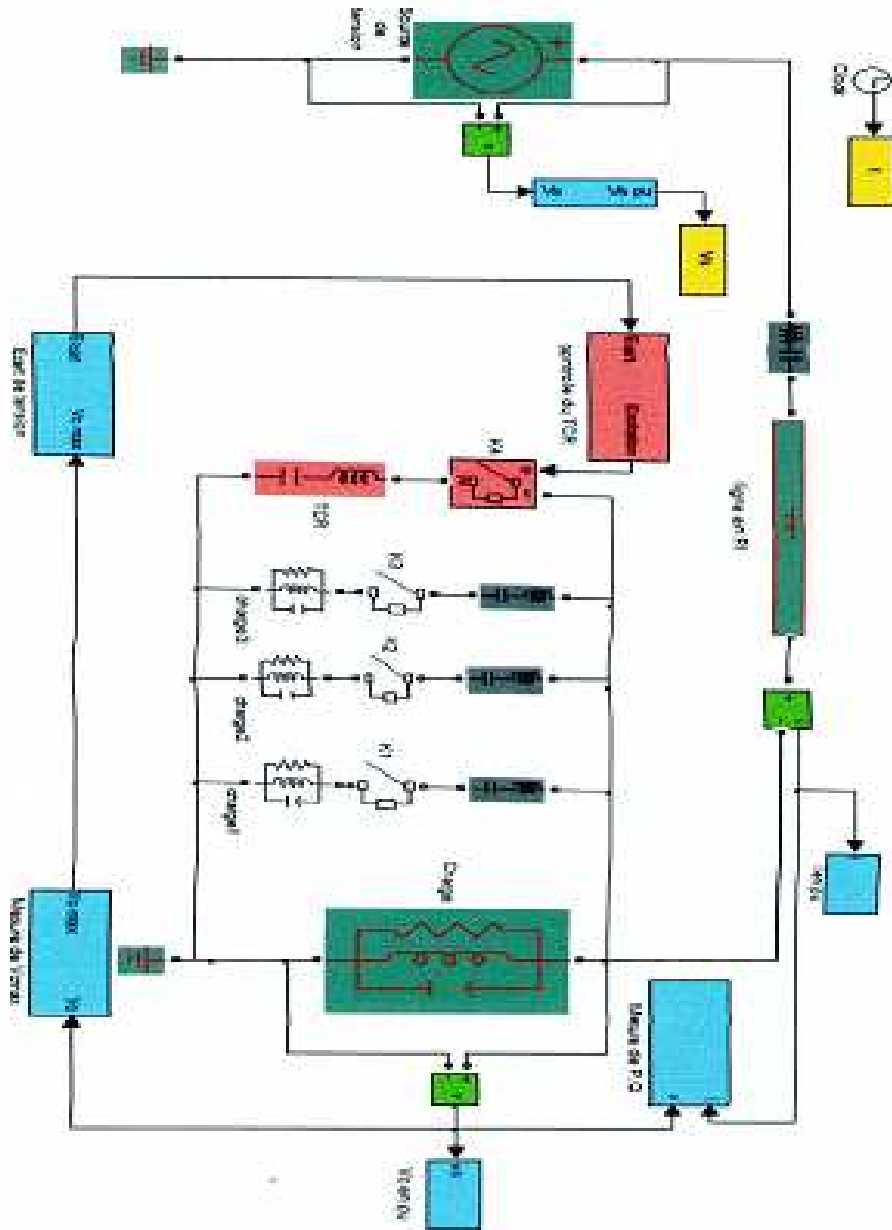


Figure IV.6 : Modèle correspondant à l'action d'un TCR

afin d'éviter les variations brusques et voir l'évolution de la tension en fonction de la charge. La figure IV.6 montre le modèle correspondant pour ce cas de figure.

Liste des blocs des systèmes :

Une série de blocs sont déjà définis au modèle de base (paragraphe IV.1.1), les blocs rajoutés sont les suivants :

-Trois blocs de charges RLC parallèle identiques ($charge_1$, $charge_2$ et $charge_3$). Ce sont des charges perturbatrices. Elles sont la cause de l'augmentation de la tension et leurs caractéristiques de puissances sont :

$$P=10kV$$

$$[IV.11]$$

$$Q_L=100\text{Var} \quad [IV.12]$$

$$Q_C= 70\text{MVar} \quad [IV.13]$$

-Trois blocs de charges inductives en série avec les interrupteurs : Leur rôle est de réduire les pics de courant. Elles ont pour valeur 15mH chacune.

-Un bloc de mesure de l'amplitude du fondamental de la tension de charge (Mesure de $V_{C_{max}}$) : Ce bloc nous permet d'avoir une courbe qui donne la variation de la valeur maximale de la tension en fonction du temps.

-Un bloc de mesure de l'écart de tension : Ce bloc comporte un sous-système donné sur la figure IV.7. Il donne l'écart entre la tension de crête de la charge et la tension maximale admissible (1,05 pu).

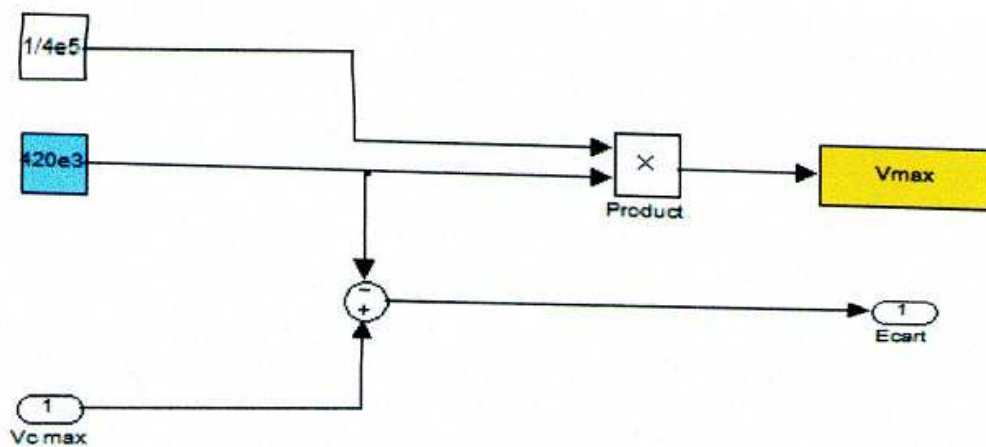


Figure IV.7 : Bloc de mesure de l'écart de tension

-Bloc de contrôle du TCR : Selon le signe de l'écart de tension, le bloc de contrôle du TCR envoie un signal à l'interrupteur K_4 . Le sous-système de ce bloc est donné par la figure suivante :

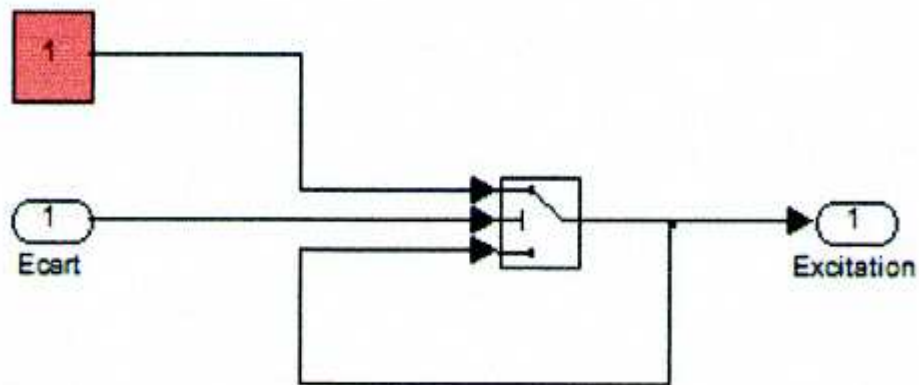


Figure IV.8 : Bloc de contrôle du TCR

Le signal d'excitation de l'interrupteur K_4 est donné comme suit :

-Egale à 1 si l'écart de tension est strictement supérieur à 0.

Dans ce cas nous avons :

$$V_{c \max} - 400.10^3 > 0 \quad [IV.14]$$

$$V_{c \max} > 400.10^3 \quad [IV.15]$$

La tension maximale dépasse la limite admissible, le signal d'excitation connecte le TCR en shunt avec les charges pour faire baisser la tension.

-Egale à 0 le cas contraire.

-Bloc TCR : Il modélise le compensateur statique d'énergie réactive de type TCR. L'inductance est choisie de telle manière à donner à la charge une tension dans la plage admissible après la connexion du compensateur, elle a pour valeur :

$$L_{TCR} = 3 \text{ H} \quad [IV.16]$$

Nous allons considérer maintenant deux cas séparément. Le premier consiste à faire une simulation sur le modèle de la figure IV.6 en déconnectant le TCR pour voir la perturbation de la tension. Le deuxième consiste à faire la même simulation en appliquant un TCR pour voir son apport au réseau et comparer les deux systèmes avec et sans compensation.

IV.3.1-Avant la connexion du TCR :

On suppose d'abord que le compensateur statique d'énergie réactive est déconnecté du réseau. Les résultats trouvés seront comparés plus tard aux résultats du même système avec le TCR connecté au réseau à l'instant de la perturbation. Donc pour le réseau de la figure IV.6 sans TCR on obtient le résultat suivant :

-Tension de la charge :

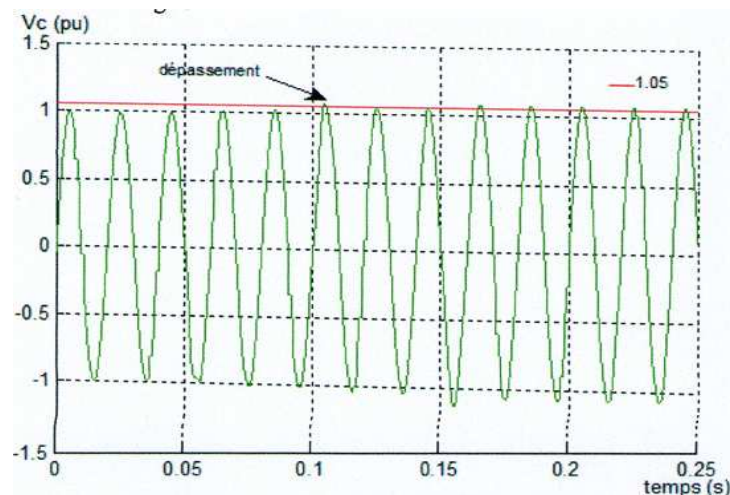


Figure IV .9 : Tension de la charge sans TCR.

On voit sur la figure IV.9 que la connexion des charges 1,2 et 3 a fait augmenter le niveau de tension au point de connexion de la charge. La nouvelle tension n'est pas maintenue dans

la plage admissible. On voit sur la figure suivante de manière exacte la valeur de la tension maximale aux bornes de la charge.

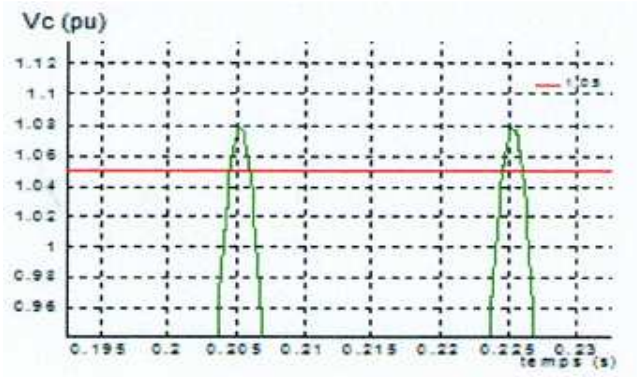


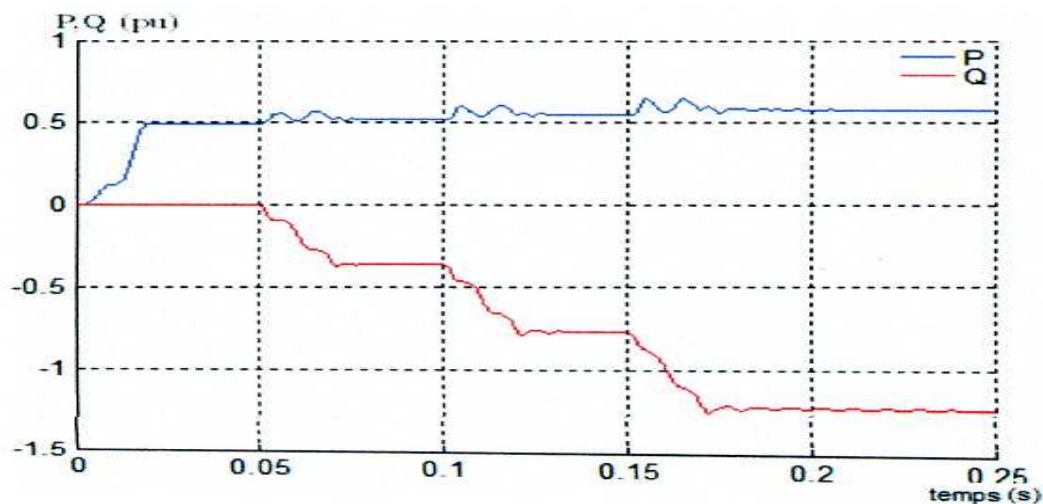
Figure IV.10 : Agrandissement d'une partie de la figure IV .9.

La valeur maximale de la tension de la charge est alors :

$$V_{c \max} = 1,076 \text{ pu} \quad [\text{IV.17}]$$

Cette augmentation significative de la tension est due à la circulation d'une importante puissance réactive de la charge vers la source. La figure qui suit met en évidence ce qu'on vient de dire

-Puissance active et réactive de la charge :



Alors que la puissance réactive est nulle pour la charge principale seule, elle a atteint progressivement la valeur de -1.22 pu après le branchement des trois charge perturbatrices .On remarque que la puissance active a subit aussi un changement.

-Courant avant l'intervention du TCR de la ligne :

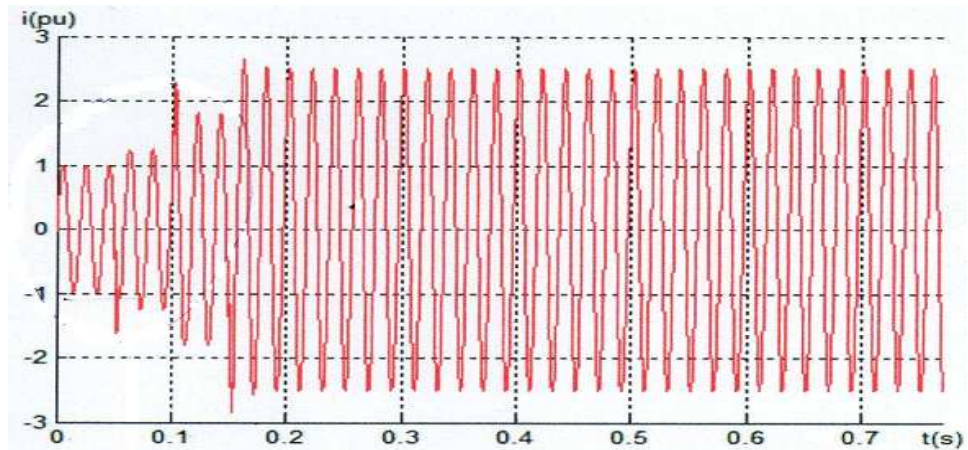


Figure IV.12 : Courant de la ligne avant l'intervention du TCR .

On voit sur cette figure que le courant de la ligne augmente à chaque connexion d'une charge perturbatrice. Au branchement des trois charges (1,2 et 3), le courant a une valeur maximale de 2.51 pu. Cette augmentation est due aux trois charges qui fournissent une importante puissance réactive au réseau. On remarque l'apparition de pics de courant produits par les actions interrupteurs.

IV.3.2-Après la connexion du TCR :

Dans ce cas, dès que la tension de la charge dépasse la tension admissible 1.05 pu, le TCR sera connecté par l'interrupteur T_4 . Les résultats trouvés sont les suivants :

-Tension de la charge :

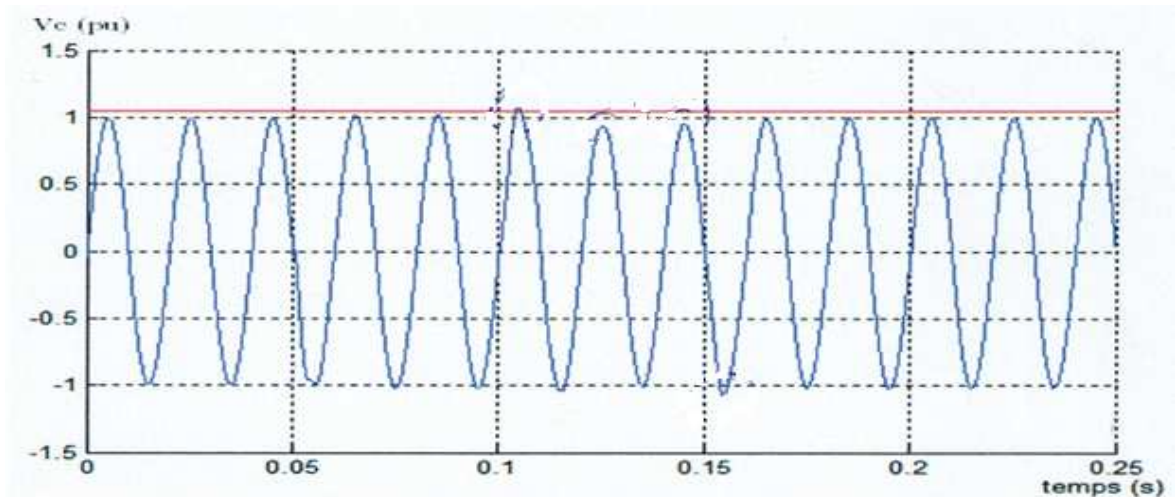


Figure IV.13 : Tension de la charge avec TCR

-Puissance active et réactive de la charge :



Figure IV.14 : Puissance active et réactive de la charge avec TCR

Sur la figure IV.13, on voit bien que la tension de la charge avec une compensation par TCR est inférieure à la tension maximale admissible (1.05 pu). La tension se stabilise à la valeur de 1 pu après quelques périodes de fluctuation dus aux interrupteurs alors qu'elle était supérieure avant l'application de la compensation d'énergie réactive (1.076 pu).

Sur la figure IV.14, on constate que la puissance réactive est passée de -1.22 pu sans compensation à la valeur -0.2 pu avec compensation. Cela veut dire que la puissance réactive fournie par la charge au réseau a diminué de 1.02 pu. Par cette action, le transit d'énergie réactive est diminué de manière conséquente, on remarque que la puissance active a repris sa valeur après un pic à l'instant de la fourniture de Q.

-Courant de la ligne :

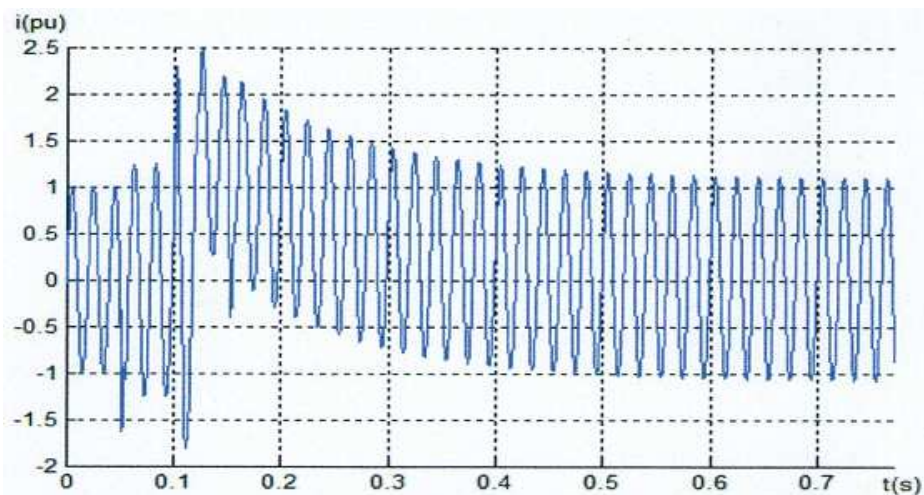


Figure IV.15: courant de la ligne après l'intervention du TCR.

Le courant de la ligne après l'application du TCR a diminué d'une valeur maximale de 2.5 pu pour se stabiliser à une valeur inférieure de 1.09 pu. Cette diminution est due à la connexion du TCR qui fait diminuer le transit de puissance réactive de la charge vers le reste du réseau.

IV.3.3-Comparaison graphique :

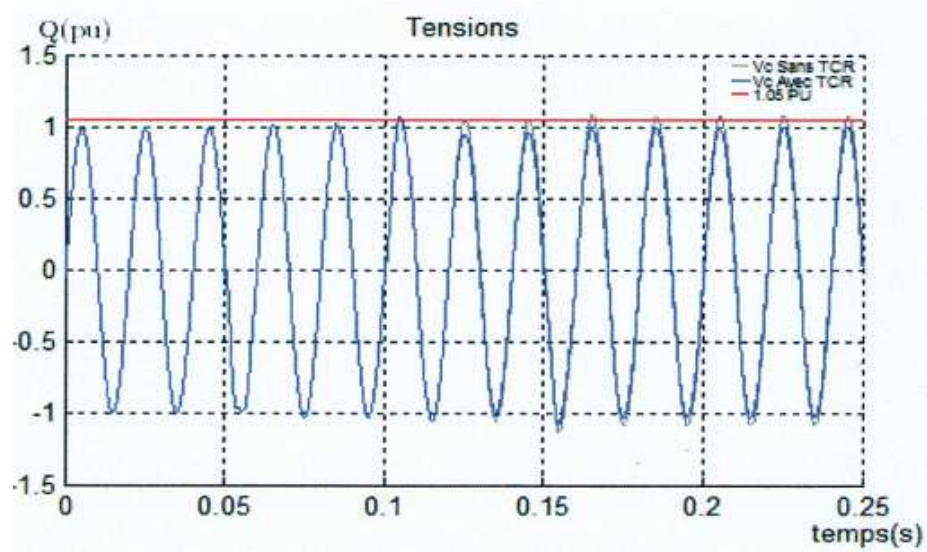


Figure IV.16 : Tension de la charge avec et sans compensation.

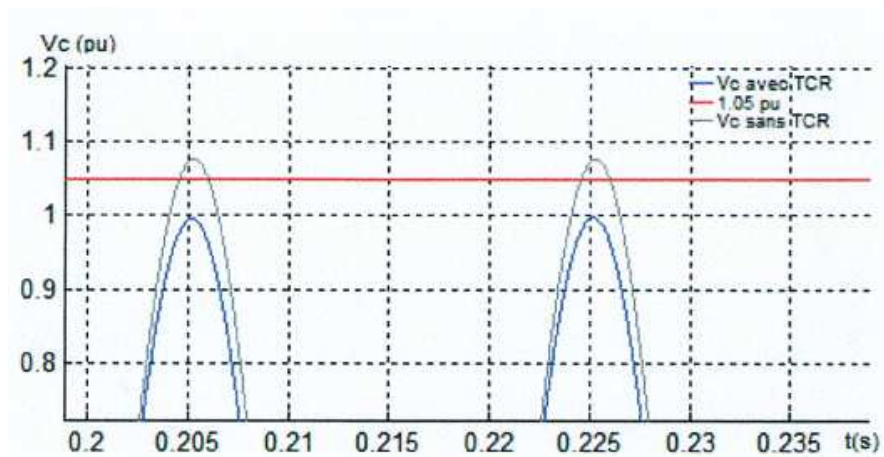


Figure IV.17: Agrandissement d'une partie de la la figure IV.16



Figure IV.19: Courant de la ligne avec et sans compensation.

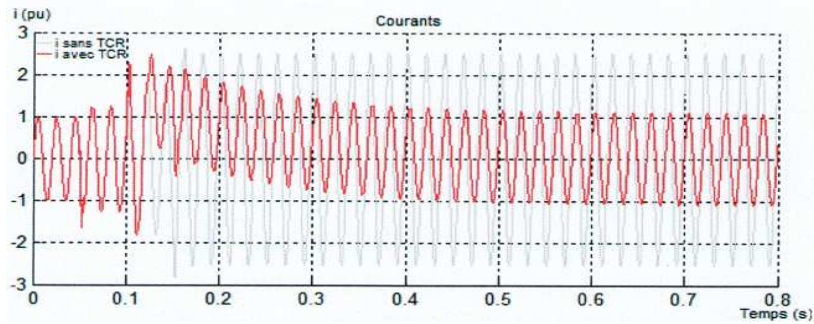


Figure IV.19 : Courant de la ligne avec et sans compensation

IV.4-Action d'un TSC :

Dans cette partie nous allons faire l'inverse de la partie précédente, c'est-à-dire que nous allons connecter trois charges perturbatrices qui vont faire chuter la tension au-dessus de la tension admissible 0,95 pu. Pour cela, nous adoptons le modèle suivant :

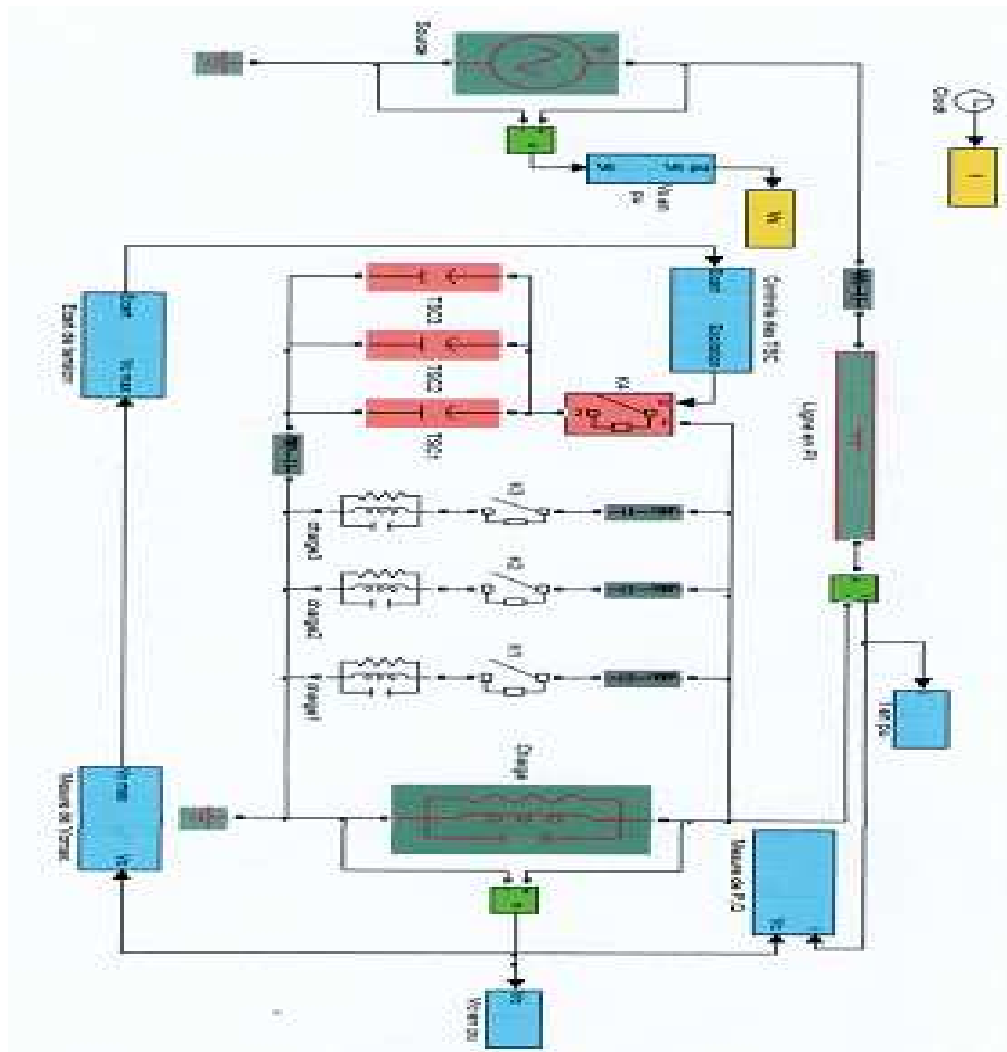


Figure IV.20: Modèle correspondant à une action d'un TSC.

Liste de blocs du système :

Certains blocs ont été définis aux paragraphes précédents, les blocs supplémentaires sont les suivants :

-Trois blocs de charges RLC parallèle identiques ($charge_1$, $charge_2$, et $charge_3$). Ce sont des charges perturbatrices. Elles sont la cause de la chute de la tension et leur caractéristiques de puissance sont :

$$P=100 \text{ MW} \quad [IV.18]$$

$$Q_L=5 \text{ MVar} \quad [IV.19]$$

$$Q_c=1 \text{ kVar} \quad [IV.20]$$

-Quatre blocs de charges inductives en série avec les interrupteurs : Leur rôle est de réduire les pics de courant. Elles ont pour valeur 1H chacune.

-Blocs de mesure de l'écart de tension :Ce bloc comporte un sous-système donné sur la figure IV.21. Il donne l'écart entre la tension minimale admissible (0.95 pu) et la valeur de crête de la tension de la charge.

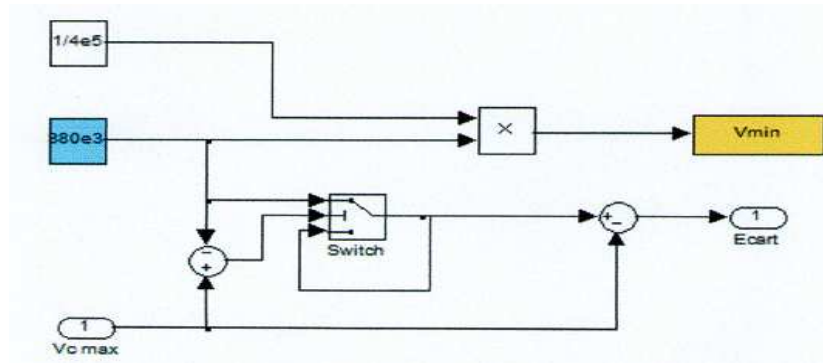


Figure IV.21 : Bloc de mesure de l'écart de tension.

On remarque que ce bloc comporte une condition (switch) qui laisse ouvert le TSC malgré que la tension soit inférieure à 0.95 pu et cela pour les raisons suivantes :

La courbe $V_{c \max}$ qui est donnée sur la figure IV.22 est comparée à la constante V_{\min} de valeur 0.95 pu. Le système de la figure IV.20 connecte le TSC à l'instant où la tension $V_{c \max}$ devient inférieure à V_{\min} . On remarque que la courbe $V_{c \max}$ met un certain temps pour passer de 0 à sa valeur réelle, c'est donc son régime transitoire où la tension est dans la plage admissible. Dans ce cas le système ne nécessite pas de compensation.

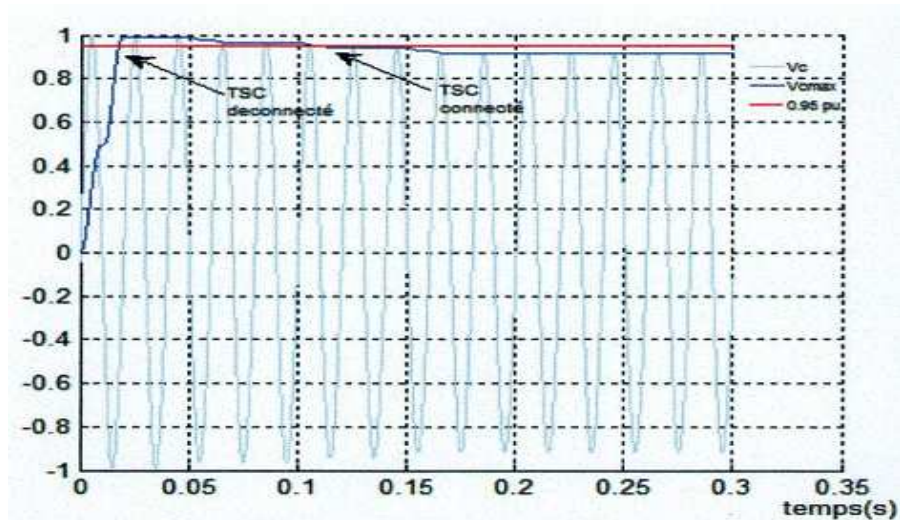


Figure IV.22: Zone de connexion du TSC

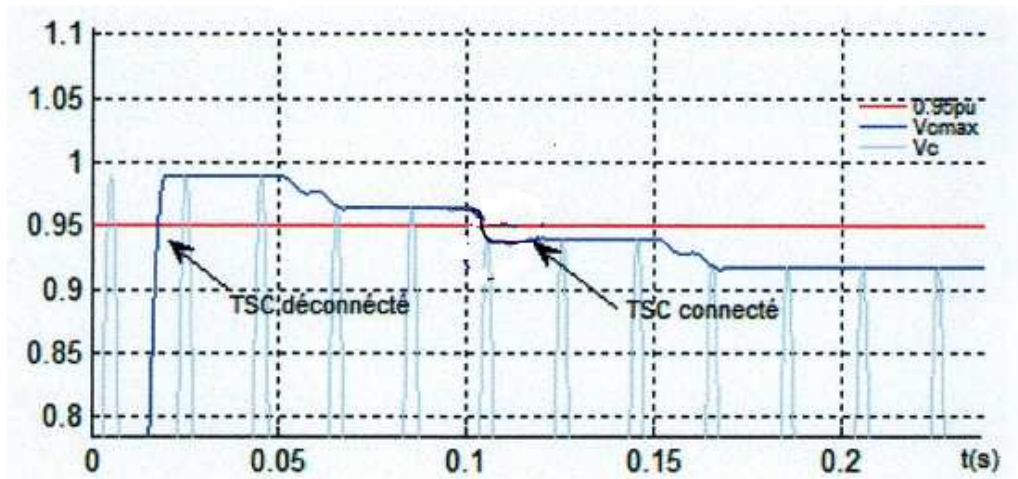


Figure IV.23 : Agrandissement de la partie haute de la figure IV.22

-Bloc de contrôle du TSC : Selon le signe de l'écart de tension, le bloc de contrôle du TSC envoie un signal à l'interrupteur K_4 . Le sous-système de ce bloc est donné par la figure suivante :

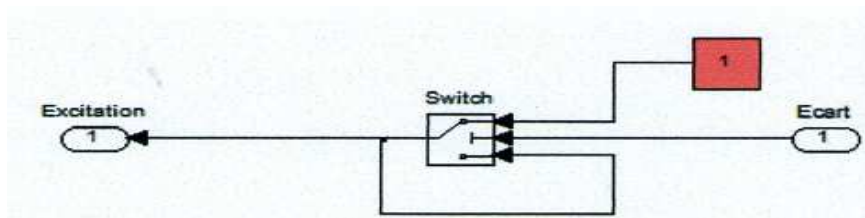


Figure IV.24 : Bloc de contrôle du TSC

Le signal d'excitation de l'interrupteur K_4 est donné comme suite :

-Egale à 1 si l'écart de tension est strictement supérieur à 0 .

Dans ce cas nous avons :

$$380.10^3 - V_{c \max} > 0 \quad [IV.21]$$

$$V_{c \max} < 380.10^3 \quad [IV.22]$$

La tension maximale est inférieure à la limite admissible (0.95 pu), le signal d'excitation connecte le TSC en shunt avec les charges pour faire augmenter la tension.

-Egale à 0 dans le cas contraire.

-Bloc TSC L : Il modélise le compensateur statique d'énergie réactive de type TSC. Trois capacités identiques sont choisies de telle manière à donnée à la charge une tension dans la plage admissible après la connexion du compensateur. Les capacités ont chacune une valeur de :

$$C_{TSC1} = C_{TSC2} = C_{TSC3} = 1.10^{-6} \text{ F} \quad [IV.23]$$

Il est à noter que le bloc de charge principale a une autre valeur de puissance réactive positive qui est de :

$$Q_L = 5 \text{ MVar} \quad [IV.24]$$

Nous allons considérer maintenant deux cas séparément. Le premier consiste à faire une simulation sur le modèle de la figure IV.20 en déconnectant le TSC pour voir les chutes de tensions causées par les charges perturbatrices. Le deuxième consiste à faire la même simulation en appliquant un TSC pour voir son apport au réseau et comparer les deux systèmes avec et sans compensation

IV.4.1- Avant la connexion du TSC :

On suppose d'abord que le compensateur statique d'énergie réactive est déconnecté du réseau. Les résultats trouvés seront comparés plus tard aux résultats de même système avec le TSC connecté au réseau à l'instant de la perturbation. Donc pour le réseau de la figure

-Tension de la charge :

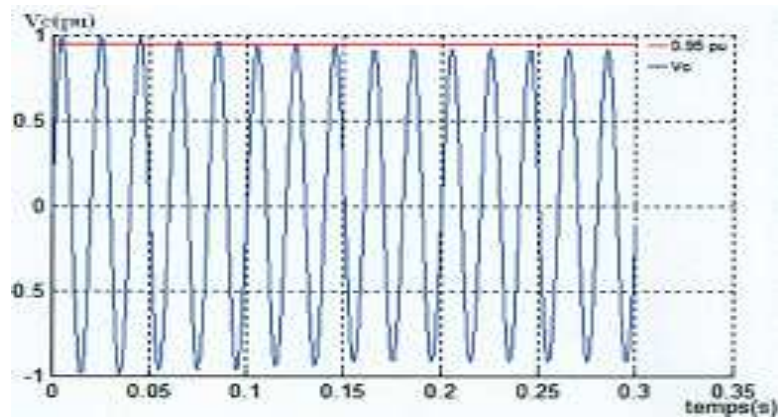


Figure IV.25 : Tension de la charge du système sans TSC.

Sur la figure IV.25, on remarque que la tension diminue progressivement avec la connexion des trois charges (1,2 et 3). En faisant un agrandissement on obtient ce segment de courbe de tension de la charge :

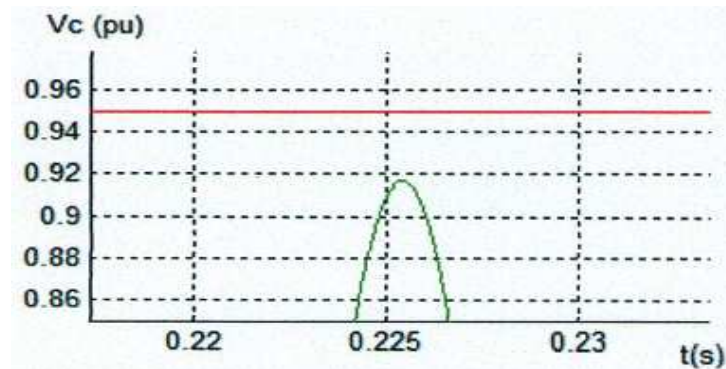


Figure IV.26 : Segment de la courbe de tension V_C .

On remarque que la tension de la charge chute progressivement de la valeur initiale maximale 1 pu et se stabilise à la valeur 0.917 pu. Cette chute de tension est due aux charges perturbatrices qui sont connectées en shunt avec la charge principale.

-Puissance active et réactive de la charge :

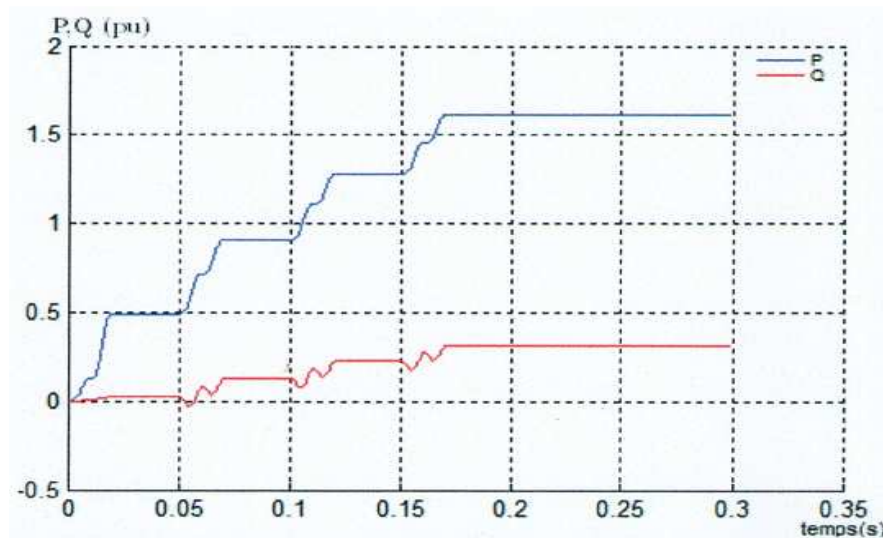


Figure IV.27 : Puissance active et réactive de la charge du système sans TSC .

Sur la figure IV.27, on voit qu'à chaque connexion d'une charge importante, les puissances actives et réactives augmentent simultanément. Initialement, pour la charge principale seule, nous avons une puissance réactive faible (0.02 pu) et une puissance active de 0.49 pu. Après la connexion des trois charges perturbatrices, la puissance réactive a atteint 0.315 pu et la puissance active 1.61 pu. On peut dire que les chutes de tension sont dues à la circulation de la puissance réactive de la source vers la charge.

-courant de la ligne :

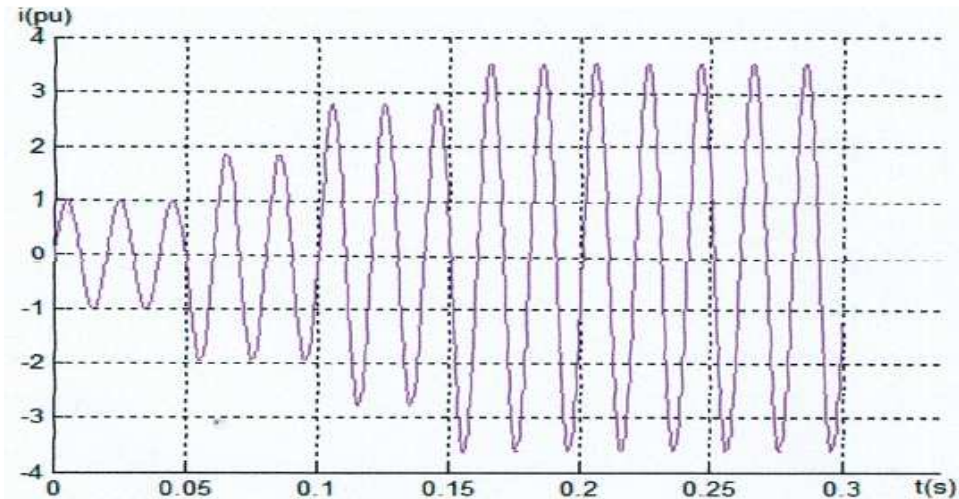


Figure IV.28 : Courant de la ligne avant l'intervention du TSC .

Le courant de la ligne suit une allure croissante en augmentant à chaque connexion d'une charge perturbatrice. Il atteint une valeur maximale de 3.55 pu après la connexion des trois charges. Cette augmentation est due à la charge qui fait appel à ce courant :

IV.4.2 : Après la connexion du TSC :

Maintenant, dès que la tension de la charge diminue au-dessous de la tension admissible 0.95 pu, le TSC sera connecté par l'interrupteur T_4 . Les courbes de tension et de puissances sont données ci-après :

-Tension de la charge :

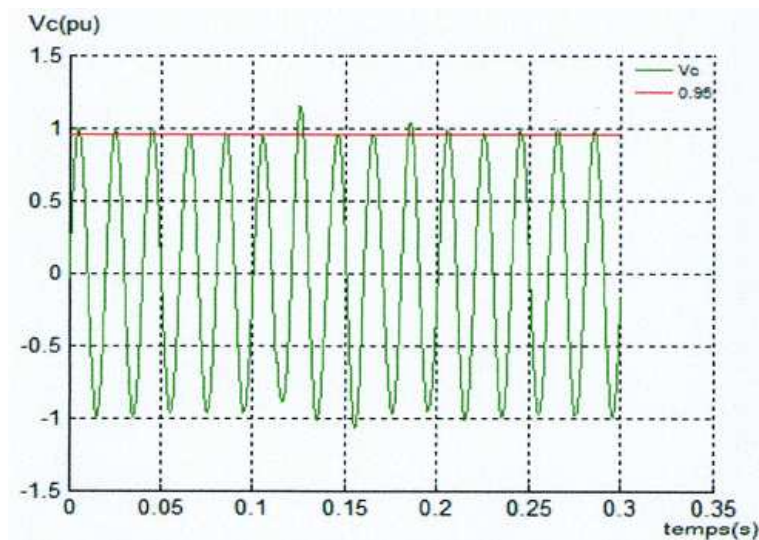


Figure.29 : Tension de la charge avec TSC.

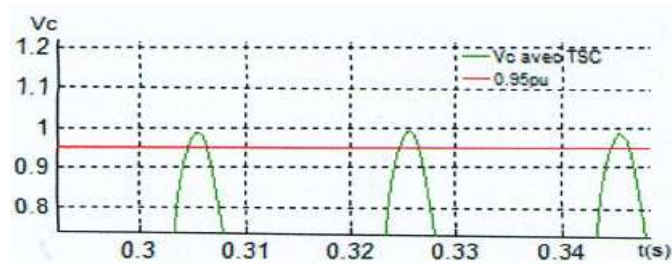


Figure IV.30 : Agrandissement d'une partie de la figure IV.29.

Sur la figure IV.29, on voit nettement que la tension de charge se stabilise à une tension proche de 1 pu quelques périodes seulement après la connexion du TSC . Donc, l'action apportée

- puissance active et réactive de la charge :

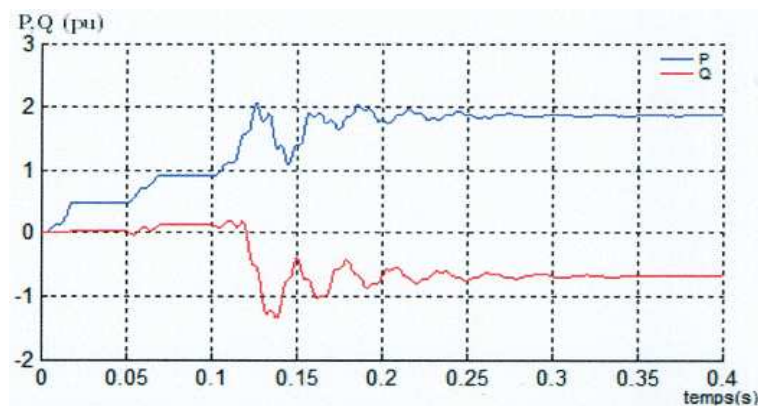


Figure IV.31 : Puissance active et réactive de la puissance avec TSC.

Sur la figure IV.31, on remarque que la puissance active n'a pas de changement important, elle est proche de 1.85 pu alors qu'elle avait une valeur de 1.61 pu pour un système non compensé. Quand à la puissance réactive, elle est passée d'une puissance inductive (0.351 pu) sans compensation à une puissance capacitive (-0.64 pu) avec compensation, soit une variation de 1 pu entre le système non compensé et le système compensé.

- Courant de la ligne :

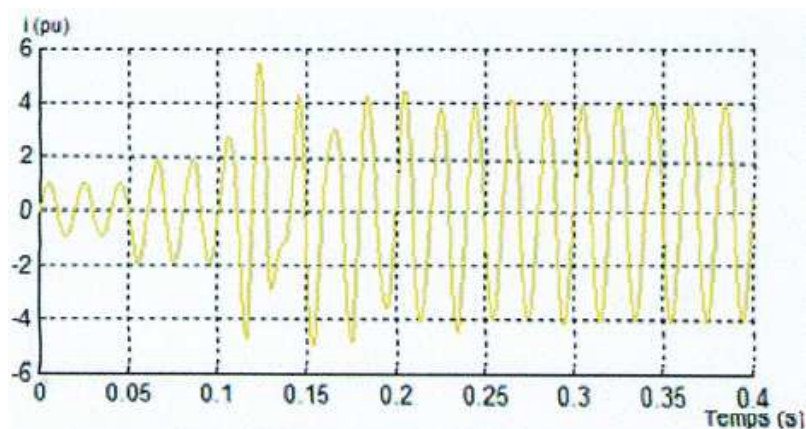


Figure IV.32 : Courant de la ligne avec TSC.

L'action du TSC a fait augmenter le courant de la ligne. Il atteint une valeur finale de 4 pu après une zone de perturbation du aux temps des manoeuvres des interrupteurs. L'augmentation du courant est due à la connexion des 3 capacités du TSC qui fournissent une énergie réactive au réseau.

IV.4.3-Comparaison graphique :

-Tension :

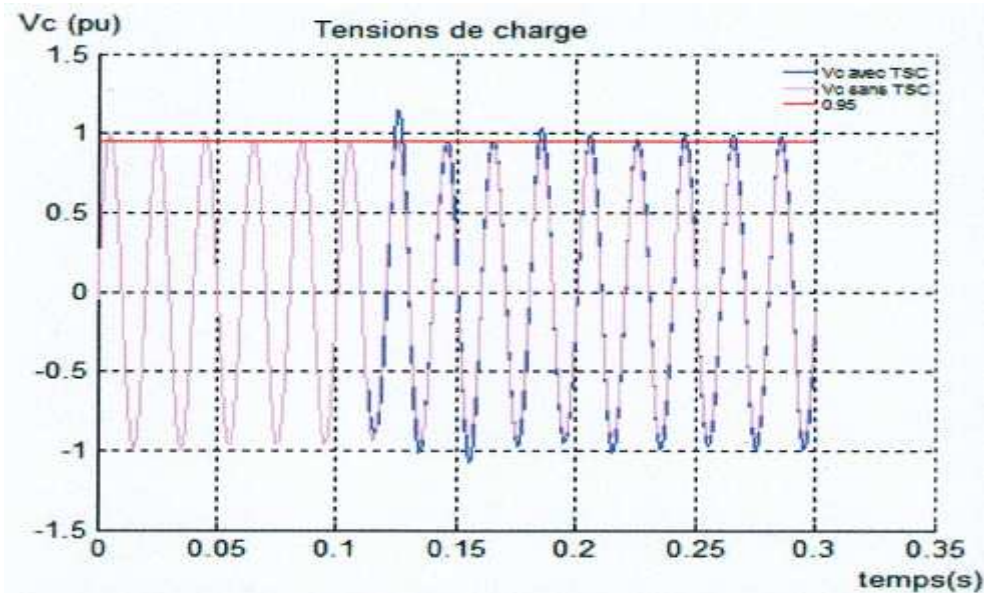


Figure IV.33 : Tension de la charge avec et sans compensation.

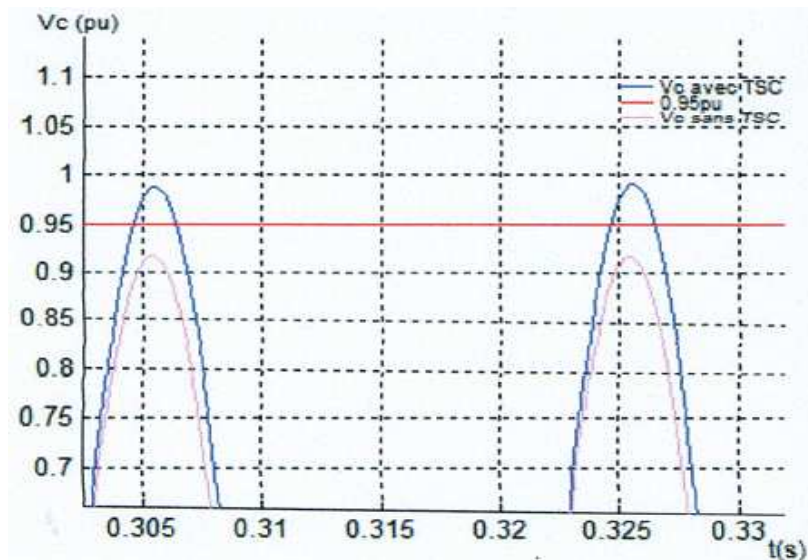


Figure IV.34 : Agrandissement de la partie de la figure IV.33.

-Puissances réactives :

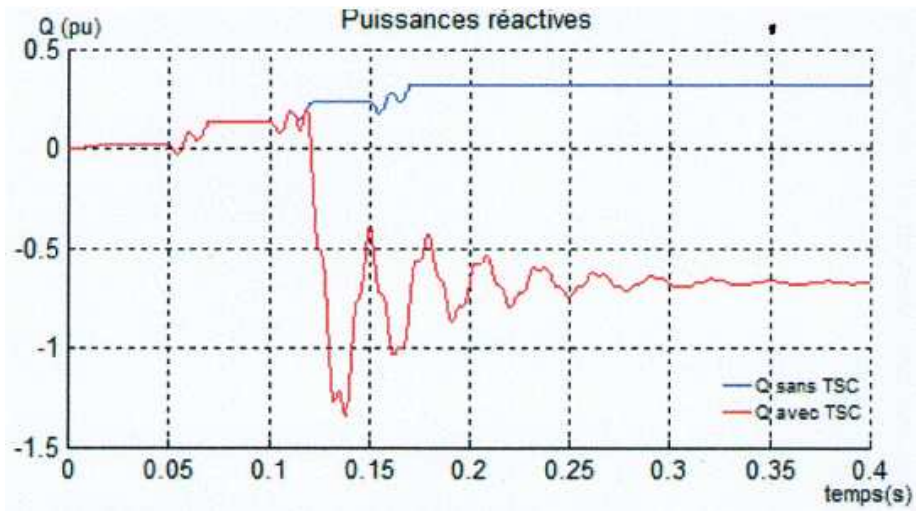


Figure IV.35 : Puissances réactive de la charge avec et sans compensation.

-Courant de la ligne :

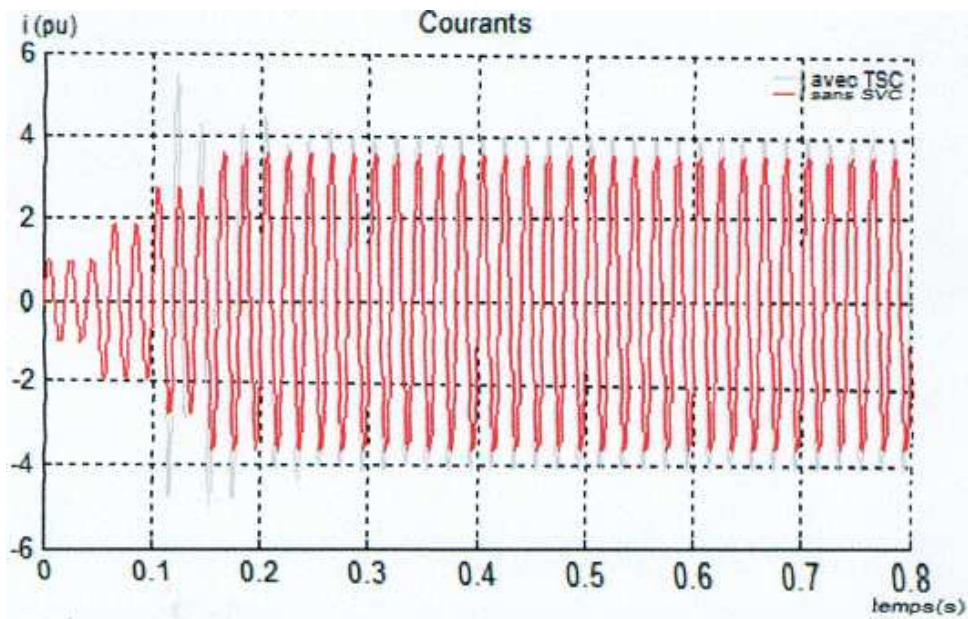


Figure IV.36 : Courant de la ligne avec et sans compensation.

IV.5-Action d'un TCR suivie d'une action d'un TSC :

Maintenant que nous avons vu les actions du TCR et du TSC séparément, nous allons considérer un système qui peut avoir besoin des deux modes de compensation à des instants très proches. En premier lieu, nous allons connecter des charges qui vont faire diminuer la tension au-dessous de 0.95 pu, le tous dans un court intervalle de temps.

Le système que nous allons utiliser et la combinaison de deux systèmes précédents, il est donné sur la figure IV.37.

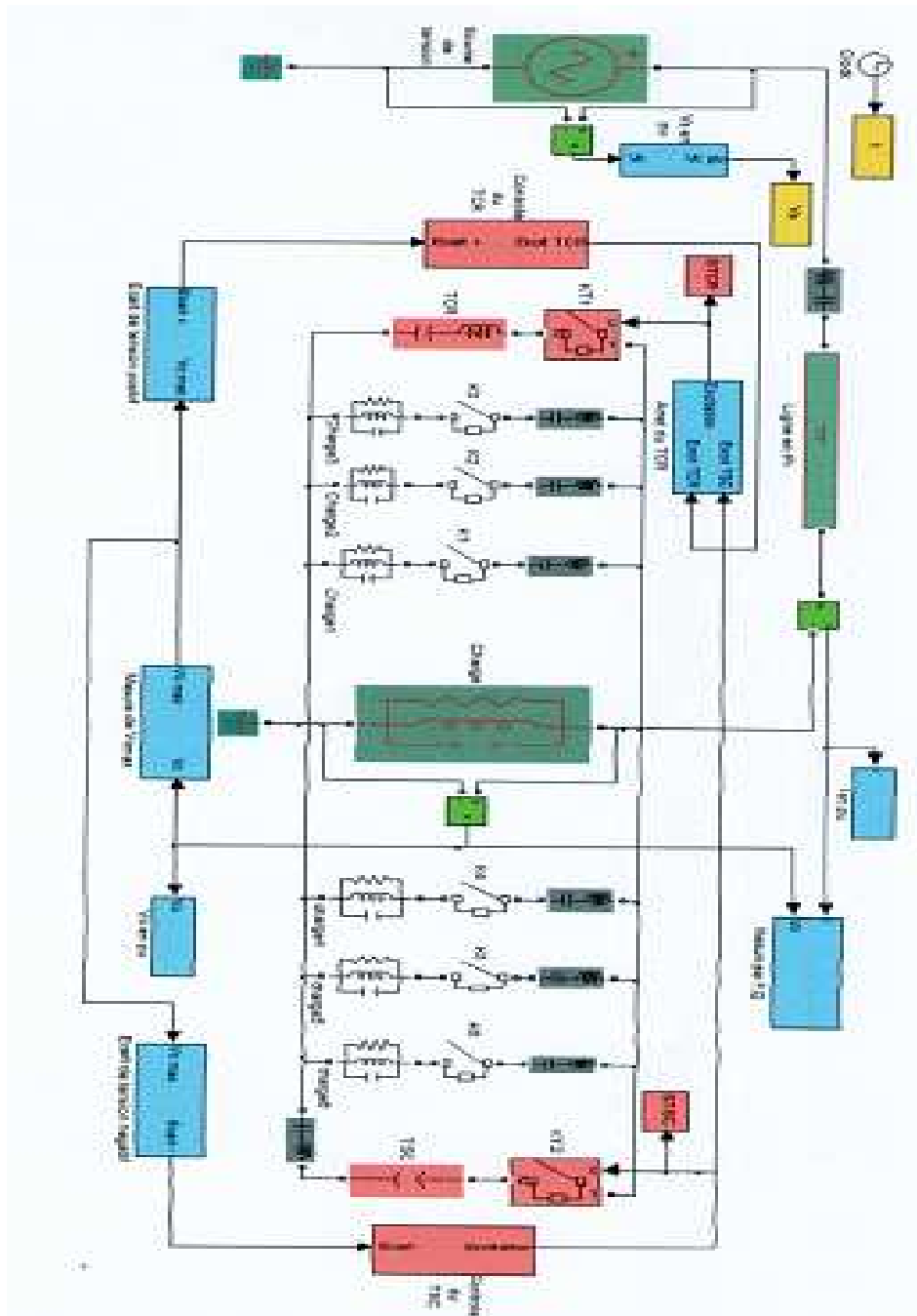


Figure IV.37 : Modèle correspondant à l'action d'un TCR suivi d'un TSC .

Liste des blocs du système :

Les blocs de ce système n'ayant pas été définis auparavant sont :

-Bloc d'arrêt du TCR : Ce bloc permet l'ouverture du TCR à l'instant de la connexion du TSC . Cette action est très importante par ce qu'on pas laisser le TCR qui est une inductance connectée au réseau alors que la tension est inferieur à la tension admissible 0.95 pu. Le sous-système de ce bloc est le suivant :

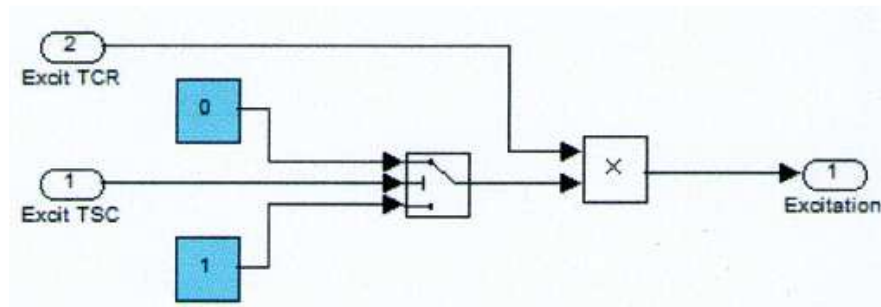


Figure IV.38 : Bloc d'arrêt du TCR.

On voit que le signal de sortie (Excitation) qui commande la TSC est soumis à une condition qui est la suivante :

-Si le signal de contrôle du TSC est nul, ce qui veut dire qu'il est ouvert, le (switch) va multiplier la constante 1 pu par le signal d'excitation du TCR qui va rester dans son état.

- Si le signal de contrôle du TSC est différent de 0, ce qui veut dire qu'il est connecté, le (switch) va multiplier la constante 0 pu par le signal d'excitation du TCR, ce qui va le déconnecter.

-Les blocs (STCR et STSC) : Ces blocs nous permettent de visualiser les signaux d'excitation des interrupteurs qui commandent les compensateurs statique d'énergie réactive.

-Les blocs de charges RLC parallèles identique (charge₄, charge₅ et charge₆).ce sont les charges qui provoquent la diminution de la tension au-dessous de 0.95 pu. Leur caractéristique de puissance est :

$$P=100\text{MW} \quad \text{[IV.25]}$$

$$Q_L=900 \text{ MVar} \quad \text{[IV.26]}$$

$$Q_c=1 \text{ kVar} \quad \text{[IV.27]}$$

- Les charges (1,2 et 3) ont les mêmes caractéristiques que celle prises pour un TCR seul (expression [IV.11],[IV.12] et [IV.13]).

- Trois blocs de charges inductives en série avec les interrupteurs k_1 , k_2 et k_3 : leur rôle est le réduire les pics de courant. Elles ont pour valeur 50 mH chacune.

-Quatre blocs de charges inductives en série avec les interrupteurs k_4, k_5, k_6 et k_T : leur rôle est de réduire les pics de courant. Les trois premières ont chacune une valeur de 2.75 H et quatrième 2.1 H.

-Les interrupteurs k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 et k_6 sont commandés à la fermeture respectivement aux instants 0.05, 0.1, 0.15, 0.25, 0.3 et 0.3 second.

Nous allons maintenant faire deux simulations séparément sur le modèle de la figure IV. 37.

La première simulation consiste à faire fonctionner le réseau en déconnectant les deux compensateurs d'énergie réactive. La deuxième consiste à refaire la même simulation en appliquant un TCR en premier, suivi du TSC qui va déconnecter le compensateur TCR juste après son branchement.

IV.5.1- Avant la connexion de SVC :

Considérant le réseau du modèle de la figure IV.37. Les courbes de tension et de puissances obtenues après simulation sont les suivantes :

Tension de la charge :

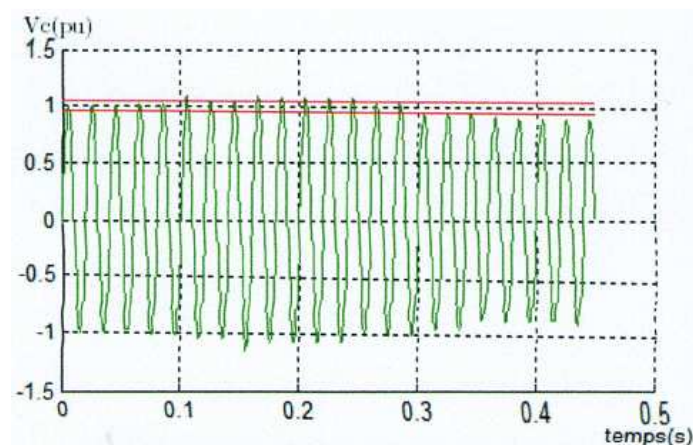


Figure IV.39 : Tension de la charge sans SVC .

Sur cette figure, deux perturbations de la tension apparaissent successivement. La première est une surtension où la tension est supérieure à la limite admissible 1.05 pu. La deuxième est une sous-tension où la tension diminue au-dessous de 0.95 pu. La figure qui suit montre de manière plus claire ce qu'on vient citer.

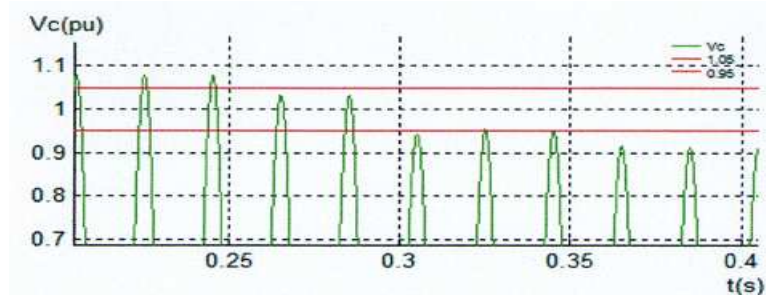


Figure IV.40 : Agrandissement d'une partie de la figure IV.39.

La valeur maximale de la tension de charge atteint 1.08 pu après le branchement de la charge trois, et sa valeur minimale 0.905 pu à l'instant du branchement de la charge six.

-Puissance active et réactive de la charge :

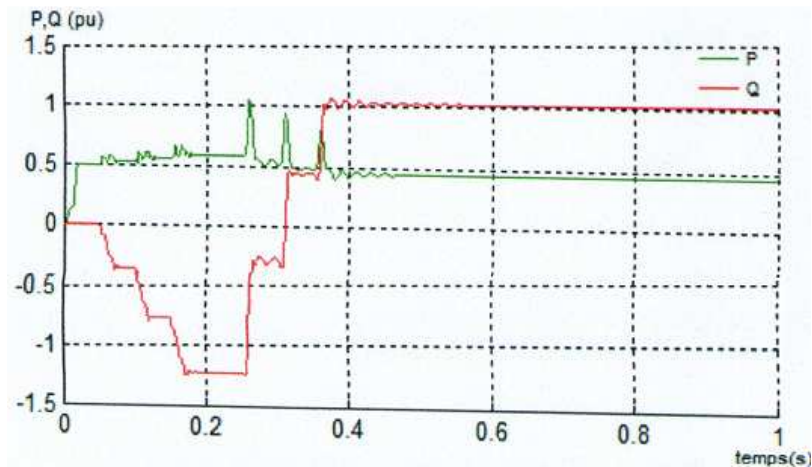


Figure IV.41 : Puissance active et réactive sans SVC.

Cette figure met en évidence les échanges énergétiques qu'effectue la charge avec le reste du réseau. On s'aperçoit que l'énergie active reste presque inchangée, proche de la valeur 0.5 pu. La puissance réactive quant à elle a subi des variations qualitatives et quand elle a subi des variations qualitatives et quantitatives, c'est-à-dire que son signe a changé en passant d'une puissance négative (capacitive) à une puissance positive (inductive), sa valeur maximale capacitive est de l'ordre de 1.22 pu (négative) et sa valeur maximale inductive est proche de 1.02 pu. Soit une différence entre les deux crêtes de 2.24 pu. Donc les fluctuations de puissance réactive engendrent des fluctuations de tension.

On peut noter aussi que les charges (1,2 et 3) fournissent de l'énergie réactive au réseau, tandis que les charges (4,5 et 6) absorbent de l'énergie réactive à partir du réseau.

-Courant avant l'action du SVC :

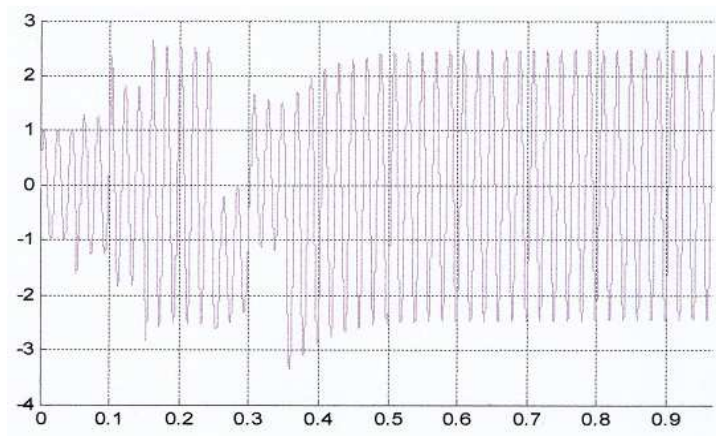


Figure IV.42 : courant de la ligne avec SVC.

Sur cette figure on voit que le courant augmente progressivement pour la connexion des trois premières charges, puis vient une perturbation à l'instant du branchement de la charge (4), le courant reprend sa progression et se stabilise à la valeur 2.47 pu.

IV.5.2- Après la connexion du SVC :

On refait la même simulation que celle d'avant, mais cette fois ci le TCR sera connectée dès le premier dépassement de la tension admissible 1.05 pu. Le TSC ne sera connectée que lorsque la tension chute au-dessous de 0.95 pu, à sa connections, le TCR se déconnecte automatiquement. Les deux figures suivantes donnent les signaux de commande du TCR et du TSC.

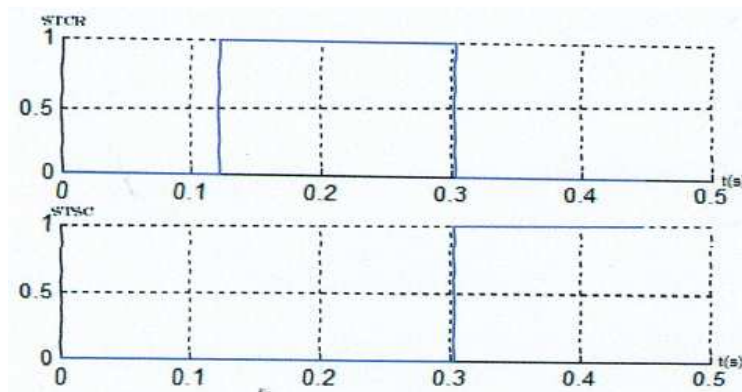


Figure IV.43 : Signaux de commande des interrupteurs TCR et TSC .

Après la connexion des compensateurs statiques d'énergie réactive, les courbes de tension de puissances et de courant de la charge sont les suivantes :

-Tension :

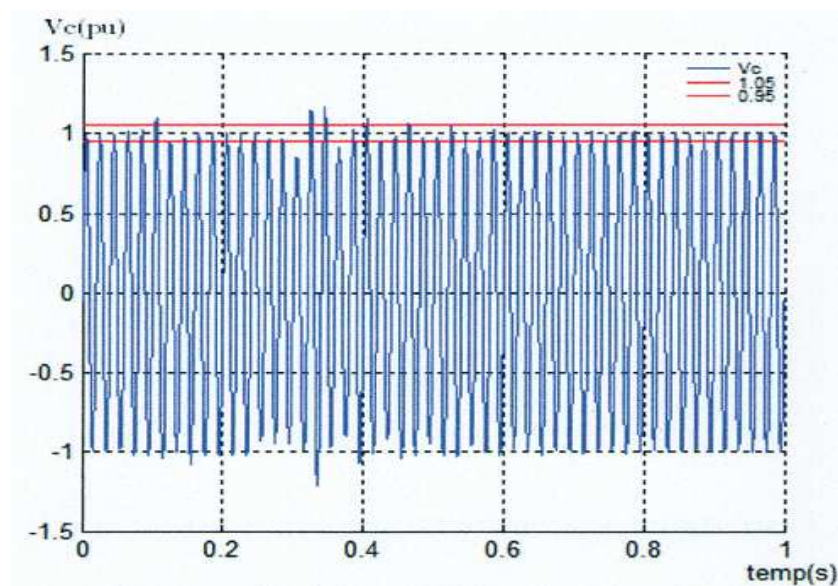


Figure IV.44 : Tension de la charge avec SVC.

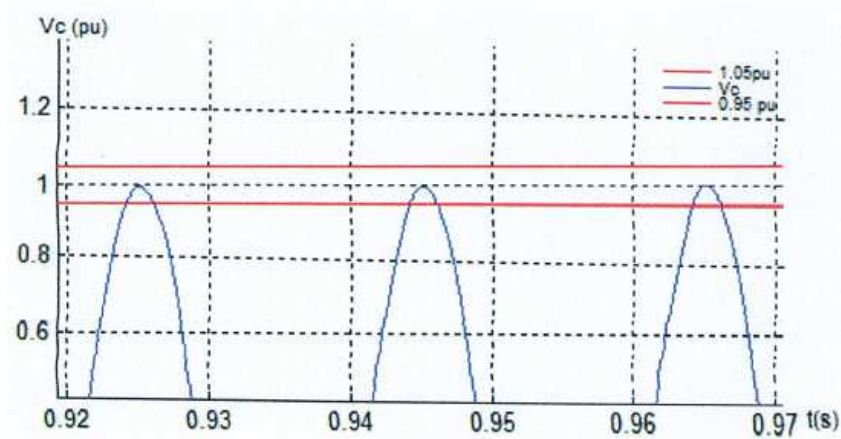


Figure IV.45 : Agrandissement de la partie de la figure IV.44

Pour la figure IV.44, nous avons pris un temps de simulation de 1s pour voir à quelles valeurs la tension se stabilisera après l'application de SVC. On voit bien que la tension après une zone de perturbation revient à la valeur 1 pu qui est bien dans la plage de tension admissible (0.95, 1.05) pu.

-Puissances :

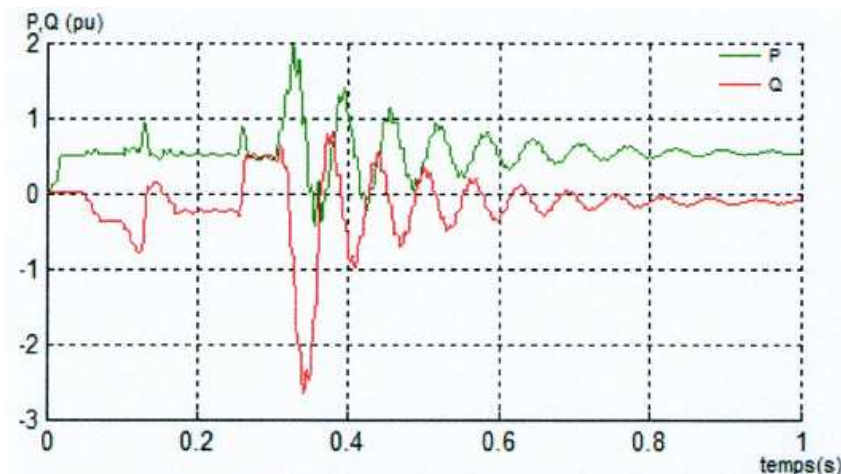


Figure IV.46 : Puissances active et réactive avec SVC.

Comme pour la tension, les courbes de puissances traversent une zone de fluctuation qui finit par se stabiliser. Après cette zone, la puissance active se stabilise à une valeur proche de 0.5pu et c'est la valeur qu'elle avait avant d'appliquer les SVC (figure IV.41), donc mis à part les fluctuations dues aux interrupteurs on peut dire que la puissance active reste autour d'une certaine valeur pour les deux systèmes, compensé et non compensé. La puissance réactive finit par se stabiliser à la valeur -0.1 pu, alors que pour le même système sans SVC la puissance réactive finale avait une valeur positive de 1.02 pu, soit un changement de 1.12 pu.

On constate que pour chaque variation de la puissance réactive correspond une variation de tension.

Courants :

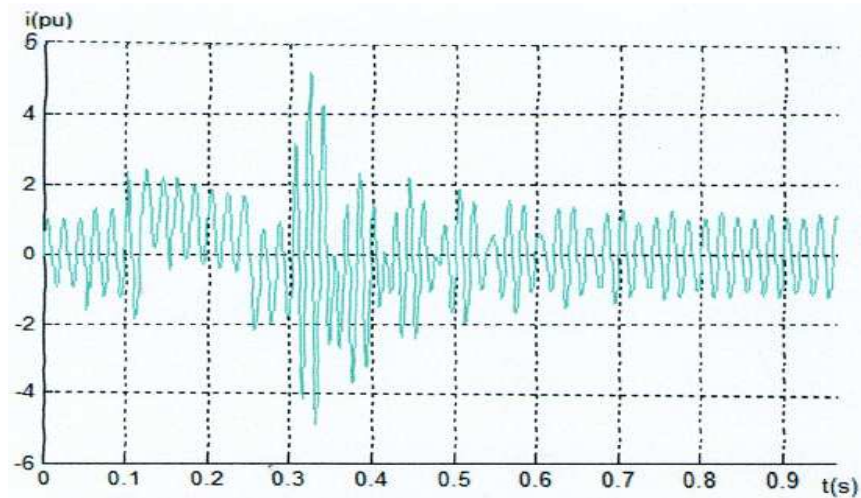


Figure IV.47 : Courant de la ligne sans SVC .

Après la connexion du SVC, le courant de la ligne prend une valeur finale de 1.12 pu. Comparée à la valeur sans compensation, on constate que la SVC a fait diminuer le courant de 1.35 pu. On remarque l'apparition de pics de courant dus aux temps de manœuvres interrupteurs.

IV.5.2- Comparaison graphique :

-Tension de la charge :

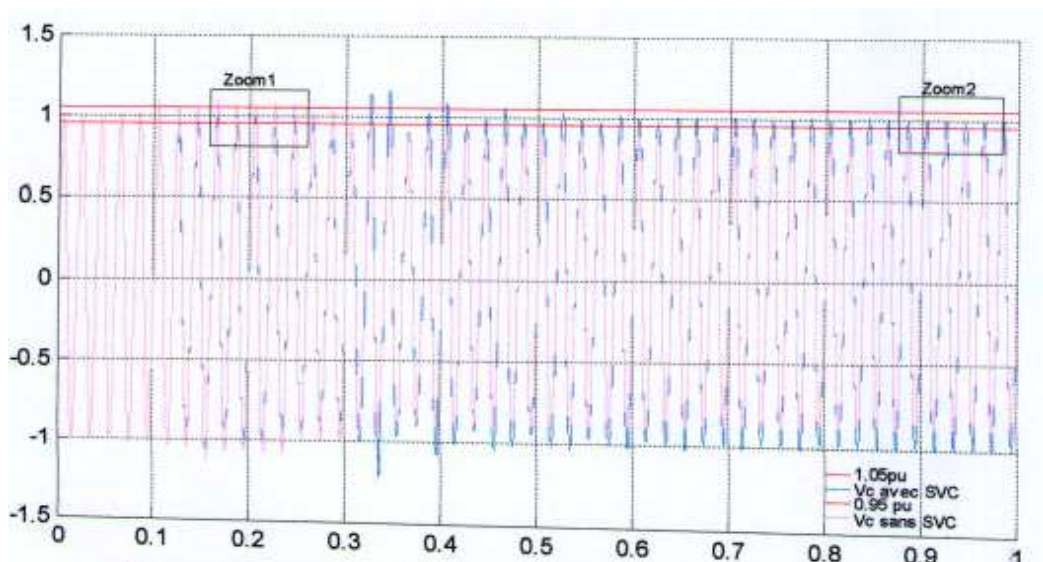


Figure IV.48 : Tension de la charge avec et sans compensation.

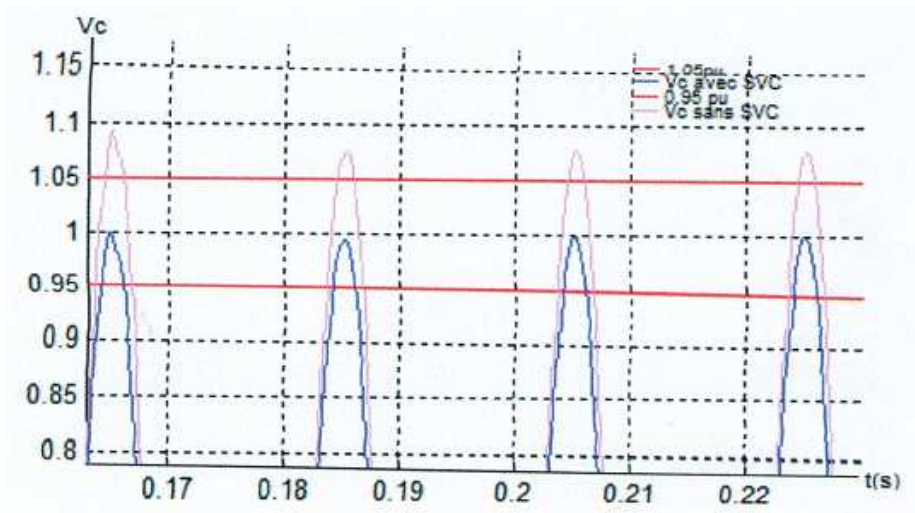


Figure IV.49 :Zoom 1.

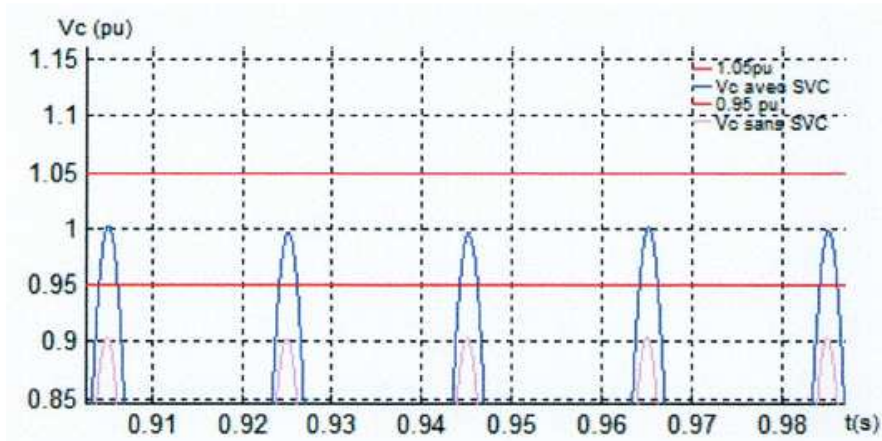


Figure IV.50 : Zoom 2

-Puissance réactive :

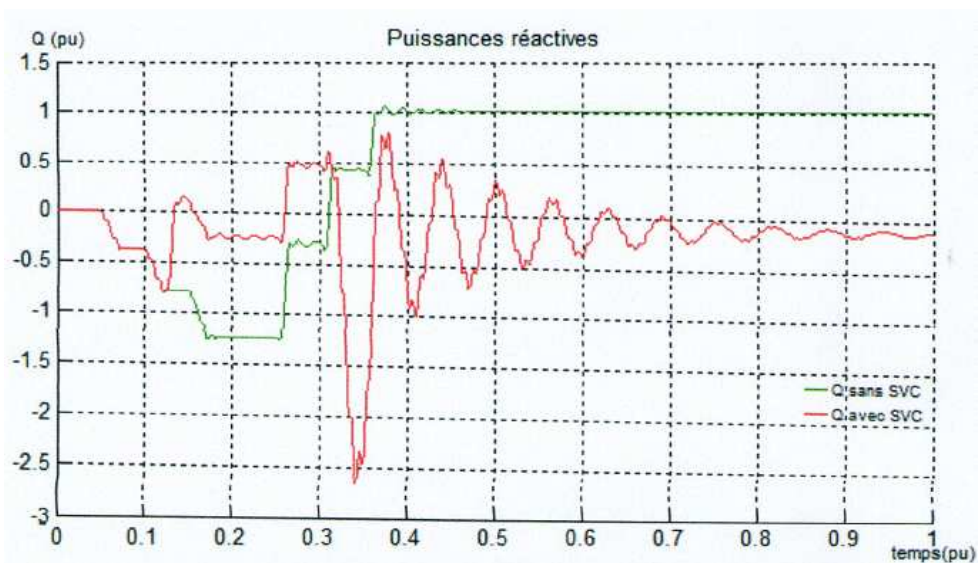


Figure IV.51 : Puissances réactives de la charge avec et sans SVC .

-Courants :

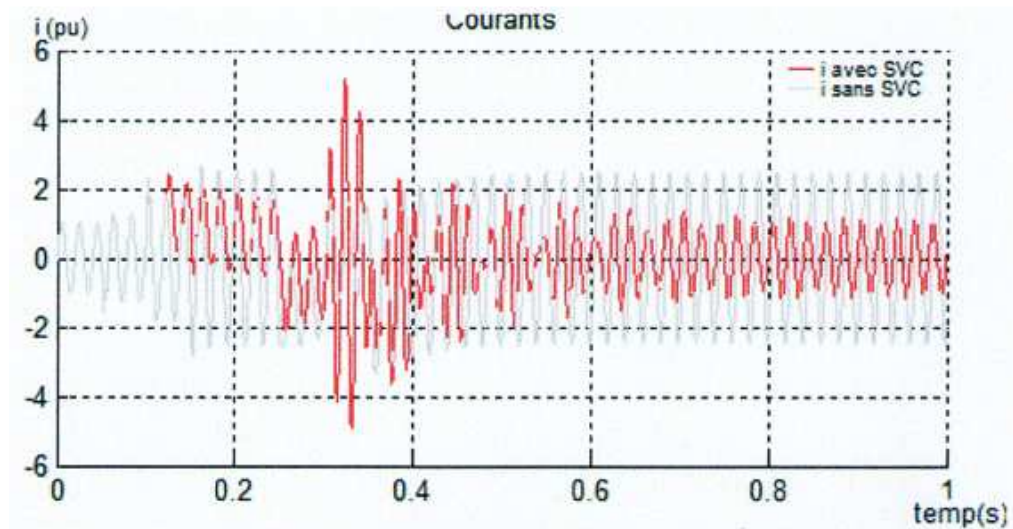


Figure IV.52 : Courant de la ligne avec et sans SVC .

IV.6-Action d'un TSC suivie d'une action d'un TCR :

Nous avons vu précédemment l'action du TCR suivie d'une action d'un TSC dans un seul système, nous allons maintenant faire l'inverse. Nous allons considérer un système qui va avoir besoin des deux modes de compensation à des instants très proches. En premier lieu, nous allons connecter des charges qui vont faire baisser la tension au-dessous de 0.95 pu, puis nous allons connecter trois autres charges qui vont faire augmenter la tension au-dessus de 1.05 pu. Le système correspondant pour ce cas de figure est le suivant :

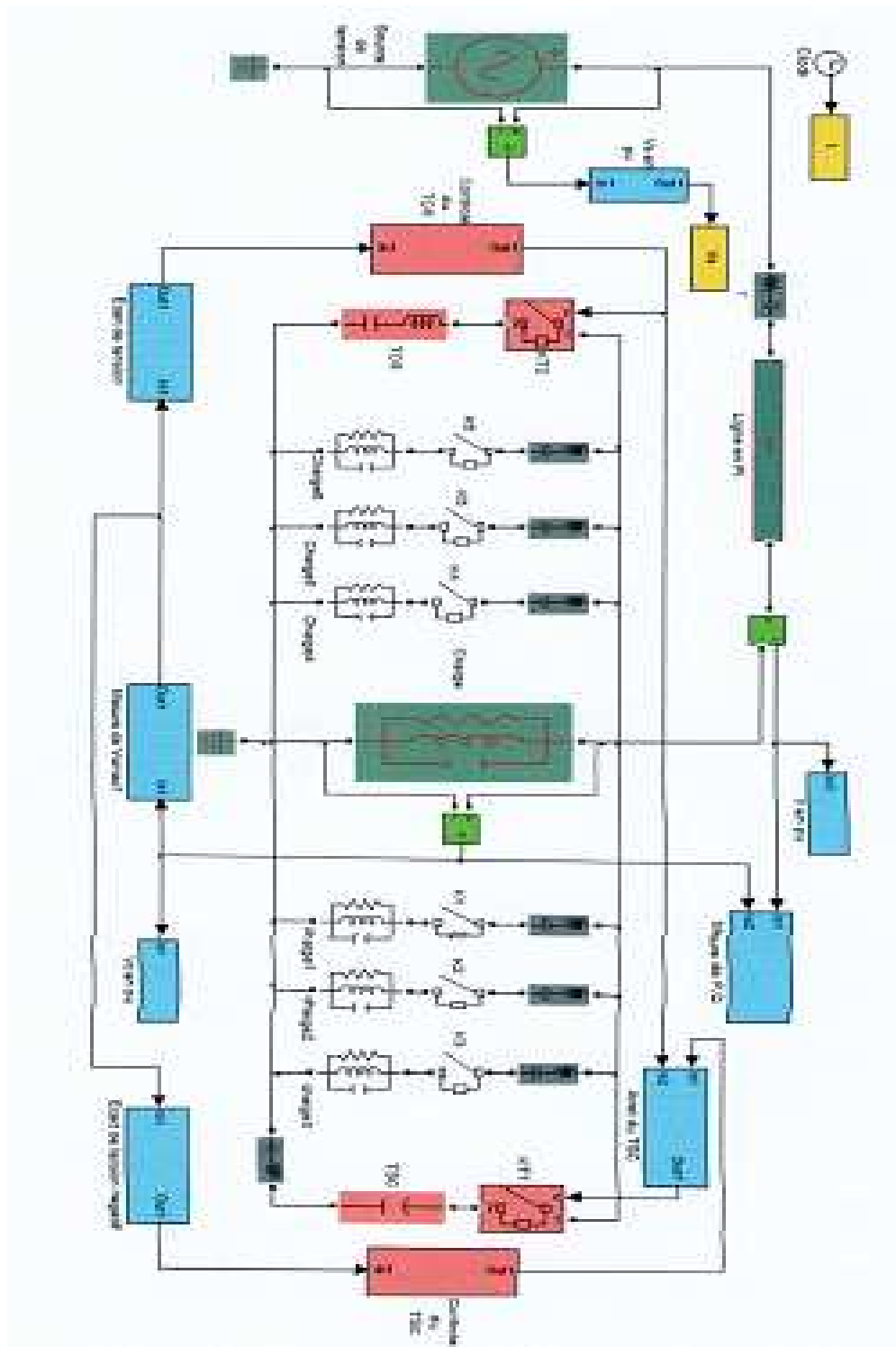


Figure IV.53 : Modèle correspondant à l'action d'un TSC suivi d'un TCR.

Liste des blocs du système :

Les blocs de ce système n'ayant pas été définis auparavant sont :

-Bloc d'arrêt du TSC : Ce bloc permet d'arrêter le TSC à l'instant de connexion du TCR. Cette action est très importante parce qu'on ne peut pas laisser le TSC qui est une capacité connectée au réseau alors que la tension est supérieure à la tension admissible 1.05 pu. Le sous-système de ce bloc est le suivant :

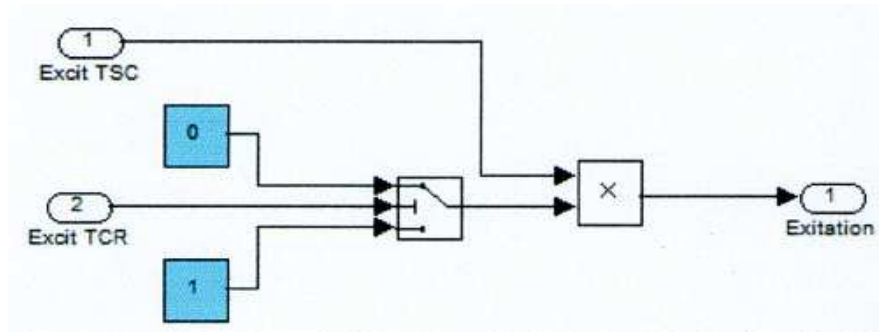


Figure IV.54 : Bloc d'arrêt du TSC .

Le signal de sortie (Excitation) qui commande le TSC est conditionné par un autre signal. On a les deux cas suivant :

-Si le signal de contrôle du TCR est nul, ce qui veut dire qu'il est ouvert, le (switch) va multiplier le signal d'excitation du TSC par 1, donc le TSC ne subira aucun changement, il va rester dans son état. Dans ce cas la tension de la charge a dépassé la limite de tension admissible 1.05 pu.

-Si le signale de contrôle du TCR est différent de 0, ce qui veut dire qu'il est connecté au réseau, le (switch) va multiplier le signale d'excitation du TSC par la constante 0, cette action va déconnecter le TSC. Dans ce cas la tension de la charge a dépassé la limite admissible 1.05 pu, le TSC se déconnecte et le TCR se connecte.

-Trois blocs des charges RLC parallèle identique (charge₄, charge₅ et charge₆). Ce sont les charges qui provoquent l'augmentation de la tension au-dessus de 1.05 pu. Leurs caractéristiques de puissances sont :

$$P=100KW \quad [IV.28]$$

$$Q_L=100 \text{ Var} \quad [IV.29]$$

$$Q_c=110 \text{ MVar} \quad [IV.30]$$

-six blocs de charges inductives en série avec les interrupteurs K₁, K₂, K₃, K₄, K₅ et K₆ : Leur rôle est de réduire les pics de courant. Elles ont pour valeur 1 H chacune. L'inductance mise en série avec l'interrupteur K_T est de 1.28 H.

-Trois blocs de charges RLC parallèles identiques (charge₁, charge₂ et charge₃). Ce sont les charges qui provoquent la diminution de la tension au-dessous de 0.95 pu. Leurs caractéristiques de puissances sont :

$$P=100 \text{ MW} \quad [IV.31]$$

$$Q_L=80 \text{ kVar} \quad [IV.32]$$

$$Q_C=1 \text{ kVar} \quad [IV.33]$$

On va refaire le même travail que celui de la partie précédente sauf qu'ici, c'est le TSC qui est connecté en premier. Sur le système de la figure IV.53, nous allons faire une première simulation qui consiste à faire fonctionner le réseau en déconnectant les deux compensateurs d'énergie réactive. La deuxième simulation consiste à refaire la première en appliquant un TSC suivi du TCR juste après et qui va déconnecter le compensateur TSC.

IV.6.1-Avant la connexion du SVC :

Considérons le modèle de la figure IV.53. Les courbes de tension et de puissances obtenues après simulation sont les suivantes :

-Tension de la charge :

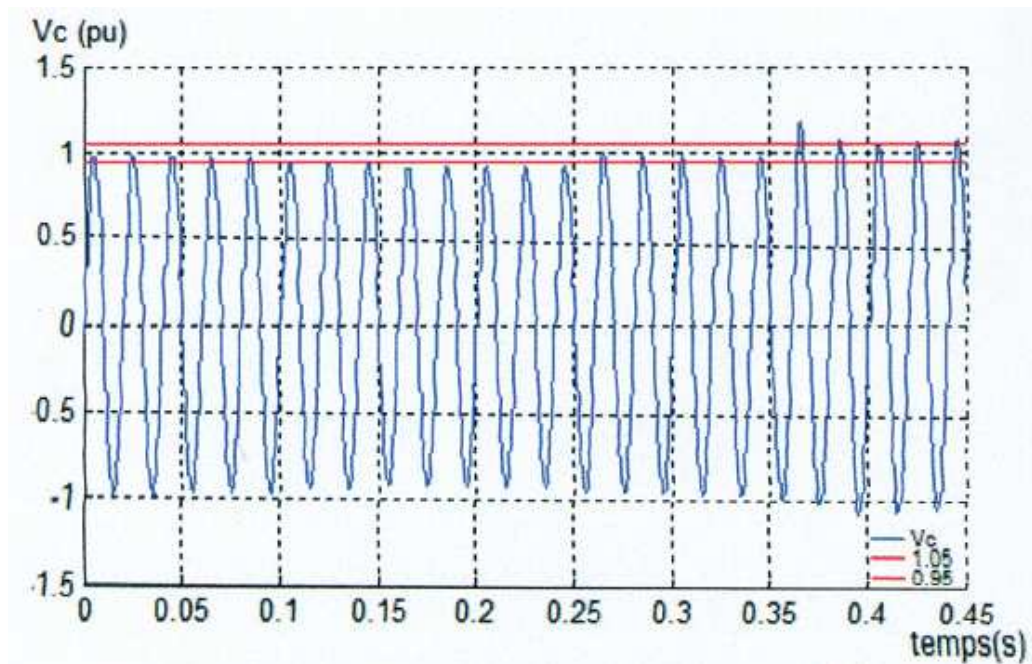


Figure IV.55 : Tension de la charge sans SVC .

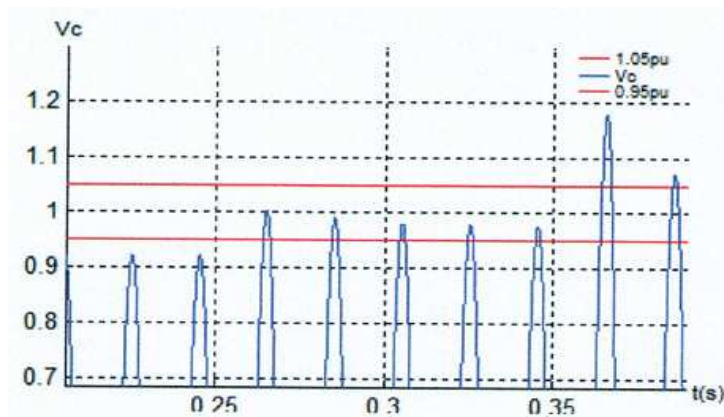


Figure IV.56 : Agrandissement de la figure IV.55

Sur la figure IV.55 apparaissent les perturbations causées par le branchement des charges. En premier, on voit l'effet d'une chute de tension au-dessous de la limite admissible

0.95 due à la connexion des trois charges (1,2 et 3). Puis vient une surtension qui dépasse la limite maximale 1.05 pu qui est due aux charges (4,5 et 6).

-Puissances de la charge :

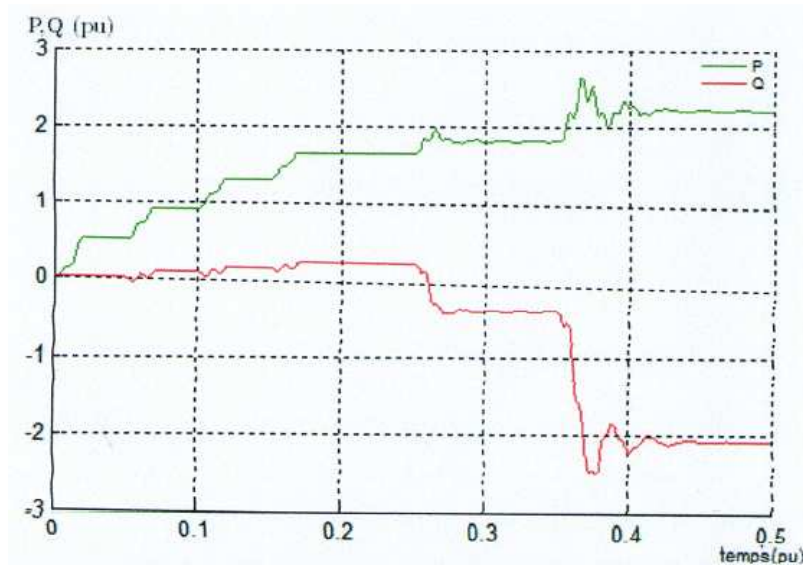


Figure IV.57 : Puissances active et réactive de la charge sans SVC

Sur cette dernière figure, on constate qu'à chaque branchement de n'importe quelle charge, la puissance active augmente, sa valeur est proche de 2.22 pu après le branchement de toutes les charges. La puissance réactive ne suit pas la même évolution, pour les trois premières charges elle augmente, pour les trois autres elle diminue pour se stabiliser à -2.08 pu.

-Courant avant l'action du SVC :

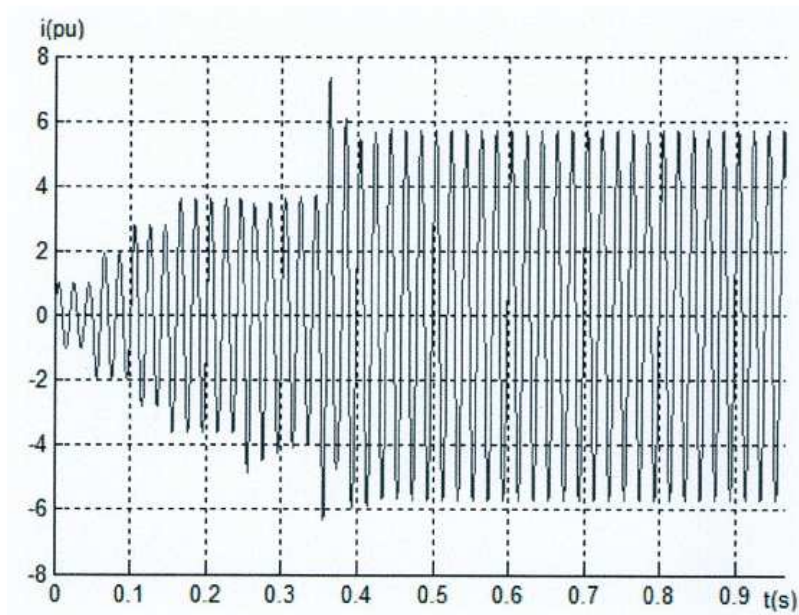


Figure IV.58 : Courant de la ligne sans SVC .

On remarque que le courant augmente à chaque connexion d'une charge perturbatrice. Il atteint sa valeur maximale finale après la connexion de toutes les charges et prend une valeur de 5.7 pu. Cette augmentation est due aux appels des charges.

IV.6.2-Après la connexion du SVC :

On refait la même simulation que celle d'avant, mais cette fois ci le TSC sera connecté à l'instant où la tension devient inférieure à la limite admissible 0.95 pu. Le TCR ne sera connecté que lorsque la tension dépasse la limite maximale admissible 1.05 pu, à sa connexion, le TSC se déconnecte automatiquement. Les signaux de commandement du TSC et du TCR sont donnés sur les figures suivantes :

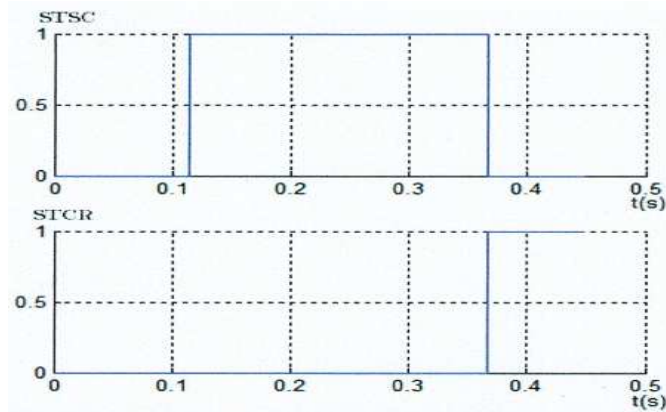


Figure IV.59: Signaux de commande des compensateurs TSC et TCR .

Après la connexion des compensateurs statiques d'énergie réactive, les courbes de tension de puissance et de courant de la charge sont les suivantes :

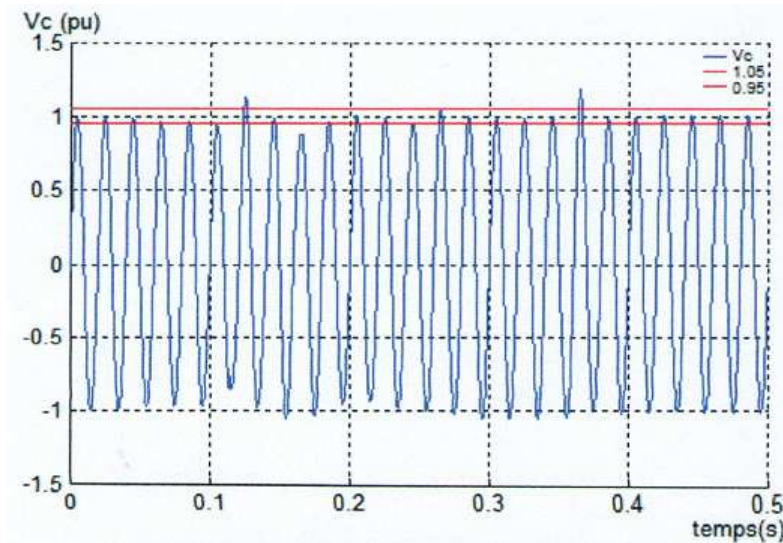


Figure IV.60 : Tension de la charge avec SVC .

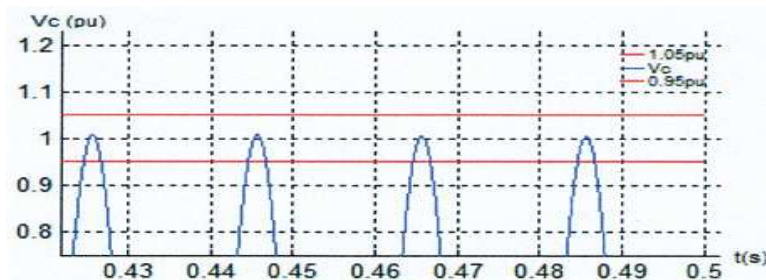


Figure IV.61 : Agrandissement de la partie finale de la figure IV.52

Sur la figure IV.60, on voit bien que la tension est stabilisée à la valeur 1 pu après la fermeture de toutes les charges. Donc le SVC a permis de réduire l'effet d'une chute de tension en premier, puis l'effet d'une surtension en dernier. On remarque l'apparition de quelques périodes fluctuantes dues aux interrupteurs.

-Puissance active et réactive :

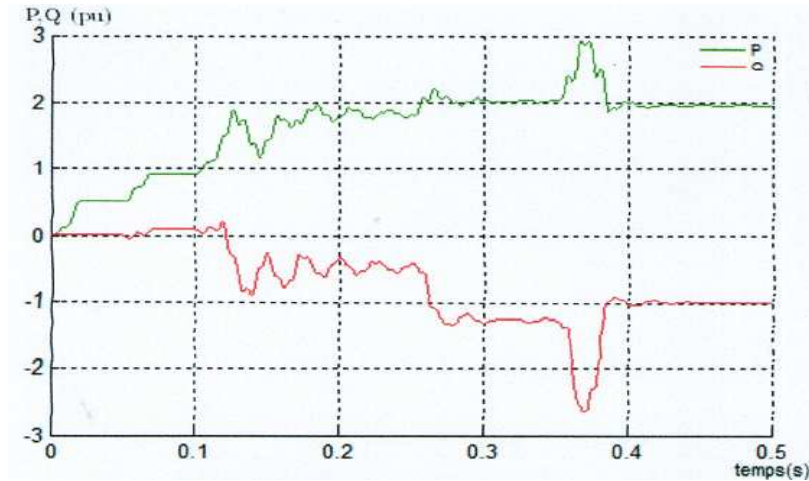


Figure IV.62 : Puissance active et réactive avec SVC .

Sur cette dernière figure, la puissance active a une valeur proche de 2 pu, donc elle n'a pas subi de changement important comparé à sa valeur du système sans SVC (2.22 pu de la figure IV.57), donc mis à part les fluctuations dues aux interrupteurs on peut dire que la puissance active reste inchangée pour les deux systèmes, compensé et non compensé. La puissance réactive traverse une zone de fluctuation et finit par se stabiliser à une valeur proche de -1 pu, la puissance réactive finale du système sans SVC avait une valeur de -2.08 pu (figure IV.57). Donc la puissance réactive a subi une variation de 1.08 pu.

-Courant après l'action du SVC

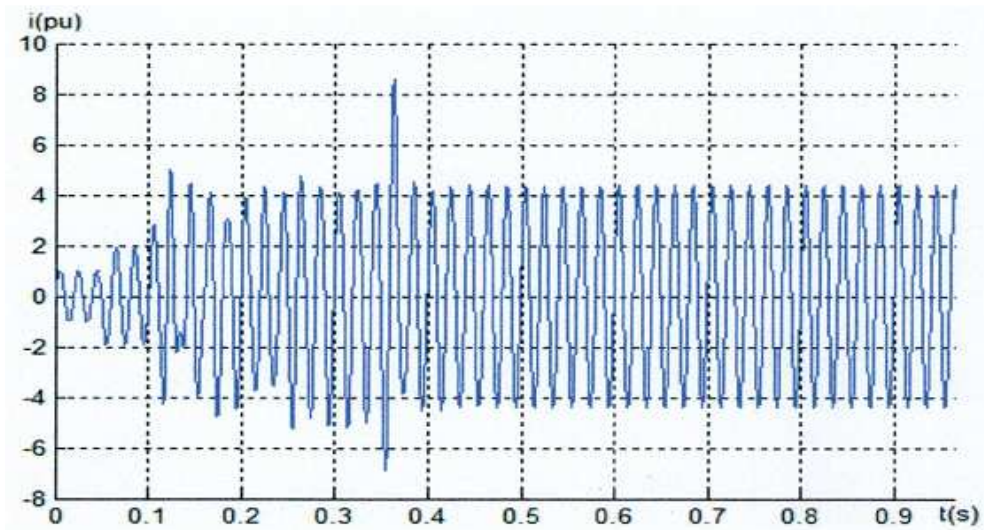


Figure IV.63 : Courant de la ligne sans SVC

On constate que la connexion du SVC a fait diminuer le courant de la ligne. Pour un système sans compensation le courant final était de 5.7 pu, après l'action du SVC le courant final est de 4.37 pu. Le SVC a fait diminuer le transit de la puissance réactive et le courant appelé par la charge. Les pics de courant sont dus aux temps de manœuvres des interrupteurs.

IV.6.3-Comparaison graphique :

-Tension de la charge :

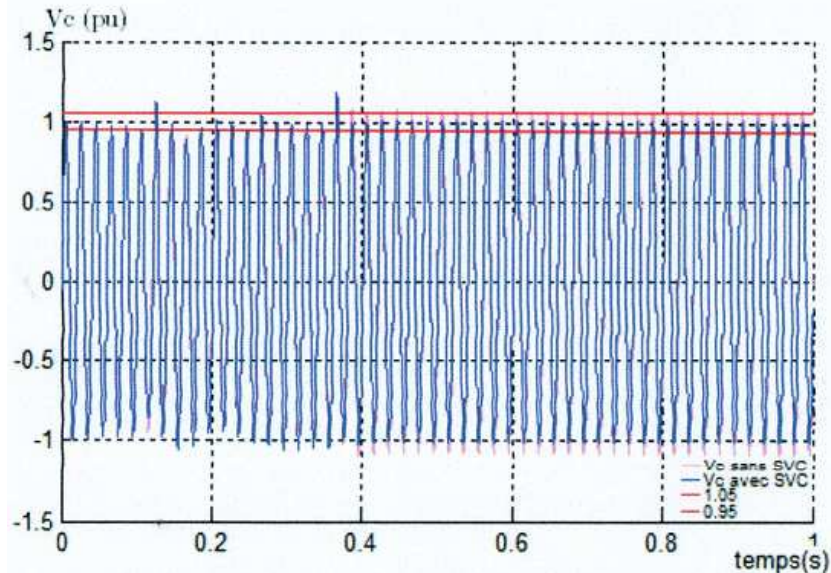


Figure IV.64 : Tension de la charge avec et sans compensation.

-Puissances réactives :

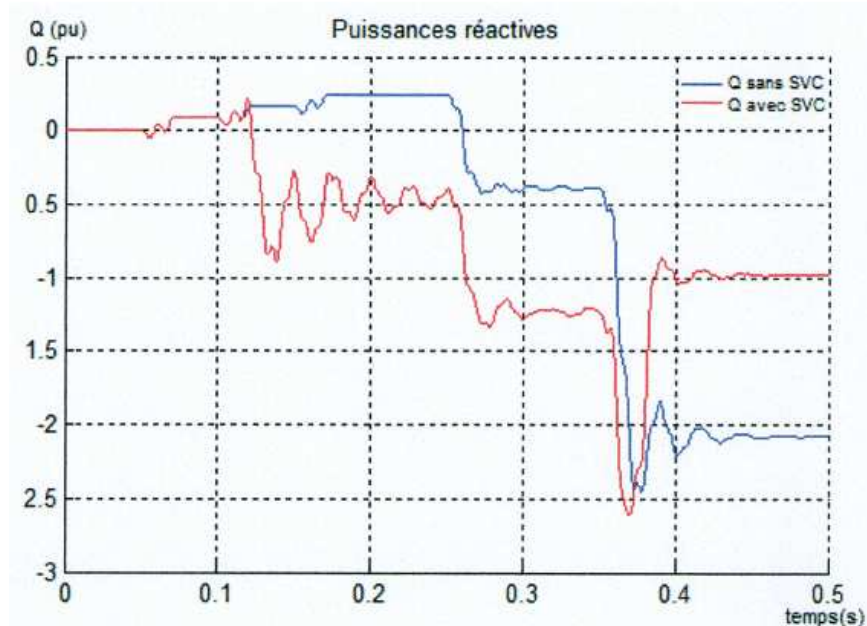


Figure IV.65 : Puissance réactive de la charge avec et sans SVC .

-Courants :

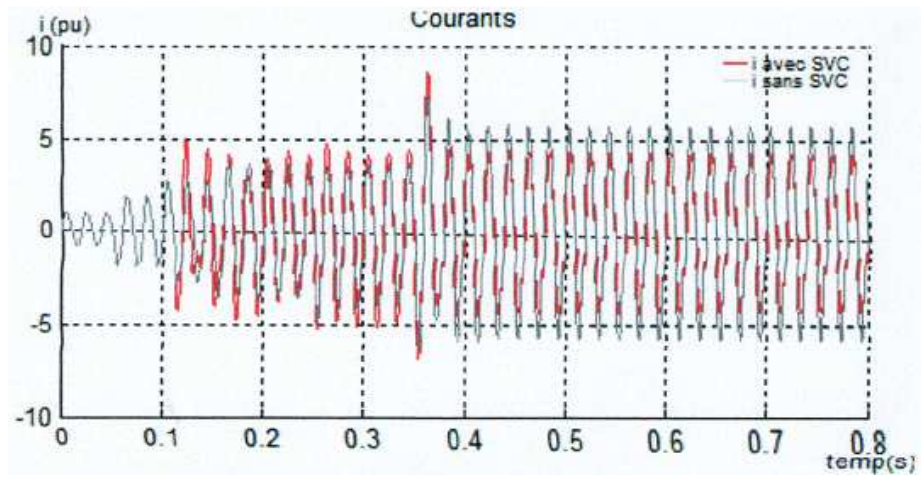


Figure IV.66 : Courant de la ligne avec et sans SVC.

Conclusion :

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de contrôler le niveau de tension sur un point du réseau en contrôlant les transits de puissance réactive. On constate qu'il y a bien des fluctuations de l'énergie réactive qui s'accompagnent de variations de la tension.

En effet, une demande d'énergie réactive par les charges produit des chutes de tension et une fourniture importante d'énergie réactive des charges au réseau engendre des surtensions.

En appliquant des dispositifs de compensation d'énergie réactive comportant des capacités et des inductances, nous avons pu rétablir la tension dans la plage admissible à chaque perturbation importante. Donc la compensation de l'énergie réactive est un moyen de contrôle de la tension.

Conclusion générale :

Après cette étude consacrée à la compensation de l'énergie réactive, nous pouvons conclure que la finalité du travail reste à compléter par des essais pratiques auxquels nous n'avons pas accès, faute de moyens.

Les résultats trouvés après les simulations qui ont résumés les différentes actions des SVC sur les réseaux électriques, montre l'apport des SVC en terme de support de profil de tension et confirment l'étude théorique stipulant que pour maintenir la tension dans les plages admissibles en s'assurant que les valeurs limites sont respectées, il est nécessaire de réduire les transites de l'énergie réactive. Il faut donc produire l'énergie réactive. Il faut donc produire l'énergie réactive au plus près de la demande, c'est le premier principe de la compensation.

Si nous admettons que la compensation de l'énergie réactive est la solution adéquate pour stabiliser la tension à travers le contrôle de transit de l'énergie réactive, il reste à définir quel type de moyens qui sera le plus approprié. Chaque installation de compensation demande une étude particulière qui va prendre en compte la nature du réseau et le niveau de tension sur la ligne.

Le compensateur statique d'énergie réactive de type SVC est un moyen moderne qui peut faciliter l'exploitation de l'énergie électrique en contribuant au contrôle de la tension. Parmi ces avantages on peut citer :

- Rapidité d'action.
- Apport de l'énergie réactive au lieu du besoin.
- Possibilité de commande de l'énergie réactive.
- Absence d'éléments tournants, donc de mouvements et de vibrations

Néanmoins, le SVC a quelques inconvénients relatifs à son exploitation dans les réseaux, et qui se résume en ce qui suit :

- Complexité technologique, ce qui domage de personnel très qualifié.
- Création d'harmoniques dans les réseaux.
- Cout élevé.

Le compensateur statique SVC conçu pour compenser la seule énergie réactive, présente les avantages de tous les dispositifs classiques de compensation en assurant la même fonction. C'est donc un moyen incontestable d'amélioration de la qualité de service.

Ce travail ne représente qu'une étude des SVC qui sera espérons-le complétée par une étude pratique dans les années à venir.

Référence bibliographique :

[doc I] :Jean VERSEILLE ‘ ‘ Circulation d’énergie réactive’ ’
Technique de l’ingénieur.
N° : D4 300-Mars 1992.

[doc II] : Gérard GAY ‘ ‘ La compensation de l’énergie réactive ’ ’
Intersections : Le magasin Schneider Electronic de l’enseignement technologique et
professionnel.
N° :16-novembre 2006.

[doc III]:Philippe SERRAND et Jean VERSEILLE ‘ ‘ Compensation de la puissance réactive
et tenue en tension dans les réseaux publics’ ’
Technique de l’ingénieur.
N° :D4 306 –Mars 1992.

[ths I] :A. CISSOUMA ‘ ‘ Etude de la compensation de la puissance réactive des réseaux
électriques (application d’un SVC)’ ’.
Thèse d’ingénieur à l’UMMTO , année 2006.

[ths II] : Jean-Christophe PASSELERGUE ‘ ‘ interactions des dispositifs FACTS dans les
grand réseaux électrique’ ’
Thèse de doctorat à l’INPG de France, septembre 1998.

[ths III] :Mario ALBERTO RIOS ‘ ‘ Modélisation pour analyses dynamiques des réseaux
électriques avec compensation de puissance réactive-SVC’ ’
Thèse de doctorat à l’INPG de France, septembre 1998.

[ths IV] : Yvon BENSANGER ‘ ‘ Etude des FACTS (flexible AC Transmission System) et
leur comportement dans les réseaux et d’interconnexion.’ ’
Thèse de doctorat à L’INPG de France , juin 1996.

[ths V] : Patrice PETICLAIRE ‘ ‘ modélisation et commande de Structure FACTS ’ ’
Application au STATCOM (STATic COMPensator)
thèse de doctorat à L’INPG de France, juillet 1997.

Mots clefs:

Réseaux électriques, compensation d'énergies électriques, Static Var Compensator (SVC)