

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف
UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF
UFAS (ALGERIE)
Faculté de Technologie

Mémoire de Magister
Présenté au département d'Electrotechnique

Pour obtenir le diplôme de :

Magister En Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques

Par

Belguidoum Hocine

Thème

***Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs
entièrement commandés***

Soutenu le 01/03/2012 devant la commission d'examen composée de :

BELKHIAT. S	Pr. à l'Université de Sétif	Président
RAHMANI. L	Pr. à l'Université de Sétif	Encadreur
BOUKTIR. T	Pr. à l'Université de Sétif	Examineur
GHERBI. A	Pr. à l'Université de Sétif	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je viens de remercier Allah le Tout Puissant Qui ma donné la force pour achever ce travail puis je dédie ce travail essentiellement à mes parents, mes frères et sœurs. je remercie également tous ceux qui m'ont soutenus de près ou de loin a fin finaliser ce projet en particulier mon encadreur Pr. RAHMANI LAZHAR et tous les autres collègues et enseignants qui m'ont aidé avec leurs conseils et documentation.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Généralités sur les réseaux de transport d'énergie électrique	3
I.1 Introduction	4
I.2 Types des perturbations qui peuvent dégrader la qualité de la tension	4
I.3 Transport de l'énergie électrique.....	5
Chapitre II : Descriptions générales des systèmes FACTS	8
II.1 Introduction	9
II.2 Types de FACTS	9
II.2.a FACTS de type série	10
II.2.a.1 Condensateur Série Commandé par Thyristors.....	10
II.2.a.2 Réactance Série Contrôlée par Thyristor (TCSR)	12
II.2.a.3 Compensateur Série Synchrones Statique SSSC	12
II.2.b FACTS de type parallèle.....	14
II.2.b.1 Compensateur Statique Synchrones STATCOM	14
II.2.b.2 La Bobine Supraconductrice de Stockage D'énergie SMES.....	17
II.2.b.3 Compensateur Statique de Puissance Réactive SVC.....	17
II.2.c FACTS de type hybride.....	21
II.2.c.1 Transformateur Déphaseur à Base de Thyristors TCPAR.....	21
II.2.c.2 Contrôleur de Flux de Puissance d'Interligne IPFC.....	23
II.2.c.3 Variateur de Charge Universel UPFC.....	23
II.3 Conclusion.....	25

Chapitre III :
Modélisation du Compensateur Statique de Puissance Réactive CSPR (SVC) 26

III.1	Introduction.....	27
III.2	Principes fondamentaux de la compensation de la puissance réactive.....	27
III.3	Types de base de compensateurs de puissance réactive.....	28
III.4	Configurations des compensateurs réactifs statiques.....	30
III.4.a	Reactance Contrôlée par Thyristor (TCR).....	30
III.4.b	Réactance Contrôlée par Thyristor-Condensateur Fixe (TCR-FC).....	34
III.4.c	Réactans Contrôlée par Thyristor – Condensateur Commuté Mécaniquement (TCR–CMS).....	36
III.4.d	Condensateur Commuté par Thyristor.....	36
III.4.d.1	Commutation d’un condensateur en série avec une inductance.....	37
III.4.d.2	Stratégies pratiques de la commutation.....	39
III.4.d.3	Stratégie de la fermeture des thyristors de TSC.....	39
III.4.d.4	Caractéristiques de fonctionnement du TSC.....	40
III.4.e	Condensateur commuté par thyristor et réactance contrôlée par thyristor (TSC-TCR)	41
III.4.e.1	Configuration.....	41
III.4.e.2	Caractéristique dynamique de fonctionnement.....	42
III.4.e.3	Calcul des limites de la marge de fonctionnement.....	42
➤	Les trois modes du courant du SVC.....	43
➤	Caractéristiques de la susceptance.....	43
III.5	Conclusion.....	44

Chapitre IV :
Gradateur MLI 46

VI.1	Introduction.....	47
VI.2	Schéma de principe.....	47
VI.3	Principe de fonctionnement.....	48
VI.4	Calcul de la tension et du courant de la charge.....	48
VI.4 .a	Calcul de la tension aux bornes de la charge.....	48
VI.4 .b	Calcul du courant	49

VI.5	Stratégies de commande implicite par modulation de largeur d'impulsion.....	49
VI.5.a	Commande par modulation naturelle.....	49
VI.5.b	Commande par modulation régulière.....	50
VI.5.c	Commande par modulation conventionnelle.....	50
VI.5.d	Stratégie de commande par modulation calculé.....	51
VI.5.d.1	Réglage du courant et réduction des harmoniques dans la charge.....	51
VI.5.d.2	Algorithme de calcul.....	54
VI.5.d.3	Angle de commutation.....	54
VI.5.d.4	Etude du cas général associé à M pair.....	56
VI.5.d.5	Etude du cas général associé à M impair.....	58
VI.6	Conclusion.....	63

Chapitre V :

SVC à base du gradateur classique et du gradateur MLI

64

V.1	Introduction.....	65
V.2	Caractéristique de Contrôle Tension-Courant de SVC	65
V.3	Réglage de tension avec un gradateur classique.....	67
V.3.a	Système de puissance	68
V.3.b	Composants de puissance de SVC	68
V.3.c	Système de commande de SVC.....	73
V.3.d	Formes d'ondes illustrant la réponse dynamique de SVC en fonction de la variation de la tension de source	76
V.3.f	Discussion et analyse des résultats	81
V.4	Le SVC amélioré par la topologie gradateur MLI.....	81
V.4.a	Système de commande.....	82
V.4.b	Cas des (M=3).....	83
V.4.c	Cas de (M=5).....	87
V.4.d	Cas de M=5 (la méthode implicite(IV.5.d))	92
V.4.e	Discussion et analyse des résultats	95
V.5	Comparaison entre les deux topologies	95
V.5.a	M=3	95

V.5.b M=5	96
V.5.c M=7	97
V.5.d M=13	97
V.5.e Discussion et analyse des résultats.....	98
V.6 Conclusion.....	100

Abréviations :

FACTS	: <i>Flexible Alternative Current Transmission System.</i>
TCSC	: <i>Thyristor-Controlled Series Capacitor.</i>
TCSR	: <i>Thyristor Switched Serie Reactor.</i>
SSSC	: <i>Static Synchronous Series Compensator.</i>
STATCOM	: <i>Static synchronous compensator.</i>
SMES	: <i>Superconductor energies stockage.</i>
SVC	: <i>Static Var Compensator.</i>
TCPAR	: <i>Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.</i>
IPFC	: <i>Interline Power Flow Controller.</i>
UPFC	: <i>Unified Power Flow Controller.</i>
PWM	: <i>Pulse Width Modulation.</i>
THD	: <i>Total harmonic distortion.</i>
r ms	: root main square.

Variables :

V_S	: Tension de source (générateur).
V_R	: Tension au point d'arrivée (le récepteur).
V_{sm}	: La tension de la bobine supraconductrice.
V_C	: La tension alternative injecte en série.
V_{SVC}	: Tension de SVC.
V_{pq}	: Tension injectée par l'UPFC.
V_{CO}	: Tension initiale du condensateur.
I_L	: Courant de ligne.
I_C	: Courant injecté.
I_{sm}	: Le courant de la bobine supraconductrice.
I_{Lmax}	: Courant max du TCR.
I_{Cmax}	: Courant max du TSC.
I_{TSC}	: Courant du TSC.
I_{TCR}	: Courant de TCR.
X_0	: La valeur en per unit de l'amplitude du fondamentale de la tension aux bornes la charge v_L .
I_{SVC}	: Courant de SVC.
V_{Seff}	: Tension efficace..
Q_{pq}	: Puissance réactive injecté ou absorbé par l'UPFC.
P_{pq}	: Puissance active injecté ou absorbé par l'UPFC.
$v_{ab_TCR}(V)$	: Valeur efficace de la tension de phase de TCR.
$i_{ab_TCR}(A)$	: Valeur efficace du courant de phase de TCR.
$v_{a_TCR}(V)$	: Valeur efficace de la tension de ligne.
$i_{a_TCR}(A)$	: Valeur efficace du courant de ligne.
I_n	: Courant efficace harmonique d'ordre n .
W_{sm}	: Energie absorbé par la bobine supraconductrice.
P_R	: Puissance active transmise (absorbée par la charge).

Q_R	: Puissance réactive transmise (absorbée par la charge).
P_S	: Puissance active générée (fournie par le générateur).
Q_S	: Puissance réactive générée (fournie par le générateur).
δ	: Angle de déphasage entre la tension de la charge et la tension de la source.
ϕ	: L'angle de déphasage entre le courant et la tension de la charge.
δ_C	: Angle de déphasage maximal entre la tension de la charge et la tension de la source
α	: Angle de commutation en degré.
x_i	: Angle de commutation.

Paramètre :

X_{TCSC}	: Réactance du Condensateur Série Commandé Par Thyristor.
X_{TSSC}	: Réactance du Condensateur Série Contrôlé Par Thyristor.
Z_{ch}	: Impédance de la charge.
X_L	: Réactance de la ligne (inductive).
X_{base}	: Réactance de base.
X_C	: Réactance capacitive.
X_{ind}	: Réactance inductive.
B_{TCR}	: Susceptance du TCR.
B_{SVC}	: Susceptance totale de SVC.
B_L	: Susceptance du TCR.
B_C	: Susceptance du TSC.
B_δ	: Susceptance du transformateur.
B_{SVC_P}	: Susceptance du SVC au primaire du transformateur.
B_{SVC_S}	: Susceptance du SVC au secondaire du transformateur.

INTRODUCTION GENERALE

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Il devient de plus en plus difficile d'obtenir des endroits de passage pour construire des nouvelles lignes de transport ou de distribution. Pour ces raisons, les compagnies d'électricité cherchent à augmenter la puissance que peuvent transporter les lignes existantes, sans autant compromettre leur fiabilité et stabilité. Idéalement, on aimerait les charger jusqu'aux limites de la capacité thermique des conducteurs et utiliser toutes les lignes pour supporter la charge électrique [01].

Les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique comportent jusqu'à maintenant des appareillages passifs. Par ailleurs, le maillage des lignes exige de plus en plus le contrôle des puissances transitées. La complexité des réseaux exige aussi des marges de sécurité accrues afin que les perturbations locales ne provoquent aucune instabilité qui pourrait s'étendre sur tout le réseau de transport [01]. L'évolution des topologies de l'électronique de puissance et leurs intégrations dans les réseaux électriques a engendré des améliorations majeures sur ces derniers, telles que la compensation flexible de l'énergie réactive, le contrôle continu de la tension aux jeux de barres, l'amélioration du facteur de puissance etc.

La travail de recherche de ce mémoire est motivé par le souci d'améliorer les performances du système de contrôle des puissances réactives et des tensions aux jeux de barres dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen des dispositifs FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission System*), comme ceux comportant une branche de réactance commandée par thyristors, tel que le compensateur statique de puissance réactive CSPR (acronyme en anglais « *Static Var Compensator SVC* »).

Le compensateur statique SVC à base des éléments de l'électronique de puissance contrôlable est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur des limites désirées. Le SVC injecte ou absorbe de la puissance réactive dans le jeu de barres là où il est installé, de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge. Il permet un contrôle flexible et continu de la tension au jeu de barres.

La correction du facteur de déplacement est réalisée en partie par des batteries de compensation fixes dont la puissance est limitée par la tension maximale admissible à vide sur le réseau. Afin d'adapter le niveau de compensation à la consommation, la partie fixe est complétée par un dispositif réglable basé sur une réactance contrôlée par des thyristors. Bien qu'il soit simple dans son principe, ce dispositif nécessite un filtrage des harmoniques en basse fréquence avec des circuits LC volumineux.

Sur la base de ce constat, l'objectif de ce travail de mémoire est de proposer une nouvelle topologie de compensateur de puissance réactive à haut rendement et utilisant un contrôle à

modulation de largeur d'impulsions dans le but de minimiser le volume des éléments de filtrage et assurer un contrôle linéaire de la susceptance du TCR du SVC.

Le premier chapitre présente la tenue de la tension des réseaux électriques. On retrouve dans ce chapitre la définition d'un réseau et sa stabilité dans différents régimes de fonctionnement ainsi que pour différentes perturbations qui gênent leur fonctionnement. On trouve aussi l'équation fondamentale des lignes de transport et sa solution en régime permanent. Les caractéristiques des lignes non compensées sont obtenues à partir de cette solution. On présente clairement un réseau compensé qu'on caractérise par rapport à un réseau non compensé et l'intérêt de la compensation des lignes longues, afin de respecter les contraintes requises pour le transport de l'énergie électrique. Ces dernières sont également présentées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est une présentation générale du concept FACTS. Il s'adresse tout d'abord aux techniques de la compensation de puissance réactive classiques et modernes et une liste des problèmes liés à l'exploitation d'un réseau électrique, puis nous introduisons les solutions qui peuvent être apportées par la technique FACTS. Une classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits d'une façon plus détaillée.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et à la modélisation du compensateur statique SVC. Dans ce chapitre, nous allons étudier le fonctionnement du SVC, et nous présentons les éléments qui constituent ces dispositifs. Différentes configurations de SVC sont présentées.

Dans le quatrième chapitre nous, avons consacré une partie importante à la stratégie de commande des convertisseurs AC/AC, où nous avons abordé les techniques de modulation de largeur d'impulsions, qui a pour objectif essentiel l'amélioration des performances spectrales (minimisation des harmoniques) par rapport au convertisseur à extinction naturelle, après avoir testé les méthodes classiques de modulation.

Dans le cinquième et le dernier chapitre, nous avons décrit en détail dans sa première partie, le principe de fonctionnement du système de commande du TCR du SVC, puis on a étudié de manière approfondie la synthèse des régulateurs et la loi de commande du TCR du SVC. Plusieurs cas des résultats de simulation ont été présentés du SVC avec le TCR à base de thyristor avec trois bancs de TSC, et puis dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons abordé le développement de la loi de commande du TCR du SVC à base de la nouvelle topologie dites hacheur Alternatif de composants commandables permettant le fonctionnement en PWM avec trois bancs de TSC. Plusieurs cas des résultats de simulation ont été présentés pour montrer la supériorité de cette dernière structure par rapport à la structure classique. Une comparaison minutieuse a été faite entre les deux topologies en termes de contrôle de la susceptance du TCR du SVC, de la minimisation du THD des formes d'ondes du courant fourni par le TCR du SVC et en fin nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les réseaux de transport d'énergie électrique

I.1 Introduction:

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu:

- ✓ Pour convertir d'une façon continue l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.
- ✓ Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.
- ✓ Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.

Pour un consommateur, le réseau devrait idéalement vu, de l'endroit où il prend son énergie électrique, comme une source de tension alternative parfaite: c'est-à-dire une source dont la fréquence et l'amplitude sont constantes quelle que soit la charge connectée.

Pour satisfaire leur clientèle, les compagnies d'électricité doivent donc s'efforcer de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension constantes (valeurs nominales). Donc, il est important de maintenir le niveau de tension près de sa valeur nominale aux différents nœuds du réseau [02].

Une grande majorité des lignes de transport d'énergie électrique sont à courant alternatif, fonctionnant à plusieurs valeurs de tension (10 kV à 800 kV), Les réseaux de distribution fonctionnent généralement au-dessous de 100 KV, tandis que la puissance est transmise à des tensions très élevées. Les lignes fonctionnant à différentes tensions sont reliées par les transformateurs qui fonctionnent au rendement élevé. Traditionnellement, les lignes à courant alternatif ne prévoient aucune commande du flux de puissance. Les disjoncteurs actionnés mécaniquement sont utilisés pour la protection contre les défauts. Un disjoncteur actionné mécaniquement est utilisé pour un nombre d'opérations d'ouverture et de fermeture limité à un moment défini et ne peut pas être employé pour la commande de flux de puissances (à la différence des commutateurs de l'électronique de puissance à fréquence de commutation très élevée tel que le thyristor, le GTO, l'IGBT, l'IGCT, etc.).

I.2 Types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de la tension:[02]

- **Les creux de tension et coupures brèves:** Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle.
- **Interruption courte:** L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycle jusqu'à 3s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 pu.
- **Chutes de tension:** Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension.
- **Tension et/ou courant transitoire:** Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant

des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde.

- **Déséquilibre de tension:** Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau.
- **Perturbations harmoniques:** Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale, qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc, etc.

I.3 Transport de l'énergie électrique:[03]

La plupart des charges sont de nature inductive et ont besoin d'une certaine quantité de puissance réactive. Cette quantité est déterminée par le facteur de puissance de la charge.

La figure I.1.a montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission avec une source de tension V_S , une réactance jX_L et une charge d'impédance $Z_{ch}(V_R)$.

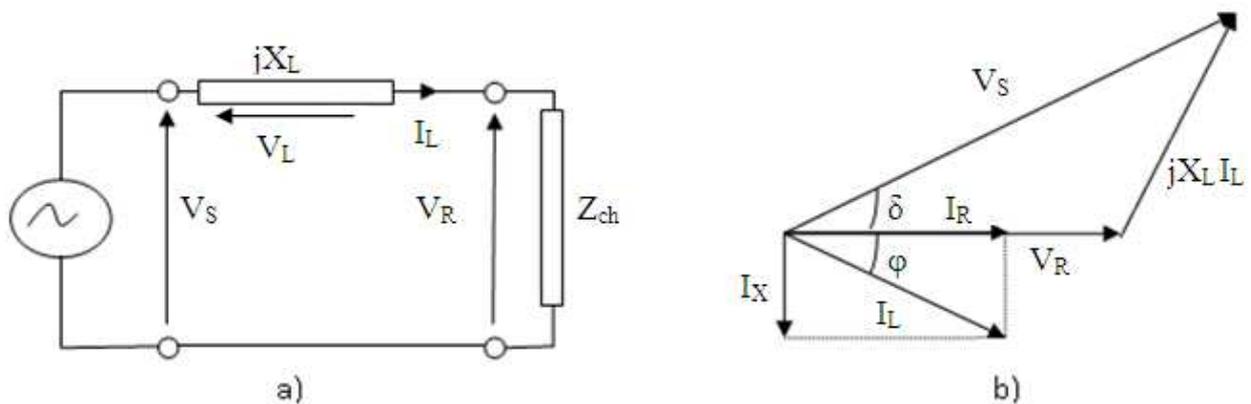


Figure I.1.a) Circuit équivalent d'un réseau électrique.

b) Diagramme vectoriel associé.

Si la charge est de nature inductive, le courant efficace I_L de i_L qui la traverse sera en retard de phase avec un angle φ par rapport à la tension aux bornes de celle-ci $Z_{ch}(V_R)$. Ce courant comprend deux composantes : la composante active I_R qui est en phase avec la tension V_R et la composante réactive I_X qui est en quadrature avec la tension V_R . La racine de la somme au carré de ces deux courants donne le courant de ligne I_L . Le courant I_R est porteur de la puissance active et le courant I_X est responsable au besoin de la puissance réactive de la charge (figure. I.1.b) [03].

Où δ est l'angle de déphasage entre V_R et V_S .

Le diagramme vectoriel de la figure I.1.b, nous permet d'extraire les équations suivantes:

$$V_S \cos(\delta) = V_R + X_L I_L \sin(\varphi) \quad (I.1)$$

$$V_S \sin(\delta) = X_L I_L \cos(\varphi) \quad (I.2)$$

$$P_R + jQ_R = V_R I_L^* = V_R I_L \cos(\varphi) + jV_R I_L \sin(\varphi) \quad (I.3)$$

A partir des deux équations (I.1) et (I.2), on peut calculer la puissance active et réactive transitant dans la ligne comme suit:

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_L} \sin(\delta) \quad (I.4)$$

$$Q_R = \frac{V_R^2}{X_L} - \frac{V_R V_S}{X_L} \cos(\delta) \quad (I.5)$$

Evidemment que $P_S = P_R$, dans le cas où les pertes sont négligeables.

Les puissances au niveau de la source :

$$P_s + jQ_s = V_s I_L^* = V_s I_L \cos(\varphi + \delta) + j V_s I_L \sin(\varphi + \delta) \quad (I.6)$$

$$Q_s = V_s I_L (\cos(\varphi) \sin(\delta) + \sin(\varphi) \cos(\delta)) \quad (I.7)$$

$$Q_s = V_s \frac{V_s \sin(\delta)}{X_L} + V_s \cos(\delta) \frac{V_s \cos(\delta) - V_R}{X_L} \quad (I.8)$$

On obtient

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_R V_S}{X_L} \cos(\delta) \quad (I.9)$$

Après l'analyse des équations ci-dessus, nous pouvons remarquer que le flux de puissance active et réactive peut être commandé par le contrôle de l'angle de déphasage δ , par le contrôle de la réactance X_L ou par le contrôle des tensions V_R et V_S . Pour bien comprendre, on suppose dans ce cas que la tension $V_S = V_R = V_{\text{base}}$ et $X_L = X_{\text{base}}$

Tenant compte de ces considérations, nous pourrions convertir les paramètres de la ligne de transmission en valeurs réduites qui sont comme suit : $V_S = V_R = 1 \text{ pu}$, $X_L = 1 \text{ pu}$. La figure. I.2 montre la variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de déphasage δ .

La figure I.3 montre la variation de la puissance réactive en fonction de la puissance active pour un angle de charge $0 \leq \delta \leq 90^\circ$.

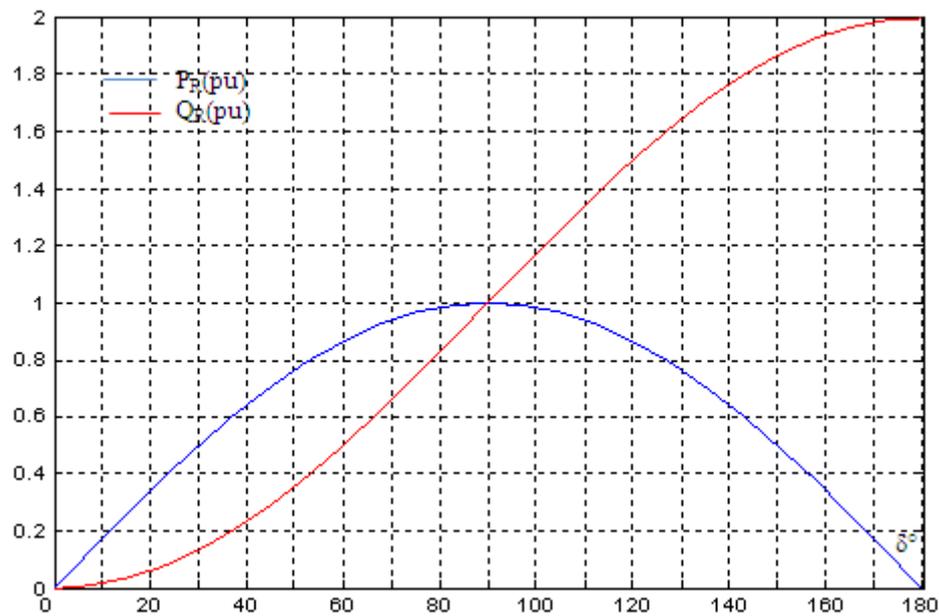


Figure I.2 P_R et Q_R transmises en fonction de δ° .

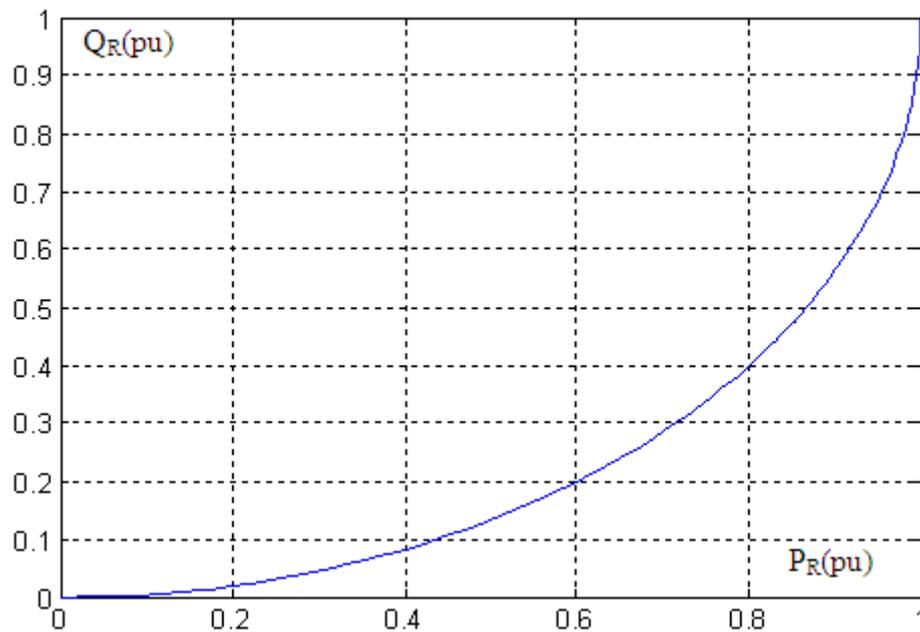


Figure I.3 Q_R en fonction P_R pour δ° ($0 \leq \delta \leq 90$).

Sur la figure I.2, nous pouvons conclure que la puissance active prend sa valeur maximale pour une valeur de δ égale 90° , donc on peut dire que dans cet intervalle le réseau reste stable (la stabilité est limitée par la valeur de $\delta = 90^\circ$), mais ailleurs, ce dernier peut devenir instable. La figure I.3 montre bien l'influence de l'augmentation de la puissance active sur la puissance réactive transmise par la ligne, donc on peut dire, pour plus de puissance active transmise, on aura plus de puissance réactive à fournir par le générateur. Pour satisfaire la demande de la charge, alors on aura plus de pertes dans la ligne de transport. Pour ces raisons, la compensation devient un facteur important pour l'amélioration du transport de la puissance active [02].

Chapitre II

Descriptions générales des systèmes FACTS

II.1 Introduction:

Un FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la tension, augmenter les capacités de transit, ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité. Il agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les condensateurs shunts fournissent la puissance réactive, et augmentent localement la tension du réseau (utilisé en période de forte consommation ou dans les zones éloignées des centres de production). Les réactances shunts consomment la puissance réactive, et diminuent la tension du réseau (utilisé en période de faible consommation). Les condensateurs séries permettent de diminuer l'impédance des liaisons électriques et d'augmenter la puissance transmissible par ces liaisons (une liaison électrique haute-tension est en effet essentiellement inductive). Les réactances série augmentent l'impédance d'une liaison électrique, afin de mieux répartir les courants sur les différentes liaisons [03].

II.2 Types de FACTS:

Les contrôleurs FACTS peuvent être classés comme suit:

a) FACTS séries: modifier l'impédance de la ligne, X_L est diminué afin d'augmenter la puissance active transmissible. Le FACTS est connecté en série avec le système de puissance. Il fonctionne comme une source de tension contrôlable. L'inductance série existe dans toutes les lignes de transmission AC. Sur les lignes longues, quand un courant fort circule, ceci provoque une chute de tension importante. Pour compenser, des condensateurs séries sont connectés, diminuant l'effet de l'inductance.

b) FACTS shunts: dans la compensation shunt, le système de puissance est connecté en shunt avec le FACTS. Il fonctionne comme une source de courant contrôlable. Un courant réactif est injecté dans la ligne pour maintenir l'amplitude de la tension. La puissance active transmissible est augmentée.

c) hybrides (séries- parallèles);

Selon les topologies et les dispositifs électroniques de puissance utilisés, les contrôleurs FACTS peuvent être classés en deux types:

1. Type d'impédance variable.
2. Type convertisseur source de tension (VSC).

Nous décrivons sommairement certains d'entre eux et nous intéressons en détail à la description, au principe de fonctionnement et à la modélisation du SVC qui fait l'objet de notre travail dans ce mémoire.

II.2.a FACTS de type série:

Ces types de FACTS connectés en série avec le réseau peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci [01-04].

II.2.a.1 Condensateur série commandé par thyristors:

Ceci peut être réalisé de deux manières:

- Par un contrôle continu.

Un module de TCSC (*Thyristor-Controlled Series Capacitor*) (figure II.1.a) est composé d'un banc de condensateurs X_C en parallèle avec une inductance X_{ind} contrôlée par deux thyristors. L'impédance totale X_{TCSC} vue par la ligne est une combinaison parallèle de la capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'amorçage des thyristors. On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser. Ce système permet:

- Accroître la longueur électrique d'une ligne de transmission à courant alternatif;
- L'amortissement des oscillations de puissance;
- La stabilité de la tension;
- L'équilibrage des flux de charge dans les réseaux de transmission;
- Une grande plage de variation de l'impédance équivalente capacitive et inductive;
- La réduction des problèmes dus aux phénomènes de résonance sub-synchrone.

- Par une commande discrète

La différence entre TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) (figure II.1.b) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés.

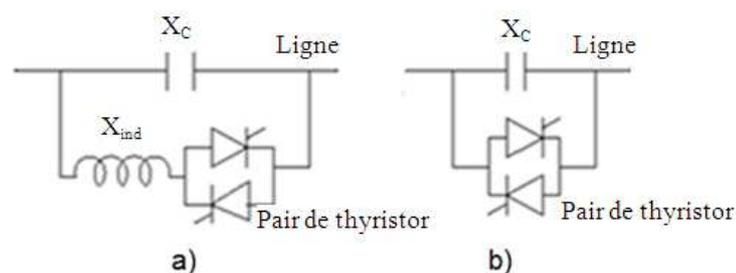


Figure II.1. Schéma de principe de a)TCSC et b) TSSC

La figure II.2.a, montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission d'une réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R , et un TSSC de réactance X_{TSSC} placé en série avec la réactance jX_L [04].

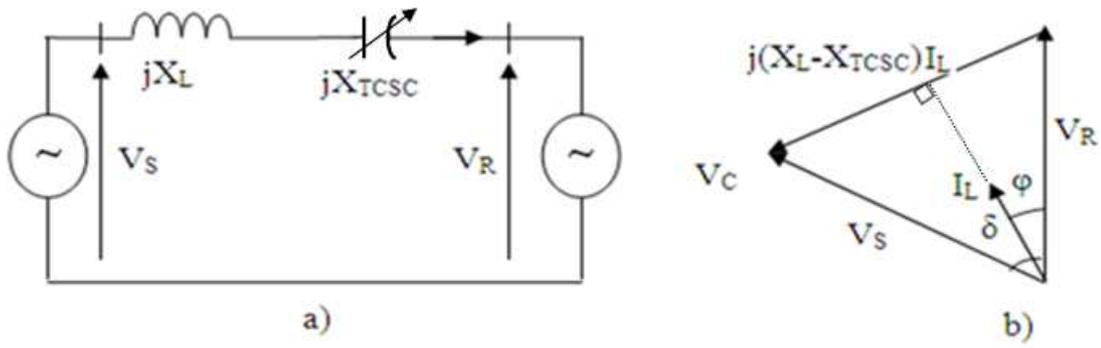


Figure II.2.a) Circuit équivalent d'un réseau électrique avec TSSC.

b) Diagramme vectoriel associé.

A partir de l'équation(I.4), on peut calculer la puissance active transitée dans la ligne comme suit:

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_L(1 - K)} \sin(\delta) \tag{II.1}$$

$$K = -\frac{X_{TSSC}}{X_L} \text{ Pour un TSSC} \tag{II.2}$$

$$K = -\frac{X_{TCSC}}{X_L} \text{ Pour un TCSC} \tag{II.3}$$

$$X_{TCSC} = \frac{X_C X_{ind}}{X_C + X_{ind}} \tag{II.4}$$

Pour mieux tracer les caractéristiques $P_R(\delta)$ avec différentes valeurs de K , on suppose dans ce cas que la tension $V_S = V_R = V_{base}$, $X_L = X_{base}$ et $0 \leq \delta \leq \pi$.

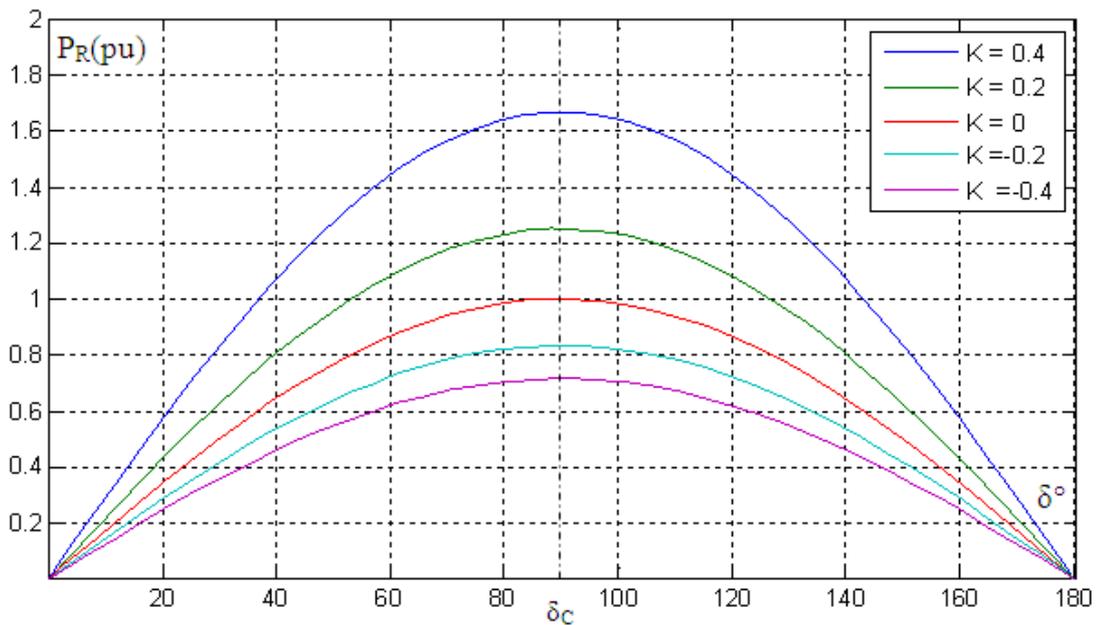


Figure II.3 P_R en fonction de δ avec un TSSC.

La figure II.3, montre que la puissance active P_R prend sa valeur maximale pour $\delta^\circ = \delta_c = 90^\circ$ et

dépend fortement de la valeur K , quand celle-ci augmente la puissance active maximale transmise augmente, et elle diminue avec la diminution de K , c'est-à-dire la puissance active transmise dépend de la réactance X_{TCSC} inséré dans la ligne de transmission.

II.2.a.2 Réactance Série Contrôlée par Thyristor TCSR:

Thyristor Switched Serie Reactor (TCSR):

Le TCSR (Figure II.4) est un compensateur inductif placé en série avec la ligne de transmission, qui se compose d'une inductance X_{ind1} en parallèle avec une autre inductance X_{ind2} commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage de la réactance commandée par thyristor est de 180° , le thyristor cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_{ind1} agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue au-dessous de 180° , la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90° , où elle est la combinaison parallèle de deux réactances [04].

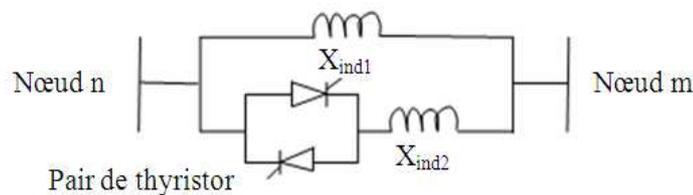


Figure II.4 Structure d'un TCSR.

II.2.a.3 Compensateur Série Synchrone Statique (SSSC):

Static Synchronous Series Compensator (SSSC):

Le SSSC est constitué d'un convertisseur statique avec une source d'énergie V_{dc} , connectée en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur de tension placé en série comme le montré la figure II.5.

Le SSSC injecte en série une tension alternative V_C en quadrature avec le courant de ligne I_L à l'aide d'un transformateur série. Le SSSC peut produire ou absorber la puissance réactive Q suivant la commande D du convertisseur statique (prend la mesure de la tension à l'aide d'un transformateur de tension TT , et du courant à l'aide d'un transformateur de courant TC).

Le SSSC a une fonction comparable au TCSC. Mais contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le réglage est continu. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure du convertisseur VSC. En distribution, il a des niveaux de puissance plus faibles, cette topologie est utilisée pour fiabiliser les utilisations critiques, face aux microcoupures: celle-ci porte alors le nom de DVR stockage dynamique de tension, (Dynamics Voltage Restorer) [04].

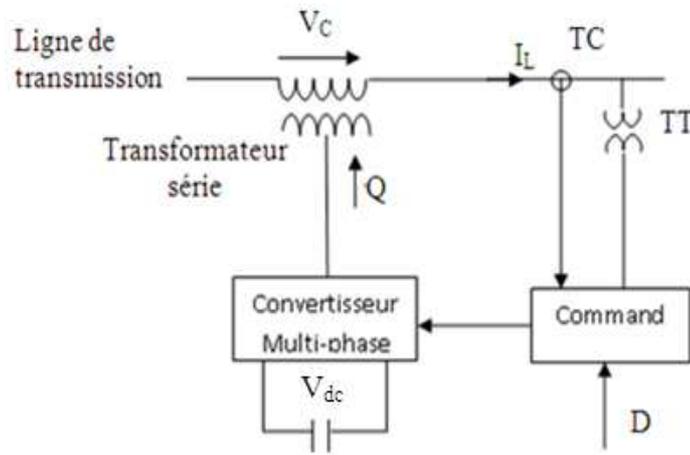


Figure II.5 Schéma de principe d'un SSSC.

La figure II.6.a, montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R , et un SSSC placé en série [04].

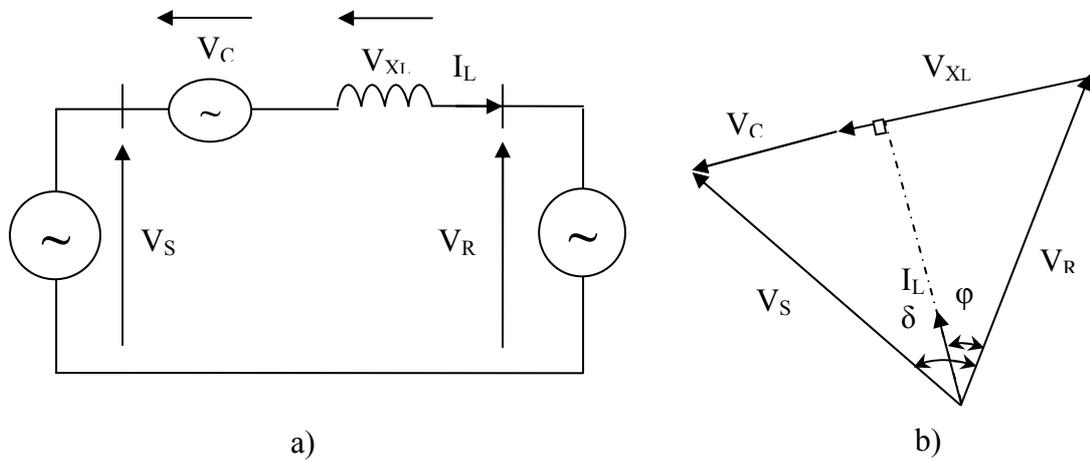


Figure II.6.a) Circuit équivalent d'un réseau électrique avec un SSSC.

b) Diagramme vectoriel associé.

Le diagramme vectoriel de la figure II.6.b, nous permettons d'extraire les équations suivantes:

$$\vec{I}_L = \frac{\vec{V}_S - \vec{V}_C - \vec{V}_R}{jX_L} \quad (II.5)$$

$$P = \Re\{\vec{V}_R \vec{I}_L^*\} \quad (II.6)$$

$$|\vec{V}_S - \vec{V}_R| = \sqrt{V_R^2 + V_S^2 - 2V_R V_S \cos(\delta)} \quad (II.7)$$

A partir des équations (II.5), (II.6) et (II.7), on peut calculer la puissance transmise comme suit.

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_L} \sin(\delta) \left(1 - \frac{V_C}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2 - 2V_R V_S \cos(\delta)}} \right) \quad (II.8)$$

Pour mieux tracer les caractéristiques $P_R(\delta)$ avec différentes valeurs de V_C , on suppose dans ce cas que la tension $V_S=V_R=V_{base}$, $X_L=X_{base}$ et $0 \leq \delta \leq \pi$.

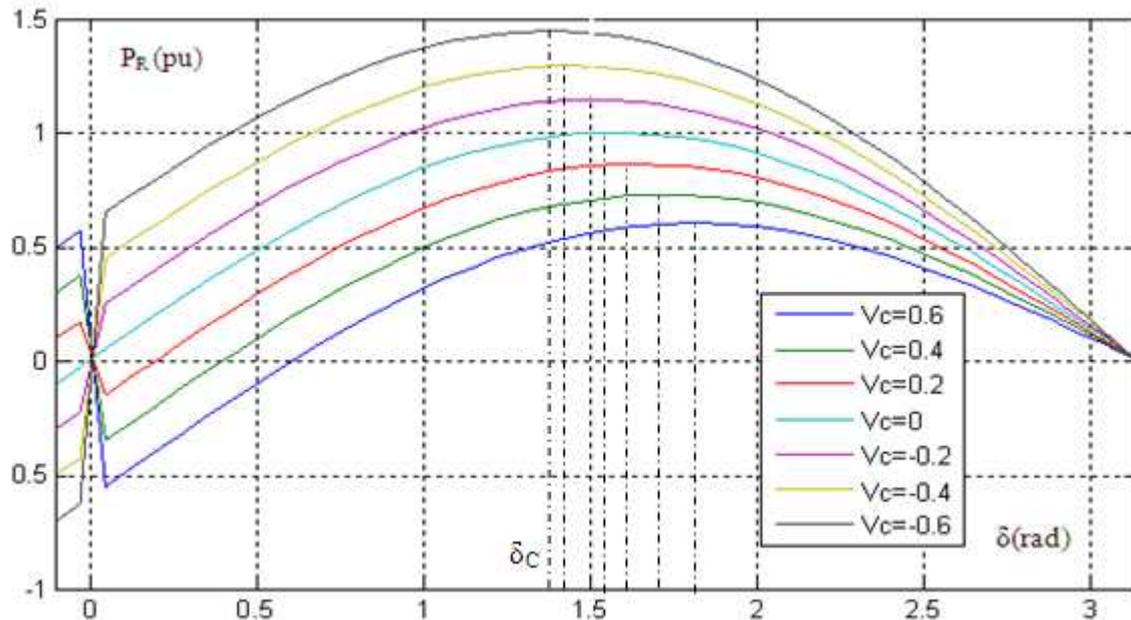


Figure II.7 P_R en fonction de δ avec un SSSC.

La figure II.7, montre que la puissance active transmise P_R atteint une valeur maximale puis diminue jusqu'à zéro pour $\delta = \pi$. En plus, la valeur maximale de P_R augmente et se déplace vers la gauche quand la tension V_C injectée dans la ligne par le SSSC diminue.

II.2.b FACTS de type parallèle:

II.2.b.1 Compensateur Statique Synchronique (STATCOM):

Static synchronous compensator (STATCOM):

Le compensateur statique synchrone STATCOM est constitué d'un convertisseur source de tension, d'un transformateur d'accouplement et d'un circuit de commande. Dans cette application, la source d'énergie V_{dc} peut être remplacée par un condensateur C , de sorte que l'échange d'énergie en régime permanent entre le compensateur statique et le réseau soit uniquement réactif, comme il est illustré dans la figure II.8 où I_C est le courant de sortie du convertisseur, perpendiculaire à la tension du convertisseur V_C . L'amplitude de la tension du convertisseur et la puissance réactive à la sortie du convertisseur sont réglables. Si V_C est supérieure à la tension V_L du réseau, le compensateur statique fournit la puissance réactive au système, si V_C est inférieure à V_L le compensateur statique absorbe la puissance réactive [04-05]. Le modèle simplifié du STATCOM considère le STATCOM comme une source de tension variable qui est ajustée automatiquement pour atteindre la tension désiré, le jeu de barres où il est connecté est considéré comme un jeu de barres où l'amplitude de la tension et la puissance active et réactive sont spécifiés [16].

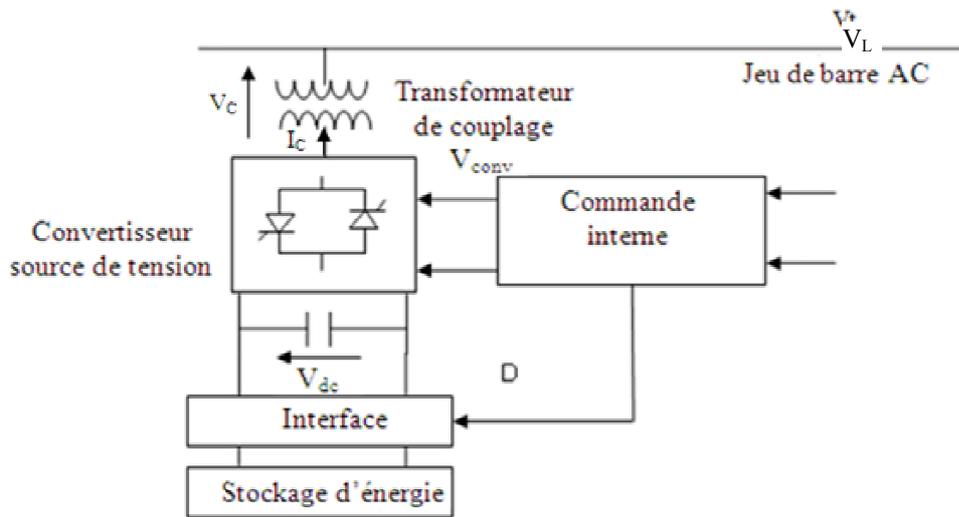


Figure II.8 Schéma de principe du STATCOM.

La figure II.9.a, montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R , et un STATCOM placé en parallèle au point quelconque de celle-ci.

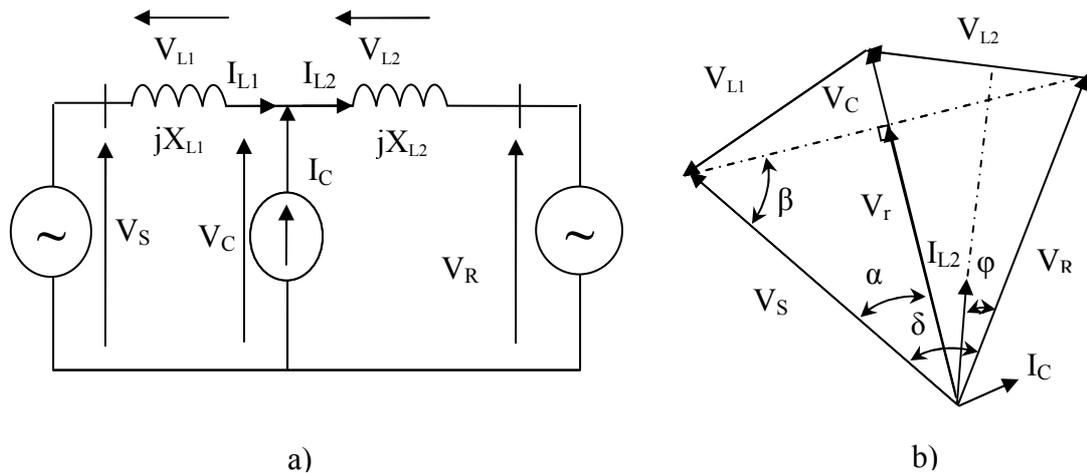


Figure II.9.a) Circuit équivalent d'un réseau électrique avec STATCOM.

b) Diagramme vectoriel associé.

Où V_r est la tension de non fonctionnement du STATCOM, c'est-à-dire $I_C = 0$. Le courant I_C est déphasé de 90° par rapport à V_C , donc il n'y a aucune puissance réactive produite ou absorbée par le STATCOM.

Le diagramme vectoriel de la figure. II.9.b, nous permet d'extraire les équations suivantes:

$$- \frac{V_{L1}}{jX_{L1}} - \frac{V_{L2}}{jX_{L2}} = I_C \tag{II.9}$$

$$- \frac{V_{L1}}{jX_{L1}} - \frac{V_{L2}}{jX_{L2}} = I_C \tag{II.10}$$

Et en substituant de (II.10) dans (II.9), on obtient l'équation (II.11):

$$\bar{V}_C = \bar{V}_r \left(1 + \frac{I_C}{V_r} \frac{X_{L1} X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \right) \quad (II.11)$$

$$\frac{\sin(\beta)}{V_R} = \frac{\sin(\delta)}{|\bar{V}_S - \bar{V}_R|} \quad (II.12)$$

$$\frac{\sin(\alpha)}{|\bar{V}_S - \bar{V}_R| \frac{X_1}{X_{L1} + X_{L2}}} = \frac{\sin(\beta)}{V_r} \quad (II.13)$$

Et en substituant de (II.12) dans (II.13), on obtient l'équation (II.14):

$$P_R = \frac{V_C V_S}{X_{L1}} \sin(\alpha) = \frac{V_R V_S}{X_{L1} + X_{L2}} \sin(\delta) \frac{V_C}{V_r} \quad (II.14)$$

$$|\bar{V}_r| = \frac{\sqrt{V_R^2 X_{L1}^2 + V_S^2 X_2^2 + 2 V_R X_{L2} V_S X_{L1} \cos(\delta)}}{X_{L1} + X_{L2}} \quad (II.15)$$

Des équations (II.11) à (II.14), on peut calculer la puissance transmise P_R comme suit:

$$P_R = \frac{V_C V_S}{X_{L1} + X_{L2}} \sin(\delta) \left(1 + \frac{I_C}{V_r} \frac{X_{L1} X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \right) \quad (II.16)$$

Pour mieux tracer les caractéristiques $P_R(\delta)$ avec différentes valeurs de I_C , on suppose dans ce cas que la tension $V_S = V_R = V_{base}$, $X_{L1} = X_{L2} = X_{base}/2$ et $0 \leq \delta \leq \pi$.

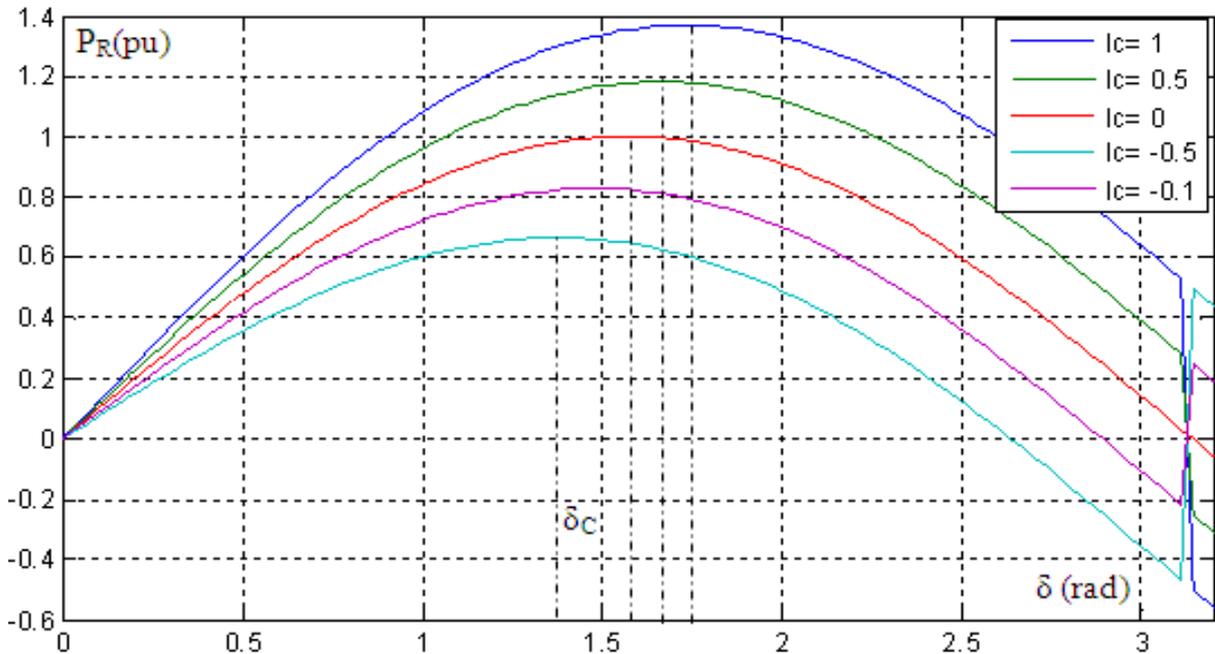


Figure II.10 P_R en fonction de δ avec un STATCOM.

La figure II.10, montre que la puissance active transmise P_R dépend du courant I_C injecté par le STATCOM, Quand la tension V_C du STATCOM est inférieure à la tension au point de connexion avec la ligne de transmission, le STATCOM absorbe un courant I_C déphasé de $-\pi/2$ par rapport à la tension V_C . Donc, le STATCOM joue le rôle d'un compensateur inductif et la puissance

active maximale $P_R(\delta_C)$ diminue avec la diminution de I_C . Dans le cas contraire, la tension V_C est supérieur à la tension au point de connexion de la ligne de transmission, le STATCOM génère un courant I_C déphasé de $+\pi/2$ par rapport à la tension V_C , Dans ce cas, le STATCOM joue le rôle d'un compensateur capacitif et la puissance active maximale $P_R(\delta_C)$ augmente avec l'augmentation de I_C .

II.2.b.2 Bobine supraconductrice de stockage d'énergie SMES:

La figure II.11 ci-dessous donne le schéma de principe d'un tel dispositif, dont la bobine supraconductrice ne présente aucune résistance: tout courant qui y est induit, en appliquant par exemple une tension à ses bornes puis en la court-circuitant, va se maintenir jusqu' à ce qu'une tension de polarité inverse soit appliquée. Aucune résistance ne soit introduite dans le circuit pour la décharger. Si l'inductance de la bobine est L_{sm} , elle accumulera une énergie W_{sm} et se charge conformément aux équations (II.17) et (II.18)

$$W_{sm} = \frac{1}{2} L_{sm} (I_{sm})^2 \quad (II.17)$$

$$V_{sm} = L_{sm} \frac{dI_{sm}}{dt} \quad (II.18)$$

I_{sm} et V_{sm} sont respectivement le courant et la tension de la bobine supraconductrice. L'association d'une bobine supraconductrice utilisée comme accumulateur magnétique supraconducteur d'énergie et d'un convertisseur à commutation forcée de grande puissance constitue le SMES. Les échanges des puissances active et réactive entre la bobine supraconductrice et le réseau électrique à travers le convertisseur convenablement commandé font que le SMES réalise les deux fonctions de régulation, à savoir la régulation de vitesse et celle de tension [05].

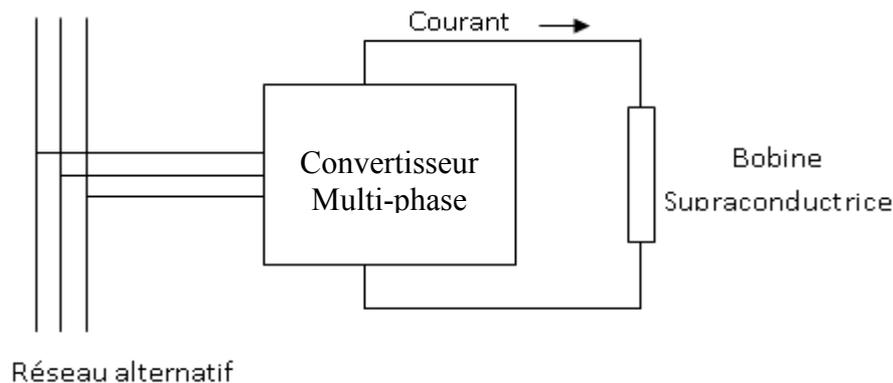


Figure II.11 Schéma de principe du SMES.

II.2.b.3 Compensateur Statique de Puissance Réactive SVC:

Static Var Compensator(SVC):

Dans la pratique, il y a plusieurs modèle de SVC, le modèle défini par (Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electrique) et considère le SVC comme un générateur synchrone qui ne produit aucune puissance active, identique à un condensateur synchrone en

parallèle avec une réactance inductive. Le jeu de barres au point de raccordement est comme un jeu de barres PV bus, devient PQ bus quand le SVC fonctionne à sa limite [16].

Le compensateur statique de puissance réactive SVC rend possible le contrôle rapide de la tension. La figure II.12 ci-dessous illustre le schéma d'un SVC.

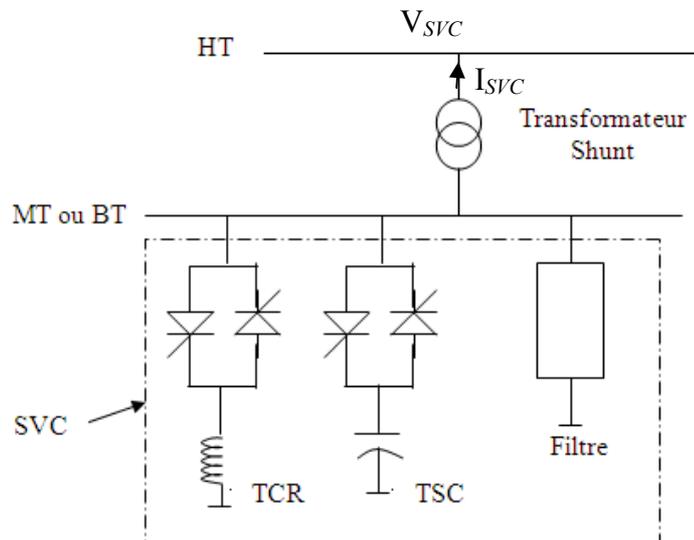


Figure II.12 Schéma de principe d'un SVC.

Le SVC est l'association d'une inductance commandée par thyristor (*Thyristor-Controlled Reactor*: TCR), d'un condensateur commuté par thyristor (*Thyristor-Switched Capacitor*: TSC) et d'un filtre d'harmoniques. La caractéristique statique de ce type de FACTS est donnée par la figure II.13.

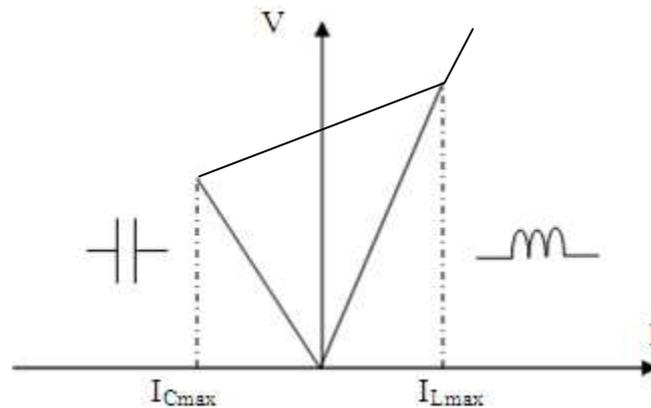


Figure II.13 Caractéristique du SVC.

I_{Cmax} et I_{Lmax} sont les courants limites que peuvent supporter respectivement le TCR et le TSC [05-07].

Le SVC est un dispositif qui met en jeu des thyristors montés en tête-bêche;

Un "Static Var Compensator" est un dispositif shunt, branché en général à travers un transformateur HT/MT ou BT.

Un SVC est un générateur de puissance réactive qui produit / absorbe une puissance variant de façon continue depuis $+Q_c$ à $-Q_l$

Le SVC répond en dynamique, dans un temps court, de l'ordre de deux cycles, pour compenser une variation brusque de la tension consécutive à un à-coup de charge ou à un défaut.

Le TSC fournit: rien ou sa pleine puissance: $0/+Q_c$

Le TCR absorbe de façon continûment variable: $0/-Q_l$

Le filtre fournit en permanence sa puissance : $+Q_f$

Le bilan du SVC est donc : $Q = +Q_c + Q_f - Q_l$

Le SVC en régime permanent:

- ✓ Régule le profil de tension, particulièrement sur les systèmes faibles, en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive
- ✓ Augmente la capacité de transport du système
- ✓ Réduit ou élimine les exigences pour de nouvelles lignes
- ✓ Réduit les pertes (en évitant de transporter du réactif) et donc optimise les investissements

Le SVC en régime dynamique:

- ✓ Participe à la Restauration d'un système après un défaut
- ✓ Amortit les oscillations de puissance
- ✓ Améliore les marges de stabilité
- ✓ Réduit les oscillations de (flicker)
- ✓ Equilibre les effets dus aux charges déséquilibrées

La figure II.14.a, montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R , et un SVC placé en parallèle au point milieu de celle-ci, le diagramme vectoriel associé est montré dans la figure II.14.b [04].

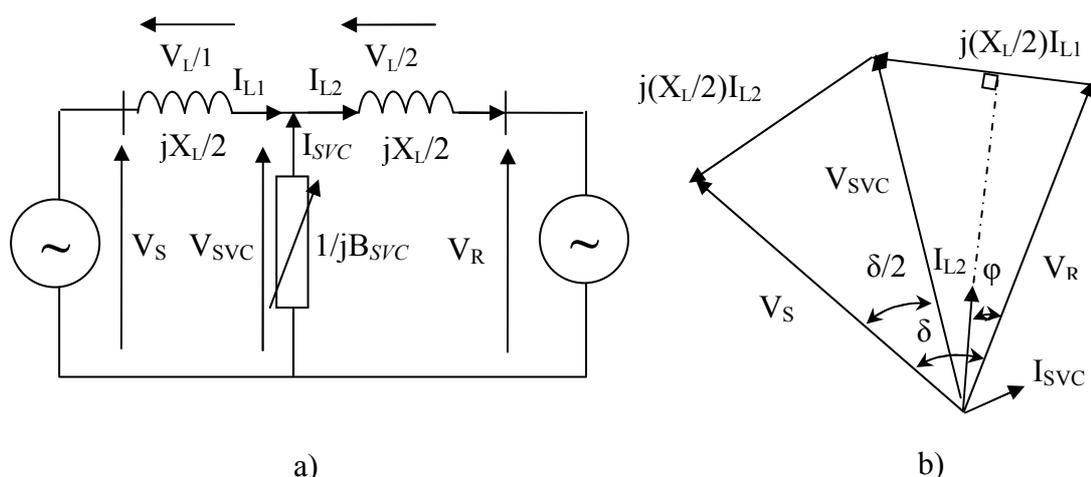


Figure II.14.a) Circuit équivalent d'un réseau électrique avec un SCV.

b) Diagramme vectoriel associé avec $\varphi = \delta/4$.

De l'équation(I.4), on peut calculer la puissance active transmise dans la ligne:

$$P_R = \frac{2V_R V_S}{X_L} \sin(\delta/2) \tag{II.19}$$

La figure II.15, montre le transformation $Y \rightarrow \Delta$ de la figure II.14.a

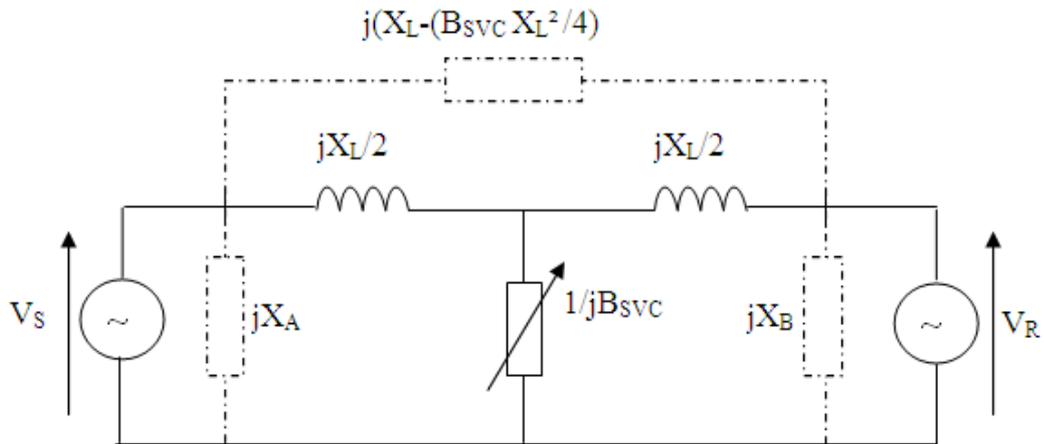


Figure II.15 Transformation $Y \rightarrow \Delta$ de circuit de la figure II.14.a.

Il n’y a aucun effet pour les réactances parallèles X_A et X_B , parce que V_S et V_R sont supposé constants, la puissance active transmise est donnée par l’équation suivante:

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_L - \frac{X_L^2 B_{SVC}}{4}} \tag{II.20}$$

De la même manière, on suppose que la tension $V_S = V_R = V_{SVC} = V_{base}$, $X_L = X_{base}$ et $0 \leq \delta \leq \pi$, pour différentes valeurs de B_{SVC} .

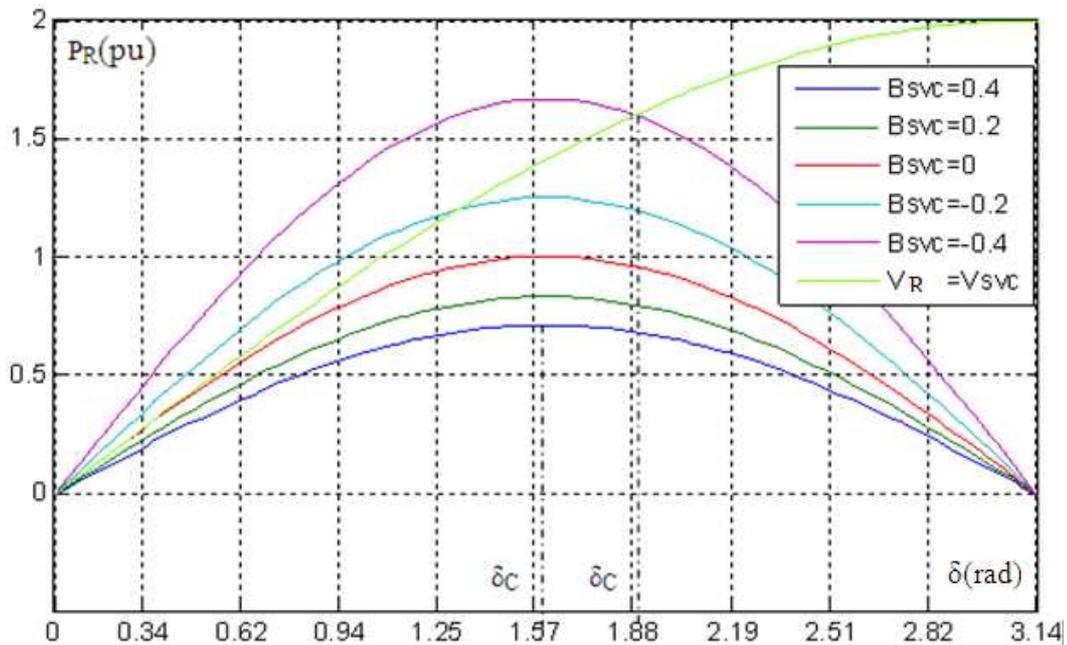


Figure II.16 P_R transmise en fonction de δ avec un SVC.

La figure II.16, montre que la puissance active maximale transmise $P_R(\delta)$ avec le SVC est deux fois supérieure à la puissance active transmise maximale $P_R(\delta)$ sans SVC, dans ce cas, on cherche la réactance B_{SVC} pour maintenir la tension au point de connexion égale 1pu et $P_R(\delta)$ au maximum.

II.2.c FACTS de type hybride:

II.2.c.1 Transformateur déphaseur à base de Thyristors (TCPAR) :

Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR):

La figure II.17, montre le schéma d'un TCPAR

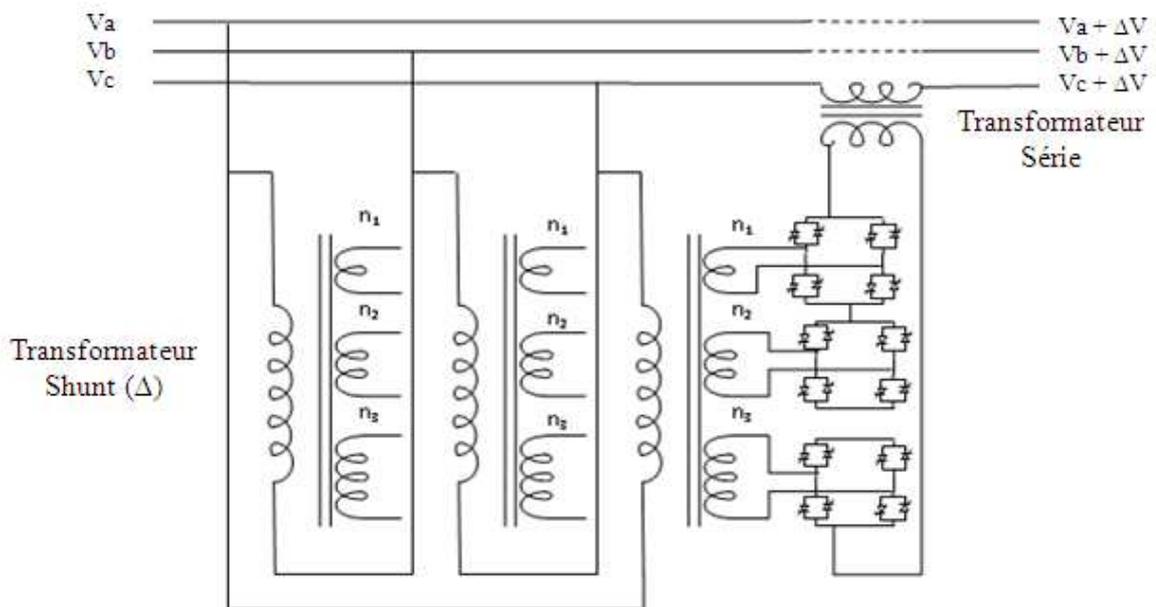


Figure II.17 Schéma de principe d'un TCPAR.

C'est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régler en charge (LTC; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier possède différents rapports de transformation (n_1 , n_2 , n_3). Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire des thyristors. Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension ΔV en quadrature avec la tension à déphaser. Il a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction. Par contre, comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'ajouter un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation. L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont n_1 , n_2 , n_3 [06]

La figure II.18.a, illustre le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R et un TCPAR placé en série [04]

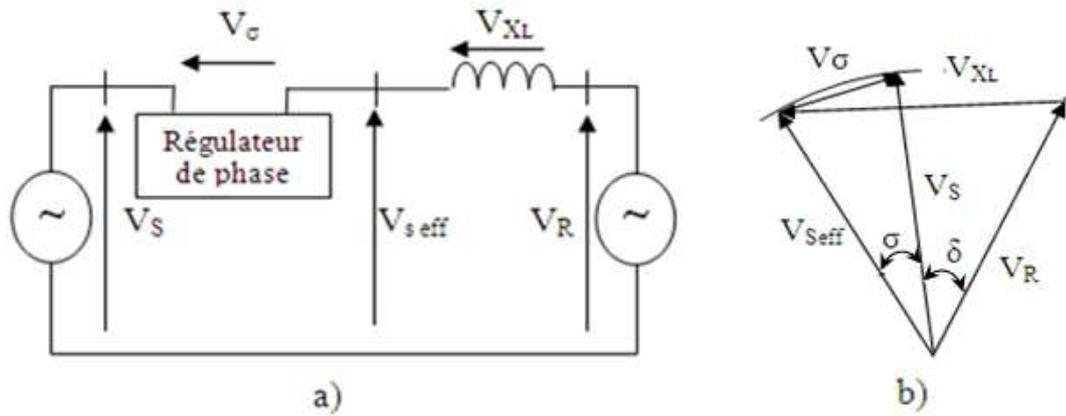


Figure II.18.a) Circuit équivalent d'un réseau électrique avec TCPAR.

b) Diagramme vectoriel associé.

Du diagramme vectoriel de la figure II.18.b) et de l'équation (I.4), on peut calculer la puissance active transmise dans la ligne comme suit:

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_L} \sin (\delta \pm \sigma) \tag{II.21}$$

De la même manière, on suppose dans ce cas, que la tension $V_S = V_R = V_{\text{base}}$, $X_L = X_{\text{base}}$ et $0 \leq \delta \leq \pi$ avec différentes valeurs de σ .

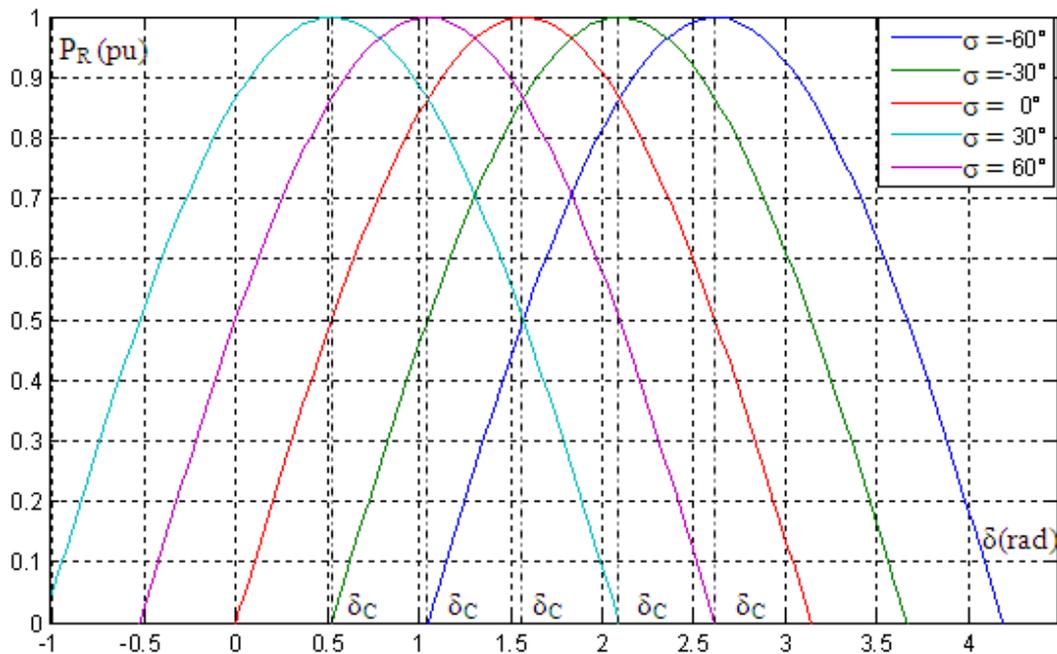


Figure II.19 P_R en fonction de δ radian avec un TCPAR.

L'idée de base de ce type de FACTS est de maintenir la puissance active transmise $P_R(\delta)$ à sa valeur désirée et indépendante de la valeur actuelle de l'angle de déphasage δ . Si δ dépasse $\pi/2$, l'amplitude de V_{σ} est choisie de telle sorte que le déphasage entre les tensions V_R et V_S reste à $\pi/2$ ($\delta = \delta_c$) [04].

II.2.c.2 Contrôleur de flux de puissance d'interligne (IPFC):

Interline Power Flow Controller (IPFC):

L'IPFC a été proposé afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC et peut ajouter le STATCOM.

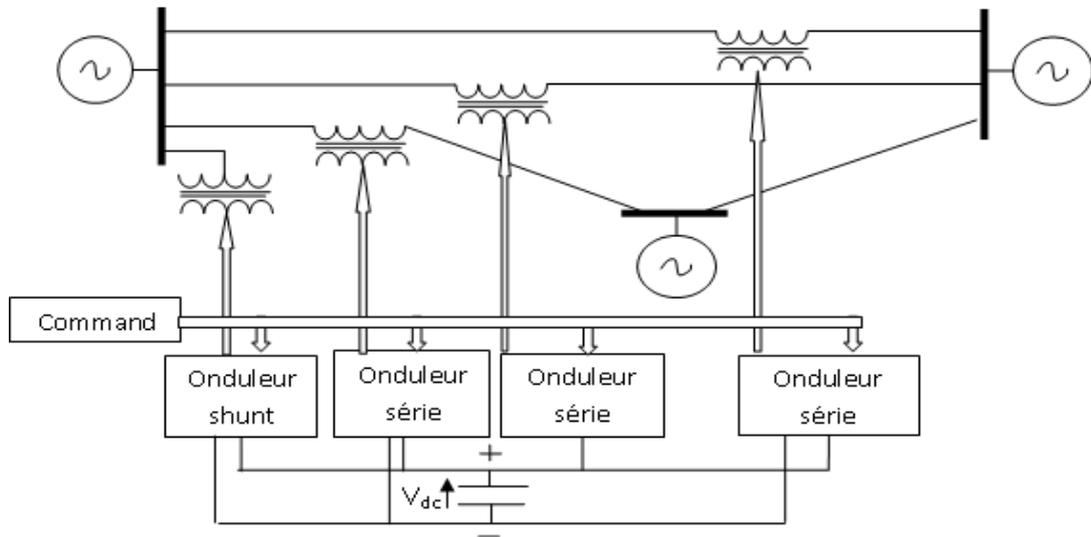


Figure II.20 Schéma de principe d'un IPFC.

II.2.c.3 Variateur de charge universel UPFC :

Unified Power Flow Controller (UPFC):

En principe, le variateur de charge universel l'UPFC possède à la fois la fonctionnalité des autres compensateurs FACTS (parallèle, série et déphaseur), à savoir le réglage de la tension, le flux de puissances, l'atténuation des oscillations de puissance et l'amélioration de la stabilité. L'originalité de ce dispositif est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique à savoir : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne où il est installé. La configuration de l'UPFC comprend un compensateur shunt STATCOM et un compensateur série SSSC. Les deux compensateurs sont interconnectés avec un jeu de barres de tension continue V_{dc} comme le montre la figure II.21 [05-06] et [08].

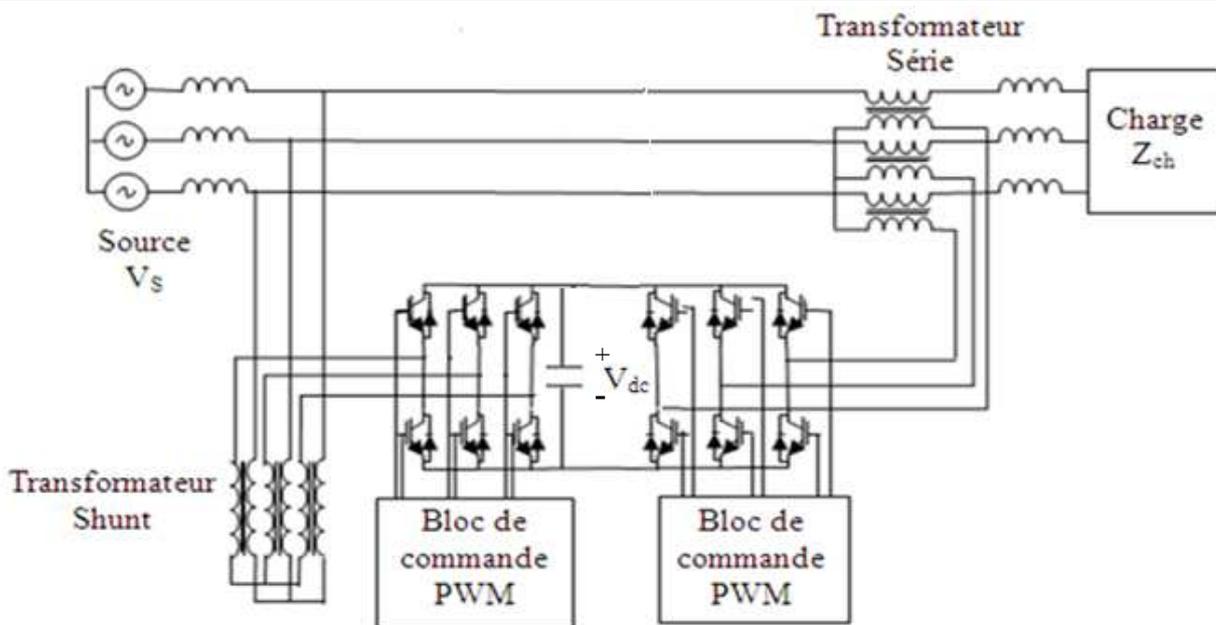


Figure II.21 Schéma de principe d'un variateur de charge universel.

La figure II.22.a, montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission de réactance jX_L avec deux générateurs de tension V_S et V_R et un UPFC [04].

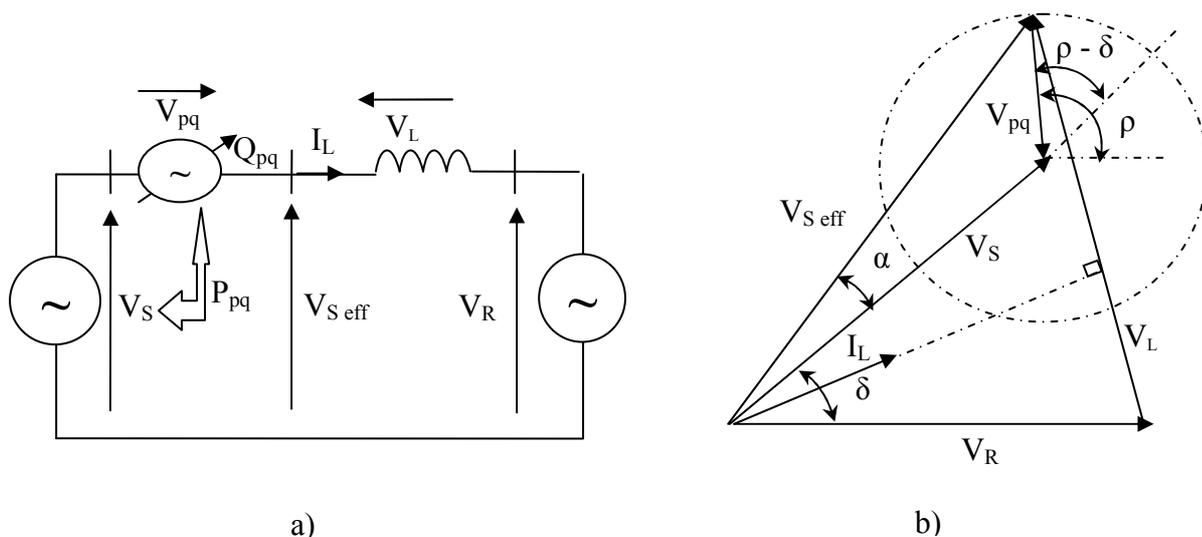


Figure II.22.a) Circuit équivalent d'un réseau électrique avec UPFC.

b) Diagramme vectoriel associé.

Le diagramme vectoriel de la figure II.22.b, nous permet d'extraire les équations suivantes:

$$P = \Re\{\overline{V_R I_L^*}\} \tag{II.22}$$

$$\overline{I_L} = \frac{\overline{V_{S\text{eff}}} - \overline{V_R}}{jX_L} = \frac{\overline{V_S} e^{j\delta} + \overline{V_{pq}} e^{j\rho} - \overline{V_R}}{jX_L} \tag{II.23}$$

A partir des deux équations (II.22) et (II.23), on peut calculer la puissance transmise:

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_L} \sin(\delta) \frac{V_R V_{pq}}{X_L} \sin(\rho) \quad (\text{II.24})$$

De la même manière, on suppose dans ce cas, que la tension $V_S = V_R = V_{\text{base}}$, $X_L = X_{\text{base}}$ et $0 \leq \delta \leq \pi$ avec différentes valeurs de V_{pq} .

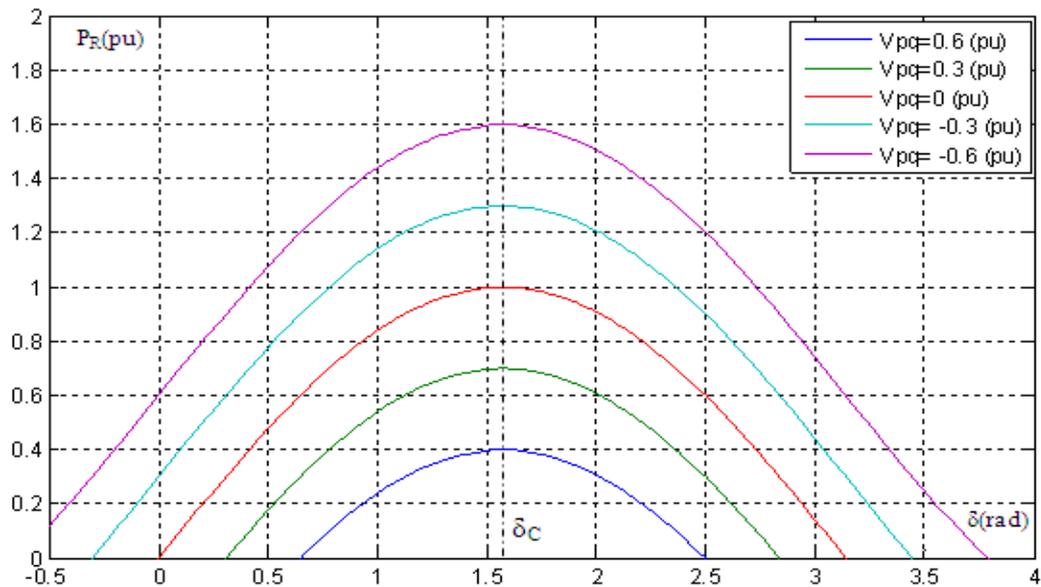


Figure II.23 P_R en fonction de δ avec un UPFC et $\rho = 90^\circ$.

La figure II.23, montre le cas, où la tension injectée par l'UPFC et au maximum influence, lorsque l'angle (ρ) est égale à 90° , donc la puissance active transmise maximale ($\delta_c = \pi/2$) dépend de la valeur de V_{pq} injectée. La puissance maximale augmente avec l'augmentation V_{pq} et l'inverse.

II.3 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques types des systèmes FACTS. Concernant la modélisation et l'intégration de ces dispositifs de compensation dynamique dans les réseaux électriques, on peut conclure que l'intégration de cette nouvelle technologie (FACTS) dans la structure des réseaux électriques, permet le réglage des tensions, le contrôle du transit de la puissance active et réactive, ce qui permet une meilleure gestion de l'énergie et une amélioration des indices de qualité de l'énergie électrique.

Les équipements à base de l'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème. Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT/GTO, le temps de réaction des dispositifs FACTS est diminué à quelques milli-secondes.

Nous avons choisi d'étudier le SVC pour améliorer les propriétés de celle-ci, afin que ce dernier être fiable pour garder la tension de raccordement à un réseau électrique dans la marge de tension désirée et pour améliorer le transit de puissance active.

Chapitre III

Modélisation du Compensateur Statique de Puissance Réactive

III.1 Introduction:

Le SVC est un dispositif shunt de la famille Flexible Alternating Current Transmission Système (FACTS) utilisant l'électronique de puissance.

Durant les dernières années, l'utilisation des compensateurs statiques de puissance réactive (SVC: *Static Var Compensator*) demeure indispensable dans le système de transmission. Il est destiné à la compensation de l'énergie réactive et l'amélioration de la stabilité de la tension, aussi bien que la stabilité des petites et grandes perturbations dans les réseaux électriques. Le rôle principale du SVC est de maintenir essentiellement la tension constante au jeu de barre là où il est installé en générant ou en absorbant de l'énergie réactive, et bénéficie à l'équilibre de la puissance réactive du système de transmission à l'état stable du réseau.

Si le SVC est installé au point milieu d'une ligne de distribution, il est possible de rendre la tension au jeu de barre au point de raccordement égale à la tension de référence par réglage continu de la puissance réactive [07].

III.2 Principes fondamentaux de la compensation de la puissance réactive:

Dans cette section nous définissons certains symboles et termes utilisés dans ce mémoire, dans le but de décrire les principes fondamentaux de la compensation de la puissance réactive.

L'inductance ou le condensateur connecté à un nœud du réseau est traités comme une charge (Figure. III.1).

La puissance est définie comme suit:

$$P + jQ = VI^* \quad (\text{III.1})$$

Où V: Tension au jeu de barres.

I : le courant de charge.



Figure III.1 Inductance et condensateur traités comme une charge.

Avec l'équation (III.1), les puissances active et réactive consommées par une inductance pure et un condensateur pur sont exprimées respectivement comme suit:

Inductance:

$$P_L + jQ_L = j \frac{V^2}{\omega L} \quad (\text{III.2.a})$$

$$P_L = 0 \quad ; \quad jQ_L = j\frac{V^2}{\omega L} \tag{III.2.b}$$

Condensateur:

$$P_C + jQ_C = -j\omega CV^2 \tag{III.3.a}$$

$$P_C = 0 \quad ; \quad jQ_C = -j\omega CV^2 \tag{III.3.b}$$

Où L : l'inductance; C : le condensateur; $\omega=2\pi f, f$: la fréquence fondamentale du réseau.

Si ($Q > 0$), alors la charge aura des caractéristiques inductives. Elle absorbe la puissance réactive du système, et si la charge aura des caractéristiques capacitives, elle fournit la puissance réactive au système. Quand, ($Q > 0$) la source d'énergie fournit la puissance réactive, quand ($Q < 0$) elle absorbe la puissance réactive du système.

Afin d'éviter la confusion possible des concepts discutés ci-dessus, dans cette section nous définirons, que la réactance consomme la puissance réactive, et le condensateur produit la puissance réactive. Cependant, dans une équation, les signes (positif ou négatif) de la puissance réactive dans le modèle d'un dispositif dépendront du cas si la réactance est traitée comme charge ou comme source [07].

III.3 Types de base de compensateurs de puissance réactive:

Un circuit simple équivalent d'un réseau électrique comprend une source de tension V_S et une ligne de transmission de réactance jX_L , et une charge d'impédance $Z_{ch}(V_R)$. Le circuit équivalent et son diagramme vectoriel correspondant sont montrés dans les figures III.2.a) et III.2.b). Evidemment, il existe des différences dans les grandeurs, dans l'angle de déphasage δ et l'amplitude entre la tension de la source V_S et la tension de la charge V_R . Le diagramme vectoriel montre que la chute de tension au niveau de la ligne est atténuée par la transmission de la puissance réactive. Et la différence de l'angle de phase entre les vecteurs de tension est due principalement à la puissance active transmise par la ligne [08].

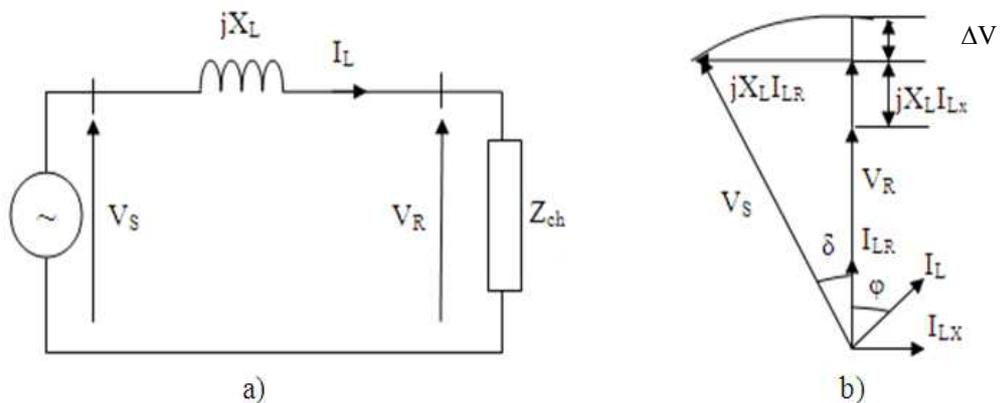


Figure III.2.a) Circuit équivalent d'un simple réseau électrique.

b) Diagramme vectoriel associé.

ΔV : La chute de tension causée par la puissance active.

La figure III.3.a montre un compensateur capacitif installé en parallèle à l'extrémité d'un récepteur d'une ligne de transmission. Le diagramme vectoriel de la figure III.3.a) montre le cas où le courant du compensateur capacitif I_C est égal à celle du courant inductif I_{LX} . Dans ce cas, il y a une chute de tension ΔV entre les amplitudes des deux tensions V_S et V_R , due à la puissance active transmise, si le système est totalement compensé, c'est à dire la puissance réactive produite par le condensateur est absorbée par la charge. Le courant du condensateur est donné par l'équation suivante [08]:

$$|I_C| = |I_{LX}| \tag{III.4}$$

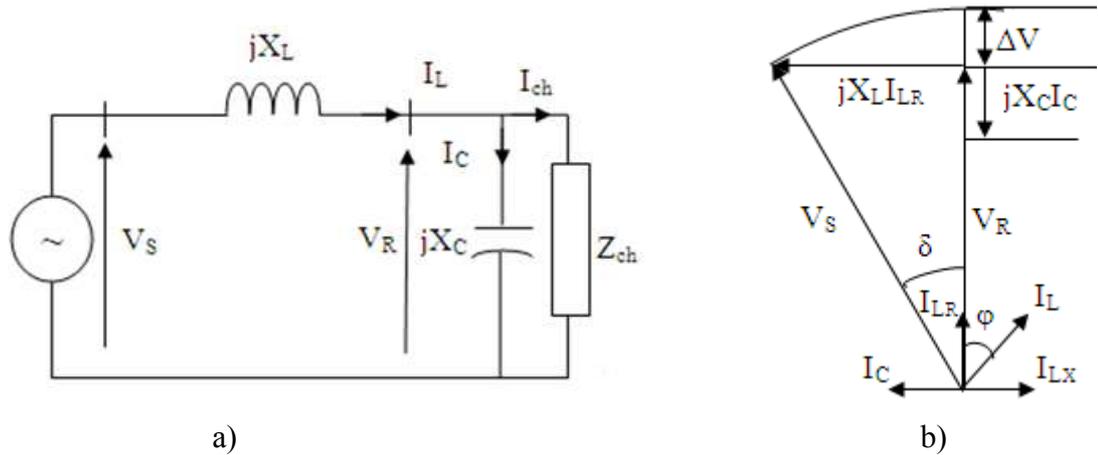


Figure III.3.a) Compensateur capacitif (compensation $\cos(\varphi)=1$)
b) Diagramme vectoriel associé.

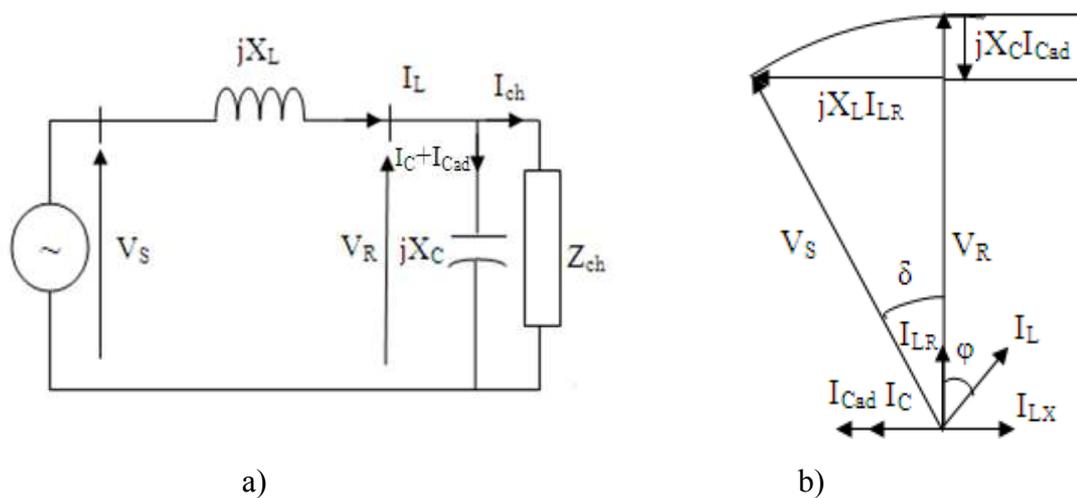


Figure III.4.a) Compensateur capacitif (compensation $V_S=V_R$).
b) Diagramme vectoriel associé.

Le courant du condensateur additionné I_{Cad} (figure III.4.a) peut compenser la chute de tension produite par la puissance active de la ligne de transmission, et rend la tension à l'extrémité du récepteur égale à la tension de source comme le montre la figure III.4.b).

$$V_R = V_S \tag{III.5}$$

Et le courant du condensateur devient :

$$|I_C| = |I_{Lx}| + |I_{cad}| \quad (\text{III.6})$$

Donc, il y a deux types de compensation capacitive,

La première compensation: est appelée le compensateur de charge qui fournit la puissance réactive, afin d'augmenter le facteur de puissance jusqu'à 1, bien que, la chute de tension entre la source et l'extrémité de la ligne de transmission existe toujours.

La deuxième compensation: est appelée le compensateur de la chute de tension le long de la ligne complète en rendant la valeur du courant du condensateur I_C plus grande que la valeur du courant de la charge I_{Lx} selon la condition du système au niveau de la tension.

III.4 Configurations des compensateurs réactifs statiques:

Dans la pratique, il y a différents types de compensateurs statiques sur les lignes de transmission.

Les principaux types sont brièvement décrits dans cette partie.

III.4.a Réactance Contrôlée par Thyristor (RCT):

Thyristor Controlled Reactor (TCR):

Le circuit monophasé d'une réactance contrôlée par thyristor (RCT), est montré dans la figure III.5, Le RCT est une inductance branchée en série avec une valve de deux thyristors bidirectionnels. La valeur de l'inductance varie continuellement par amorçage des thyristors [07].

Si la tension d'alimentation v_s est [07-09].:

$$v_s(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{III.7})$$

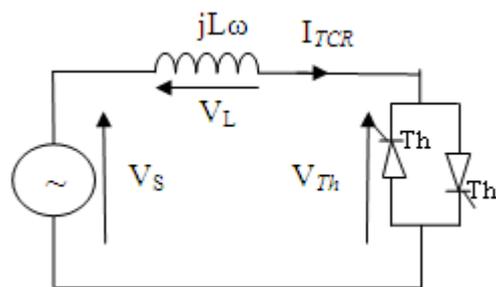


Figure III.5 Circuit monophasé du TCR.

De la figure.III.5 l'équation de la tension du circuit est:

$$L \frac{di_{TCR}(t)}{dt} - v_s(t) = 0 \quad (\text{III.8})$$

La solution de cette équation est:

$$i_{TCR}(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^t v_s(t) dt + c = \left[-\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t) + c \right]_t^{\alpha} \quad (\text{III.9})$$

Où c : est la constante d'intégration, avec la condition initiale de $i_{TCR}(\omega t = \alpha) = 0$ nous obtenons:

$$i_{TCR}(t) = -\frac{V_m}{\omega L} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t)) \quad (III.10)$$

Où α est l'angle d'amorçage en degré.

Les formes d'onde du courant i_{TCR} et de la tension v_{TCR} de la réactance aux différents angles d'amorçage α sont montrées dans la figure III.6. La forme d'onde i_{TCR} indique que le TCR est actionné comme une réactance réglable continuellement. L'effet de l'augmentation de l'angle d'amorçage α réduit la composante fondamentale du courant. Si l'angle d'amorçage est proche de 180° le courant i_{TCR} devient zéro. La pleine conduction est obtenue avec un angle d'amorçage égal à 90° là où la forme d'onde du courant est presque sinusoïdale : donc sa valeur fondamentale proche ou maximum.

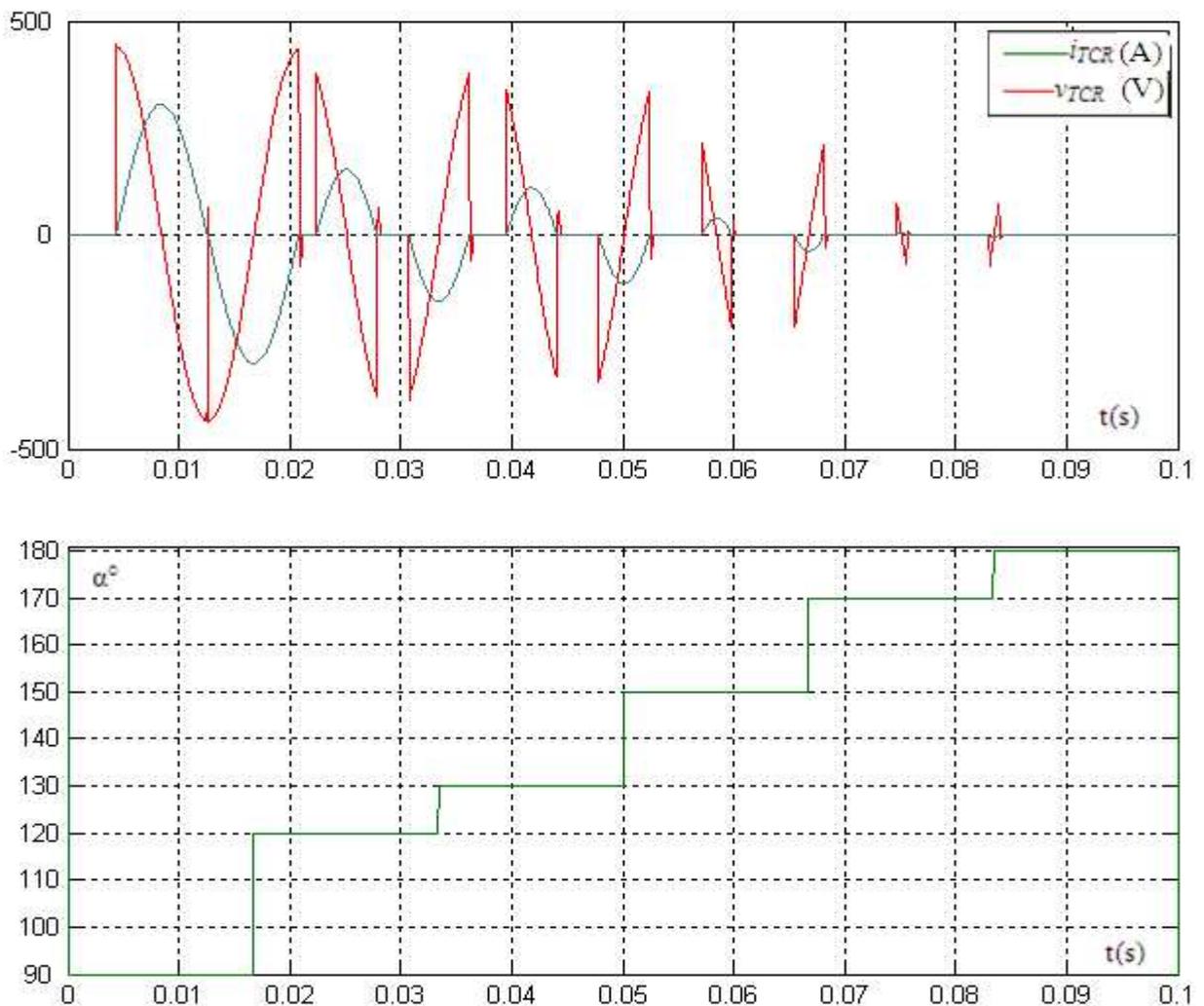


Figure III.6 Les formes d'ondes du courant et de la tension de la réactance aux différents angles d'amorçage α° .

Cependant, nous sommes principalement concernés par la composante fondamentale du courant pour la conception d'un compensateur dans les systèmes de transport d'énergie. Selon l'analyse de Fourier, la composante fondamentale du courant peut être écrite sous la forme suivante:

$$i_{1TCR}(t) = a_{1TCR}\cos(\theta) + b_{1TCR}\sin(\theta) \quad (III.11)$$

De l'équation (III.10), le courant est une fonction de similitude $i(t)=-i(t)$, c'est à dire $b_1=0$.

Selon la formule suivante:

$$a_{1TCR}(t) = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \left(-\frac{V_m}{\omega L} \cos(\theta) \cos(\theta) \right) d\theta \quad (III.12)$$

La valeur de a_{1TCR} est donnée par :

$$a_{1TCR} = \frac{V_m}{\omega L} \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi} \quad (III.13)$$

Où α est exprimé en degré, on substitue l'équation (III.13) dans l'équation (III.11).

L'amplitude du fondamentale du courant est donnée par l'équation suivante:

$$I_{1TCR} = \frac{V_m}{\omega L} \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi} \quad (III.14)$$

Évidemment, la composante fondamentale du i_{TCR} est en fonction de l'angle d'amorçage α

La division des deux termes de l'équation (III.14) par la tension V_m donne la susceptance à la fréquence fondamentale.

$$\frac{I_{1TCR}}{V_m} = B_{TCR} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\omega L \pi} \quad (III.15)$$

Cependant, si la réactance est représentée comme :

$$jB_L = \frac{1}{jX_L} = -j\frac{1}{\omega L} \quad (III.16)$$

La figure III.7 montre la relation entre la susceptance B_{TCR} et l'angle d'amorçage α . Le TCR ainsi agit comme une susceptance variable. On observe sur la figure III.7 que la susceptance diminue de sa valeur maximale B_L à zéro lorsque l'angle d'amorçage α varie de 90° à 180° , ainsi que la composante fondamentale du courant associée, ce qui permet de régler la puissance réactive à absorber par la réactance.

Le TCR est également appelé compensateur statique de puissance réactive, comme une réactance continuellement réglable. Le TCR est le type le plus simple du SVC.

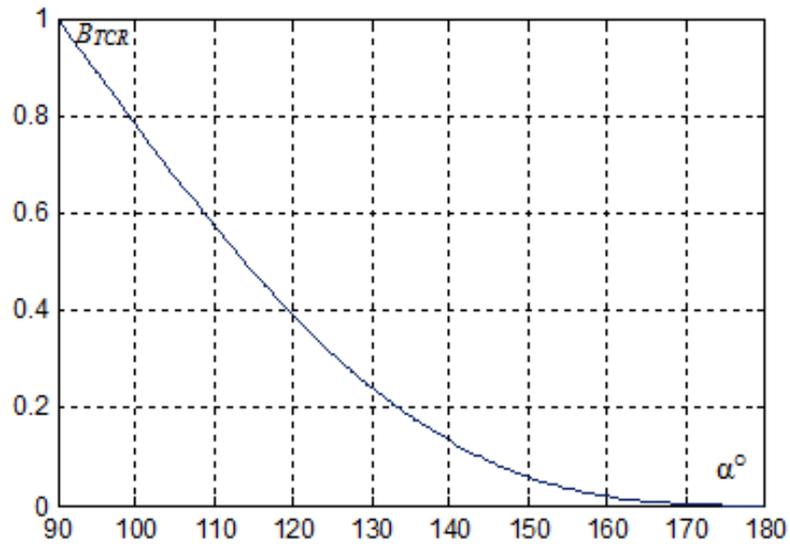


Figure III.7 Caractéristique de contrôle de B_{TCR} avec α .

Cependant, si l'angle d'amorçage augmente au-delà de 90° , le courant devient non sinusoïdal et des harmoniques sont produits (figure.III.8). Si les deux thyristors de commutation dont la séquence positive et la séquence négative sont symétriques, alors seulement les harmoniques d'ordre impair sont produits. Les harmoniques peuvent être déduits par l'analyse de Fourier des composantes de hautes-fréquences. Les valeurs efficaces du courant (RMS) I_{TCR} et du courant harmonique de la nième-ordre I_{nTCR} sont exprimées en fonction de α par l'équation suivante [07-08]:

$$I_{nTCR}(\alpha) = \frac{V_m}{\omega L \pi} \left[-2 \frac{\cos \alpha}{n} \sin n\alpha + \frac{\sin (n-1)\alpha}{(n-1)} + \frac{\sin (n+1)\alpha}{(n+1)} \right] \quad (\text{III.17})$$

$$I_{nTCR}(\alpha) = \frac{V_m}{\omega L \pi} \left[\frac{\sin \alpha \cos n\alpha - n \cos \alpha \sin n\alpha}{n(n^2 - 1)} \right] \quad (\text{III.18})$$

$$I_{TCR}(\alpha) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} (I_{nTCR})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{III.19})$$

Où $n = 2k + 1$ et $k = 1, 2, 3, \dots$

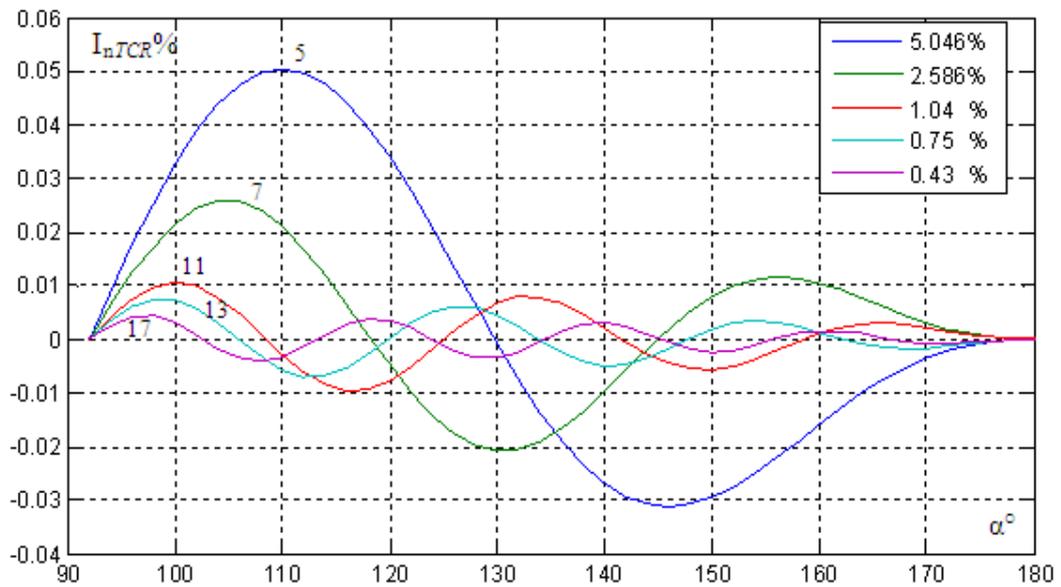


Figure III.8 Les harmoniques du courant I_{TCR} .

Le SVC peut être généralement considéré comme un dispositif avec des paramètres réglables. Le rapport entre la tension V_{SVC} et le courant I_{SVC} est exprimé comme suit :

$$\bar{I}_{SVC} = jB_{SVC}\bar{V}_{SVC} \tag{III.20}$$

$$B_{SVC} = -B_{TCR}$$

III.4.b Réactance contrôlée par thyristor-condensateur fixe (RCT-CF) [07] [08]:

Fixed Capacitor – Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR):

La configuration du compensateur RCT-CF est illustrée dans la Figure III.9

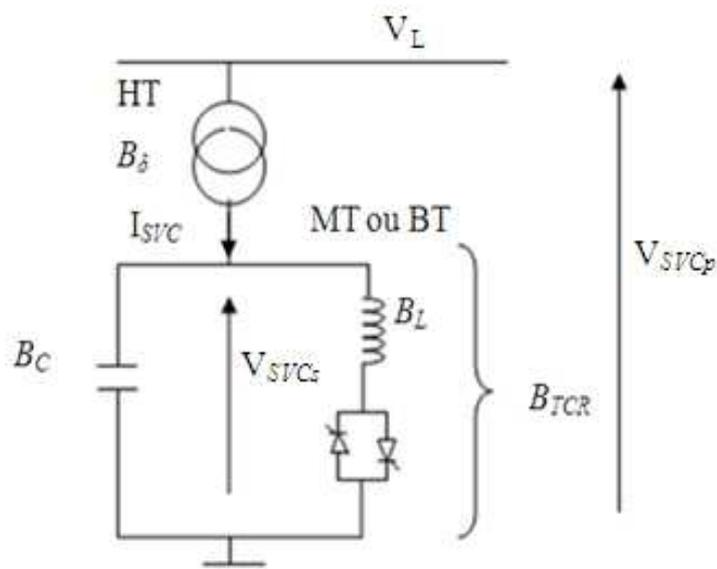


Figure III.9 La configuration du compensateur FC- TCR.

B_{SVCp} : est la susceptance du SVC au primaire du transformateur,

B_{SVC_S} : est la susceptance de SVC au secondaire du transformateur ou on prend en considération la susceptance de fuite de transformateur B_δ .

Par l'utilisation des paramètres de la figure III.9, B_{SVC_p} de l'équation(III.20) devient comme suit:

$$B_{SVC_S} = \frac{B_\delta(B_C + B_{TCR})}{B_\delta + B_C + B_{TCR}} \quad (III.21)$$

Où: $B_C = \omega C$;

Si l'angle d'amorçage α varie entre 90° et 180° , la valeur de B_{TCR} varie ente B_L et 0, si $\alpha=180^\circ$ $B_{TCR}=0$, et la valeur maximale de la susceptance B_{SVC} devient:

$$B_{SVC_S_{max}} = \frac{B_\delta B_C}{B_\delta + B_C} \quad (III.22)$$

Et aussi, si $\alpha=90^\circ$, $B_{TCR}=B_L$, et la valeur minimale de la susceptance B_{SVC} devient :

$$B_{SVC_S_{min}} = \frac{B_\delta(B_C + B_L)}{B_\delta + B_C + B_L} \quad (III.23)$$

L'analyse de l'équation (III.21) : montre que la susceptance du SVC est une fonction non-linéaire. Si la susceptance $B_C/B_\delta \ll 1$ et $B_L/B_\delta \ll 1$, la variation du B_{SVC} en fonction de B_{TCR} devient linéaire.

$$B_{SVC_S} = \left(1 - \frac{B_C}{B_\delta}\right)B_C + \left(1 - \frac{2B_C + B_L}{B_\delta}\right)B_{TCR} \quad (III.24)$$

De l'équation ci-dessus, les valeurs limites de la susceptance du SVC peuvent être données comme suit:

$$B_{SVC_S_{max}} = \left(1 - \frac{B_C}{B_\delta}\right)B_C \quad si \quad B_{TCR} = 0 \quad (III.25.a)$$

$$B_{SVC_S_{min}} = \left(1 - \frac{B_C + B_L}{B_\delta}\right)(B_C + B_L) \quad si \quad B_{TCR} = B_L \quad (III.25.b)$$

On considéré la tension de ligne V_L égale à V_S , La tension secondaire du transformateur est:

$$\bar{V}_{SVC_p} = \bar{I}_{SVC} \frac{1}{j(B_C + B_{TCR})} \quad (III.26)$$

Le courant \bar{I}_{SVC} peut être exprimé en fonction de la tension du système à partir de l'équation (III.23) et (III.26). Les valeurs les limites de la tension secondaire sont données comme suit :

$$V_{L_{max}} = V_{SVC_p_{max}} = V_m \frac{B_\delta}{B_\delta + B_C} \approx V_m \left(1 - \frac{B_\delta}{B_C}\right) \quad (III.27)$$

Où $B_{TCR} = 0$ et $B_C \ll B_\delta$

$$V_{L_{min}} = V_{SVC_p_{min}} = V_m \frac{B_\delta}{B_\delta + B_C + B_L} \approx V_m \left(1 - \frac{B_C + B_L}{B_\delta}\right) \quad (III.28)$$

Où $B_{TCR} = B_L$ et $B_L \ll B_\delta$

III.4.c Réactance contrôlée par thyristor – Condensateur commuté mécaniquement (TCR–CMS):

Le condensateur commuté mécaniquement peut être branché avec le jeu de barre de haute tension. Cependant, dans ce cas, des filtres fixes des harmoniques doivent être installés en shunt avec le TCR sur le secondaire du transformateur pour réduire les harmoniques de la charge du transformateur.

L'avantage du compensateur MSC-TCR réside dans les frais de ses composants qui sont moins chers que les commutateurs à thyristor pour le branchement du condensateur.

L'inconvénient du MSC-TCR est que le temps de réponse est plus lent. Les commutateurs mécaniques peuvent se fermer en deux cycles et s'ouvrir à environ en huit cycles, par rapport à la commutation par thyristor qui se fait en un demi(ou moins) cycle.

Quelques études et réalisations pratiques montrent que le taux de compensation MSC-TCR représente moins de 25% de la compensation par TSC-TCR

Un autre problème est à signaler concernant le MSC-TCR consiste à la charge emmagasinée dans le condensateur qui se décharge constamment après la déconnexion. La charge qui reste emmagasinée dans les condensateurs est habituellement absorbée en cinq minutes environ par les résistances de décharges existantes dans les batteries du condensateur. Si le condensateur est alimenté dans un délai de cinq minutes après la déconnexion, la charge emmagasinée dans les condensateurs augmente le régime transitoire. Le MSC peut être commuté uniquement lorsque les condensateurs sont déchargés. Ce problème des charges emmagasinées peut être résolu en utilisant un petit transformateur magnétique, tel qu'un transformateur de potentiel, placé parallèlement au condensateur à chaque phase qui facilite l'absorption de la charge emmagasinée dans un délai de moins de 0.15 s.

Le TCR dans un MSC-TCR est conçu pour avoir une inductance inférieure par rapport au TCR dans un TCR-TSC de SVC. Cette conception doit permettre l'augmentation de sa capacité de puissance capacitive-réactive. Une petite inductance TCR produit un niveau plus élevé des harmoniques; ainsi il a besoin plus de filtrage par rapport au TCR-TSC [07].

III.4.d Condensateur commuté par Thyristor [07-10]:

Le schéma de principe du TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) est montré dans la figure III.11.

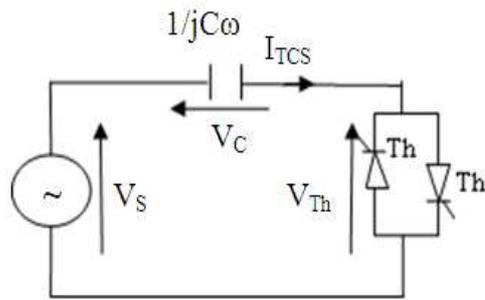


Figure III.11 Circuit monophasé d'un simple TSC.

L'ouverture et la fermeture du commutateur (thyristor) peut se faire de deux façons, elles sont discutées ci-dessous:

- Le thyristor est fermé dans le cas où la tension du condensateur V_C n'est pas égale à la tension d'alimentation $v_S(t)$, il y aura une quantité infiniment grande du courant i_{TCS} pour charger le condensateur jusqu'à la tension d'alimentation en un temps très court. Le thyristor utilisé comme commutateur, peut être endommagé à cause de ce fort courant.

- Le thyristor est fermé dans le cas où la tension du condensateur V_C est égale à la tension d'alimentation $v_S(t)$, le courant I_{TCS} aura une variation avec un pas discontinu par rapport à sa valeur d'équilibre, et il diminue jusqu'à son état d'équilibre dans un temps très court. Dans le cas où l'amplitude du courant I_{TCS} est inférieure à sa valeur d'état d'équilibre, le rapport d'augmentation du courant di_{TCS}/dt peut être infiniment grand, et peut dépasser la valeur maximale permise de di/dt et cause la destruction du thyristor.

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, une inductance d'atténuation spéciale est insérée en série avec un condensateur dans le circuit principal.

III.4.d.1 Commutation d'un condensateur en série avec une inductance [07-10]:

Comme on a mentionné ci-dessus (pour résoudre le problème discuté dans la partie précédente), une petite réactance L_S d'atténuation est ajoutée en série avec le condensateur, figure III.10.

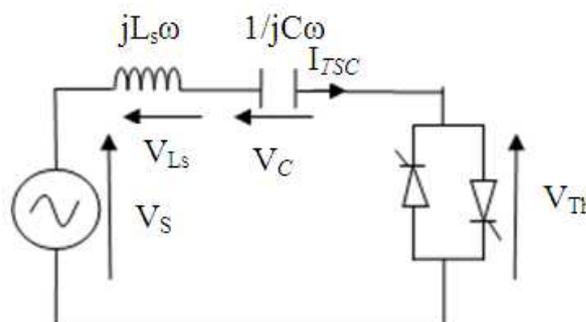


Figure III.11 Le TSC avec une inductance d'atténuation.

Si la tension d'alimentation est:

$$v_s(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{III.29})$$

Où ω est la fréquence du système, l'analyse du courant après la fermeture du thyristor à $t=\alpha$ $i_{TSC}(\alpha)=0$ donne le résultat suivant:

L'équation de tension en termes de transformation de Laplace est:

$$v_s(s) = \left[L_s S + \frac{1}{CS} \right] i_{TCS}(S) + \frac{V_{CO}}{S} \quad (\text{III.30})$$

Avec la transformation de Laplace inverse, nous obtenons le courant instantané exprimé comme suit [08-10] :

$$i_{TSC}(t) = i_{AC} \cos(\omega t + \alpha) - n B_c \left[V_{CO} - \frac{n^2}{n-1} V_m \sin(\alpha) \right] \sin(\omega_n t) - i_{AC} \cos \alpha \cos(\omega_n t) \quad (\text{III.31})$$

ω_n : Est la fréquence naturelle du circuit

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_s C}} = n \omega \quad ; \quad V_{CO} = I_{TSC} X_C = i_{AC} = V_m \frac{B_C B_{L_s}}{B_C + B_{L_s}} \quad (\text{III.32})$$

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_{L_s}}} \quad ; \quad X_C = j c \omega \quad ; \quad X_{L_s} = 1/j \omega L_s \quad (\text{III.33})$$

n : Per-unit de la fréquence naturelle [8-9]

⇒ **Conditions nécessaires pour une commutation sans régime transitoire:**

Pour faire une commutation sans régime transitoire, il faut que le terme du courant oscillatoire de l'équation (III. 32) devienne nul. Ceci peut se produire seulement quand les deux conditions suivantes sont momentanément réalisées :

$$\cos \alpha = 0 \quad c - \text{à} - \text{dire} \quad \sin \alpha = \pm 1 \quad (\text{III.34})$$

$$V_{CO} = \pm V_m \frac{n^2}{n-1} \quad (\text{III.35})$$

La première condition (III.34) est remplacée dans (III.31) pour annuler les régimes transitoires, le commutateur doit être fermé à la crête positive ou négative du sinus de la tension d'alimentation $v_s(t)$. La deuxième condition(III.35) montre que le condensateur doit être chargé à une valeur prédéterminée.

En pratique, il y a beaucoup de problèmes dans la réalisation de la stratégie de commutation pour éviter le régime transitoire, définie ci-dessous:

- À l'endroit où le SVC est installé, habituellement les tensions ne sont pas purement sinusoïdales et constantes; ceux-ci rendent la décision de la commutation à un moment moins prédictive que l'état idéal. Une certaine quantité de transitoire est prévue, même avec des stratégies de commutation très précises.

- Les grands condensateurs à AC, ne sont pas conçus pour résister à l'effort du prolongement

de la pré-charge en DC.

III.4.d.2 Stratégies pratiques de la commutation:

Les stratégies de commutation suivantes, limitent les régimes transitoires dans une marge acceptable, qui sont basées sur des processus très simples pour décider que le thyristor devra être en conduction [08-10].

- Quand la tension initiale du condensateur V_{C0} est égale à la tension d'alimentation $V_{C0} = v_S(t)$, donc la commutation se fait quand la tension aux bornes du thyristor égale à zéro.

$$V_m \sin(\alpha) = V_{C0} \quad (\text{III.36})$$

Est l'angle de commutation est donnée comme suit :

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{V_{C0}}{V_m} \quad (\text{III.37})$$

- On commute avec la valeur crête de la tension d'alimentation $v_S(t)$, $\cos(\alpha) = 0$

Stratégie de commutation:

- ✓ On décharge les condensateurs s'ils ne sont pas reliés au système, donc il n'y a aucune tension initiale à travers le condensateur.
- ✓ Si $V_{C0} < V_m$ à l'instant de raccordement du condensateur, il est commuté selon la première stratégie de commutation qui a été expliquée précédemment, c'est à dire, dès que la tension à travers le thyristor atteint zéro et la tension du condensateur V_{C0} est égale à la tension d'alimentation $v_S(t)$.
- ✓ Si le condensateur est surchargé $V_{C0} > V_m$ à l'instant de raccordement du condensateur, il est connecté selon la deuxième stratégie de commutation, c'est à dire, quand la tension de la source atteint sa crête maximale V_m et la tension à travers le thyristor est au minimum. Cet état de fonctionnement s'appelle *Commutation forcé*

Ces stratégies de commutation utilisent les deux théories de commutation mentionnées ci-dessus pour réduire au minimum les régimes transitoires du courant.

III.4.d.3 Stratégie de fermeture des thyristors de TSC:

Les thyristors sont bloqués quand le courant i_{TCS} passe par zéro, comme il est montré dans la figure. III.12. Le passage du courant par zéro dans le condensateur se produit simultanément avec la valeur crête de la tension du condensateur. Si le courant est bloqué par les thyristors, le condensateur restera chargé, les thyristors bloqués conservent la différence de tension entre la tension alimentation $v_S(t)$ et la tension du condensateur V_C qui devient plus élevée que la tension d'alimentation à la crête suivante de la tension d'alimentation.

Dans la figure. III.12, la tension d'alimentation $v_S(t)$, la tension du condensateur $v_C(t)$ sont montrées dans un cas idéal sans décharge du condensateur et dans un cas réel où on prend en

considération la décharge du condensateur. La première étape qui arrive juste après l'ouverture des thyristors est causée par l'inductance L_S .

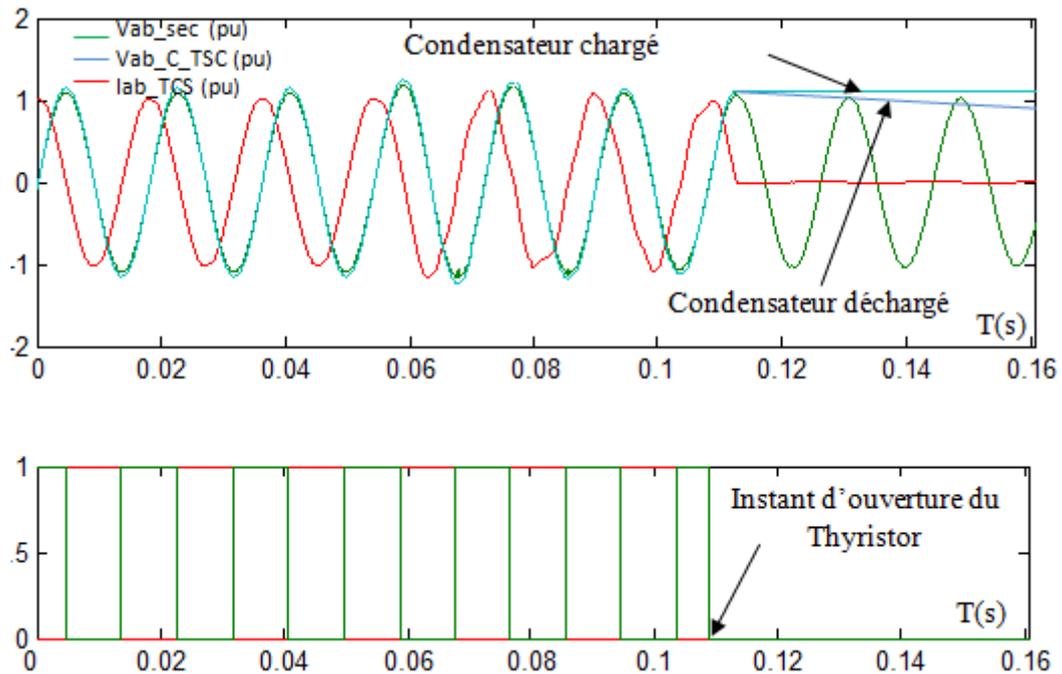


Figure III.12 Les formes d'ondes de tension et du courant avant et après l'ouverture du thyristor du TSC.

III.4.d.4 Caractéristiques de fonctionnement du TSC [07]:

Le TSC a une caractéristique de fonctionnement tension-courant discrète, comme le montre la figure III.13. La forme de cette caractéristique est en fonction du nombre n de bancs de condensateurs branchés, et de la marge de variation de la tension ΔV . Ainsi, pour éviter des commutations fréquentes indésirables, le TSC règle la tension au jeu de barres dans la gamme de $V_{réf} \pm \Delta V/2$.

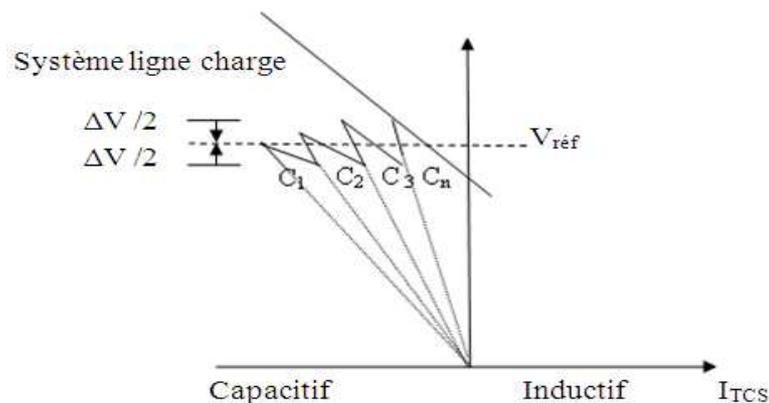


Figure III.13 Caractéristiques du TSC.

III.4.e Condensateur Commuté par Thyristor-Réactance Contrôlée par Thyristor (TSC-RCT):

Thyristor Switched Capacitor – Thyristor Controlled Reactor (TSC–TCR):

III.4.e.1 Configuration:

Le compensateur TSC-TCR montré dans la figure III.14 comporte n bancs du TSC et un simple TCR qui sont reliés en parallèle. La valeur du TCR choisie pour être $1/n$ de la valeur générale du SVC. Les condensateurs peuvent être branchés dans des étapes discrètes. Le contrôle contenu de la puissance réactive de chaque étape est réalisé par le TCR.

Le TSC est raccordé en série avec une inductance pour éliminer les différents harmoniques des fréquences très élevées. Pour éviter le cas de fonctionnement du TSC tout seul c'est à dire le TCR non raccordé (s'il n'y a aucun filtre associé).

Les buts principaux de développement du TSC-TCR sont l'augmentation de la flexibilité opérationnelle du compensateur pendant les grandes perturbations du réseau, et de réduire les pertes de puissance dans l'état stable du réseau.

Un FC-TCR fonctionne comme un circuit LC branché en parallèle, cela peut constituer un circuit de résonance dans les systèmes de courant alternatif durant le déroulement de la distribution de l'énergie, peut engendrer des problèmes graves. Dans ce cas, un TSC-TCR inséré dans le système peut agir rapidement pour déconnecter tous les condensateurs du compensateur, permettant les oscillations résonnantes. Ce dispositif de déconnection des condensateurs n'est pas disponible dans le FC-TCR.

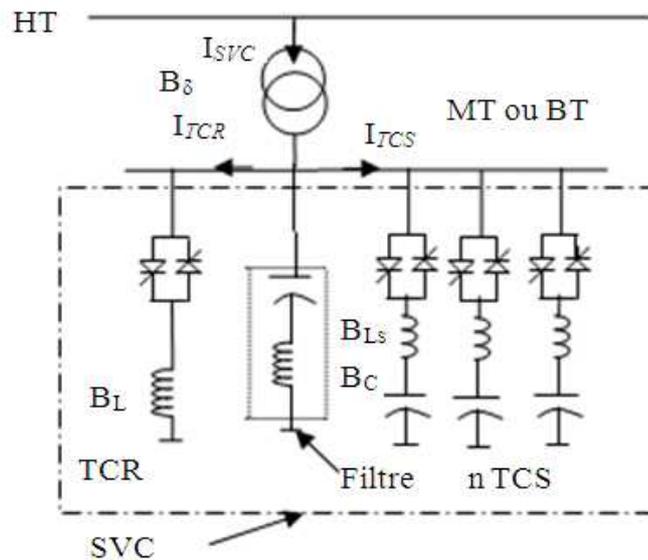


Figure III.14 Cas général de TSC-TC.

III.4.e.2 Caractéristique dynamique V-I de fonctionnement du SVC:

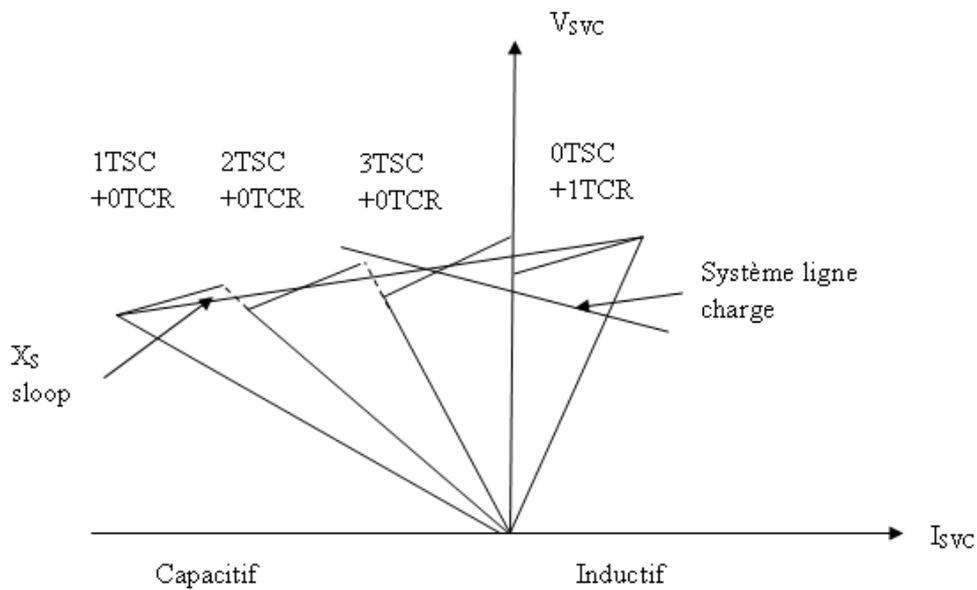


Figure III.15 Caractéristiques V-I de commande du SVC.

La caractéristique statique du SVC est donnée par la figure III.15. Trois zones sont distinctes :

- Pour $V_{L-min} < V_{SVC} < V_{L-max}$: Zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.
- Pour $V_{SVC} > V_{L-max}$: Zone où le RCT donne son énergie maximale. Les condensateurs sont déconnectés
- Pour $V_{SVC} < V_{L-min}$: Zone où seul les capacités sont connectés au réseau.

III.4.e.3 Calcul des limites de la marge de fonctionnement:

On prend l'exemple de 3 TSC et un TCR :

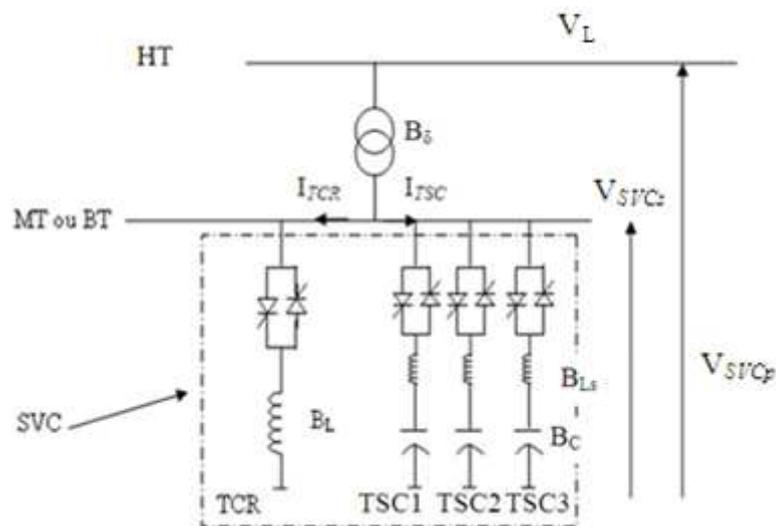


Figure III.16 SVC avec 3 TSC et un TCR.

Les équations (III.20) et (III.21) peuvent être utilisées pour déterminer la marge des limites de fonctionnement de la susceptance du SVC. Dans l'équation (III.21), B_C est remplacée par B_{3C} du TSC pour obtenir la susceptance à la limite maximum de production d'énergie réactive. On prend en considération l'influence de la réactance d'atténuation B_δ du transformateur. B_C est considérée zéro dans la limite d'absorption d'énergie réactive, si tous les condensateurs sont déconnectés.

Avec les données précédentes, la susceptance maximale est donnée comme suit:

$$B_{svcs} = \frac{B_\delta}{B_\delta + B_{3C}} \quad (III.38)$$

Et la susceptance minimale est donnée comme suit :

$$B_{svcs} = \frac{B_\delta + B_L}{B_\delta + B_L} \quad (III.39)$$

$$B_{3C} = 3 * B_C \quad (III.40)$$

$$B_C = \frac{B_C B_{Ls}}{B_C + B_{Ls}} \quad (III.41)$$

Les caractéristiques de fonctionnement globale de TSC-TCR peuvent être adaptées avec les équations FC-TCR, supposant qu'il y a un, deux, ou trois, condensateurs qui sont reliés.

Ici, tout la mode de fonctionnement se décompose en trois modes.

➤ **Les trois modes du courant du SVC:**

Le courant total du compensateur est donné comme suit [07-11] :

$$I_{svc} = V_m \frac{B_\delta(B_{3C} + B_{TCR})}{B_\delta + B_{3C} + B_{TCR}} \quad (III.42)$$

Le signe négatif indique que le courant est capacitif. Les courants des deux limites des trois modes capacitives peuvent être donnés par l'équation suivante:

$$I_{svc} = V_m \frac{B_\delta B_{3C}}{B_\delta + B_{3C}} \quad (III.43)$$

Et pour le mode inductive, le courant est donnée par :

$$I_{svc} = V_m \frac{B_\delta B_L}{B_\delta + B_L} \quad (III.44)$$

➤ **Caractéristiques de la susceptance:** [08] [09]

L'équation (III.40) peut être utilisée pour calculer la susceptance du SVC dans le cas du TSC-TCR comme suit [27]:

$$B_{svcs} = \frac{B_\delta(B_{nc} + B_{TCR})}{B_\delta + B_{nc} + B_{TCR}} \quad (III.45)$$

Où $n = 1, 2, \dots$ le nombre de Banc du TSC en fonction et B_{nC} est la susceptance totale des TSC de n bancs. Avec une approximation linéaire, l'équation(III.45) devient:

$$B_{SVC_S} = \left(1 - \frac{B_{nc}}{B_\delta}\right) B_{nc} + \left(1 - \frac{2B_{nc}+B_L}{B_\delta}\right) B_{TCR} \quad (\text{III.47})$$

La caractéristique V-I du TSC-TCR du SVC montrée dans la figure III.17 est un cas simple de la tension au jeu de barre qui est réglée strictement suivant la tension à la référence désirée. Dans la pratique, le SVC incorpore une pente légère X_S à la caractéristique V-I, pour obtenir certaines tensions. Le problème est la coordination entre les TSC (entre bande). Une variation d'une manière minutieuse du TCR se fait pour obtenir une caractéristique lisse de pente X_S désirée. Il est nécessaire de varier légèrement le TCR après chaque banc du TCS additionné [07-11].

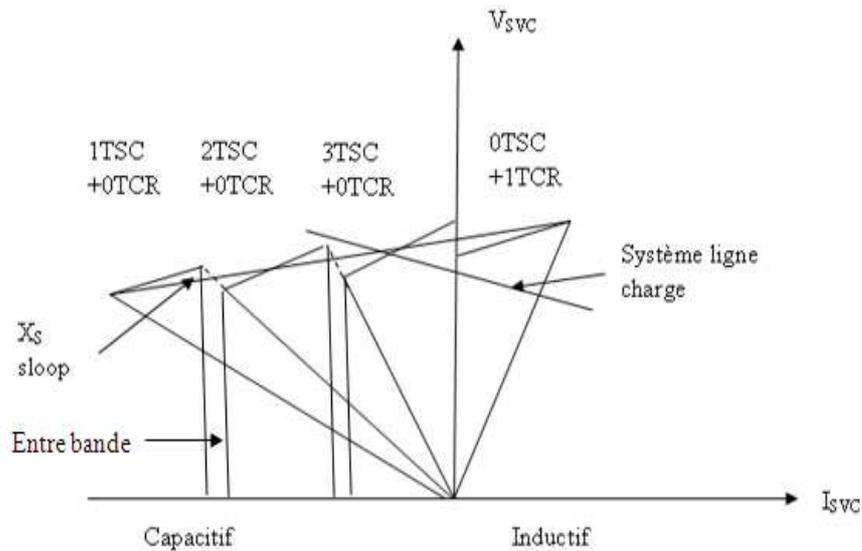


Figure III.17 Caractéristique statique avec une combinaison entre TSC-TCR.

III.5 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté en détail les principes de fonctionnement et les caractéristiques fondamentales des divers compensateurs de puissance réactive. Nous avons réservé une partie importante à l'étude, l'analyse et le développement de toutes les équations qui régissent le fonctionnement du système en question, le SVC. Notre choix s'est porté sur ce dernier pour sa simplicité et son usage parce que dans la totalité des systèmes qui nécessitent la compensation de l'énergie réactive que soit pour les systèmes interconnectés ou isolés. Plusieurs exemples ont été étudiés pour illustrer leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques statiques.

C'est la commutation naturelle des thyristors qui explique la simplicité de la mise en œuvre des montages gradateur pour les systèmes SVC, mais nous avons vu que cette structure a deux inconvénients qui sont un contrôle non linéaire de la susceptance du SVC et l'injection des courants harmoniques au point de raccordement. La présence de ces harmoniques génère des perturbations importantes.

La structure du convertisseur à base de gradateur ne permet pas une bonne amélioration et de façon importante les performances liées aux harmoniques et au contrôle de la susceptance du SVC.

Pour limiter les inconvénients causés par les gradateurs au point de raccordement, et améliorer la qualité du courant injecté au point de raccordement et assurer un contrôle plus souple de la susceptance, il est nécessaire de passer à des structures de convertisseur à commutation dur et utiliser les possibilités offertes par les interrupteurs entièrement commandés.

Chapitre IV

Gradateur MLI

IV.1 Introduction:

Comme nous avons mentionné au chapitre précédent, l'introduction de la commutation dure permet souvent de considérer des harmoniques du côté de la charge.

Les travaux de recherche sur les convertisseurs directs AC-AC à commutation dure sont beaucoup moins nombreux bien que ces derniers se prêtent également, de par leur structure, à la modulation de largeur d'impulsion. Parmi nos objectifs: la réduction des harmoniques de la tension et du courant de sortie du convertisseur, sans l'utilisation d'un filtre de sortie et le contrôle linéaire de la valeur efficace de sortie. Toutefois le filtrage passif de courant à l'entrée à l'aide d'une cellule LC est également à mentionner, car il est important d'avoir un courant d'entrée dépourvu d'harmonique en même temps qu'une source de tension à l'entrée du convertisseur [14].

IV.2 Schéma de principe:

Le circuit de puissance du hacheur alternatif est composé de deux paires de thyristors connectés en parallèles, l'un de ces deux est connecté en série, et l'autre est connecté en parallèle avec la charge, les thyristors connectés en série règlent la puissance fournie à la charge et les thyristors parallèles assurent le chemin de roue libre pour décharger l'énergie stockée quand les thyristors séries sont bloqués. La figure IV.1 donne la configuration de ce circuit [13-19]:

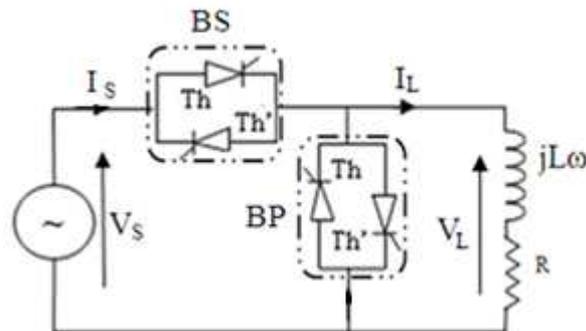


Figure IV.1 Topologie du hacheur alternatif.

La structure de ce convertisseur permet de supprimer les contraintes de la commutation assistée par le réseau au convertisseur AC-AC de type gradateur [14-19].

Les avantages offerts par l'utilisation de ces dispositifs sont [19]:

- ✓ Réponse rapide;
- ✓ Compacité;
- ✓ Les pertes de commande sont nulles.

La fonction du régulateur de tension AC-AC à commutation dure donne les avantages suivants :

- ✓ Améliorer la qualité du courant de sortie;
- ✓ Contrôle le contenu harmonique à l'entrée et à la sortie comparé à la structure classique;

- ✓ L'amplitude de la composante fondamentale de la tension de la charge est commandée par le rapport cyclique;
- ✓ Commande linéaire de la composante fondamentale de la tension aux bornes de la charge.

IV.3 Principe de fonctionnement:

En supposant quelconque les instants d'ouverture et de fermeture de BS par rapport au passage par zéro de la tension du réseau. Les interrupteurs BS et BP ayant à transiter des courants réversibles et à supporter des tensions ayant le même caractère, nous dirons qu'ils sont bidirectionnels. En effet lorsque BS est fermé, la charge inductive emmagasine l'énergie transférée de la source vers la sortie, à l'ouverture de BS le courant doit trouver un chemin de passage, BP doit être fermé et il y a déconnexion de la source et du récepteur. La commande des deux interrupteurs devra être complémentaire sous peine de voir apparaître un court-circuit de la source d'alimentation et déconnexion en même temps de la charge [13-14].

IV.4 Calcul de la tension et du courant de la charge:

IV.4.a Calcul de la tension aux bornes de la charge:[14-16]

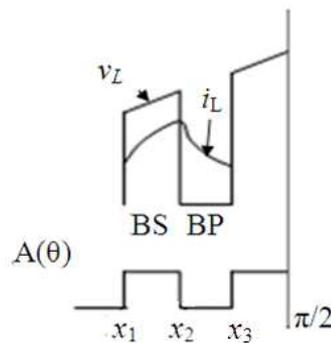


Figure IV.2 Tension et courant aux bornes de la charge.

Compte tenu de la symétrie demi-période, les harmoniques de rangs pairs sont nuls il reste seulement à calculer les harmoniques de rangs impairs, en appliquant la fonction de commutation $A(\theta)$. La tension v_L peut être définie de la façon suivante:

$$x_1 \leq \theta \leq x_2 \text{ et } x_3 \leq \theta \leq \pi/2 \text{ Alors } v_L(\theta) = V_m \sin(\theta) ; \text{ si non } v_L(\theta) = 0. \quad (\text{IV.1})$$

Le développement en série de Fourier de v_L est donné par l'équation suivante:

$$v_L(\theta) = \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)] \quad (\text{IV.2})$$

En considérant la symétrie quart de période de la tension $v_L(\theta)$, et $a_{2n} = 0$; $b_{2n} = 0$

Et si on prend pour origine du temps un passage par zéro, il n'y a que des sinus impairs:

$$v_L(\theta) = b_1 + \sum_{n=1}^N b_n \sin(n\theta) \quad (\text{IV.3})$$

$$n=2k+1 \quad k=1, 2, 3, \dots, N$$

Posons $b_1 = V_{L1}$

X_0 est donnée par $X_0 = V_{L1}/V_m$

Avec V_{L1} : l'amplitude du fondamental de la tension $v_L(\theta)$ aux bornes de la charge.

X_0 : La valeur en per unit de l'amplitude du fondamental de la tension aux bornes la charge v_L .

IV.4.b Calcul du courant:

Nous supposons que le courant i_L dans la charge est une fonction continue qui est la solution de l'équation suivante:

$$\frac{L di_L(\theta)}{d\theta} + Ri_L(\theta) = v_L(\theta) \quad (IV.4)$$

$$v_L(\theta) = A(\theta)v_s(\theta) \quad (IV.5)$$

D'après l'allure du courant i_L , nous pouvons observer deux modes de conduction :

Si (BS) conduit, nous avons:

$$\frac{L di_L(\theta)}{d\theta} + Ri_L(\theta) = V_m \sin(\theta) \quad (IV.6)$$

Si (BP) conduit, l'équation (IV.6) devient :

$$\frac{L di_L(\theta)}{d\theta} + Ri_L(\theta) = 0 \quad (IV.7)$$

IV.5 Stratégies de commande implicite par modulation de largeur d'impulsion:

Les techniques de modulation de largeur d'impulsion peuvent être classées en deux catégories selon que les angles de commutation sont exprimés par calcul numérique, ou proviennent d'une fonction de régulation. Dans le premier cas, nous dirons que nous avons une commande par modulation de largeur d'impulsion explicite, tandis que dans le second cas elle sera qualifiée d'implicite. Les techniques implicites ont été développées essentiellement pour les convertisseurs continu-alternatif mais elles peuvent être parfaitement étendues aux convertisseurs AC-AC construits autour d'interrupteurs fonctionnant à commutation dure, afin de tester les performances de la réduction des harmoniques et le contrôle de l'amplitude de la tension de sortie v_L [14].

IV.5.a Commande par modulation naturelle:

Le principe de la modulation naturelle consiste à comparer une porteuse triangulaire V_p de fréquence F_p et une onde de référence sinusoïdale (d'amplitude maximale V_m) de fréquence f_s . L'intersection de la porteuse et de l'onde de référence permet de définir les instants de commutation (Figure IV.3)

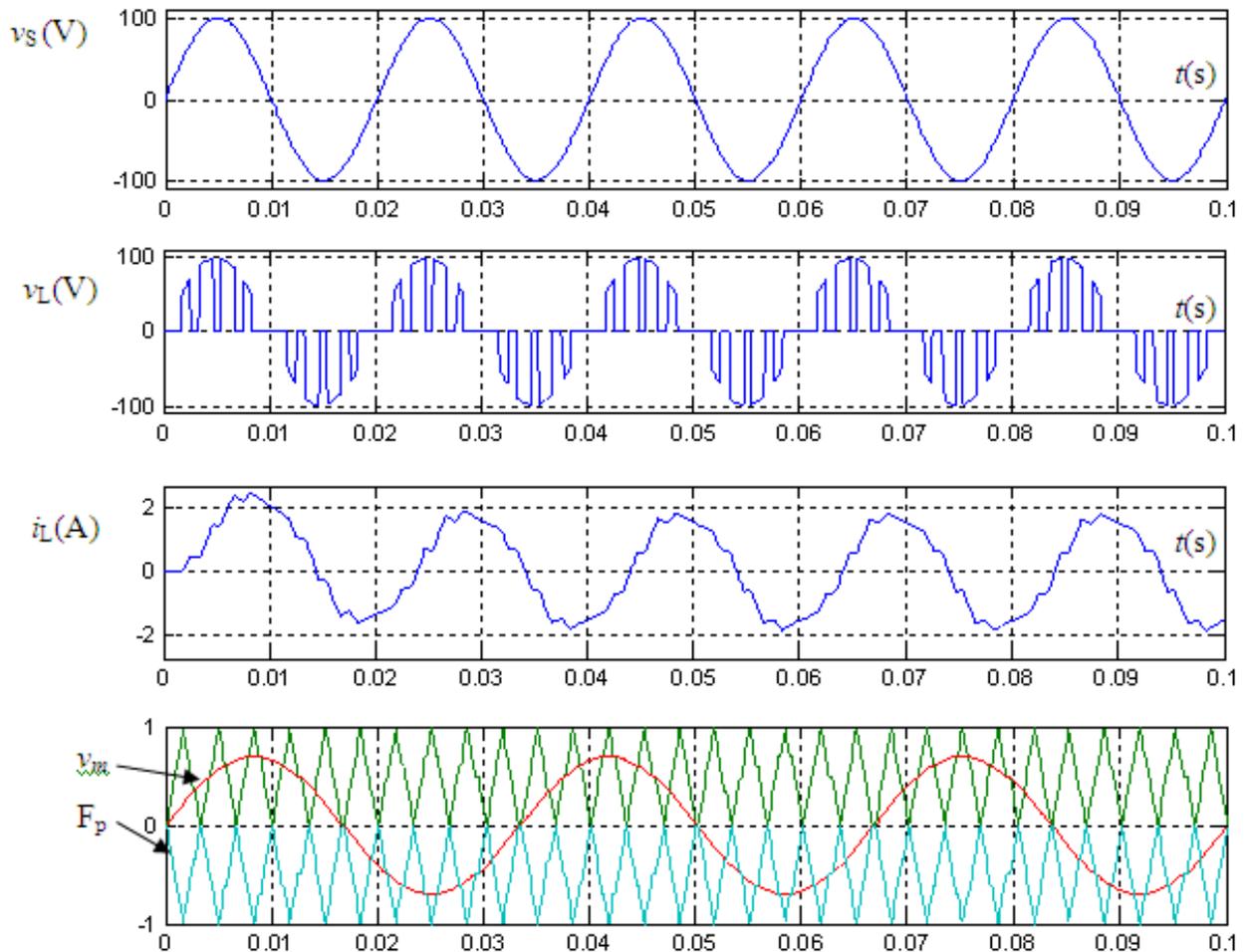


Figure IV.3 Tension de source v_s , tension v_L et

Courant i_L aux bornes de la charge. $f_s=50$ Hz $F_p=1000$ Hz $V_m=0.7$ pu.

IV.5.b Commande par modulation régulière:

La technique de commande à échantillonnage régulier est dérivée de la triangulo-sinusoidale. Elle consiste à comparer une porteuse triangulaire à une version discrétisée de la référence sinusoidale [14].

IV.5.c Commande par modulation conventionnelle:

Une onde porteuse triangulaire à haute fréquence, soit du type-M, soit du type-W est comparée à un signal de référence constant X_0 varie dans l'intervalle $[0,1]$. L'intersection de la porteuse V_p avec la constante X_0 détermine les instants de commutation du hacheur PWM (Figure IV.4) [14].

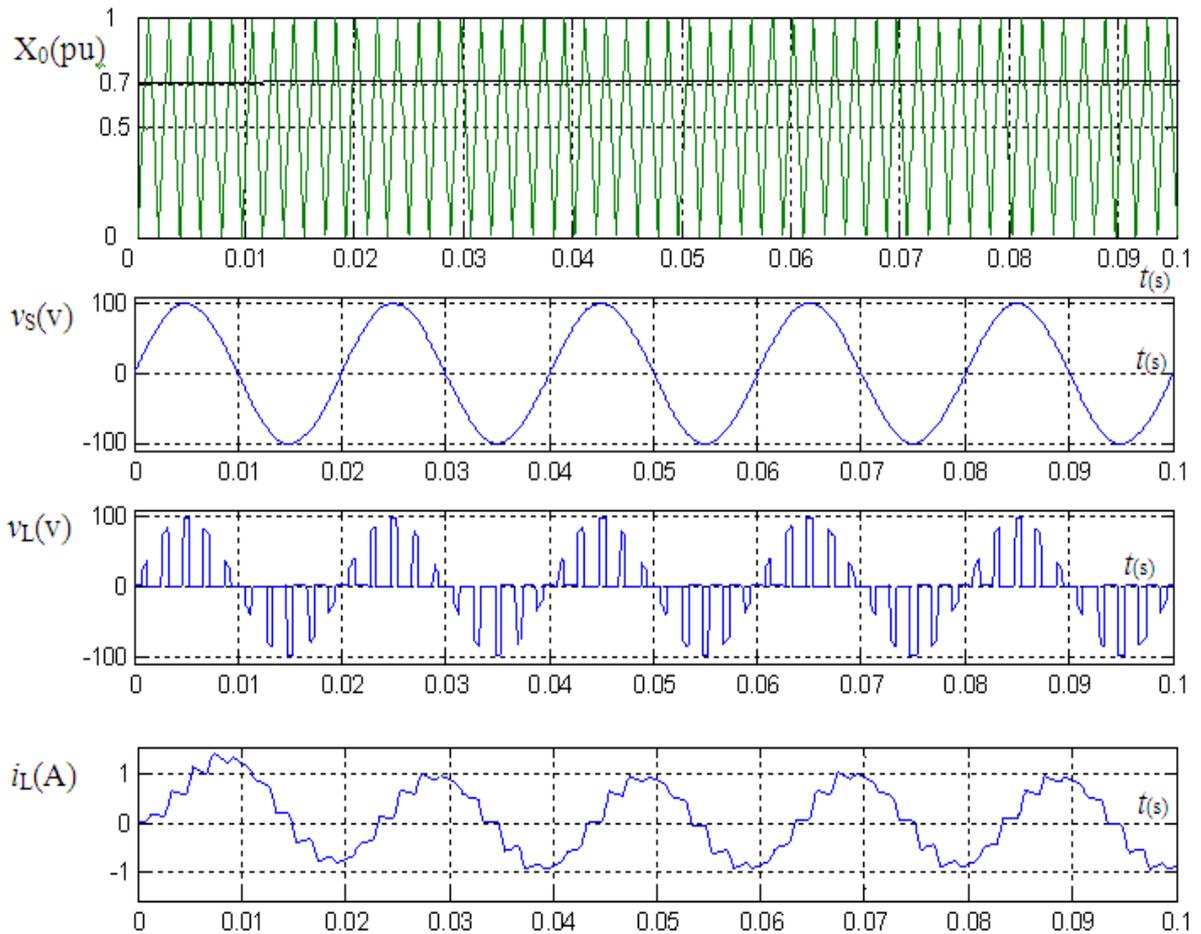


Figure IV.4 Tension de source v_s , tension v_L et courant i_L aux bornes de la charge.
avec l'porteuse de type M de $V_p = 500\text{Hz}$; $X_0=0.7$ pu

IV.5.d Stratégie de commande par modulation calculée:

Dans les stratégies de modulation de largeur d'impulsion implicite, la simplicité d'implantation de ces techniques par des moyens analogique lui ont permis d'être les plus utilisés jusqu'à l'apparition récente des microprocesseurs qui a rendu possible l'implantation d'autre techniques compétitives [14].

IV.5.d.1 Réglage de courant et réduction des harmoniques dans la charge:

En conservant l'hypothèse d'une charge inductive au schéma équivalent résistance et une inductance en série.

Les formes d'onde PWM peuvent être obtenues par la résolution de l'équation (IV.8) du circuit de la figure IV.1 [13] [14] [19].

$$v_s(\theta) = \frac{L di_L(\theta)}{d\theta} + Ri_L(\theta) \quad (\text{IV.8})$$

Si la fonction de commutation $A(\theta)$ est définie, la tension aux bornes de la charge est donnée comme suit:

$$v_L(\theta) = A(\theta)v_S(\theta) \quad (\text{IV.9})$$

Si la fonction de commutation idéale $A(\theta)$ est représentée par un paramètre fixe X_0 , qui est limité par l'intervalle de commande $[0 \ 1]$ $A(\theta) = X_0$, la tension de sortie est réglée idéalement sur l'intervalle $[0 \ V_m]$ et n'a aucun harmonique dans cet intervalle.

Considérons la fonction de commutation $A(\theta)$, avec M impulsions par demi-période (Figure. IV.5) en conservant la symétrie au quart de période.

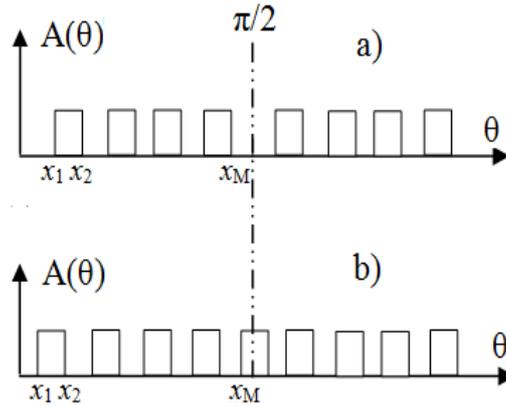


Figure IV.5 Fonction de commutation a) M pair b) M impair.

Tenant compte de ces propriétés, l'analyse en série de Fourier de $A(\theta)$ donne les équations suivantes [21] [24] :

En prend l'exemple de la figure IV.2, la composante fondamentale b_1 est donnée comme suit :

$$b_1(\theta) = \frac{4}{2\pi} \left[\int_{x_1}^{x_2} \sin(\theta) \sin(\theta) d\theta + \int_{x_3}^{\pi/2} \sin(\theta) \sin(\theta) d\theta \right] \quad (\text{IV.10})$$

$$b_1(\theta) = \frac{4}{2\pi} \left[\int_{x_1}^{x_2} \frac{1 - \cos(2\theta)}{2} d\theta + \int_{x_3}^{\pi/2} \frac{1 - \cos(2\theta)}{2} d\theta \right] \quad (\text{IV.11})$$

$$b_1(\theta) = \frac{4}{2\pi} \left[\frac{\theta}{2} - \frac{\sin(2\theta)}{2} \right]_{x_2}^{x_1} + \left[\frac{\theta}{2} - \frac{\sin(2\theta)}{2} \right]_{x_3}^{\pi/2} \quad (\text{IV.12})$$

$$b_1(\theta) = \frac{8}{2\pi} \left[\frac{x_2}{2} - \frac{\sin(2x_2)}{4} - \frac{x_1}{2} + \frac{\sin(2x_1)}{4} + \frac{\pi}{4} - \frac{x_3}{2} + \frac{\sin(2x_3)}{4} \right] \quad (\text{IV.13})$$

Alors la forme générale de b_1 est donnée par l'équation suivante:

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi\delta}{2} + \sum_{K=1}^M (-1)^K \left(x_K - \frac{1}{2} \sin(2x_K) \right) \right) \quad (\text{IV.14})$$

Où

$\delta = 1$ pour M : impair

$\delta = 0$ pour M : pair Et les composants harmoniques b_n sont donnés comme suit

$$b_n(\theta) = \frac{8}{2\pi} \left[\int_{x_1}^{x_2} \sin(\theta) \sin(n\theta) d\theta + \int_{x_3}^{\pi/2} \sin(\theta) \sin(n\theta) d\theta \right] \tag{IV.15}$$

$$b_n(\theta) = \frac{8}{2\pi} \left[\int_{x_1}^{x_2} \frac{\cos((n-1)\theta) - \cos((n+1)\theta)}{2} d\theta + \int_{x_3}^{\pi/2} \frac{\cos((n-1)\theta) - \cos((n+1)\theta)}{2} d\theta \right] \tag{IV.16}$$

$$b_n(\theta) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin((n-1)\theta)}{(n-1)} - \frac{\sin((n+1)\theta)}{(n+1)} \right]_{x_2}^{x_1} + \left[\frac{\sin((n-1)\theta)}{(n-1)} - \frac{\sin((n+1)\theta)}{(n+1)} \right]_{x_3}^{\pi/2} \tag{IV.17}$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left(\sum_{K=1}^M (-1)^K \left(\frac{\sin(n-1)x_K}{(n-1)} - \frac{\sin(n+1)x_K}{(n+1)} \right) \right) \tag{IV.18}$$

n= 1, 3,5

La tension de sortie est:

$$v_L(\theta) = V_m \left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\theta) \right) \tag{IV.19}$$

n= 1, 3,5

Pour n’importe quel type de convertisseur de tension, le rapport entre les valeurs efficaces de la tension d’entrée v_S et la tension de sortie v_L peut être exprimé par une fonction de commutation donnée par :

$$v_L(\theta) = A(\theta)v_S(\theta) \tag{IV.20}$$

Alors $A_1(\theta) = b_1(\theta)$
 $A_n(\theta) = b_n(\theta)$

La symétrie quarte de période de cette tension nous a permis de limiter la recherche des angles de commutation dans un intervalle de $[0 \ \pi/2]$, les autres angles peuvent être déduits par symétrie. Les coefficients de la série de FOURIER des harmoniques à éliminer sont réglés à zéro pour supprimer complètement les (M-1) harmoniques sur tout l’intervalle de contrôle $[0, 1]$ jusqu’à l’ordre (2M-1) et ceux du fondamental de v_L à la valeur désirée X_0 . Ainsi, nous aurons à résoudre le système à M équations suivant:

$$n = 1 \quad A_1 = X_0 \tag{IV.21}$$

$$n > 1 \quad A_n = 0 \tag{IV.22}$$

$$n = 3, 5, 7, \dots, M$$

Ce système d’équations est non linéaire. La résolution de ces équations est basée sur la méthode numérique de NEWTON-RAPHSON.

$$f_1(x) = A(x)_1 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi\delta}{2} + \sum_{K=1}^M (-1)^K \left(x_K - \frac{1}{2} \sin(2x_K) \right) \right) \tag{IV.23}$$

$$\dots \dots \dots \quad 2 \sum_{K=1}^M \left(\sin(n-1)x_K - \sin(n+1)x_K \right) \dots \dots \dots$$

IV.5.d.2 Algorithme de calcul [19]:

1. Choisir un ensemble de valeurs initiales x , noté par $x^0 [x_1^0, x_2^0, x_3^0 \dots x_M^0]$
2. Calcul de la valeur $f(x^0) = f^0(x)$
3. Linéariser le système autour de x^0 $f^0 + M_x^0 \cdot dx = 0$

Avec

$$M_x^0 = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \dots & \frac{df_1}{dx_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{df_m}{dx_1} & \dots & \frac{df_m}{dx_m} \end{bmatrix} = J^0$$

Appelée matrice **JACOBEENNE**

$$\left(\frac{df_i}{dx_j} \right)_{x^0} = [-1]^j \cdot 2 \sin(x_j) * \sin(n_i x_j)]$$

$$j = 1, 3, \dots, M$$

$$i = 1, 3, \dots, M$$

4. Calculer l'incrément $dx = (M_x^0)^{-1} \cdot f^0$
5. Répéter de 1 jusqu'à 4 en utilisant comme choix amélioré $x^1 = x^0 + dx$
6. Répéter la procédure jusqu'à la précision désirée $e = \max(\text{abs}(dx))$. La solution correcte doit satisfaire la condition suivante.

$$0 \leq x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4 \dots \leq x_M \leq \frac{\pi}{2}$$

Afin de déduire des propriétés physiques simples, les équations générales posées seront appliquées à un nombre restreint de commutation par quart de période. Nous analyserons le cas de différentes formes d'impulsions et les performances au niveau harmonique aussi bien du côté source et du côté charge, ainsi que la valeur efficace du courant et de la tension de sortie [23].

IV.5.d.3 Angle de commutation:

Pour tout X_0 dans $[0, 1]$, la propriété de changement des points de commutation est trouvée comme montre la figure IV.6 $M=2, 3, 4, 5, 7, 13$.

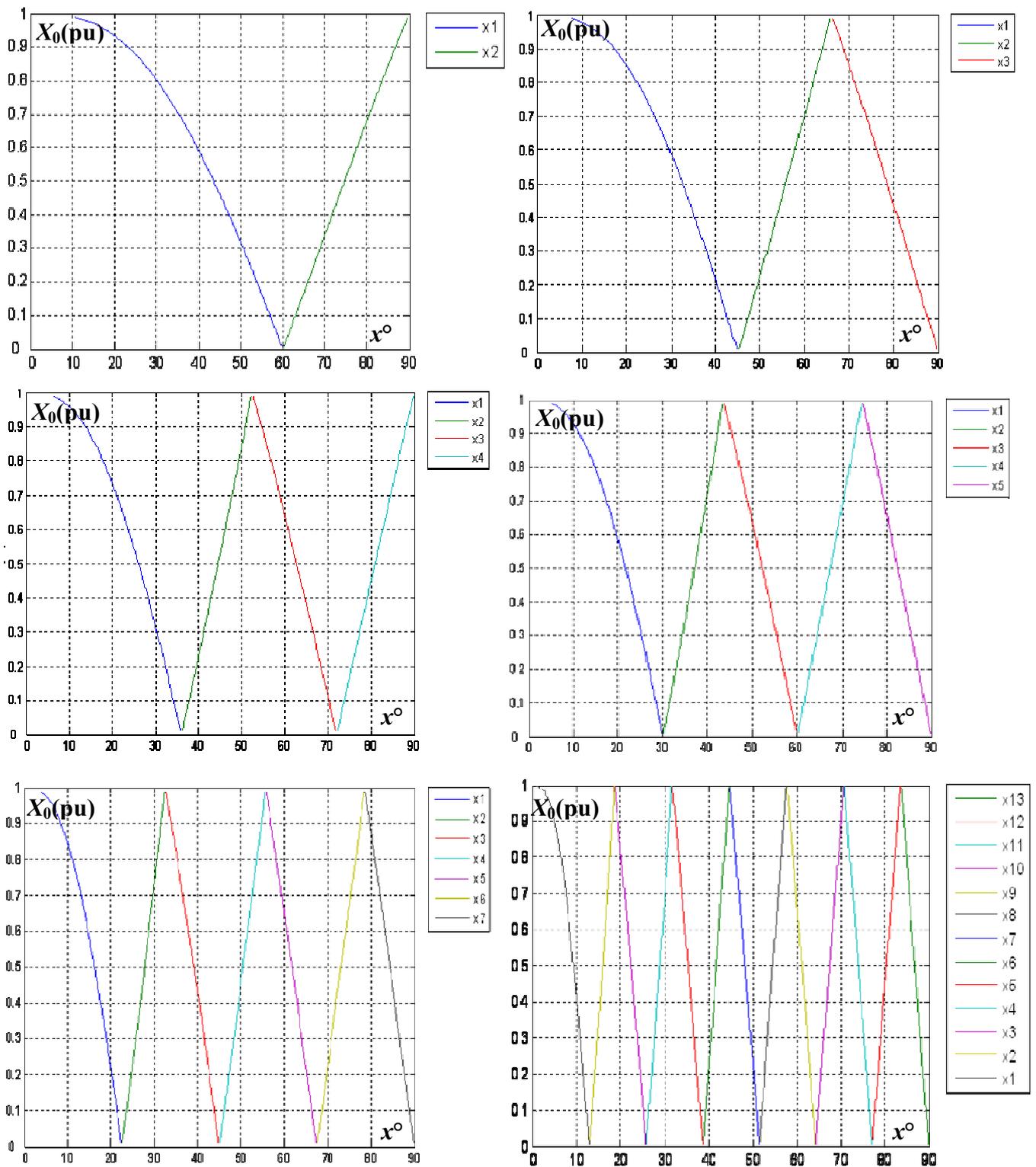


Figure IV.6 Variation des angles de commutation x_i en fonction de $X_0[0,1]$ pour $M=2, 3, 4, 5, 7, 13$.

Et pour $M=13$, les valeurs des angles de commutation sont calculés avec une erreur de 0.0001 par [16], sont comparés avec les valeurs calculées par la méthode mentionnée NEWTON RAFESON:

Valeurs calculées par [16]		Valeurs calculées par la méthode de NEWTON RAFESON	
$X_0=0.5$	$X_0=0.7$	$X_0=0.5$	$X_0=0.7$
9.2720	7.4483	9.2719	7.4481
15.8571	16.9588	15.8570	16.9585
22.3517	20.8956	22.3517	20.8952
28.8176	30.0029	28.8177	30.0027
35.2708	33.8895	35.2708	33.8897
41.7172	42.9402	41.7172	42.9402
48.1596	46.8136	48.1596	46.8139
54.5994	55.8454	54.5995	55.8457
61.0376	59.7141	61.0376	59.7143
67.4746	68.7382	67.4747	68.7382
73.9109	72.6044	73.9110	72.6046
80.3467	81.6248	80.3468	81.6249
86.7823	85.4903	86.7823	85.4904

Tableau IV.1. Angles de commutation pour $M=13$, trouvés par [16],
et calculées parla méthode de NEWTON RAFESON.

La pente de x_1 est approximativement constante jusqu'au voisinage de $X_0=0.5$ au-delà X_1 décroît d'une manière significative.

Par conséquent, pour $M=2$, x_1 et x_2 peuvent être approximées par les relations suivantes [20]:

$$X_0 = ax_1^2 + bx_1 + c \quad (IV.25)$$

$$X_0 = mx_2 + n \quad (IV.26)$$

$$a = -0.0003648 \quad m = 1/30$$

$$b = 0.004859 \quad n = -2 \quad C = 0.9838$$

Pour toutes les valeurs X_0 de $[0, 1]$ et $M=2$, les points de commutation X_1 et X_2 sont [10]:

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4a(c - X_0)}}{2a} \quad (IV.27)$$

$$x_2 = \frac{X_0 - n}{m} \quad (IV.28)$$

Le modèle PWM pour $M = 2$ peut être donc obtenu sans passer par la résolution du système non linéaire compliqué.

IV.5.d.4 Etude du cas général associé à M pair [20]:

Les études récentes et les simulations que nous avons effectuées ont montré que les

impulsions et les intervalles entre les impulsions, sont de largeurs constants et confinés dans l'espace $[0, \pi]$, il existe alors un rapport μ entre les angles de commutation X_i et X_i' . Partant de ce constat nous avons pu établir la relation qui existe entre les angles de commutation connus X_i dans le cas de deux impulsions $M=2$ et le rapport μ lorsque nous avons M impulsions [14].

Pour le cas M pair:

$$x'_1 = \mu x_1 \tag{IV.29}$$

$$x'_2 = \mu x_2 \tag{IV.30}$$

$$x'_3 = \mu x_3 \tag{IV.31}$$

Avec $x_3 = \pi - x_2$ (IV.32)

Pour $2 \leq K < \frac{M}{2}$ nous avons $x'_{2K} = x'_{2K-1} + (x'_2 - x'_1)$ (IV.33)

Pour $K \leq \frac{M}{2}$ nous avons $x'_{2K+1} = x'_{2K} + (x'_3 - x'_2)$ (IV.34)

Connaissant x_1 et x_2 pour M pair, le facteur μ correspondant est donné par le tableau suivant.

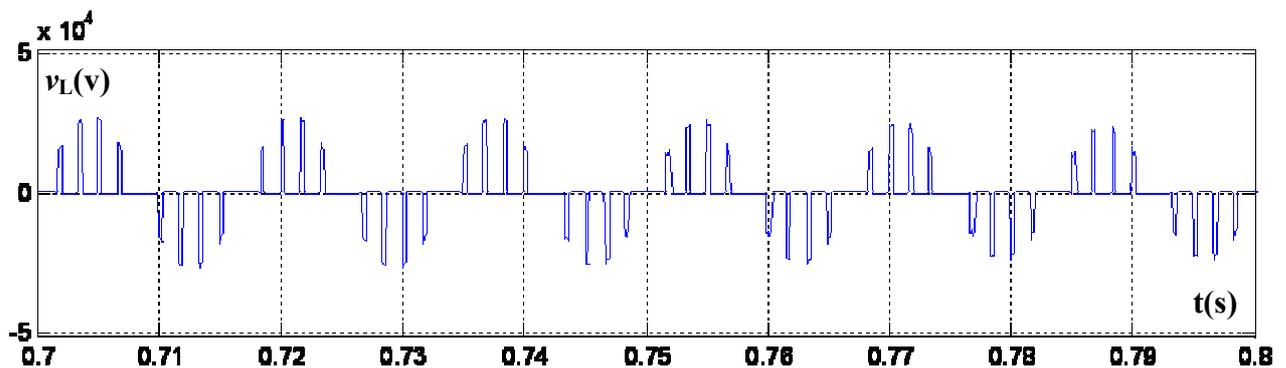
M	2	4	6	8	....	....	M
μ	1	3/5	3/7	1/3	....	....	3/(M+1)

Tableau IV.2 le facteur μ pour les cas M pair.

Pour vérifier numériquement les relations précédentes nous fixerons $M=4$ et $X_0= 0.2$ puis $X_0=0.7$ pour éliminer les trois premiers harmoniques de la tension de sortie. Nous aurons donc les résultats suivants en arrondissant les valeurs de X aux degrés supérieurs.

Cas1 : $X_0=0.2$ et $M=4$

$$e = 5.8040e-007 ; x(1:4) = [32.2804 \quad 39.5084 \quad 68.3700 \quad 75.5806]$$



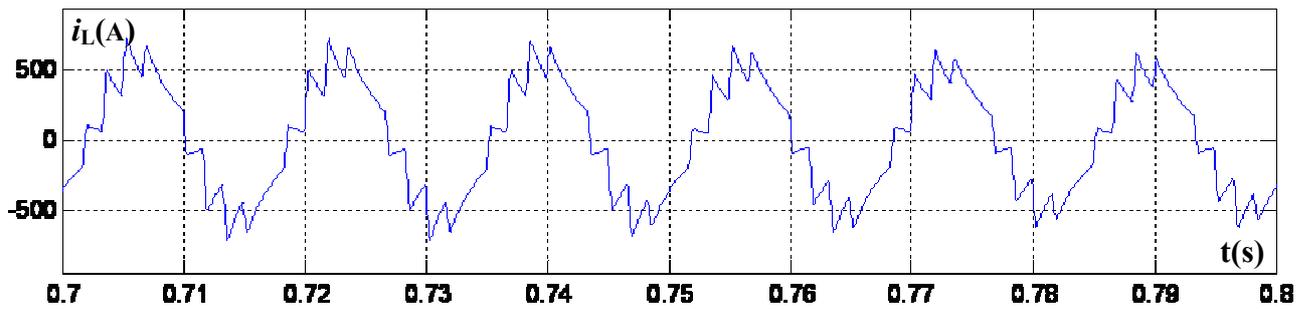


Figure IV.7 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=4$, $X_0=0.2$

Cas 2: $X_0=0.7$ et $M=4$

$$e = 2.0365e-006 ; x(1:4) = [20.9584 \quad 47.7305 \quad 58.8201 \quad 84.5077]$$

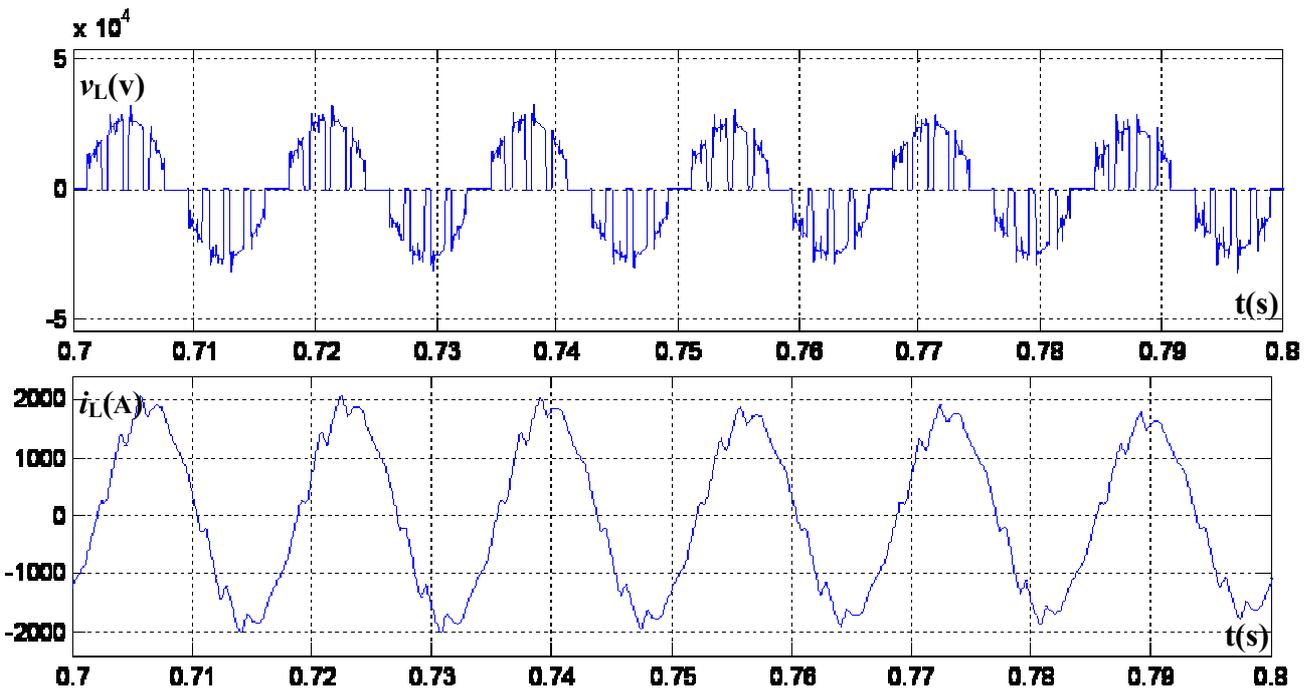


Figure IV.8 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=4$, $X_0=0.7$.

Les figures. (IV.9) (IV.10) montrent la variation des grandeurs électriques à la sortie du hacheur, pour $M=4$, $X_0=0.7$ et $X_0=0.2$ sur ces figures on voit bien que le courant dans la charge est proche à la sinusoïdale.

IV.5.d.5 Etude du cas général associé à M impair [14]:

Par rapport au cas présenté au paragraphe précédent nous avons une impulsion supplémentaire au centre par demi-période. Le nombre d'impulsion totale M par demi-période sera alors impair, nous aurons

$$M_i = M_p + 1 = M$$

Par la suite nous pouvons calculer les angles de commutation x'_k de la façon suivante

$$x'_1 = \mu x_1 \tag{IV.35}$$

$$x'_2 = \mu x_2 \tag{IV.36}$$

$$x'_3 = \mu x_3 \tag{IV.37}$$

Avec $x_3 = \pi - x_2$ (IV.38)

Pour $2 \leq K < \frac{M}{2}$ nous avons $x'_{2K} = x'_{2K-1} + (x'_2 - x'_1)$ (IV.39)

Pour $K \leq \frac{M}{2}$ nous avons $x'_{2K+1} = x'_{2K} + (x'_3 - x'_2)$ (IV.40)

Connaissant x_1 et x_2 pour M impair, le facteur μ correspondant est donné au tableau IV.5

M	3	5	7	9	....	....	M
μ	3/4	1/2	3/8	3/10	.....	.....	3/(M+1)

Tableau IV.3 Le facteur μ pour le cas M impair.

Nous fixerons $M = 3, X_0=0.7$ et $X_0=0.2$ pour éliminer les deux premiers harmoniques de la tension de sortie nous aurons donc les résultats suivants en arrondissant les valeurs aux degrés supérieurs

Cas 1: $M = 3 \quad X_0=0.2$

$e = 2.6906e-007 ; x(1 :3) = [40.3611 \quad 49.3988 \quad 85.4907]$

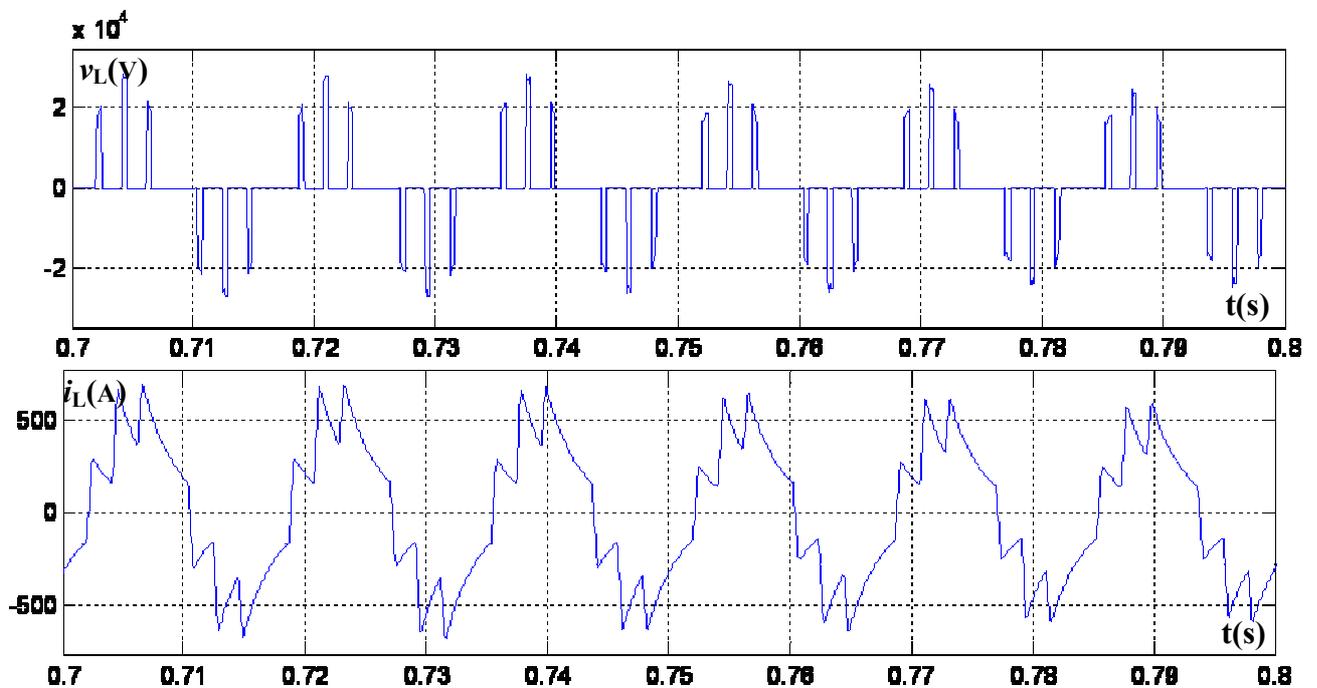


Figure IV.9 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=3, X_0=0.2$

Cas 2: $M=3 \quad X_0 = 0.7$

$e = 1.5093e-006 ; x(1 :3) = [26.2841 \quad 59.8811 \quad 73.8146]$

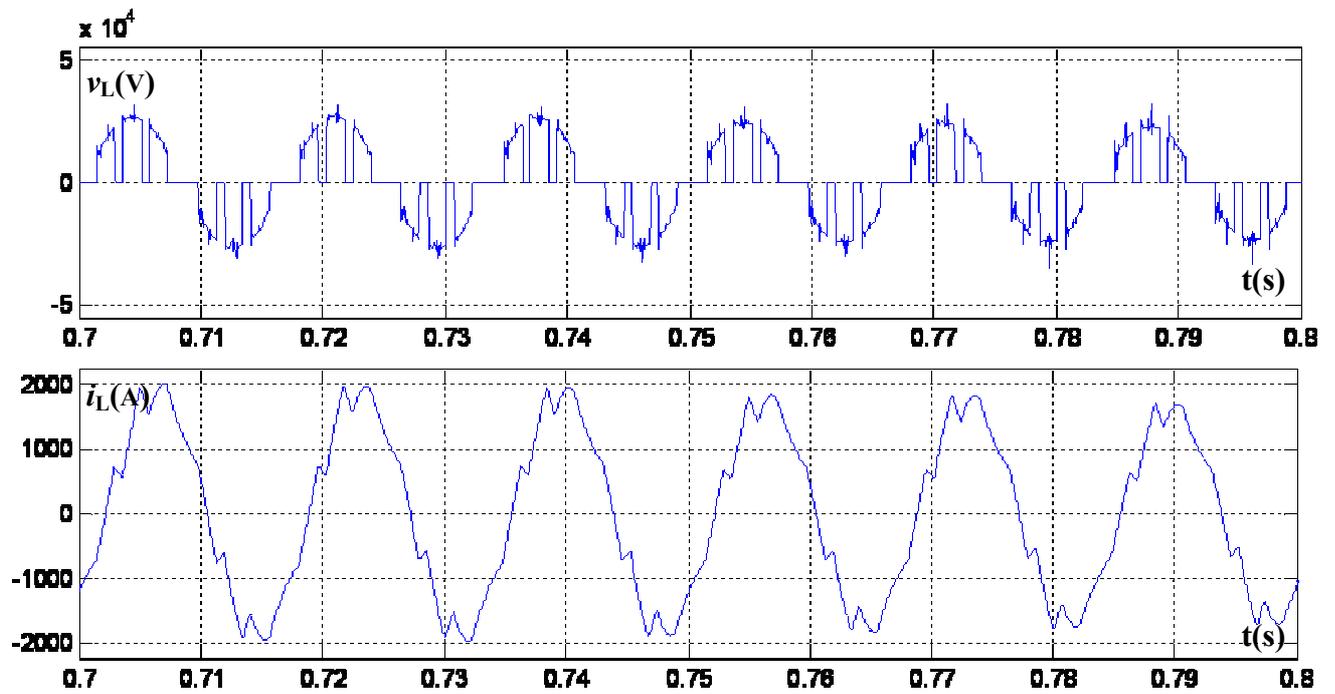


Figure IV.10 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=3, X_0=0.7$.

Cas 3: $M=5X_0=0.2$

$e = 8.0770e-006 ; x(1:5) = [26.8966 \ 32.919056.9659 \ 62.9732 \ 86.9972]$

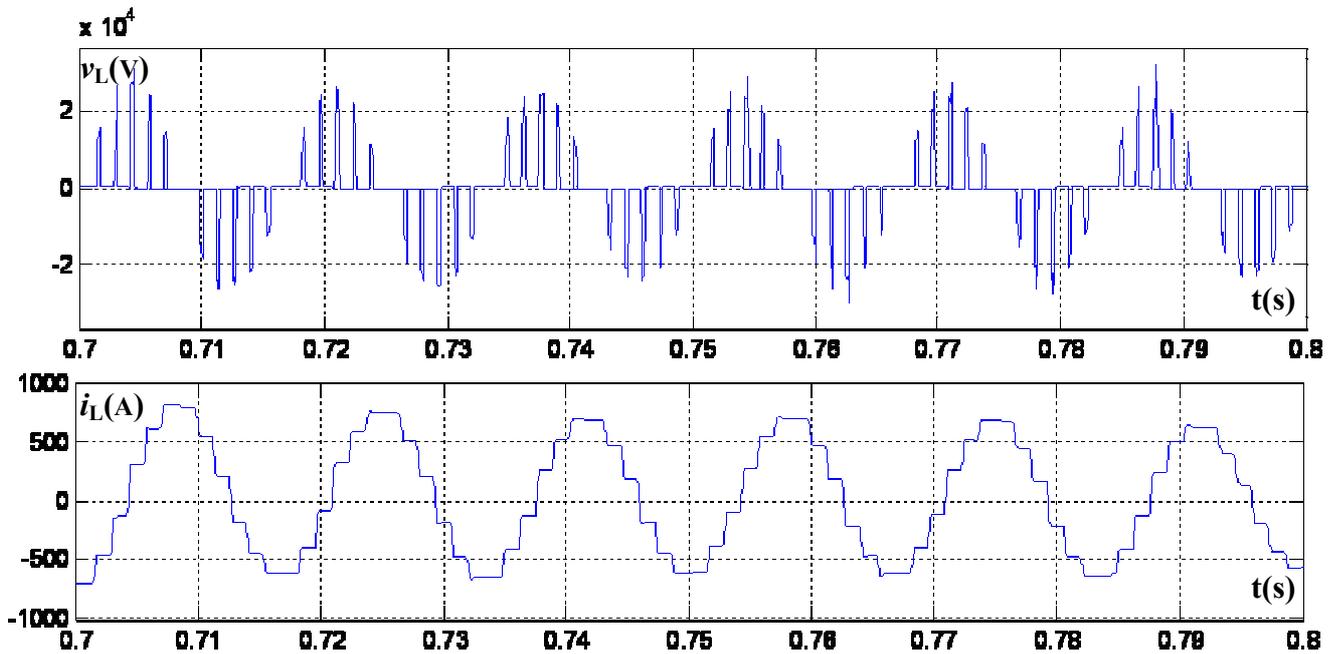


Figure IV.11 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=5, X_0=0.2$.

Cas 4: $M=5 X_0=0.7$

$e = 6.5700e-004 ; x(1:5) = [17.4347 \ 39.7009 \ 48.9205 \ 70.2611 \ 79.3750]$

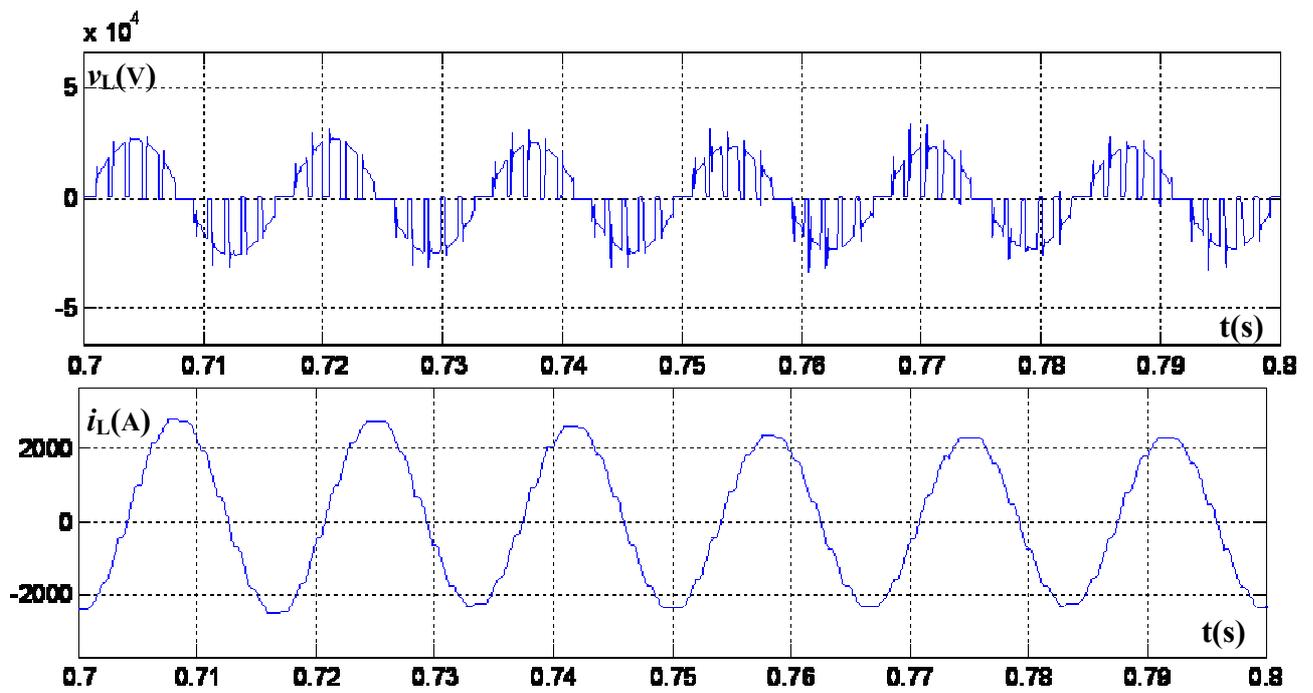


Figure IV.12 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=5, X_0=0.7$.

Cas 5: $M=7 ; X_0=0.2 ; e = 6.9012e-007$

$x(1:7) = [20.1697 \ 24.6858 \ 42.7180 \ 47.2227 \ 65.2364 \ 69.7391 \ 87.7488]$

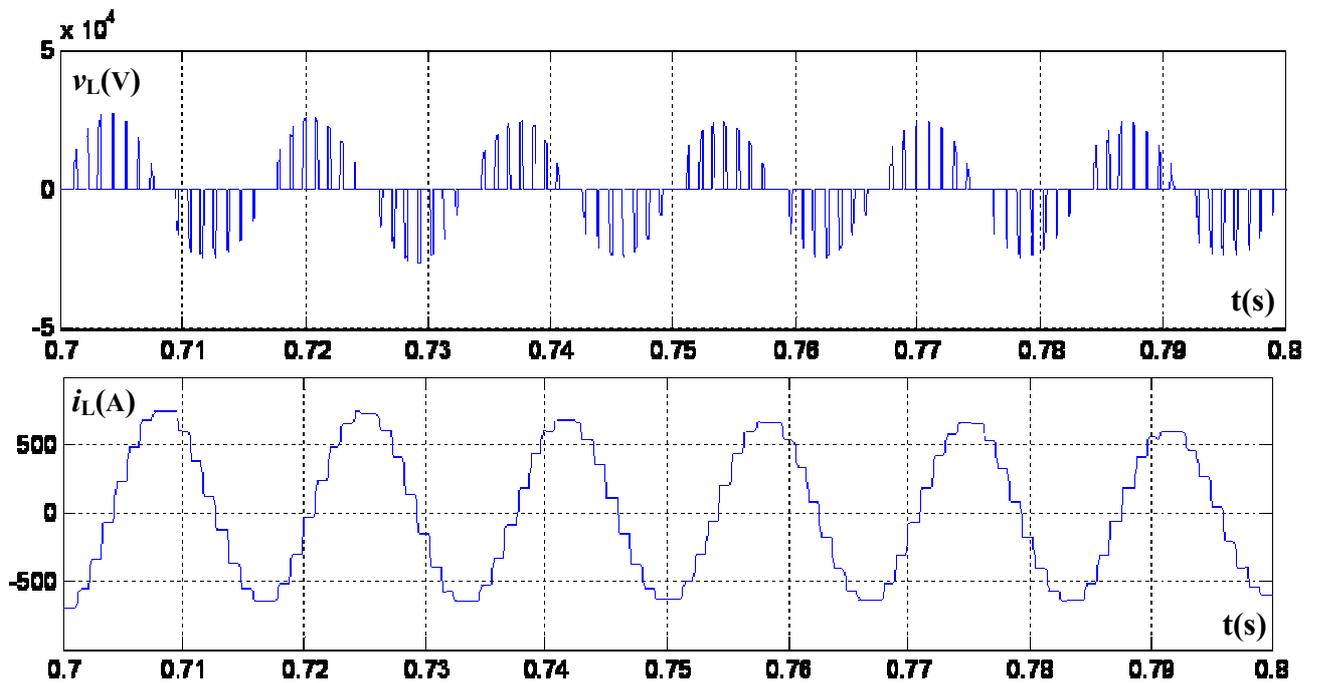


Figure IV.13 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=7, X_0=0.2$.

Cas 5: $M=7 ; X_0=0.7 ; e = 8.1101e-004$

$x(1:7) = [13.0535 \ 29.7221 \ 36.6225 \ 52.5888 \ 59.4036 \ 75.2766 \ 82.0728]$

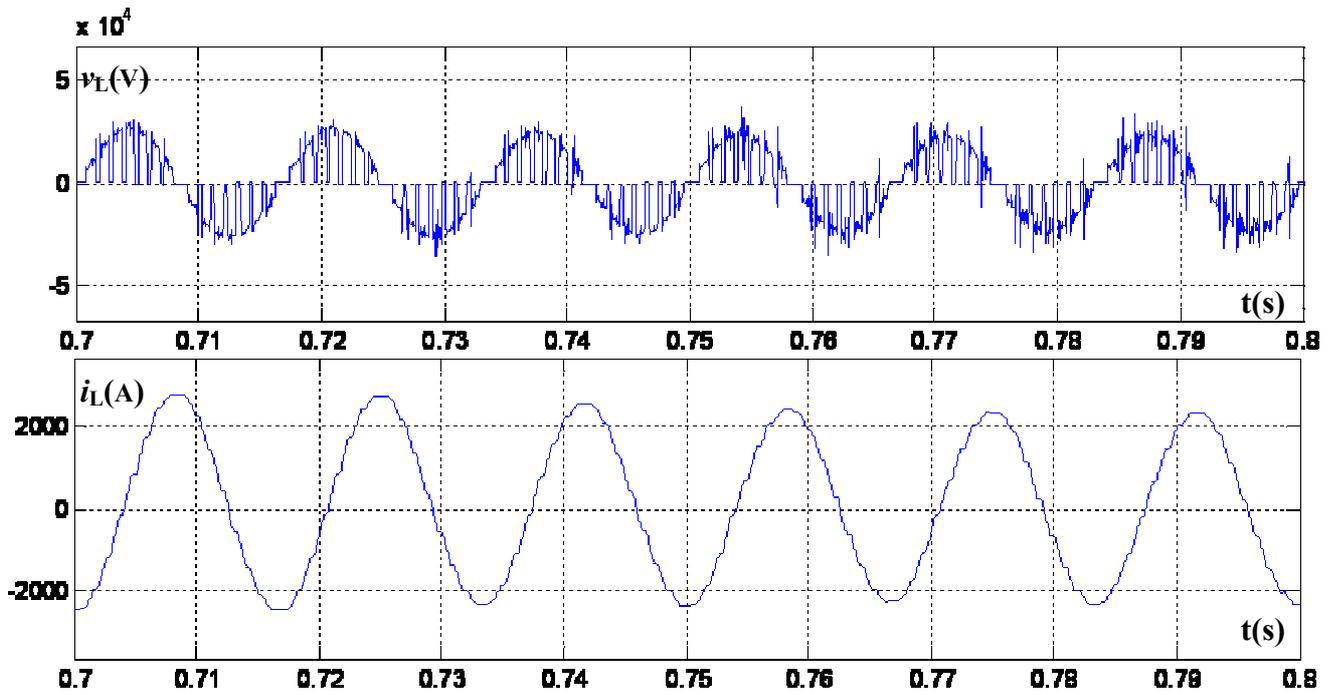


Figure IV.14 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=7, X_0=0.7$.

Cas 6: $M=13 ; X_0=0.2 ; e = 2.1371e-004 ; x(1:13) = [11.5242 \ 14.1045 \ 24.4073 \ 26.9811 \ 37.2730 \ 39.8456 \ 50.1348 \ 52.7069 \ 62.9951 \ 65.5670 \ 75.8547 \ 78.4266 \ 88.7141]$

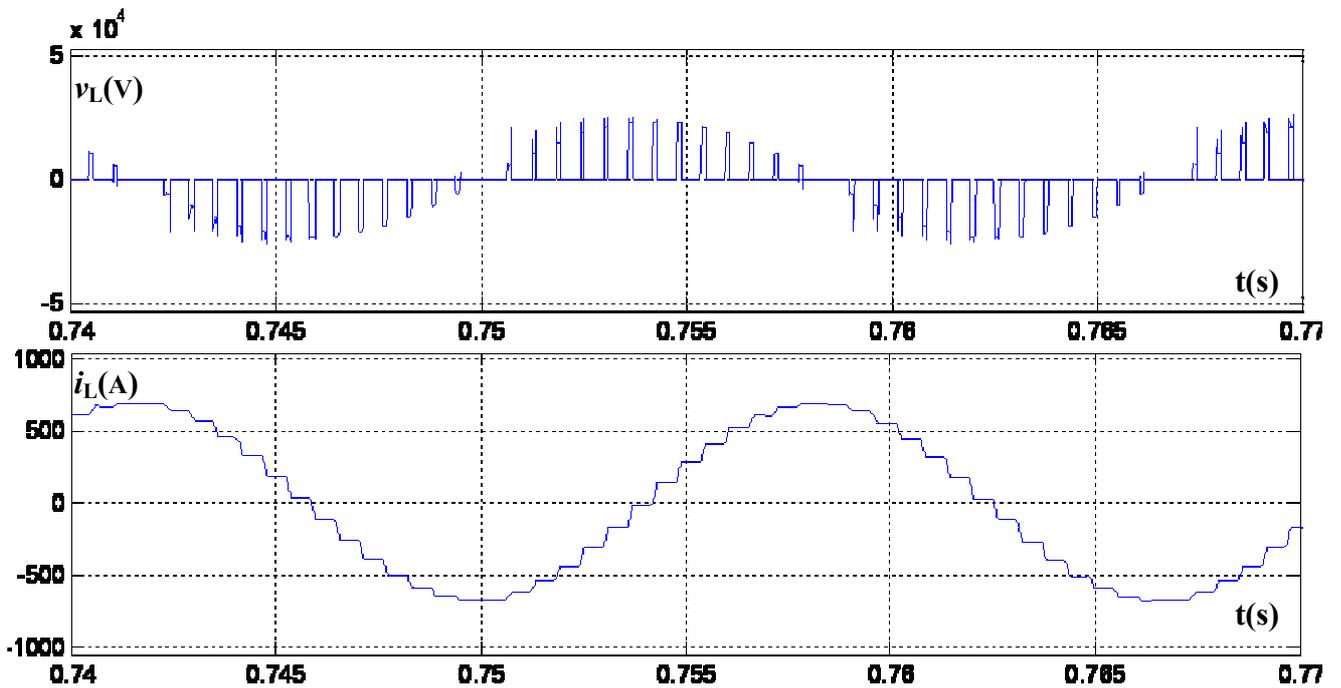


Figure IV.15 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=13, X_0=0.2$.

Cas 6: $M=13 ; X_0=0.7 ; e = 1.2893e-005$

$x(1:13) = [7.4481 \ 16.9585 \ 20.8952 \ 30.0029 \ 33.8897 \ 42.9402 \ 46.8139 \ 55.8457 \ 59.7143 \ 68.7382 \ 72.6046 \ 81.6249 \ 85.4904]$

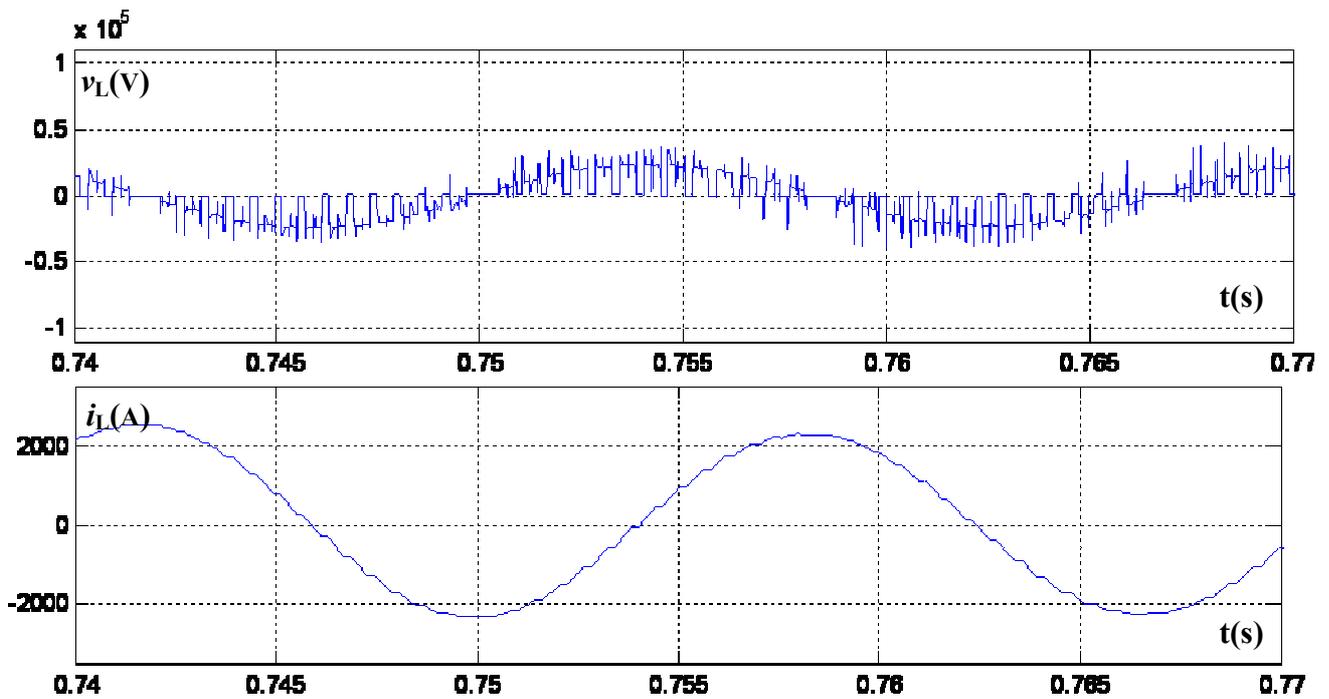


Figure IV.16 Variation de la tension v_L et du courant i_L de phase pour $M=13$, $X_0=0.7$.

Les Figures (IV.11) à (IV.16) montrent la variation des grandeurs électriques à la sortie du hacheur, pour $M=3, 5, 7, 13$ pour $X_0=0.2$ et $X_0=0.7$ sur ces figures, on voit bien que le courant dans la charge est proche à la sinusoïdale.

IV.6 Conclusion:

Ce chapitre nous a permis de présenter quelques stratégies de commande des convertisseurs alternatifs – alternatif monophasés à commutation dure d'un circuit inductif simple.

L'expression sous forme analytique de certaines contraintes, nous a conduits à aborder les stratégies de modulation de largeur d'impulsion de type explicite. Ces techniques sont utilisées depuis très longtemps dans les convertisseurs continu-alternatif pour neutraliser les harmoniques au niveau de la charge et pour régler l'amplitude de la composante fondamentale de la tension et du courant. Afin de chercher les angles de commutation, nous avons imposé des contraintes au niveau du réglage du fondamentale de la tension de sortie et de l'annulation de certains harmoniques de courant [14].

Chapitre V

SVC à base du gradateur classique et du gradateur MLI

V.1 Introduction:

Les convertisseurs AC/AC directs présentent une meilleure solution pour contrôler la valeur efficace de la tension au jeu de barres concerné du réseau électrique d'une manière efficace et simple. Les types conventionnels des convertisseurs AC/AC à base de gradateur à commande par l'angle de phase, permettent un contrôle simple de la valeur de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage ALPHA du TCR du SVC grâce à la commutation naturelle. Cependant, ces derniers présentent l'inconvénient que le courant de sortie est riche en harmoniques et la relation entre la susceptance en fonction d'ALPHA n'est pas linéaire. Pour y remédier, on doit introduire d'autres topologies à commutation dure ce qui permet d'ajouter des degrés de liberté supplémentaires à la commande pour pouvoir améliorer la qualité du courant à la sortie et à l'entrée et assurer un contrôle linéaire de la valeur de la susceptance du TCR du SVC.

Les compensateurs statiques de puissance réactive(SVC), à base de gradateur classique, sont employés principalement dans les systèmes électriques surtout pour le réglage de la valeur efficace de la tension au jeu de barres, la stabilité du système de puissance et la compensation de l'énergie réactive. Nous avons traité dans ce chapitre les caractéristiques statiques et dynamiques de la commande de la tension du TCR du SVC, les principes de la conception du régulateur de tension du SVC et l'application de la nouvelle topologie dites gradateur MLI sur le TCR du SVC.

L'élaboration de la commande de la tension du SVC dépend de plusieurs facteurs, tel que l'influence de la résonance du réseau, la saturation des transformateurs, les effets géomagnétiques et la fluctuation de tension [22].

V.2 Caractéristique de contrôle tension-courant du SVC:

Les caractéristiques statique et dynamique du SVC décrivent la variation de la tension par rapport au courant au jeu de barres où le SVC est installé ou par rapport à la puissance réactive que le SVC absorbe ou fournit.

On distingue les caractéristiques suivantes [22]:

Tension de référence $V_{réf}$:

C'est la tension aux bornes du SVC pendant l'état flottante, c'est à dire, quand le SVC ne produit et n'absorbe aucune puissance réactive. La tension du SVC peut être variée entre les limites maximum et minimum (V_{max} - V_{min}) en agissant sur la commande du TCR du SVC, dans le cas d'un compensateur à base de thyristors. Les valeurs typiques de V_{max} et de V_{min} sont 1.05 pu et 0.95 pu, respectivement [22].

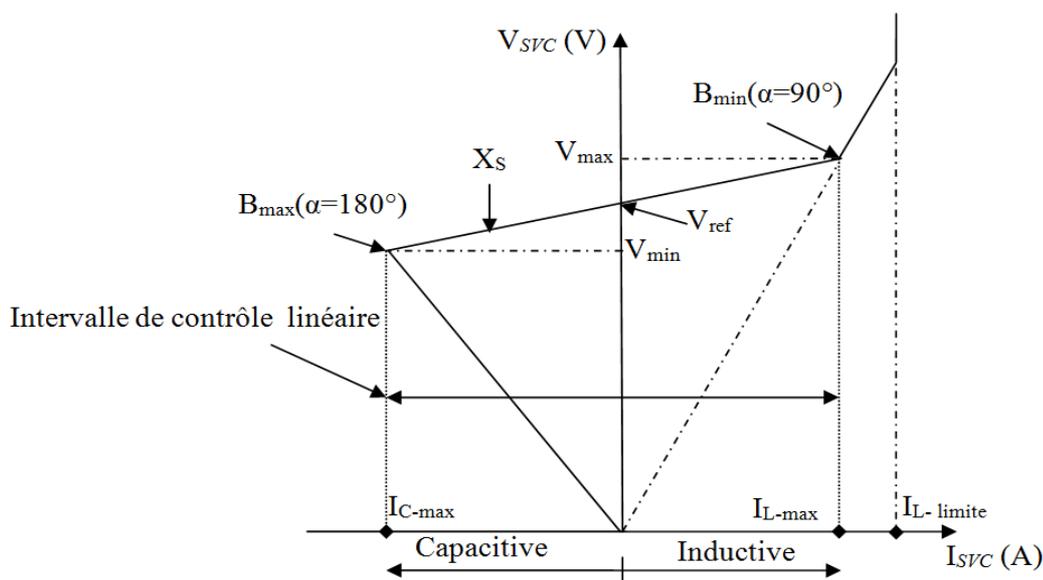


Figure V.1 Caractéristique statique courant-tension du SVC.

Intervalle de contrôle linéaire du SVC:

C'est l'intervalle de contrôle dans lequel la tension à la sortie (terminals) du SVC varie linéairement avec le courant du SVC ou bien de la puissance réactive, car cette dernière est variée dans tout l'intervalle capacitif-inductif.

La pente ou chute du courant:

La pente ou la chute de la caractéristique V-I est définie comme le rapport entre la variation de l'amplitude de la tension et la variation de l'amplitude du courant dans l'intervalle linéaire de commande du compensateur, la pente K_{SL} en Ω est donnée par:

$$K_{SL} = (\Delta V / \Delta I) (\Omega) \quad (V.1)$$

Où ΔV : la variation de l'amplitude de tension.

ΔI : la variation de l'amplitude de courant

La valeur réduite de la pente en pu est obtenue comme suit :

$$K_{SL} = \frac{\Delta V / V_b}{\Delta I / I_b} \text{ pu} \quad (V.2)$$

Où I_b et V_b représentent les valeurs de base de la tension et du courant respectivement de SVC.

Donc, la pente peut être définie alternativement comme la variation en pourcent de la tension nominale mesurée aux deux extrémités : maximum inductif ou maximum capacitif de la puissance réactive de sortie, comme la sortie maximale correspond toujours à la puissance réactive de base du SVC. Dans quelques littératures, le taux de la puissance réactive du SVC est défini comme la somme des taux inductif et capacitif. La pente est toujours exprimée comme une réactance équivalente :

$$X_S = K_{SL} \quad (V.3)$$

La pente peut être variée par le système de commande dans le compensateur commandé par

thyristor, tandis que dans le cas des compensateurs à réactance saturée, la pente est ajustée par les condensateurs séries de correction de celle-ci. La pente est habituellement maintenue dans (1–10)%, avec une valeur typique de (3 –5)%. Ainsi, le SVC est chargé de réguler la tension au jeu de barres et de maintenir le profil de la chute tension-courant de l'intervalle linéaire avec une pente égale à zéro, il est désirable d'incorporer une pente finie dans la caractéristique V-I.

L'intervalle de surcharge:

Quand le SVC fonctionne en dehors de l'intervalle linéaire de contrôle inductif, le SVC entre dans la zone de surcharge, il se comporte comme une inductance fixe ($\alpha=90^\circ$ et $B_{TCR}=B_L$).

La limite de surintensité:

Pour éviter que les thyristors soient soumis aux efforts excessifs du courant maximal que traverse le SVC, le maximum de courant inductif dans l'intervalle de surcharge est soumis à une valeur limite par une action additionnelle dans le circuit de commande [22]

V.3 Réglage de la tension avec un gradateur classique:

L'exemple décrit dans cette section illustre l'insertion du compensateur statique SVC à base du gradateur afin d'étudier les caractéristiques statiques et dynamiques du compensateur statique de puissance réactive dans un système d'une ligne de transmission.

Le dispositif du compensateur statique de puissance réactive SVC est constitué d'une réactance contrôlée par thyristor (TCR) et de trois bancs de condensateurs commutés par thyristor (TSC) comme le montre la figure V.2. Ce compensateur exige la simulation discrète avec un pas d'échantillonnage fixe (50 μ s) et il est employé pour étudier le fonctionnement du SVC dans le réseau électrique.

Le schéma unifilaire du système avec le SVC connecté au jeu de barres du secondaire du transformateur de 16KV est montré dans la figure V.2. Il représente trois bancs de 94MVAR capacitif pour chaque banc et d'un banc de TCR de 109MVAR reliés avec une ligne de transmission de 735KV:

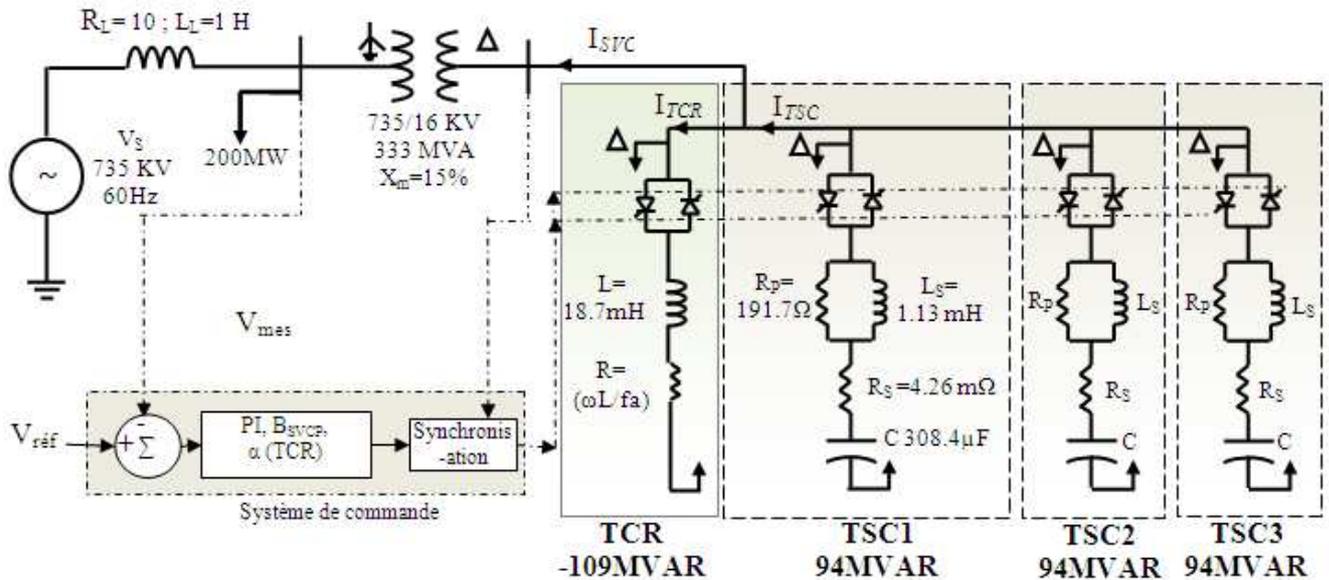


Figure V.2 Schéma unifilaire d'une simple ligne reliée avec un SVC.

V.3.a Système de puissance:

Le système de puissance est représenté par une inductance équivalente (niveau de court-circuit de 6000 MVA) et une charge 200MW.

La tension du système de puissance équivalent d'alimentation peut être varié par le bais d'une source de tension triphasé programmable pour observer la réponse dynamique du SVC lorsque de cette variation.

V.3.b Composants de puissance du SVC:

Le SVC est constitué d'un transformateur d'accouplement de 735 kV/16 kV, 333 MVA, $X_{\delta}=0.15pu$, un banc TCR de 109 MVAR et de trois bancs 94 MVAR (TSC1, TSC2, TSC3) chacun, connectés au secondaire du transformateur [20].

Calcul de la puissance réactive triphasé fournie par le TSC:

Pour calculer la puissance de chaque banc du TSC, on considère que le TCR est totalement déconnecté, et la connexion d'un seul banc du TSC au secondaire du transformateur.

L'impédance d'une seule phase du TSC est :

$$z_{TSC} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{jL_s\omega}} + R_s + \frac{1}{jC\omega}$$

$$z_{TSC} = R_s + \frac{R_p(L_s\omega)^2}{R_p^2 + (L_s\omega)^2} + j\left(\frac{R_p^2 + R_p(L_s\omega)^2}{R_p^2 + (L_s\omega)^2} - \frac{1}{C\omega}\right)$$

$$z_{TSC} = 0.0095 - j8.18 \Omega$$

$$|z_{TSC}| = 8.18 \Omega$$

La puissance produite par un banc de TSC d'une seule phase est avec l'équation(III.3.b) est comme suit :

$$Q_{TSC} = \frac{V^2}{X_{TSC}} = \frac{(16\text{kv})^2}{-j8.18} = \mathbf{31.29\ MVAR}$$

Donc, La puissance totale des trois phases produite par un banc de TSC est:

$$Q_{TSC1} = \mathbf{93.87\ MVAR}$$

Calcul de la puissance réactive triphasé absorbée par le TCR :

Pour calculer la puissance du TCR, on considère que les trois bancs du TSC sont totalement déconnectés, et le TCR est en pleine conduction ($\alpha=90^\circ$).

L'impédance d'une seule phase du TCR est donnée par:

$$Z = R + jL\omega$$

$$Z = (L\omega/fa) + jL\omega$$

Où fa est le facteur de qualité de la réactance = 50.

$$Z = (7.049/50) + j7.049$$

$$|Z_{TCR}| = \mathbf{7.05\ \Omega}$$

La puissance absorbée par un banc de TCR d'une seule phase et par l'équation(III.2.b) est comme suit :

$$Q_{TCR} = \frac{V^2}{X_{TCR}} = \frac{V^2}{j7.049} = \mathbf{-36.31\ MVAR}$$

Donc, la puissance totale des trois phases absorbée par le TCR est donnée par:

$$Q_{TCR} = \mathbf{-108.95\ MVAR} \approx \mathbf{-109\ MAVR}$$

Calcul des susceptances:

La puissance réactive de base est:

$$S_{base} = 100\ \text{MVA}$$

$$|Y_{base}| = \frac{100 * 10^6}{3(16 * 10^3)^2} = \mathbf{0.1302\ pu}$$

La susceptance du TCR en pu au secondaire du transformateur:

$$B_{TCR} = -\frac{1}{X_{TCR}} = \mathbf{-j0.1418\ \Omega^{-1}}$$

$$B_{TCR_pu} = \frac{B_{TCR}}{Y_{base}} = \mathbf{-j1.0895\ pu}$$

La susceptance du TSC en pu au secondaire du transformateur:

$$B_{TSC} = j\frac{1}{X_{TSC}} = \mathbf{j0.1224\ \Omega^{-1}}$$

$$B_{TSC_pu} = \frac{B_{TSC}}{Y_{base}} = \mathbf{j0.9394\ pu}$$

La susceptance du secondaire du transformateur:

$$j1/B_\delta = jX_m \frac{S_{base}}{S_{nom}} = 0.15 * \frac{100 * 10^6}{333 * 10^6} = \mathbf{j0.04995\ pu}$$

On remarque que la susceptance du transformateur B_δ est plus grande que les susceptances B_L et B_{3C} .

Avec l'équation (III.21), et la susceptance du transformateur B_δ , les susceptances maximale et minimale sont données par:

$$B_{SVCs_max} = \frac{B_{3C}}{1+B_{3C}/B_\delta} = \frac{j2.82}{1 - 2.82 * 0.04504} = \mathbf{j3.23 \text{ pu}}$$

$$B_{SVCs_min} = \frac{B_L}{1+B_L/B_\delta} = \frac{-j1.089}{1 + 1.089 * 0.04504} = \mathbf{-j1.038 \text{ pu}}$$

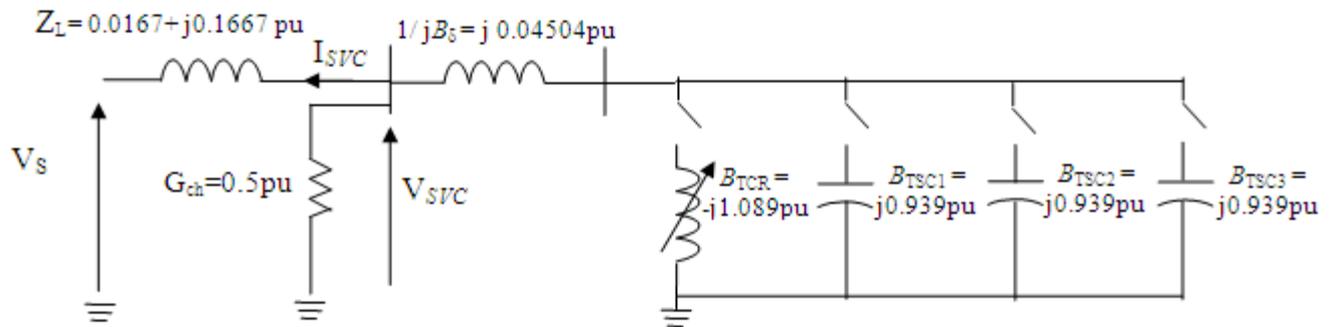


Figure V.3 Schéma unifilaire équivalent d'une simple ligne reliée avec un SVC.

La commutation du TSC par élimination ou ajout par banc permet une variation discrète de la puissance réactive au secondaire du transformateur de 0 à 282 MVAR capacitive (à 16 kV) avec un pas de 94 MVAR, tandis que la commande par l'angle de phase des thyristors du TCR permet une variation continue de 0 à 109 MVAR inductive. En tenant compte de la réactance de fuite du transformateur (0.15 pu), la pente X_S est égale à 0.01, la susceptance équivalente du SVC vue du côté primaire peut varier sans interruption de -1.04 pu/100 MVAR (entièrement inductif) à +3.23 pu/100 MVAR (entièrement capacitif).

Le contrôleur du SVC règle la tension au primaire du transformateur pour obtenir la susceptance adéquate par le régulateur de tension de type PI au jeu de barres et envoie les impulsions appropriées aux 24 thyristors (6 thyristors par banc triphasé).

Chaque banc triphasé est connecté en delta Δ afin que, pendant le fonctionnement normal équilibré, les harmoniques multiples de trois homopolaires (3ème, 9ème...) restent confinés à l'intérieur de cette connexion Δ , ainsi la réduction des harmoniques injectés au système de puissance

Calcul de la pente X_S :

Si le SVC circule un courant réactif I_{SVC} , et avec l'absence du régulateur de tension du SVC. La tension au jeu de barres du SVC est donné par:

$$V_s = V_{SVC} + I_{SVC} \cdot X_S \quad (\text{V.4.a})$$

$$V_s = V_{SVC} \langle 0^\circ + I_{SVC} \langle -90^\circ \cdot X_S \langle 90^\circ \quad (\text{V.4.b})$$

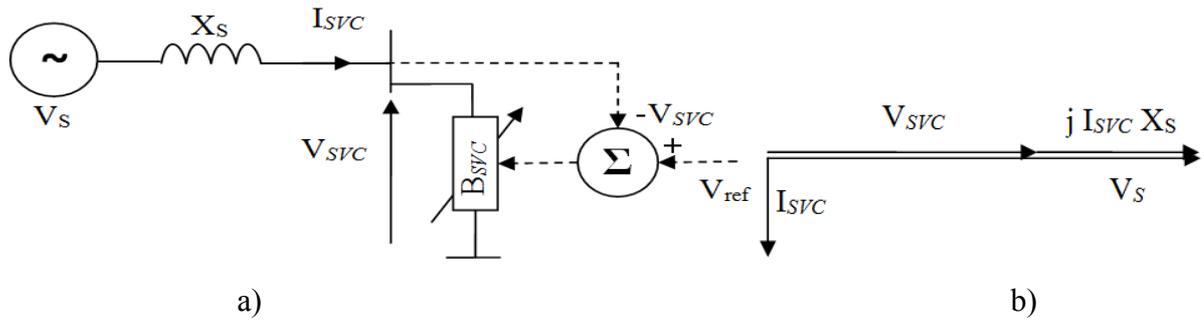


Figure V.4.a) Le système de puissance avec le SVC et sans le régulateur de tension

b) Diagramme vectorielle correspondant pour un courant inductif du SVC.

La tension du SVC au jeu de barre HT diminue avec le courant inductif du SVC et augmente avec son courant capacitif. Le SVC est plus efficace dans les systèmes de contrôle à faible tension AC. (Grande X_s)[22].

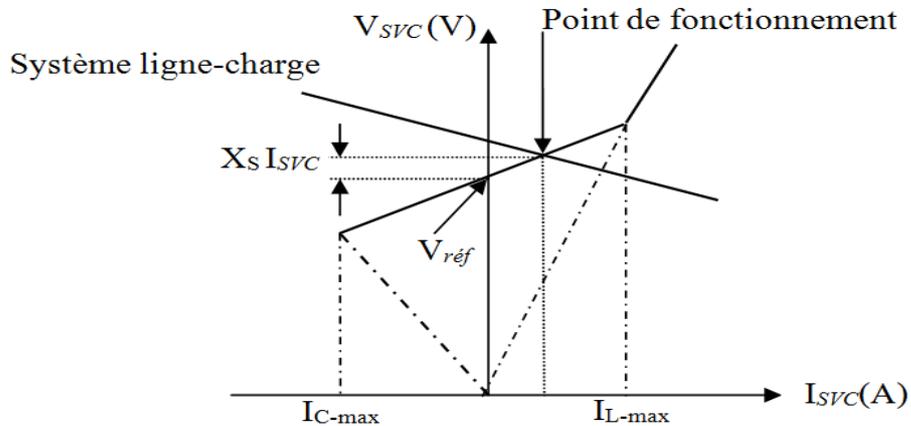


Figure V.5 Intersection de la caractéristique V-I du SVC et du système ligne-charge.

La caractéristique dynamique du SVC représentée dans la figure V.5 décrit la compensation de la puissance réactive fournie par le SVC en réponse de la variation de la tension du SVC. L'intersection de la caractéristique du système ligne-charge et la caractéristique dynamique du SVC donne le point de fonctionnement stable du SVC comme le montre la figure V.5.

L'équation de réglage de la tension dans l'intervalle linéaire est donnée par:

$$V_{SVC} = V_{ref} + I_{SVC} K_{SL} \tag{V.5}$$

Où I_{SVC} est positif si inductif (c.à.d. $V_{SVC} > V_{ref}$), ou négatif si capacitif (c.à.d. $V_{SVC} < V_{ref}$).

Le courant de base:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{base}} = \frac{100 * 10^6}{\sqrt{3} * 735 * 10^3} = 78.55A$$

La tension maximale du TCR est :

$$735KV * 1.01 = 742.35KV$$

Quand $\alpha = 90^\circ$ et $B_{TCR} = B_L$, le courant $I_{TCR} = I_{L-max}$ et la tension V_{SVC} est en

maximum: 742.35KV

$$I_{L-\max} = \frac{Q_{TCR}}{\sqrt{3} V_{\max}} = \frac{109 * 10^6}{\sqrt{3} * 742.35 * 10^3} = \mathbf{84.77A}$$

$$I_{L-\max} = \mathbf{1.079pu}$$

La tension minimale du trois TSC est:

$$735KV * 0.97 = \mathbf{712.95KV}$$

Quand $\alpha=180^\circ$ et $B_{TCR}=0$, le courant $I_{TSC} = I_{C-\max}$ et la tension V_{SVC} est en minimum: **712.95KV**

Si $B_{TSC}=B_{3C}$, le courant ($I_{TSC} = I_{C-\max}$)

Le courant maximum produit par les trois TSC :

$$I_{C-\max} = \frac{Q_{3TSC}}{\sqrt{3} V_{\min}} = \frac{282 * 10^6}{\sqrt{3} * 712.95 * 10^3} = \mathbf{228.36 A}$$

$$I_{C-\max} = \mathbf{-2.9pu}$$

Avec l'équation (V.2) nous avons :

$$X_S = \frac{\left(\frac{(742.35 - 712.95)}{735} \right)}{\frac{(228.36 - (-84.77))}{78.55}} = \mathbf{0.01 pu}$$

Les avantages de la pente X_S dans la caractéristique dynamique du SVC :

- Réduit substantiellement le taux de la puissance-réactive du SVC pour la réalisation des mêmes objectifs de la commande (régulateur de puissance);
- Facilite le partage de la puissance réactive entre les multiples compensateurs TSC raccordés en parallèle;
- Empêche le SVC d'atteindre les limites de réglage de la puissance réactive brusquement.

La figure V.6 illustre la caractéristique dynamique de notre SVC décrit dans la figure V.2. On observe sur la figure que les valeurs limites de la susceptance varie entre $-j1.038pu$ à $j3.23pu$ ce qui correspond à un réglage de la tension au jeu de barre du SVC de 1.01pu à 0.97pu et une compensation de l'énergie réactive de -100MVAR à 300MVAR avec une pente de réglage X_S 0.01/100MVA

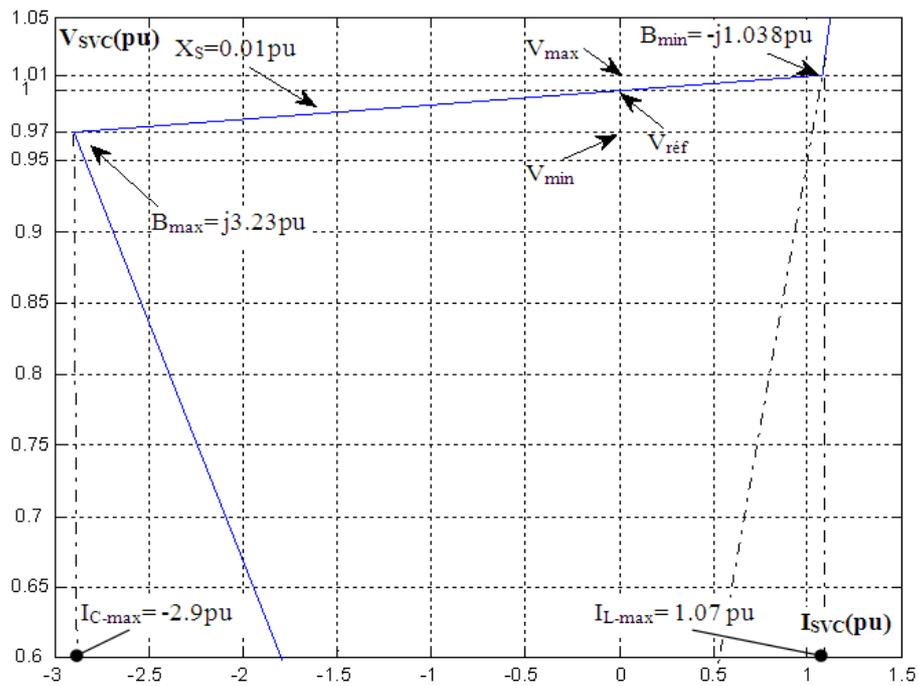


Figure V.6 Caractéristique statique du SVC.

V.3.c Système de commande du SVC:

La figure V.7.a montre le circuit de commande du SVC constitué d'un TCR et de trois TSCs pour maintenir la tension au jeu de barre où le SVC est installé autour de la valeur de référence [22].

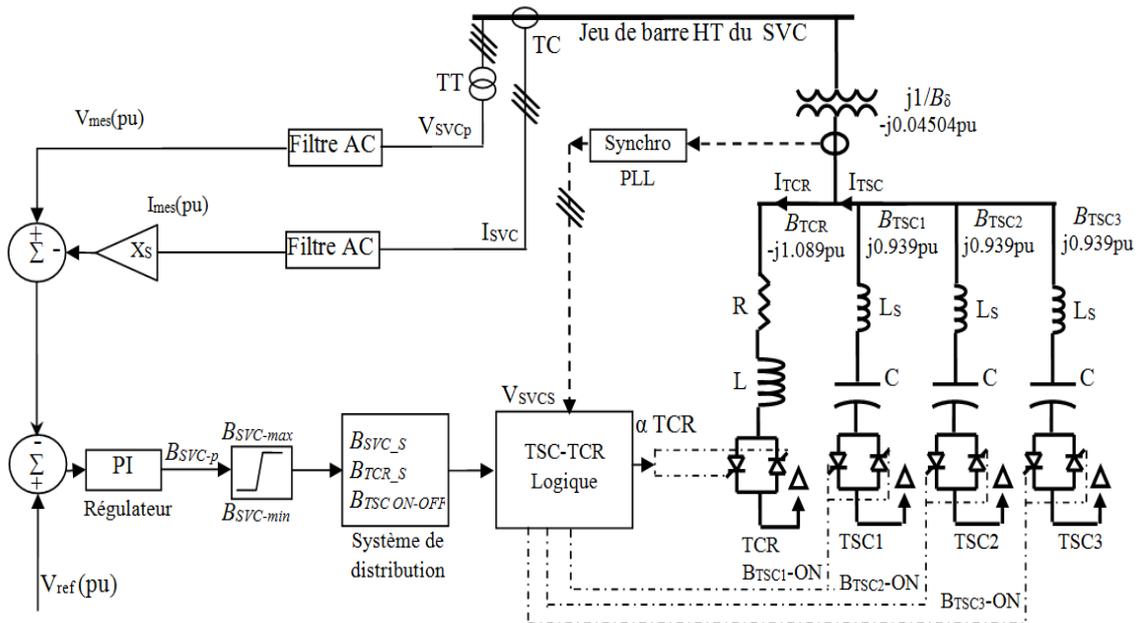


Figure V.7 Schéma du circuit de commande du SVC.

Le système de commande du SVC comporte les quatre principaux modules suivants:

Système de mesure:

Avec des transformateurs de mesure, on mesure les trois tensions et les trois courants au primaire du transformateur, en passant par un filtre AC, puis en utilisant la transformation α, β pour calculer la valeur efficace de la tension et du courant au primaire du transformateur.

Régulateur de tension du SVC:

Le courant du SVC est donné par l'équation:

$$I_{SVC} = B_{SVC} V_{SVC} \quad (V.6)$$

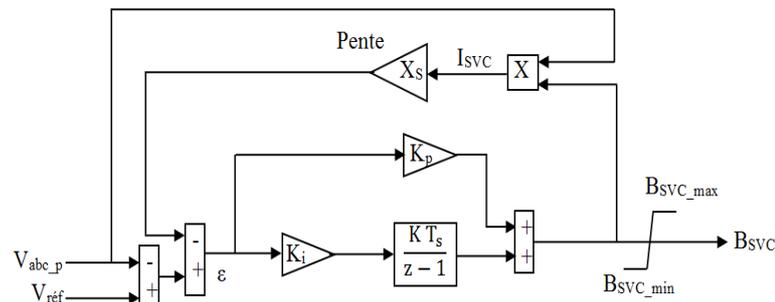


Figure V.8 Boucle du régulateur de tension.

Où K_p et K_i sont les paramètres du régulateur PI.

La figure V.8 montre la boucle de régulation de la tension au jeu de barre du SVC. La vitesse de réponse du SVC dépend du gain intégral du régulateur de tension K_i ($K_p=0$), la réactance du système de puissance X_L et la pente X_S . Si la constante du temps du capteur de mesure de la tension et le temps moyen de retard à l'amorçage T_d du thyristor sont négligés. Le système de puissance peut être approximé par un système du premier ordre ayant une constante du temps en boucle ouverte donnée par:

$$T_o = \frac{1}{X_S * K_p} \quad (V.7)$$

$$T_o=0.125s$$

La constante du temps en boucle fermée est donnée par

$$T_F \cong \frac{X_S}{(X_L + X_S)} * T_o \quad (V.8)$$

Si on augmente le gain du régulateur ou on diminue la réactance du système, la constante du temps du capteur de mesure de la tension et le temps moyen de retard à l'amorçage T_d du thyristor ne seront plus négligeables et on observera une réponse oscillatoire et éventuellement l'instabilité.

Circuit de génération des impulsions:

La figure V.9 montre le principe de génération des impulsions. Dans ce circuit, on détermine le nombre entier n du TSC à utiliser pour compenser l'énergie réactive et augmenter la tension pour la maintenir constante au jeu de barre, par contre, l'angle d'amorçage α du TCR permet de régler la susceptance B_{TCR} afin d'amener la tension à sa valeur désirée selon l'équation suivante [23].

$$B_{TCR} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi} \quad (V.09)$$

Où α : est l'angle d'amorçage en radian,[22].

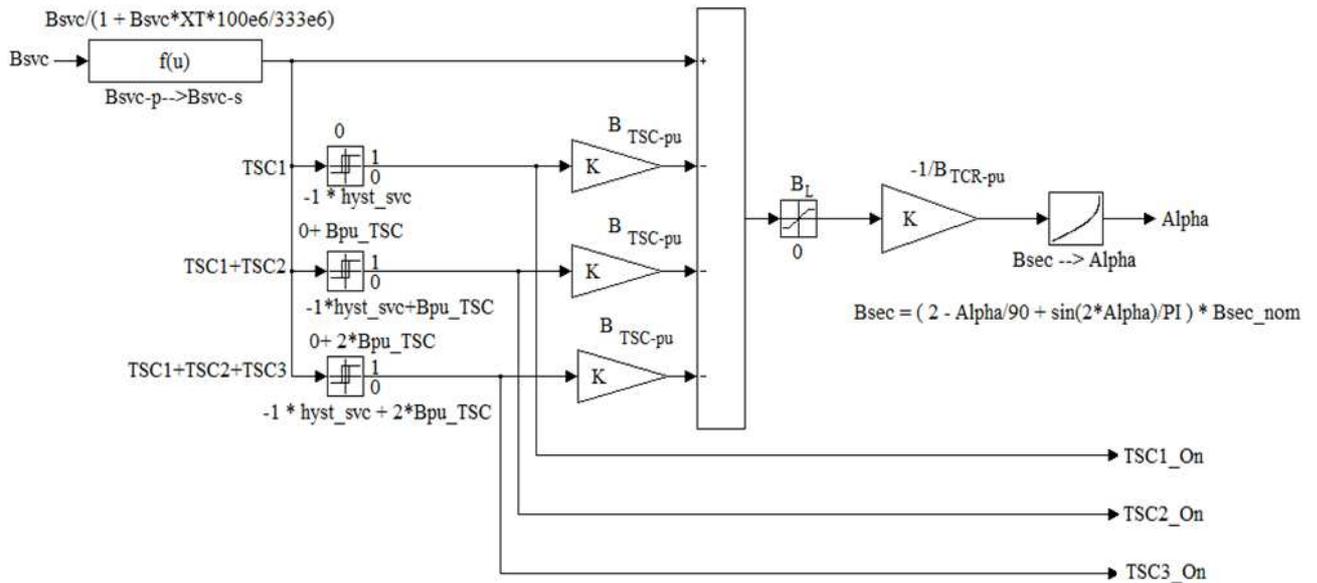


Figure V.9 Circuit de commande du SVC.

Circuit de synchronisation des impulsions:

Le circuit de synchronisation des impulsions se compose de trois sous-blocs indépendants pour les trois phases. Chaque sous-bloc se compose d'une PLL qui permet la synchronisation des impulsions avec la tension du secondaire du transformateur. La PLL permet de mesurer la tension au secondaire et non pas au primaire pour éviter la réactance totale du transformateur, en plus elle joue le rôle d'un filtre d'entrée.

Paramètres de simulation du circuit programmable:

a) paramètres du transformateur et du SVC:

Puissance nominale du transformateur	S	VA	33310 ⁶
Inductance totale de fuite du transformateur	L _T	pu/Pnom	0.15
Fréquence	f	Hz	60
Tension nominale entre phase du secondaire du transformateur	Vabc-s	V(RMS)	1610 ³
Inductance du TCR	L	H	18.7 10 ⁻³
Capacité du TSC	C	F	308.4 10 ⁻⁶
Inductance du TSC	L _S	H	1.13 10 ⁻³

b) Source de tension programmable:

Fréquence	f	Hz	60
Tension nominale entre phase	Vabc	V(RMS)	1.004 735 10 ³
Tension nominale entre phase programmable	Vabc	pu	1.0-1.025-0.93-1.0
Temps programmable	t	S	0-0.1-0.4-0.7
X/R	-	-	10

c) La charge:

Fréquence	f	Hz	60
Tension nominale entre phase	Vabc	V(RMS)	735 10 ³
Puissance active	P	W	200MW

d) Les paramètres de contrôle:

Tension de référence	$V_{\text{réf}}$	pu	1.0
Paramètres du régulateur	K_i	V(RMS)	0
	K_p	-	800
La pente	X_S	pu/100MVA	0.01
La susceptance minimale	$B_{\text{SVCs-min}}$	pu/100MVA	-1.04
La susceptance maximale	$B_{\text{SVCs-max}}$	pu/100MVA	3.23
Hystérésis	hyst_svc	pu/100MVA	0.01

V.3.d Formes d'onde illustrant la réponse dynamique du SVC en fonction de la variation de la tension de la source :

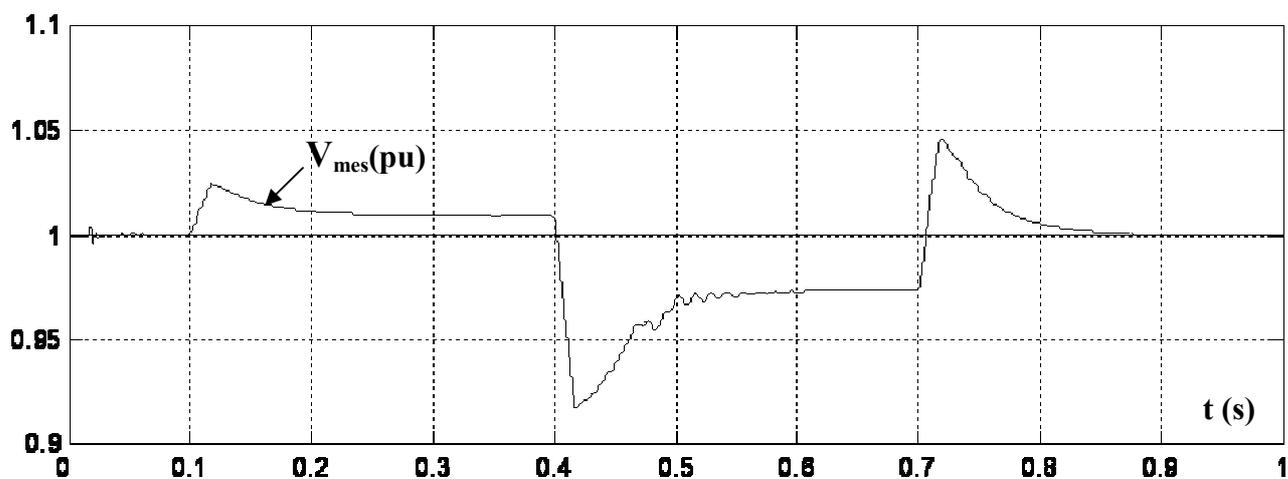


Figure V.10.a) Variation de la tension mesurée V_{mes} (pu).

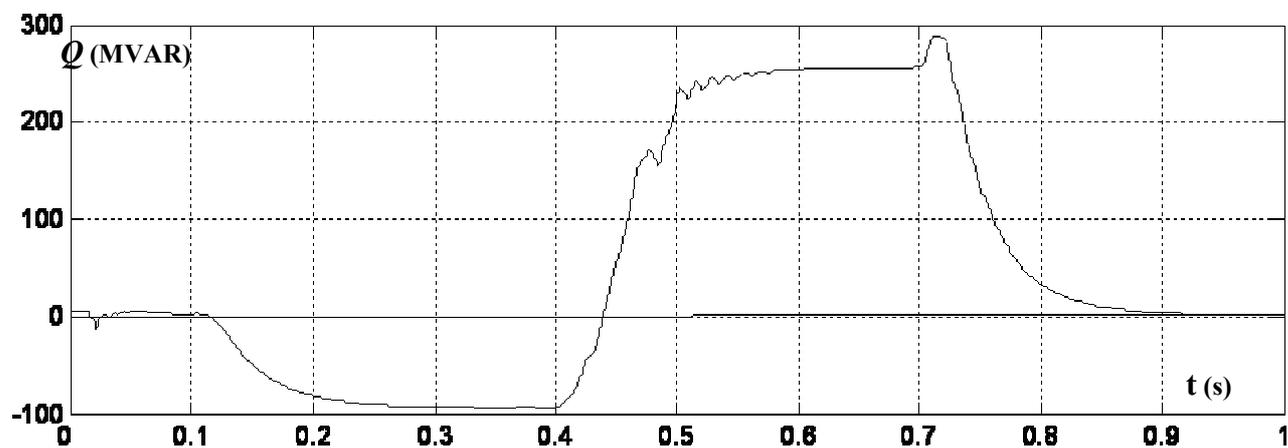


Figure V.10.b) Variation de la puissance réactive.

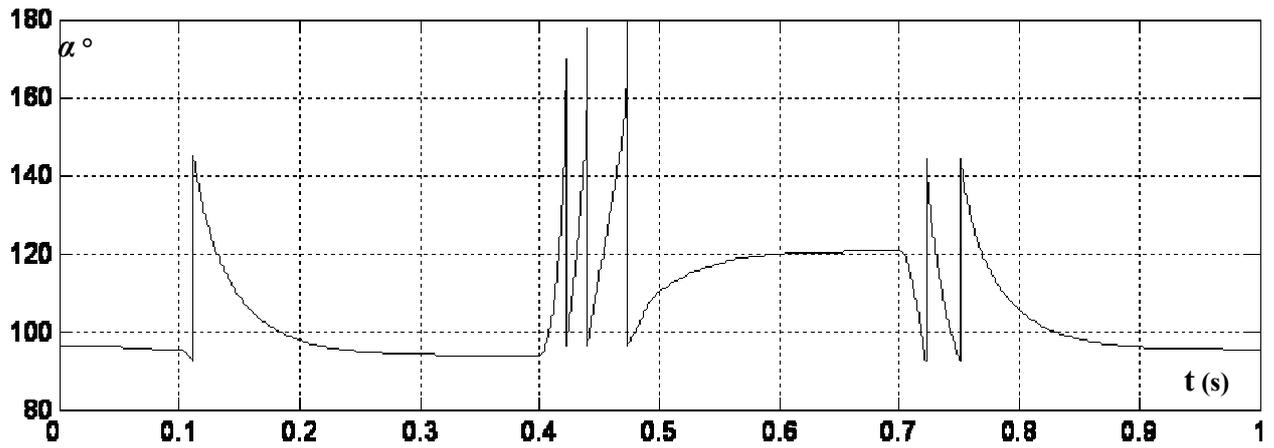


Figure V.10.c) Variation des angles de commutation du TCR.

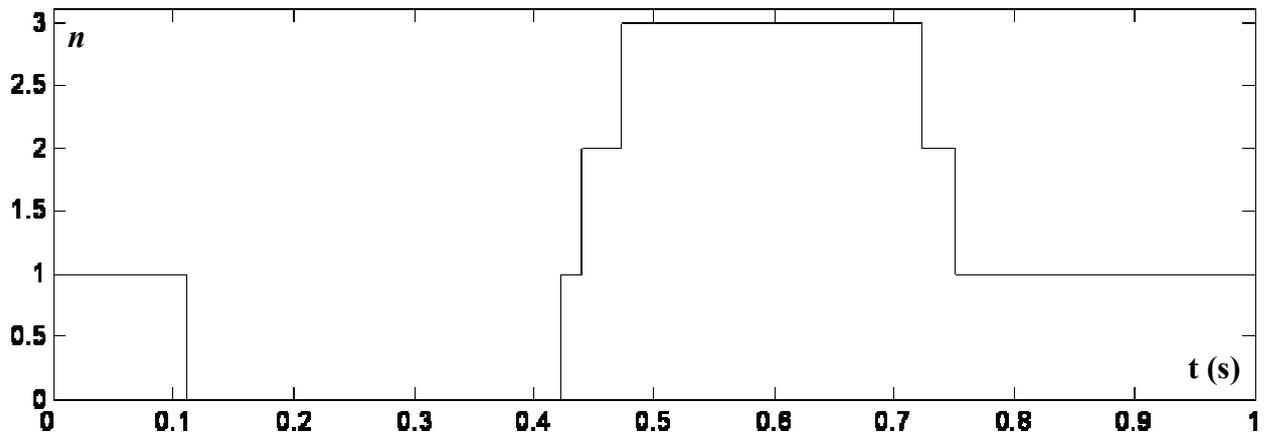


Figure V.10.d) n le nombre du banc du TSC utilisé.

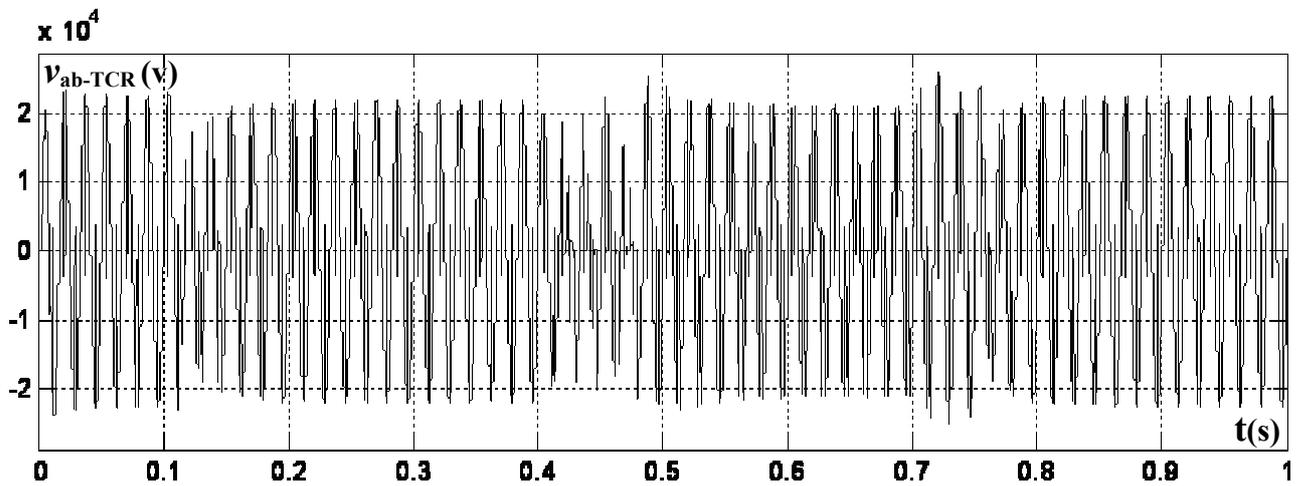
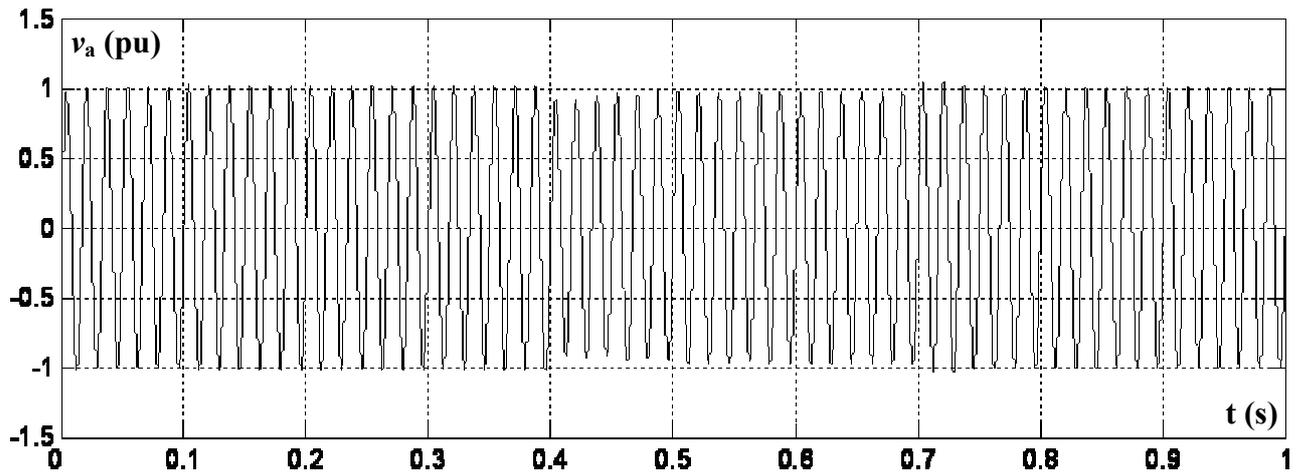
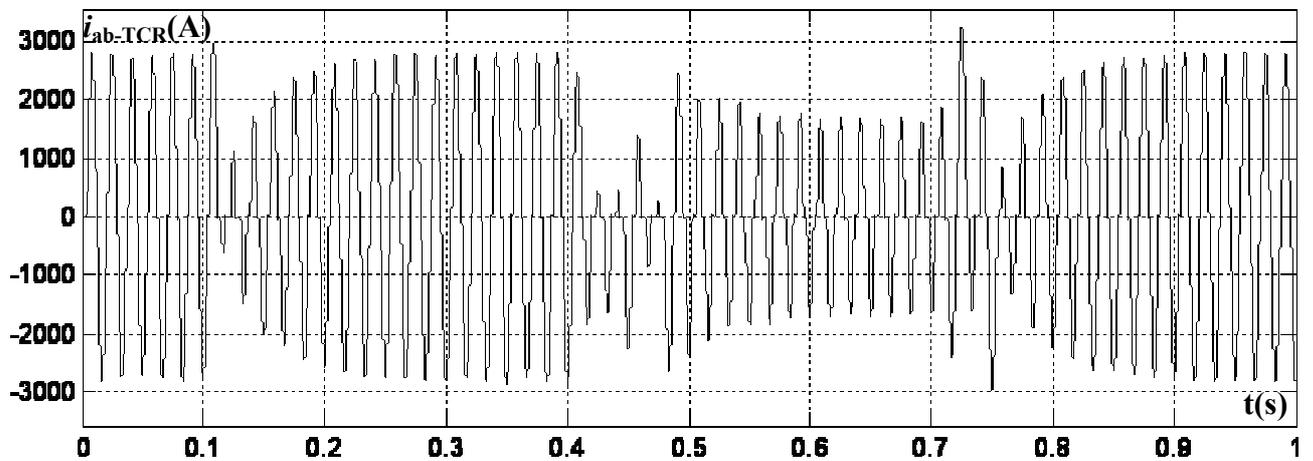
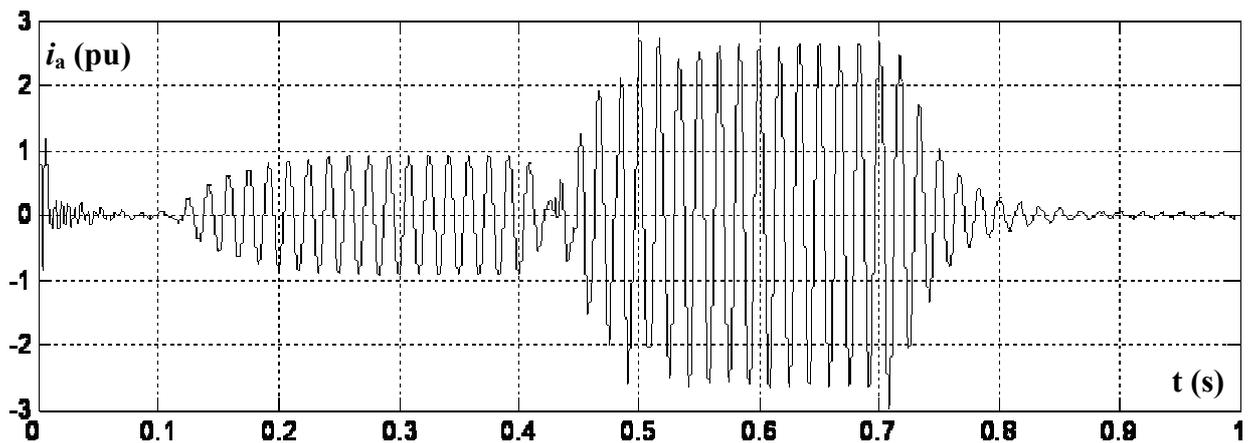


Figure V.10.e) Variation de la tension de phase v_{ab} de TCR.

Figure V.10.f) Variation de la tension de ligne v_a .Figure V.10.g) Variation du courant de phase i_{ab} de TCR.Figure V.10.h) Variation du courant de ligne i_a de TCR.

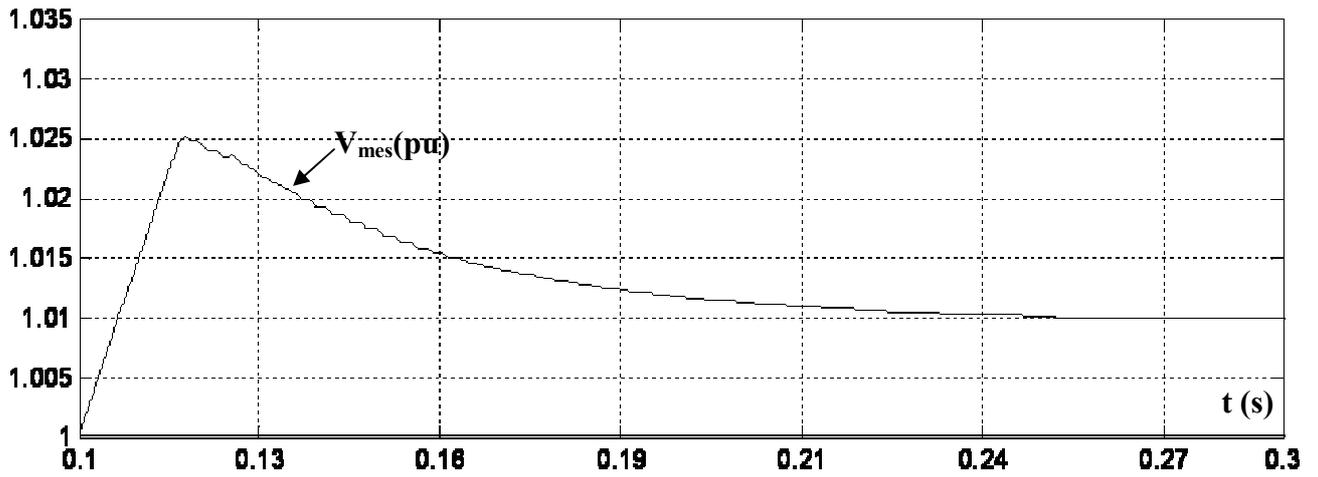


Figure V.10.i) Variation de la tension mesuré V_{mes} (pu).

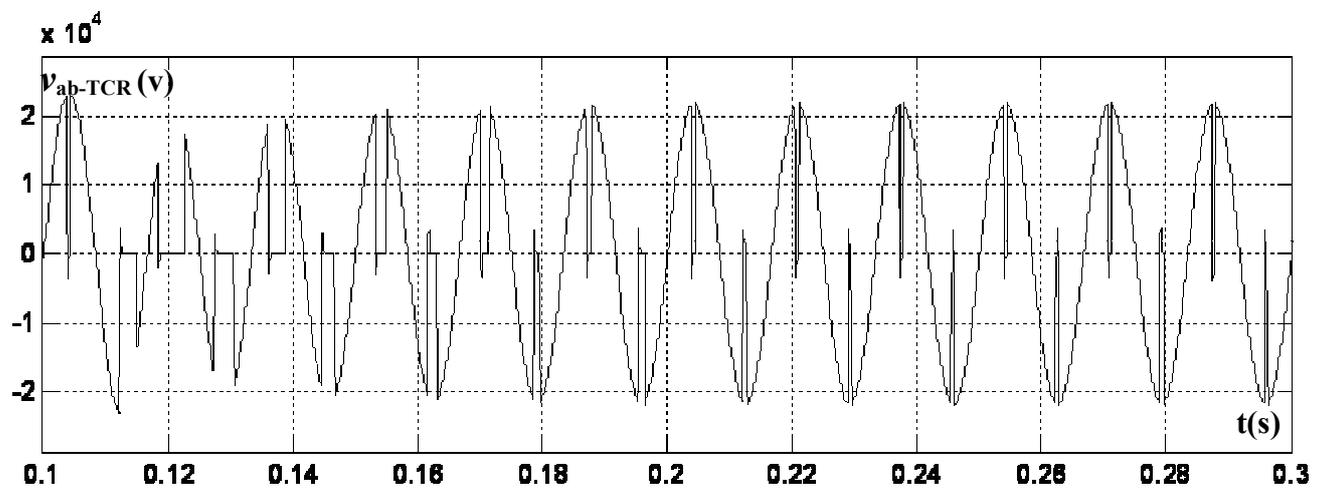


Figure V.10.j) Variation de la tension de phase v_{ab} de TCR.

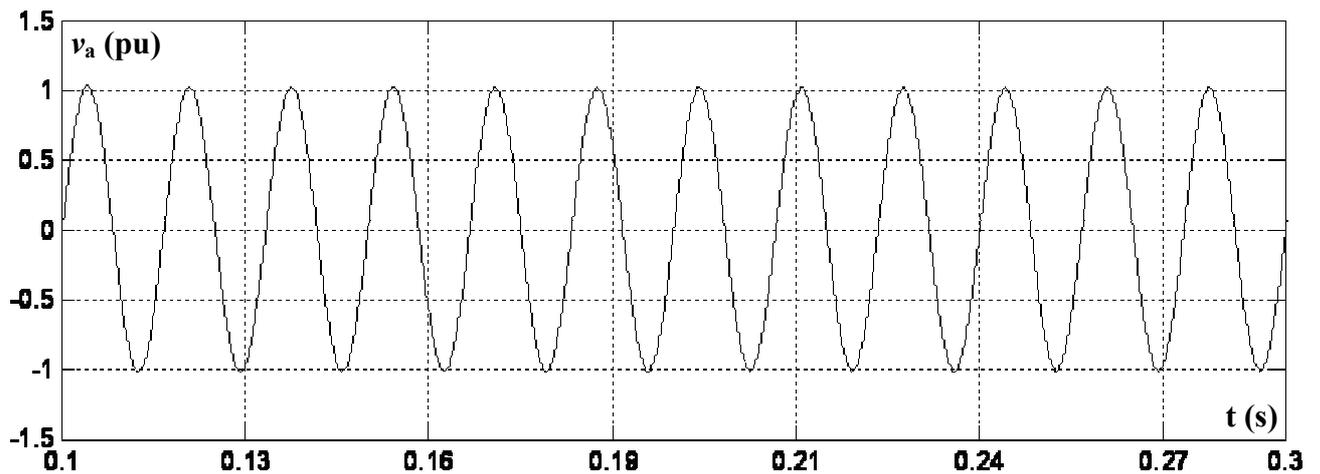


Figure V.10.k) Variation de la tension de ligne v_a .

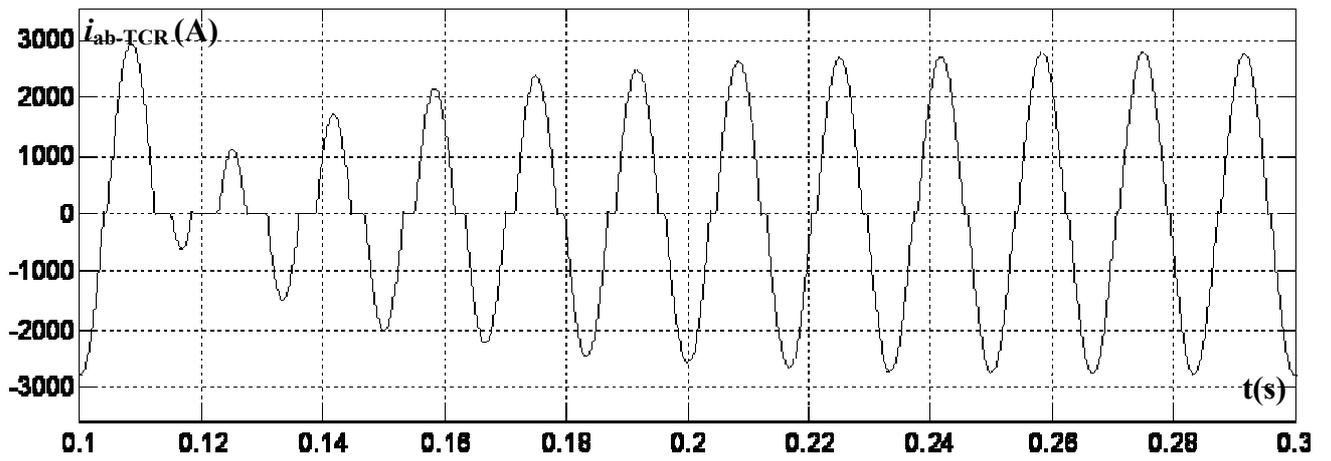


Figure V.10.l) Variation du courant de phase i_{ab-TCR} .

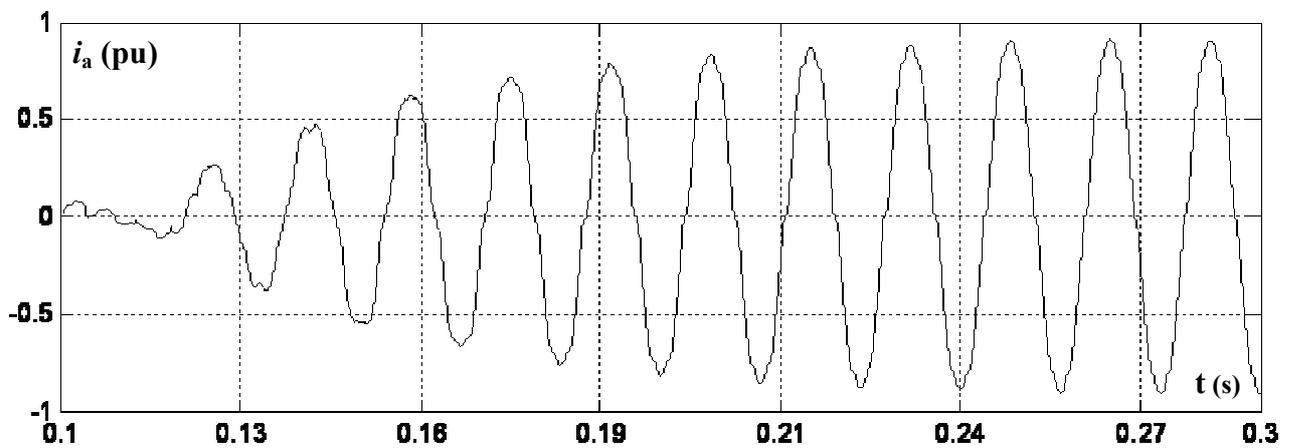


Figure V.10.m) Variation du courant de ligne i_a .

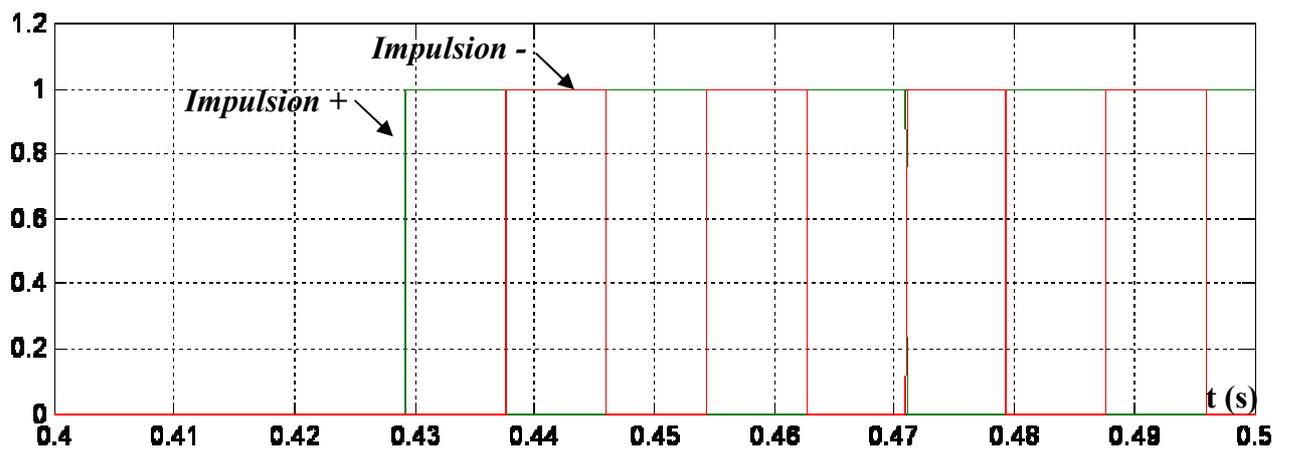


Figure V.10.n) impulsion de commutation du TSC.

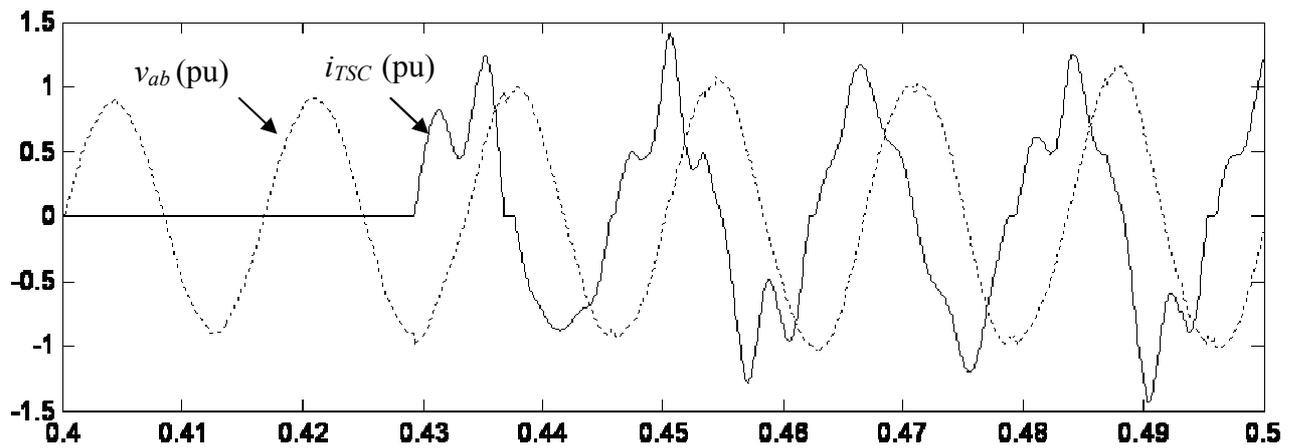


Figure V.10.o) Courant du TSC et tension de phase à l'instant de raccordement du premier banc du TSC.

V.3.f Discussion et analyse des résultats:

Initialement la tension de source est mise à 1.004 pu, résultant à une tension de 1.0 pu aux bornes du SVC quand ce dernier est hors service. Comme la tension de référence $V_{\text{réf}}$ est mise à 1.0 pu, le SVC est initialement flottant (zéro courant). Ce point de fonctionnement est obtenu avec TSC1 en service et TCR presque en pleine conduction ($\alpha = 96$ degrés). A $t=0.1s$, la tension est brusquement augmentée à 1.025pu. Le SVC réagit en absorbant la puissance réactive ($Q=-95$ MVAR) afin d'amener la tension à nouveau à 1.01pu. Les 95% du temps de stabilisation est approximativement 125ms. En ce point tous les TSCs sont hors service et le TCR est presque en pleine conduction ($\alpha = 94$ degrés). A $t = 0.4s$, la tension de source est brusquement diminuée à 0.93pu. Le SVC réagit en produisant 256 MVAR de puissance réactive, augmentant par conséquent la tension à 0.974pu. En ce point les trois TSCs sont en service et le TCR absorbe approximativement 40% de la puissance réactive nominale ($\alpha = 120$ degrés). On observe sur le trace de la figure V.10.c, comment les TSC sont séquentiellement commutés en marche et en arrêt. Chaque fois un TSC est amorcé, l'angle α du TCR change brusquement de 180 degrés (aucune conduction) à 90 degrés (pleine conduction). Enfin, à $t=0.7s$, la tension au jeu de barre est augmenté à 1.0 pu et la puissance réactive du SVC est diminuée à zéro.

V.4 Le SVC avec la topologie gradateur MLI:

On prend l'exemple précédent mais avec l'utilisation de la topologie gradateur MLI dans le circuit du TCR du SVC au lieu du gradateur à commutation naturelle comme le montre la figure V.11 suivante :

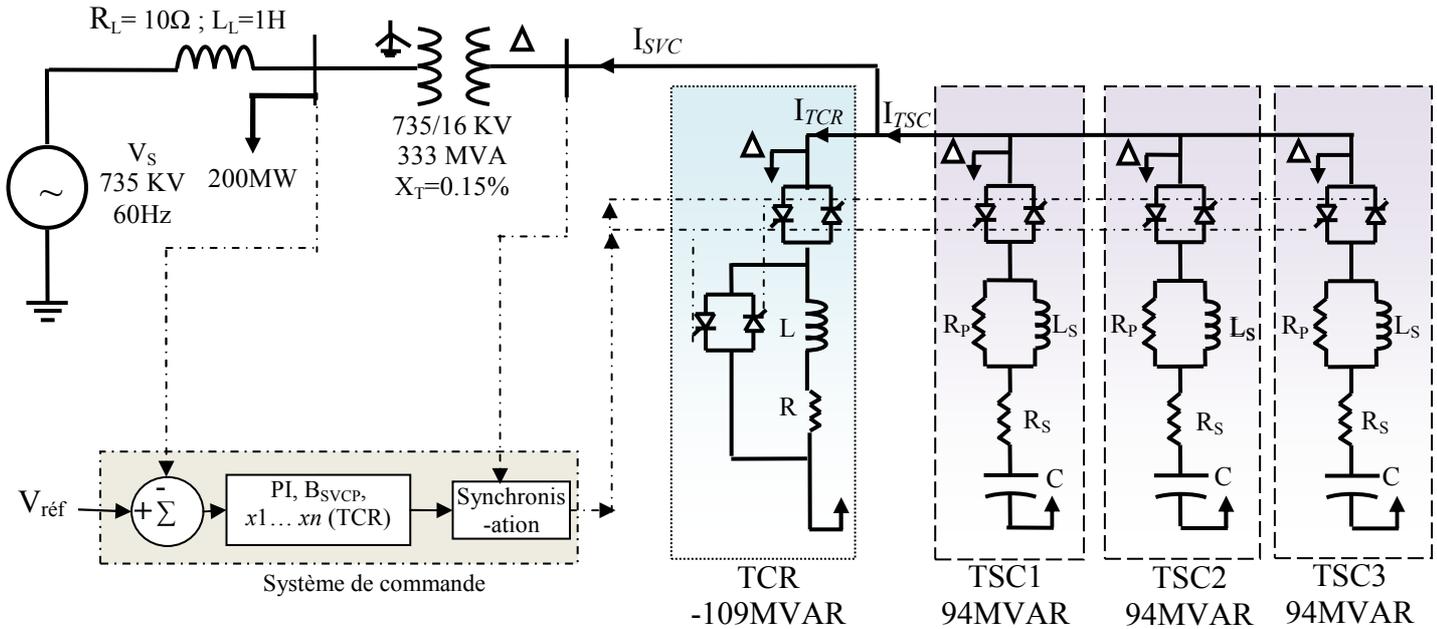


Figure V.11 système de puissance connecté un SVC à base d'un gradateur MLI.

V.4.a Système de commande:

Le circuit de commande de la susceptance du TCR du SVC utilisant la topologie gradateur MLI avec le système de puissance est montrée dans la figure V.11:

Génération du signal MLI du TCR:

Le circuit de réglage de la tension du SVC à base du gradateur MLI est le même que le gradateur classique. Par contre, le circuit de génération des impulsions du SVC dans le cas du gradateur MLI surtout pour le TCR diffère par rapport au gradateur classique. La relation entre l'angle d'amorçage et la susceptance est linéaire dans le premier cas (figure V.12), mais elle est non linéaire dans le deuxième cas (figure V.9).

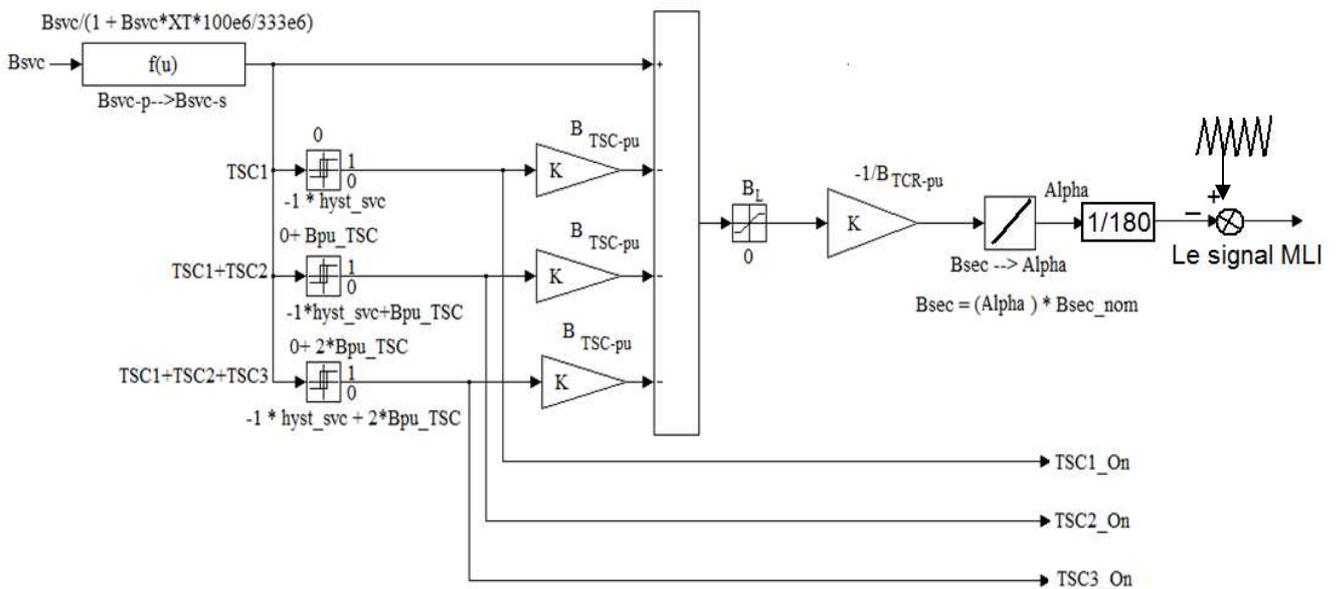


Figure V.12 Circuit de génération des impulsions du SVC.

Circuit de synchronisation des impulsions:

Le principe du circuit de synchronisation des impulsions est le même que le cas précédent avec gradateur classique.

V.4.b Cas de (M=3):

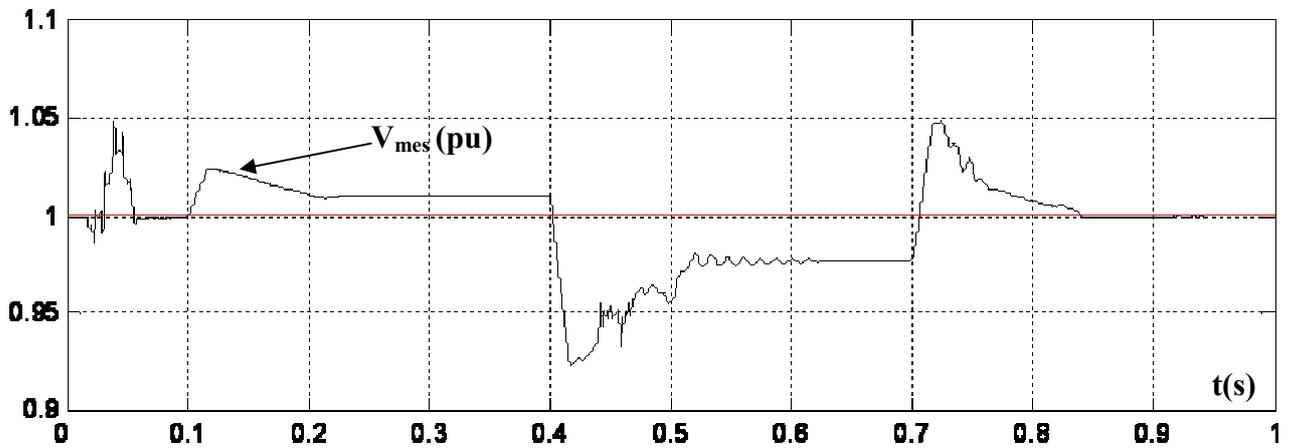


Figure V.13.a) Variation de la tension mesuré V_{mes} (pu).

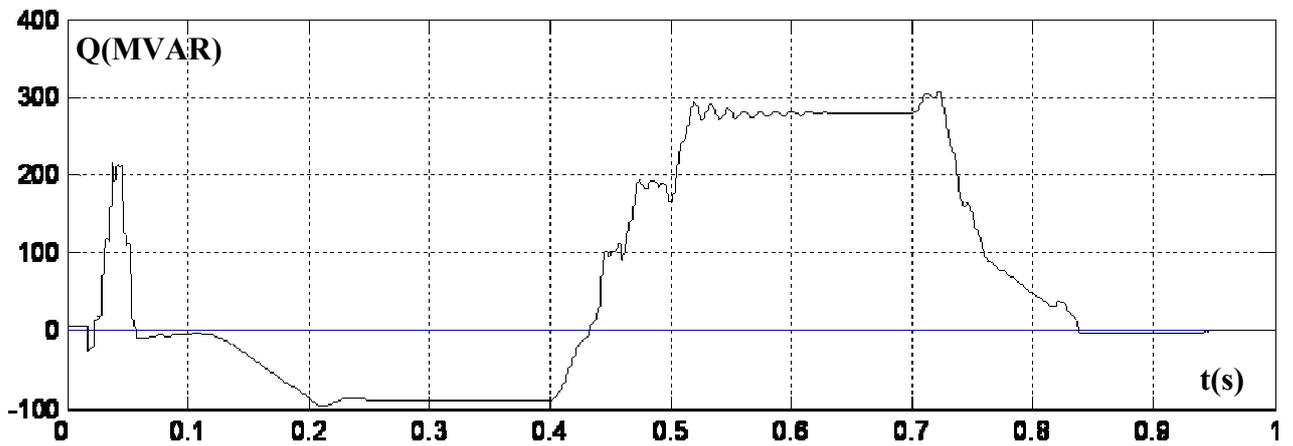


Figure V.13.b) Variation de la puissance réactive.

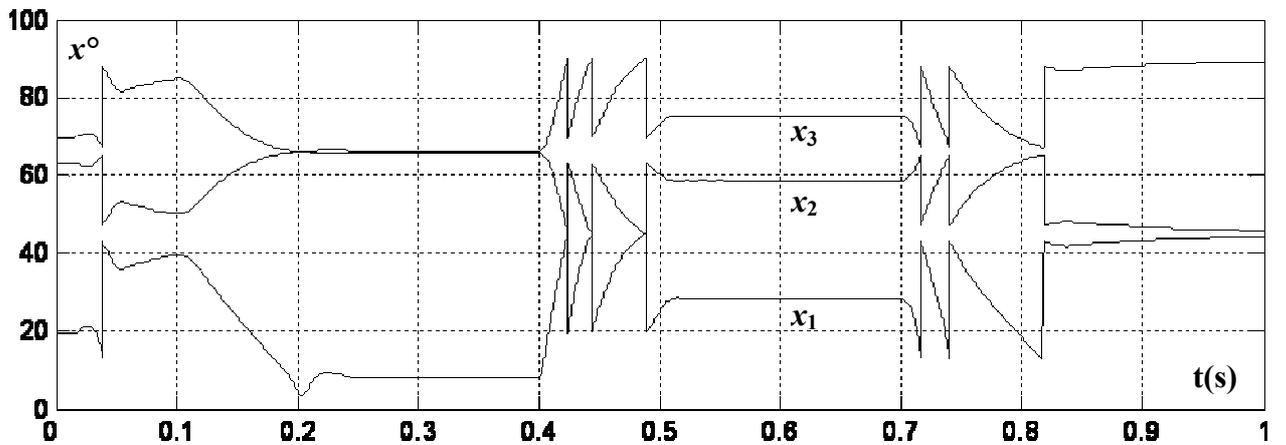


Figure V.13.c) Variation des angles de commutation du TCR.

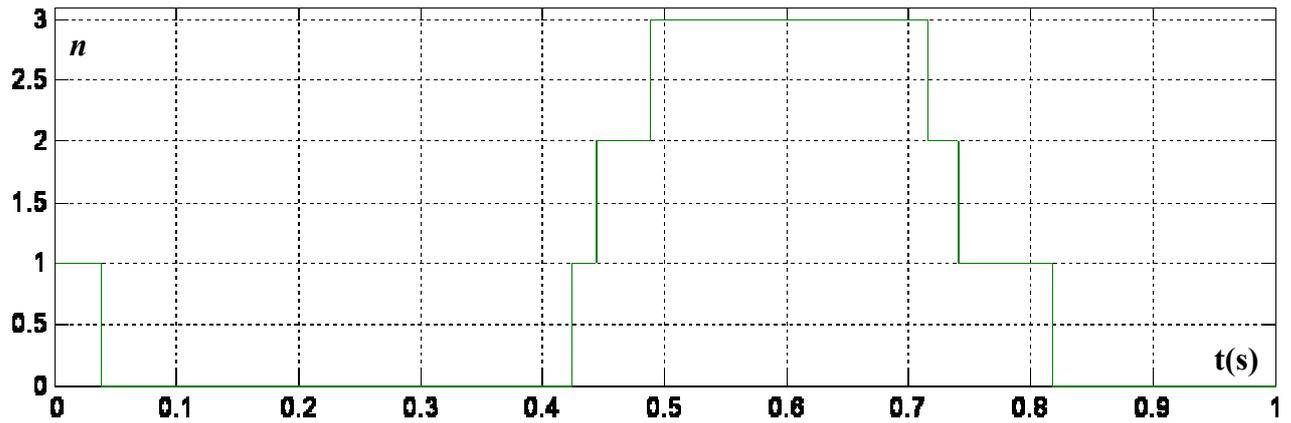


Figure V.13.d) n le nombre des bancs du TSC utilisé.

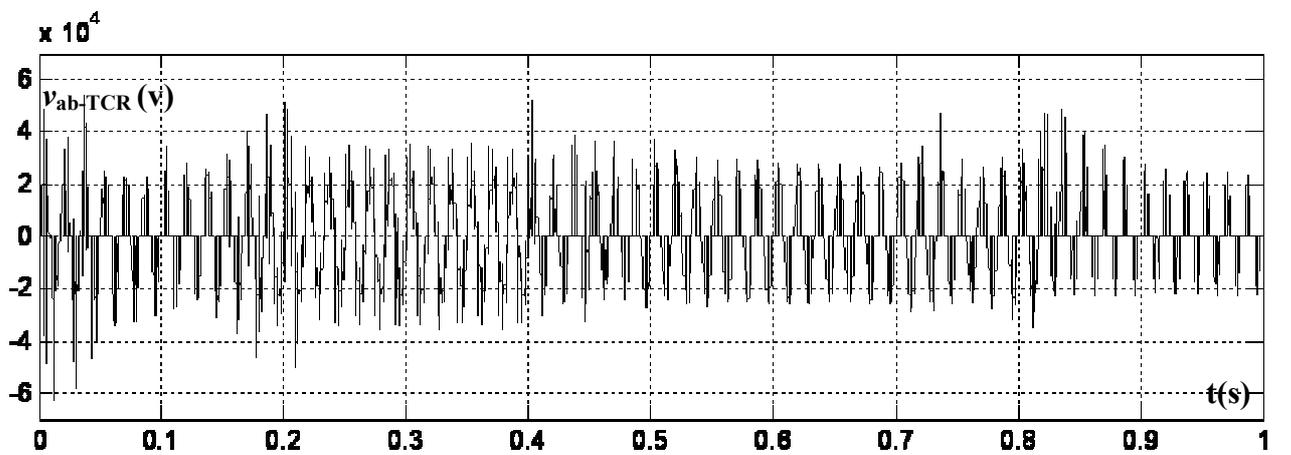


Figure V.13.e) Variation de la tension de phase v_{ab} de TCR.

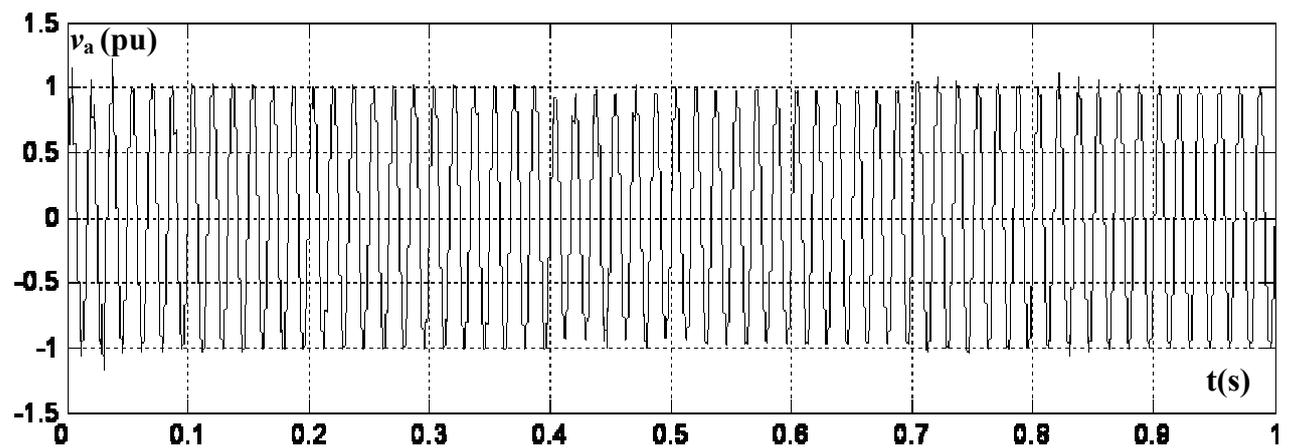


Figure V.13.f) Variation de la tension de ligne v_a .

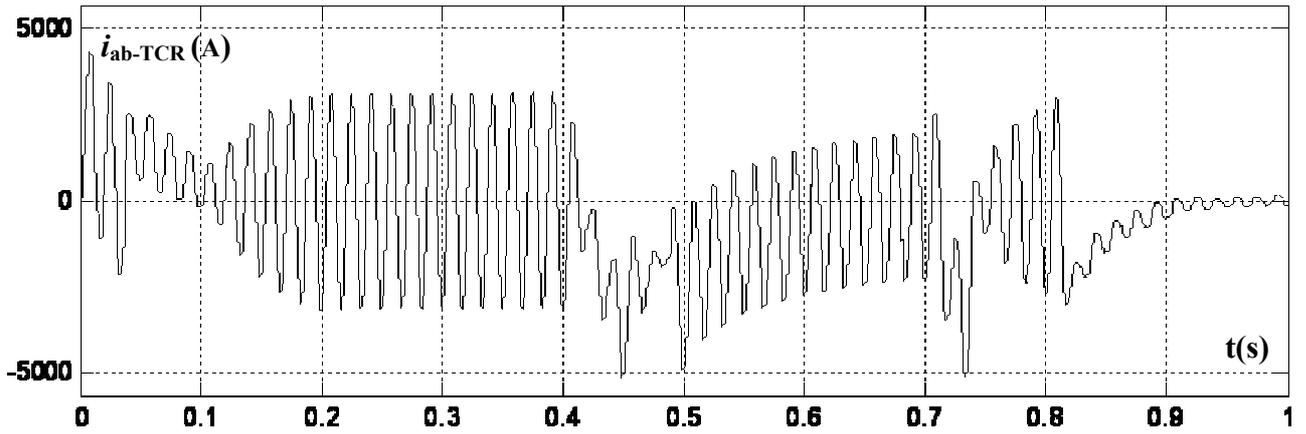


Figure V.13.g) Variation du courant de phase i_{ab} de TCR.

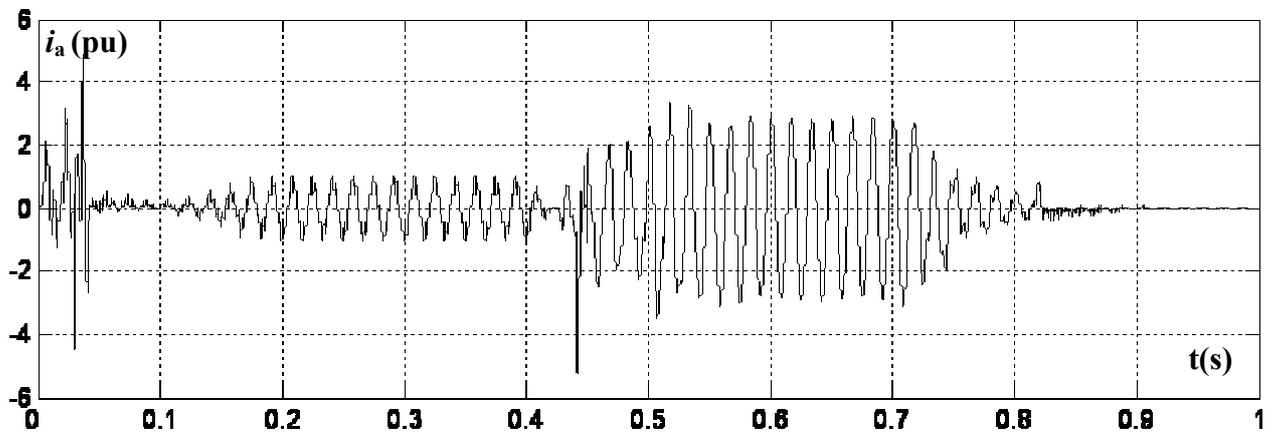


Figure V.13.h) Variation du courant de ligne i_a .

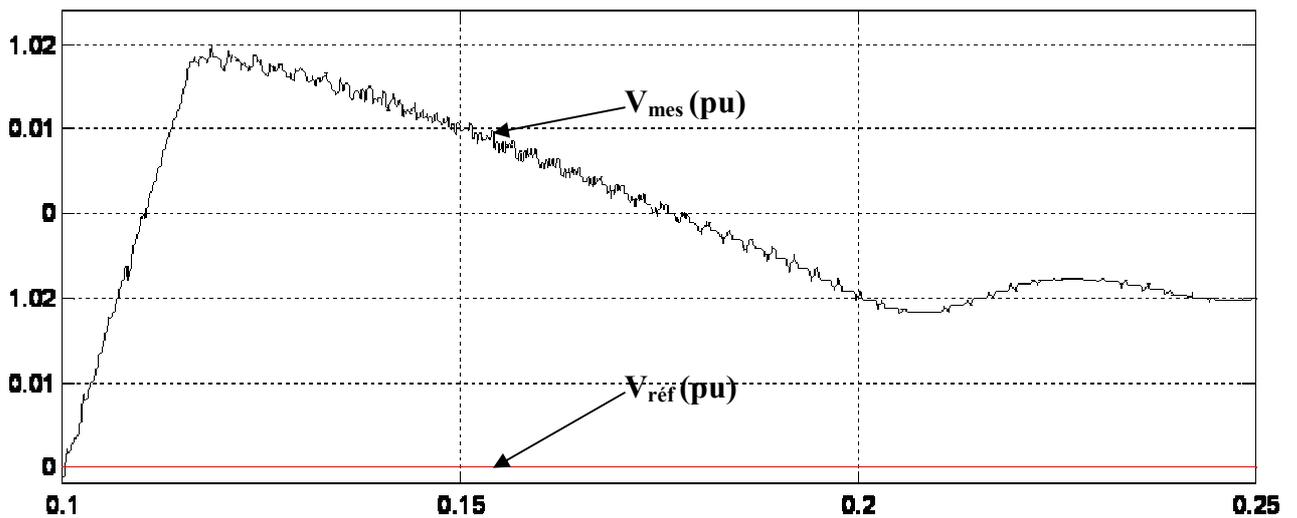
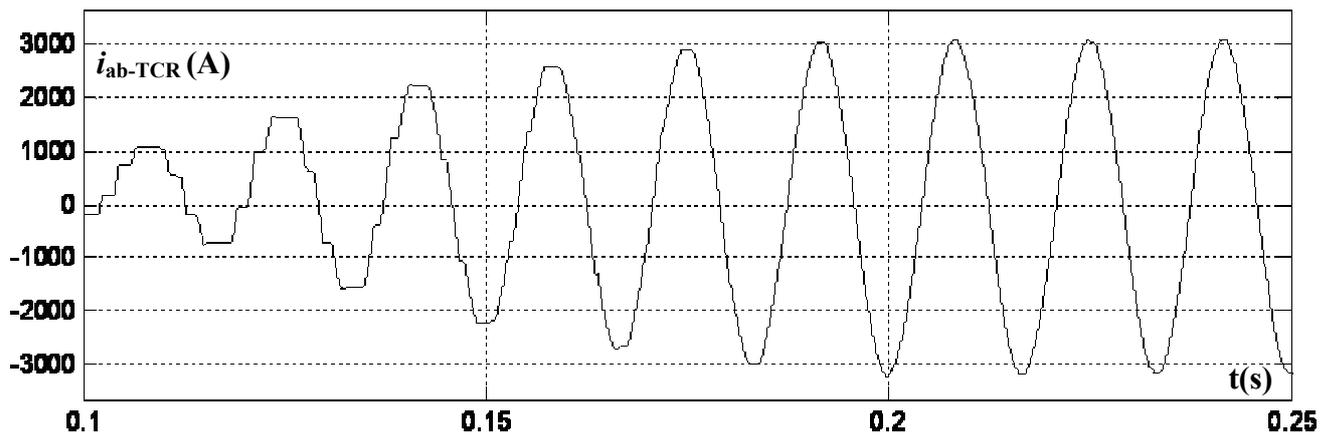
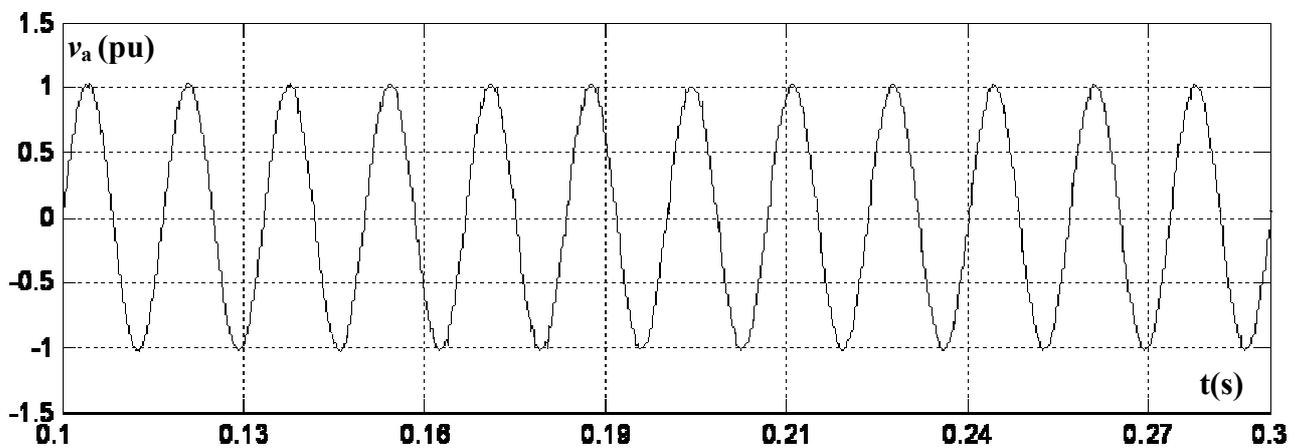
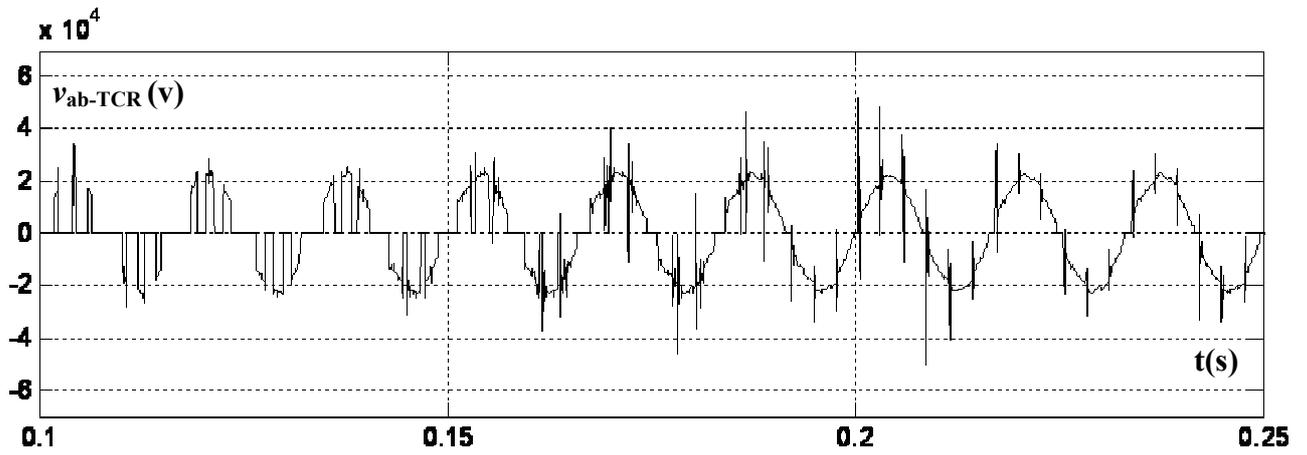


Figure V.13.i) Variation de la tension mesurée V_{mes} (pu).



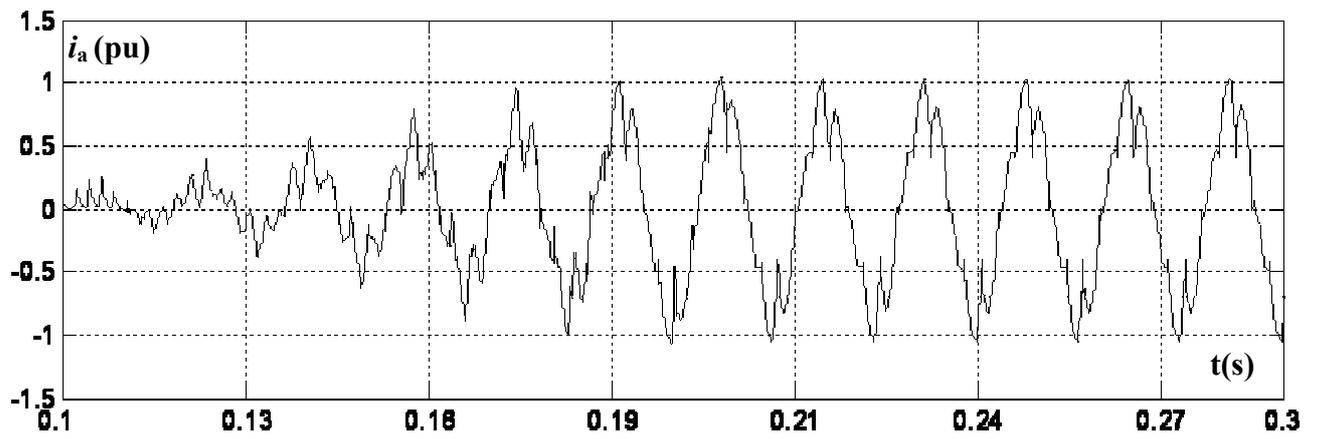


Figure V.13.m) Variation du courant de ligne i_a .

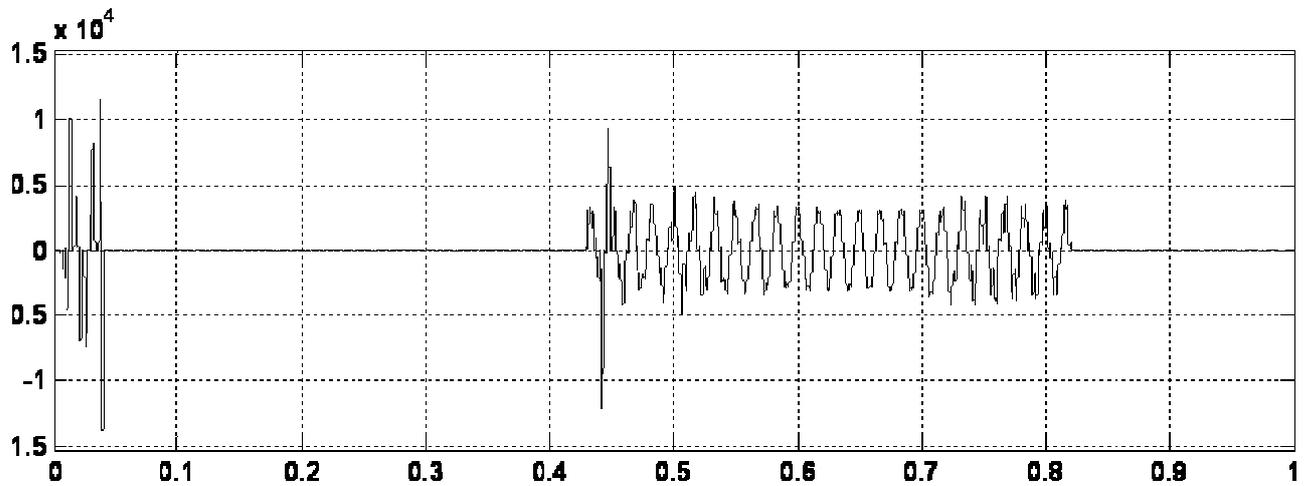


Figure V.13.n) Courant du TSC de phase à l'instant de raccordement du premier banc du TSC.

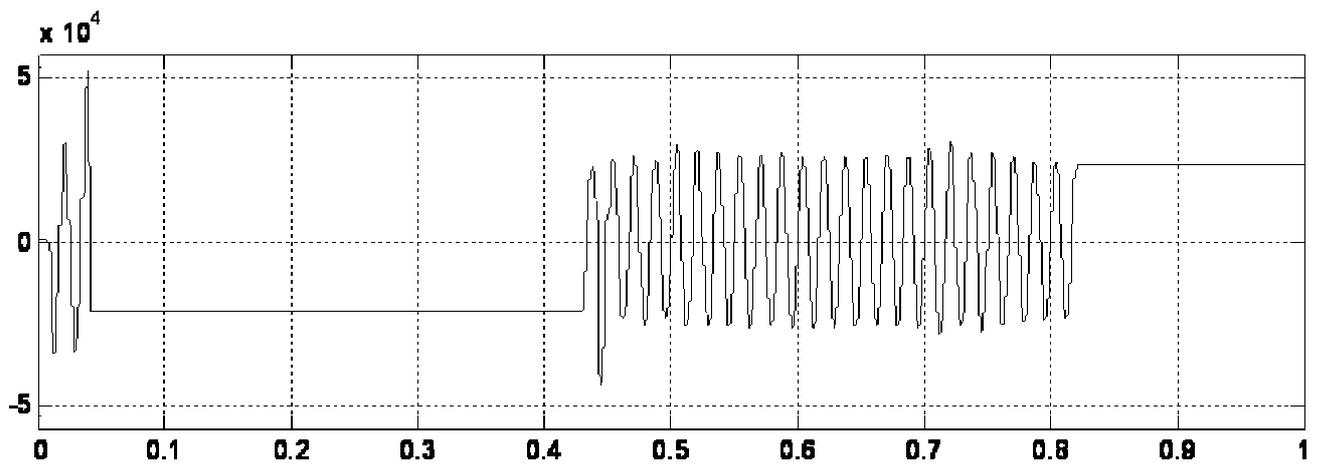


Figure V.13.o) Tension aux bornes condensateur à l'instant de raccordement du premier banc du TSC.

V.4.c Cas de (M=5):

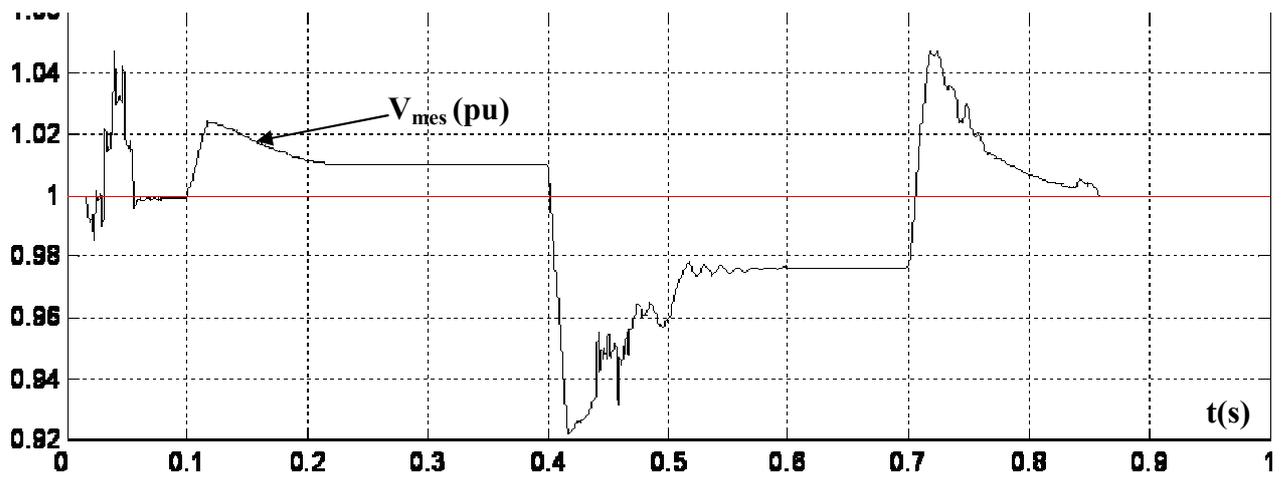


Figure V.14.a) Variation de la tension mesuré V_{mes} (pu).

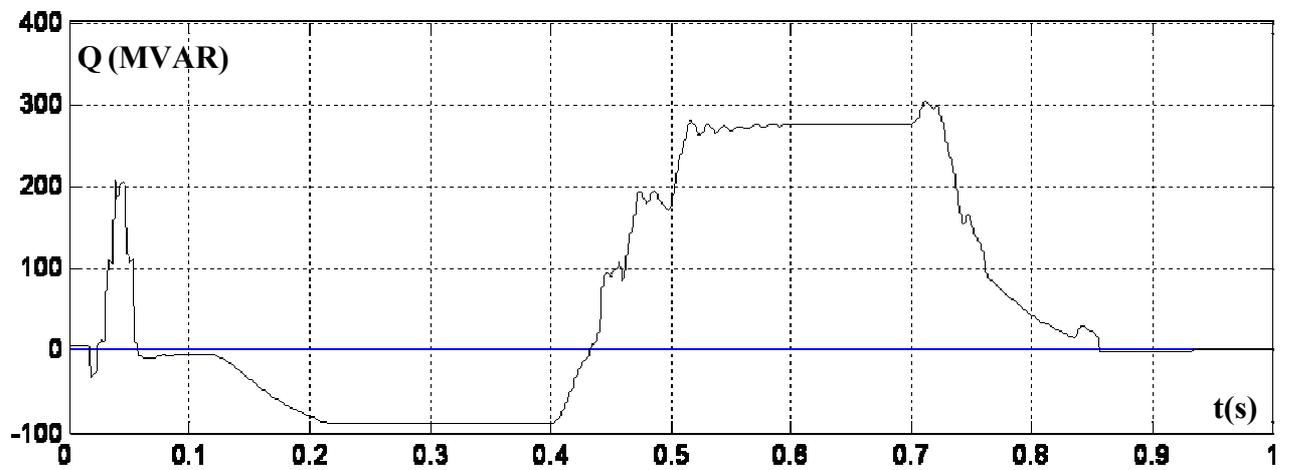


Figure V.14.b) Variation de la puissance réactive absorbé au généré par le SVC.

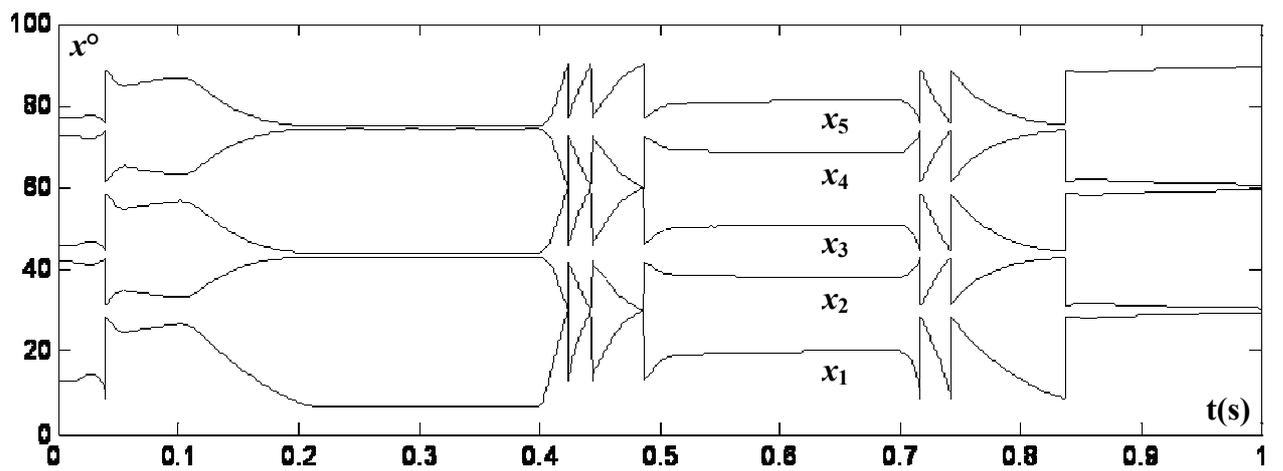


Figure V.14.c) Variation des angles de commutation du TCR.

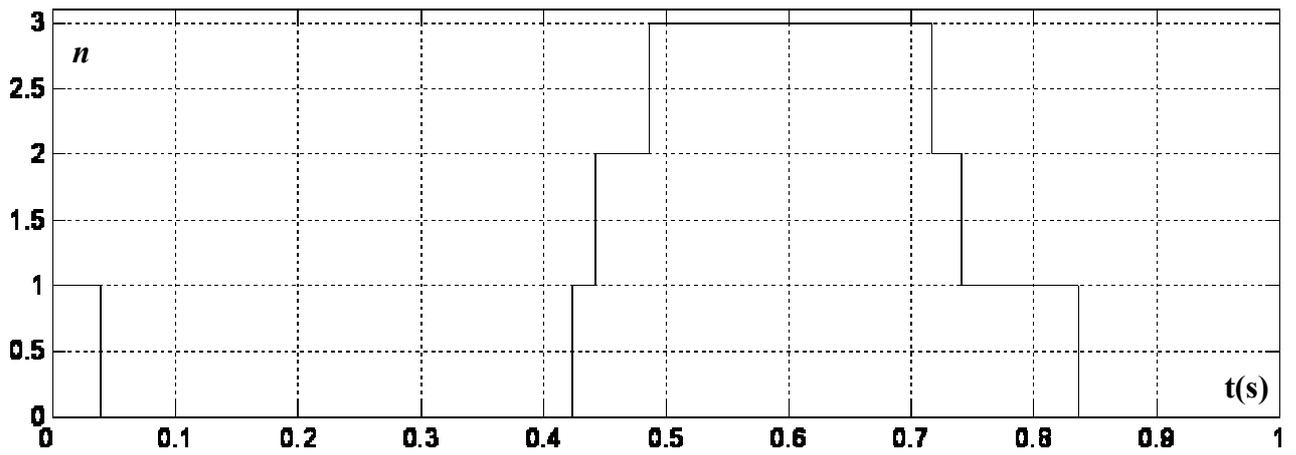


Figure V.14.d) n le nombre du banc du TSC utilisé.

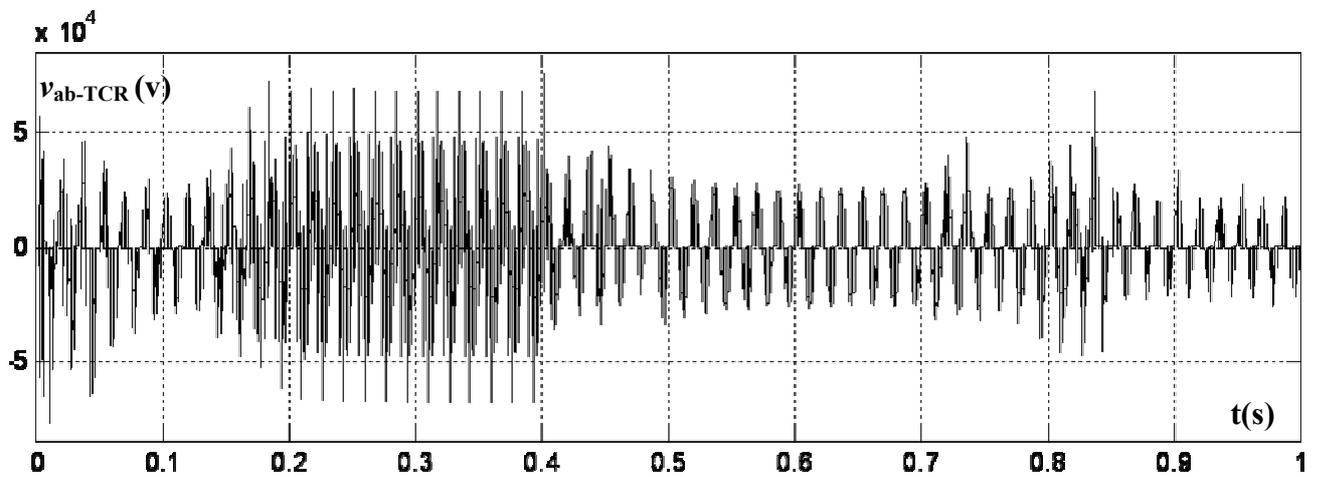


Figure V.14.e) Variation de la tension de phase v_{ab} de TCR.

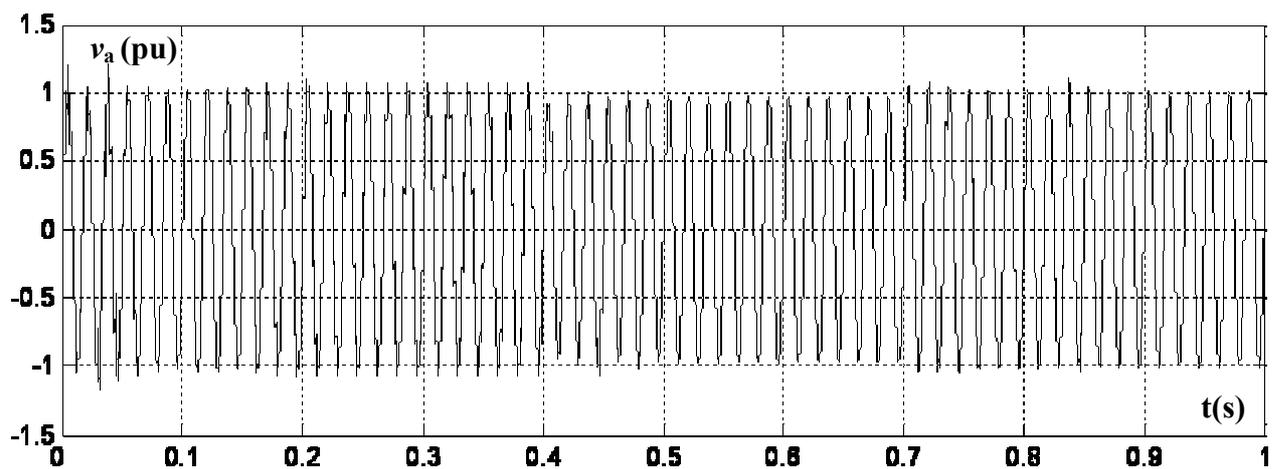


Figure V.14.f) Variation de la tension de ligne v_a .

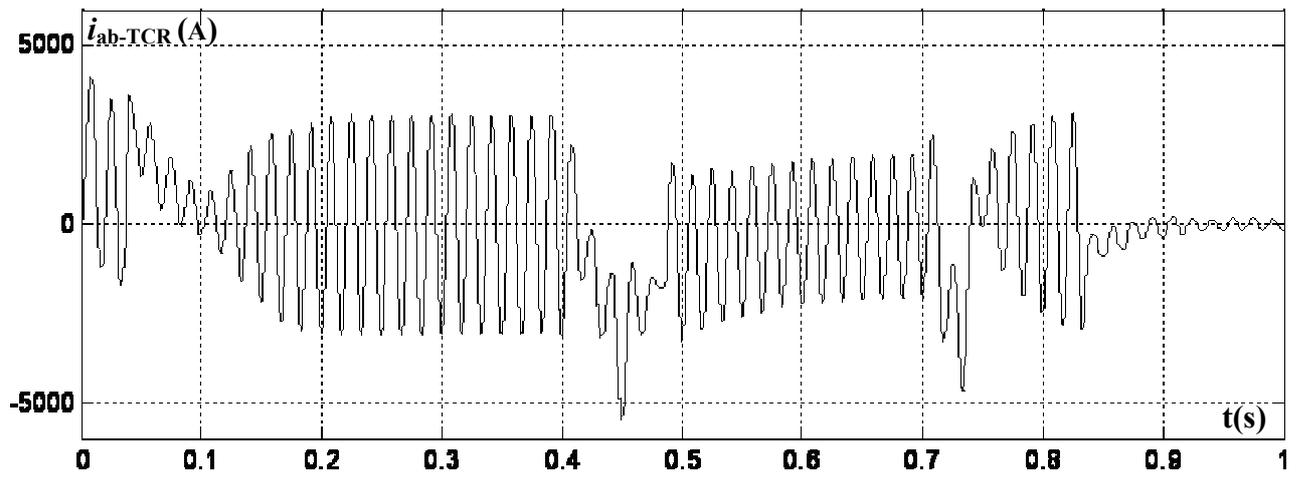


Figure V.14.g) Variation du courant de phase i_{ab} de TCR.

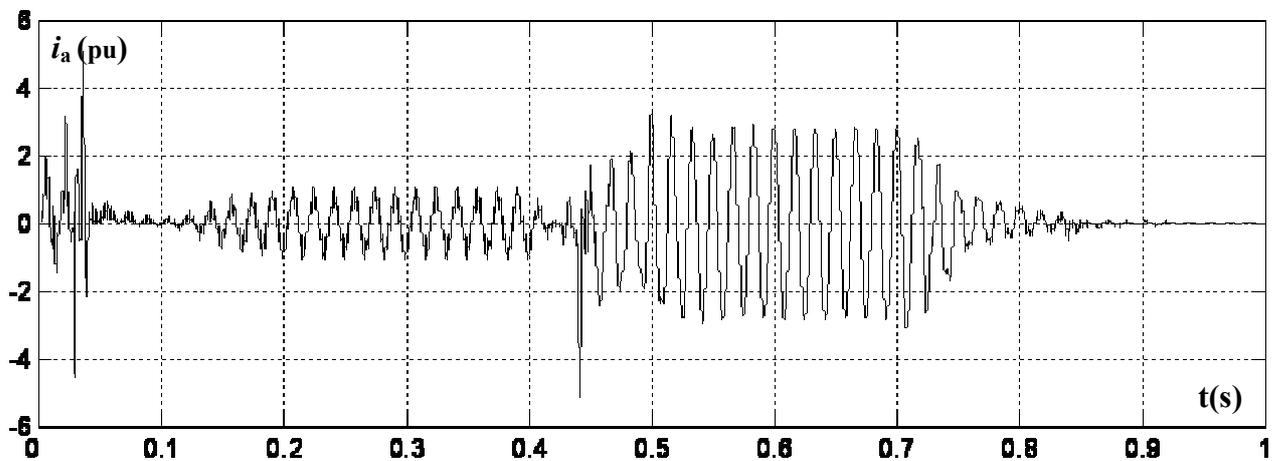


Figure V.14.h) Variation du courant de ligne i_a .

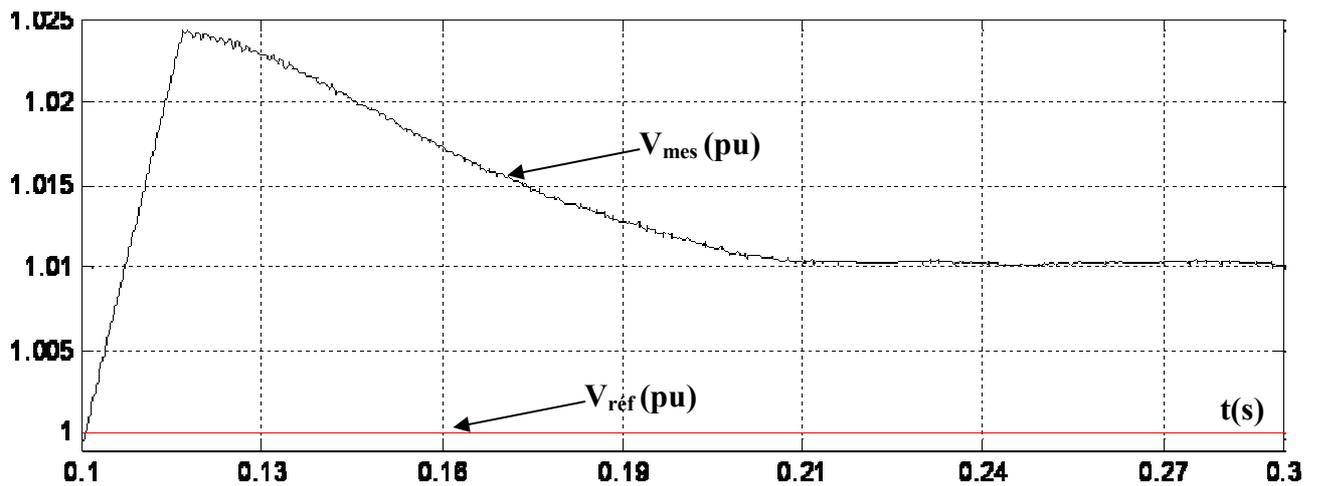


Figure V.14.i) Variation de la tension mesuré V_{mes} (pu).

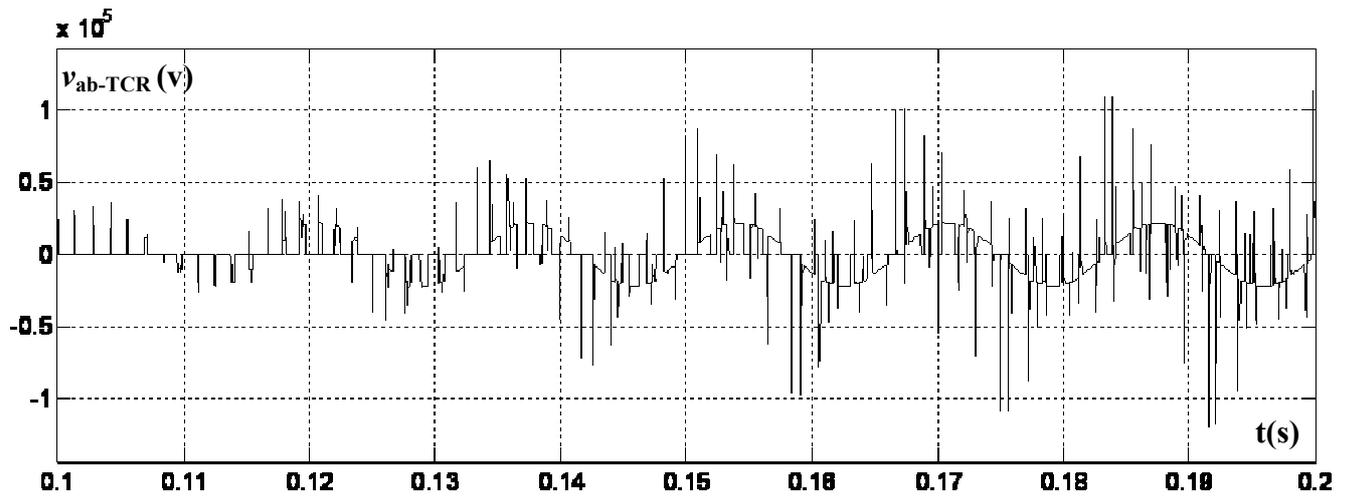


Figure V.14.j) Variation de la tension de phase v_{ab} de TCR.

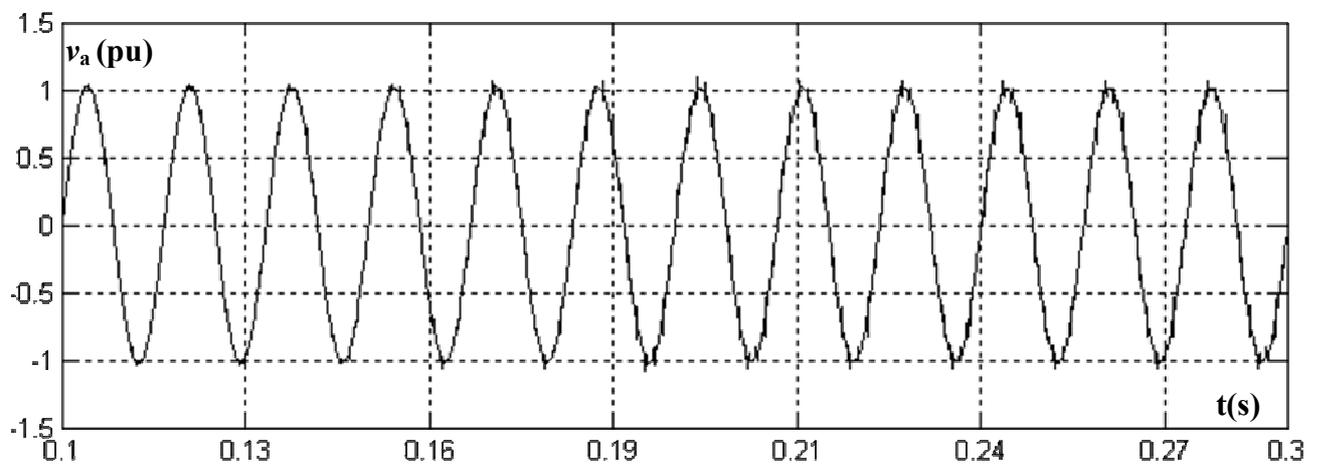


Figure V.14.k) Variation de la tension de ligne v_a .

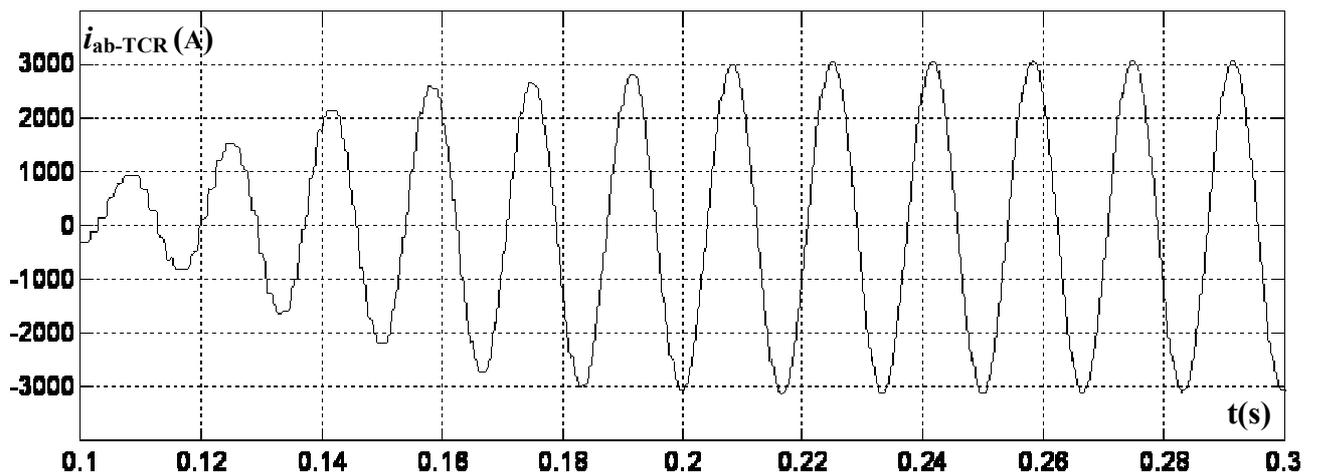
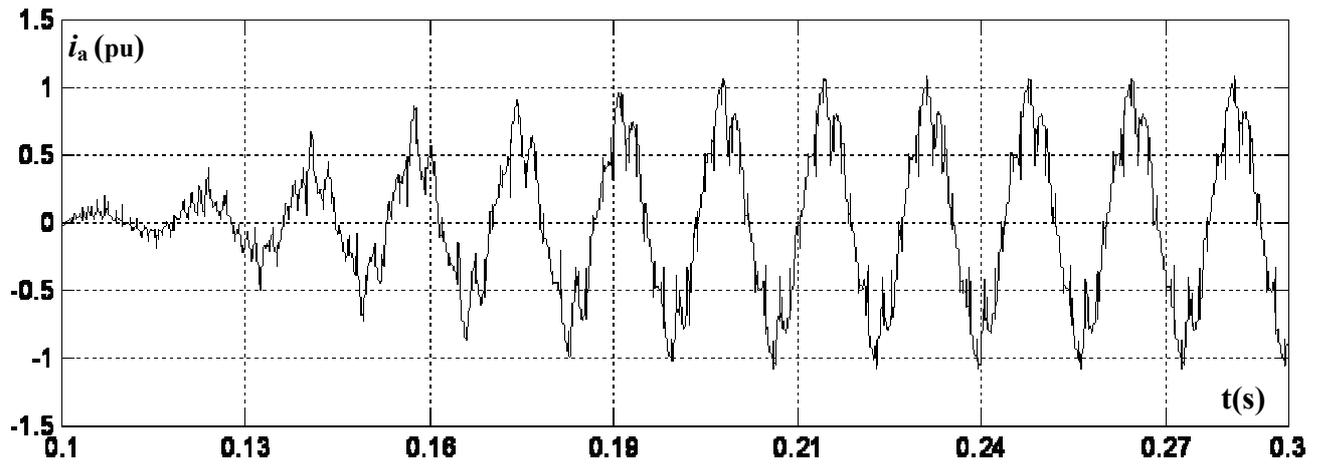


Figure V.14.l) Variation du courant de phase i_{ab} de TCR durant.

Figure V.14.m) Variation du courant de ligne i_a .

V.4.d Cas de M=5 (la méthode implicite(IV.5.d)):

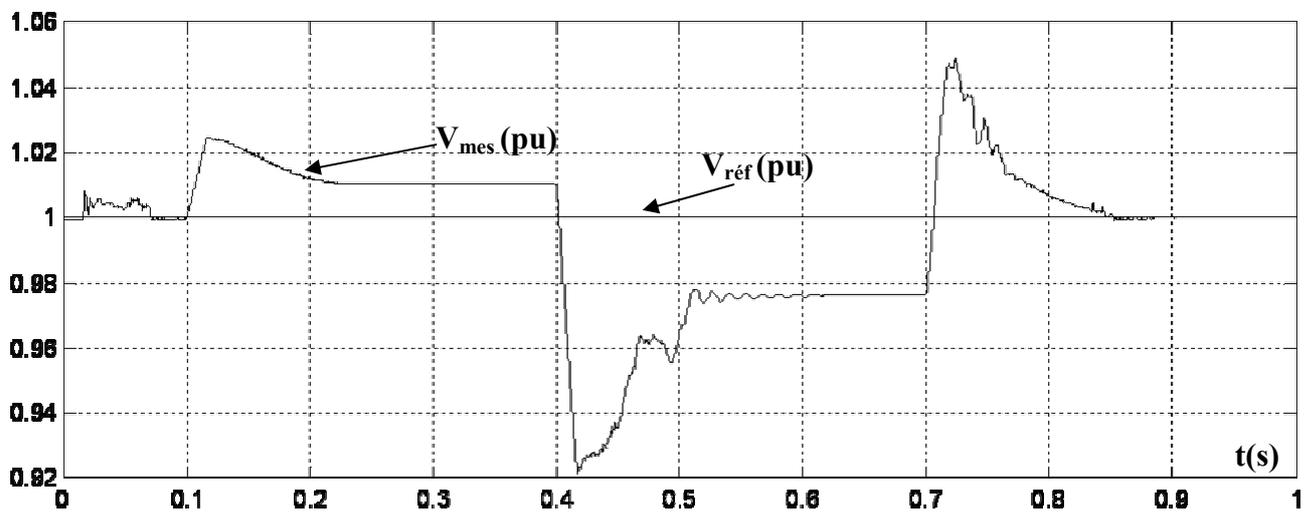
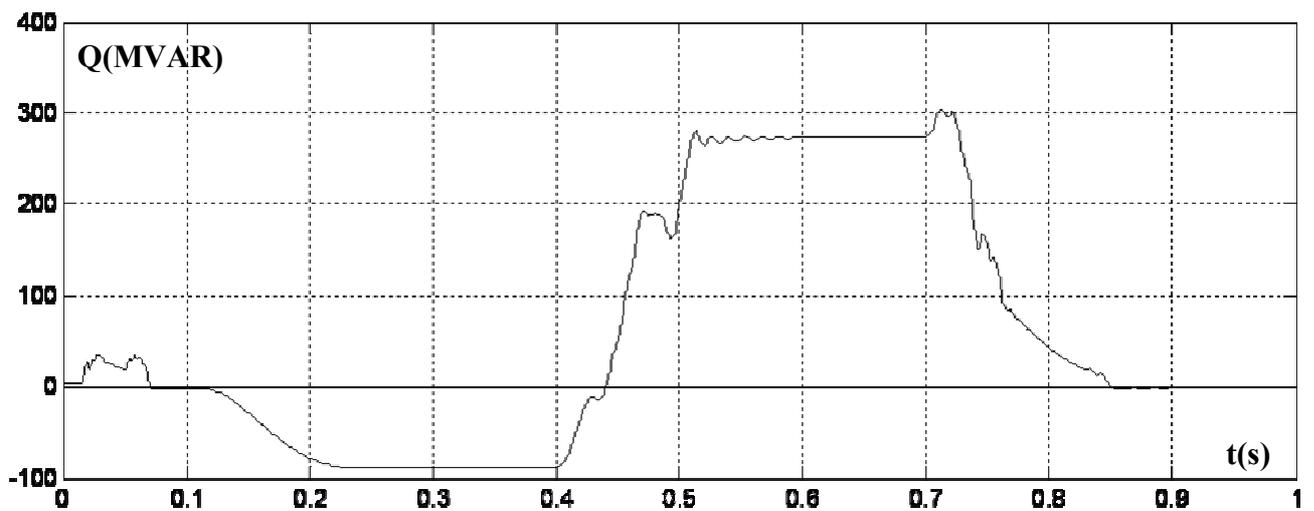
Figure V.15.a) Variation de la tension mesurée V_{mes} (pu).

Figure V.15.b) Variation de la puissance réactive.

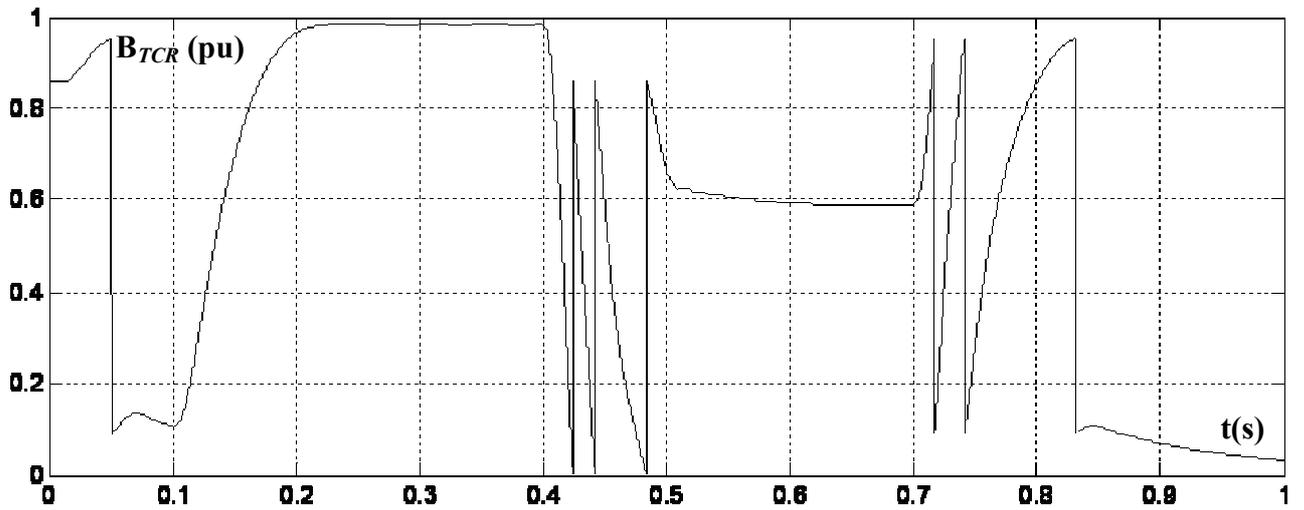
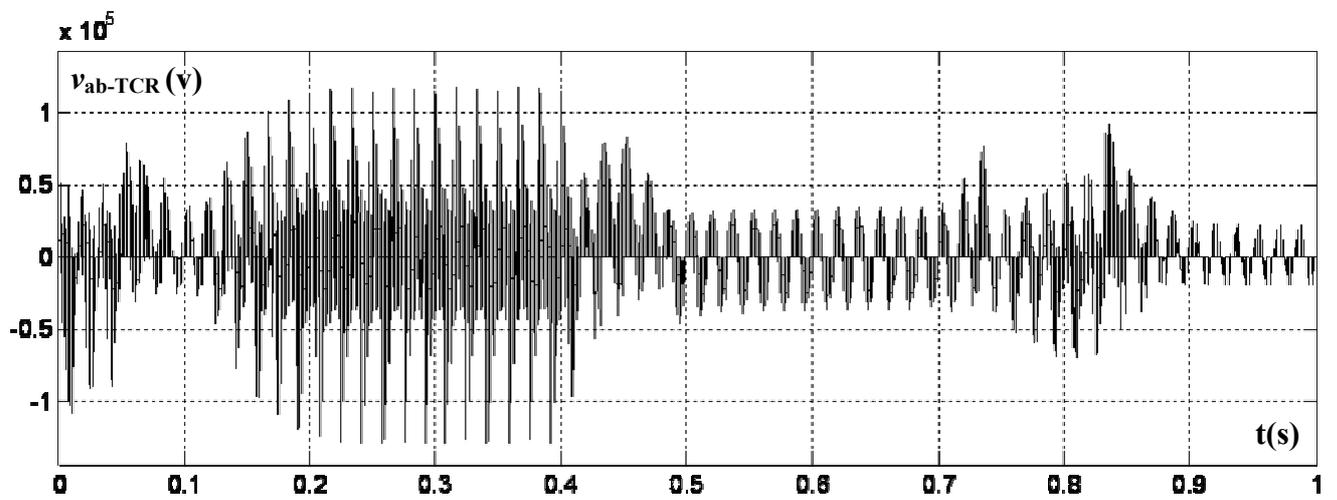
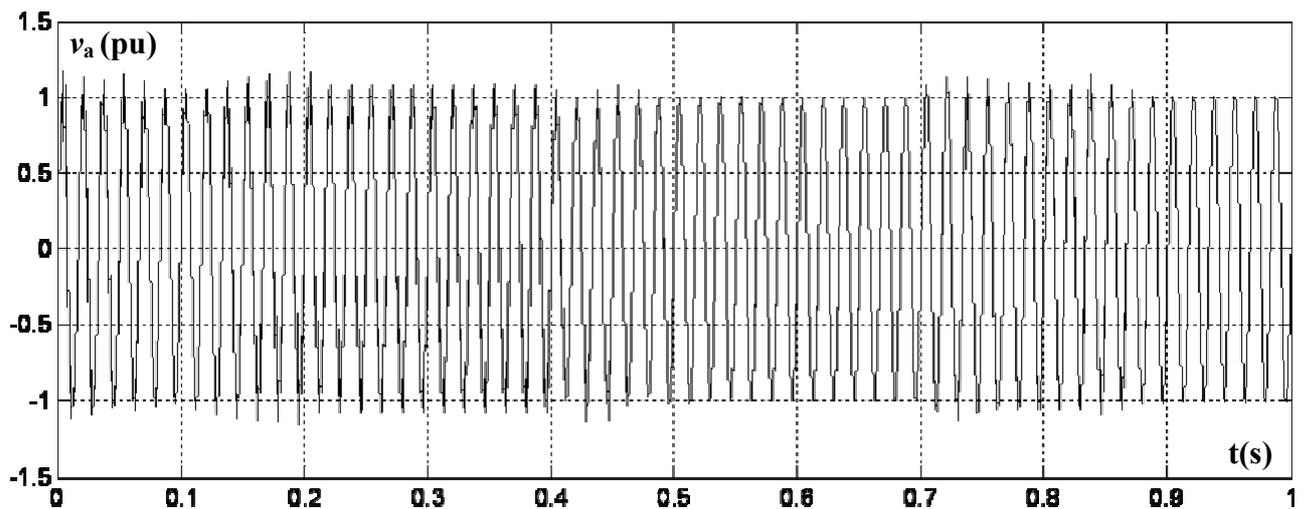


Figure V.15.c) Variation des angles de commutation du TCR.

Figure V.15.e) Variation de la tension de phase v_{ab} de TCR.Figure V.15.f) Variation de la tension de ligne v_a .

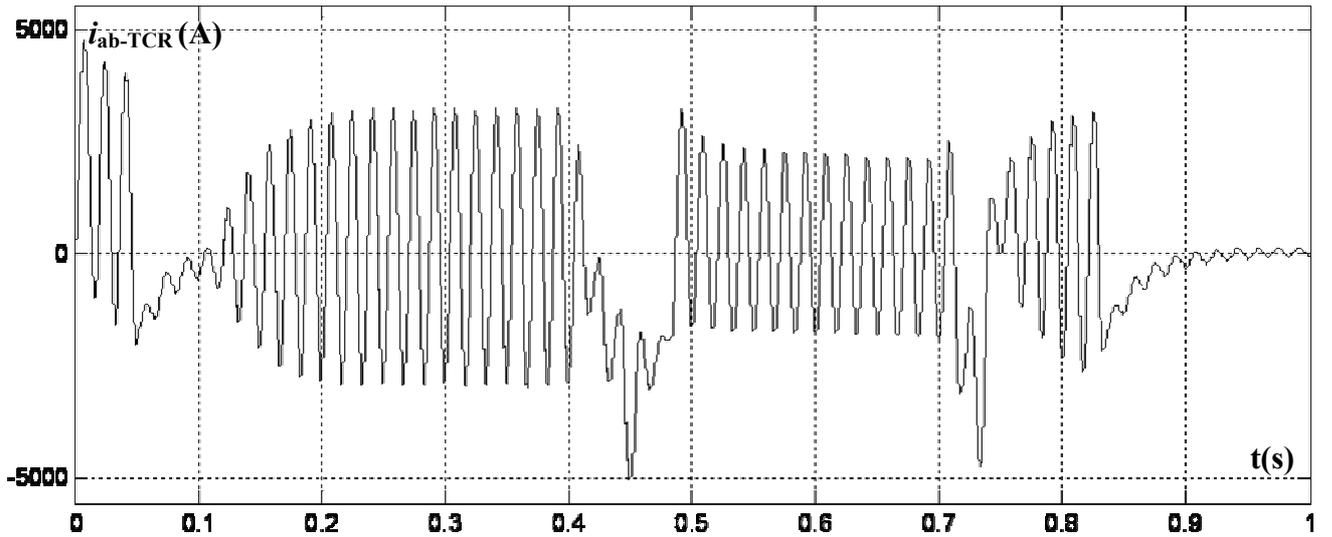


Figure V.15.g) Variation du courant de phase i_{ab} de TCR.

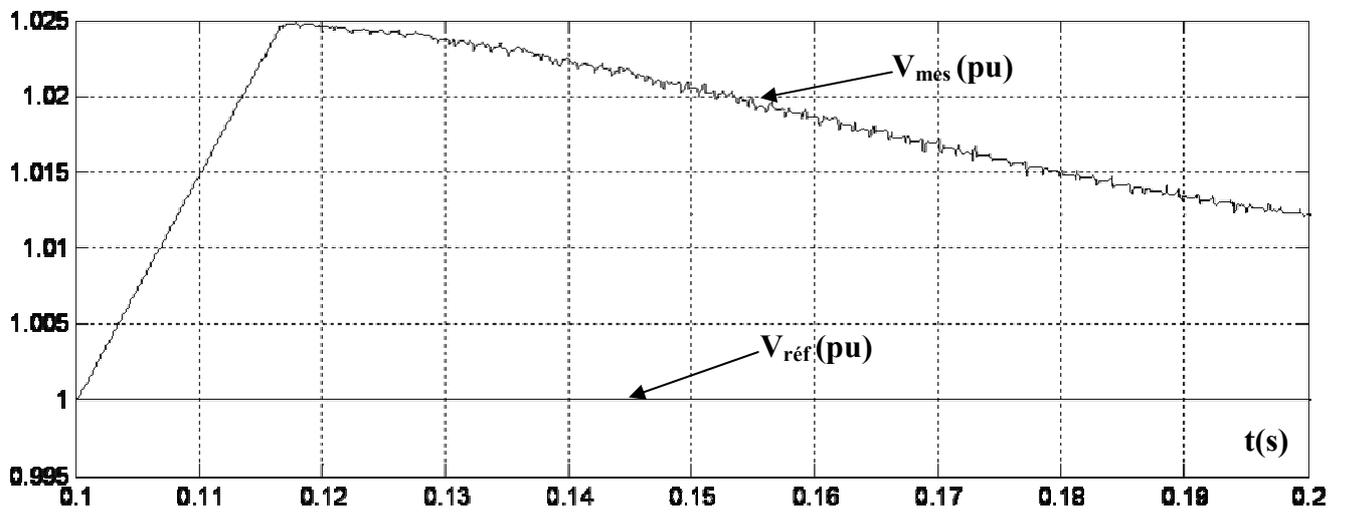


Figure V.15.h) Variation de la tension mesuré V_{mes} (pu).

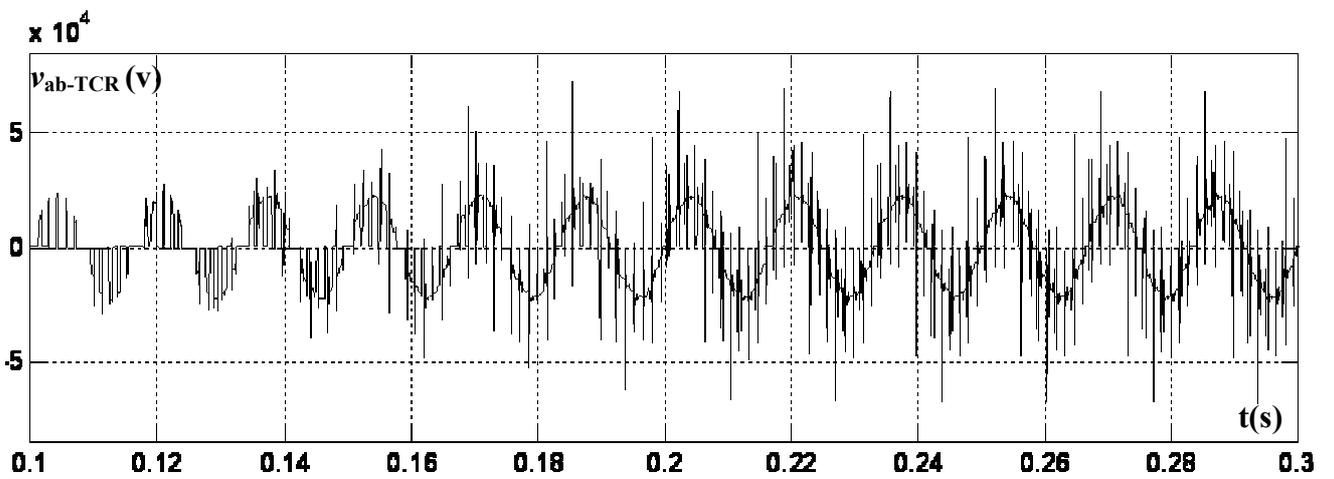


Figure V.15.i) Variation de la tension de phase v_{ab} de TCR.

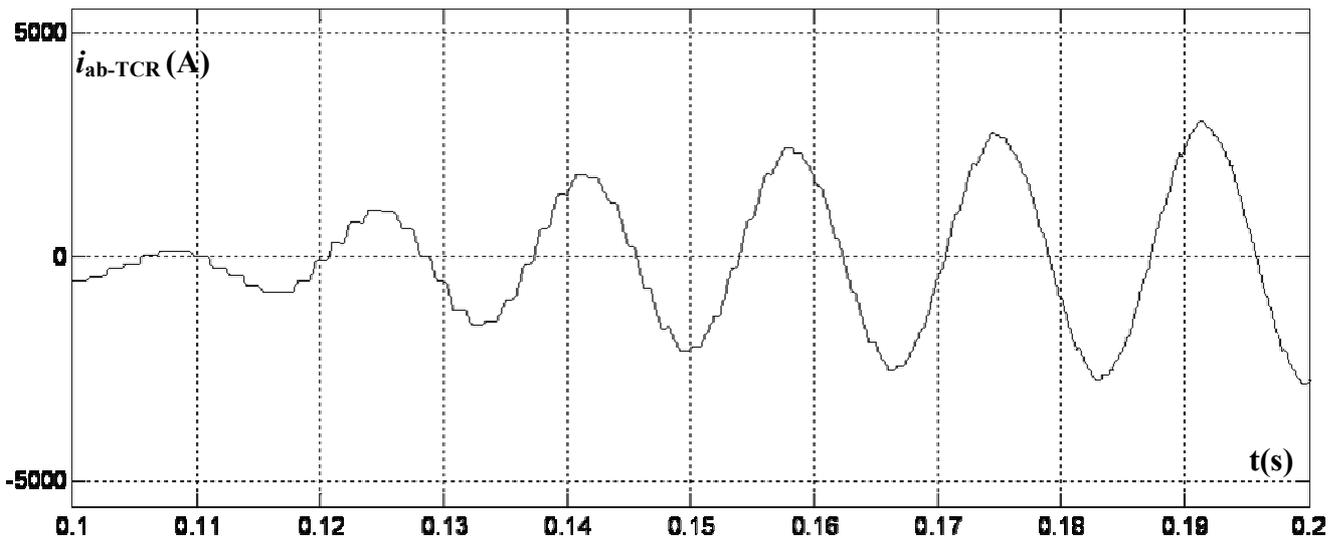


Figure V.15.j) Variation du courant de phase i_{ab} de TCR.

V.4.f Discussion et analyse des résultats:

Initialement la tension de source est mise à 1.004 pu, résultant à une tension de 1.0 pu aux bornes du SVC quand ce dernier est hors service. Comme la tension de référence $V_{réf}$ est mise à 1.0 pu, le SVC est initialement flottant (zéro courant). Ce point de fonctionnement est obtenu avec TSC1 en service et TCR presque en pleine conduction ($\alpha = 96$ degrés). A $t=0.1s$, la tension est brusquement augmentée à 1.025pu. Le SVC réagit en absorbant la puissance réactive ($Q=-95$ MVAR) afin d'amener la tension à nouveau à 1.01pu. Les 95% du temps de stabilisation est approximativement 121 ms. En ce point tous les TSCs sont hors service et le TCR est presque en pleine conduction ($\alpha = 94$ degrés). A $t=0.4s$, la tension de source est brusquement diminuée à 0.93pu. Le SVC réagit en produisant 256 MVAR de puissance réactive, augmentant par conséquent la tension à 0.974pu. En ce point les trois TSCs sont en service et le TCR absorbe approximativement 40% de la puissance réactive nominale ($\alpha =120$ degrés). On observe sur le dernier tracé de la figure V.14.c, comment les TSC sont séquentiellement commutés en marche et en arrêt. Chaque fois un TSC est amorcé, l'angle α du TCR change brusquement de 180 degrés (aucune conduction) à 90 degrés (pleine conduction). Enfin, à $t=0.7s$, la tension au jeu de barre est augmenté à 1.0 pu et la puissance réactive du SVC est diminuée à zéro.

V.5 Comparaison entre les deux topologies:

V.5.a M=3:

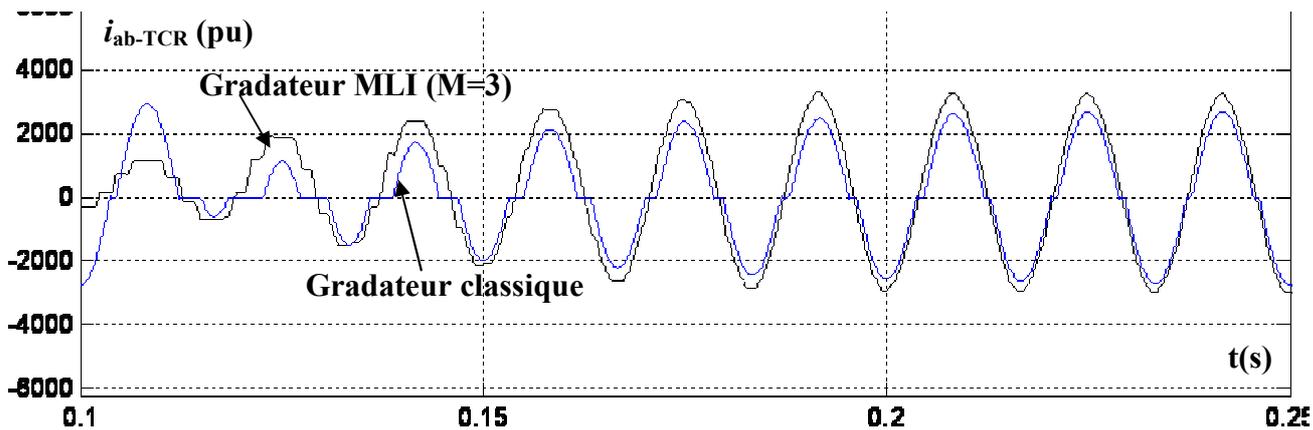


Figure V.16.a) Variation du courant de phase de TCR.

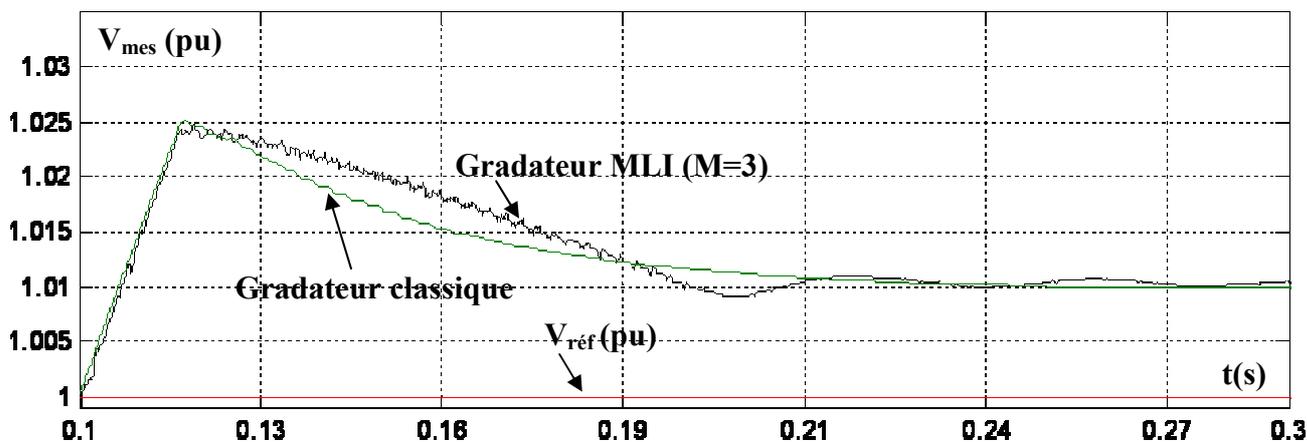


Figure V.16.b) Variation de la tension mesuré.

V.5.b M=5:

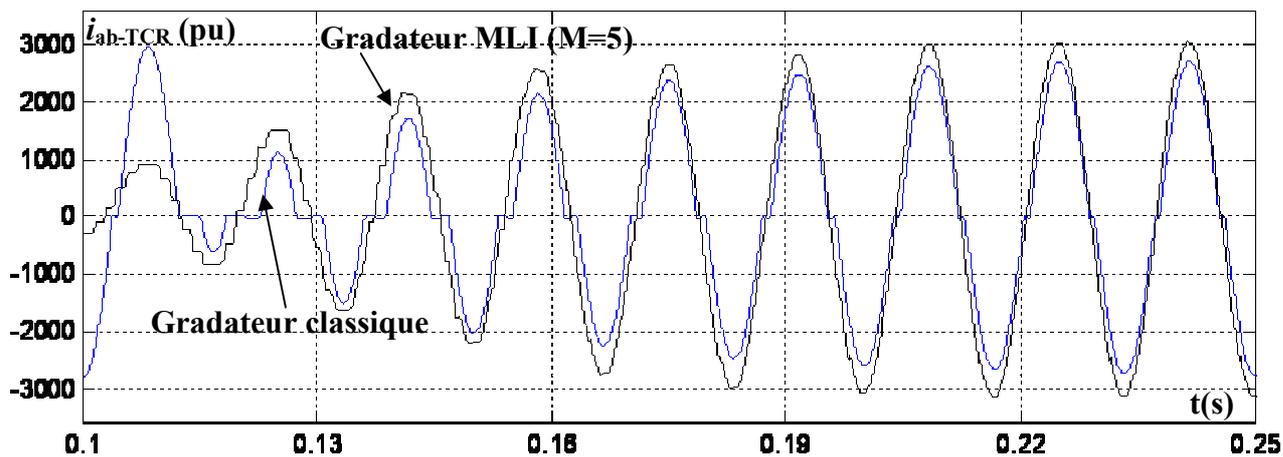


Figure V.17.a) Variation du courant de phase de TCR.

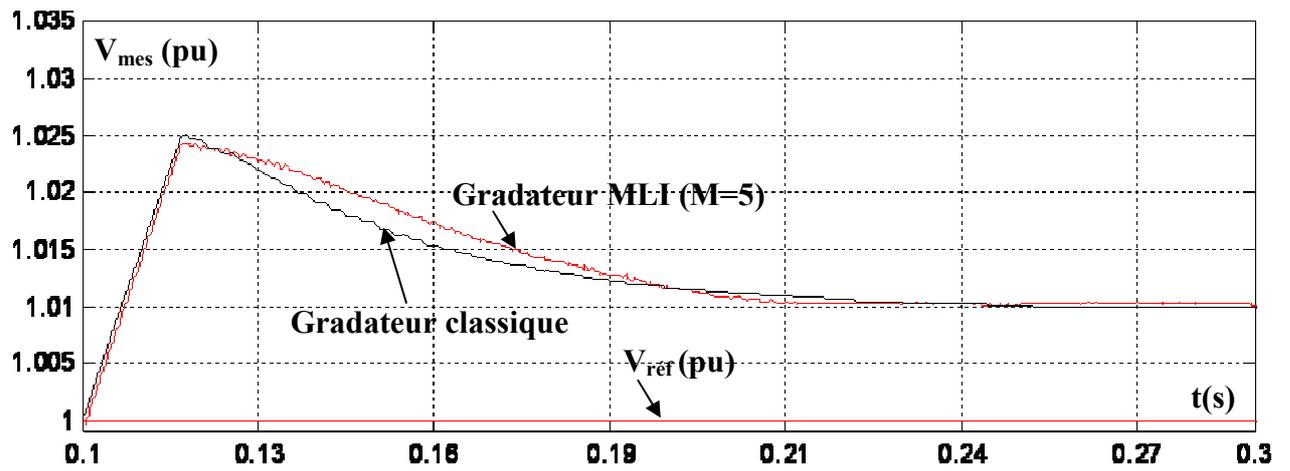


Figure V.17.b) Variation de la tension mesuré.

V.5.c M=7:

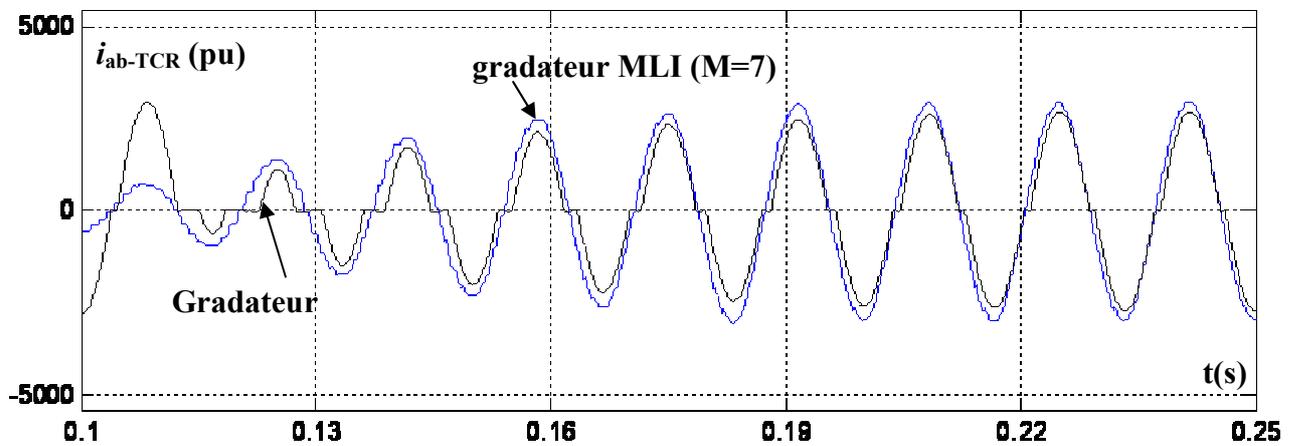


Figure V.18.a) Variation du courant de phase de TCR.

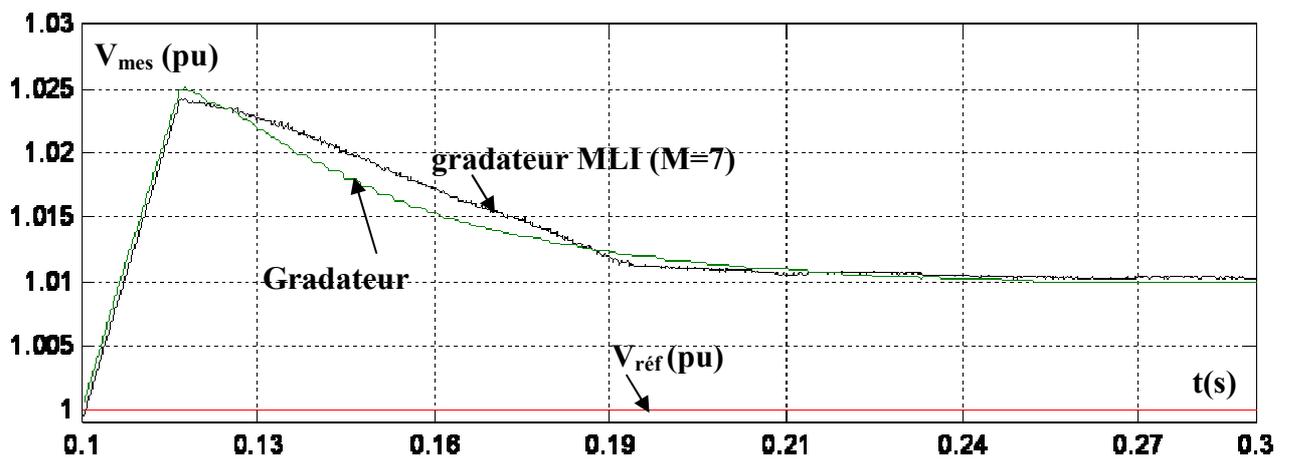


Figure V.18.b) Variation de la tension mesuré.

V.5.d M=13:

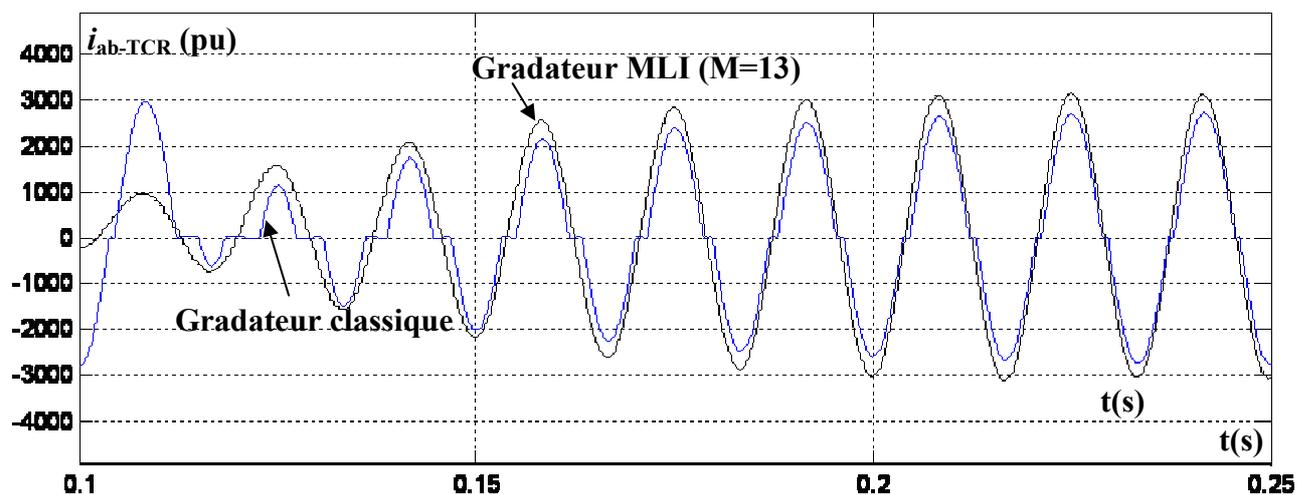


Figure V.19.a) Variation du courant de phase de TCR.

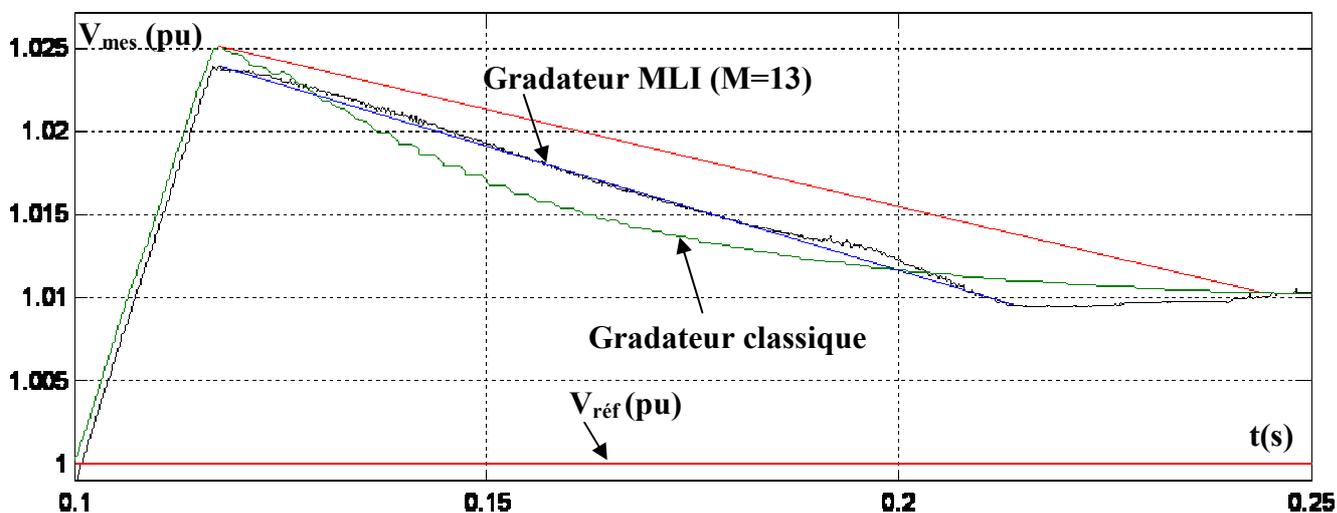


Figure V.19.b) Variation de la tension mesurée.

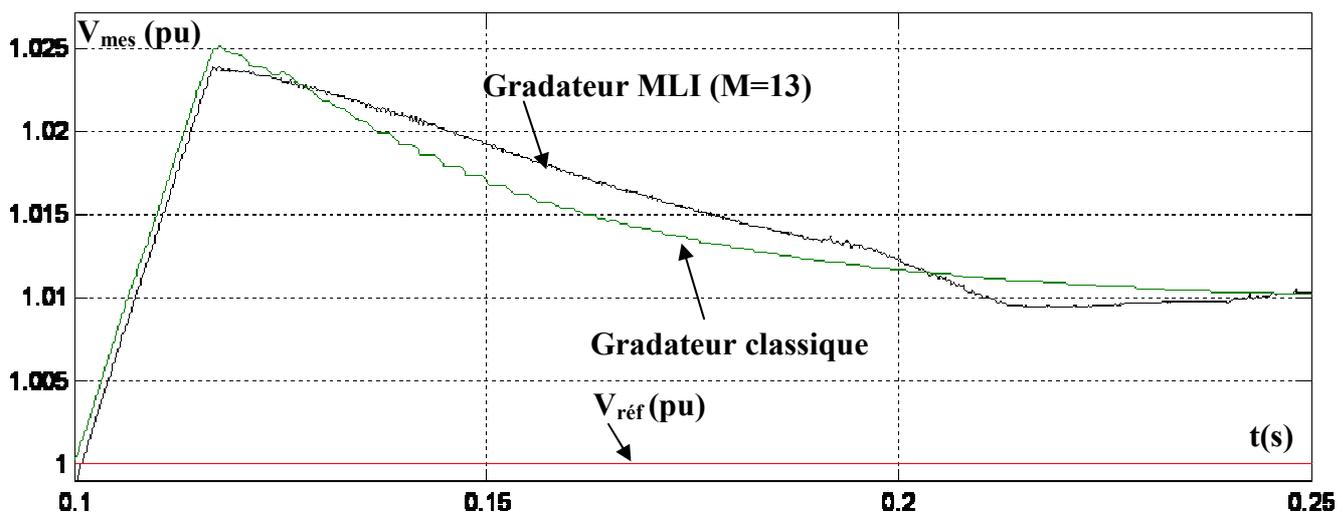


Figure V.19.c) Variation de la tension mesurée.

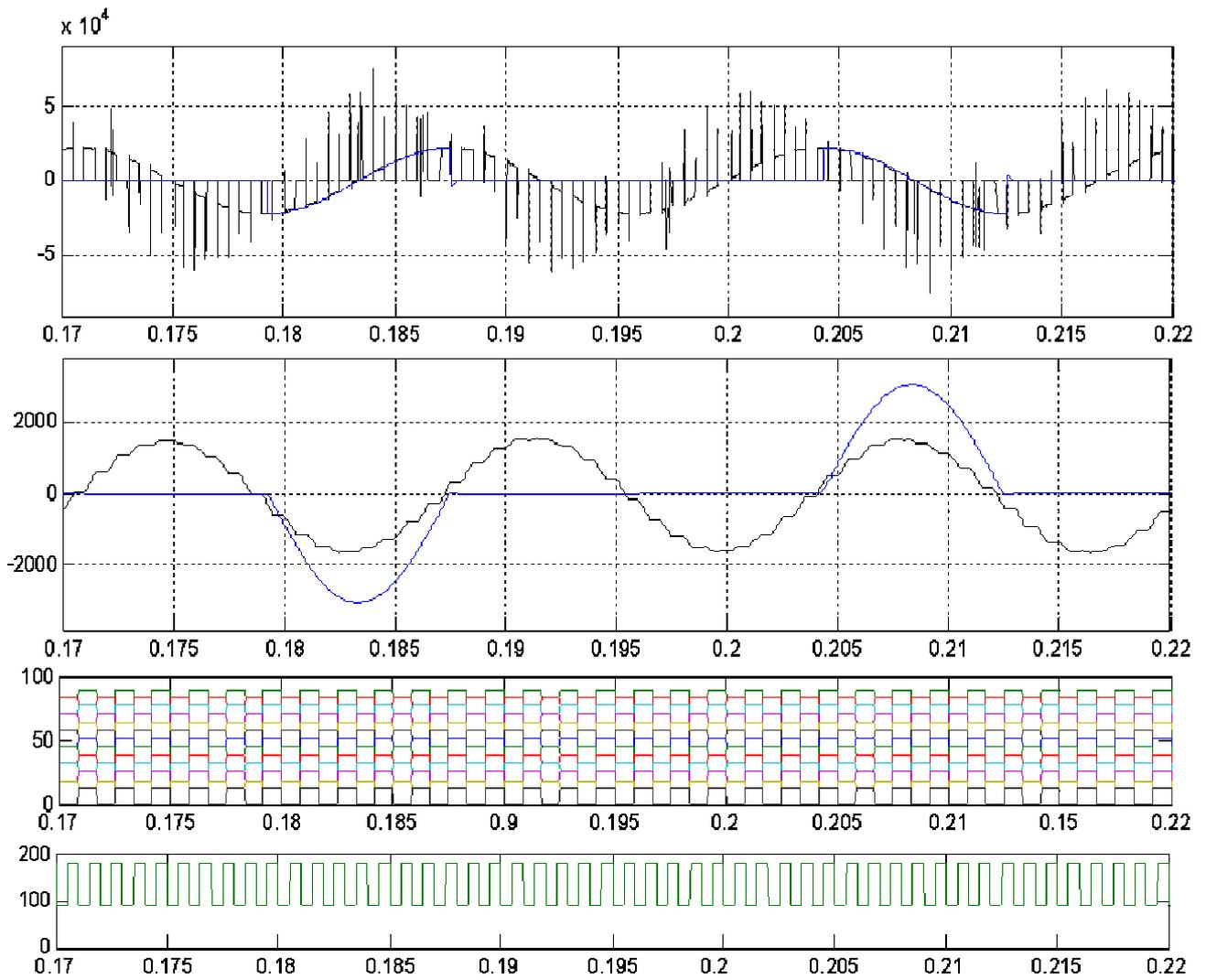


Figure V.20 Comparaison entre les tensions et les courants de TCR i_{ab_TCR} (A) et v_{ab_TCR} (V)
Avec une variation de B_{TCR} de 0 à 1pu dans un 0.001s.

V.5.a Discussion et analyse du résultat:

La figure V.20 montre la variation de la tension aux bornes de la réactance et le courant absorbée par celle dernière. On remarque que la tension et le courant varie plusieurs fois au cours d’une demi-période selon la demande de la charge. Si la tension de ligne augment par (0.01 pu) la réactance est complètement branchée et si la tension est diminuée à sa valeur initiale la réactance est déconnectée totalement dans le cas d’un gradateur MLI. Par contre dans le cas du gradateur classique la réactance est branchée ou débranchée une seule fois au cours d’une demi période avec l’attente de la séquence positive ou négatives du courant et la présence de la commande de l’angle de commutation.

Le tableau ci-dessous montre la comparaison entre les deux topologies:

	SVC avec gradateur classique	SVC avec gradateur MLI
Commande	-Commande par l'angle de phase; -commutation naturelle; -simple; -Contrôle non linéaire de la susceptance du TCR.	-Toutes les commandes sont envisageables; -Commutation forcée; -Difficile. Contrôle linéaire de la susceptance du TCR.
Tension de sortie	-Riche en harmonique et la forme d'onde dépend de la charge	-Contrôle du contenu harmonique et la forme d'onde dépend de la commande; -Plus pratique avec la méthode analytique.
Courant de sortie	-Courant riche en harmonique à cause des discontinuités.	-La forme d'onde est proche de la sinusoïde.
THD	-Le THD est très grand	-Le THD est très faible.
Compensation	-Une bonne compensation de la puissance réactive.	-Une bonne compensation de la puissance réactive.
Filtre harmonique	-Nécessite un filtre à l'entrée et à la sortie.	-Nécessite un filtre à l'entrée seulement.
Temps d'établissement	-A 95% est de 125ms.	-A 95% est de 121ms.

Tableau V.1 Comparaison entre les deux topologies.

V.6 Conclusion:

D'après l'analyse de fonctionnement du SVC, durant l'intervalle de temps t [0.1s, 0.3s] on remarque que la variation de la tension mesurée V_{mes} , pour les cas du SVC avec gradateur MLI ($M=13$) devient linéaire, et le courant est purement sinusoïdale, ce qui permet une commande plus fiable est très précise de la réactance, par contre pour le SVC avec gradateur classique la tension mesurée est non linaire et le courant est discontinue.

La modification du circuit de puissance par l'application de la topologie du gradateur MLI pour varier la réactance permet d'améliorer la qualité du courant absorbé ou injecté par le SVC, ainsi d'assuré un contrôle continue et linéaire du sucseptance globale du SVC comparé par la structure classique (gradateur à commutation naturelle).

CONCLUSION GENERALE

Les usines et les populations peuvent être de grandes consommatrices de puissance réactive à cause des besoins énergétiques demandés en grande partie par des usines équipées de convertisseurs contrôlés à basse de composants l'électronique de puissance. Cela entraîne la facturation de l'énergie réactive par le fournisseur d'énergie électrique et une baisse de la tension dans les jeux de barres provoquant un mauvais fonctionnement de toutes les charges connectées au réseau.

Partant de ce constat, le travail de mémoire présenté dans ce mémoire porte sur l'étude d'une nouvelle topologie de compensateur de puissance réactive pour les réseaux électriques utilisant une commande par modulation de largeur d'impulsion. Par rapport aux moyens de compensation existante, l'utilisation de ce genre de dispositif se justifie par la limitation en puissance des batteries fixes à installer aux jeux de barres et par le volume des éléments de filtrage des compensateurs à thyristors. Une première analyse des relevés de puissances dans les réseaux électriques a permis de définir un cahier des charges pour aboutir à un compromis entre le dimensionnement du compensateur statique à installer et la réduction des pénalités.

Une étude comparative entre les différentes topologies commandées en MLI et classique à commande par l'angle de phase a été réalisée. Un bilan des déchets harmoniques dans les formes d'ondes de sortie et des contrôles des valeurs efficaces des grandeurs de sortie et un bilan énergétique des éléments réactifs pour filtrer les grandeurs de sortie ont permis de sélectionner les solutions à base de gradateurs MLI au lieu des dispositifs à base de gradateur à commutation naturelle .

Nous avons traité le problème de la répartition des puissances réactives et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs SVC. Une étude sur les dispositifs FACTS a été réalisé et en plus une étude détaillée sur les dispositifs SVC à base de gradateur puis à base de gradateurs MLI. Le logiciel MATLAB utilisé a donné des résultats très satisfaisants pour divers cas de simulation, où on a amélioré avec succès les tensions des nœuds et une répartition adéquate des puissances réactives.

Dans notre modeste travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du contrôleur SVC. Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle SVC à base de gradateur classique peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds. Néanmoins, le courant fourni par le TCR du SVC est riche en harmonique ce qui nécessite un filtre de sortie de taille importante et en plus, la relation qui donne la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage est fortement non linéaire. L'introduction de nouvelles topologies à commande MLI dans les systèmes SVC permet d'améliorer nettement la qualité du courant fourni par le SVC

au jeu de barres là où il est installé ce qui permet de réduire de façon importante les éléments de filtrage et assurer un contrôle linéaire de la valeur de la susceptance en fonction de ALPHA du SVC pour contrôler de façon continue et précise l'impédance de la ligne de transport .

Enfin si les systèmes SVC sont surtout destinés au réseau de transport, des applications en réseau à moindre tension sont envisageables pour résoudre des problèmes liés notamment aux nouvelles contraintes nées de la production décentralisée.

En perspective, nous suggérons la continuité de ce travail de recherche par le développement des techniques de commande plus avancées de la structure gradateurs MLI et sa maîtrise et une étude comparative approfondie des différentes topologies gradateurs MLI par des bilans énergétique des pertes dans les semi-conducteurs et des bilans sur le THD et la compensation de l'énergie réactive.

REFERENCE

- [01] Théodor Wildi avec la collaboration de Gylbert Cybille, " électrotechnique 3eme édition", partie 47, 1978, 1991, 2000.
- [02] Laib Hichem, "Contribution A L'étude du Contrôle du Flux de Puissance Par l'UPFC" Magister en Electrotechnique, université BATNA Soutenu le : 13/06/2009.
- [03] Eskandar Gholipour Shahraki,"Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ", Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique soutenu le 13 Octobre 2003
- [04] Gabriela, Glanzmann, " Flexible Alternating Current Transmission Systems ", EEH - Power Systems Laboratory, 14. January 2005,
- [05] David C. Hamill, "A Classification Scheme for FACTS Controllers", School of Electronic Engineering, Information Technology and Mathematics University of Surrey, Guildford GU2 5XH, United Kingdom.
- [06] Mohamed.E,Elhawari "Thyristor-Based FACTS Controllers and Electrical Transmission System ", A John Wiley & sons inc publication, IEEE press 2002
- [07] Qian lu Yuanzhang sun Shengwei Mei, "Nonlinear Control and power system dynamics " book, cluwer academic publishers 2001.
- [08] K. R. Padiyar " FACTS controllers in power transmission and distribution ", new age international publisher, 2007
- [09] Acha R. Enrique, Glasgow, Claudio Fuerte-Esquivel " FACTS Modeling and simulation in power networks", book, John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [10] Leonard L. Grigsby. " Power Systems" CRC press Taylor & Francis Group, LLC, 2006
- [11] E.acha V.G.Agledis O.Anaya Lara T.J.E Miller "Power Electronique Controle in Electrical Systems" NEWNES power engineering series, 2002
- [12] Muhammad H. Rashid "power electronics handbook", academic press series, 2001
- [13] Luc Anthony lowinsky "Nouvelle topologie de Compensateur de Puissance Réactive pour les Réseaux Ferrés 25 kV / 50 Hz", l'institut National Polytechnique de Toulouse Doctorat, soutenu Le 27 mai 2010.
- [14] Rahmani Lazhar "Réalisation d'un hacheur alternatif monophasé à commande PWM" Pr université FARHAT ABBAS SETIF, Mémoire magister, soutenu novembre, 1994.
- [15] A.Mouhamedien and K.E.Ad'doweesh, "Harmonique Minimization in a Chopper-type AC Voltage Control ",Electrical Engineering department, College of Engineering1993.
- [16] Gyu-ha Choe, K Wallace, Min ho Park "An improved PWM techniques for ac-chopper" IEEE transaction on power electronic vol 4 NO 1 October 1989.
- [17] D.A.Deib and H.W.Hill, "optimal harmonique reduction in ac/ac chopper converters" department of electrical engineering Ohio University 1993.
- [18] khaled E, marzouki S reyadh Saudi "ac-chopper technique with phase and voltage control" Arabic IEEE 1993.
- [19] M.Karpagam,N.Devarajan "Extenuation of Voltage Harmonics in PWM AC Chopper Using Differential Evolution" EuroJournals Publishing, Inc. 2010
- [20] Boudjella.Houari F.Z. Gherbi, S. Hadjeri and F. Ghezal, "Modelling and Simulation of Static Var Compensator with Matlab ", 4th International Conference on Computer Integrated

Manufacturing CIP, 03-04 November 2007.

- [21] Nitin Ved, Satish Natti, Abur ELEN "Static VAR Compensation using Thyristor Controlled Reactor " Course project, December 12, 2003.
- [22] Mohamed.E,Elhawari "Thyristor-Based FACTS Controllers and Electrical Transmission System ", partie 03, 04 ,A John Wiley & sons inc publication, IEEE press 2002

ملخص:

في هذا العمل الجديد، قمنا بتبيين فعالية وسرعة مراقبة الجهد بإدراج منظم الطاقة الإرتكاسية، النتائج المحصل عليها تبين أن جهاز تعديل الطاقة بواسطة الغردتور يلعب دورا هاما في ميدان تعديل الطاقة الإرتكاسية وتنظيم الجهد، إلا أن التيار الكهربائي الناتج من الوشيعه غني بالأمواج الطيفية الغير مرغوب فيها، التي تتطلب مرشح عند المخرج ذو حجم كبير إضافة إلى العلاقة التي تبين قيمة الممانعة بدلالة زاوية الطور غير خطية، إدراج التقنية الجديدة، طريقة التقطيع على منظم الطاقة الإرتكاسية يسمح بالتحسين التام للتيار الكهربائي الناتج بمنع ظهور الأمواج الطيفية من منظم الطاقة الإرتكاسية في نقطة التثبيت بحيث يسمح بمراقبة للطاقة. خطية للممانعة بدلالة الزاوية من اجل التحكم المستمر والدقيق للممانعة الأسلاك الناقله

الأمواج الطيفية، الطاقة الإرتكاسية. كلمات المفتاح

Résumé :

Dans notre modeste travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du contrôleur SVC. Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle SVC à base de gradateur classique peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds. Néanmoins, le courant fourni par le TCR du SVC est riche en harmonique ce qui nécessite un filtre de sortie de taille importante et en plus, la relation qui donne la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage est fortement non linéaire. L'introduction de nouvelles topologies à commande PWM dans les systèmes SVC permet d'améliorer nettement la qualité du courant fourni par le SVC au jeu de barre là où il est installé ce qui permet de réduire de façon importante les éléments de filtrage et assurer un contrôle linéaire de la valeur de la susceptance en fonction de ALPHA du SVC pour contrôler de façon continue et précise l'impédance de la ligne de transport.

Mots Clés : RCT, FACTS, SVC, Gradateur, Gradateur MLI, PI, Compensation, Réactive

Abstract:

In our modest work, we have tried to clarify the utility, efficiency and the rapidity voltage control by the insertion of the SVC controller. The results obtained show that the dispositive of the SVC control based on a phase angle control can play a very important role in the field of the compensation if the reactive power and the control of the voltage at the terminals of the SVC. However, the courant supplied by the TCR of the SVC is much distorted and the use of the output filter with very large dimension is very necessary and in addition, the relation that gives the susceptance with the firing angle ALPHA is very no linear. The introduction of the new topologies with PWM control in the SVC Systems allow the neatly improving of the quality of the current supplied by the SVC at its terminals where is installed that is allowed the reduction the dimension of the output filter and garneted a linear control of the value of the susceptance of the SVC with the firing angle Alpha to control the impedance of the SVC with continuous and precise manner of the line transport.

Key words: TCR, FACTS, SVC, Phase angle control, Chopper PWM, PI, Compensation, Reactor