

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Présenté par

Nabil CHEBALLAH
Aghiles ABDELLAOUI

Thème

Etude et Simulation d'un Compensateur Statique de Puissance Réactive (SVC) dans un Système de Puissance.

Mémoire soutenu publiquement le/.... / 2024 devant le jury composé de :

M Chafik	BIROUCHE	M.A.A	UMMTO,	Président
M Karim	HADJ SAID	M.A.A	UMMTO,	Encadrant
M Arezki	DICHE	M.A.A	UMMTO,	Examineur

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce mémoire et en tout premier lieu nous tenons à remercier le bon Dieu tout puissant qui nous a donné, force, courage et patience pour élaborer et présenter ce modeste projet.

Nos chaleureux remerciements s'adressent à notre promoteur Monsieur Karim HADJ SAID d'avoir encadré ce travail, nous le remercions pour sa compréhension, ses encouragements accordés tout au long de cette aventure.

Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à notre travail en acceptant de faire partie du jury d'évaluation. Aussi bien aux enseignants du département D'Électrotechniques, et l'équipe pédagogique, qui nous ont suivis durant nos années d'études.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui m'ont accompagné durant toute ma vie et qui m'ont énormément soutenu.

À toi spécialement, maman, ma source de joie qui a sacrifié tout pour mon bonheur et ma réussite.

Sans toi, je ne serais vraiment rien. Maman, merci infiniment.

À mon père, pour son soutien inébranlable, tant moral que financier, tout au long de mes études.

Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir accompagné dans chaque étape de ce parcours.

Que Dieu me les garde pour toujours.

À la mémoire de mes chers grand père et grand- mère, que dieu les accueille dans son vaste paradis.

À mon unique frère Yacine, à mes chères sœurs Souad, Lila, Karima, Céline et ma petite Lisa

à qui je souhaite une vie paisible et épanouie.

À toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers, veuillez trouver l'expression de mon affection.

À toi mon binôme mon frère Aghiles,

avec qui j'ai partagé les moments les plus beaux et les plus durs.

À tous mes collègues de la promotion Électrotechnique 2024 et en particuliers tous mes amis et frères du

groupe option Réseaux Électriques.

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce

Travail.

Nabil

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Avant tout, à mes chers parents,

qui m'ont soutenu durant toutes ces années de formation. Merci d'avoir été présents pour moi et d'avoir beaucoup investi et sacrifié de votre temps pour ma réussite.

À mon ami binôme Nabil, qui a toujours été là dans les moments difficiles et a su me soutenir.

Je n'oublierai jamais ta générosité et ta gratitude envers moi.

À tous mes amis et amies qui m'ont aidé de près ou de loin, spécialement Sadoun Sarah et Amarni Sara. Je n'oublierai pas votre gentillesse et votre loyauté dans notre amitié.

Aghiles.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I Généralités sur la Compensation de l'Energie Réactive	3
I- Introduction	3
II- Energies active, réactive, apparente :	3
III- Composante active et réactive du courant:.....	3
IV- Composante réactive et active de la puissance :.....	4
V- Puissance dans un récepteur monophasé:.....	5
VI- Puissance dans un récepteur triphasé:.....	5
VII- Facteur de puissance:	7
VII.1 Définition du facteur de puissance :	7
VII.2 Causes du mauvais facteur de puissance :	8
VII.3 Utilité de la puissance réactive :.....	8
VII.4 Circulation de la puissance réactive et ses effets :	9
VII.4.1 Pertes Joule:	10
VII.4.2 Chute de tension:	11
VII.4.3 Augmentation des investissements:.....	12
VII.4.4 Coté économique:	13
VIII- Principe de la compensation d'énergie réactive:	13
VIII.1 Les grands consommateurs d'énergie réactive :	13
VIII.2 Compensation de l'énergie réactive des réseaux de transport :.....	14
VIII.3 Description de l'instabilité en tension :	15
VIII.4 Phénomène d'écroulement de la tension :.....	15
IX- Conclusion:.....	15
Chapitre II Moyens de Compensation d'Energie Réactive	16
I- Introduction:	16
II- Batteries de condensateurs:	16
II.1 Présentation:	16
II.2 Les modes de compensation par batteries :	16
A. La compensation globale :	16
B. Compensation partielle ou par secteur :	17
C. Compensation Individuelle :	18
II.3 Constitution de la batterie de condensateurs :.....	18
II.4 Type d'installation:.....	18
II.5 Raccordement des condensateurs au réseau :	19
III- Inductances:	21
IV- Compensateurs synchrones:	22
V- Groupe thermique et hydraulique:.....	23
VI- Compensateurs Statiques d'Energie Réactive (dispositifs FACTS):	24
VI.1 Concept FACTS : un projet EPRI.....	24
VI.2 Quelques dispositifs de type FACTS :	25

Sommaire

VI.2.1	Les Condensateurs Commutés par Thyristors :	25
➤	TSC : Thyristor Switched Condensator	25
➤	TCR : Thyristor Controlled Reactor.....	25
VI-2-2	Compensateur Statique de Puissance Réactive	26
VI-2-3	Compensateur Synchrone Statique	26
VI-2-4	Condensateur Série Commandé par Thyristors	27
VII-	Conclusion.....	27
	Chapitre III Compensateurs Statiques de Puissance Réactive.....	28
I-	Introduction:	28
II-	Schéma et fonctionnement du SVC:.....	28
II.1	Schéma du SVC:.....	28
II.2	Réactance Commandée par Thyristors (TCR)	29
II.3	Condensateur Commandé par Thyristors (TSC) :	30
II.4	Fonctionnement du SVC:	31
II.5	D'autres SVC:.....	33
III-	Modélisation statique:.....	35
IV-	Modélisation dynamique:	36
IV.1	Modèles Standards:	36
IV.2	Paramètres du SVC:	39
V-	Utilisation et Inconvénients des SVC :	40
V.1	Utilisation des SVC:.....	40
V.2	Inconvénients des SVC:.....	42
VI-	Commande de SVC	42
VI.1	Commande Principale:.....	42
VI.2	Commandes Supplémentaires:.....	42
VII-	Conclusion:.....	43
	Chapitre IV Etude par Simulation d'un Compensateur Statique SVC (TCR-TSC)	44
	A. PARTIE THEORIQUE.....	44
I-	Réactance contrôlée par thyristors	44
I.1	Introduction:.....	44
I.2	Schéma électrique:.....	44
I.3	Principes de fonctionnement:.....	45
I.4	Équipement principal:.....	45
I.4.1	Valve à thyristors:.....	46
I.4.2	Harmoniques	47
II-	Condensateur commuté par thyristor:	48
II.1	Introduction:.....	48
II.2	Schéma électrique:.....	48
II.3	Principes de fonctionnement.....	49
II.3.1	Courant en régime permanent:	49
II.3.2	Cas hors tension:	49
II.3.3	Déblocage – conditions normales:.....	50

Sommaire

II.3.4	Déblocage – conditions anormales	50
II.4	Équipement principal:	51
II.4.1	Banc de condensateurs:	51
II.4.2	Réactance du TSC:	51
II.4.3	Valve à thyristors:	51
II.5	Types spéciaux de TSC:	52
B.	PARTIE PRATIQUE : SIMULATION	53
I-	Introduction:	53
II-	Schéma électrique	53
III-	Schéma de simulation sous Simulink:	54
IV-	Paramètres de Simulation:	55
V-	Commande:	55
VI-	But de la simulation:	56
VII-	Résultats de simulation:	57
	Première série de simulation :	57
I-	Simulation de la branche TCR seule:	57
II-	Simulation de la branche TSC seule :	58
III-	Simulation des deux branches (TCR et TSC) en même temps à vide (sans la charge) :	59
IV-	Simulation des deux branches (TCR et TSC) en même temps en charge :	61
V-	Conclusion:	63
	Deuxième série de Simulation :	64
I-	Courbes des tensions aux bornes de la charge :	64
II-	Courbes des valeurs efficacités:	65
III-	Courbes des Puissances actives et réactives :	66
IV-	Conclusion:	67
	Conclusion Générale	68

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I 1: Composante vectorielle des courants	4
Figure I 2: Composition vectorielle des puissances.....	4
Figure I 3: Récepteur monophasé	5
Figure I 4: Elément de réseau triphasé symétrique.....	6
Figure I 5: Influence du $\cos \alpha$ sur la valeur de la puissance apparente.....	9
Figure I 6: Influence du $\cos \alpha$ sur la valeur du courant apparent.....	9
Figure I 7: Réseau monophasé.....	10
Figure I 8: Circuit équivalent du réseau électrique.....	11
Figure I 9: Diagramme vectoriel des tensions.....	11

Chapitre II

Figure II 1: Compensation Globale.....	17
Figure II 2: Compensation Partielle.....	17
Figure II 3: Compensation individuelle.....	18
Figure II 4: Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur.....	19
Figure II 5: Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre.....	19
Figure II 6: Schéma de branchement d'un condensateur série et parallèle.....	20
Figure II 7: Schéma de couplage de condensateur shunt.....	20
Figure II 8: Schéma de montage d'un absorbeur sur un jeu de barres HT.....	21
Figure II 9: Schéma équivalent de la machine synchrone.....	22
Figure II 10: Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau.....	23
Figure II 11: Présentation d'un TSC.....	25
Figure II 12: Présentation d'un TCR.....	25
Figure II 13: Présentation d'un TCR avec filtres harmoniques.....	26
Figure II 14: Structure d'un SVC.....	26
Figure II 15: Structure d'un STATCOM.....	27
Figure II 16: Structure TCSC.....	27

Chapitre III

Figure III. 1: Schéma Type d'un SVC.....	28
Figure III. 2: Figure III.2 Réactance Commandée par Thyristors (TCR)	29
Figure III. 3: Caractéristique V-I du TCR.....	30
Figure III. 4: TCR Triphasées	30
Figure III. 5: Condensateur Commandé par Thyristors (TSC) et Schéma de Connexion.....	31
Figure III. 6: Caractéristique V-I du TSC.....	31
Figure III. 7: Caractéristique Fondamentale du SVC.....	32
Figure III. 8: Réseau Equivalent.....	32
Figure III. 9: Fonctionnement du SVC.....	33
Figure III. 10: MSC et MSR.....	34
Figure III. 11: SVC de Type Saturable (SR).....	34
Figure III. 12: Caractéristique V-I d'un STATCOM et d'un SVC conventionnel.....	35
Figure III. 13: Modèle Statique du SVC.....	35
Figure III. 14a: Modèle dynamique CIGRE du SVC.....	36
Figure III. 14b: Schéma détaillé du modèle de SVC CIGRE.....	36
Figure III. 15: Schéma du second modèle CIGRE de SVC.....	37
Figure III. 16: Types de Régulateurs de Tension du SVC.....	38
Figure III. 17: Représentation Simple par Schémas Blocs d'un SVC.....	40
Figure III. 18: Système de Ligne de Transport d'électricité (sans et avec SVC).....	41
Figure III. 19: Capacité de Transport de Puissance d'une Ligne de Transport.....	41
Figure III. 20: Commande Supplémentaire du Gain pour le SVC.....	43

LISTE DES FIGURES

Chapitre IV

Figure IV 1: TCR triphasé typique connecté en triangle.	44
Figure IV 2: Formes d'onde de tension et de courant dans un TCR.	45
Figure IV 3: Une valve à thyristor TCR (monophasée).....	46
Figure IV 4: Formes d'onde de tension et de courant de la valve à thyristor TCR.....	47
Figure IV 5: Condensateur commuté à thyristors (TSC), connecté en triangle.....	48
Figure IV 6: Le condensateur commuté par thyristor (TSC) s'éteint, affichant la tension piégée restant sur le condensateur.	50
Figure IV 7: Condensateur commuté à thyristors (TSC) s'activant au bon moment.	50
Figure IV 8: Représentation idéalisée d'un condensateur commuté à thyristors (TSC) s'activant à un instant incorrect.	51
Figure IV 9: Valve TSC typique.....	52
Figure IV 10: Schéma électrique	53
Figure IV 11: Schéma de simulation sous Simulink.....	54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: Bilan de puissance pour les différents récepteurs de base.....	6
Tableau II. 1: Différents couplages des condensateurs shunt.....	20

Liste des nomenclateurs

I_t courant apparent	[ka]
I_a courant actif	[ka]
I_r courant réactif	[ka]
φ déphasage entre le courant apparent et le courant actif	[rad]
$Fp ; \cos\varphi$ facteur de puissance	[.]
P puissance active	[kw]
Q puissance réactive	[kvar]
S puissance apparente	[kvar]
α Angle de commutation	[°]
P_j pertes joules	[J]
U tension entre phases	[Kv]
Z impédance complexe	[Ω]
I_h courant harmonique	[ka]
V_r tension du réseau	[kv]
Q_c puissance réactive de compensation	[kvar]
$\tan\varphi_1$ Tangente du déphasage φ avant compensation	[.]
$\tan\varphi_2$ Tangente du déphasage φ après compensation	[.]
I_{SVC} Le courant total du compensateur	[a]
F fréquence	[hz]
C capacité	[μ f]
Vs tension de sortie	[kv]
X_l réactance inductive	[h]

Abréviations

LBC	Lampes à Basse Consommation.
FACTS	Flexible AC Transmission Systems.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
TSR	Thyristor Switched Reactor
FC	Fixed Capacitors
MSC	Mechanically Switched Reactor
SR	Saturable Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor.
TCR	Thyristor Controlled Reactor.
SVC	Static Var Compensator.
STATCOM	Static Synchronous Compensator.
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor.
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques.
UPFC	Unified Power Flow Controller.
GTO	Gate Turn Off
LQG	Linear Quadratic Gaussian Regulator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

INTRODUCTION
GENERALE

Tout système électrique utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive. Dans les processus industriels utilisant l'énergie électrique seule l'énergie active est transformée au sein de l'outil de production en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc... . L'autre, l'énergie réactive sert notamment à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques (moteurs, autotransformateurs, etc...).

Par ailleurs, certains constituants des réseaux électriques de transport et de distribution (transformateurs, lignes, etc...) consomment également dans certains cas d'exploitation de l'énergie réactive.

L'utilisateur, donc, ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active" ; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite. Les économies d'énergie réalisées se chiffrent par dizaines de pour cent de la consommation globale, situant les procédés de compensation d'énergie réactive en première ligne du combat pour la réduction de l'impact des activités humaines sur l'écosystème de notre planète.

Par le passé, ces problèmes ont été résolus (anticipé) avec l'utilisation des moyens classiques (transformateurs déphaseur, compensation série ou parallèle d'énergie réactive, modification des consignes de production, action sur l'excitation des générateurs). Mais ces techniques s'avèrent actuellement trop lentes et insuffisantes pour répondre efficacement aux perturbations du réseau sous l'effet des nouvelles contraintes.

Aujourd'hui, grâce à l'amélioration des performances de l'électronique de puissance, on voit apparaître des nouveaux équipements connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) qui permettent d'améliorer la stabilité des réseaux électriques et accroître la puissance de transport des lignes. Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre des nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux électriques par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (tension, déphasage, impédance). Ainsi les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Notre travail, consiste à étudier l'un des dispositifs FACTS, qui le SVC, compensateur statique shunt qu'on place au milieu d'une ligne de transport d'énergie électrique, ou directement en parallèle avec une charge.

Pour atteindre notre objectif, nous proposons un travail qui se présente comme suit : Partant des notions générale sur la compensation de l'énergie réactive, dans le premier chapitre, on a mis l'accent sur l'importance d'avoir un facteur de puissance élevé, les modes et les moyens de compensation de la puissance réactive, l'utilité de la puissance réactive et ses effets dans un réseau électrique, et donc l'influence qu'a cette puissance sur le niveau et la forme de la tension.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les dispositifs de compensation de l'énergie réactive, leur mode de raccordement, le principe des FACTS et leurs dispositifs, ainsi que la manière de calculer leurs différents paramètres.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du compensateur statique shunt SVC, sa composition, son fonctionnement, ses inconvénients, et sa modélisation statique et dynamique et sa commande.

Une étude par simulation du SVC a été l'objet du quatrième chapitre dans lequel nous avons opté pour un circuit électrique qui représentera notre système de puissance dans sa forme la plus simple, c'est-à-dire source, transport et consommation (charge). Ce circuit est représenté par un schéma Simulink qui nous permet différentes configurations grâce à plusieurs interrupteurs qui permettent de relier ou d'isoler une ou plusieurs parties du réseau électrique.

Enfin, notre travail est achevé par une conclusion générale dans laquelle nous proposons d'aborder cette étude en utilisant un compensateur statique SVC commandé (commande de la susceptance), pour apporter ou absorber cette puissance réactive.

Chapitre I
Généralités sur la
Compensation de l'Energie
Réactive

I- Introduction

L'énergie électrique est parmi les biens de consommation, un des plus rapidement mis à la disposition des utilisateurs. Il suffit de brancher à la source permanente d'alimentation électrique (prise) le récepteur (télévision, ventilateur, frigidaire, lampe ...) et l'énergie est là instantanément, provenant d'une centrale de production située peut être à plusieurs centaines de kilomètres. Du fait que les délais de commande et de transport sont absolument nuls, on parlera de transmission d'énergie au lieu de transport car l'énergie électrique se communique sans transport simultané de matière.

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

Les économies d'énergie réalisées sont d'une grande importance vue les efforts humains et matériels qui sont investis quotidiennement pour garantir la continuité et la qualité de service. Dans ce chapitre, nous allons parler du principe de la compensation de l'énergie réactive en évoquant les différentes techniques entreprises pour sa concrétisation.

II- Energies active, réactive, apparente :

Tout système électrique (câble, ligne, transformateur, moteur, éclairage,..) utilisant un courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

- **L'énergie active consommée (KWh) :** résulte de l'utilisation de puissance active $P(KW)$ par les récepteurs .Elle se transforme intégralement en énergie mécanique, aussi thermique ou lumineuse.
- **L'énergie réactive consommée (KVARh) :** sert à la magnétisation des circuits magnétiques des machines (transformateurs et moteurs). De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. Elle correspond à la puissance réactive $Q(KVAR)$ des récepteurs.
- **L'énergie apparente (KVAh) :** est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente $S (KVA)$ des récepteurs, somme vectorielle de $P(KW)$ et $Q(KVAR)$. [1]

III- Composante active et réactive du courant:

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

Le courant apparent (I_t) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel. [1]

Ces courants se composent alors vectoriellement comme représenté à la figure I.1 :

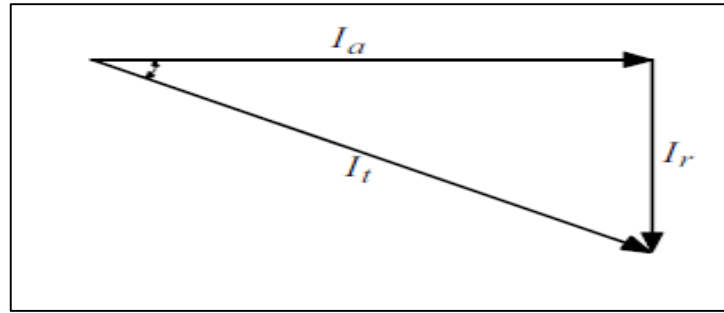


Figure I 1: Composante vectorielle des courants [1]

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{I.1})$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi \quad (\text{I.2})$$

$$I_r = I \sin \varphi \quad (\text{I.3})$$

IV- Composante réactive et active de la puissance :

Pour des courants et des tensions ne comportant pas des composantes harmoniques, le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances ; il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau.

On définit aussi pour un circuit monophasé :

$$P = UI \cos \varphi : \text{Puissance active en (kW)}. \quad (\text{I.4})$$

$$Q = UI \sin \varphi : \text{Puissance réactive en (kVAR)}. \quad (\text{I.5})$$

$$S = UI : \text{Puissance apparente en (kVA)}. \quad (\text{I.6})$$

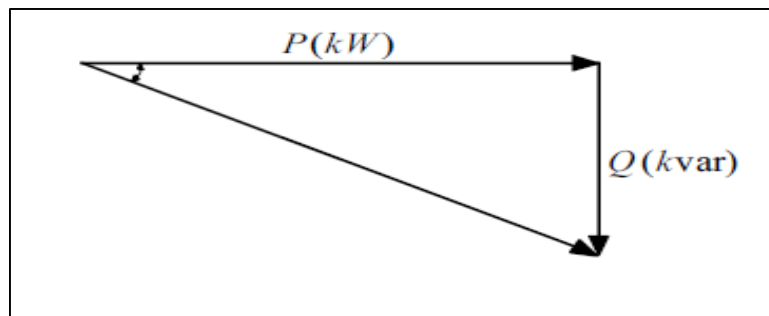


Figure I 2: Composition vectorielle des puissances [1]

S = Puissance apparente.

P = Puissance active.

Q = Puissance réactive.

φ = Déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension).

P , Q , S et φ sont reliés par ces relations : [1]

$$P = S \cos \varphi \quad (\text{I.7})$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (\text{I.8})$$

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{I.9})$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{I.10})$$

V- Puissance dans un récepteur monophasé:

On représente sur la figure I.3 un récepteur monophasé soumis à une tension alternative v et dans lequel circule un courant alternatif i , avec φ comme déphasage entre la tension et le courant.

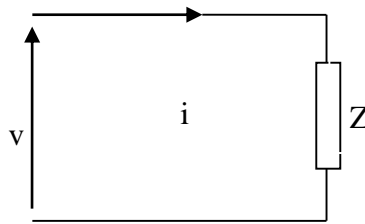


Figure I 3: Récepteur monophasé

$$v = V\sqrt{2} \sin \omega t \quad (\text{I.11})$$

$$i = I\sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi) \quad (\text{I.12})$$

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

$$P = v \cdot i \quad (\text{I.13})$$

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

$$P = V\sqrt{2} \sin \omega t \cdot I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) = 2VI \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi). \quad (\text{I.14})$$

A l'aide des relations trigonométriques et après développement, on obtient l'expression finale de la puissance instantanée qui est composée de deux termes :

$$P = \underbrace{VI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t)}_1 - \underbrace{VI \sin \varphi \sin 2\omega t}_2 \quad (\text{I.15})$$

La valeur moyenne du terme (1) représente la puissance active fournie par la source au récepteur. Le deuxième terme a une valeur moyenne nulle ; c'est la composante qui caractérise par son amplitude l'échange de puissance réactive entre le récepteur et la source. Cet échange est de nature fluctuante et s'effectue à la pulsation 2ω . Cette notion de puissance réactive apparaît lorsqu'il y'a un déphasage entre la tension et le courant qui traverse le récepteur ; c'est le cas des récepteurs composant des condensateurs ou des inductances en régime sinusoïdal.

L'apparition de la puissance réactive est due à la circulation d'un courant réactif qui ne donne lieu à aucun échange de puissance moyenne, ce courant peut être à l'origine de pertes et de chutes de tension. En régime sinusoïdal, les puissances réactives produites et consommées ne conservent au même titre que les puissances actives.

En ce qui concerne la puissance apparente, elle est surtout utilisée pour le dimensionnement des appareils et des machines. Contrairement aux puissances actives et réactives, la puissance apparente ne se conserve pas. [2]

VI- Puissance dans un récepteur triphasé:

On représente sur la figure I.4 un récepteur triphasé symétrique qui est alimenté par un système de tensions triphasées équilibrées.

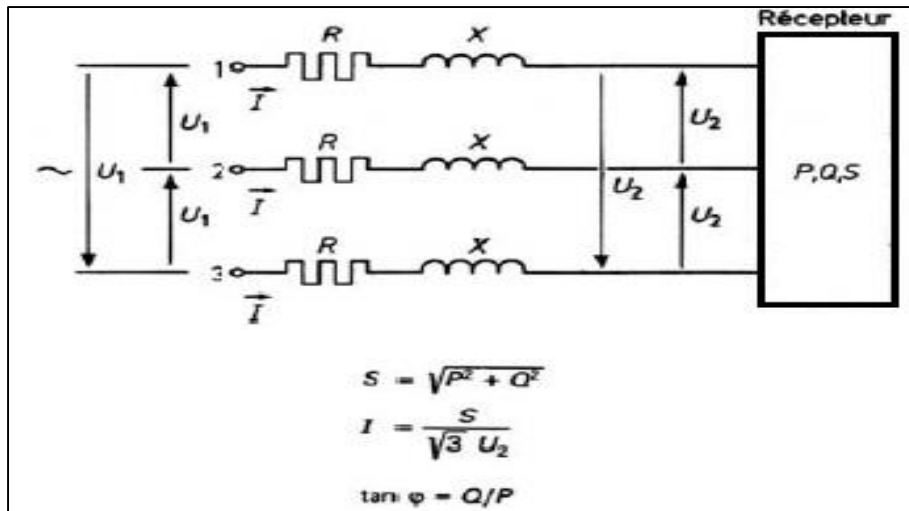


Figure I 4: Elément de réseau triphasé symétrique. [3]

Les puissances active, réactive et apparente pour un tel système sont d'expressions suivantes :

- **Puissance active** : égale à la valeur moyenne de la puissance instantanée soit : [3]

$$P = 3VI \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi \tag{I.16}$$

Avec U : Tension composée.

V : Tension simple.

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

$$Q = \sqrt{3} VI \sin \varphi \tag{I.17}$$

- **Puissance apparente** : A partir des deux puissances précédente on définit cette troisième comme suit :

$$S = \sqrt{3} UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{I.18}$$

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

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

Tableau I. 1: Bilan de puissance pour les différents récepteurs de base. [3]

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

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

VII- Facteur de puissance:

VII.1 Définition du facteur de puissance :

Par définition le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente ; c'est un nombre abstrait compris entre 0 et 1, on l'appelle également cosinus φ .

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{Puissance active}}{\text{Puissance apparente}} \quad (\text{I.19})$$

$$Fp = \frac{P(KW)}{S(KVA)} \quad (\text{I.20})$$

Si les courants de tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal à $\cos\varphi$, c'est-à-dire :

$$Fp = \cos \varphi = \frac{P(KW)}{S(KVA)} \quad (\text{I.21})$$

On utilise également la variable $\text{tg}\varphi$. Dans les mêmes conditions, nous avons également la relation :

$$\text{Tg}\varphi = \frac{Q(KVAR)}{P(KW)} = \frac{\text{Puissance réactive}}{\text{Puissance active}} \quad (\text{I.22})$$

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

$$Fp_{\text{moy}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = (\cos \varphi)_{\text{moy}} \quad (\text{I.23})$$

Où

$$\text{Tg}\varphi_{\text{moy}} = \frac{Q(KVAR)}{P(KW)} \quad (\text{I.24})$$

Le facteur de puissance est une grandeur très utile qui permet d'évaluer la consommation ou l'apport en puissance réactive de l'élément mis en jeu. En effet, si le facteur de puissance est proche de 1, cette donnée nous permet de constater que l'élément étudié ne consomme pratiquement aucune puissance réactive, il ne consomme que de la puissance active.

Contrairement, si le facteur de puissance est proche de 0, cela nous permet de constater que cet élément consomme uniquement la puissance réactive. Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus grande qu'il se rapproche de 0.

Les valeurs approximatives de $\cos\varphi$ des principaux actionneurs consommateurs d'énergie réactive comme suit :

- Moteur asynchrone à 100% de charge : $\cos\varphi = 0.85$.
- Moteur asynchrone à 50% de charge : $\cos\varphi = 0.73$.
- Lampe à incandescence : $\cos\varphi = 1$.
- Lampe à fluorescence : $\cos\varphi = 0.5$.
- Chauffage par induction : $\cos\varphi = -0.5$.

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

Un bon facteur de puissance c'est $\cos\varphi$ plus élevé plus proche de 1 ou $tg\varphi$ est trop faible proche de 0, il permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation d'énergie réactive.
- La diminution de la puissance souscrite en KVA.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte –tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire. [4]

VII.2 Causes du mauvais facteur de puissance :

Dans une installation bien dimensionnée, un bon facteur de puissance est obtenu lorsque chaque machine consomme une puissance active proche de sa valeur nominale. Mais il reste toujours que cette installation consomme une certaine puissance réactive due au courant magnétisant des transformateurs et des moteurs asynchrones. Cette puissance est indépendante de puissance active consommée par l'élément de l'installation.

Maintenant, le mauvais facteur de puissance est obtenu lorsque la puissance active absorbée diminue, c'est-à-dire que les éléments de l'installation consomment des puissances actives loin de leurs valeurs nominales. Donc $\cos\varphi$ diminue, ce qui risque des pénalités pour le consommateur. [5]

En pratique, une mauvaise utilisation du matériel résulte souvent un mauvais facteur de puissance, à titre d'exemple ;

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

VII.3 Utilité de la puissance réactive :

La notion de puissance réactive est utilisé lorsqu'il existe un déphasage entre la tension et le courant qui traverse le récepteur, c'est-à-dire lorsque celui-ci comporte des inductances ou des condensateurs en régime sinusoïdale. Elle caractérise l'existence d'une composante du courant ($\bar{I}r$) qui ne donne lieu à aucun échange de puissance moyenne mais qui occasionne des pertes et des chutes de tension quand elle est transportée.

Mais la puissance réactive se révèle très utile voir indispensable dans l'exploitation des réseaux électriques quand elle est produite en un lieu stratégique (compensation). Toute machine électrique a besoin d'être excitée pour fonctionner (moteurs, générateurs, transformateurs), cette excitation est assurée par le courant réactif qui correspond à la puissance réactive.

Ainsi toute installation à facteur de puissance différent de zéro appelle en plus de sa consommation active une certaine puissance réactive. [6]

VII.4 Circulation de la puissance réactive et ses effets :

La circulation de l'énergie réactive a des influences importantes sur le choix des matériels et le fonctionnement des réseaux. Elle a, par conséquent, des incidences économiques.

En effet, pour une même puissance active P utilisée, la figure I.5 montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente ($S_2 > S_1$) que le $\cos\varphi$ est faible, c'est-à-dire que l'angle φ est élevé

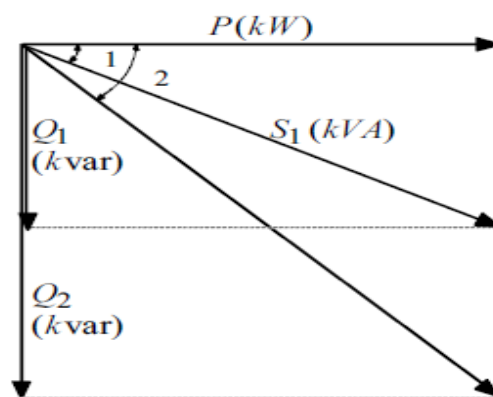


Figure I 5: Influence du $\cos\alpha$ sur la valeur de la puissance apparente.

De façon identique, sur la figure I.5, pour un même courant actif utilisé I_a (pour une tension constante U du réseau), il faut fournir d'autant plus de courant apparent ($I_2 > I_1$) que le $\cos\varphi$ est faible (l'angle φ est élevé).

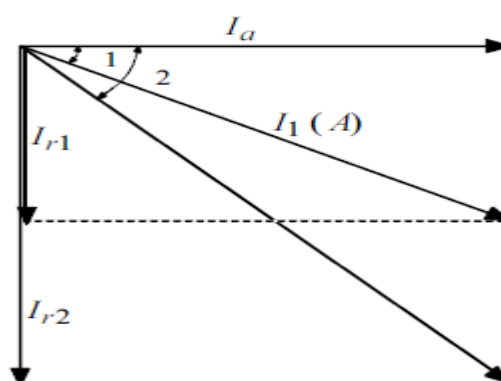


Figure I 6: Influence du $\cos\alpha$ sur la valeur du courant apparent.

Ainsi, en raison de l'augmentation du courant apparent, la circulation d'énergie réactive provoque :

- Des surcharges et des échauffements supplémentaires dans les transformateurs et les câbles qui ont pour conséquences des pertes d'énergie active (pertes joule).
- Des chutes de tension

Les conséquences de la circulation d'énergie réactive conduisent à surdimensionner les équipements électriques du réseau. [7]

VII.4.1 Pertes Joule:

Afin de déterminer les pertes joule engendrées par le transit d'une puissance réactive Q , on se propose à étudier le réseau monophasé illustré dans la figure I.7.

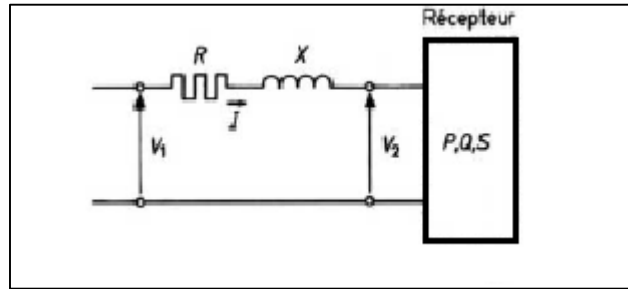


Figure I 7: Réseau monophasé.

Le réseau considéré est représenté par une résistance R en série avec une inductance X . l'ensemble fournit une puissance active P et échange une puissance réactive Q avec un récepteur monophasé.

Le courant circulant dans le réseau a une valeur efficace I égale :

$$I = \frac{S}{V_2} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V_2} \quad (\text{I.25})$$

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

S : puissance apparente consommée par le récepteur.

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

$$P_j = R \cdot I^2 = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{V_2^2} \quad (\text{I.26})$$

$$P_j = \frac{RP^2}{V_2^2} + \frac{RP^2 \cdot tg^2\varphi}{V_2^2} \quad (\text{I.27})$$

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

Pour le réseau triphasé on applique le même principe et on aura les résultats suivants :

$$P_j = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (\text{I.28})$$

En remplaçant la valeur efficace du courant par :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U_2} \quad (\text{I.29})$$

On obtient alors:

$$P_j = 3 \cdot R \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} U_2}\right)^2 = \frac{3 \cdot R \cdot (P^2 + Q^2)}{3 \cdot U_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{U_2^2} \quad (\text{I.30})$$

$$P_j = \frac{RP^2}{U_2^2} + \frac{RP^2 \cdot tg^2\varphi}{U_2^2} \quad (\text{I.31})$$

La partie des pertes joule qui est occasionnée par le transit de la puissance réactive est le terme :

$$\left(\frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{U_2^2}\right)$$

Le transport de la puissance réactive engendre des pertes joule considérable, d'où la nécessité de réduire au mieux le transport de cette puissance indispensable pour le fonctionnement des machines. [7]

VII.4.2 Chute 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. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel consommation et production sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte au nœud du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

Considérant maintenant sur la figure I.8 le schéma équivalent d'une ligne de transmission ; d'impédance complexe $Z = R + jX$, et destinée à alimenter la charge Z_c . La tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance : $S_2 = P_2 + jQ_2$

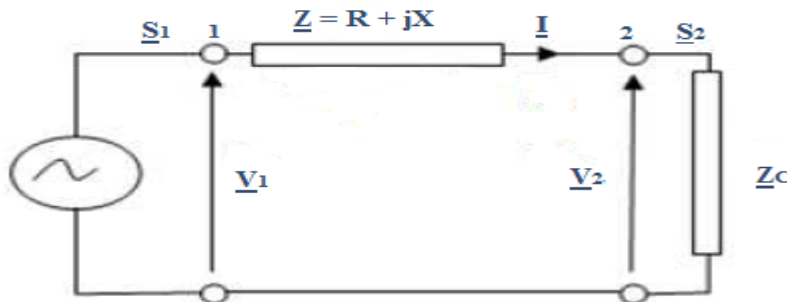


Figure I 8: Circuit équivalent du réseau électrique.

Les puissances apparentes :

$$S_1 = P_1 + jQ_1 \tag{I.32}$$

$$S_2 = P_2 + jQ_2 \tag{I.33}$$

La relation qui relie les tensions est donnée par :

$$V_1 = V_2 + R.I + jX.I \tag{I.34}$$

Le diagramme vectoriel des tensions est représenté sur la figure I.9

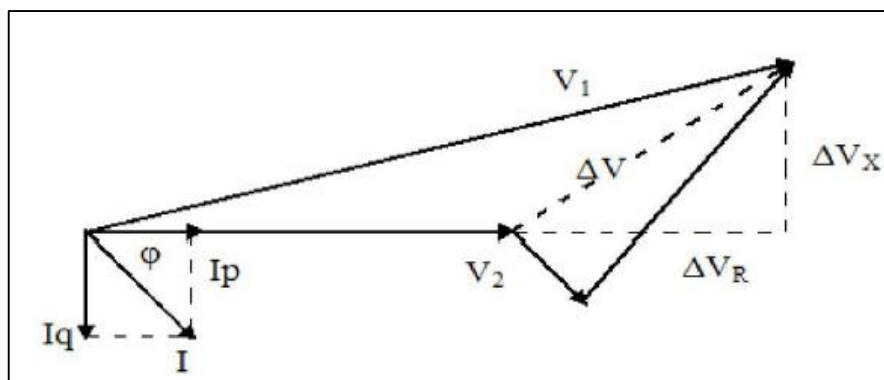


Figure I 9: Diagramme vectoriel des tensions.

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

$$\Delta V = V_1 \cos \varphi - V_2 \quad (\text{I.35})$$

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

$$\Delta V = R.I \cos \varphi + X.I \sin \varphi \quad (\text{I.36})$$

$$\Delta V = R.I \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + X.I \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi \quad (\text{I.37})$$

$$\Delta V = \frac{R.P_2 + X.Q_2}{V_2} \quad (\text{I.38})$$

On considère U étant la tension composée dans un réseau triphasé correspondante à V , P et Q les transits triphasés des puissances, on obtient alors l'écart relatif de tension :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2} \quad (\text{I.39})$$

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

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{X.Q}{U^2} \quad (\text{I.40})$$

Cette dernière relation montre bien que la chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par la charge. [7]

VII.4.3 Augmentation des investissements:

C'est par rapport au dimensionnement des installations ; l'intensité I du courant qui circule dans un élément de réseau triphasé est égale à :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q}}{\sqrt{3}U} \quad (\text{I.41})$$

La section des conducteurs (des lignes, des transformateurs) est définie par le courant admissible. Les transformateurs ou les câbles deviennent chers au fer et à mesure qu'ils ont de grandes caractéristiques en courant.

Nous allons considérer une compensation au bout de la ligne, en produisant la puissance réactive juste au point de consommation. L'intensité du courant sur la ligne sera réduite par une réduction de Q par conséquent la caractéristique en courant de la ligne ou du transformateur démunie et par suite le prix de revient.

Par ailleurs le courant admissible dans un élément de réseau étant limité par les échauffements thermiques, tout transit de puissance réactive réduit les possibilités de transport de puissance active. Pour satisfaire une même consommation de puissance active, il faut donc augmenter la capacité des matériels utilisés ou leurs nombre, ce qui se traduit par une augmentation des investissements. [7]

VII.4.4 Coté économique:

Le transit de l'énergie réactive à travers les réseaux de transport d'énergie n'arrange pas le distributeur. Etant donné que le courant admissible circulant dans un réseau est limité par des échauffements thermiques, tout transit de puissance réactive engendra une diminution du transport de la puissance active. Pour satisfaire une même consommation de puissance active, il faut augmenter la capacité et le nombre des matériaux utilisés, ce qui conduira à une augmentation des investissements. [7]

VIII- Principe de la compensation d'énergie réactive:

Les réseaux de transport et d'interconnexion en très hautes tension (THT) et haute tension (HT) permettent d'acheminer l'énergie électrique des centres de production jusqu'au consommateur à tout instant.

Précédemment nous avons vu que le transit de la puissance réactive engendre des perturbations (pertes joule et chutes de tension), or que cette puissance est indispensable pour faire fonctionner les machines et les transformateurs, il est donc nécessaire de produire l'énergie réactive auprès de la demande pour :

- Réduire les pertes joule et les chutes de tension.
- Permettre de transporter plus de puissance.
- Eviter le sur dimensionnement des réseaux. [8]

VIII.1 Les grands consommateurs d'énergie réactive :

a- Machines à excitation (générateurs et moteurs) :

Les machines fonctionnant avec l'électricité ont toujours besoin d'un courant magnétisant pour que le fonctionnement soit possible.

Le courant magnétisant n'est autre que la partie réactive du courant ($I_r = I \sin\phi$), il met en évidence la quantité d'énergie réactive demandée.

Le moteur asynchrone à rotor court-circuité peut être représenté en schéma simplifié comme un transformateur de puissance, d'où une consommation permanente et importante d'énergie réactive qui augmente avec le couple transmis.

b- Systèmes d'électroniques de puissance :

En électronique de puissance le facteur de puissance est différent du $\cos\phi$ car le régime est alternatif non sinusoïdal. Les systèmes d'électronique de puissance sont connus avec un facteur de puissance relativement mauvais, cela se traduit par une grande consommation de puissance réactive.

Nous pouvons citer en plus, les locaux informatiques et les consommations d'énergie réactive faites dans les ménages par les récepteurs à base d'électronique de puissance (lampes LBC et autres).

c- Industries :

- Les industries utilisant la force motrice (utilisant les moteurs asynchrones et autres pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique ou en chaleur) font intervenir de considérable consommation d'énergie réactive.
- Les industries métallurgiques comme les aciéries et les industries de chemin de fer (traction électrique) consomment eux aussi de grandes quantités de puissance réactive selon leur principe de fonctionnement. [10]

VIII.2 Compensation de l'énergie réactive des réseaux de transport :

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

➤ Caractéristiques des réseaux de transport et de répartition :

- Présence de groupes de production, raccordés pour la plus part au réseau THT, et qui constituent les sources de tension grâce aux forces électromotrices des alternateurs.
- Absence des clients raccordés directement au réseau HT, uniquement à travers des Transformateurs propres, ce type de consommateur dispose souvent de moyens de réglage de la tension sur leurs installations.
- Les réseaux THT et HT sont caractérisés par une structure maillée.
- Pertes et chutes de tension occasionnées essentiellement par le transit de la puissance réactive
- Sur les réseaux de transport et de réparation, on fait la compensation afin de réduire au minimum le transit de la puissance réactive et d'avoir un plan de tension aussi haut que possible ce qui va limiter les pertes joule tout en tenant compte de la tenue des matériaux (lignes, câbles, transformateurs). [9]

➤ Caractéristique des réseaux de distribution :

- Absence des groupes de production.
- Présence de clientèle raccordée directement au réseau basse tension.
- Les réseaux de distribution sont caractérisés par une structure arborescente
- Les pertes et les chutes de tension sont essentiellement occasionnées par le passage de la puissance active.

Sur les réseaux de distribution, l'objectif de la compensation est de maintenir la tension aussi proche que possible de la valeur admissible en vue de réaliser une bonne utilisation des équipements électriques.

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

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

Ainsi grâce à des condensateurs installés dans les postes HT/MT, le transit de la puissance réactive sur les réseaux de transport sera réduit par une compensation d'une grande partie de la consommation des charges. D'autre part grâce aux groupes ou inductances raccordées aux réseaux THT, les pertes réactives dans les ouvrages (lignes, câbles, transformateurs) sont compensées. [9]

VIII.3 Description de l'instabilité en tension :

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

Tout étant différent de l'état stable est dit instable. L'instabilité en tension est due au fonctionnement des régulateurs en charge lorsque la tension du réseau diminue au-dessous d'une certaine valeur critique. Ce phénomène se produit lorsque le réseau est très chargé, en raison des chutes de tension occasionnées par le transit des puissances active et réactive. [8]

VIII.4 Phénomène d'écroulement de la tension :

En pratique, la diminution de l'impédance de charge peut être le résultat soit d'une augmentation de la consommation de puissance, soit après la mise en action du régulateur en charge du transformateur pour modifier le rapport de transformation afin d'élever la tension de la charge.

En effet, quand la tension aux bornes de la charge baisse, pour la relever le régulateur en charge entre en action pour changer le rapport de transformation ; cette baisse d'impédance engendre des chutes de tension supplémentaires du côté primaire. Au côté secondaire, deux actions à effets inverses arrivent en même temps : la première a l'effet d'une augmentation de tension provoquée par le changement de prise du régulateur et la deuxième a l'effet d'une baisse de tension coté primaire provoquée par les chutes de tension.

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

Les grandeurs, tension et de la puissance transmissible, peuvent également être représentées par les courbes des figures I..., qui donnent l'évolution de la tension de la charge en fonction de la puissance transmise. [8]

IX- Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons voulu mettre en évidence d'une part à travers les notions de puissances : la puissance réactive et l'importance du facteur de puissance (qui définit la consommation de puissance réactive) en exploitation des réseaux électriques ; d'autre part de faire paraître les raisons de compenser l'énergie réactive.

Le transport de puissance réactive à travers les réseaux de transports entraîne des pertes joules, des chutes de tension et une augmentation des investissements, l'exploitant est contraint de réduire le transport de puissance réactive. Par ailleurs le besoin d'énergie réactive est marqué par la consommation des charges ou du réseau : un point du réseau qui a un mauvais facteur de puissance présente des inconvénients mais cela peut être corrigé par l'apport de puissance réactive en ce point. Ainsi pour satisfaire à ce besoin de puissance réactive en évitant en même temps le transport de la puissance réactive on la compense.

Chapitre II
Moyens de
Compensation
d'Énergie Réactive

I- Introduction:

Les dispositifs de compensation sont constitués soit par des machines tournantes, soit par des condensateurs. Ces condensateurs élémentaires sont regroupés en série ou en parallèle pour constituer des batteries de condensateurs. L'association des condensateurs et de bobines d'inductances commandés par des thyristors permet de réaliser des systèmes statiques, capables de produire ou d'absorber de la puissance réactive de manière continue entre deux limites.

II- Batteries de condensateurs:

II.1 Présentation:

Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économiques et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans les réseaux publics. Les moteurs synchrones peuvent également fournir de l'énergie réactive mais leur fonction principale, la force motrice, n'est pas toujours compatible avec la demande instantanée de puissance réactive. Les batteries de condensateurs fournissent une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau. [11]

II.2 Les modes de compensation par batteries :

Dans une installation électrique les batteries de condensateurs peuvent être implantées à trois niveaux différents :

A. La compensation globale :

Ce type de compensation convient pour une installation simple de moyenne puissance ; la batterie de condensateur est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la période de facturation de l'énergie réactive pour un fonctionnement normal du site. Cette compensation représente l'avantage de :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Représenter la solution la plus économique parce que toute la puissance est concentrée en un point et le coefficient de foisonnement permet des batteries bien optimisées.

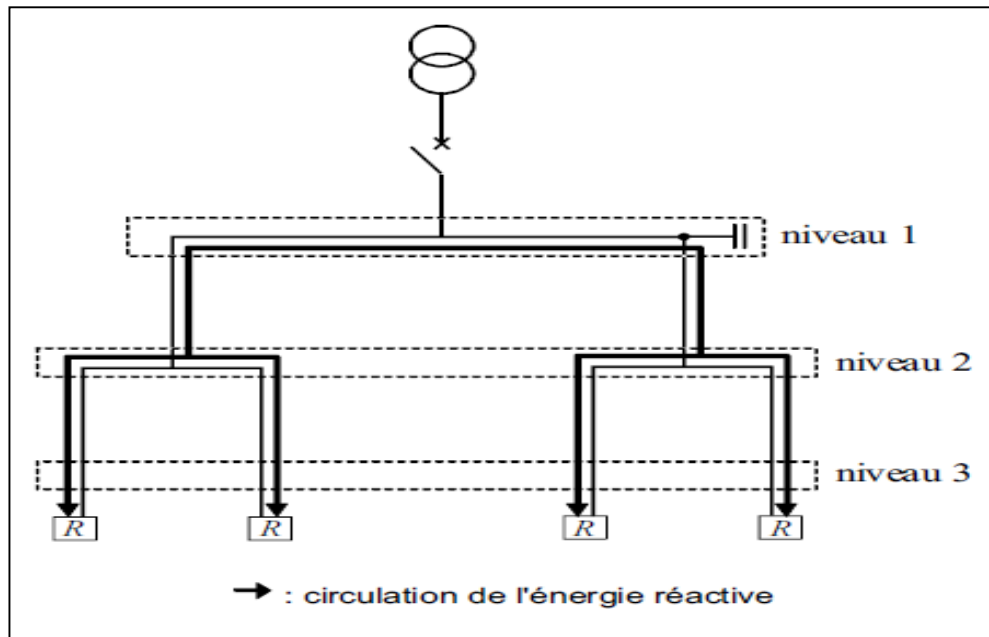


Figure II 1: Compensation Globale. [11]

B. Compensation partielle ou par secteur :

Les condensateurs sont installés en tête du secteur d'installation à compenser. Elle convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

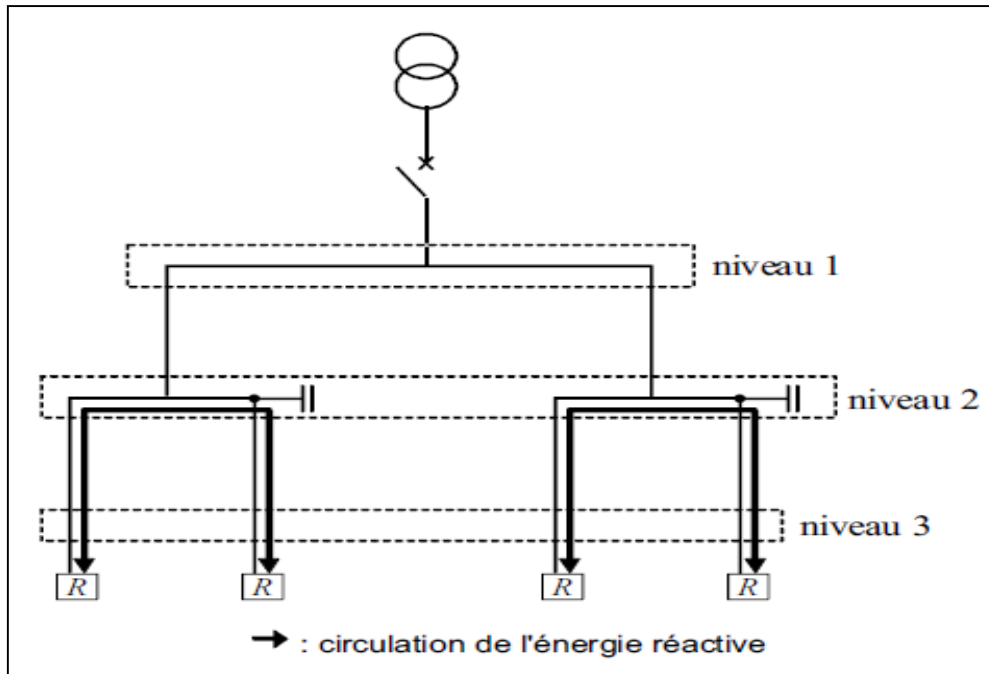


Figure II 2: Compensation Partielle. [11]

C. Compensation Individuelle :

La batterie de condensateur est raccordée directement aux bornes de récepteurs. Elle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur. Cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins. C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantages mais qui est le plus coûteux. Un complément en tête de l'installation peut être nécessaire au niveau du transformateur.

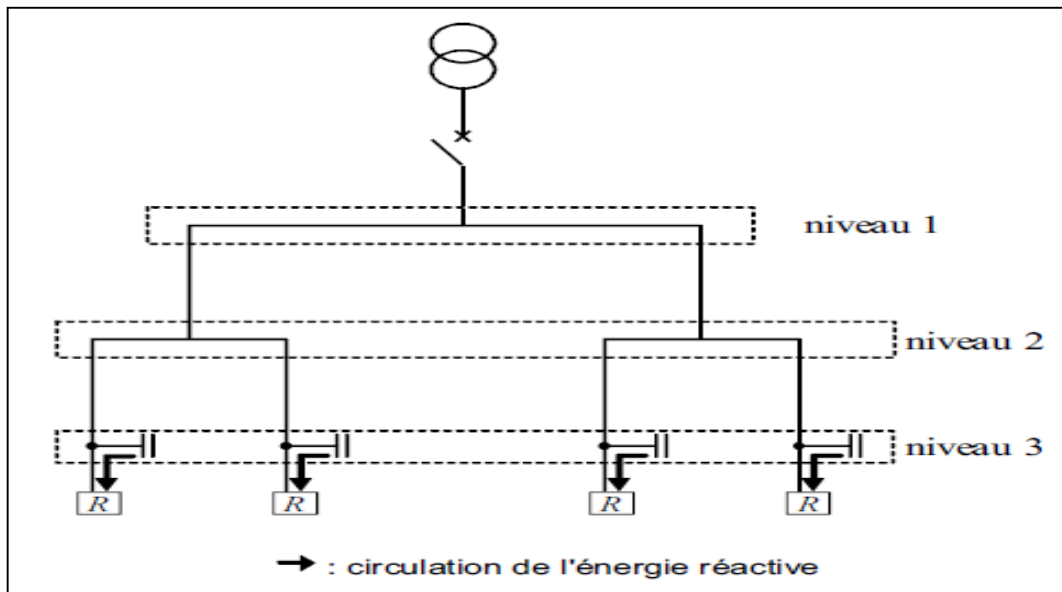


Figure II 3: Compensation individuelle. [11]

II.3 Constitution de la batterie de condensateurs :

Chaque élément est formé de feuilles d'aluminium entre lesquelles est inséré un ensemble de trois ou quatre feuilles d'un papier spécial imprégné d'huile minérale, le tout est plié en accordéon ou enroulé. Dans le premier cas, l'élément est parallélépipédique, dans le second il est cylindrique.

Ces éléments sont disposés en séries puis en parallèle et sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile susceptible d'assurer le refroidissement. Cela constitue une unité, ces unités peuvent aussi être associées en série, en parallèle, en triangle ou en étoile.

Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt. Dans ce qui suit, nous allons donner ces deux types d'installation. [12]

II.4 Type d'installation:

a-Installation série :

L'installation des batteries de condensateurs en série permet de compenser les chutes de tension sur les longues lignes de transport d'énergie réactive (THT et HT). En diminuant la réactance effective de la ligne, la capacité de transit de la puissance active peut être augmentée en diminuant les chutes de tension. Considérons les calculs de la puissance de la batterie de condensateur à installer afin de compenser la chute de tension sur un réseau. La figure II.4 montre un modèle de réseau sur lequel un condensateur série est installé.

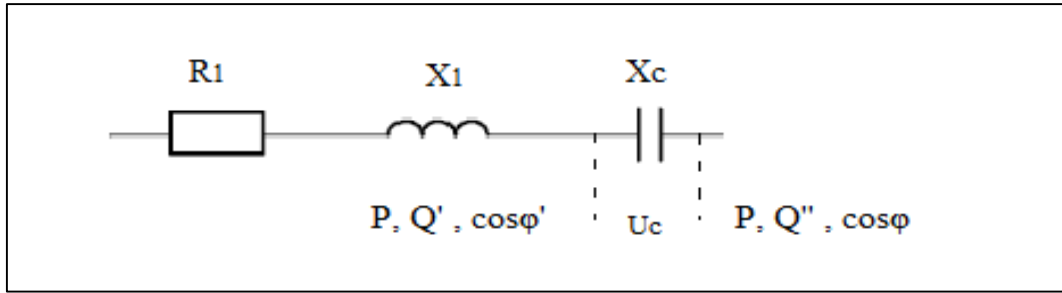


Figure II 4: Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur. [12]

La puissance active P est considérée constante avant et après le condensateur, par contre les paramètres Q', U' et $\cos\phi'$ sont considérés à l'amont ; Q'', U'' et $\cos\phi''$ à l'aval du condensateur. Nous avons alors la puissance compensée : [12]

$$Q_c = \frac{P}{\cos\phi} \left(\sin\phi - \sqrt{1 - \left(\frac{U''}{U'}\right)^2 \cos^2\phi} \right) \quad (\text{II.1})$$

b- Installation shunt :

Considérons maintenant le schéma de la figure II.5 qui représente un jeu de barres de puissance ($P + jQ$) alimentant une charge à travers une ligne, les deux sont représentées par une seule impédance ($R + jL\omega$). La charge est supposée de mauvais facteur de puissance, d'où l'installation d'une batterie de condensateurs shunt de puissance ($j Q_c$).

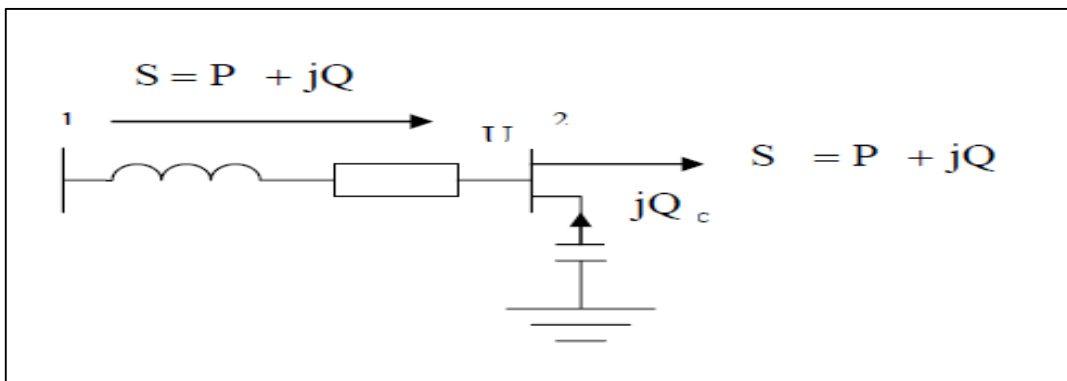


Figure II 5: Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre. [12]

II.5 Raccordement des condensateurs au réseau :

La figure II.6, représente le schéma de branchement d'un condensateur série à travers des disjoncteurs. P étant un parafoudre pour assurer la protection et le transformateur TT permet la mise à la terre des charges partielles après le débranchement du condensateur.

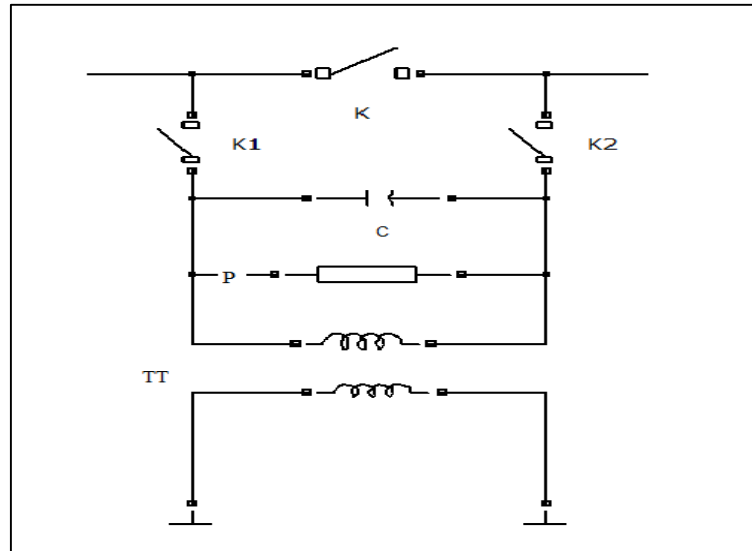


Figure II 6: Schéma de branchement d'un condensateur série et parallèle. [13]

Les condensateurs shunt sont habituellement couplés en triangle avant d'être raccordés au réseau. Le choix du système triangle est fait pour des raisons économiques ; la puissance produite par des condensateurs en triangle est trois fois plus importante que la puissance produite par les mêmes condensateurs couplés en étoile.

Le tableau II.1 donne les différents couplages des condensateurs shunt.

Couplage	Etoile(Y)	Triangle (Δ)	comparaison
Impédance $3\sim(Xc)$ des condensateurs	$X_{cy} = \frac{V}{I}$	$X_{c\Delta} = \frac{3V}{I}$	$X_{c\Delta} = 3X_{cy}$
Puissance (Q) des condensateurs	$Q_y = 3VI \sin \varphi$	$Q_{\Delta} = \sqrt{3}UI \sin \varphi$	$Q_y = Q_{\Delta}$

Tableau II. 1: Différents couplages des condensateurs shunt.

La figure ci-dessous représente un gradin de condensateurs couplés en étoile sur une ligne triphasé :

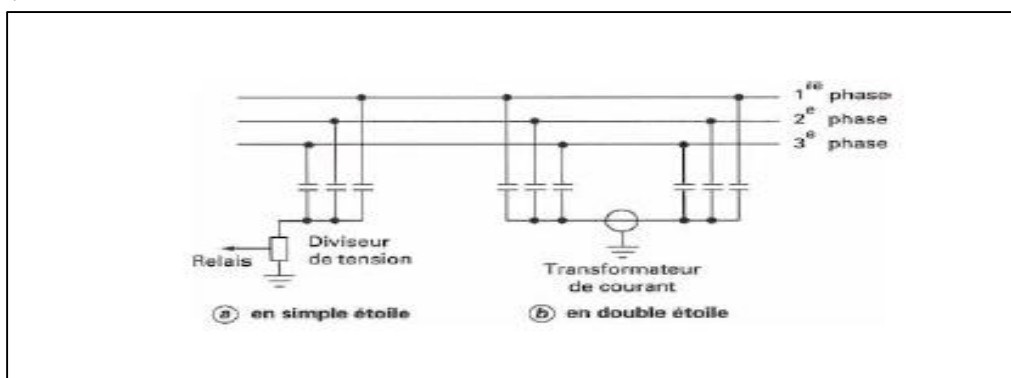


Figure II 7: Schéma de couplage de condensateur shunt. [13]

Les batteries de condensateurs peuvent être raccordées en étoile, mais dans ce cas, le problème de surtension survient en cas de varie d'une phase.

- **Avantage des batteries de condensateurs :**

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

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

- **Inconvénients des batteries de condensateurs :**

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

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

III- Inductances:

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

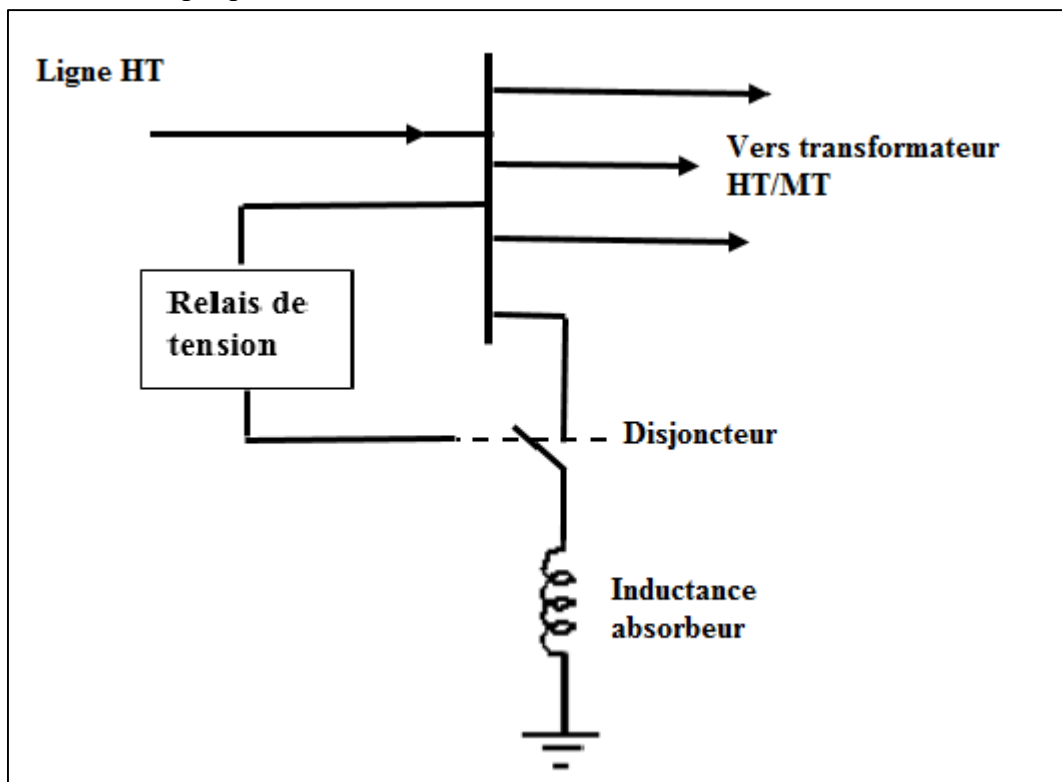


Figure II 8: Schéma de montage d'un absorbeur sur un jeu de barres HT. [13]

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

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

IV- Compensateurs synchrones:

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

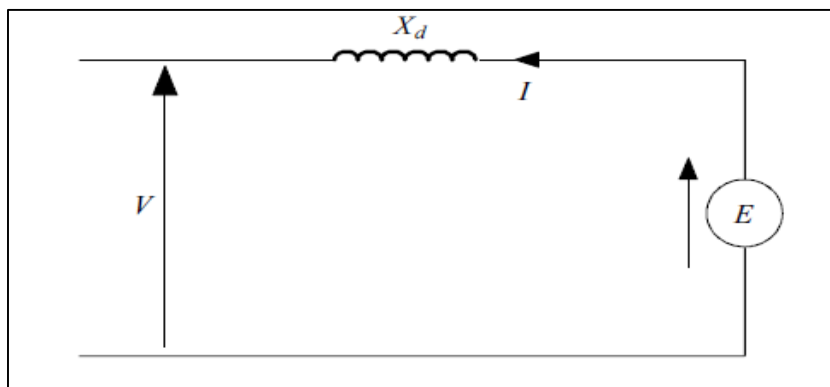


Figure II 9: Schéma équivalent de la machine synchrone. [13]

D'après la théorie de Potier, le modèle simplifié d'une machine synchrone est représenté sur la figure II.9 par une source de tension E en série avec une inductance

$$X_d = (R \ll X_d). \quad (\text{II.2})$$

De la figure II.9, on tire l'équation des tensions suivante :

$$\bar{E} = \bar{V} + jX_d \bar{I} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

E , f e m due à l'excitation du compensateur synchrone.

V , tension du réseau ;

X_d , réactance de fuite de compensateur synchrone ;

I , courant échangé avec le réseau ;

La puissance active consommée par le condensateur est :

$$P = 3VI \cos \varphi \quad (\text{II.4})$$

La puissance réactive aussi est :

$$Q = 3VI \sin \varphi \quad (\text{II.5})$$

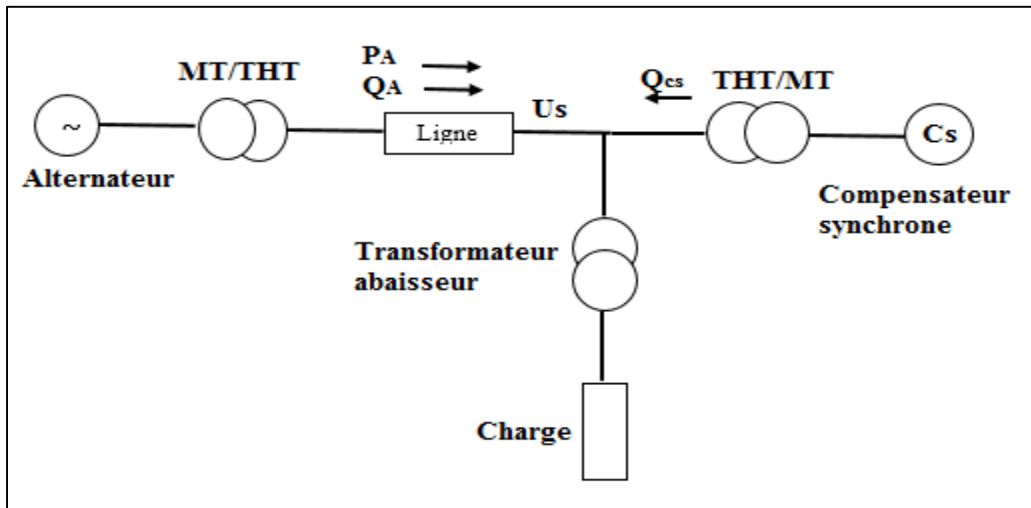


Figure II 10: Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau. [13]

Le raccordement du compensateur synchrone au réseau se fait à travers un transformateur survolteur comme le montre la figure II.10 ; le compensateur est branché à côté de la charge pour réduire la portée du transit de la puissance réactive.

V- Groupe thermique et hydraulique:

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

Plusieurs zones de limitation de fonctionnement sont à prendre en considération en raison de :

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

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

La modification de la production d'énergie réactive dans un groupe s'effectue en quelques dixièmes de seconde seulement. Il peut donc faire face aux fluctuations brusques de la demande. Cette performance dynamique fait du groupe un moyen accompli de compensation d'énergie réactive dans les réseaux de transport.

Mais il reste qu'il ne crée par les transits de l'énergie réactive dans les réseaux. L'alternateur étant une machine synchrone, on a donc utilisé le schéma équivalent de la figure précédente.

L'expression de la force électromotrice interne de l'alternateur est :

$$\bar{E} = V_s + jX_d \bar{I} \quad (\text{II.6})$$

L'expression de la puissance active produite par l'alternateur est :

$$P = \frac{3V_s}{X_d} \cdot E \sin \delta \quad (\text{II.7})$$

L'expression de la puissance réactive absorbée ou fournie par l'alternateur est :

$$Q = \frac{3 \cdot E \cdot V_s}{X_d} \cos \delta - \frac{3V_s^2}{X_d} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

E : Force électromotrice interne

I : Courant statorique.

P : Puissance active fournie par l'alternateur.

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

V_s : Tension aux bornes du stator.

δ : Angle interne.

X_d : Réactance de l'alternateur.

φ : Angle de phase.

P_n, Q_n, E_n, φ_n : Valeurs nominales.

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

Si $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$, l'alternateur fournit de la puissance réactive.

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

VI- Compensateurs Statiques d'Energie Réactive (dispositifs FACTS):

VI.1 Concept FACTS : un projet EPRI.

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

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

Les transits de la puissance réactive ont des effets directs sur le niveau de tension dans le réseau. Un transit de puissance non contrôlé, peut causer une instabilité en tension en raison des chutes de tension et des pertes joule occasionnées.

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

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

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

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (\text{II.9})$$

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

Le contrôle de ces paramètres se fait par les moyens de la compensation statique. Le mot statique est relatif à l'absence d'éléments tournants parmi ses dispositifs qui sont constitués d'ensemble de condensateurs et d'inductances commandés par thyristors. Parmi les dispositifs FACTS les plus utilisés on peut citer quelques types. [14]

VI.2 Quelques dispositifs de type FACTS :

VI.2.1 Les Condensateurs Commutés par Thyristors :

➤ TSC : Thyristor Switched Capacitor

Le condensateur n'est pas commandé en phase mais simplement enclenché et déclenché un nombre entier de 1/2 périodes. Grâce à la précision du réglage de l'instant de mise en conduction des thyristors, la plupart des phénomènes transitoires sont supprimés. La puissance réactive injectée n'est pas modulable, on va moduler cette puissance grâce à une inductance réglable.

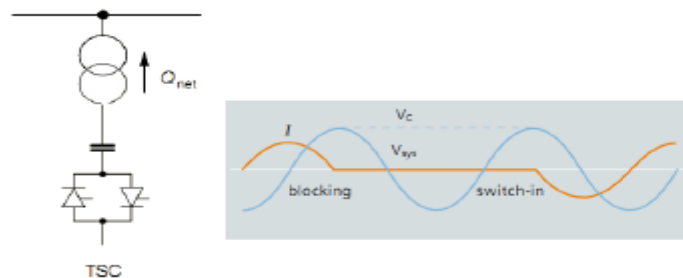


Figure II 11: Présentation d'un TSC. [15]

➤ TCR : Thyristor Controlled Reactor

Le TCR ne peut absorber que l'énergie réactive, puisque il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristor tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins de demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

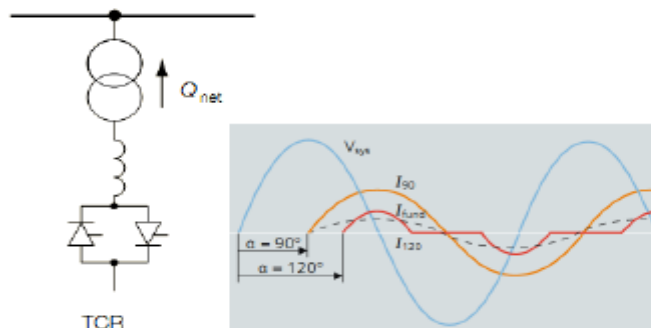


Figure II 12: Présentation d'un TCR. [15]

Pour les angles supérieurs à 90°, ce dispositif génère des harmoniques. On ajoute des filtres harmoniques.

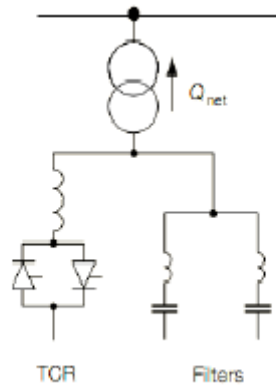


Figure II 13: Présentation d'un TCR avec filtres harmoniques. [15]

VI-2-2 Compensateur Statique de Puissance Réactive: (SVC: Static Var Compensator)

On arrive alors à la structure suivante :

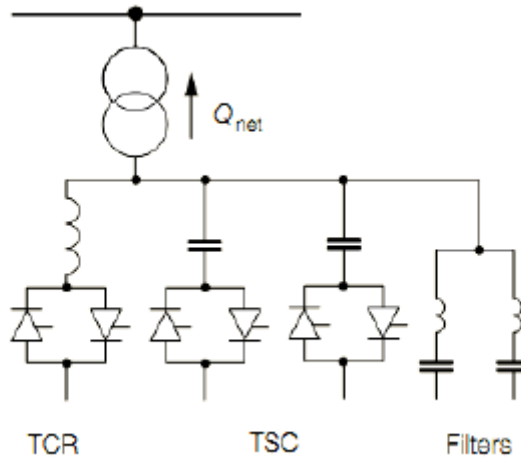


Figure II 14: Structure d'un SVC

Chaque branche du TSC permet d'injecter la puissance réactive Q_c . Le TCR absorbe la puissance réactive Q_L ajustable de $Q_{Lmax}(= -Q_c)$ à 0. Ainsi on peut ajuster graduellement la puissance réactive injectée de 0 à $2Q_c$.

De plus, lorsque les TSC sont déclenchés et en commandant simplement le TCR, ce compensateur absorbe de la puissance réactive. Cela permet, lorsque le réseau est peu chargé, d'éviter les remontées en tension sur les lignes. [16]

VI-2-3 Compensateur Synchrone Statique: (STATCOM: Static Synchronous Compensator)

Le STATCOM est composé d'une source d'énergie continue, ou d'un condensateur, associé à un convertisseur statique à base de semi-conducteurs du type IGBT. Ce convertisseur permet de régler le niveau V_s de la tension en sortie du convertisseur et maintenir le courant de sortie I_s en quadrature avec V_s .

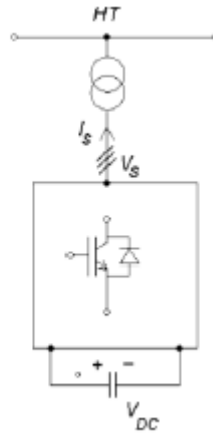


Figure II 15: Structure d'un STATCOM [17]

VI-2-4 Condensateur Série Commandé par Thyristors: (TCSC: Thyristor Controlled Serie Condensator)

En déviant, du courant I_C qui traverse le condensateur, une partie I_V dans une bobine commandée par des thyristors, on obtient un condensateur de capacité réglable :

$$X_C = U_C / U_L$$

La structure est la suivante :

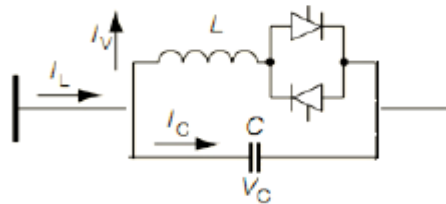


Figure II 16: Structure TCSC.

L'impédance de la ligne est réglable. On peut répartir les flux de puissance entre les lignes des réseaux maillés afin d'y minimiser les pertes. [17]

VII- Conclusion

Plusieurs moyens sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive, certains participent à la stabilité des systèmes compensés, d'autres au contraire créent de nouvelles contraintes au système.

Le choix du moyen de compensation doit répondre aux exigences fixées dès le départ et atteindre aussi l'objectif de compensation, de régulation ou du maintien de la tension proche des conditions idéales de fonctionnement.

Ces moyens utilisés pour la compensation de l'énergie réactive sont différents dans leur conception et leurs performances. L'évolution technique des charges et l'accroissement du niveau de consommation énergétique des abonnés, imposent plus de rapidité lors des échanges de l'énergie réactive. D'où, l'application de moyens à performances dynamiques avancées tels que les systèmes FACTS.

Chapitre III
Compensateurs Statiques
de Puissance Réactive (SVC)

I- Introduction:

Le compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif statique qui, sans composants tournants, est connecté en shunt à un nœud du réseau électrique. Contrôlé par des thyristors, le SVC peut absorber ou générer de la puissance réactive en fonction des besoins du réseau. Dans ce chapitre, on donnera les schémas et le fonctionnement du SVC conventionnel, les modélisations statique et dynamique et les diverses applications du SVC, ainsi que ses avantages et inconvénients. [18] [19]

II- Schéma et fonctionnement du SVC:

II.1 Schéma du SVC:

Le SVC conventionnel est constitué de deux éléments principaux connectés en parallèle : Un Condensateur commandé par thyristors (TSC «Thyristor Switched Capacitor») et d'une Réactance commandée par thyristors (TCR «Thyristor Controlled Reactor») .

Le SVC est relié au réseau électrique via un transformateur. La Figure 1 illustre le schéma type d'un SVC conventionnel.

Cette configuration hybride de condensateur et de réactance commandés électroniquement permet au SVC de réguler de manière flexible la puissance réactive injectée ou absorbée, en fonction des besoins du réseau. [19] [20]

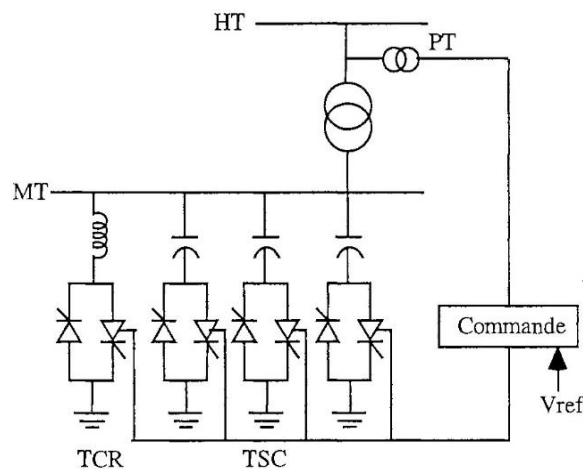


Figure III. 1: Schéma Type d'un SVC.

La combinaison d'un SVC avec des condensateurs fixes (FC «Fixed Capacitors») ou des condensateurs à commutation mécanique (MSC «Mechanically Switched Capacitor») conduit à la formation de systèmes de compensation statique de puissance réactive (« Static Var Systems »).

II.2 Réactance Commandée par Thyristors (TCR)

Les composants essentiels d'un TCR comprennent une inductance en série avec deux thyristors en tête-bêche, comme illustré dans la Figure II.2.

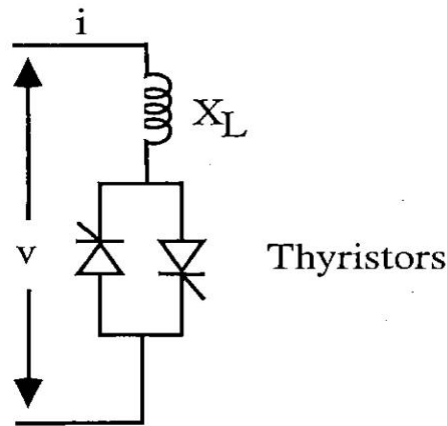


Figure III. 2: Réactance Commandée par Thyristors (TCR)

Les thyristors permettent la conduction du courant par demi-périodes en fonction de l'angle de commande (α), mesuré à partir du point de passage par zéro de la tension. Ainsi, une conduction totale est réalisée lorsque $\alpha=90^\circ$, tandis qu'une conduction partielle est obtenue pour des valeurs de α entre 90° et 180° .

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (\text{III.1})$$

De cette façon, le courant est :

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} \sin(\cos(\alpha) - \cos(\omega t)) & \text{pour } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \text{pour } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Où X_L est la réactance de l'inductance,

La composante fondamentale du courant (I_1) est donnée par :

$$I_1 = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \sin(\sigma)}{\pi} \quad (\text{III.3})$$

L'augmentation de l'angle α entraîne une diminution de la composante fondamentale I_1 . Cela se traduit par une hausse de la valeur effective de l'inductance.

Ainsi, la valeur effective de la susceptance est déterminée par cette variation de l'inductance en fonction de l'angle α .

$$B(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi X_L} \quad (\text{III.4})$$

La commande l'inductance de cette manière est connue sous le nom de commande de phase.

Ce dispositif de commande est essentiel pour le TCR afin de modifier l'angle de déclenchement des thyristors. La caractéristique tension courant (V-I) de régime permanent du TCR est représentée par la Figure III.3.

Cette caractéristique est décrite par l'équation suivante :

$$V = V_{ref} + X_{sl} + I_1 \quad (\text{III.5})$$

Où X_{sl} est la pente de la caractéristique.

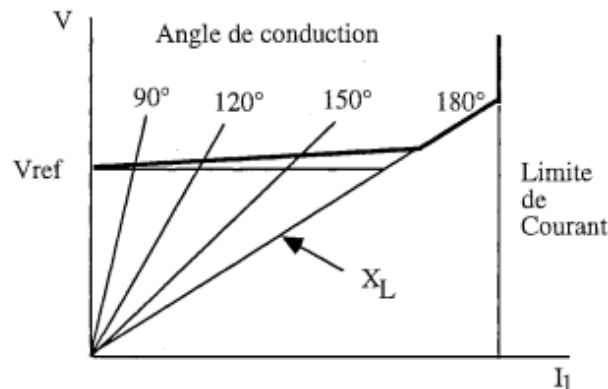


Figure III. 3: Caractéristique V-I du TCR.

Comme l'angle de commande α des thyristors varie (de 90° à 180°), le courant devient moins sinusoïdal, ce qui entraîne la génération d'harmoniques. Si les deux thyristors ont le même angle de commande α , seules les harmoniques impaires seront générées. Pour les systèmes triphasés, les TCR sont généralement connectés en triangle (a - schéma à 6-impulsions), permettant d'éliminer les harmoniques du courant de ligne. Un autre couplage utilisé est le schéma 12-impulsions.

Le temps de réponse pour faire varier les angles de commande des thyristors dans un TCR est compris entre 5 et 10 ms. [19] [20]

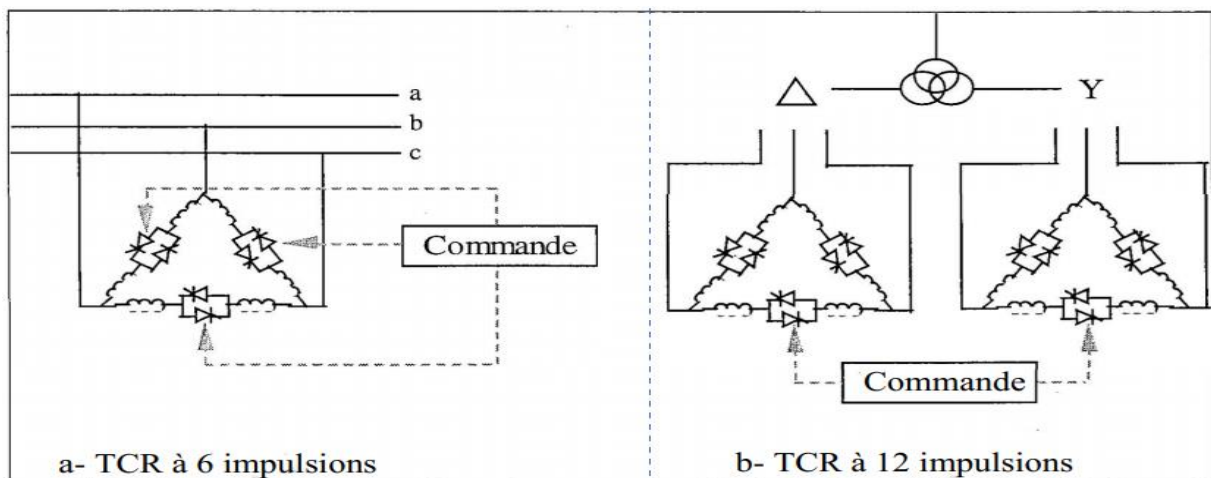


Figure III. 4: TCR Triphasées

II.3 Condensateur Commandé par Thyristors (TSC) :

Le TSC est un dispositif composé d'un ensemble de condensateurs commandés par des thyristors. Il inclut également une petite inductance connectée en série avec les condensateurs pour limiter les surtensions transitoires et prévenir les effets de résonance avec le réseau, comme illustré dans la (Figure III.5a). Le TSC utilise les mêmes configurations de couplage que le TCR (6-impulsions ou 12-impulsions). En général, la susceptance requise est répartie sur plusieurs TSC connectés en parallèle, comme représenté dans la (Figure III.5b). [20]

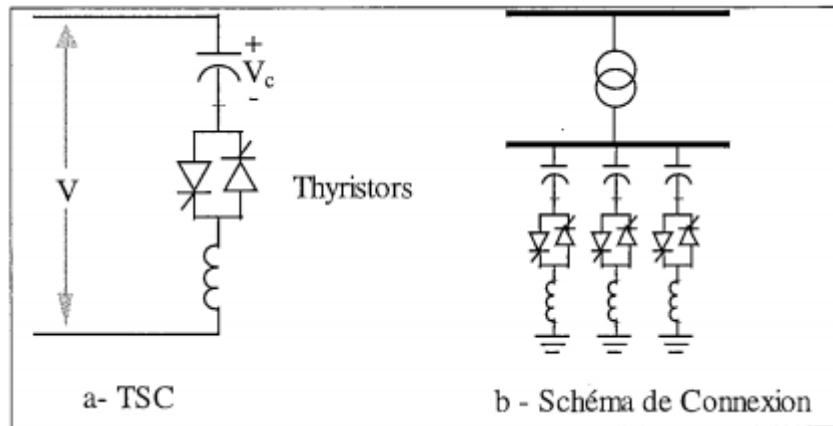


Figure III. 5: Condensateur Commandé par Thyristors (TSC) et Schéma de Connexion.

Lorsque la tension s'écarte de la bande morte autour de la tension de référence, le système de commande des TSC connecte ou déconnecte un ou plusieurs bancs de condensateurs. Ce processus permet d'obtenir la caractéristique tension-courant (V-I) du TSC représentée par la (Figure III.6).

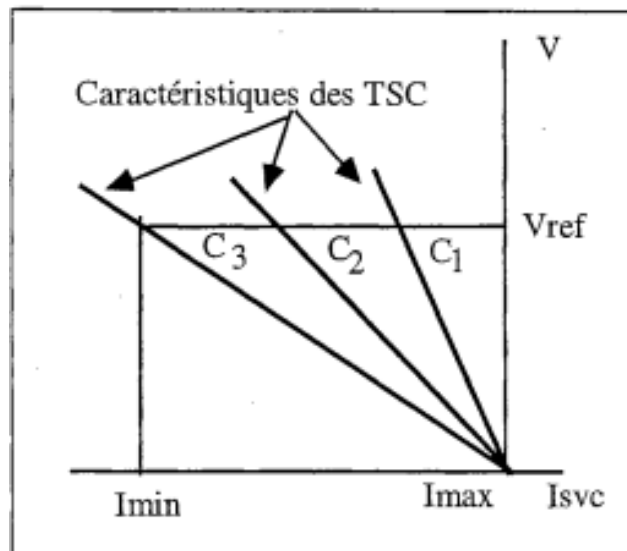


Figure III. 6: Caractéristique V-I du TSC.

II.4 Fonctionnement du SVC:

Un SVC conventionnel est composé d'une réactance (TCR) et de plusieurs condensateurs (TSC), comme illustré dans la Figure III.1.

La caractéristique tension-courant (V-I) du SVC résulte de l'agrégation des caractéristiques individuelles du TCR et des TSC.

Comme le montre la Figure II.7, le SVC conventionnel présente trois zones de fonctionnement :

- La zone de régulation, où ($V_{min} < V < V_{max}$; $I_{min} < I < I_{max}$). C'est la plage de fonctionnement où le SVC peut réguler la tension en injectant ou en absorbant de la puissance réactive.
- La zone de génération maximale de puissance réactive, correspondant à la limite supérieure de fonctionnement du SVC.
- La zone d'absorption maximale de puissance réactive, correspondant à la limite inférieure de fonctionnement du SVC.

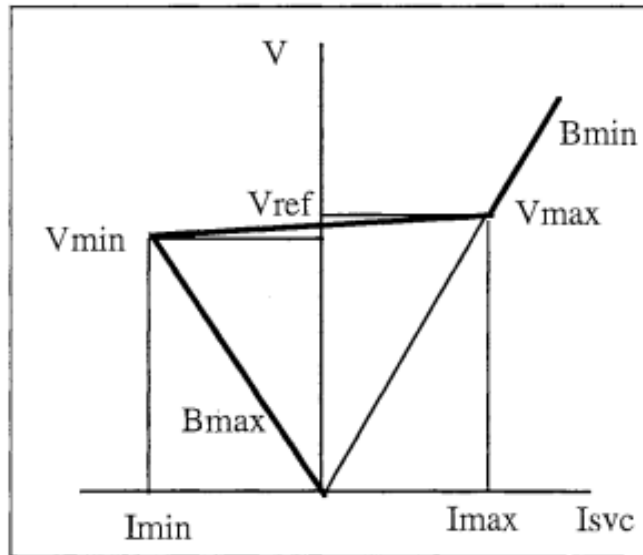


Figure III. 7: Caractéristique Fondamentale du SVC.

Ces limites sont données en fonction de la susceptance capacitive totale des condensateurs (B_C) et de la susceptance maximum de l'inductance (B_{LMX}).

$$B_{max} = B_C \Rightarrow Q = -B_{max}V^2 \tag{III.6}$$

$$B_{min} = B_C - B_{LMX} \Rightarrow Q = -B_{min}V^2 \tag{III.7}$$

La caractéristique V-I dans la zone de commande est donnée par l'équation suivante :

$$V = V_{ref} + X_{SL}I_{SVC} \tag{III.8}$$

En général, la réactance X_{SL} , qui représente la pente de la caractéristique, est habituellement située entre 1% à 5%.

Pour mieux expliquer le fonctionnement du SVC dans le réseau électrique, on peut simplifier en utilisant une courbe V-I. au nœud où le SVC est installé, le système peut être modélisé par son équivalent de Thevenin (E_{TH}, X_{TH}), comme illustré dans la (Figure III.8).

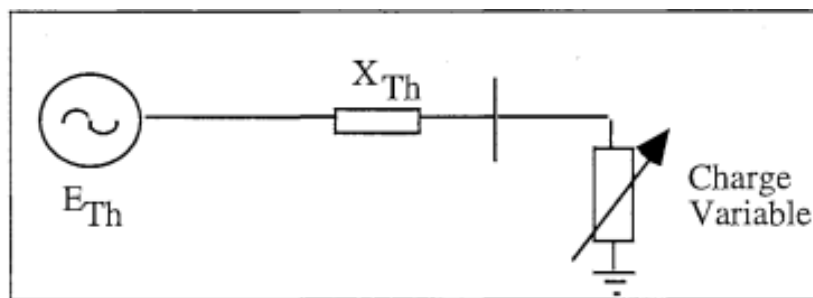


Figure III. 8: Réseau Equivalent.

La caractéristique V-I du réseau est influencée par la nature réactive variable de la charge à ce nœud. La tension augmente de manière linéaire en fonction de l'augmentation de la charge capacitive et décroît de façon linéaire avec l'augmentation de la charge inductive, comme représenté dans la Figure III.9. De ce fait, la caractéristique V-I est donnée par l'équation :

$$V = E_{th} - X_{th}I_s \tag{III.9}$$

Toute variation de la tension équivalente du système (E_{th}) représente une caractéristique V-I parallèle à la caractéristique initiale.

Lorsqu'un SVC est positionné au nœud de charge, il effectue une commande de la tension. Ainsi, en cas d'augmentation de la tension E_{th} (par exemple, due à une diminution de la charge du système), la caractéristique du système évolue, passant de la courbe aa' à bb' , comme illustré dans la Figure III.9. En l'absence de SVC, la nouvelle tension serait V_1 , tandis qu'avec le SVC, le point de fonctionnement se déplace en **B** (intersection des caractéristiques du système et du SVC) grâce à l'absorption de courant par l'inductance (absorption de puissance réactive).

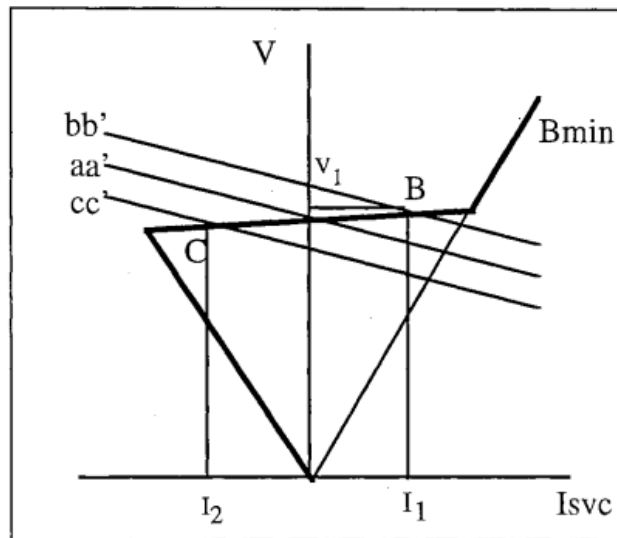


Figure III. 9: Fonctionnement du SVC.

Si la tension équivalente E_{th} diminue, par exemple à cause d'une augmentation de la charge du système, la nouvelle caractéristique de tension sera représentée par la courbe cc' (dans la Figure III.9). Dans ce cas, le nouveau point de fonctionnement sera le point C, à cause de la génération de puissance réactive par le SVC.

Ainsi, lorsque la tension équivalente du réseau diminue, le SVC injecte de la puissance réactive pour maintenir la tension à un niveau acceptable. Le point de fonctionnement se déplace alors de la courbe aa' à la courbe cc' , avec le nouveau point d'équilibre en C. Cette capacité du SVC à ajuster dynamiquement la puissance réactive injectée ou absorbée permet de réguler la tension du réseau, même en cas de variations de la charge.

II.5 D'autres SVC:

En plus du SVC conventionnel (TSC et TRC), il existe d'autres appareils, le MSC («Mechanically Switched Capacitor») et le MSR («Mechanically Switched Reactor»). L'ensemble forme les SVS («Static VAR Systems»). La Figure III.10 montre ces deux types d'appareils ainsi que leur caractéristique V-I. [19]

La différence entre le MSC et le TSC est principalement due au système de connexion et de déconnexion du condensateur. L'interrupteur utilisé pour le TSC est basé sur des thyristors, ce qui permet une vitesse de fonctionnement de 1/2 à 1 cycle. En revanche, l'interrupteur utilisé pour le MSC est mécanique, ce qui prend environ 100 ms pour fonctionner.

En plus de la différence de vitesse de fonctionnement des interrupteurs du MSR et du TCR (système mécanique contre système à thyristors), il existe une autre distinction importante liée aux amplitudes de variation de la réactance. Dans le MSR, la réactance ne peut prendre que deux

valeurs de fonctionnement : 0 ou la valeur totale de la réactance (X_M). En revanche, pour le TCR, la réactance peut varier entre plusieurs valeurs comprises entre 0 et X_M , offrant ainsi une plus grande flexibilité dans le contrôle de la puissance réactive du système.

Le SVC saturable (SR - Saturable Reactor) est un autre type de SVC généralement conçu avec un réacteur à noyau de fer à neuf branches pour neutraliser les harmoniques triples. Il utilise des condensateurs en série et en parallèle pour ajuster la réactance et fournir un support de tension capacitif, et peut fonctionner efficacement sous des conditions de tension symétriques.

L'élément de base est un circuit magnétique avec une caractéristique V-I non-linéaire (voir Figure III.11a). Pour obtenir la caractéristique V-I de la (Figure III.11b) il est nécessaire d'ajouter un condensateur en parallèle à la réactance saturable.

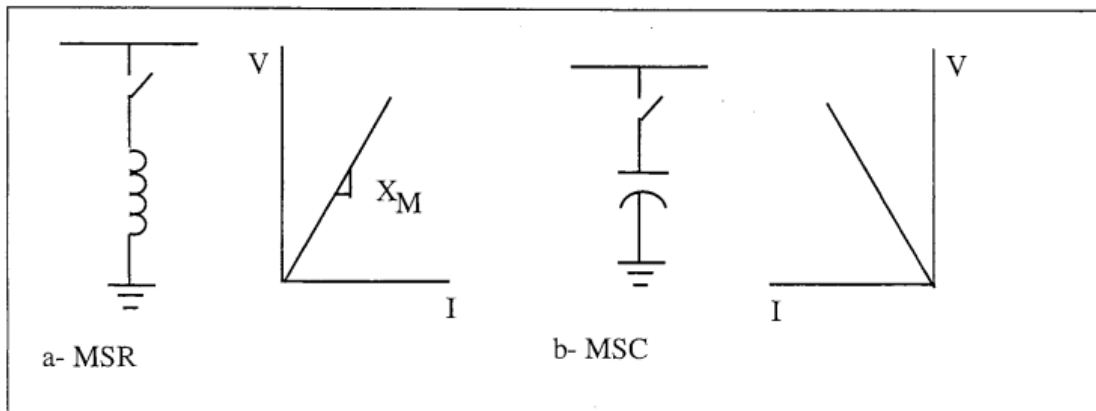


Figure III. 10: MSC et MSR.

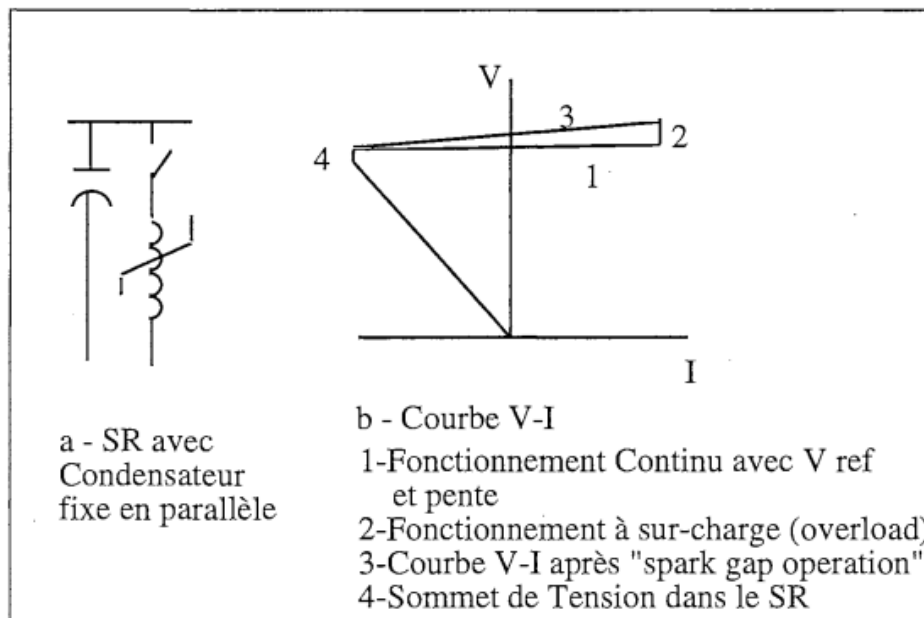


Figure III. 11: SVC de Type Saturable (SR).

Les avancées technologiques dans les domaines de l'électronique de puissance, de la commande et de la simulation ont permis le développement des SVC, Ce progrès a donné naissance aux Advanced SVC (STATCOM) et aux UPFC (Unified Power Flow Controller) basés sur la technologie du thyristor à ouverture par gâchette (Thyristors GTO). Ces dispositifs se distinguent des SVC conventionnels par leur technologie avancée, leur contrôle plus précis et leur capacité à gérer le flux de puissance de manière plus efficace.

Les STATCOM utilisent des onduleurs de tension qui génèrent, à l'aide d'une source de tension continue, un ensemble de tensions triphasées en phase avec les tensions de la ligne et qui sont couplées à la ligne via une inductance faible, correspondant à l'inductance de fuite par phase du transformateur de couplage. La Figure III.12 représente la différence de la caractéristique V-I du STATCOM et du SVC. [21] [22]

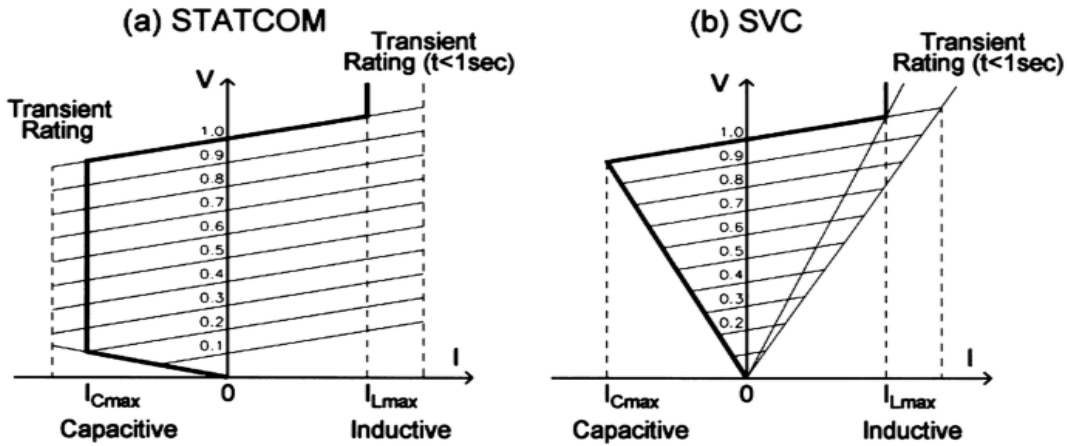


Figure III. 12: Caractéristique V-I d'un STATCOM et d'un SVC conventionnel.

III- Modélisation statique:

Les modèles statiques des compensateurs de puissance réactive (SVC) conventionnels représentent leur caractéristique tension-courant. Ces modèles ont été conçus pour être compatibles avec les logiciels de calcul de répartition de charge. Ils permettent de mieux expliquer le fonctionnement et l'efficacité du SVC, tout en prenant en compte ses caractéristiques électriques, telles que sa réactance variable, sa capacité fixe, et les composants de commande tels que les thyristors. Mais aussi, déterminer comment ce dispositif réagit aux variations de tension et de charge dans le réseau, et comment il fournit ou absorbe de la puissance réactive pour maintenir la stabilité du système électrique.

On utilise un schéma par zone de fonctionnement du SVC. La Figure III.13a illustre le modèle du SVC pour la zone de régulation. Le SVC peut être modélisé de manière simple par un nœud PQ connecté à un nœud PV via une réactance X_{sl} . Cette réactance reflète la caractéristique de fonctionnement, qui correspond à la pente de la courbe généralement située entre 1 % et 5 %. Au nœud PV, la tension à réguler (V_{ref}) est fixée. [19] [20] [23]

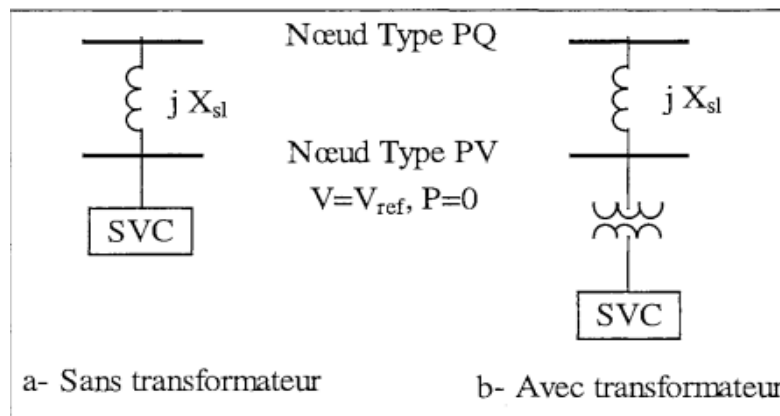


Figure III. 13: Modèle Statique du SVC. [6]

Ce modèle a été modifié afin d'inclure la réactance du transformateur de connexion du SVC au poste et de séparer le nœud de mesure (haute tension) du nœud de connexion (moyenne tension) (Figure III.13b).

Si le SVC fonctionne en dehors de la zone de régulation, il peut être représenté par une branche nœud masse avec une susceptance donnée par les expressions suivantes:

$$\begin{aligned}
 B &= B_{min} = -\frac{Q_{max}}{V_{max}^2} && \text{Pour } I_{SVC} > I_{max} \\
 B &= B_{max} = -\frac{Q_{min}}{V_{min}^2} && \text{Pour } V < V_{min}
 \end{aligned}
 \tag{III.10}$$

IV- Modélisation dynamique:

Pour l'analyse dynamique dans le domaine temporel, les modèles de SVC doivent représenter son comportement uniquement en séquence système directe pour des analyses de stabilité transitoire et de stabilité dynamique à court et long terme. Cela est dû au fait que la composante de séquence système inverse des éléments du SVC (condensateur et inducteur) est égale à la composante de séquence directe. De plus, le type de connexion du SVC au tertiaire du transformateur (type Δ pour SVC type 6-impulsions et Y sans mise à la terre pour SVC type 12-impulsions, Figure III.4) fait que l'impédance de séquence homopolaire est ouverte sans affecter celle du réseau dans les analyses des courts-circuits non-triphasés.

Pour des analyses électromagnétiques et de résonance sous synchrone, il est essentiel d'utiliser des modèles plus sophistiqués, tels que les modèles triphasés. Les modèles dynamiques pertinents pour cette étude sont ceux qui suivent la modélisation classique du système de régulation des générateurs, c'est-à-dire des fonctions de transfert par modules. L'objectif principal du SVC est de réguler la tension au nœud de connexion. Ainsi, le SVC utilise un système de commande en boucle fermée, contrôlé par la tension définie par l'équation III.5.

IV.1 Modèles Standards:

Des modèles de base appropriés pour des études générales ont été recommandés par la CIGRE [19] [20] [23]. La Figure III.14 et III.16 présentent deux modèles préconisés par la CIGRE [CI-95] et l'IEEE [IE-93] pour la modélisation du SVC, se distinguant par leurs systèmes de régulation. Ces modèles conviennent pour des analyses générales de stabilité où les caractéristiques spécifiques du SVC n'impactent pas les études de stabilité. Ils peuvent également être utilisés pour des études préliminaires de nouvelles installations de SVC. Pour des analyses approfondies tenant compte des spécificités du SVC, le choix des modèles dépendra de chaque type de SVC.

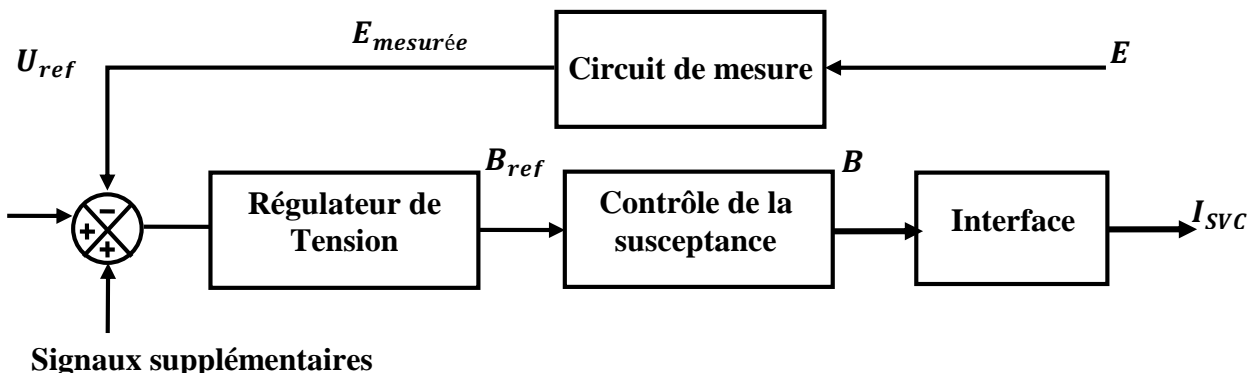


Figure III. 14a: Modèle dynamique CIGRE du SVC.

Ce modèle régule le courant I_{SVC} en se basant sur la mesure de la tension E au nœud de connexion. La pente de la caractéristique statique est définie par le bloc régulateur de tension, qui commande la susceptance du dispositif à thyristor. Un bloc d'interface calcule le courant dans le SVC en fonction de son admittance. Les différentes fonctions sont détaillées à la (figure III.5).

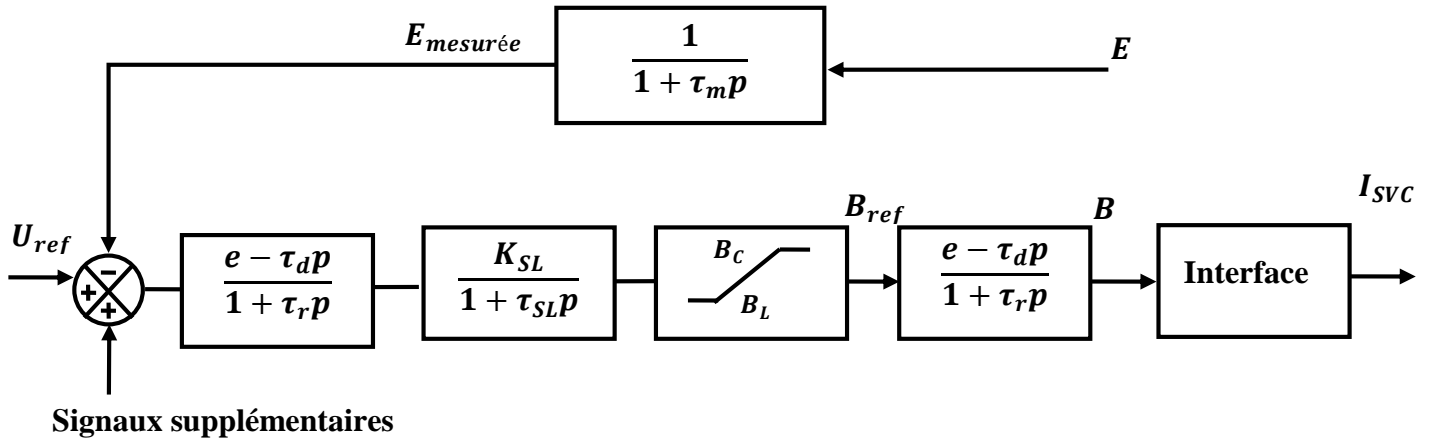


Figure III. 14a: Schéma détaillé du modèle de SVC CIGRE.

Un second modèle de SVC est donné à la figure III.15 La principale différence avec le modèle précédent est la mesure du courant.

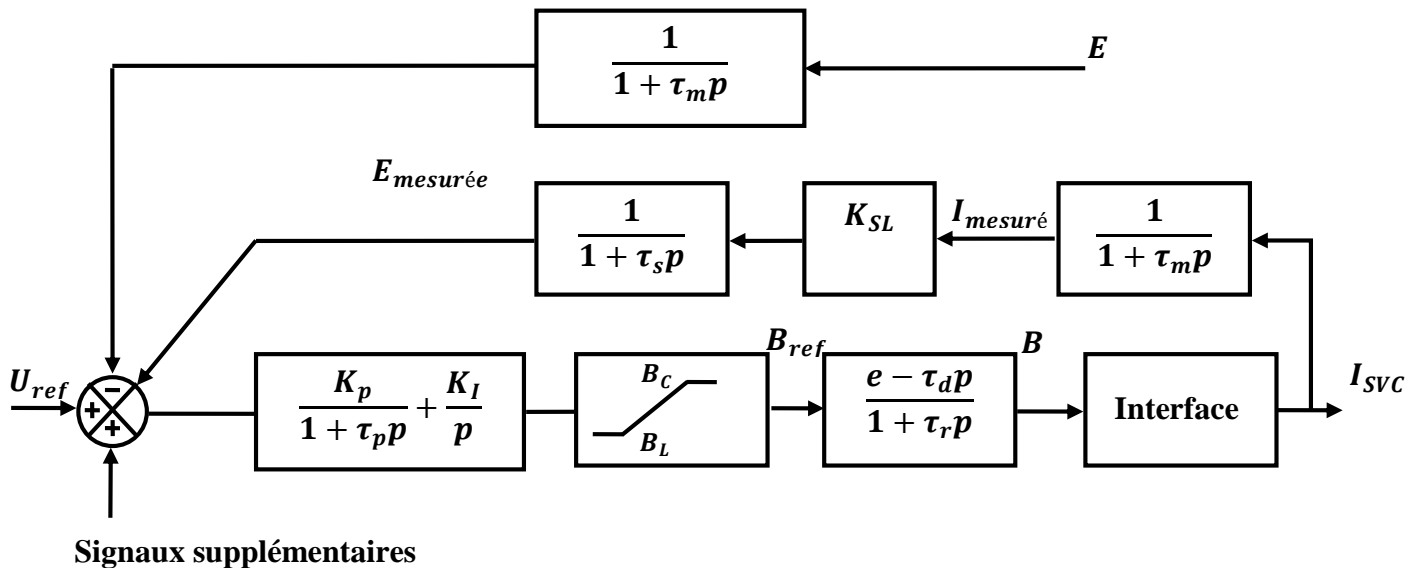


Figure III. 15: Schéma du second modèle CIGRE de SVC.

La pente dans la zone de régulation est définie par la boucle de courant. Le régulateur de tension utilise un contrôleur Proportionnel-Intégral. Les autres fonctions de ce modèle sont similaires à celles du modèle représenté à la figure II.14a.

Fondamentalement, les modèles standards sont constitués des modules suivants:

- Module du système de mesure
- Module de régulation de tension
- Module de régulation de la susceptance
- Module de l'interface avec le réseau.

a. Module de Mesure : L'équipement de mesure convertit la tension et le courant triphasés en signaux quasi continus proportionnels à l'amplitude de la variable mesurée. Ce module est modélisé par un filtre passe-bas et caractérisé par une fonction de transfert du premier ordre suivante :

$$H_{mes} = \frac{1}{1 + \tau_m p} \quad (III.11)$$

$$H_{mes} = \frac{V_{mes}}{V_{réseau}} \quad \text{ou} \quad H_{mes} = \frac{I_{mes}}{I_{réseau}} \quad (III.12)$$

Où τ_m est la constante de temps du système de mesure, avec une valeur typique comprise entre 1 et 8 ms.

b. Module de régulation de la tension : Le bloc de régulation de tension donne la consigne de la susceptance B_{ref} en fonction de l'erreur de tension ($U_{ref} - E_{mesurée}$). Ce régulateur est constitué d'un correcteur avance-retard de phase. Si on utilise un régulateur de type proportionnel (Figure III. 15a), l'inverse du gain K_r donne la pente de la caractéristique statique V-I de réglage désirée pour le SVC (X_{SL}), c'est-à-dire :

$$K_{SL} = \frac{1}{X_{SL}} \quad (III.13)$$

La constante du temps (τ_{SL}) est typiquement comprise entre 20 et 150 ms. Le bloc $\frac{1+\tau_1 p}{1+\tau_2 p}$ permet d'obtenir une marge de phase appropriée et d'améliorer l'amortissement des oscillations.

Si on utilise un régulateur de type intégral (Figure III. 16b), il est nécessaire d'introduire une boucle de courant telle qu'elle est représentée en Figure III. 15.

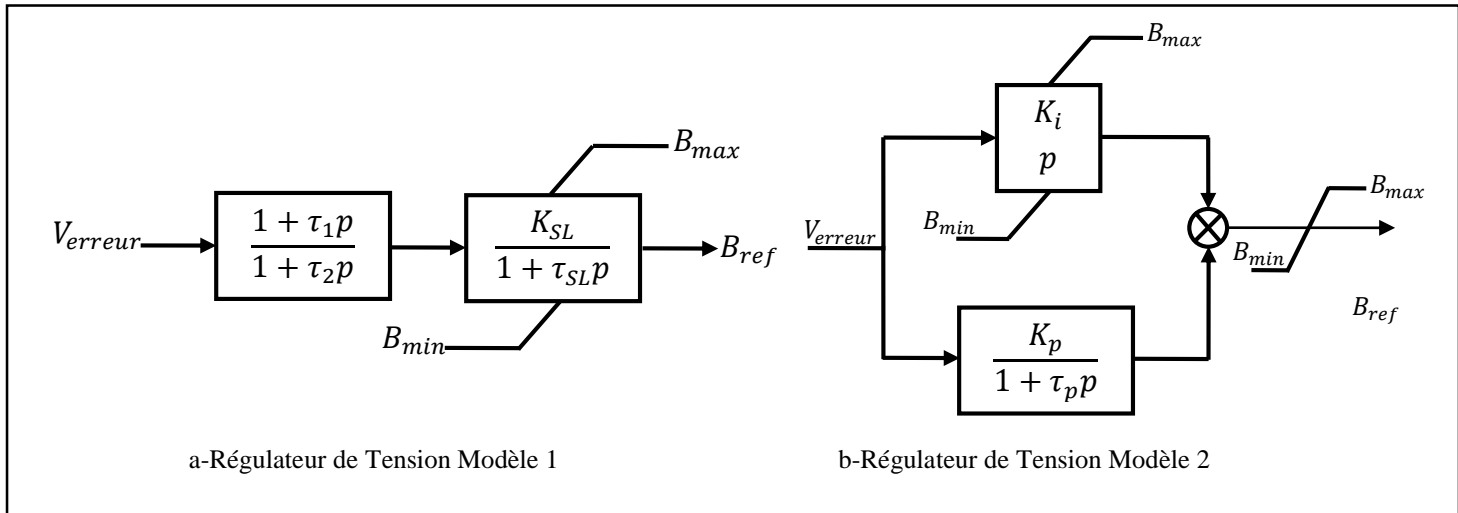


Figure III. 16: Types de Régulateurs de Tension du SVC.

Pour des études préliminaires, on peut choisir les constantes

$\tau_1 = \tau_2 = \tau_p = \tau_d = \tau_b = \tau_s = K_p = 0$, de façon à ce que l'on puisse relier les deux modèles par les équations :

$$K_{SL} = \frac{1}{K_p} = \frac{1}{X_{SL}} \quad \text{et} \quad \tau_{SL} = \frac{1}{K_{SL} K_i} \quad (III.14)$$

Où K_p est le gain proportionnel et K_i est le gain intégral du régulateur du modèle 2, X_{SL} est la pente de la caractéristique V-I du SVC.

Ainsi, les réponses des deux modèles de régulateurs seront équivalentes. Le choix pratique entre le régulateur proportionnel ou intégral dépend des signaux mesurés. La majorité des SVC installés utilisent le régulateur intégral, qui permet d'éliminer l'erreur en régime permanent. La tension mesurée et employée pour calculer l'écart V_{erreur} , que ce soit avec le régulateur proportionnel ou intégral, correspond à la tension côté primaire du transformateur reliant le SVC au réseau, soit la tension à asservir. En revanche, le courant mesuré provient du côté secondaire du transformateur et représente le courant injecté par le SVC.

c. Module de Régulation de Susceptance: Sa fonction de transfert est donnée par l'expression suivante:

$$H_B = \frac{e^{-p\tau_d}}{1 + \tau_b p} \quad (\text{III.15})$$

τ_d représente le temps de réponse de fonctionnement des thyristors (gating transport delay - typiquement autour de 1 ms) et τ_b représente la constante de temps de la séquence de régulation (firing sequence control - typiquement autour de 5 ms).

En outre, il existe une relation non linéaire entre la sortie du SVC (B) et l'angle d'action qui est obtenue par la fonction donnée par l'équation (III.4).

IV.2 Paramètres du SVC:

L'ensemble minimum de paramètres nécessaires à la caractérisation d'un SVC sont:

- Q_{max} , limite de puissance réactive inductive.
- Q_{min} , limite de puissance réactive capacitive.
- V_{max} et V_{min} , ces paramètres ainsi que les deux précédents définissent la pente de la caractéristique V -I (équations (III.6) et (III. 7)).
- Les données caractéristiques du SVC fournies par le constructeur.
- Les paramètres dynamiques, pour le régulateur proportionnel: K_r , τ_r , τ_1 et τ_2 , pour le régulateur intégral: K_{SL} , K_i , K_p , τ_p .

Le dernier groupe de données détermine la caractéristique dynamique du SVC. Le gain du régulateur doit être égal à l'inverse de la pente (X_{SL}). Pour un premier calcul, on peut choisir τ_1 , τ_2 , K_p , $\tau_p = 0$. Ainsi, il n'y a à définir qu'un paramètre, K_r pour le régulateur proportionnel et pour le régulateur intégral.

Selon les valeurs de ces constantes, on obtiendra la forme de la réponse dynamique. Pour effectuer ce calcul, il est essentiel de connaître une représentation simple du réseau. Cette représentation est fournie par l'impédance de Thévenin (Z_{th}) égale à l'inverse de la puissance de court-circuit dans le nœud de connexion du SVC. De cette manière, le système à analyser est réduit à la représentation donnée dans la Figure III.17.

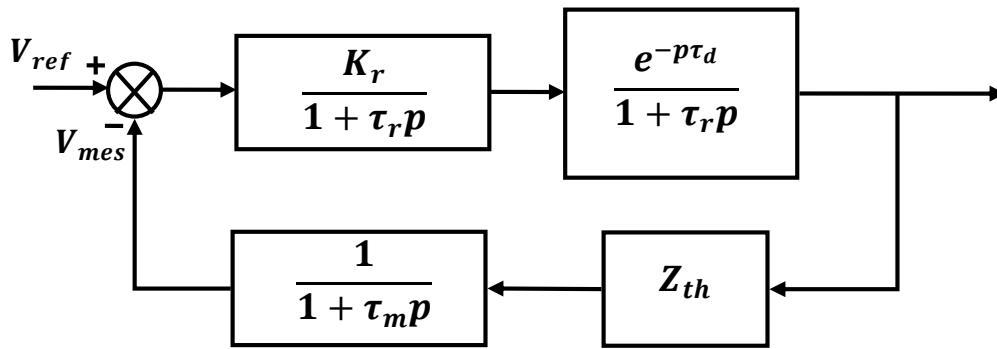


Figure III. 17: Représentation Simple par Schémas Blocs d'un SVC.

En outre, il est nécessaire de spécifier les valeurs des caractéristiques de la réponse temporelle du SVC, qui sont définies en fonction de la réponse aux sollicitations de type échelon unitaire appliquée au signal de commande. Ces caractéristiques sont :

- Temps de montée (t_r): Temps que la réponse prend pour passer de 0,1 au 0,9.
- Temps de stabilisation (t_s): Temps tel que la variation de la tension autour de la valeur finale soit inférieure ou égale à 2% ou 5%.
- Valeur maximum admissible (V_{max})

V- Utilisation et Inconvénients des SVC :

V.1 Utilisation des SVC:

Les compensateurs statiques de puissance réactive ont été utilisés dans les réseaux électriques pour résoudre une variété de problèmes, à savoir:

- **Améliorer les niveaux de tension sur un jeu de barres ou une région :**

La régulation de la tension est la fonction principale d'un SVC. Comme expliqué précédemment, le SVC contrôle la tension d'un nœud en absorbant ou en injectant de la puissance réactive sur le réseau. Dans les systèmes avec une faible puissance de court-circuit, notamment ceux comportant des lignes de transport longues, la tension est fortement affectée par les variations de charge et la déconnexion d'éléments du réseau. Pour des charges élevées, la tension peut chuter significativement, pouvant conduire à l'instabilité en tension du réseau. Les SVC ont été principalement utilisés pour remédier à ce problème.

- **Augmenter la capacité de transport de puissance active du réseau :**

Soit le système donné par la Figure (III. 15. a). La capacité de transport de la ligne sera donnée par les tensions V_1 et V_2 , par simplicité on suppose que $V_1 = V_2$, et la réactance de la ligne (X_L), est donnée par l'équation suivant :

$$P = P_m \sin(\delta) \quad \text{Où : } P_m = \frac{V_1^2}{X_L} \quad (\text{III.16})$$

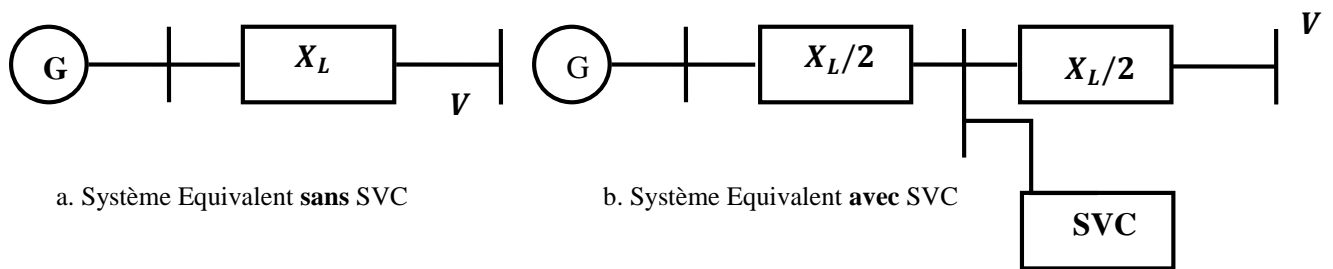


Figure III. 18: Système de Ligne de Transport d'électricité (sans et avec SVC).

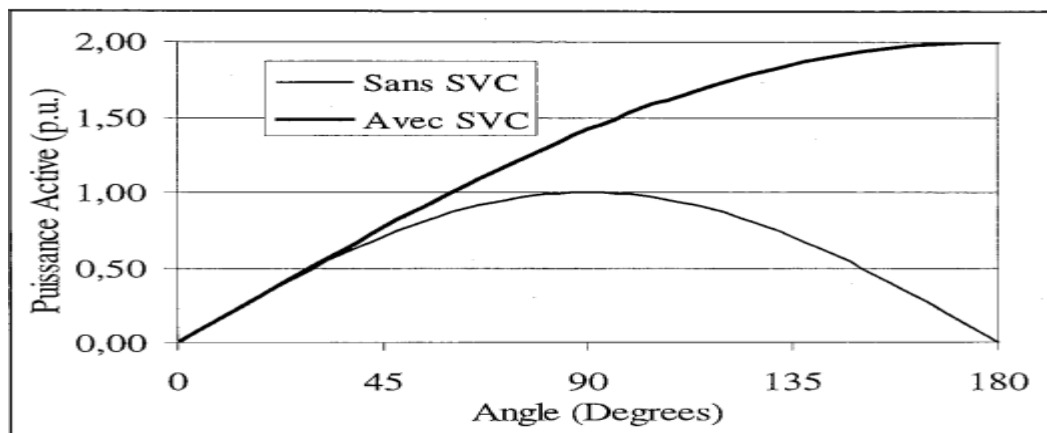
Quand un SVC de capacité de puissance réactive illimitée est installé au point milieu de la ligne (Figure III.18.b), la capacité de transport est donnée par:

$$P_1 = \frac{V_1^2}{X_L/2} \sin(\delta/2) \quad (\text{III.17})$$

Pour un SVC avec une limite de capacité de puissance réactive (\$Q_c\$), la puissance transmise par la ligne compensée est :

$$P = P_m \frac{1}{1 - \frac{Q_c}{4P_m}} \sin(\delta/2) \quad (\text{III.18})$$

La Figure III.19 compare la caractéristique $P - \delta$ de transport d'une ligne de transport sans et avec SVC.



- **Augmenter l'amortissement des oscillations électromécanique :**

Les grandes perturbations sur le réseau électrique entraînent des oscillations électromécaniques généralement amorties par les circuits amortisseurs des rotors des alternateurs et les stabilisateurs de puissance (PSS) associés aux commandes d'excitation du générateur. Cependant, des oscillations non amorties peuvent être provoquées par des oscillations de tension générées de façon continue par une compensation rapide de puissance réactive, comme la commande d'un SVC.

- **Réduire les surtensions temporelles :**

Les surtensions temporaires sont produites lors de la connexion et de la déconnexion d'éléments du réseau. Un SVC permet d'absorber de la puissance réactive, contribuant ainsi à réduire ces surtensions. Outre les applications mentionnées précédemment, le SVC offre un avantage important : sa rapidité de réponse. Étant dépourvu d'éléments tournants, donc d'inertie,

son temps de réponse est plus rapide que celui des machines électriques. Une action rapide sur la commande de tension évite l'augmentation de la génération de puissance réactive par les alternateurs, les empêchant d'atteindre leurs limites de fourniture ou d'absorption de puissance réactive.

Pour les charges, une réponse rapide du SVC évite que les charges dynamiques (moteurs asynchrones) n'augmentent la charge totale du système. Cela permet également à certaines charges de ne pas s'arrêter en cas de creux de tension (par exemple, l'éclairage fluorescent).

V.2 Inconvénients des SVC:

Un système qui fonctionne à ses limites d'exploitation et fortement dépendant de la compensation par SVC est susceptible de devenir instable et de subir un effondrement de tension. Cela est dû au fait que la génération de puissance réactive hors de la zone de régulation est fonction du carré de la tension, et que le SVC ne peut plus maintenir le niveau requis par le réseau. En dehors de la zone de contrôle, le SVC fonctionne comme une susceptance connectée en parallèle sur le nœud, ce qui peut entraîner une perte de stabilité.

D'autre part, le SVC permet de contrôler uniquement l'un des trois paramètres clés, la tension. Pour les deux autres paramètres, l'impédance et l'angle, d'autres systèmes sont nécessaires pour en assurer le contrôle, soulignant ainsi les limites de la compensation par SVC dans la régulation des réseaux électriques.

VI- Commande de SVC

Les SVC sont généralement configurés sur-mesure pour répondre aux besoins spécifiques de chaque système électrique. Les techniques de contrôle employées sont diverses et dépendent de l'équipement utilisé. En conséquence, il n'existe pas de modèle standard capable de représenter en détail toute la variété des commandes des SVC.

VI.1 Commande Principale:

Comme expliqué précédemment, la commande principale du SVC est généralement un gain pur ou une régulation de type PI (Proportionnelle-Intégrale). Cependant, l'utilisation croissante des microprocesseurs pour réaliser les fonctions de contrôle des réseaux électriques permet de développer des lois de commande plus élaborées mais aussi plus robustes et fiables, telles que les régulateurs de type LQG (Linear Quadratic Gaussian Regulator) et H_{∞} .

VI.2 Commandes Supplémentaires:

Selon les besoins spécifiques du système et les fonctions attendues du SVC, il est possible d'ajouter diverses commandes complémentaires, comme la régulation de la puissance réactive ou la supervision du gain. De plus, le mode de fonctionnement des SVC nécessite une coordination étroite avec les autres sources de puissance réactive connectées au même poste ou aux postes voisins. Une telle synchronisation permet d'optimiser les performances du SVC et d'éviter les interactions néfastes

Par ailleurs, pour tirer pleinement parti des avantages d'un SVC particulier, il est essentiel de concevoir son système de contrôle de manière robuste, flexible.

- **Supervision du gain :**

Étant donné que le réseau électrique est en constante évolution, la réponse du SVC varie selon les conditions du système, et ce même avec des paramètres dynamiques identiques. Par exemple, la réponse du SVC devient plus lente si l'impédance Z_{th} au nœud de commande augmente. Certaines variations du système peuvent même conduire le SVC à un fonctionnement

instable. Une solution pour remédier à ce problème consiste à rendre le gain du régulateur plus flexible, en implémentant un système de commande à gain variable. Cela peut être obtenu en intégrant un système automatique de supervision du gain au sein même du régulateur du SVC (Figure III.20).

Ce système de supervision ajuste dynamiquement le gain en fonction de l'évolution des conditions du réseau, permettant ainsi de maintenir des performances stables du SVC malgré les changements incessants auxquels il est soumis.

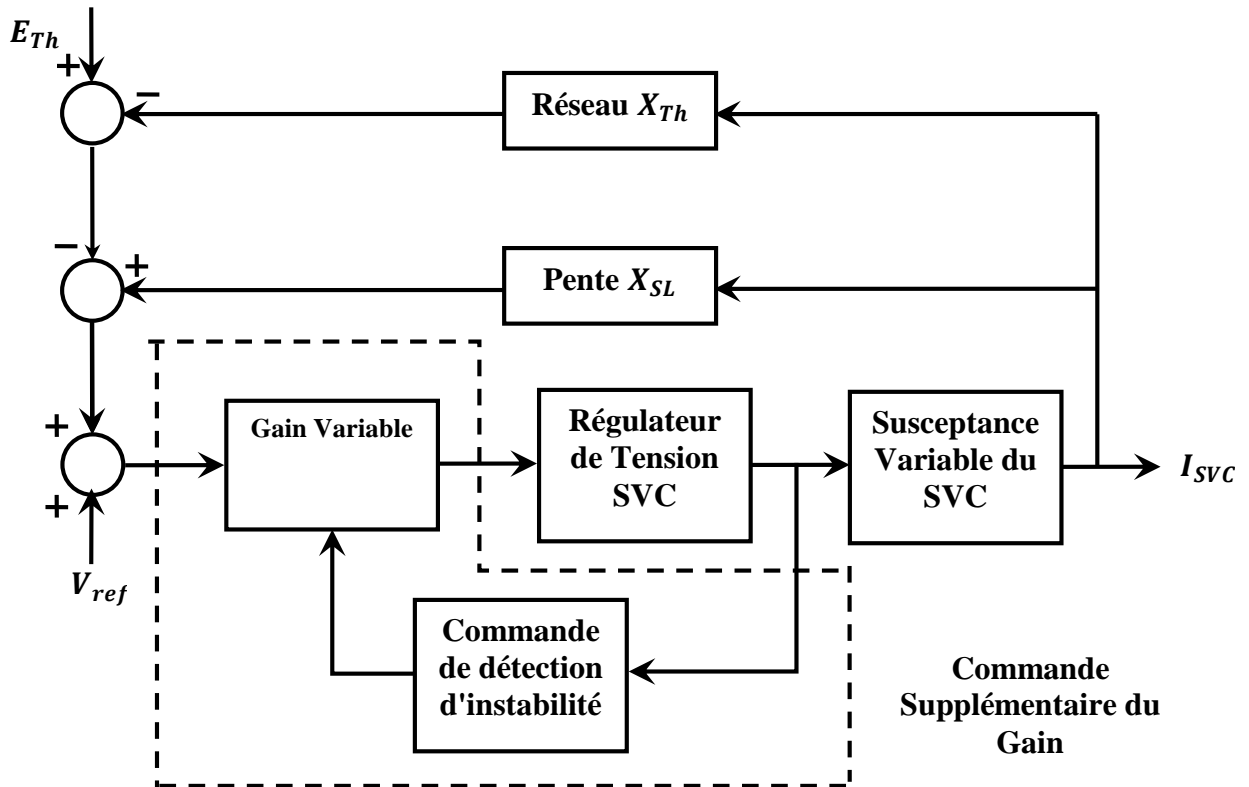


Figure III. 20: Commande Supplémentaire du Gain pour le SVC.

- **Commande de puissance réactive :**

Le fonctionnement en régime permanent du SVC nécessite une coordination avec d'autres sources de puissance réactive connectées au même poste pour éviter que le SVC ne fonctionne constamment à ses limites de fonctionnement, notamment aux limites de puissance réactive. La réponse du SVC est généralement plus rapide que celle des autres sources de puissance réactive. Son rôle est de ramener le SVC à un point de fonctionnement prédéfini (Q_{ref}) dans la zone de contrôle, permettant ainsi de maintenir le SVC opérant de manière optimale malgré les variations du réseau électrique.

VII- Conclusion:

Dans le présent chapitre, nous avons fourni une étude des Compensateurs Statiques d'Energie Réactive (SVC), dispositifs essentiels pour la stabilisation et la régulation des réseaux électriques modernes. Après avoir expliqué les principes de fonctionnement et les différentes topologies de SVC, les aspects de modélisation statique et dynamique ont été abordés en profondeur. Les modèles développés permettent de représenter fidèlement le comportement des SVC dans diverses études de réseaux, que ce soit en régime permanent ou en régimes transitoires.

Chapitre IV
Etude par Simulation d'un
Compensateur Statique SVC
(TCR-TSC)

A. PARTIE THEORIQUE

I- Réactance contrôlée par thyristors

I.1 Introduction:

Dans un système de transport d'énergie électrique, une réactance commandée par thyristor (TCR) est une réactance connectée en série avec une valve à thyristor bidirectionnelle. La valve à thyristor est contrôlée par phase, ce qui permet d'ajuster la valeur de la puissance réactive délivrée pour répondre aux différentes conditions du système. Les selfs commandées par thyristors peuvent être utilisées pour limiter les augmentations de tension sur les lignes de transport peu chargées. Un autre dispositif utilisé à cette fin est une réactance à commande magnétique (MCR), un type d'amplificateur magnétique autrement connu sous le nom de transducteur.

Parallèlement à la réactance et à la vanne à thyristors connectées en série, il peut également y avoir une batterie de condensateurs, qui peut être connectée en permanence ou qui peut utiliser une commutation mécanique ou à thyristors. La combinaison est appelée compensateur statique de puissance réactive.

I.2 Schéma électrique:

Une réactance contrôlée par thyristors est généralement un assemblage triphasé, normalement connecté en triangle pour assurer une annulation partielle des harmoniques. Souvent, la réactance TCR principale est divisée en deux moitiés, la valve à thyristor étant connectée entre les deux moitiés. Cela protège la valve à thyristor vulnérable des dommages dus aux flashovers, aux coups de foudre, etc. [24]

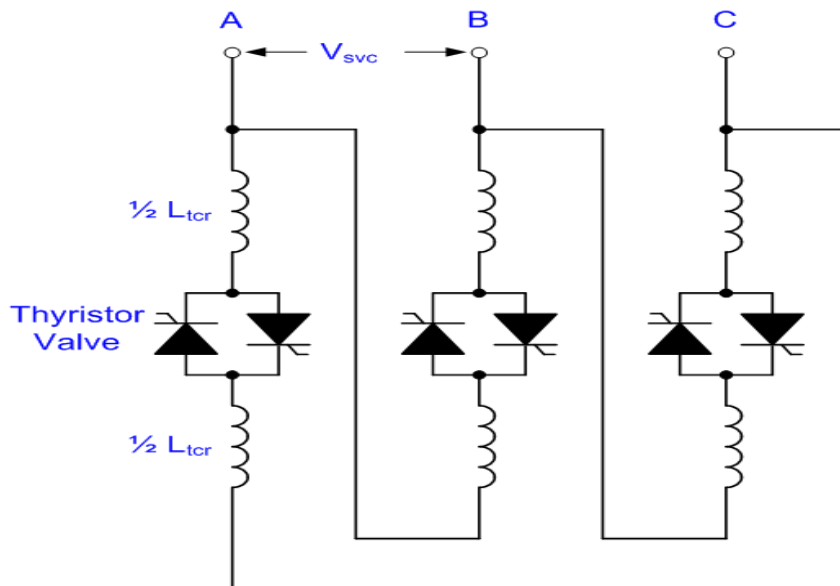


Figure IV 1: TCR triphasé typique connecté en triangle. [26]

I.3 Principes de fonctionnement:

Le courant dans le TCR varie du maximum (déterminé par la tension de connexion et l'inductance de la réactance) à presque zéro en faisant varier « l'angle de retard à l'amorçage », α . α est défini comme l'angle de retard à partir du point auquel la tension devient positive jusqu'au point auquel la valve à thyristor est activée et le courant commence à circuler.

Le courant maximum est obtenu lorsque α vaut 90° , point auquel le TCR est dit en "pleine conduction" et le courant efficace est donné par :

$$I_{TCR-max} = \frac{V_{SVC}}{2\pi f L_{TCR}} \quad (IV.1)$$

Où:

V_{SVC} : est la valeur efficace de la tension entre phases du jeu de barres à laquelle le SVC est connecté.

L_{tcr} : est l'inductance totale du TCR par phase.

Le courant est en retard de 90° par rapport à la tension, conformément à la théorie classique des circuits alternatifs. À mesure que α augmente au-dessus de 90° , jusqu'à un maximum de 180° , le courant diminue et devient discontinu et non sinusoïdal. Le courant TCR, en fonction du temps, est alors donné par :

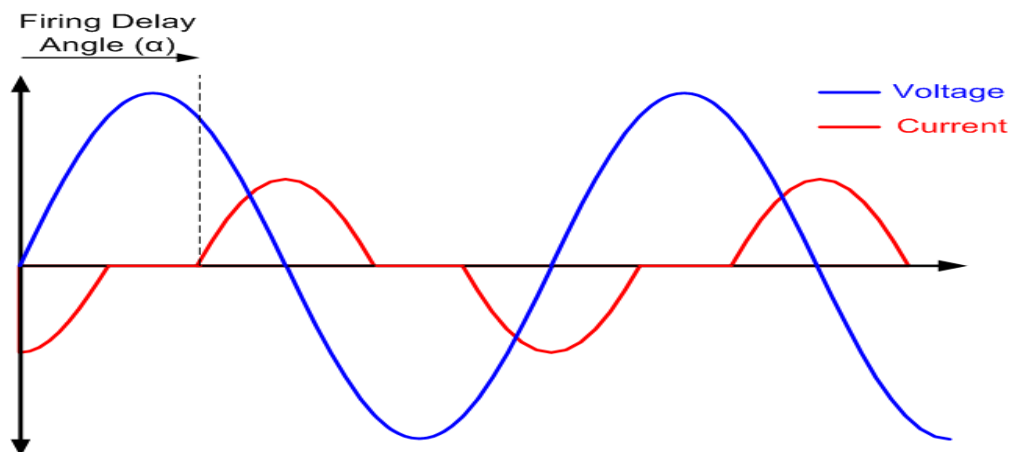


Figure IV 2: Formes d'onde de tension et de courant dans un TCR. [24]

I.4 Équipement principal:

Un TCR comprend deux équipements principaux : la réactance elle-même, qui est généralement à noyau d'air (bien que des réactances à noyau de fer soient possibles) et la valve à thyristors. En fonction de la tension du système, un transformateur de puissance intermédiaire peut être nécessaire pour passer de la tension gérée par les thyristors à la tension du système de transport.

I.4.1 Valve à thyristors:

La valve à thyristors se compose généralement de 5 à 20 paires de thyristors connectés en parallèle inversé et connectés en série. La connexion parallèle inversé est nécessaire car la plupart des thyristors disponibles dans le commerce ne peuvent conduire le courant que dans une seule direction. La connexion en série est nécessaire car la tension nominale maximale des thyristors disponibles dans le commerce (jusqu'à environ 8,5 kV) est insuffisante pour la tension à laquelle le TCR est connecté. Pour certaines applications basses tension, il peut être possible d'éviter la connexion en série des thyristors ; dans de tels cas, la valve à thyristors est simplement une connexion antiparallèle de deux thyristors. [24]

En plus des thyristors eux-mêmes, chaque paire de thyristors antiparallèles est dotée d'un circuit résistance-capacité connecté à ses bornes, pour forcer la tension aux bornes de la valve à se diviser uniformément entre les thyristors et pour amortir le « dépassement de commutation » qui se produit lorsque la valve s'éteint.

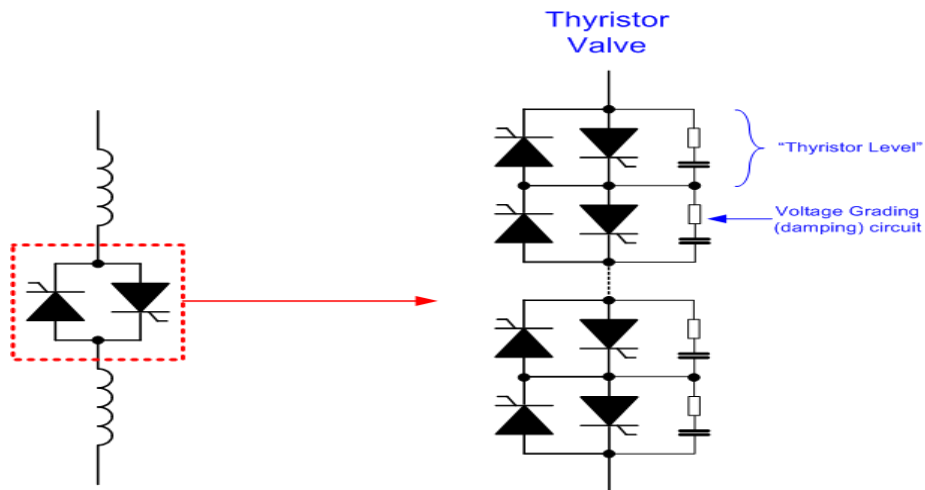


Figure IV 3: Une valve à thyristor TCR (monophasée). [26]

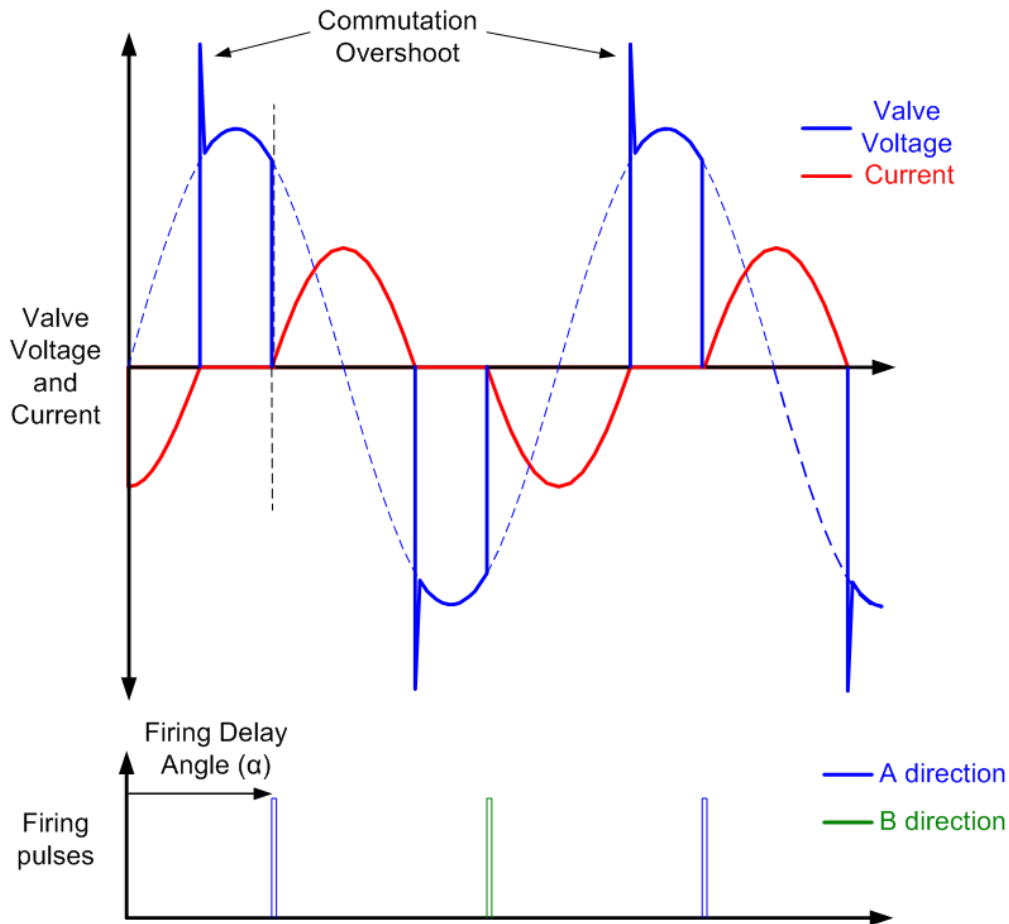


Figure IV 4: Formes d'onde de tension et de courant de la valve à thyristor TCR. [24]

I.4.2 Harmoniques

Un TCR fonctionnant avec $\alpha > 90^\circ$ génère des quantités importantes de courants harmoniques, en particulier aux 3ème, 5ème et 7ème harmoniques. En connectant le TCR en triangle, les courants harmoniques d'ordre $3n$ (« harmoniques triples ») circulent uniquement autour du triangle et ne s'échappent pas dans le système AC connecté. Cependant, les 5ème et 7ème harmoniques (et dans une moindre mesure les 11ème, 13ème, 17ème etc.) doivent être filtrés afin d'éviter une distorsion excessive de la tension sur le réseau AC. Ceci est généralement réalisé en connectant des filtres harmoniques en parallèle avec le TCR. Les filtres fournissent une puissance réactive capacitive qui compense en partie la puissance réactive inductive fournie par le TCR.

II- Condensateur commuté par thyristor:

II.1 Introduction:

Un condensateur commuté à thyristors (TSC) est un type d'équipement utilisé pour compenser la puissance réactive dans les systèmes d'alimentation électrique. Il se compose d'un condensateur de puissance connecté en série avec une valve à thyristors bidirectionnels et, généralement, une self de limitation de courant (inductance). Le condensateur commuté à thyristor est un composant important d'un compensateur statique de puissance réactive (SVC), où il est souvent utilisé en conjonction avec un réacteur contrôlé par thyristor (TCR). Les compensateurs statiques de puissance réactive font partie de la famille des systèmes de transmission flexibles AC (FACTS).

II.2 Schéma électrique:

Un TSC est généralement un assemblage triphasé, connecté soit en triangle, soit en étoile. Contrairement au TCR, un TSC ne génère aucune harmonique et ne nécessite donc aucun filtrage. Pour cette raison, certains SVC ont été construits avec uniquement des TSC. Cela peut conduire à une solution relativement rentable dans laquelle le SVC ne nécessite qu'une puissance réactive capacitive, bien qu'un inconvénient soit que la puissance réactive de sortie ne peut varier que par étapes. La production de puissance réactive variable en continu n'est possible que lorsque le SVC contient un TCR ou un autre élément variable tel qu'un STATCOM. [25]

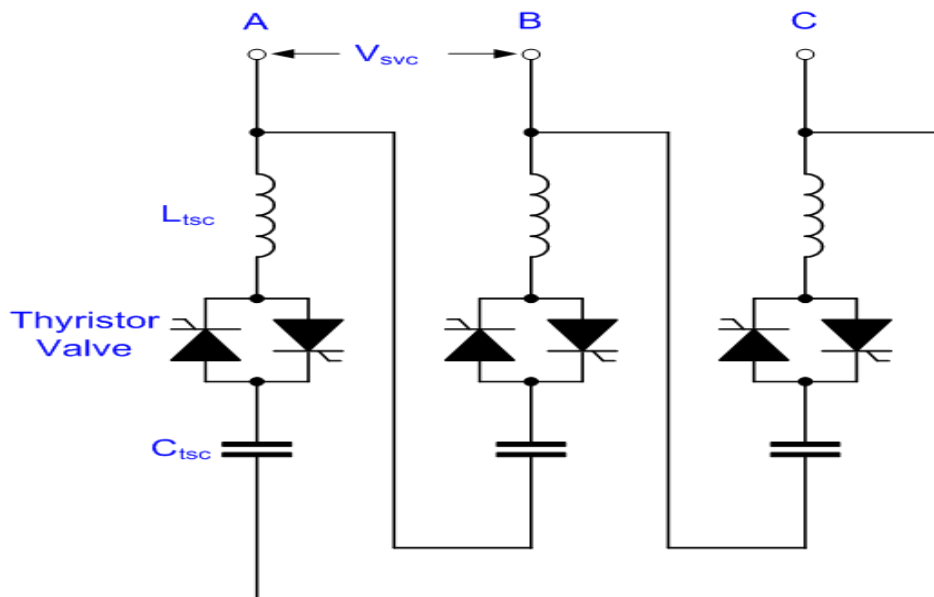


Figure IV 5: Condensateur commuté à thyristors (TSC), connecté en triangle. [26]

II.3 Principes de fonctionnement

Contrairement au TCR, le TSC ne fonctionne qu'en tout ou rien. Une tentative de faire fonctionner un TSC en « contrôle de phase » entraînerait la génération de courants résonants de très grande amplitude, entraînant une surchauffe de la batterie de condensateurs et de la valve à thyristors, ainsi qu'une distorsion harmonique dans le système CA auquel le SVC est connecté.[25]

II.3.1 Courant en régime permanent:

Lorsque le TSC est allumé ou « débloqué », le courant avance la tension de 90° (comme pour tout condensateur). Le courant efficace est donné par :

$$I_{TSC} = \frac{V_{SVC}}{X_{TSC}} ; \quad \text{où } X_{TSC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{TSC}} - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{TSC} \quad (IV.2)$$

V_{SVC} : est la valeur efficace de la tension entre phases du jeu de barres auquel le SVC est connecté.

C_{TSC} : est la capacité TSC totale par phase

L_{TSC} : est l'inductance TSC totale par phase

f : est la fréquence du système AC

Le TSC forme un circuit résonant inductance-capacité (LC) avec une fréquence caractéristique de :

$$f_{TSC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{C_{TSC} \cdot L_{TSC}}} \quad (IV.3)$$

La fréquence accordée est généralement choisie entre 150 et 250 Hz sur les systèmes à 60 Hz ou entre 120 et 210 Hz sur les systèmes à 50 Hz. Il s'agit d'un choix économique entre la taille de la réactance du TSC (qui augmente avec la fréquence décroissante) et la nécessité de protéger la valve à thyristor des courants oscillatoires excessifs lorsque le TSC est activé à un point d'onde incorrect (« ratés d'amorçage »).

Le TSC est généralement réglé sur une harmonique non entière de la fréquence du secteur afin d'éviter le risque de surcharge du TSC par les courants harmoniques qui y circulent depuis le système AC.

II.3.2 Cas hors tension:

Lorsque le TSC est éteint ou « bloqué », aucun courant ne circule et la tension est supportée par la valve à thyristor. Après que le TSC ait été éteint pendant une longue période (heures), le condensateur sera complètement déchargé et la valve à thyristor ne subira que la tension alternative du jeu de barres SVC. Cependant, lorsque le TSC s'éteint, il le fait à courant nul, correspondant à la tension maximale du condensateur. Le condensateur ne se décharge que très lentement, de sorte que la tension ressentie par la valve à thyristor atteindra un pic de plus de deux fois la tension alternative de pointe, environ un demi-cycle après le blocage. La valve à thyristors doit contenir suffisamment de thyristors en série pour résister à cette tension en toute sécurité.

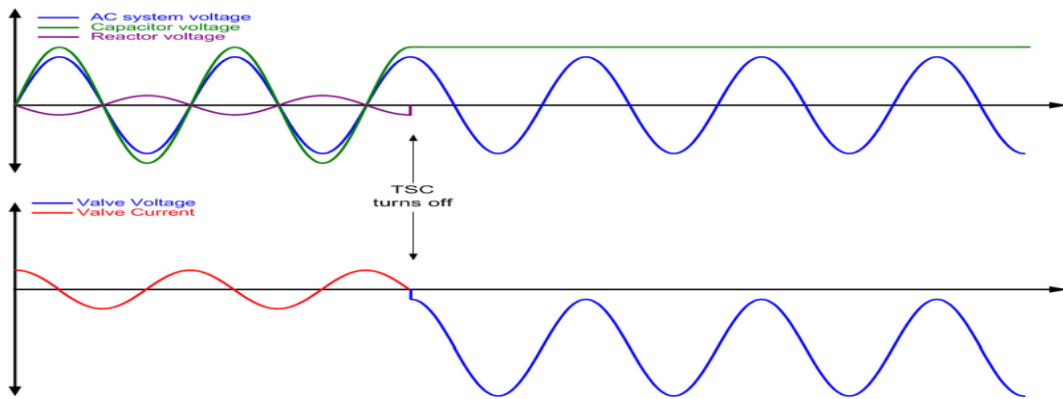


Figure IV 6: Le condensateur commuté par thyristor (TSC) s'éteint, affichant la tension piégée restant sur le condensateur. [25]

II.3.3 Déblocage – conditions normales:

Lorsque le TSC est réactivé (« débloqué »), il faut veiller à choisir le bon instant afin d'éviter de créer des courants oscillatoires très importants. Le TSC étant un circuit résonant, toute excitation soudaine de choc produira un effet de sonnerie haute fréquence qui pourrait endommager la valve à thyristor.

L'instant optimal pour allumer un TSC est lorsque le condensateur est encore chargé à sa valeur de crête normale et que la commande d'allumage est envoyée au minimum de la tension de la vanne. Si le TSC est débloqué à ce stade, la transition vers l'état conducteur se fera en douceur.

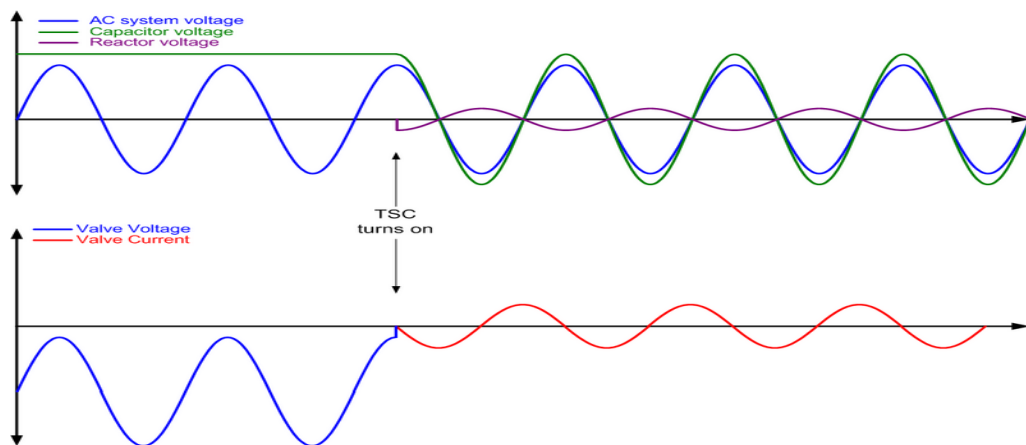


Figure IV 7: Condensateur commuté à thyristors (TSC) s'activant au bon moment. [25]

II.3.4 Déblocage – conditions anormales

Parfois, cependant, le TSC peut s'allumer à un moment incorrect (en raison d'un défaut de contrôle ou de mesure), ou le condensateur peut se charger à une tension supérieure à la valeur normale, de sorte que même au minimum de tension de la vanne, un grand résultat de courant transitoire. Le courant dans le TSC sera alors constitué d'une composante de fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz) superposée à un courant beaucoup plus important à la fréquence accordée du TSC. Ce courant transitoire peut mettre des centaines de millisecondes à disparaître, période pendant laquelle l'échauffement cumulé dans les thyristors peut être excessif. [25]

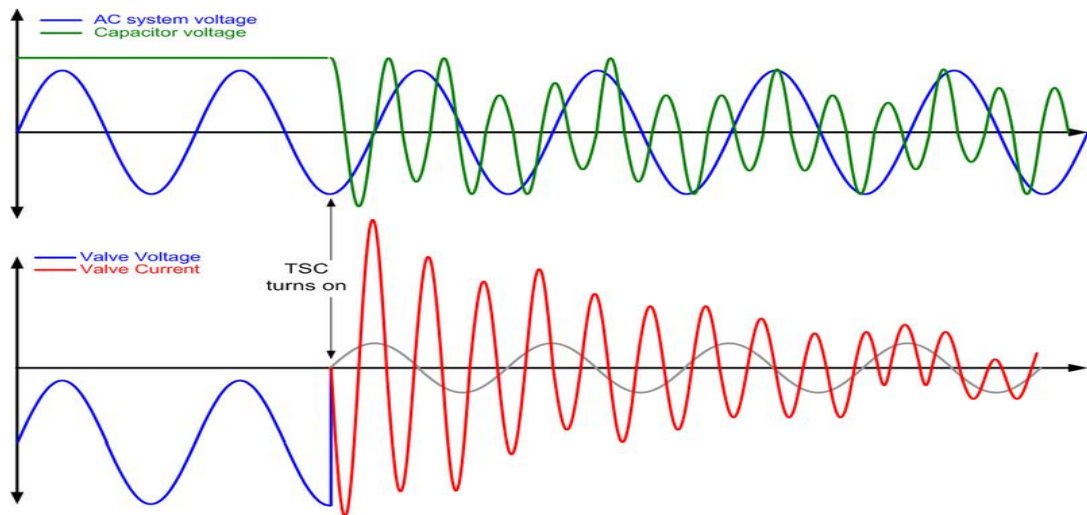


Figure IV 8: Représentation idéalisée d'un condensateur commuté à thyristors (TSC) s'activant à un instant incorrect. [25]

II.4 Équipement principal:

Un TSC comprend normalement trois équipements principaux : la batterie de condensateurs principale, la vanne à thyristors et un réacteur limiteur de courant, généralement à noyau d'air.

II.4.1 Banc de condensateurs:

Le plus gros élément d'équipement d'un TSC, la batterie de condensateurs, est construit à partir d'unités de condensateurs extérieures, chaque unité ayant généralement une valeur nominale comprise entre 500 et 1 000 kilovars (kVAr).

II.4.2 Réactance du TSC:

La fonction de la réactance TSC est de limiter le courant de pointe et le taux d'augmentation du courant (di/dt) lorsque le TSC s'allume à un moment incorrect. La réactance est généralement une réactance à noyau d'air, similaire à celle d'un TCR, mais plus petite. La taille et le coût du réactance TSC sont fortement influencés par la fréquence de réglage du TSC, les fréquences plus basses nécessitant des réactances plus grandes. La réactance TSC est généralement située à l'extérieur, à proximité de la batterie de condensateurs principale.

II.4.3 Valve à thyristors:

La valve à thyristors se compose généralement de 10 à 30 paires de thyristors connectés en antiparallèle et connectés en série. La connexion en antiparallèle est nécessaire car la plupart des thyristors disponibles dans le commerce ne peuvent conduire le courant que dans une seule direction.

La connexion en série est nécessaire car la tension nominale maximale des thyristors disponibles dans le commerce (jusqu'à environ 8,5 kV) est insuffisante pour la tension à laquelle le TCR est connecté.

Pour certaines applications basses tension, il peut être possible d'éviter la connexion en série des thyristors ; dans de tels cas, la valve à thyristors est simplement une connexion antiparallèle de deux thyristors.

En plus des thyristors eux-mêmes, chaque paire de thyristors en antiparallèle est dotée d'un circuit d'amortissement, résistance-condensateur connecté à ses bornes, pour forcer la tension aux bornes de la valve à se diviser uniformément entre les thyristors et pour amortir le « dépassement de commutation » qui se produit lorsque la valve se ferme.

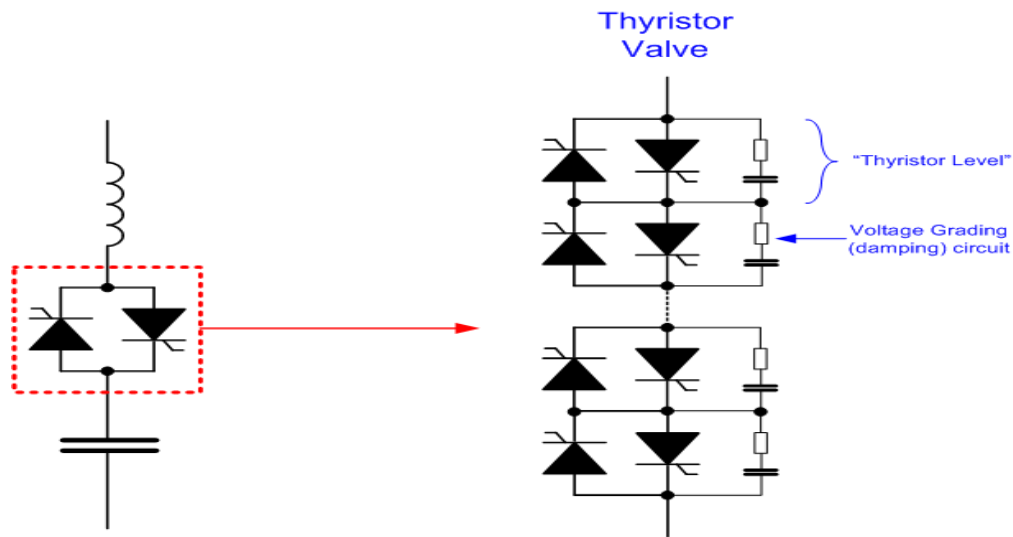


Figure IV 9: Valve TSC typique. [26]

La valve à thyristors d'un TSC est très similaire à celle d'un TCR, mais (pour une tension alternative donnée) comporte généralement entre 1,5 et 2 fois plus de thyristors connectés en série en raison de la nécessité de résister à la fois à la tension alternative et à la tension emmagasinée du condensateur après blocage.

La valve à thyristor est généralement installée dans un bâtiment spécialement construit et ventilé ou dans un conteneur d'expédition modifié. Le refroidissement des thyristors et des résistances d'amortissement est généralement assuré par de l'eau déminéralisée.

II.5 Types spéciaux de TSC:

Certains TSC ont été construits avec le condensateur et l'inductance disposés non pas comme un simple circuit LC accordé mais plutôt comme un filtre amorti. Ce type de disposition est utile lorsque le système électrique auquel le TSC est connecté contient des niveaux importants de distorsion harmonique, ou lorsqu'il existe un risque de résonance entre le système électrique et le TSC.

B. PARTIE PRATIQUE : SIMULATION

I- Introduction:

Considérons le circuit illustré ci-dessous. Il représente une phase d'un compensateur statique (SVC) utilisé sur un réseau de transport de 735 kV. Au secondaire du transformateur 735 kV/16 kV, deux branches à susceptance variable sont connectées en parallèle : une branche de réactance commandé par thyristors (TCR), et une branche de condensateur commuté par thyristors (TSC).

II- Schéma électrique

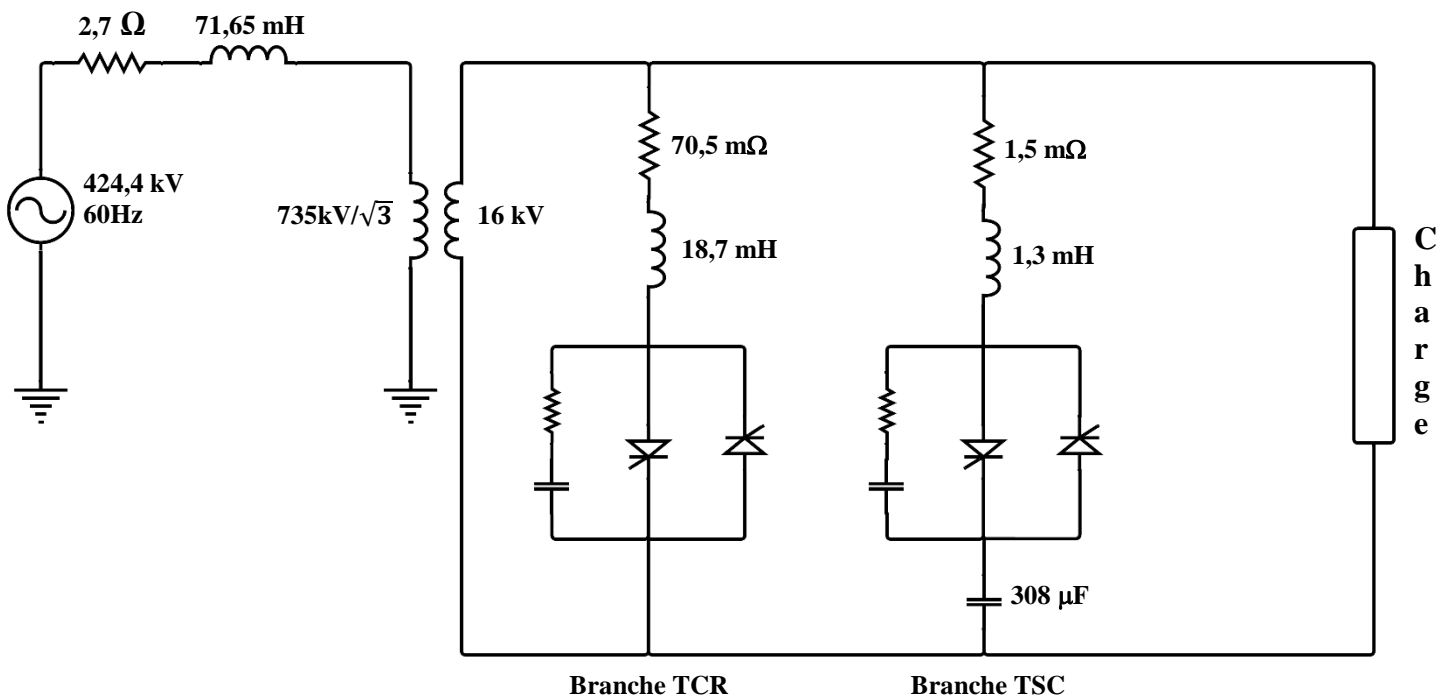


Figure IV 10: Schéma électrique

III- Schéma de simulation sous Simulink:

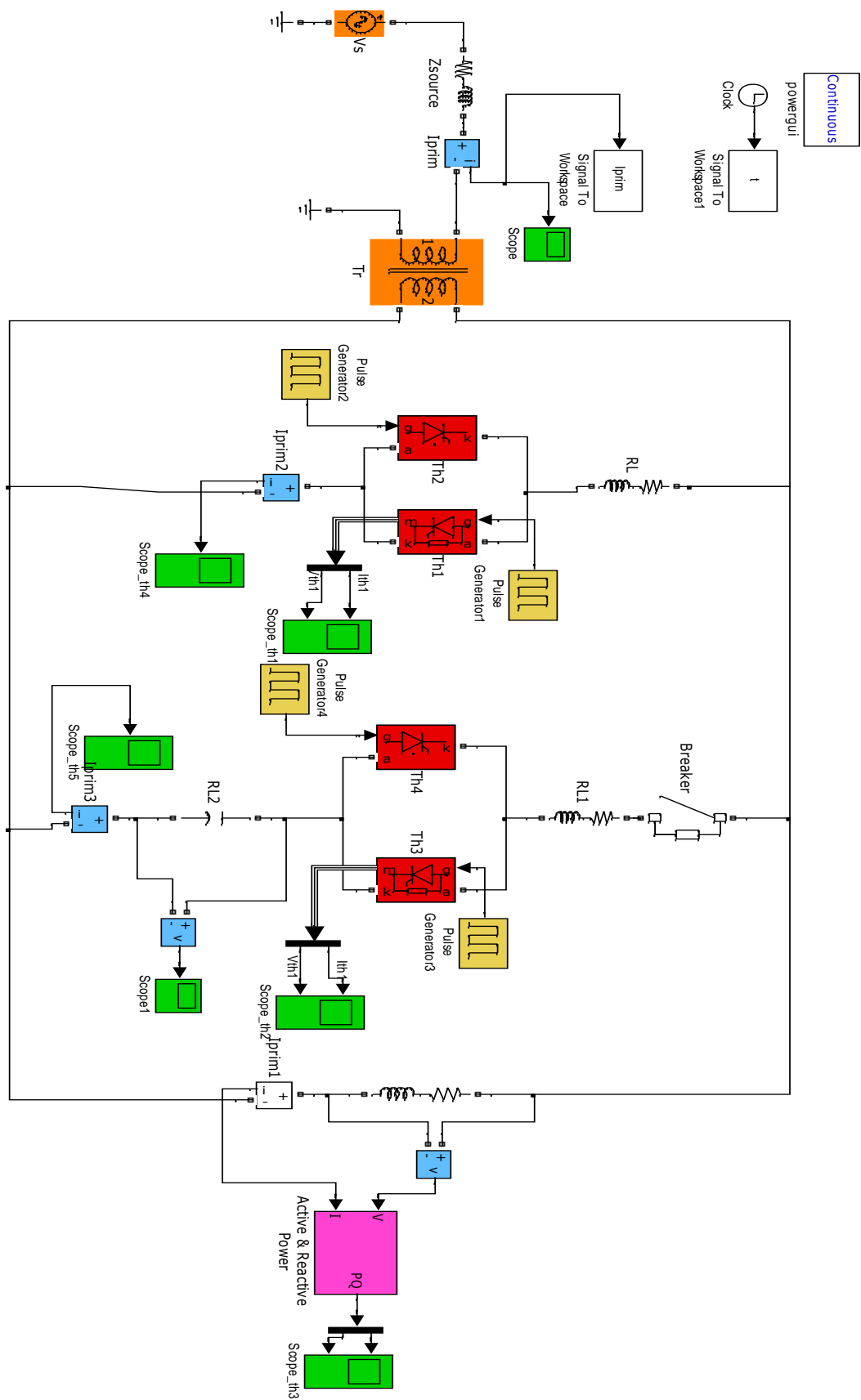


Figure IV 11: Schéma de simulation sous Simulink.

IV- Paramètres de Simulation:

Les paramètres des thyristors sont les suivants :

Ron	1e⁻³
Lon	0
Vf	14*0.8
Rs	500
Cs	0.15e⁻³

Paramètres d'amortissement sur

Rs	Inf
Cs	0

Les paramètres de branche magnétisante R_m et X_m à [500, 500].

Ces valeurs correspondent à 0,2% de courants résistifs et inductifs.

Amplitude	1
Period	1/60 s
Pulse width (% of period)	1% (3.6 degrees pulses)
Phase Delay	1/60 + T 1/60 + 1/120 + T for Pulse 2

Paramètres de la charge : $V_n=16\text{kV}$; $f=60\text{Hz}$; $P=100\text{kW}$; $Q=30\text{kVAR}$

V- Commande:

Les branches TCR et TSC sont toutes deux contrôlées par une valve constituée de deux chaînes de thyristors connectées en antiparallèle. Un circuit d'amortissement RC est connecté à chaque valve. La branche TSC est activée/désactivée, fournissant ainsi une variation discrète du courant capacitif. La branche TCR est contrôlée en phase pour obtenir une variation continue du courant réactif.

Les impulsions envoyées au TCR 2 sont retardées de 180 degrés par rapport aux impulsions envoyées au TCR 1. Le retard T est utilisé pour spécifier l'angle d'amorçage α . Pour obtenir un angle d'amorçage de 120 degrés, spécifiez T dans l'espace de travail en saisissant : $T = 1/60/3$; Le temps de simulation sur 0,1.

VI- But de la simulation:

Nous avons opté dans ce travail de simulation, d'étudier les caractéristiques d'un SVC simplifié, c'est-à-dire dans sa constitution de base, TCR et TSC, pour vérifier son bon fonctionnement avec la commande adoptée, (instants d'amorçage des quatre thyristors), ce qui constitue la première partie des simulations. La seconde partie sera l'étude de l'influence de l'angle d'amorçage α des thyristors, sur le courant, la tension et les puissances au niveau de la charge.

Première partie de simulation

Dans cette série de simulation, nous voulons voir les caractéristiques des deux branches du SVC, la branche TCR et la branche TSC afin de valider la commande du SVC.

Nous simulerons donc :

- **la branche TCR seule pour visualiser :**
 - Le courant primaire du transformateur ;
 - Le courant du TCR ;
 - Le courant et la tension dans le thyristor ;
- **la branche TSC seule,**
 - Le courant primaire du transformateur ;
 - Le courant du TSC ;
 - Le courant et la tension dans le thyristor ;
- **Les deux branches en même temps (TCR et TSC) à vide sans charge**
 - Le courant primaire du transformateur ;
 - Le courant du TCR ;
 - Le courant et la tension dans le thyristor ;
 - Le courant du TSC ;
 - Courbes des puissances active et réactive
- **Les deux branches en même temps (TCR et TSC) en charge**
 - Le courant primaire du transformateur ;
 - Le courant du TCR ;
 - Le courant et la tension dans le thyristor ;
 - Le courant du TSC ;
 - Courbes des puissances active et réactive

Deuxième partie de simulation

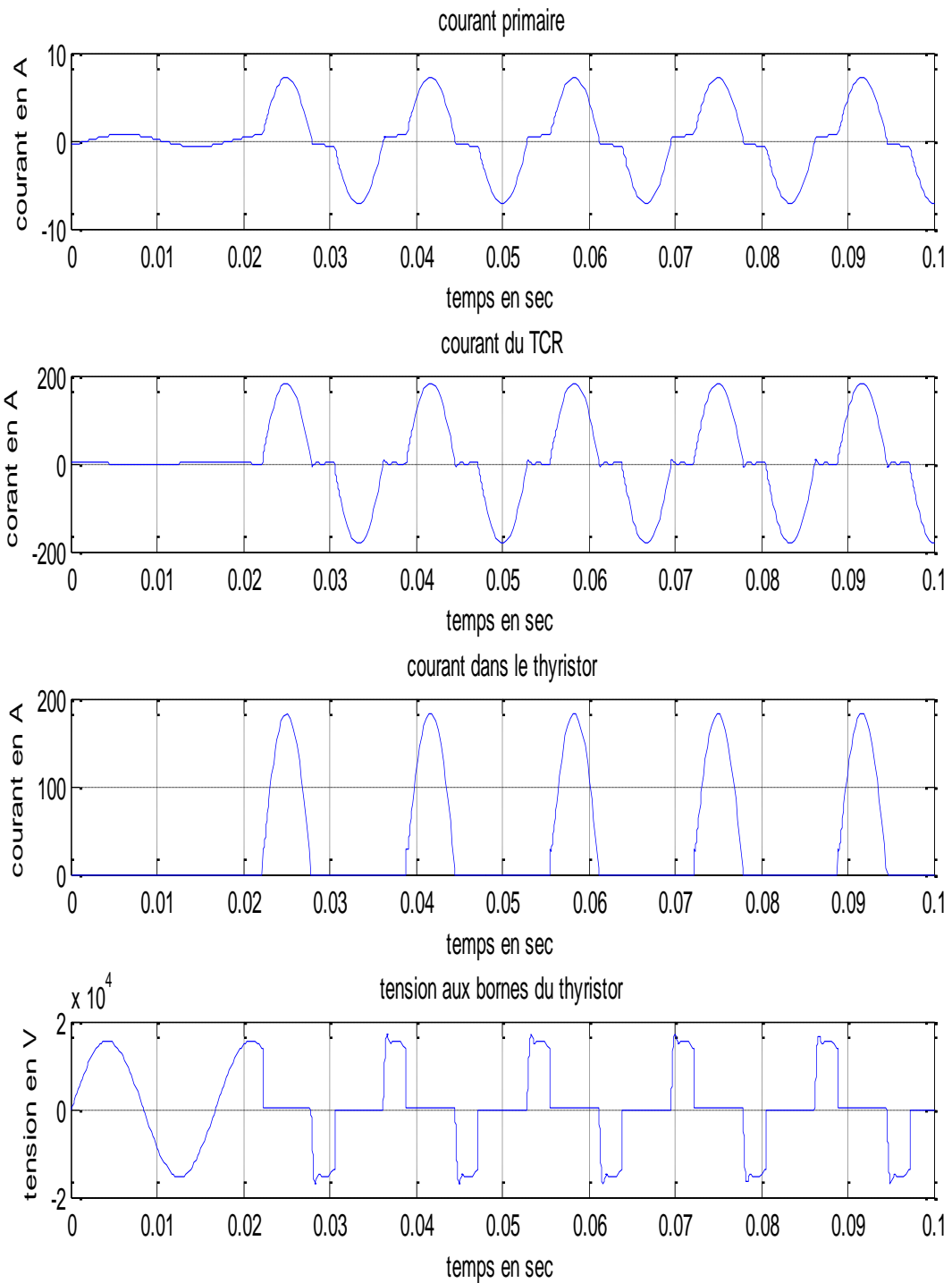
Dans cette série de simulation, nous voulons voir l'impact de l'angle d'amorçage des thyristors α sur la valeur efficace du courant et sur les puissances active et réactive absorbées par la charge. Nous varierons α de 30° à 180° et simulerons pour visualiser :

- Les courbes des tensions aux bornes de la charge
- Les courbes des valeurs efficaces
- Les courbes des Puissances actives et réactives

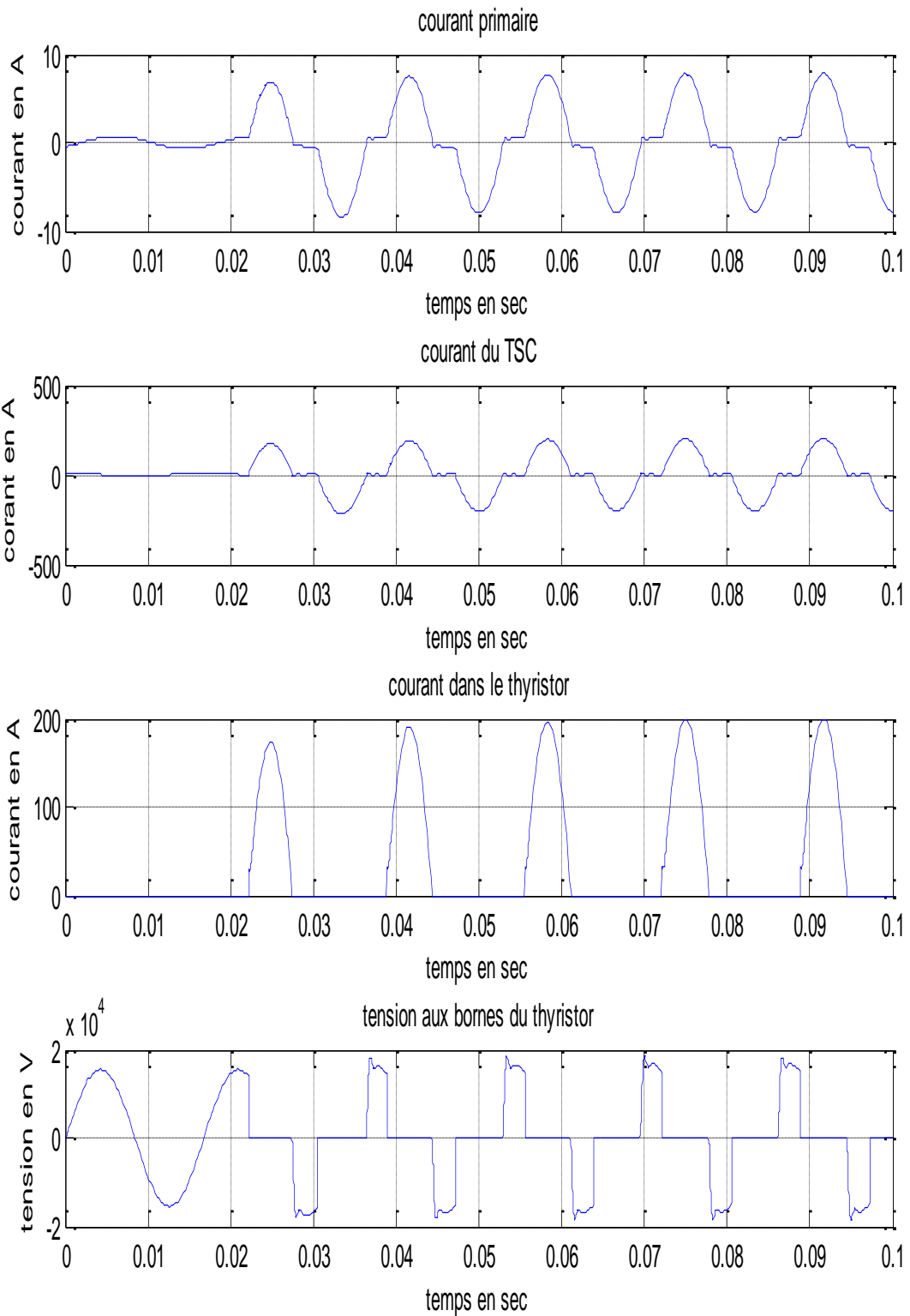
VII- Résultats de simulation:

Première série de simulation :

I- Simulation de la branche TCR seule:

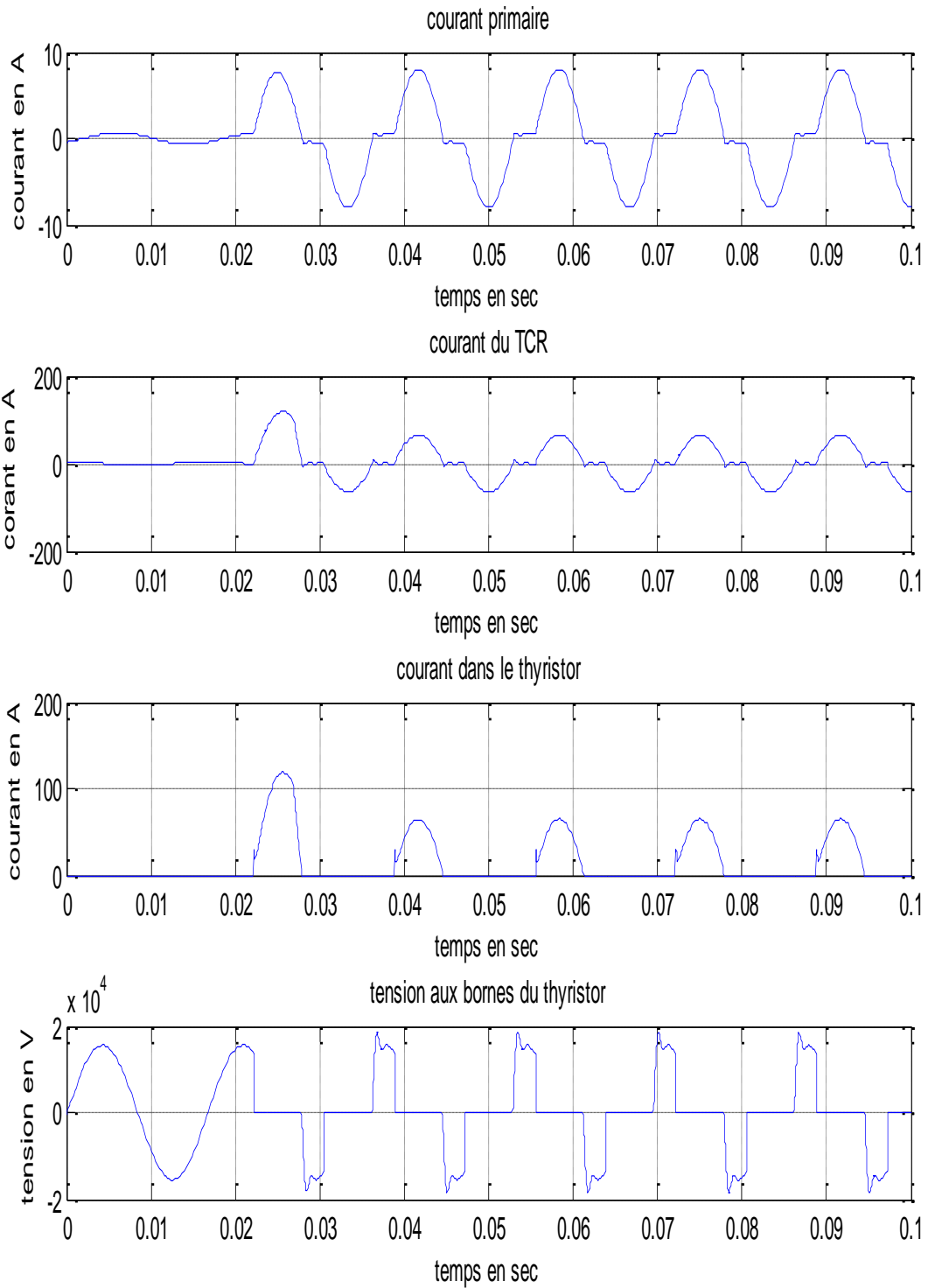


II- Simulation de la branche TSC seule :

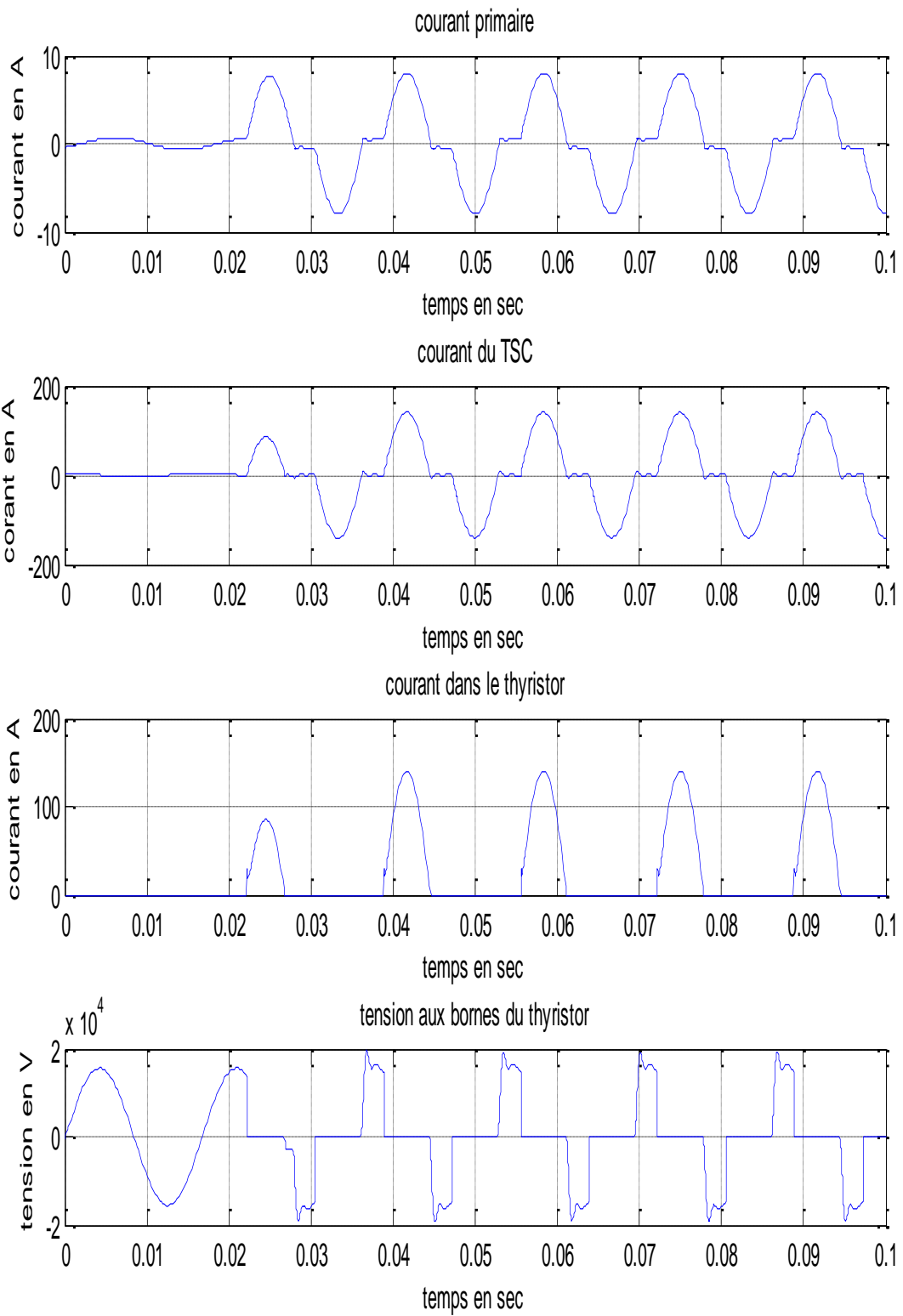


III-Simulation des deux branches (TCR et TSC) en même temps à vide (sans la charge) :

a- Courbes dans la branche TCR :

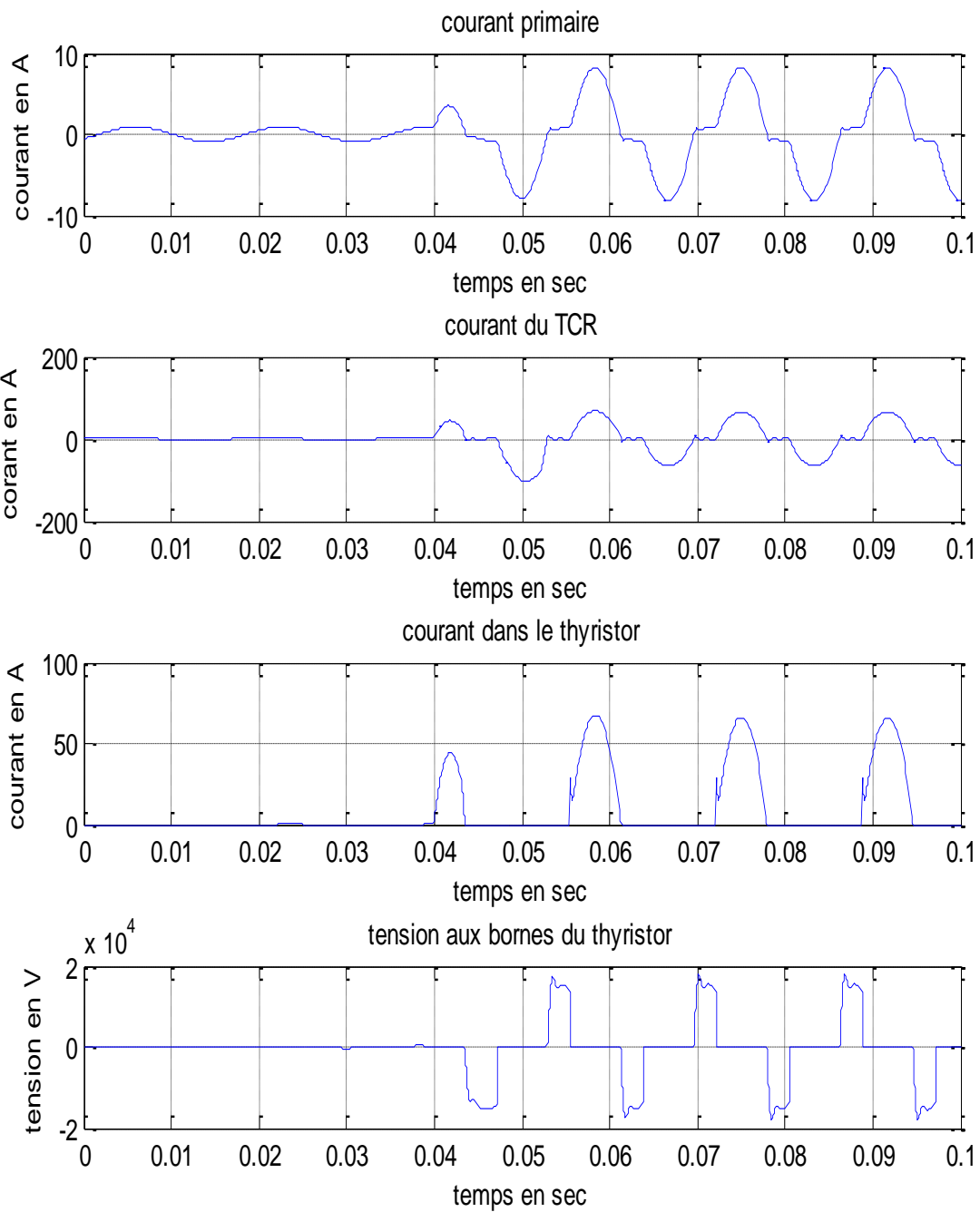


b- Courbes dans la branche TSC :

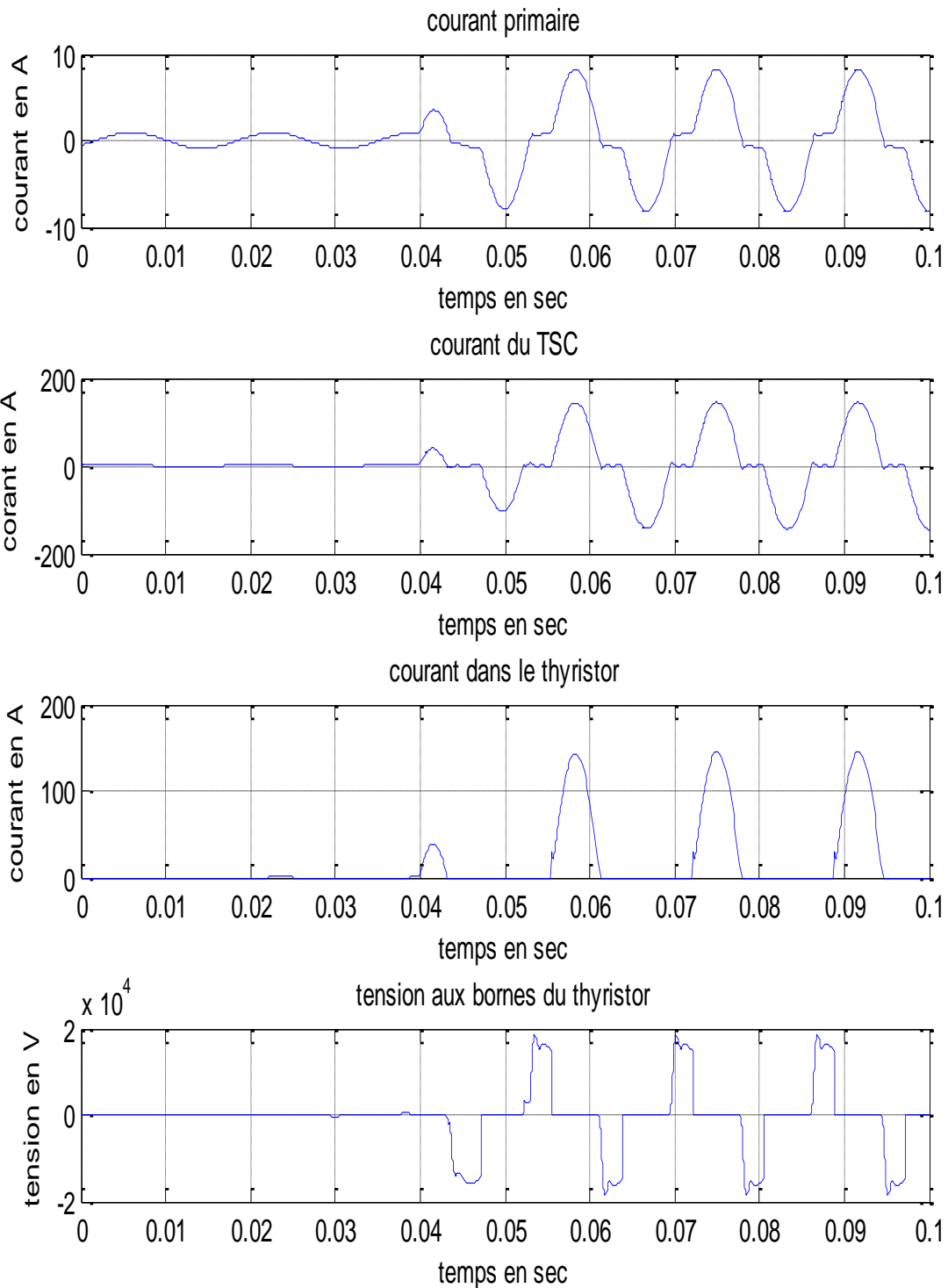


IV- Simulation des deux branches (TCR et TSC) en même temps en charge :

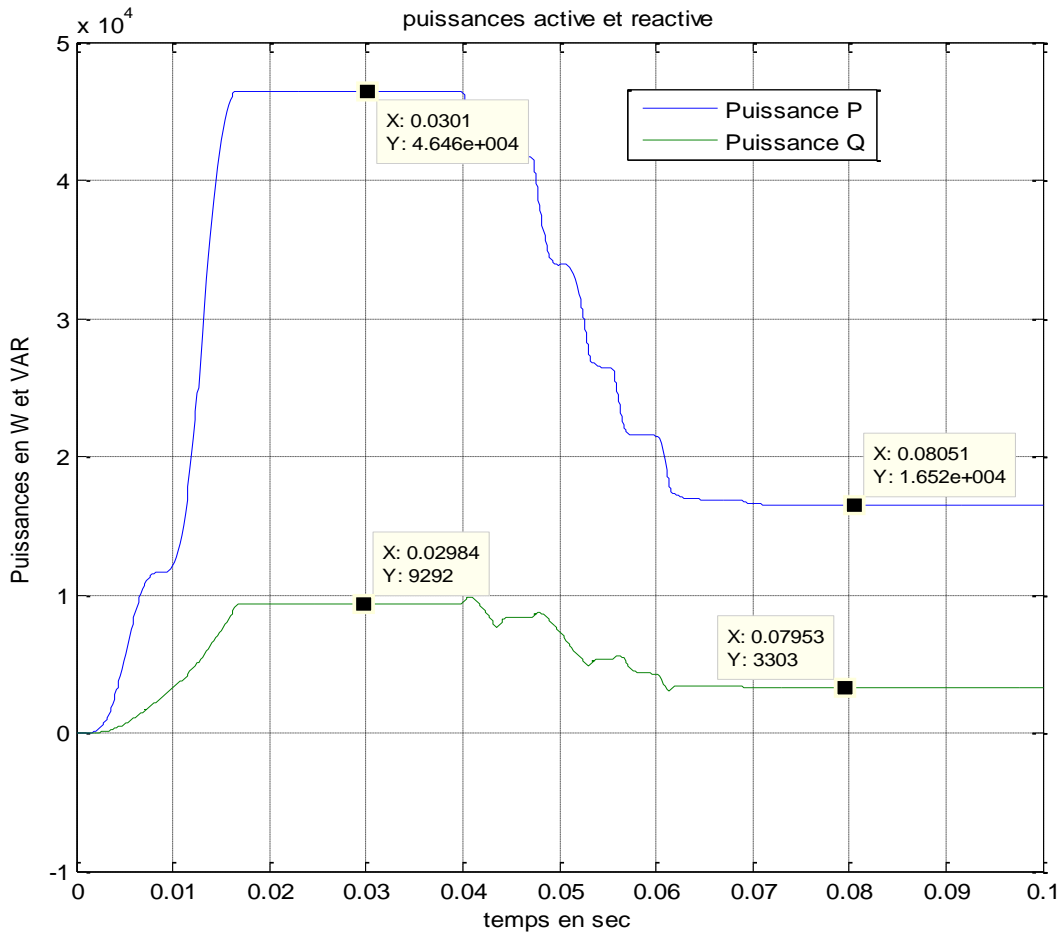
a- Courbes dans la branche TCR :



b- Courbes dans la branche TSC :



c- Courbes des puissances active et réactive :



V- Conclusion:

Dans cette série de simulation, nous voulons mettre en évidence le fonctionnement d'un SVC en faisant fonctionner les branches TCR et TSC séparément et voir l'évolution des signaux des différents paramètres électriques, courants, tensions et puissances. Elle permet l'analyse dite «classique» du TCR et du TSC car la connaissance approfondie des circuits (TCR et TSC) est importante afin de pouvoir comprendre les effets de ces circuits dans le SVC.

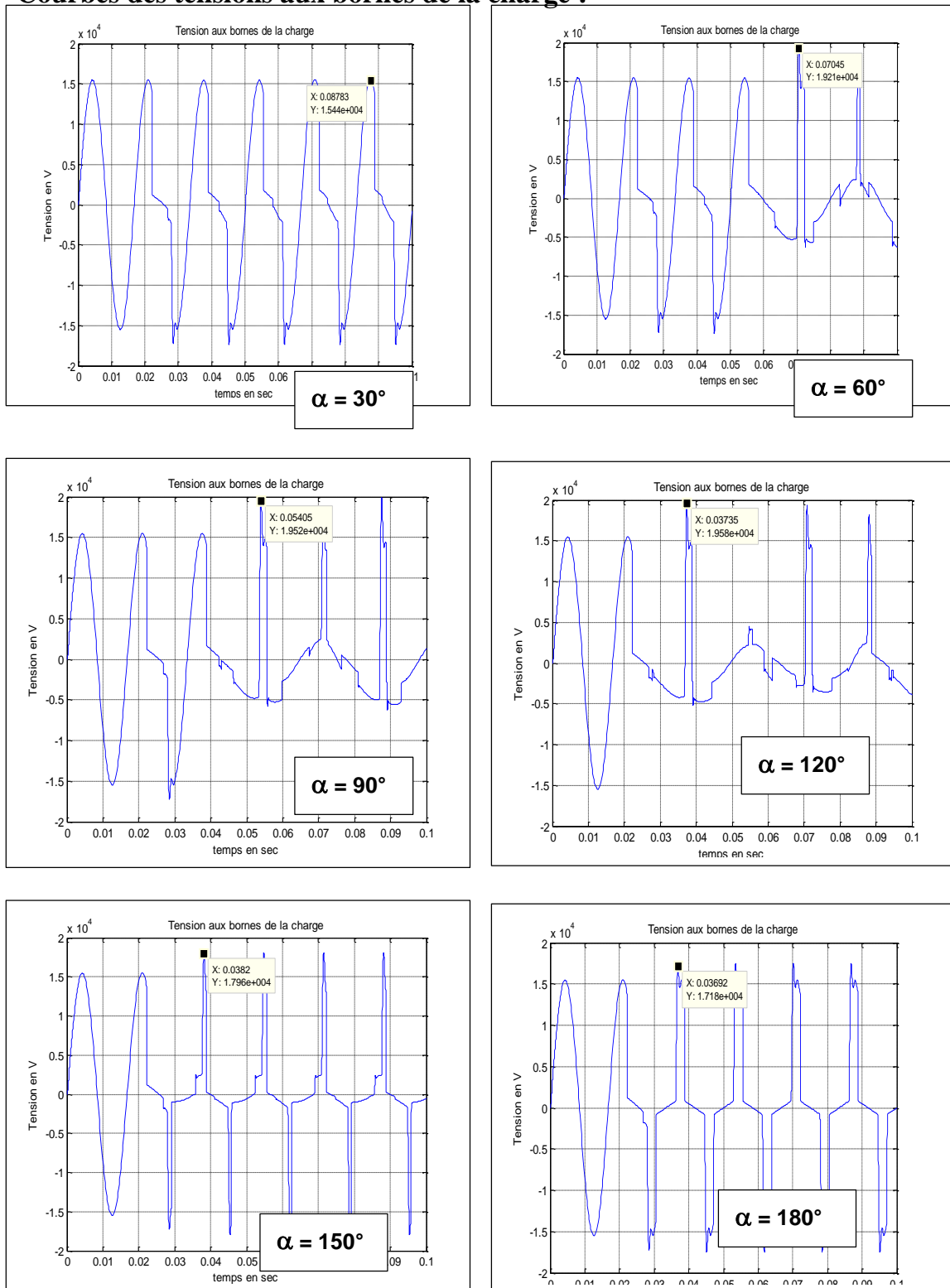
Ces simulations montrent que le SVC (TCR et TSC) influence considérablement le fonctionnement d'un réseau électrique, et déforment significativement la forme sinusoïdale du courant ainsi que la tension, et agit directement sur les puissances active et réactive absorbées par la charge.

On remarque que le courant devient non sinusoïdal et des harmoniques sont produits, c'est pour cette raison que le dispositif SVC est toujours associé avec des filtres des courants harmoniques qui sont produit par le TCR lui-même ou le TSC, pour ne pas les transmettre au réseau électrique.

Deuxième série de Simulation :

On fait varier α de 30° à 180°

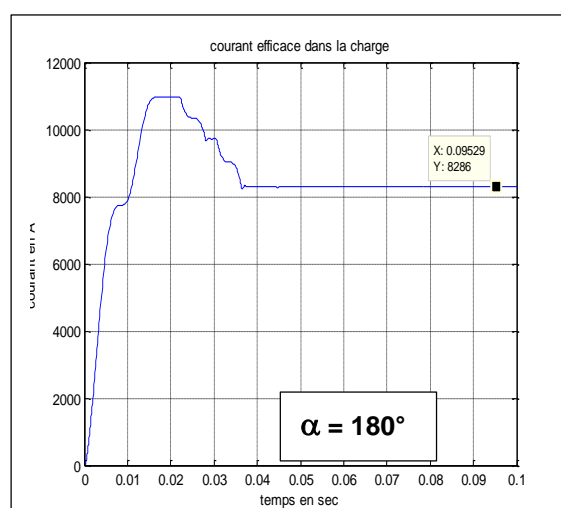
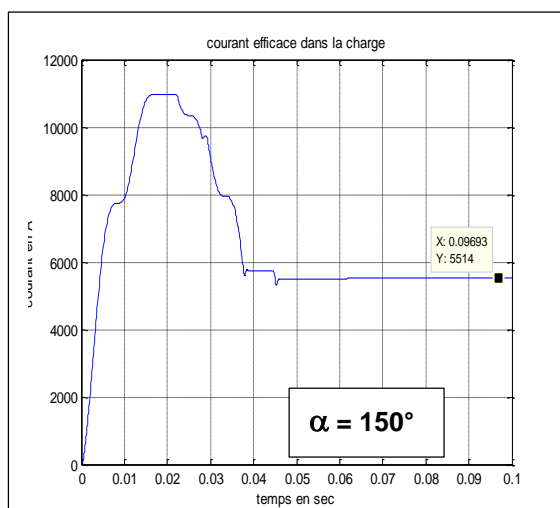
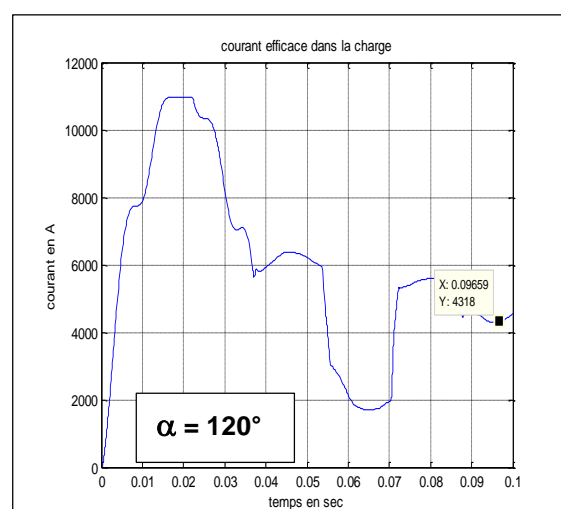
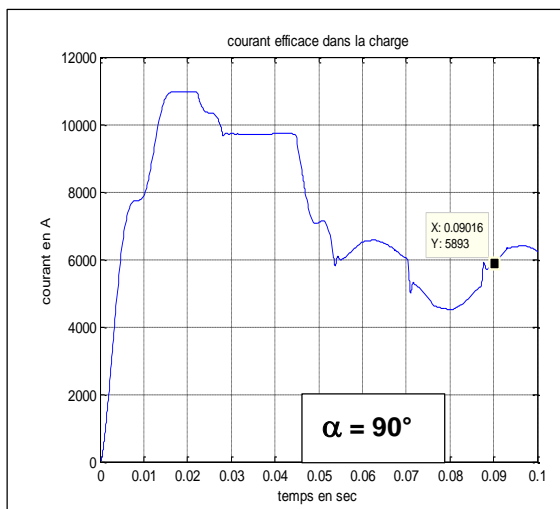
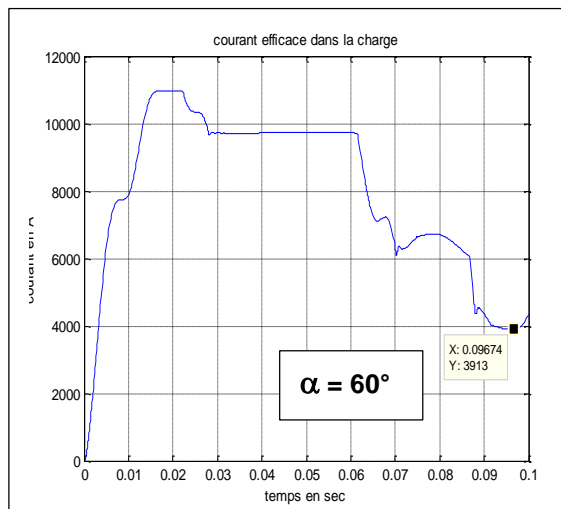
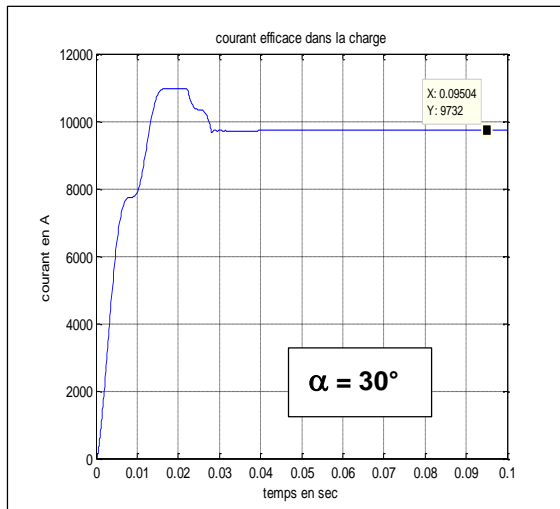
I- Courbes des tensions aux bornes de la charge :



Interprétations :

- L'augmentation de α perturbe considérablement la forme de la tension aux bornes de la charge, ce qui engendre des harmoniques plus importantes.
- L'utilisation de filtres d'harmoniques est indispensable pour diminuer les harmoniques, limiter les pertes, augmenter le facteur de puissance et donc d'améliorer la qualité de l'énergie électrique consommée.

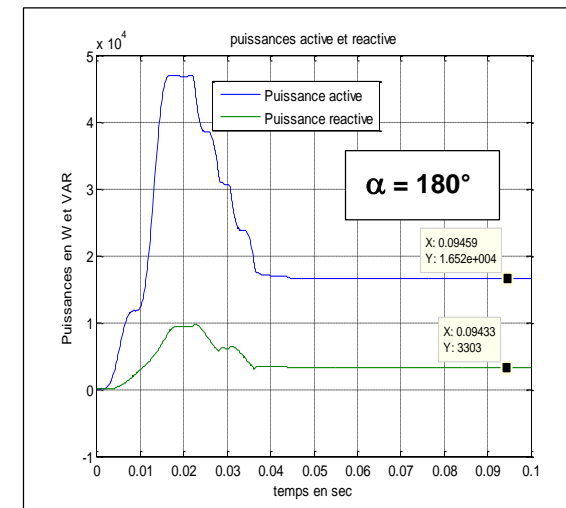
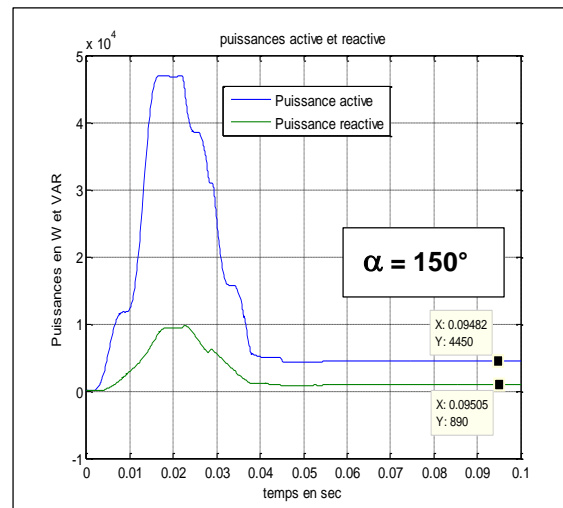
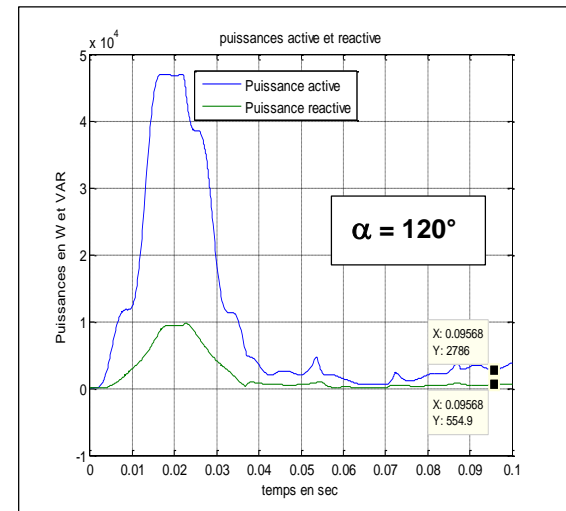
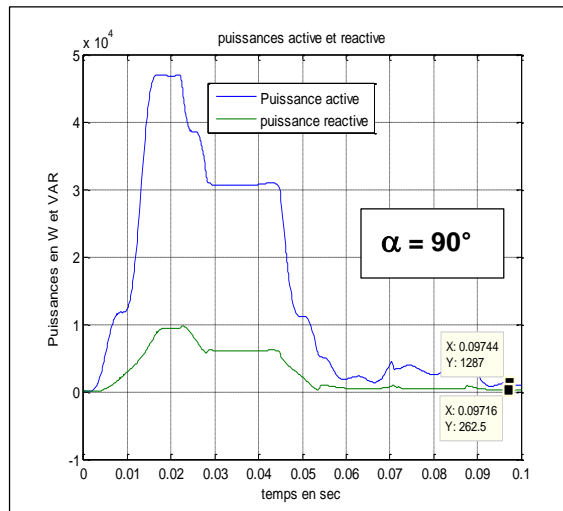
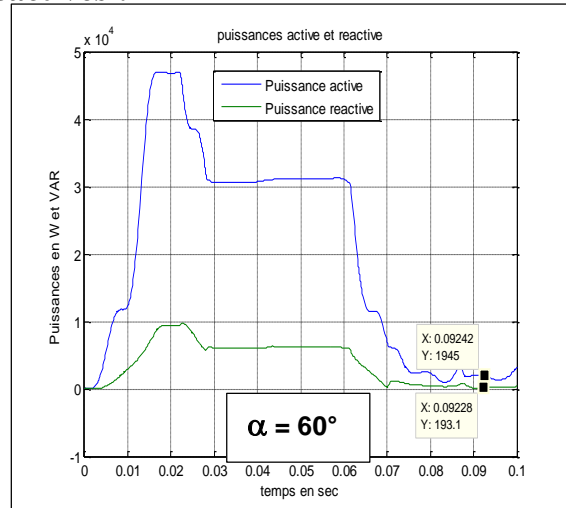
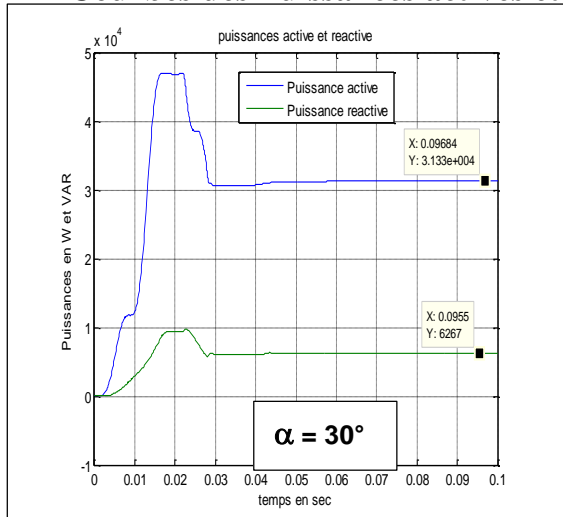
II- Courbes des valeurs efficaces:



Interprétations

- La valeur efficace du courant de la charge est affectée par la variation de l'angle d'amorçage des thyristors du SVC : α
- Elle diminue tout autour de 90° , que ce soit à plus de 60° ou à moins de 120° .
- Cette valeur est d'autant plus importante en s'éloignant de 90° , c'est-à-dire, petites valeurs de α et grandes valeur de α inférieures à 180° .

III- Courbes des Puissances actives et réactives :



Interprétations :

- La puissance active et la puissance réactive dans la charge varient de manière très significative avec la variation de l'angle d'amorçage α .
- La puissance réactive apportée par le SVC agit efficacement pour les valeurs faibles de α .
- Pour les différentes valeurs de α , il faut une commande adéquate basée sur la caractéristique $V_{svc} = f(I_{svc})$, pour contrôler l'action des branches TCR et TSC.

IV- Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons simulé un réseau électrique qui alimente une charge inductive, qui consomme donc de la puissance réactive, dans lequel, on a inséré un SVC formé de deux branches TCR et TSC, que lui-même perturbe le courant de la charge et donc la tension, qui engendre des harmoniques, ce qui nécessite encore de la puissance réactive et des filtres.

Les signaux mis en évidence dans la première partie de la simulation, sont les courants primaires du transformateur, le courant du TCR, le courant et la tension dans le thyristor, et le courant du TSC, afin de visualiser les différentes formes dans un fonctionnement normal du système.

La deuxième partie de la simulation consiste en la variation de l'angle d'amorçage α des thyristors, et de voir son influence sur la tension de la charge, la valeur efficace de son courant et enfin les puissances active et réactive dans cette charge.

Le SVC permet d'obtenir, aux bornes de la charge une tension périodique mais pas complètement sinusoïdale, elle peut sous forme de portion de sinusoïde, cependant, la variation de α perturbe sa forme mais garde sa périodicité et sa fréquence imposée par le réseau ; il permet aussi le réglage continu de la valeur efficace du courant qu'une source de tension alternative débite dans la charge ; et enfin il permet de contrôler la puissance absorbée par la charge et ceci en régime alternatif.

Conclusion Générale

À travers notre travail, on remarque que le TCR fait varier le courant à travers l'inductance et cela en variant l'angle d'amorçage des thyristors. Il est caractérisé par sa commande continue et par sa génération d'harmoniques sur le réseau.

Dans le TSC l'inductance d'atténuation sert à limiter le courant en cas de fonctionnement anormal et à éviter la résonance avec le réseau à des fréquences particulières. La susceptance étant fixe, le courant dans le TSC varie linéairement avec la tension V (qui explique l'absence des harmoniques sur le TSC)

Le SVC (TCR et TSC) est donc un dispositif FACTS, qui permet la génération ou l'absorption de l'énergie réactive et cela pour maintenir un niveau de tension désiré, il permet aussi de rééquilibrer le réseau par une action différenciée sur chacune des phases.

L'étude d'un SVC nécessite plusieurs étapes d'analyses laborieuses, afin d'opter pour son utilisation comme source de puissance réactive pour la compensation shunt, ou comme contrôleur de la tension ou du courant dans un réseau électrique ou dans un système de puissance en général. Ces étapes comportent la modélisation (statique et dynamique), donc choisir le modèle adéquat en fonction du système et de l'objectif à atteindre dans compensation de la puissance réactive ou le contrôle de la tension aux bornes de la charge.

En faisant varier α , l'angle d'amorçage des thyristors, on peut ajuster les puissances active et réactive dans la charge, la tension à ses bornes et faire varier la valeur efficace de courant absorbé, et enfin commander la puissance transitant dans le réseau en réactance globale de la ligne.

La commande du SVC reste la partie la plus importante et la plus complexe dans le choix de son utilisation comme principal compensateur de la puissance réactive, raison pour laquelle, on n'a pas traité la partie commande qui relève essentiellement de l'automatique, donc nécessitant des connaissances poussées en asservissements et régulation. Cependant, grâce à notre travail, nous estimons que cette commande en utilisant la caractéristique ($V-I$) traitée dans le chapitre 3, complétera cette étude et permettra d'améliorer les conditions de fonctionnement de notre réseau.

Références bibliographiques

- [1] [Doc I] : Gérard GAY “la compensation de l’énergie réactive”
Intersection : le magasin Schneider Electronic de l’enseignement technologique et professionnel.
N° :16 novembre 2006
- [2] Fauché, F., Lagonotte, M., & Sabonnadière, J.-C. (2007). *Electrotechnique: Fondements et applications* (2e éd.). Paris : Dunod
- [3] Fauché, F., Lagonotte, M., & Sabonnadière, J.-C. (2010). *Electrotechnique: Théorie et applications* (3e éd.). Paris : Dunod.
- [4] Auzanneau, A., & Louis, J.-P. (2013). *Systèmes électriques: Théorie et pratique* (2e éd.). Paris : Dunod
- [5] Tounsi, A., & Muraro, P. (2015). *Gestion de l’énergie électrique*. Paris : Dunod
- [6] Fauché, F., Lagonotte, M., & Sabonnadière, J.-C. (2010). *Électrotechnique: Théorie et applications* (3e éd.). Paris : Dunod.
- [7] [Doc II] : Jean VERSEILLE “Circulation d’énergie réactive” Technique de l’ingénieur N° : D4300- Mars 1992.
- [8] [Doc III] : Philippe SERRAND et Jean VERSEILLE “ compensation de la puissance réactive et tenue en tension dans les réseaux publics”
Technique de l’ingénieur N° : D4305- Juin1986.
- [9] Sabonnadière, J.-C., & Bertrand, P. (2011). *Distribution électrique et systèmes de puissance*. Paris : Dunod.
- [10] Louis, J.-P., & Malabre, A. (2018). *Machines électriques: Fonctionnement et utilisation* (4e éd.). Paris : Dunod.
- [11] HELD (W.), POLIMEEIR (F.J.) - Les fusibles intérieurs, dans les condensateurs à haute tension modernes. - ELECTRA, no 33, p. 32-47, mars 1974
- [12] « Encyclopédie des sciences industrielles (Electricité, électronique générale) ».Année 1977, édition QUIETT.
- [13] IMMADOUCHENE, G « Compensation de la puissance réactive sur les réseaux d’énergie électrique -Application SVC » Mémoire Ingénieur Année 2007, UMMTO
- [14] IGNATOVA Vanya, "Méthodes d’analyse de la qualité de l’énergie électrique: Application aux creux de tension et à la pollution harmonique", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Joseph Fourier, France, 20 Octobre 2006.En ligne:(hal.archivesouvertes.fr/docs/00/17/.../PDF/memoire_these_Ignatova-v2.pdf...).
- [15] Delendi Louardi,“ Contrôle de l’écoulement de puissance active par système FACTS”, Mémoire de Magister Soutenu au département d’électrotechnique Université de Batna 2009.
- [16] Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press.
- [17] Padiyar, K.R. (2007). *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*. New Age International.

Références bibliographiques

- [18] CIGRE WG 38-01 Task Force 3. "Reactive Power Generation Analyses and Planning Procedure", CIGRE, Paris, 1989.
- [19] CIGRE Working Group 38-01. "Static Var Compensators", CIGRE, Paris, 1986.
- [20] Kundur, Prabha. "Power System Stability and Control". Mc Graw-Hill, New York, 1994.
- [21] L.Gyugyi; "Unified Power-Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems". IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 4, Juillet 1992, pp. 323-331.
- [22] Passelerge, J.Ch. "Étude de l'Insertion d'un STATCON sur les Performances Statiques d'un Réseau". LEG-DEA, Juin 1995.
- [23] IEEE Special Stability Controls Working Group. "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, Février 1994, pp 229-240
- [24] BARAR, A. et LADJICI, A. A. (2020). Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission en Courant Alternatif. École Nationale Polytechnique, Alger.
- [25] Dupont, J., & Martin, A. (2023). Condensateur commuté par thyristor (TSC). Dans Manuel de systèmes d'alimentation électrique (2e éd., Vol. 1, pp. 150-172). Éditions Techniques.
- [26] « système flexible de transmission d'énergie en courant alternatif (FACTS) » cahiers techniques de l'ingénieur

