

11/621.769

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Réseaux Electrique**

**CONTROLE DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE ACTIVE
ET REACTIVE PAR LE SYSTEME FACTS**

Présenté par :

BRAHMIA MOUHSSIN

CHAIB RASOU ASMA

Sous la direction de :

Mr. BLOUCIF Faycel

JUIN 2012



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Réseaux Electrique**

**CONTROLE DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE ACTIVE
ET REACTIVE PAR LE SYSTEME FACTS**

Présenté par :

BRAHMIA MOUHSSIN

CHAIB RASOU ASMA

Sous la direction de :

Mr. BLOUCIF Faycel

JUIN 2012

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier ALLAH qui nous a donné vie et santé pour le parachèvement de ce modeste travail.

Nous remercions de tout cœur notre encadreur

Mr. Beloucif Faycel pour son soutien, son encouragement, la confiance qu'il nous témoignée en acceptant de diriger ce travail et pour avoir mis à notre disposition ses conseils pour une meilleure maîtrise du sujet.

Nous remercions tous les enseignants du département qui n'ont ménagé aucun effort pour toujours donner le meilleur travail.

Nous remercions nos familles qui nous ont toujours donnée la possibilité de faire ce que nous voulions durant nos études et qui ont toujours cru en nous.

En fin, nous remercions tous ceux qui en contribué a ce travail par leur remarque, leurs suggestions et leurs soutiens.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I	
Qualité d'énergie électrique	
I.1 Introduction.....	3
I.2 le paramètre caractérisé de qualité d'énergie.....	3
I.3 Dégradation de la qualité de la tension.....	4
I.3.1 Généralités.....	4
I.3.2 Variations et fluctuations de tension (Flicker).....	5
I.3.3 Variations ^{et} <u>on</u> fluctuations de la fréquence	5
I.3.4 Creux de tension et coupures.....	6
I.3.5 Harmoniques	7
I.3.5.1 Définition.....	7
I.3.5.2. sources d'harmoniques.....	7
I.3.5.2.1- Les charges industrielles.....	9
I.3.5.2.2- Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage.....	9
I.3.6 Déséquilibres de tension.....	9
I.3.7 Surtensions.....	10
I.4 influences négative reliées a ces perturbations.....	11
I.5 Solutions et moyen utilisés pour améliorer la QEE.....	12
I.5.1 Fluctuations de tension.....	12
I.5.2 Creux de tension et coupures	13
I.5.3 Harmoniques.....	14
I.5.4 Déséquilibres.....	15
I.5.5 Surtensions.....	16

Conclusion

CHAPITRE II

Écoulement de puissance et compensation d'énergie réactive

II.1. Introduction.....	19
II.2. Définition des puissances.....	19
II.2.1. Puissance réactive	19
II.2.2. Puissance apparente	19
II.3. <u>D</u> éferente source d'énergie réactive	20
II.3.1. Les dispositifs conventionnels	20
II.3.2. Les groupes de production (générateurs)	20
II.3.3. Groupes thermiques et hydrauliques	20
II.3.4. Les condensateurs	21
II.3.5. Les inductances	22
II.3.6. Condensateurs et inductances fixes.....	22
II.3.7. Les compensateurs synchrones.....	23
II.3.8. Les compensateurs statiques.....	24
II.4. Effet de transit d'énergie réactive.....	24
II.5. Compensation d'énergie réactive.....	25
II.5.1. Définition.....	25
II.5.2. Facteur de puissance.....	27
II.5.3. Chute de Tension et Compensation Réactive.....	28
II.6. Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive.....	29

Conclusion

CHAPITRE III

Système FACTS et compensateur statique SVC

III.1. Introduction aux systèmes FACTS.....	33
III.2. Avantage du système FACTS.....	33
III.3. Les différents types de Systèmes FACTS.....	34
III.4. Différentes Catégories des FACTS	35
III.4.1. Compensateurs séries	35
III.4.2. Compensateurs shunts.....	36
III.4.3. Compensateurs hybrides série-shunt.....	37
III.5. Compensateur statique (SVC) a thyristor.....	37
III.5.1. Historique du SVC	37
III.5.2. Définition de Thyristor.....	38
III.5.3. Définition de compensateur statique SVC.....	39
III.5.4. Structure de principe.....	41
III.5.5. Différents types de SVC.....	44
III.5.5.1. Condensateur fixe (FC).....	44
III.5.5.2. Réactance commandée par thyristors (TCR).....	44
III.5.5.3. Condensateur commuté par thyristors (TSC).....	51
III.5.5.4. TCR et FC (Fixed Capacitors/ thyristor - Controlled Reactor).....	53
III.5.5.5. inductance commandée par thyristors.....	55
III.5.5.6. TCBR (Thyristor Control Breking Resistor).....	56
III.5.6. Compensateurs séries à base de thyristors.....	57
III.5.6.1. TCSC (thyristor controlled series capacitor).....	57
III.5.6.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor).....	57
III.5.6.3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor).....	57
III.5.6.4. TSSR (Thyristor Switched Serie Reactor).....	58

III.6. Avantage du SVC.....	58
III.7.Rôle des différents compensateurs du système FACTS.....	59
Conclusion.....	60

CHAPITRE IV

Modélisation D'un SVC

IV.1.Configuration D'un TCR /FC.....	61
IV.2.Simulation d'un model TCR/FC.....	65
IV.3.Analyse de résultante de simulation.....	66
IV.3.1.Cas d'un compensateur a caractère capacitif.....	66
IV.3.2. Cas d'un compensateur a caractère inductif.....	71
Conclusion	
Conclusion générale	

Liste des figures

N°	TITRE	PAGE
1.1	paramètres caractéristiques d'un creux de tension.	6
1.2	la Lure de tension pour le courant harmonique d'ordre 3	8
1.3	Les formes d'ondes de différentes perturbations	11
2.1	principe de la compensation	23
2.2	Angle de déphasage $\theta' < \text{angle de déphasage } \theta$ d'où $\cos \theta' > \cos \theta$	26
2.3	Circuit équivalent d'une ligne avec charge et compensateur	28
2.4	Diagramme des tensions sans Compensation	28
2.5	Diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante)	30
3.1	Principaux Dispositifs FACTS	34
3.2	Ligne de Transmission avec système de compensation série	36
3.3	Diagramme de Fresnel	36
3.4	Ligne avec compensateur shunt	37
3.5	Principe de compensation shunt	37
3.6	Symbole du thyristor	38
3.7	Caractéristique d'un thyristor	39
3.8	A. Compensateur statique SVC b. Circuit équivalent de SVC	40
3.9	Représentation schématique monophasée d'un SVC	42
3.10	Exigences posées à la puissance réactive	43
3.11	Réactance commandée par thyristor	45
3.12	Courant et Tension de la branche non linéaire TCR en fonction d'angle d'amorçage (α)	46
3.14	Caractéristique de contrôle de la susceptance TCR, B_{TCR}	48
3.15	Harmonique dans un courant de TCR	50
3.16	Le courant I_1 et le courant total I_n	50
3.17	Condensateur commute par thyristors TSC	52
3.18	Principe du TSC	53
3.19	Schéma de principe d'un FC/TCR.	54

3.20	Inductance commandée par thyristor	55
3.21	Schéma du SVC et TCBR	56
3.22	Structure d'un TCSC	57
4.1	A Model TCR / FC B. schema equivalent	58
4.2	Installation d'un compensateur SVC en parallèle (modèle TCR/FC)	65
4.3	la Lure de P et Q de réseau	68
4.4	la tension et le courent de la charge	69
4.5	Tension et courent du TCR	70
4.6	la Lure de P et Q de réseau	72
4.7	la tension et le courent de la charge	73
4.8	Tension et courent du TCR	64

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La consommation de l'énergie électrique est en hausse progressive et cette tendance augmente avec l'industrialisation et la croissance de la population. De plus en vie aujourd'hui dans l'ère de l'électronique et de l'informatique et toute les chargessont très sensible aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations: une perted'alimentation peut causer l'interruption des différents processus de production; etdevant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plusd'énergie et de meilleur qualité, les entreprises de production de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement régulier de cette demande, et sansinterruption, à travers un réseau maillé et interconnecté afin de prouver une fiabilitédans leurs service.

D'autre part plus que le réseau augmente plus qu'il devient complexe et plusdifficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie enl'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmespeuvent survenir sur ce réseau tel que: le transit de puissance réactive exccssif dansles lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau... etc. et de ce fait lepotentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploiter.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement: malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs).

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés(GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS: Flexible Alternatif CurrantTransmission Systems.

L'apport de cette technologie FACTS pour les compagnies de l'électricité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour contrôler le flux de puissance dans les réseauxet d'augmenter les capacités utilisées des lignes existantes semblables à des extensions dans ces dernières. Ces apports

résultent de l'habilité de ces contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres interdépendants qui gouvernent l'opération de transport de l'énergie électrique y compris l'impédance série, impédance shunt, courant, tension, angle de phase... etc. ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une autre. Ils limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement de réseau.

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, le contrôle des puissances actives et réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs SVC, pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons parlé de la qualité d'énergie électrique et présenté les différentes causes de perturbation qui agissent sur la qualité de tension.
- Le second chapitre nous avons fait une analyse générale des écoulements des puissances et nous décrivons d'une façon générale les différentes sources de la puissance réactive et une description des moyens de compensation.
- Le troisième chapitre est une présentation générale des dispositifs FACTS à savoir leurs classifications et leur principe de fonctionnement est conçu pour l'étude des compensateurs statiques SVC.
- Et on a finalisé notre travail dans le quatrième chapitre par une modélisation d'une configuration d'un SVC

Premier chapitre

Qualité d'énergie électrique

I.1. Introduction :

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transites de puissance soient inférieure aux capacités de transport du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques permettent de rendre l'énergie transportée, distribuée et consommée en très bonne qualité.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'ils maintiennent à leurs bornes, il est évident que la quantité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernent l'exploitation des réseaux électriques.

I.2. les paramètres caractéristiques de qualité d'énergie:

Pour le bon fonctionnement des appareils, matériels, instruments et l'utilisateur consommateur de l'énergie électrique exige d'avoir une alimentation en énergie dans des conditions biens déterminées, et pour la réalisation des gains de productivité (économique de fonctionnement ou réduction des coûts d'exploitations) il faut avoir un bon fonctionnement des procédés et une bonne gestion de l'énergie.

Ce bon fonctionnement n'est assuré que par une meilleure qualité d'énergie électrique pour la satisfaction des besoins des clients.

Pour rappel La tension possède quatre caractéristiques principales, définissent la qualité d'énergies électrique sont:

- Déviation de tension.
- Déviation de fréquence.
- Taux de distorsion harmonique (THD).
- Symétrie de la tension.

I.3. Dégradation de la qualité de la tension :

I.3.1. Généralités :

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées:

- ✓ basse fréquence (< 9 kHz),
- ✓ haute fréquence (>9 kHz),
- ✓ de décharges électrostatiques.

La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) :

- ✓ Variations et fluctuations de tension
- ✓ Variations ou fluctuations de la fréquence
- ✓ creux de tension et coupures
- ✓ harmoniques
- ✓ déséquilibres de tension
- ✓ surtensions

Il n'est en général pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations. Elles peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension. Plusieurs de ces caractéristiques sont souvent modifiées simultanément par une même perturbation. Elles peuvent aussi être classées selon leur caractère aléatoire (foudre, court-circuit, manœuvre...) permanent ou semi permanent.

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension lorsque celle-ci est présente sont brièvement décrits ci-après.

I.3.2 .Variations et fluctuations de tension (Flicker) :

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale.

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoire sont provoquées par des variation rapides de puissance absorbée ou produite par des installations tel que les soudeuses, fours à arc..... etc.

Les fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour les consommateurs.

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cyclique ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude.

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

I.3.3.Variations ou fluctuations de la fréquence :

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans les conditions nouvelles de fonctionnement la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50Hz $\pm 1\%$.

I.3.4. Creux de tension et coupures :

1.3.4.1. Définition :

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 90 % et 10 % d'une tension de référence suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute.

La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée pour les réseaux MT et HT. Une tension de référence glissante, égale à la tension avant perturbation, peut aussi être utilisée sur les réseaux MT et HT équipés de système de réglage (régleur en charge) de la tension en fonction de la charge. Ceci permet d'étudier (à l'aide de mesures simultanées dans chaque réseau) le transfert des creux entre les différents niveaux de tension.

Les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont donc :

- sa profondeur ΔU (ou son amplitude U),
- sa durée Δt , définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est inférieure à 90 %.

Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur, supérieures à 90 %. Elles sont caractérisées par un seul paramètre (la durée). Les coupures brèves sont de durée inférieure à 3 minutes.

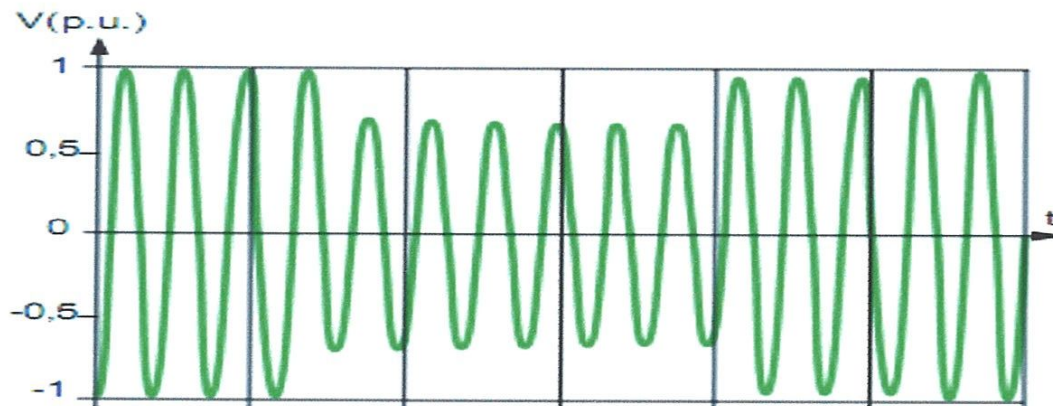


Fig. 1.1 : paramètres caractéristiques d'un creux de tension.

I.3.4.2. Origine:

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation.

Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes :

- des défauts de surintensité sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle même.
- la commutation de charges de puissance importante (moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, chaudières...) par rapport à la puissance de court-circuit.
- Enclenchement des appareils de protection.

I.3.5. Harmoniques:

I.3.5.1 Définition:

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale, qui provoquent une déformation ou distorsion de l'onde sinusoïdale.

I.3.5.2. source des harmoniques:

Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente. Ce courant est riche en composantes harmoniques dont le spectre sera fonction de la nature de la charge.

Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source.

L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques a donc un rôle fondamental dans la sévérité de la distorsion en tension.

Le taux de distorsion harmoniques est exprimé par :

$$\text{THD}_{(U)} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{U_n^2}{U_1^2}} \quad \text{Distorsion harmonique de tension}$$

$$\text{THD}_{(I)} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{I_1^2}} \quad \text{Distorsion harmonique de courant}$$

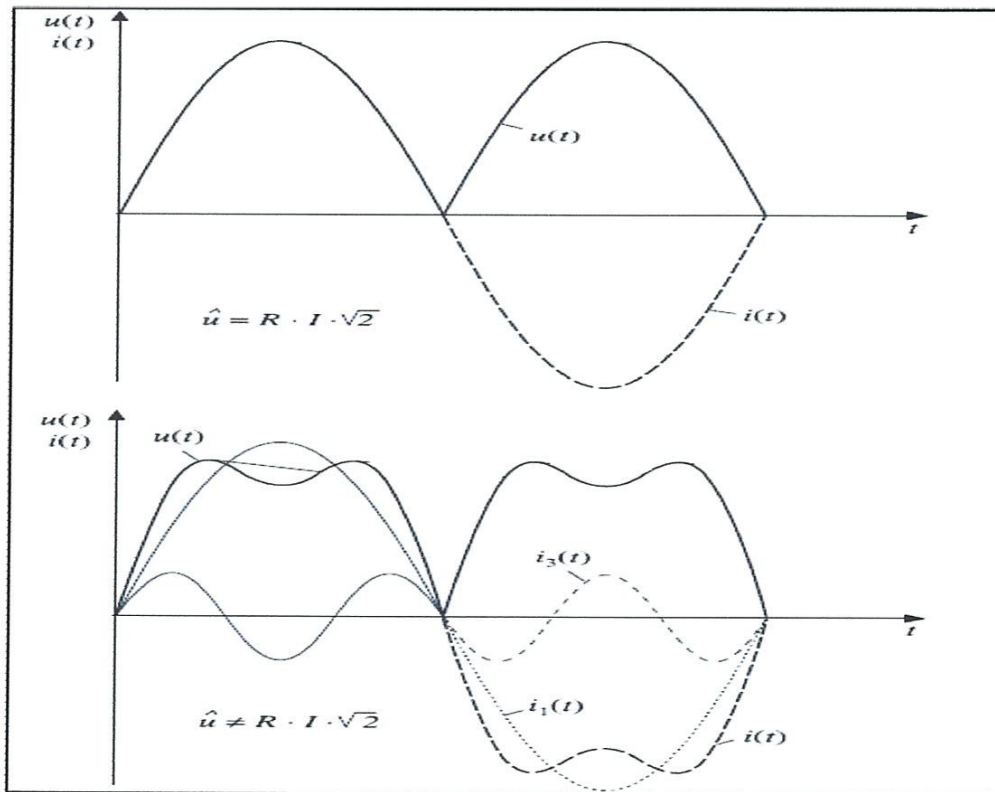


Fig.1.2. la Lure de tension pour le courant harmonique d'ordre 3

Deux types de charges produisant les harmoniques sont :

I.3.5.2.1- Les charges industrielles:

- Équipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage.
- charges utilisant l'arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).

I.3.5.2.2-Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage :

Téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes.

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes.

I.3.6. Déséquilibres de tension:

Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

Le déséquilibre du système triphasé de tension est essentiellement dû aux charges monophasé ou déséquilibrées raccordées sur le réseau. Les conséquences sont l'augmentation de l'échauffement des machines asynchrones, l'existence de couple inverse conduit à la dégradation prématurée des machines.

I.3.7. Surtensions:

Une tension amplifiée à une valeur de crête est des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification sont de trois natures :

- Temporaire (à fréquence industrielle) prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre
- De manœuvre : découlent d'une modification de la structure du réseau.
- Atmosphériques sont provoquées par le foudre soit directement soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

I.3.7. 1- Les surtensions temporaires :

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles ont plusieurs origines :

- Un défaut d'isolement lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la terre dans un réseau à nature impédance ou isolé, la tension des phases saines par rapport à la terre peut atteindre la tension composée. Des surtensions sur les installations BT peuvent provenir des installations HT par l'intermédiaire de la prise de terre du poste HT/BT.

I.3.7. 2 -Les surtensions de manœuvre :

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...). On distingue :

- les surtensions de commutation en charge normale,
- les surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs,
- les surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs).

I.3.7. 3- Les surtensions atmosphériques :

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre).

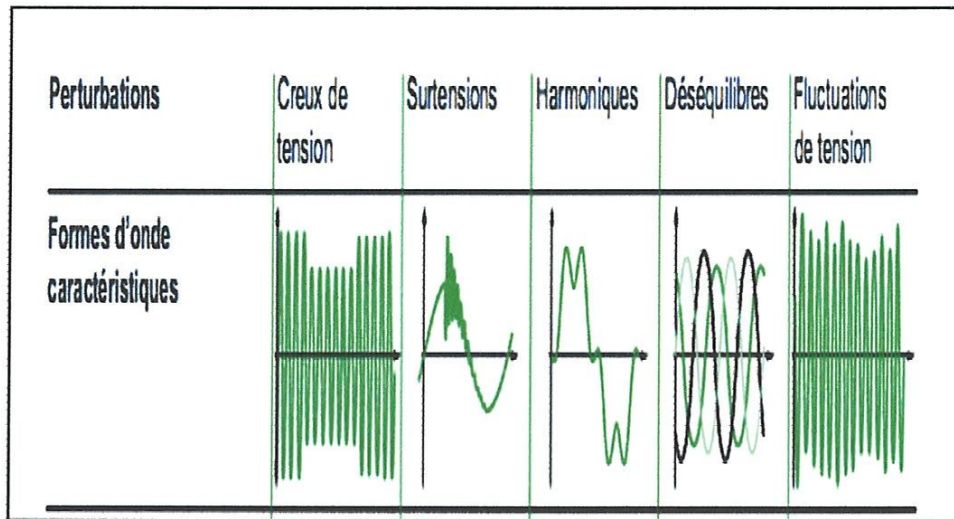


Fig. 1.3. Les formes d'ondes de différents perturbations

I.4. influences négatives liées à ces perturbations :

D'une façon générale, quelle que soit la perturbation, les effets peuvent être classés de deux façons différentes :

- Effets instantanés : manœuvres intempestives de contacteurs ou d'organes de protection, mauvais fonctionnement ou arrêt d'une machine. L'impact financier de la perturbation est alors directement chiffrable.
- Effets différés : pertes énergétiques, vieillissement accéléré du matériel dû aux échauffements et aux efforts électrodynamiques supplémentaires engendrés par les perturbations. L'impact financier (par ex. sur la productivité) est plus difficilement quantifiable.

I.5. Solutions et moyen utilisés pour améliorer la qualité d'énergie électrique :

I.5.1. Fluctuations de tension :

Les fluctuations produites par les charges industrielles peuvent affecter un grand nombre de consommateurs alimentés par la même source. L'amplitude de la fluctuation dépend du rapport entre l'impédance de l'appareil perturbateur et celle du réseau d'alimentation. Les solutions consistent à :

- Changer de mode d'éclairage Les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence.
- Installer une alimentation sans interruption Elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés.
- Modifier le perturbateur Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités.
- Modifier le réseau :
 - Augmenter la puissance de court circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point de l'alimentation.
 - Eloigner « électriquement » la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant.
- Utiliser un compensateur automatique Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. Le flicker peut être réduit de 25% à 50 %.
- Placer une réactance série En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement d'un four à arc peut réduire de 30 % le taux de flicker.

I.5.2. Creux de tension et coupures :

a- Réduction de la durée et de la profondeur des creux de tension :

➤ Au niveau du réseau :

- Augmentation des possibilités de bouclage (nouveaux postes source, interrupteur de bouclage).
- Amélioration du niveau de performance des protections électriques (sélectivité, automatisme de reprise d'alimentation, organes télécommandés en réseau, tél éconduite, remplacement des éclateurs par des parafoudres...)
- Augmentation de la puissance de court circuit du réseau.

➤ Au niveau des équipements :

- Diminution de la puissance absorbée par les charges de fortes puissances lors de leur mise sous tension avec des compensateurs automatiques en temps réel et des démarreurs progressifs qui limitent les pointes de courant (ainsi que les sollicitations mécaniques).

b- Insensibilisation des installations industrielles et tertiaires

Le principe général de désensibilisation contre les creux de tension et les coupures est de compenser le manque d'énergie par un dispositif à réserve d'énergie intercalé entre le réseau et l'installation. Cette réserve doit avoir une autonomie supérieure à la durée du défaut de tension dont on veut se protéger. Les informations nécessaires au choix du dispositif d'insensibilisation sont :

- qualité de la source (niveau maximal de perturbations présent),
- exigences des récepteurs (sensibilité dans le plan durée-profondeur). Seule une analyse fine du procès et des conséquences techniques et financières de la perturbation permet de les réunir.

c- Compensateurs électroniques :

Ces dispositifs électroniques modernes compensent dans une certaine mesure les creux de tension et les coupures avec un faible temps de réponse, par exemple le compensateur automatique en temps réel réalise une compensation en temps réel de la puissance réactive ; il est particulièrement bien adaptée au cas des charges variant rapidement et de façon importante (soudeuses, ascenseurs, presses, concasseurs, démarrages moteur...).

I.5.3. Harmoniques :

a- Réduction des courants harmoniques générés :

➤ Inductance de ligne :

Une inductance triphasée est placée en série avec l'alimentation (ou intégrée dans le bus continu pour les convertisseurs de fréquence). Elle réduit les harmoniques de courant de ligne (en particulier ceux de rang élevés) donc la valeur efficace du courant absorbé ainsi que la distorsion au point de raccordement du convertisseur. Il est possible de l'installer sans intervenir sur le générateur d'harmoniques et d'utiliser des inductances communes à plusieurs variateurs.

➤ Utilisation de redresseurs de déphasés

Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile, l'autre en triangle, et permet de ne générer que les harmoniques de rang $12k \pm 1$.

d- Filtrage :

- Le filtrage passif Il consiste à réaliser une impédance faible aux fréquences à atténuer grâce à l'agencement de composants passifs (inductance, condensateur, résistance). Cet ensemble est placé en dérivation sur le réseau. Plusieurs filtres passifs en parallèle peuvent être nécessaires pour filtrer plusieurs composantes. Le dimensionnement des filtres harmoniques doit être soigné : un filtre passif mal conçu peut conduire à des résonances dont l'effet est d'amplifier des fréquences qui n'étaient pas gênantes avant son installation.
- Le filtrage actif Il consiste à neutraliser les harmoniques émis par la charge en analysant les harmoniques consommés par la charge et en restituant ensuite le même courant harmonique avec la phase convenable. Il est possible de mettre en parallèle plusieurs filtres actifs.
- Le filtrage hybride Il est composé d'un filtre actif et d'un filtre passif accordé sur le rang de l'harmonique prépondérant et qui fournit l'énergie réactive nécessaire.

I.5.4. Déséquilibre :

Les solutions consistent à :

- équilibrer les charges monophasées sur les trois phases,
- diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles,
- prévoir une protection adaptée des machines utiliser des charges L C judicieusement raccordées (montage de Steinmetz)

I.5.5 : Surtensions :

Les solutions consistent à :

a- Surtensions temporaires :

- Mettre hors service tout ou partie des condensateurs en période de faible charge,
- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de résonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène

b- Surtensions de manœuvre :

- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour limiter les effets des surtensions transitoires.
- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs, par l'installation de self de choc, résistances de pré-insertion. Les compensateurs automatiques statiques qui permettent de maîtriser l'instant d'enclenchement sont particulièrement adaptés aux applications BT n'acceptant pas les surtensions transitoires (automates industriels, informatique).

b- Surtensions atmosphériques :

- Protection primaire :
 - Elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu).
- Protection secondaire :
 - Elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre.

Le tableau ci-dessous regroupe Les natures des Perturbations, ainsi que leurs conséquences, et les solutions possibles pour chaque perturbation.

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solution
Variations et fluctuations de tension	Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	Fluctuation de la luminosité des lampes	Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur électronique série, régleur en charge.
Creux de tension	Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur...).	ouverture de contacteurs, ralentissement ou décrochage de moteurs	compensateur électronique série.
Coupures	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	dijoncteur shunt, télé conduite.
Harmoniques	Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder,	Surcharges dégradation du rendement énergétique,	hybride, inductance de ligne.
Déséquilibres de tension	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance...).	sur échauffement des machines asynchrones.	Compensateur électronique shunt, régulateur Electronique.
Surtensions	Manœuvre d'appareillages et de condensateurs, foudre.	Verrouillage de variateurs de vitesse, déclenchements intempestifs, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation	Parafoudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de préinsertion, self de choc, compensateur automatique statique.

Conclusion

Les perturbations provoquées dans les réseaux électriques, installations et récepteurs par plusieurs phénomènes engendrent obligatoirement des conséquences graves agissant directement sur la bonne exploitation du système d'énergie par la dégradation de la qualité de l'énergie électrique.

Pour parvenir à l'amélioration de cette qualité, il serait nécessaire d'assurer un contrôle très fiable de tous les paramètres pour permettre de choisir la solution la plus convenable au chaque type de perturbations.

Deuxième chapitre

Écoulement de puissance et compensation d'énergie réactive

II.1. Introduction:

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé d'un nombre de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production et de charge et les niveaux des tensions du réseau. Les calculs permettant d'obtenir ces informations sont connues sous le nom (*écoulement des puissances* ou *load flow* ou encore *power flow*).

II.2. Définition des puissances:

II.2.1. puissance active :

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

II.2.2. Puissance réactive :

L'énergie consommée (kVARh) qui sert à l'alimentation des circuits magnétique des machines électrique. Elle correspond à la puissance réactive Q (kVARh) des récepteurs elle et exprimée par :

II.2.3. Puissance apparente :

L'énergie apparente (kVAh) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes, elle correspond à la puissance apparente (KVA) du récepteur, somme vectorielle de P (KW) et Q (KVAR)

$$S=U * I \quad (2.1)$$

$$\text{Avec: } U= V_{\max} \cos \omega t \quad (2.2)$$

$$I= I_{\max} \cos(\omega t - \phi) \quad (2.3)$$

$$P = \frac{V_{max} I_{max}}{2} [\cos \omega t + \cos(2\omega t - \phi)] \quad (2.4)$$

$$S = V * I = P + j Q = V I \cos \phi + j V I \sin \phi \quad (2.5)$$

$$\text{Avec : } P = V I \cos \phi \text{ puissance active} \quad (2.6)$$

$$Q = V I \sin \phi \text{ puissance réactive} \quad (2.7)$$

II.3. Déférente source d'énergie réactive :

II.3.1. Les dispositifs conventionnels:

Le réseau en lui-même est une source non négligeable de puissance réactive. Ainsi, en dehors de la production de l'énergie réactive par les générateurs, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou plutôt d'autres moyens de compensation, qui finalement sont au moins aussi souvent consommateurs que fournisseurs d'énergie réactive.

II.3.2. Les groupes de production (générateurs) :

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux.

II.3.3. Groupes thermiques et hydrauliques :

Ils jouent un rôle essentiel dans le contrôle de la tension et la compensation de l'énergie réactive, ils constituent en effet, les sources de tension du réseau grâce à la force électromotrice (FEM) de l'alternateur. Ils peuvent de plus échanger des quantités.

Importantes d'énergie réactive avec le réseau, ils ont de bonnes performances sur le plan dynamique.

➤ **Avantage :**

- Cout initial nul
- Souplesse de fonctionnement et facilité de réglage.

➤ **Inconvénients :**

Eventuellement surdimensionnés :

- Q_{\max} pour limite d'excitation.
- Q_{\min} pour limite de stabilité.

II.3.4. Les condensateurs:

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

➤ A/ Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.

➤ B/Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.

➤ **Avantage :**

- Des petites pertes de la puissance active.
- La simplicité de l'exploitation.
- Peut être installé au voisinage des utilisateurs.
- Eviter de transit réactif dans les lignes (moins de chute de tension, augmentation de la capacité de transport)

➤ **Inconvénients :**

Réglage discontinu, cout initial élevé, courant de décharge sub-transitoire très élevé.

- Réglage négatif impossible.

II.3.5. Les inductances :

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau.

➤ **Avantage :**

- Utile dans les cas où il y a trop de puissance réactive produite par les câbles et les lignes à haute tension.

➤ **Inconvénients :**

- Réglage positif impossible.
- Pertes actives non négligeable.

II.3.6. Condensateurs et inductances fixe:

Les bancs de condensateurs installés en dérivation peuvent atteindre quelques MVAR fractionnables par gradins de 2 à 4 MVAR, voire 10 MVAR. Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance au niveau des charges inductives. Parmi leurs inconvénients :

-La puissance réactive produite diminue lorsque la tension diminue ($Q = \omega CV^2$) alors qu'elle devrait augmenter.

-surtensions et surintensités à l'enclenchement.

Les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins mis en ou hors tension par disjoncteurs ou actuellement par thyristors (ce qui supprime toute usure du matériel et accroît la vitesse de réponse)

Commandé par relais var métrique qui mesure l'erreur entre valeur de consigne et puissance fournie.

Des bancs de condensateurs peuvent être insérés en série avec les conducteurs d'une ligne afin de diminuer sa réactance. On diminue aussi la chute de tension entre la source et la charge comme indiquée sur la figure Fig.2.1.

On voit que ce type de compensation diminue l'angle de transport θ et agit donc aussi sur le transit de puissance active et augmente la limite de puissance transmissible et la stabilité de réseau.

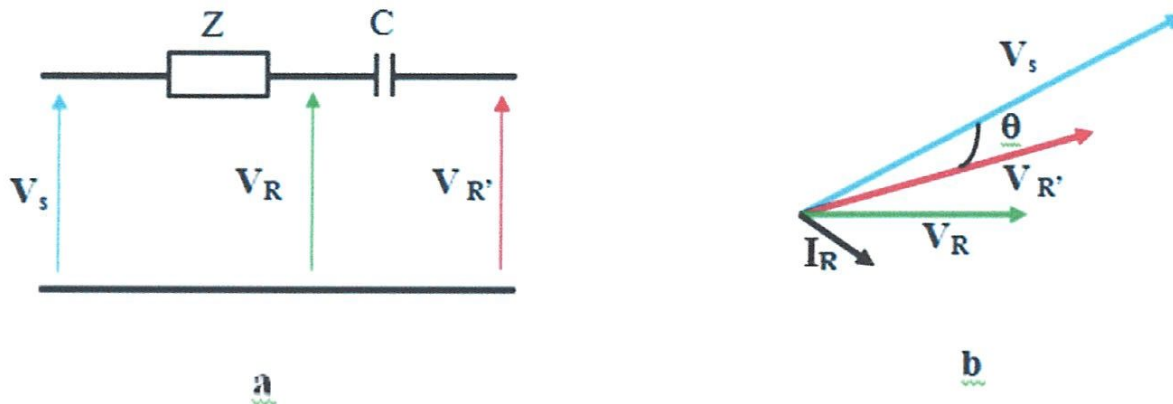


Fig.2.1. principe de la compensation

II.3.7. Les compensateurs synchrones:

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive.

➤ Les avantages :

- Une grande puissance dans une unité (de 5 jusqu'à 350 MVAR).
- La possibilité de réglage continu et automatique de la puissance réactive fournie.
- La puissance réactive fournie ne dépend pas de la tension d'alimentation.
- *Cout initial élevé.*
- Machine tournante demande en entretien.
- Perte active relativement importantes.

➤ Les inconvénients :

- des grandes pertes d'énergie active (1.5-2.5%).
- Un grand prix spécifique d'un KVAR.
- La complexité d'exploitation.

II.3.8. Les compensateurs statiques:

Les compensateurs statiques sont des équipements utilisés pour l'injection/absorption rapide de puissance réactive en un nœud du réseau, ayant pour objectifs de maintenir la tension à une valeur proche de la tension de consigne, améliorer la stabilité statique (par l'augmentation de la puissance transmissible à longues distances et par l'amortissement des oscillations), améliorer la stabilité dynamique et d'augmenter la capacité de transport. Ces compensateurs statiques sont très avantageux grâce à leur grande vitesse de réponse et puissance réactive précise.

II.4. Effet de transit d'énergie réactive:

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel. Il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée. Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension.

L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs aux caractéristiques très différentes :

- le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont connues, tout au moins pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande part de l'ajustement peut donc être réalisée à l'aide de moyens dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux

- le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en œuvre de moyens dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques.

Le transit ou l'écoulement de l'énergie réactive sur un réseau provoque :

- ✓ des surcharges au niveau des transformateurs.
- ✓ l'augmentation des pertes joule.
- ✓ des chutes de tension au bout de la ligne.

Ce qui diminue la qualité de l'énergie électrique reçue par les récepteur donc il est nécessaire d'apporter cette énergie réactive au point au elle est demandée c'est pourquoi on utilise les moyens de compensation.

II.5.Compensation d'énergie réactive

II.5.1. Définition:

La compensation de l'énergie réactive à une importance capitale dans toute installation électrique. La compensation peut se faire en base tension ou en haut tension en utilisant des condensateurs et des inductances. Compenser une installation suppose installer une source d'énergie réactive de compensation qui permet

d'améliorer le facteur de puissance de l'installation réduire les pertes de puissance et de tension.

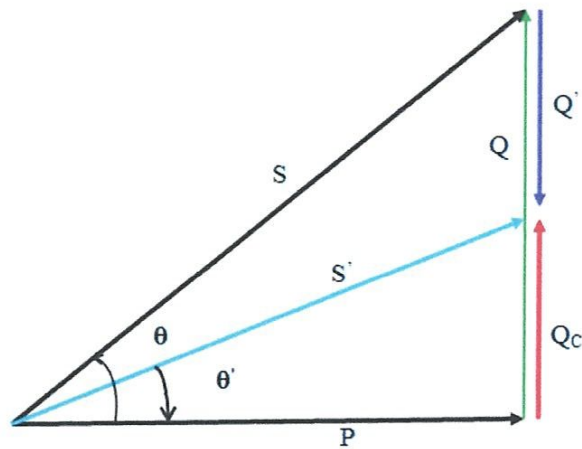


Fig.2.2. Angle de déphasage $\theta' < \theta$ d'où $\cos \theta' > \cos \theta$

▪ **Avant compensation**

Puissance active P (en KW)

Puissance réactive Q (en KVAR)

Puissance apparente S (en KVA)

Facteur de puissance $\cos \theta$

▪ **Après compensation avec une puissance réactive compensé Q_c**

Puissance active P (en KW)

Puissance réactive Q' (en KVAR)

Puissance apparente S' (en KVA)

Facteur de puissance $\cos \theta'$

La compensation réactive représente l'application de tous les dispositifs de puissance réactive dans un réseau électrique pour :

- maintenir le profil du plan de la tension pour les différents niveaux des puissances transportées.
- Pour améliorer la stabilité du système par augmentation de la puissance maximale transmissible.
- Et/ou pour couvrir le besoin en puissance réactive sur la majorité des plans économiques.

Idéalement la compensation réactive doit modifier l'impédance de charge en agissant sur la capacité et/ou l'inductance de la ligne pour obtenir une impédance de charge virtuelle s'adaptant aux valeurs de la puissance actuelle transportée par la ligne.

II.5.2. Facteur de puissance:

Le facteur de puissance de l'installation est le quotient de la puissance active consommée par l'installation sur la puissance apparente fournie à l'installation. Il est égal au cosinus de l'angle de déphasage entre la puissance active et la puissance apparente :

$$\cos\delta = \frac{P}{S} \quad (2.8)$$

Un facteur de puissance proche de 1 optimise le fonctionnement d'une installation. Il est possible d'exprimer la $\tan\delta$ avec :

$$\tan\delta = \frac{p}{Q} \quad (2.9)$$

II.5.3. Chute de Tension et Compensation Réactive:

En considérant la ligne électrique de la figure (2.3) sans tenir en compte le compensateur, la représentation du diagramme des tensions est donnée sur la figure (234). Lorsque la charge appelle un courant I à partir de la source V_s , la tension V_r chute au dessous de la valeur V_s .

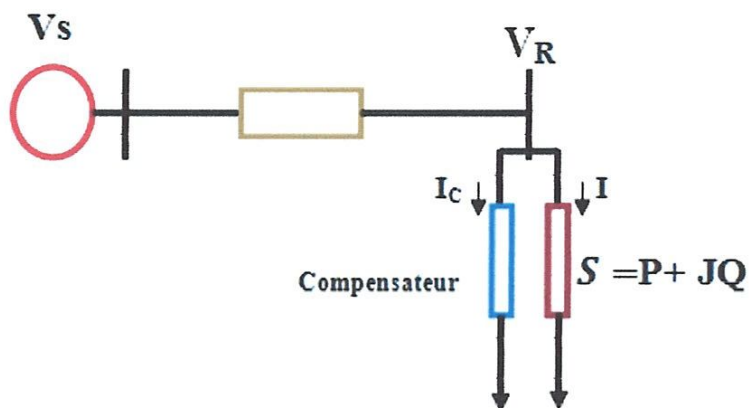


Fig.2.3.Circuit équivalent d'une ligne avec charge et compensateur

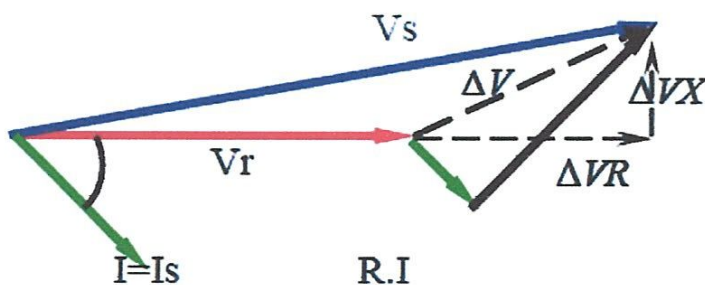


Fig.2.4.Diagramme des tensions sans compensation

La chute de tension ΔV à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure (b) est donnée par la formulation qui suit :

$$\Delta V = V_S - V_R = Z * I \quad (2.10)$$

Avec I le courant de charge il est donnée en fonction des puissances P et Q de la charge par l'équation :

$$I = \frac{P - jQ}{V_R} \quad (2.11)$$

En tenant la tension V_r comme référence des phases donc $V_R = V_r + j0$

Alors:

$$\Delta V = (R_s + jX_s) * \left(\frac{P + jQ}{V_r} \right) = \Delta V_r + j\Delta V_x \quad (2.12)$$

La chute de tension possède donc deux composantes ΔV_r en phase avec la tension V_r et une composante ΔV_x en quadrature avec V_r . D'après l'équation la chute ΔV dépend de la puissance active et réactive de la charge.

En connectant un compensateur de puissance réactive en parallèle avec la charge, il sera possible de maintenir la tension V_r égale en module à la tension V_s . La puissance réactive totale connectée au jeu de barre de charge sera remplacée par $Q_s = Q_L + Q_c$ où Q_c est la puissance réactive injectée par le compensateur et qui sera ajustée pour faire tourner le vecteur ΔV jusqu'à ce que la tension V_r sera égale à la tension V_s comme le montre la figure.

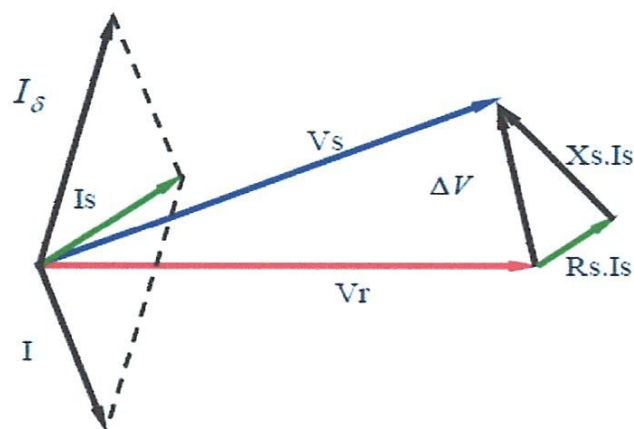


Fig.2.5. Diagramme des tensions pour une ligne compensée (tension constante

II.6. contrôles de tension / puissance réactive :

Dans les réseaux électriques, la tension et la fréquence sont les principaux indicateurs de la bonne exploitation technique et économique du système de production et de transport.

Techniquement, on situe les contrôles, fréquence/puissance active et tension/puissance réactive. Si la fréquence a une grande dépendance avec les variations de la puissance active générée, transportée et consommée, les modules de la tension seront affectés principalement par les variations de la puissance réactive.

Le problème du contrôle de la fréquence est très limité. Actuellement les systèmes de puissance sont équipés d'une large gamme de dispositifs dont leur action affecte principalement la puissance réactive. La sélection du type de contrôle automatique ou manuel du problème tension/puissance réactive est généralement conditionnée par le niveau des tensions du sous-système à contrôler.

Dans le tableau, on peut regrouper les différents dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/ puissance réactive, et leurs principales caractéristiques.

Tableau : Différents dispositifs de contrôle de tension/puissance réactive.

Contrôles par génération de la puissance réactive					
	Ajustable en Continue	Capacitive	Inductive	Responserapide	Control local
Generators synchronies	OUI	OUI	OUI	Oui, dépend du système 'excitation.	OUI
Condensations synchronies	OUI	OUI	OUI	Depend de l'automatisation	OUI
Batteries de condensations	Non, plusieurs gradins. (discret)	OUI	NON	Depend de l'automatisation	OUI
Reactance	Non, (discrète) généralement une ou deux unités par ligne	NON	OUI	Depend de l'automatisation	-
Overture des Lignes	-	-	-	-	Decision de l'opérateur
Délestage de charge	Uniquement dans l'état d'urgence.	NON	OUI	Depend de l'automatisation	Depend de l'automatisation
Reduction de tensions	OUI	OUI	NON	Depend de l'automatisation	Depend de l'automatisation

Conclusion:

Une analyse des écoulements d'énergie et de charges dans un réseau électrique est nécessaire pendant la conception et lors d'ajouts pour déterminer les tensions dans les différents nœuds ou bien barres, et les courants dans les lignes et câbles.

Toute perturbation empêchant la bonne exploitation des systèmes doit être contrôlée et éliminée par l'emplacement de groupes de source d'énergie réactive.

Afin de compenser cette puissance réactive, et améliorer le profil de tension ou encore d'augmenter la capacité de transport et finalement diminuer la facturation de consommation.

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension.

Troisième chapitre
Systeme FACTS et
le compensateur
statique SVC

III.1.Introduction aux systèmes FACTS :

La dérégulation du marché de l'électricité, qui concerne progressivement tous les pays, modifie profondément l'approche technico-économique dans l'exploitation et l'optimisation des réseaux électriques. C'est dans ce nouveau contexte que les spécialistes des réseaux électriques se voient de plus confrontés à de nombreux défis. Le développement des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure exploitation du réseau.

Le concept de FACTS introduit en 1986 par EPRI regroupe tous les dispositifs d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (thyristors ou GTO- Gate-Turn-Off thyristor) leur assure une vitesse et une fiabilité supérieure à celles des systèmes électromécaniques classiques.

Ils agissent sur le réseau par le contrôle du réactif (compensateurs statiques de puissance réactive, classiques ou avancés), l'échange d'énergie active ou réactive (régulateur à bobine supraconductrice) ou le contrôle de l'impédance d'une ligne (impédance série avancée).

III.2. Avantage du système FACTS :

Les dispositifs FACTS, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnement.

Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Réduire des pertes actives totales.
- Compenser l'énergie réactive.
- Amortir les oscillations de puissance.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.

- Maîtriser la répartition et les transits des puissances.
- Améliorer des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production.

III.3. Les différents types de Systèmes FACTS :

Le tableau de la figure 3.1 représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composants de base R L C et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement.

Commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

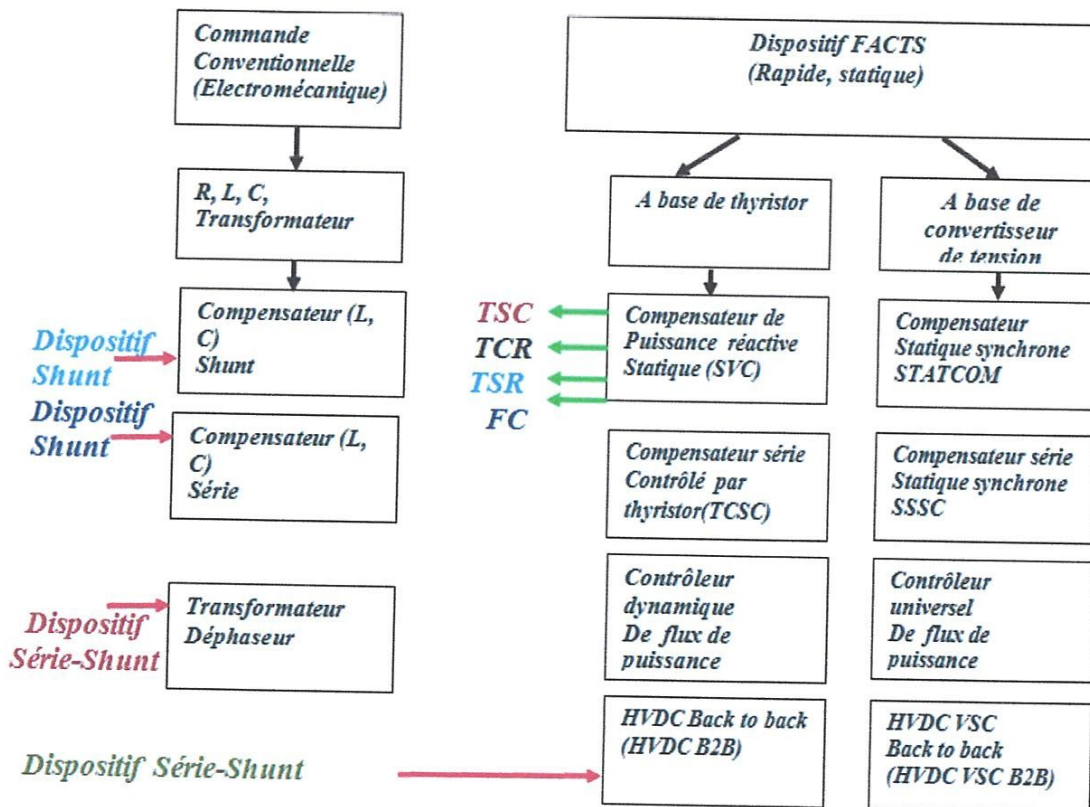


Fig.3.1. Principaux Dispositifs FACTS

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors, Ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs

III.4. Différentes Catégories des FACTS :

Les systèmes "FACTS" peuvent être classés en trois catégories.

- Les compensateurs séries.
- Les compensateurs parallèles.
- Les compensateurs hybrides (série – parallèle).

III.4.1. Compensateurs séries :

La puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison dont le comportement est essentiellement inductif. C'est ce que réalise la compensation série par la jonction en série avec la ligne d'un banc de condensateurs d'impédance X_c .

Artificiellement l'impédance de la ligne est donc réduite de X_l à $(X_l - X_c)$ et le transit de puissance est augmenté.

De plus, comme le montre le diagramme de Fresnel représenté par la figure Fig.3.3, le profil de tension est amélioré tout au long de la ligne ($V_S - V_R$ plus petit) et l'angle de transport est réduit d'où une amélioration de la stabilité dynamique du système de transport.

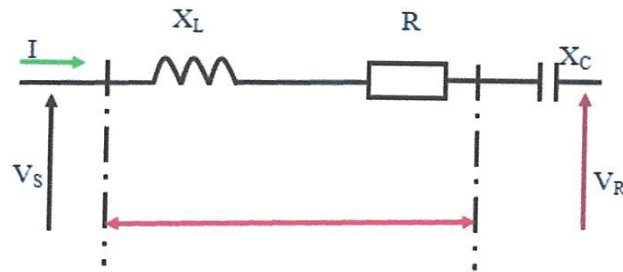


Fig.3.2. Ligne de transmission avec système de compensation série

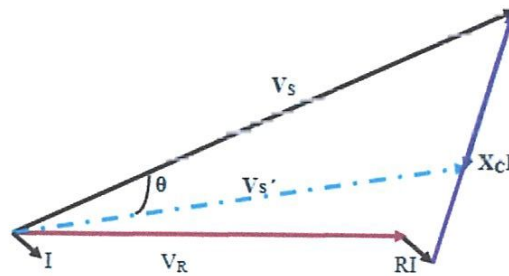


Fig.3.3. Diagramme de Fresnel

III.4.2. Compensateurs shunts:

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquence contrôler de tension des nœuds.

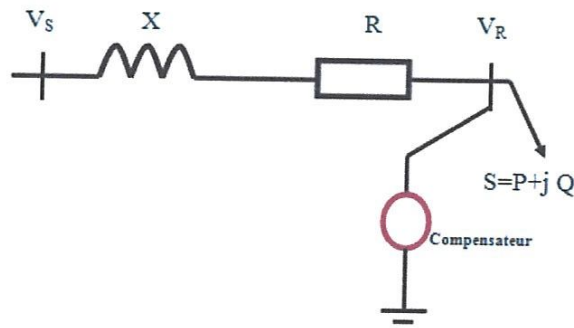


Fig.3.4.Ligne avec compensateur shunt

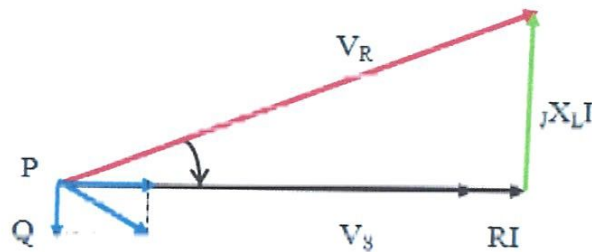


Fig.3.5.Principe de compensation shunt

III.4.3.Compensateurs hybrides série-shunt:

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini.

Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

III.5.Compensateur statique (SVC) a thyristor:

III.5.1.Historique du SVC :

Le compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator) est apparu dans les années soixante-dix, le premier SVC est

installé dans l'ouest de Nebraska, en Amérique du Nord, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de décharges industrielles très fluctuantes telles que les laminoirs ou les fours à arc. Les SVC sont des FACTS de la première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage.

III.5.2. Définition de Thyristor :

La figure 3.6.a nous montre le symbole du thyristor ainsi que les paramètres les plus utilisés dans le cadre de la présente recherche.

On peut y identifier les paramètres suivants : le courant dans le thyristor (I) la tension dans l'anode (V_A) la tension dans la cathode (V_K), et la tension de gâchette (V_G).

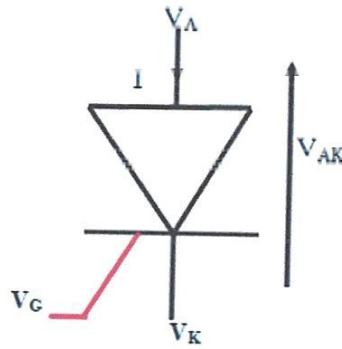


Fig.3.6.a. Symbole du thyristor.

La figure 3.7.b présente la caractéristique statique du thyristor. Sur cette figure on peut voir que le thyristor se comporte comme une résistance à deux états qui correspondent aux états du thyristor. La valeur de cette résistance change de R_{fwd} lorsque le thyristor est en mode conduction à R_{rev} lorsqu'il est en mode non-conduction. L'arrêt de conduction se produit en fonction du courant qui circule entre l'anode et la cathode, et l'amorçage en fonction d'une tension de valeur élevée (tension de retournement).

La tension de retournement V_{akf} est la tension entre l'anode et la cathode à laquelle l'élément semi-conducteur se polarise et laisse passer le courant, passe à l'état allumé. À l'allumage, la résistance du thyristor passe de R_{rev} de valeur élevée à R_{fwd} de valeur plus faible.

La tension de retournement est élevée, elle peut être diminuée par l'application d'une tension entre la gâchette et la cathode V_{GK} . Plus la tension V_{GK} est grande moins sera élevée la tension de retournement nécessaire à l'allumage du thyristor.

Cette montre la tension de retournement V_{akf} à laquelle correspond une tension V_{GK} égal à zéro. On montre aussi deux autres tensions V_{ak1} et V_{ak2} dont les tensions V_{GK} pour l'allumage du thyristor sont aussi montrées. Le courant de seuil I_{seuil} est le courant minimal pour que la conduction se produise et persiste. De même, la tension V_{AK} et la tension V_{GK} possèdent aussi un seuil $V_{ak\ seuil}$ et $V_{GK\ seuil}$, respectivement

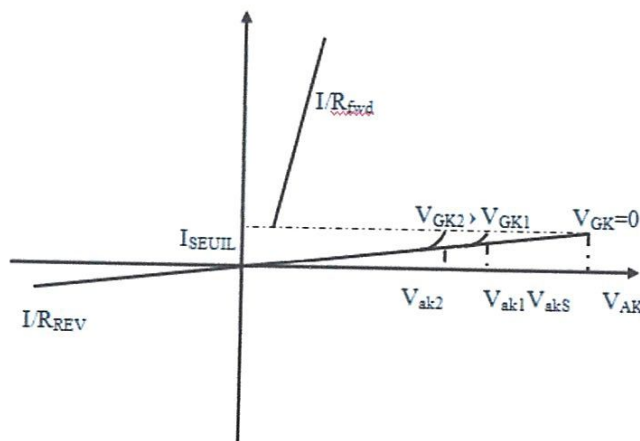


Fig.3.7.b. Caractéristique d'un thyristor

III.5.3. Définition de compensateur statique SVC :

Le SVC est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur de limites désirées il injecte la puissance réactive dans la barre ou il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge.

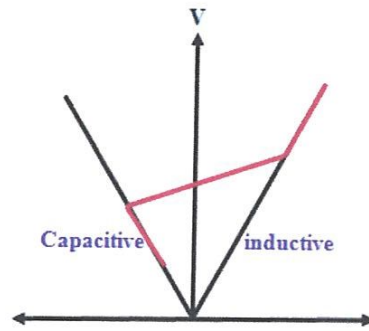


Fig.3.8.c. Caractéristique d'un SVC

$$B_{eq} = B_L(\alpha) + B_C \quad (3.1)$$

D' où :

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (3.2)$$

$$B_C = \omega c \quad (3.3)$$

III.5.4. Structure de principe :

La figure (3.9) et une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique shunt. Il est composé d'un condensateur de réactance " X_C " dont la puissance réactive fournie peut être complètement enclenchée ou complètement déclenchée et d'une bobine d'induction de réactance inductive " X_L " dont la puissance réactive absorbée est commandée entre zéro et sa valeur maximale par des thyristors montés en tête-bêche pour assurer des inversions très rapides du courant.

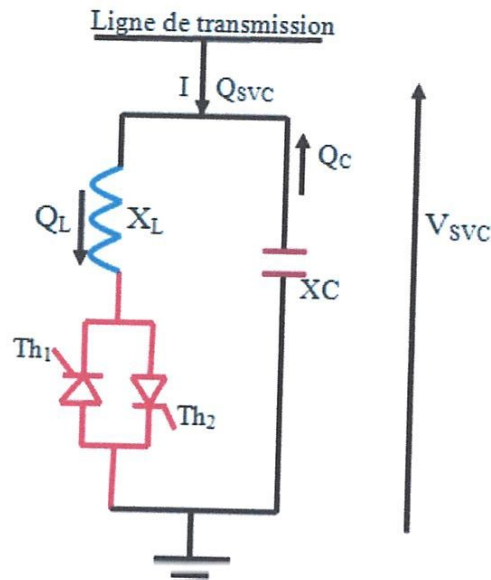


Fig.3.9.Représentation schématique monophasée d'un SVC

Pour fixer le signe de puissance réactive Q_{SVC} , le compensateur est considéré comme un commutateur. La puissance réactive Q_{SVC} est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif).

Le courant d'entrée I est un courant réactif, il est supposé positif lorsqu'il est retardé de 90° par rapport à la tension V_{SVC} .

Si par contre, le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), cette dernière est considérée comme étant négative, ainsi que le courant I .

Ces relations sont prises en compte sur la figure. Par conséquent, la puissance réactive Q_L est positive alors que la puissance réactive Q_C est négative.

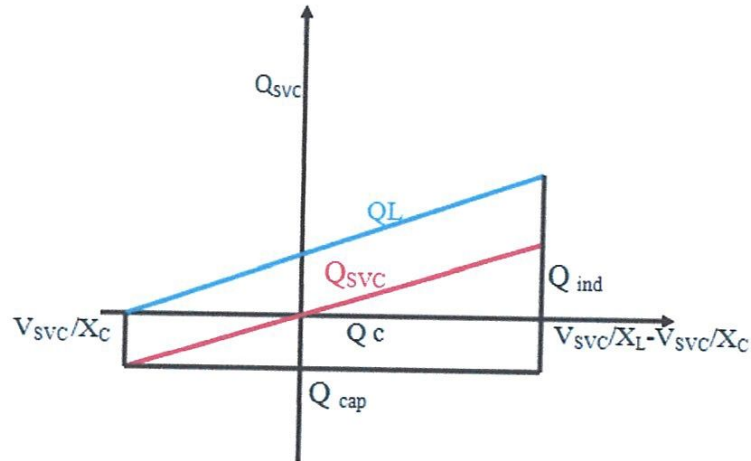


Fig.3.10. Exigences posées à la puissance réactive

La puissance réactive Q_{svc} varie entre une valeur inductive " Q_{ind} " et une valeur capacitive " Q_{cap} ".

Avec:

$$Q_{cap} = \frac{V_{svc}^2}{X_c} \times B_c \quad (3.4)$$

On obtient alors la réactance capacitive X_c nécessaire pour le condensateur.

De la relation suivante, on peut déterminer la réactance X_L de la bobine d'inductance.

$$Q_{svc} = \frac{V_{svc}^2}{X_L} - \frac{V_{svc}^2}{X_c} \quad (3.5)$$

$$Q_{svc} = -V_{svc}^2 \times B_{svc} \quad (3.6)$$

La puissance réactive du compensateur statique Q_{svc} est positif lorsque' elle absorbée par le compensateur (caractère inductif) si par contre le SVC fournit de la puissance réactive (caractère capacitif), cette dernière est considérée comme étant négative.

III.5.5. Différents types de SVC :

Le compensateur statique SVC est composé de plusieurs éléments tel que le condensateur fixe (FC), qui est commandé par des éléments mécaniques, D'une réactance commandée par thyristors (TCR), et de condensateurs commutés par des thyristors (TSC), et parfois de réactance commutée par thyristors (TSR), et des filtres d'harmoniques.

III.5.5.1. Condensateur fixe (FC) :

Le condensateur fixe fournit à la barre une puissance réactive fixe, il est connecté au réseau mécaniquement et comporte un contrôle pour l'ouverture du disjoncteur qui le relie à la barre.

III.5.5.2. Réactance commandée par thyristors (TCR):

La réactance commandée par thyristors TCR (Thyristor-Controlled Reactor) possède une bobine d'inductance fixe L branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle. La réactance contrôlée par thyristors permet un contrôle plus fin de la puissance réactive car elle permet un contrôle continu du courant de compensation.

Les thyristors sont enclenchés avec un certain angle d'allumage α et conduisent alternativement sur une demi-période. On définit l'angle d'allumage α à partir du passage par zéro dans le sens positif de la tension aux bornes du thyristor à allumer.

L'angle de conduction σ est l'angle pendant lequel les thyristors conduisent. Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé et la tension à ses bornes est positive. Il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule. Les thyristors sont allumés de façon symétrique toutes les demi-périodes. Le courant à fréquence fondamentale est réglé par la commande de phase de la valve à thyristors.

En pleine conduction ($\alpha = 90^\circ$), le courant est essentiellement réactif et sinusoïdal, et lorsque $\alpha = 180^\circ$, on est en conduction nulle.

La relation qui lie l'angle d'allumage et l'angle de conduction en régime permanent est :

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (3.7)$$

Une conduction partielle des thyristors est accomplie avec un angle d'amorçage α compris entre 90° et 180° , a pour effet de réduire la fondamentale du courant, et donc de diminuer la susceptance apparente de l'inductance.

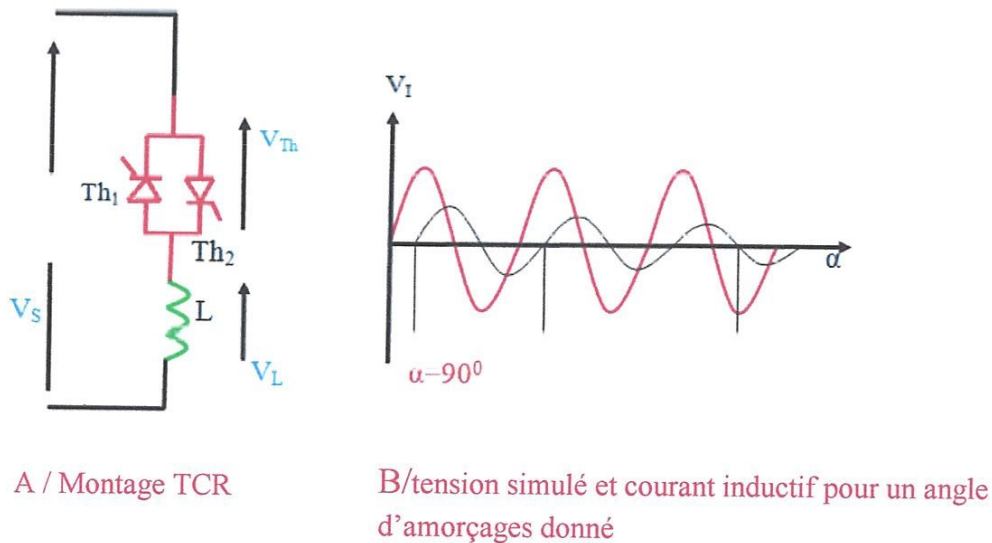


Fig.3.11. Réactance commandée par thyristors

Lorsque l'angle d'allumage (amorçage) est fixe, on parle d'inductance commutée par thyristor TSR (Thyristor-Switched Reactor).

Généralement α vaut 90° . Dans ce cas, les thyristors sont en pleine conduction sur un nombre entier de demi-périodes et le TSR ne génère pas de courants harmoniques. En revanche, la valeur de la susceptance effective n'est pas modulable et il n'y a que deux cas de fonctionnement possibles.

Lorsque les thyristors sont enclenchés, le courant réactif I_L absorbé par le TSR est proportionnel à la tension appliquée V_S . Il est nul lorsque la valve à thyristors reste ouverte. Les valeurs maximales admissibles du courant et de la tension doivent être respectées. Le recours à plusieurs branches TSR connectées en parallèles permet d'obtenir une admittance réactive contrôlable

Par palier, tout en conservant un courant sinusoïdal.

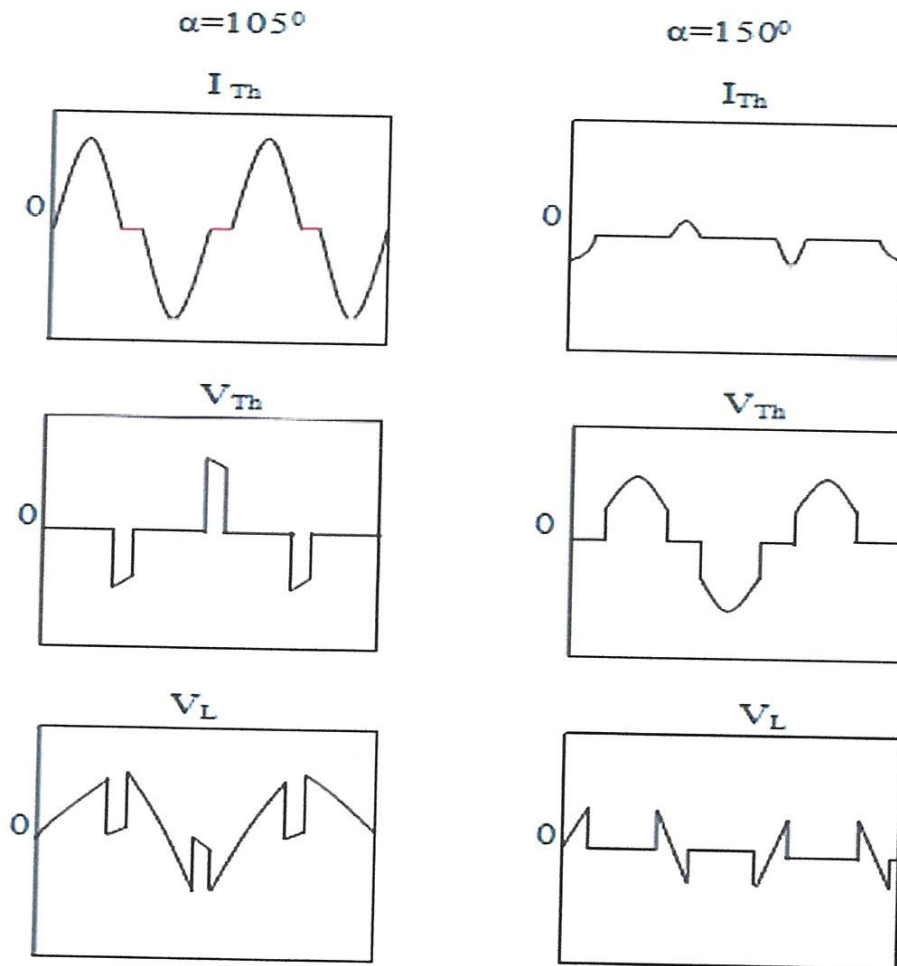


Fig.3.12. Courant et Tension de la branche non linéaire TCR en fonction d'angle d'amorçage (α)

V = la valeur maximum de la tension appliquée

ω = la pulsation de tension d'alimentation. Le courant I_l qui traverse la branche TCR peut se déterminer à partir de l'équation suivante.

Résolution:

$$I_1(\alpha) = \frac{V}{\omega l} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (3.15)$$

Cette équation peut être réécrite sous la forme :

$$I_1(\alpha) = V B_{TCR}(\alpha) \quad (3.16)$$

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{MAX} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (3.17)$$

$$B_{MAX} = \frac{1}{\omega l} \quad (3.18)$$

L'angle d'amorçage α est lié à l'angle de conduction σ :

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (3.19)$$

D'après l'équation (3.15) et (3.19) on a :

$$I_1(\sigma) = V B_{MAX} \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (3.20)$$

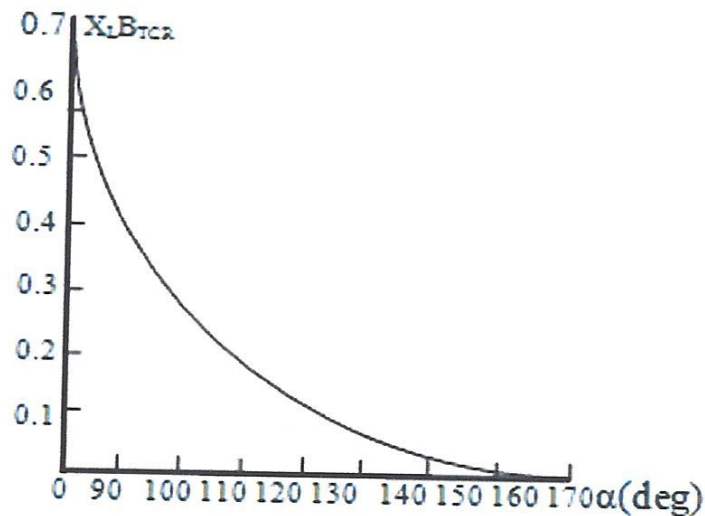


Fig.3.13.Caractéristique de contrôle de la susceptance TCR, B_{TCR}

$$I_1(\sigma) = V B_{\text{TCR}}(\sigma) \quad (3.21)$$

$$B_{\text{TCR}}(\sigma) = B_{\text{MAX}} \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (3.22)$$

La variation de la valeur unitaire de B_{TCR} avec l'angle d'amorçage α est représenté à la figure 3-11. La valeur de B_{TCR} est obtenue par rapport à sa valeur maximal B_{MAX} que la quantité de base. Le TCR agit donc comme un susceptance variable. Variation de l'angle d'amorçage changements de la susceptance et par conséquent la composante fondamentale de courant ce qui conduit à une variation de la puissance réactive absorbée par le condensateur parce que la tension appliquée à courant alternatif est constant. Tout fois comme l'angle d'amorçages est augmenté de 90° , le courant devient non sinusoïdal, et les harmonique sont générés. Si les deux thyristors sont déclenchés de façon symétrique dans les effets positifs et négatif demi-cycle, alors que les harmoniques d'ordre impair sont produites.

Les harmoniques peuvent être réduites par une analyse de Fourier des composantes de plus haute fréquence.

La valeur efficace de l'harmonique d'ordre n est exprimée en fonction d'un α dans l'équation suivante :

$$I_n(\alpha) = \frac{V}{\omega l \pi} \left[-2 \frac{\cos \alpha}{n} \sin(n\alpha) + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{(n+1)} \right] \quad (3.23)$$

$$I_n(\alpha) = \frac{V}{\omega l \pi} \left[\frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2-1)} \right] \quad (3.24)$$

Ou $n=2K+1$ avec $k=1, 2, 3\dots$

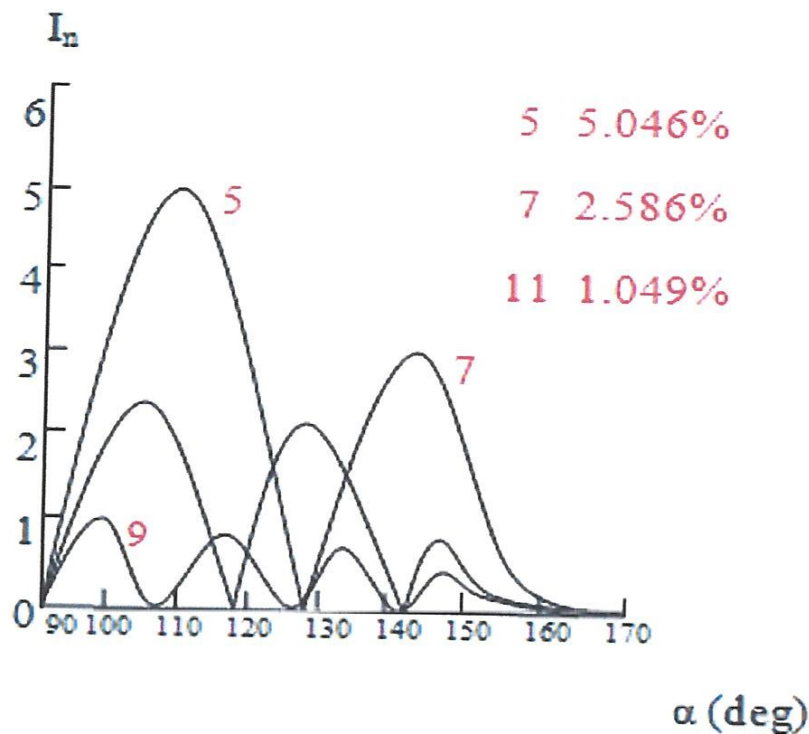


Fig.3.14. Harmonique dans un courant de TCR

La variation de l'amplitude des harmoniques différentes est montrée dans la figure alors que la même chose pour le contenu harmonique totale de courant.

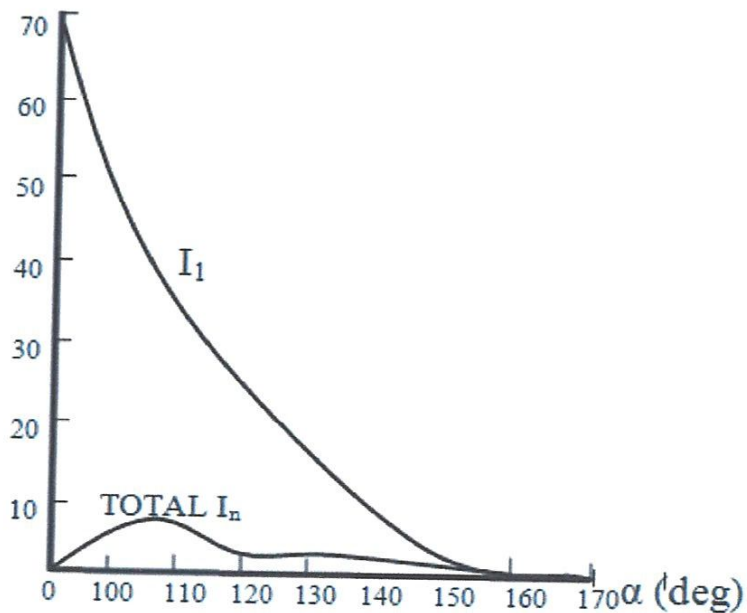


Fig.3.15. Le courant I_1 et le courant total I_n

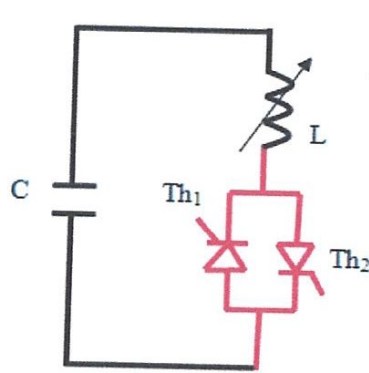


Fig.3.18.a. Schéma de principe d'un FC/TCR.

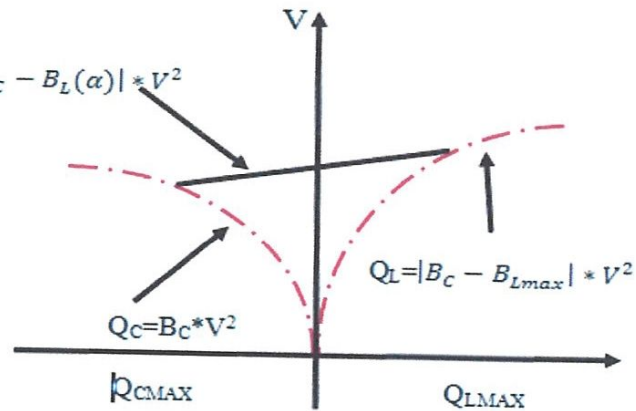


Fig.3.18.b. Caractéristique de tension et puissance réactive d'un TCR et FC

Le courant qui circule dans l'inductance est réglé de façon continue par les thyristors.

Ce réglage s'effectue en jouant sur l'angle d'amorçage " α " qui est compris entre 90° (Q_{Lmax}) et 180° (Q_{Lmin}). Avec α l'angle de retard à l'amorçage (angle entre le passage par zéro de la tension composée et du courant de l'inductance). L'inductance "L" est son interrupteur est alors équivalent à une inductance classique.

Donc:

$$B_L(\alpha) = (\sin(2\pi - 2\alpha) - (2\pi - 2\alpha)) / (\pi L \omega) \quad (3.25)$$

D'où:

$$B_{Lmax} = 1/L\omega \text{ pour } (\alpha = \pi/2) \quad (3.26)$$

Et :

$$B_{Lmin} = 0 \text{ pour } (\alpha = \pi) \quad (3.27)$$

$$I_L(\alpha) = \frac{V}{\pi \omega L} (2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)) \quad (3.28)$$

III.5.5.5. inductance commandée par thyristors :

Un LCT est constitué d'un variateur de courant alimentant une charge inductive-bobine permettant la variation de la puissance réactive absorbée (fig.3.16). donc le LCT se comporte comme une inductance variable. Si les thyristors entrent en conduction au moment où la tension d'alimentation est maximale, il en résulte une conduction maximale pour l'inductance, la valve des thyristors étant court-circuitée.

La composante fondamentale du courant électrique à un caractère inductive, étant déphasée par rapport à la tension appliquée d'environ 90° .

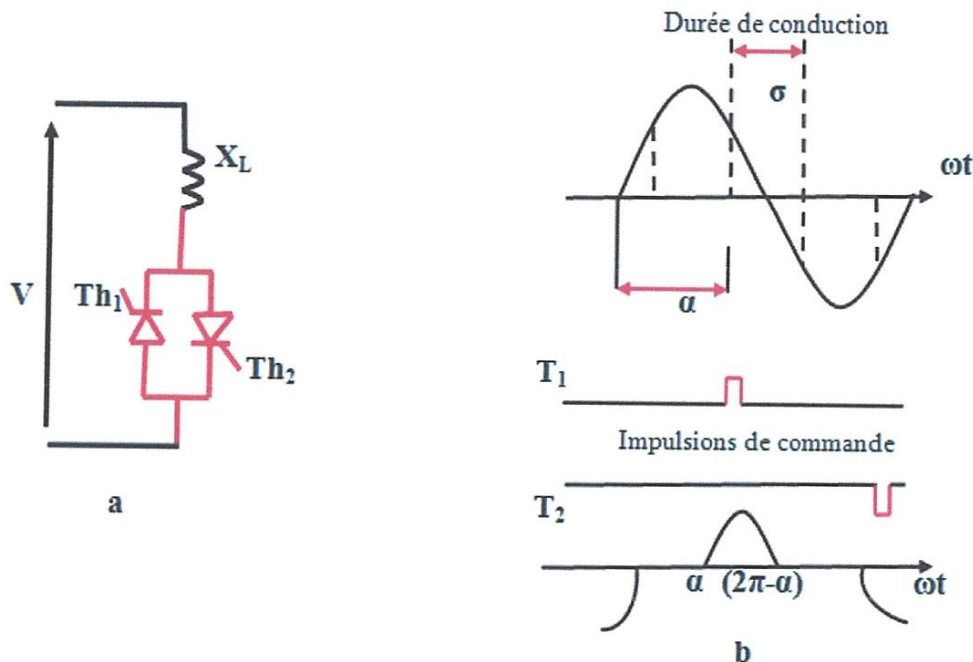


Fig.3.19. Inductance commandée par thyristor

Si on applique $U = \sqrt{2} \sin \omega t$ aux bornes, alors

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} u \sin \omega t \quad (3.29)$$

Ou après l'intégration :

$$I = -\frac{\sqrt{2}u}{\omega t} \cos \omega t + c \quad (3.30)$$

C est déterminée par la condition : $\omega t = \alpha$, $i(\alpha) = 0$ (fig.3.16.b).

$$C = \frac{\sqrt{2}u}{\omega t} \cos \alpha \quad (3.31)$$

III.5.5.6. TCBR (Thyristor Control Breking Resistor):

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations.

La figure (3.20) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique.

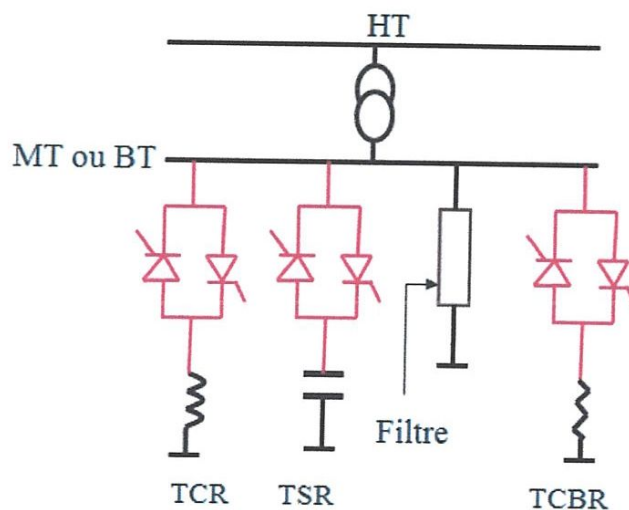


Fig.3.20. Schéma du SVC et TCBR

III.5.6. Compensateurs séries à base de thyristors:

Les compensateurs série à base de thyristors les plus connus sont :

III.5.6.1. TCSC (thyristor controlled series capacitor):

Un module de TCSC est composé d'un banc de condensateur en parallèle avec une inductance commandée par thyristors, l'impédance totale vue par la ligne est une combinaison parallèle de capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'allumage des thyristors de la figure.

On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser.

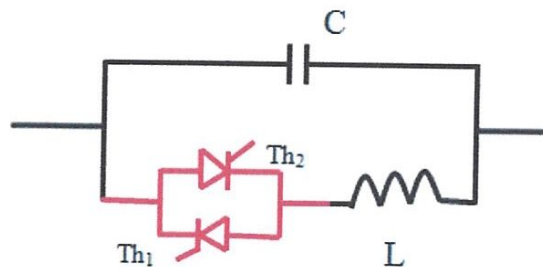


Fig.3.21. Structure d'un TCSC

III.5.6.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor):

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

III.5.6.3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor):

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage de réactance contrôlée est égal à 120 degrés, le thyristor cesse de conduire, et la réactance non contrôlée X_L agit comme un limiteur de courant de défaut.

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

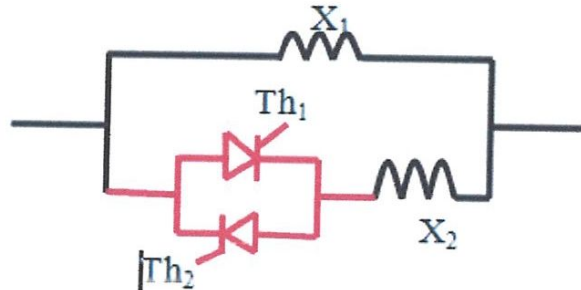


Fig.3.22. Structure d'un TCSR

III.5.6.4. TSSR (Thyristor Switched Serie Reactor):

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

III.6. Avantage du SVC :

Les raisons principales d'incorporer le SVC dans des system de transmission et de distribution sont :

- ✓ Tension stabilisation des systèmes faibles.
- ✓ Réduction des pertes de transmission.
- ✓ Augmentation de la capacité de transmission.
- ✓ Stabilité croissante pour des perturbations passagères.
- ✓ Atténuation croissante de petite perturbation.
- ✓ Amélioration de la commande tension et de la stabilité
- ✓ Atténuation des oscillations de puissance.

III.7.Rôle des différents compensateurs du système FACTS :

Les dispositifs FACTS	ROLE
Static Synchronous compensator (STATCOM without storage)	Contrôle de la tension, compensation de réactive, amortir les oscillations, stabilité la tension.
Static Synchronous compensator (STATCOM without storage, BESS, SMES, large de capacitor)	Contrôle de la tension, compensation de réactive, amortir les oscillations, stabilité la tension, transitoires et la stabilité dynamique, stabilité de la tension.
Static VAR compensator (SVC, TCR, TCS, TRS)	Contrôle de la tension, compensation de réactive, amortir les oscillations, stabilité la tension, transitoires et la stabilité dynamique, stabilité de la tension.
Thyristor –Controlled Braking Resistor (TCBR)	Amortir les oscillations; stabilité transitoires et dynamique
Static Synchronous Séries compensator (SSSC without storage)	Contrôle du courant, amortir les oscillations Assure la stabilité transitoires et la stabilité dynamique, stabilité de la tension, limitation du courant de défaut.
Static Synchronous Séries compensator (SSSC with storage)	Contrôle du courant, amortir les oscillations stabilité transitoires et la stabilité dynamique, stabilité de la tension,
Thyristor –Controlled series capacitor (TCSC, TSSC)	Contrôle du courant, amortir les oscillations stabilité transitoires et la stabilité dynamique, stabilité de la tension, limitation du courant de défaut.
Thyristor –Controlled series Reactor (TCSR, TSSR)	Contrôle du courant, amortir les oscillations stabilité transitoires et la stabilité dynamique, stabilité de la tension, limitation du courant de défaut.
Thyristor –Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST or TCPR)	Contrôle de puissance active, amortir les oscillations, transitoires et dynamique, stabilité de la tension.
Unified Power Flow Controller (UPFC)	Contrôle de puissance active et réactive, réglage de la tension, compensation de réactive, amortir les oscillations, stabilité transitoires et dynamique stabilité de la tension, limitation du courant de défaut.
Thyristor –Controlled Voltage Limiter (TCVL)	Limite de tension transitoire et dynamique
Thyristor –Controlled Voltage Regulator (TCVR)	Contrôle de puissance réactive, réglage de la tension, amortir les oscillations,

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre en premier lieu une définition et une classification des dispositifs FACTS et les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), ainsi nous avons choisi le SVC comme dispositifs FACTS pour améliorer la qualité de la tension et contrôler la puissance active et réactive dans un réseau de transport d'énergie électrique.

Si aujourd'hui les dispositifs FACTS sont encore peu utilisés par rapporte a leur potentiel, les évolutions technique de l'électronique de puissance vont rendre la solution FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux.

Quatrième chapitre
Modélisation d'un
SVC

IV.1. Configuration D'un TCR / FC

Dans le nœud ou est raccordé le SVC un flux de puissance réactive transmis vers soit la charge consommateur si elle consomme tors de puissance réactive, ou bien un écoulement de réactive vers la source si seulement la charge a caractère résistif, il s'agit dans ce cas d'un surplus de puissance réactive dans le nœud.

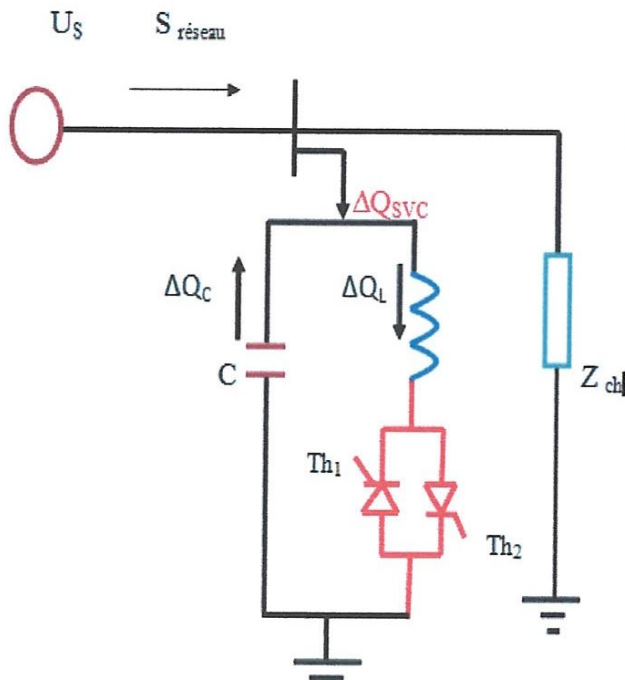


Fig.4.1.a. Model TCR / FC

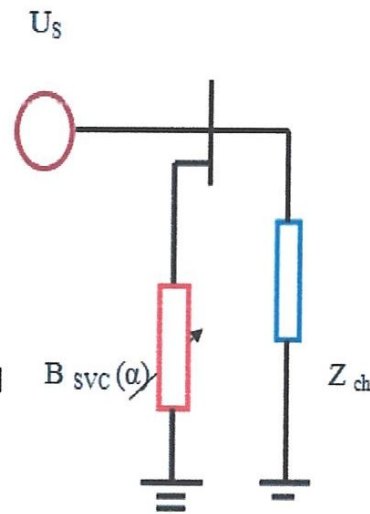


Fig.4.1.b. schéma equivalent

$$V_{SVC} = V_{Th} + V_L \quad (4.1)$$

$$Z_{SVC} = \frac{Z_L \times Z_C}{Z_L + Z_C} = \frac{jX_L(-jX_C)}{jX_L - jX_C} \quad (4.2)$$

$$Z_{SVC} = \frac{X_L X_C}{j(X_L - X_C)} = \frac{jX_L X_C}{X_C - X_L} \quad (4.3)$$

Donc :

$$X_{SVC} = \frac{X_L \times X_C}{X_C - X_L} \quad (4.4)$$

$X_{SVC} < 0$ c a dsi $X_C < X_L$ le SVC pués fournie de la puissance réactive
(compensateur à caractère inductive)

Lorsque $X_{SVC} > 0$ c a d $X_C > X_L$ le SVC pués absorber de la puissance réactive
(compensateur à caractère capacitive)

D'après les équations suivantes :

$$\Delta Q_C = I_C \times U_{SVC} = I_{SVC} \times \frac{Z_L}{Z_L + Z_C} \times U_{SVC} \quad (4.5)$$

$$\Delta Q_L = I_L \times U_L = I_{SVC} \times \frac{Z_C}{Z_L + Z_C} \times U_L \quad (4.6)$$

$$\Delta Q_C = I_{SVC} \times \frac{jX_L}{jX_L - jX_C} = j I_{SVC} \times \frac{X_L}{X_L - X_C} \quad (4.7)$$

$$\Delta Q_C = I_{SVC} \times \frac{X_L}{X_L - X_C} \times U_{SVC} \quad (4.8)$$

$$\Delta Q_L = I_{SVC} \times \frac{-jX_C}{jX_C jX_L} = -I_{SVC} \times \frac{X_C}{X_L - X_C} \quad (4.9)$$

$$\Delta Q_L = I_{SVC} \frac{X_C}{X_C - X_L} \times U_{SVC} \quad (4.10)$$

$\Delta Q_L, \Delta Q_C$: sont respectivement les puissances réactive capacitive et inductive des deux branches parallèle du compensateur statique a thyristor.

La puissance totale (résultante) du SVC :

$$\Delta Q_{SVC} = \Delta Q_L - \Delta Q_C \quad (4.11)$$

$$\Delta Q_L = U_{SVC} \times I_{SVC} \frac{X_C}{X_C - X_L} = U_{SVC} \times \frac{U_{SVC}}{Z_{SVC}} \times \frac{X_C}{X_C - X_L} \quad (4.12)$$

Avec :

$$Z_{SVC} = j X_{SVC} = j \frac{X_L X_C}{X_C - X_L} \quad (4.13)$$

Donc on obtient

$$\Delta Q_L = U_{SVC}^2 \left(\frac{X_C}{X_C - X_L} \right) \left(\frac{X_C - X_L}{X_L \times X_C} \right) = U_{SVC}^2 \times \frac{1}{x_L} \quad (4.14)$$

$$\Delta Q_L = U_{SVC}^2 \times B_L = U_{SVC}^2 \times \frac{1}{x_L}$$

De même que ΔQ_C :

$$\Delta Q_C = U_{SVC} \times I_{SVC} \times \frac{X_L}{X_L - X_C} \quad (4.15)$$

$$\Delta Q_C = U_{SVC} \times \frac{U_{SVC}}{Z_{SVC}} \times \frac{X_L}{X_L - X_C} \quad (4.16)$$

$$\Delta Q_C = U_{SVC}^2 \left(\frac{X_L}{X_L - X_C} \right) \left(\frac{X_C - X_L}{X_L \times X_C} \right) = -U_{SVC}^2 \left[\frac{X_L - X_C}{X_L - X_C} \right] \frac{1}{x_L} \quad (4.17)$$

$$\Delta Q_C = -U_{SVC}^2 \times \frac{1}{x_L} \quad (4.18)$$

$$\Delta Q_C = -U_{SVC}^2 \times B_C$$

$$\Delta Q_{SVC} = \Delta Q_L - \Delta Q_C \quad (4.19)$$

Donc :

$$\Delta Q_{svc} = U_{SVC}^2 \times \frac{1}{x_L} + U_{SVC}^2 \times \frac{1}{x_L} \quad (4.20)$$

$$\Delta Q_{svc} = U_{SVC}^2 \left[\frac{1}{x_L} + \frac{1}{x_C} \right] \quad (4.21)$$

$$\Delta Q_{svc} = U_{SVC}^2 \left[\frac{x_C + x_L}{x_C \times x_L} \right] \quad (4.22)$$

IV.2.Simulation d'un model TCR/FC

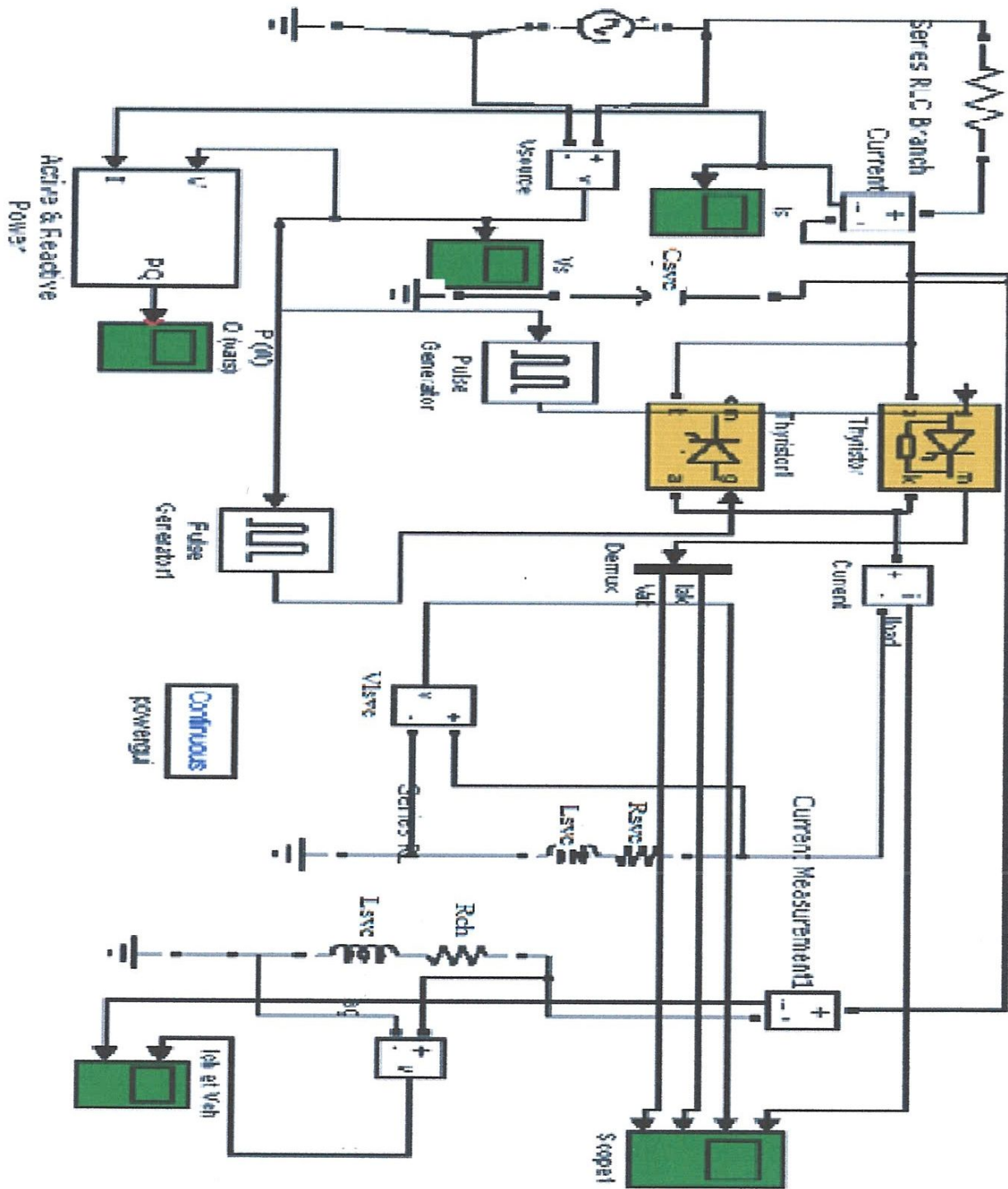


Fig.4.2.Installation d'un compensateur SVC en parallèle (modèle TCR/FC)

IV.3. Analyse de résultante de simulation

L'objectif est d'utiliser le SVC comme un système de contrôle de puissance transmise dans le réseau électrique, pour mieux comprendre ce phénomène on change les paramètres du FC et de l'inductance variable ainsi que la variation de la charge pour plusieurs possibilité qu'on se limite dans notre simulation a deus cas différents.

IV.3.1. Cas d'un compensateur à caractère capacitif

Nous avons comme données :

$U=13.5$ KV (tension de la source).

$f= 50$ HZ.

$$\Delta Q_C = U^2 \times B_C \quad (4.23)$$

$$\Delta Q_C = U^2 \times C \times \omega \quad (4.24)$$

Avec :

$$C = 200 \mu F \quad (4.25)$$

$$\Delta Q_C = (13.5 \times 10^3)^2 \times 200 \times 10^{-6} \times 314 \quad (4.26)$$

La puissance réactive ΔQ_C fournie par le compensateur de vient :

$$\Delta Q_C = 11.4453 \text{ MVAR} \quad (4.27)$$

Pour la branche inductive :

$$\Delta Q_L = U^2 \times B_L \quad (4.28)$$

$$\Delta Q_L = U^2 \times \frac{1}{X_L} = U^2 \times \frac{1}{\omega \times L} \quad (4.29)$$

Pour :

$$L = 100 \text{ m H} \quad (4.30)$$

On obtient :

$$\Delta Q_L = (13.5 \cdot 10^3)^2 * \frac{1}{2\pi 50 \times 100 \times 10^{-3}} \quad (4.31)$$

$$\Delta Q_L = 5.804 \text{ MVAR} \quad (4.32)$$

Avec une puissance de charge :

$$S_{ch} = P + JQ \quad (4.33)$$

tel que :

$$P_{ch} = 1 \text{ MW} \quad (4.34)$$

$$Q_{ch} = 1 \text{ MVAR} \quad (4.35)$$

$$\Delta Q_{svc} = \Delta Q_L - \Delta Q_C = -5 \text{ MVAR} \quad (4.36)$$

Le compensateur injecte de la puissance réactive tel que la charge absorbe en viron une puissance de 1Mvar et le reste de la puissance réactive fournie par le SVC sera écoulé vers la source comme le montre la figure.4.3.

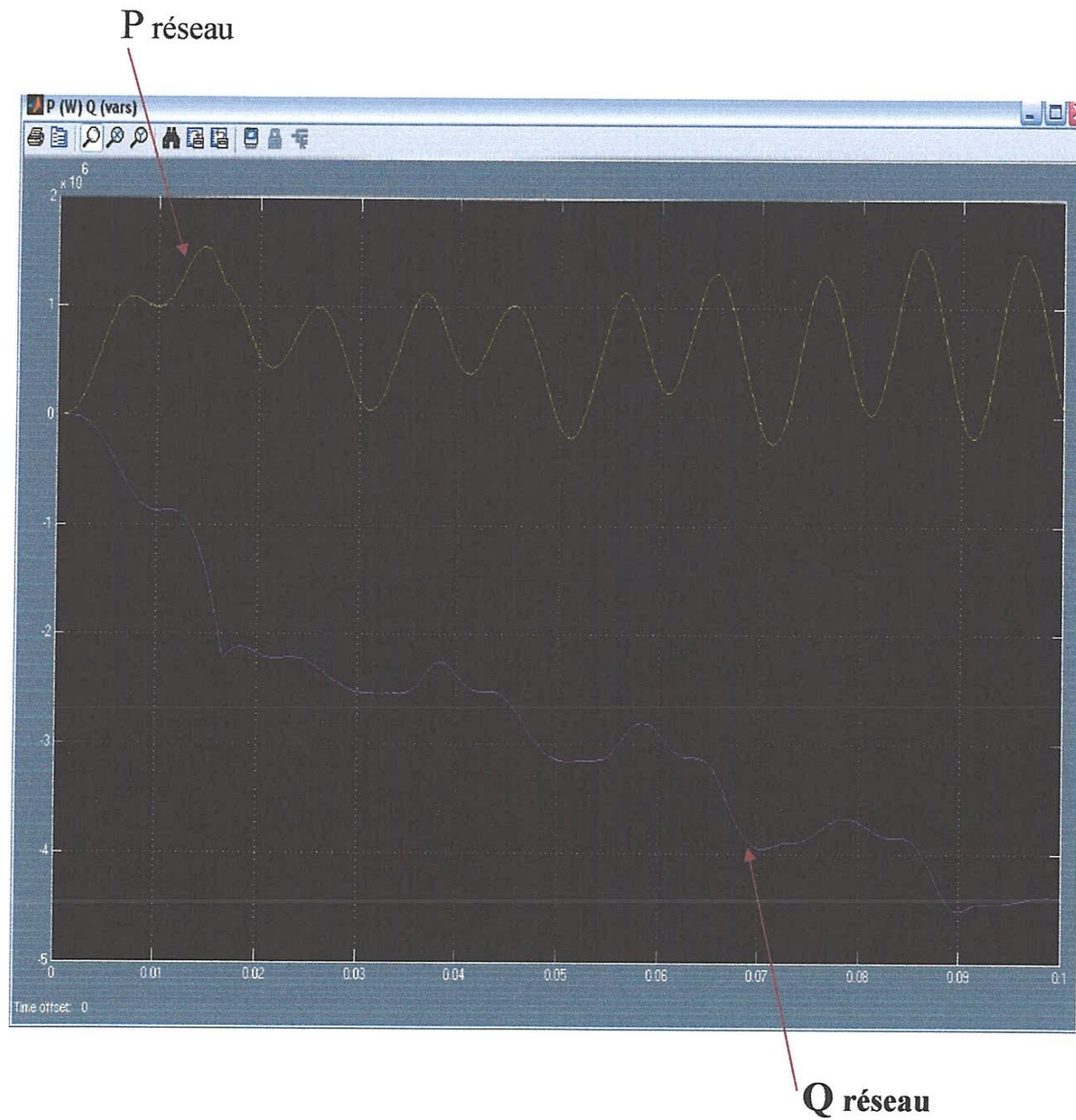


Fig.4.3. Variation de $P_{\text{réseau}}$ et $Q_{\text{réseau}}$ en fonction de temps

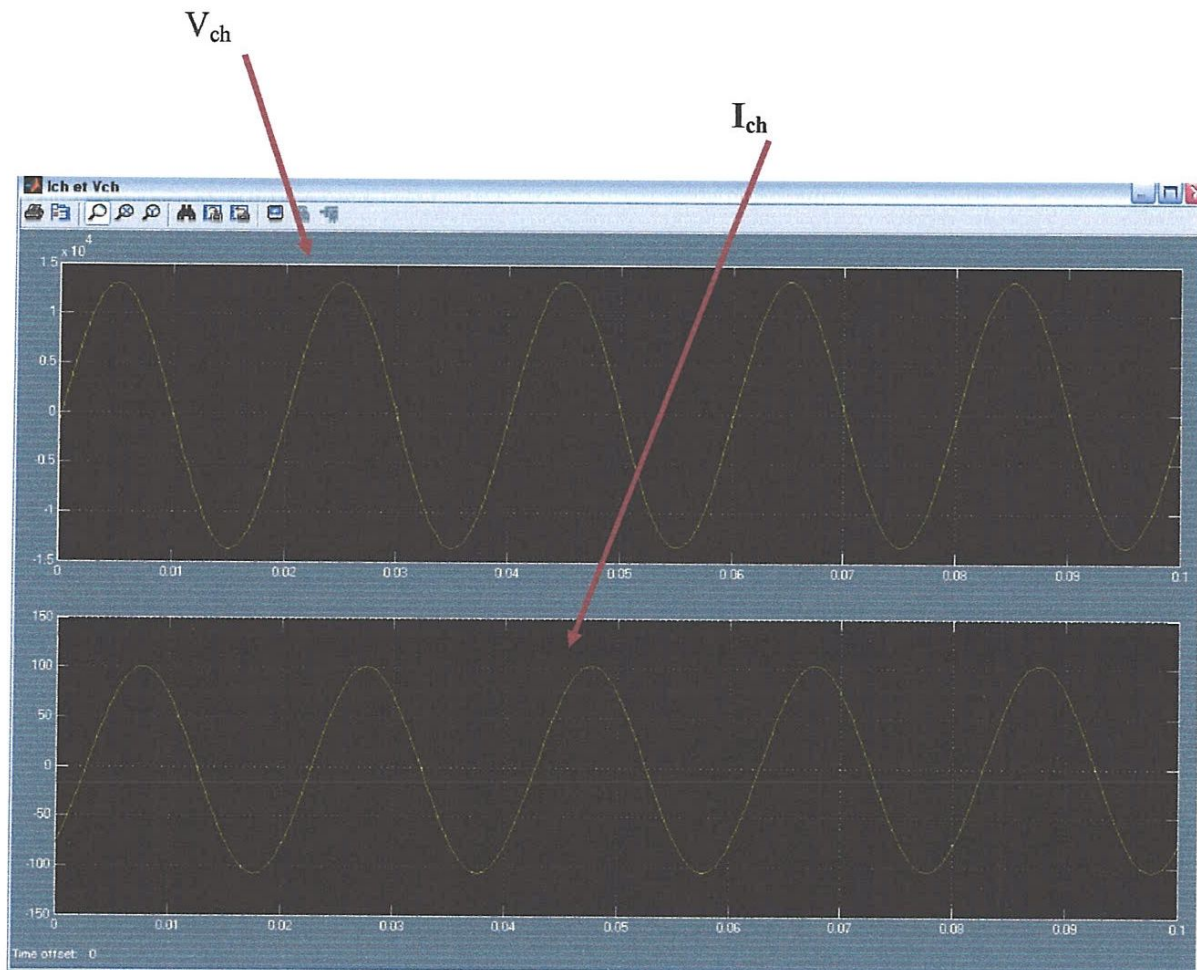


Fig.4.4. Tension et Courant de la Charge

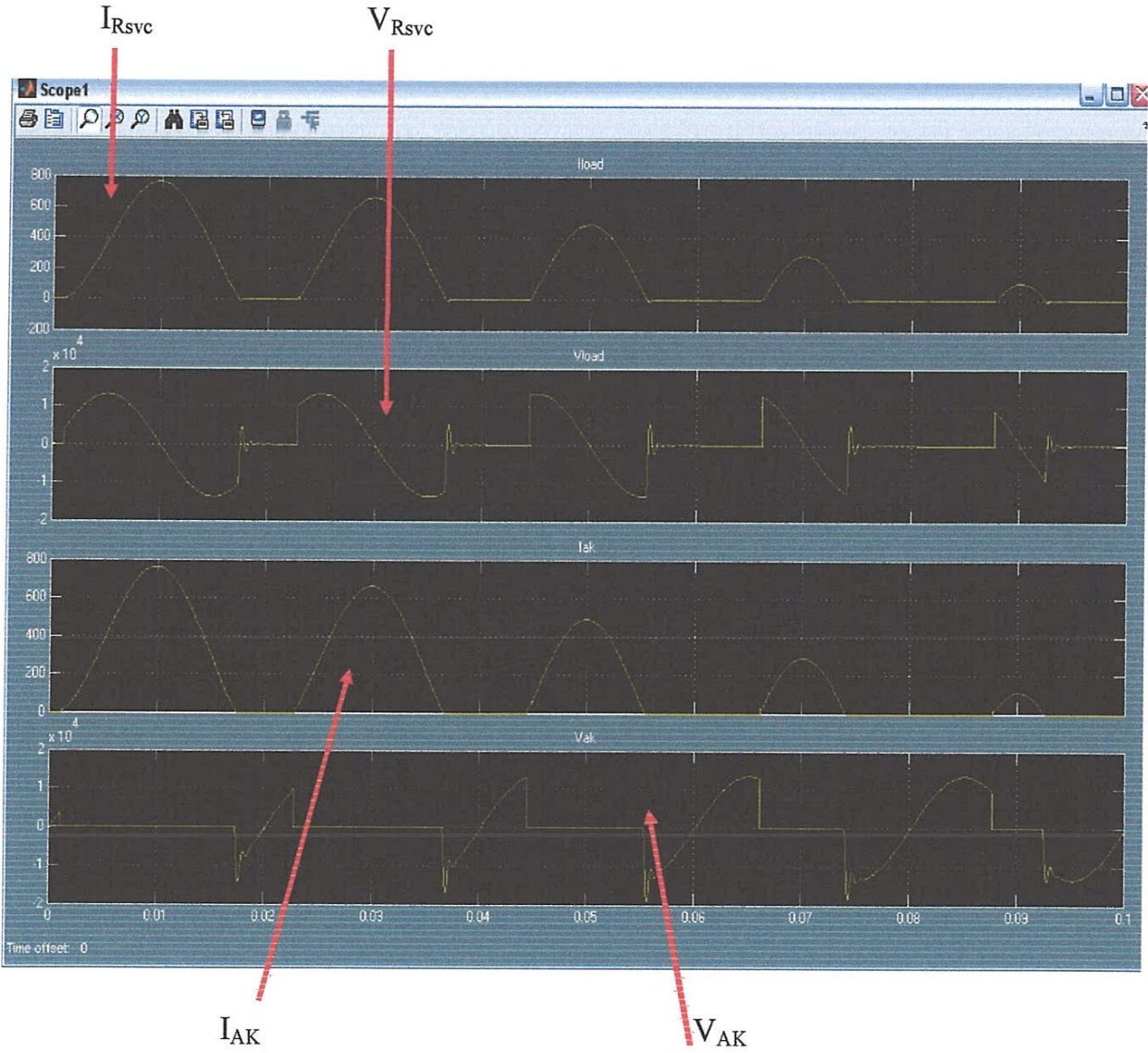


Fig.4.5. Tension et courant du TCR

IV.3.2.Cas d'un compensateur a caractère inductif

Dans se cas la puissance réactive de SVC sera positive et le compensateur absorbe de puissance réactive, pour se la on doit change les paramétrer du block de SVC (FC/TCR) pour avoir les quantités de puissance réactive suivantes.

$$\Delta Q_L = U^2 \times \frac{1}{X_L} = U^2 \times \frac{1}{\omega \times L} \quad (4.37)$$

Avec :

$$L = 3.75 * 10^{-3} \quad (4.38)$$

$$\Delta Q_L = 11.4453 \text{Mvar} \quad (4.39)$$

ET:

$$\Delta Q_C = U^2 \times C \times \omega \quad (4.40)$$

$$\Delta Q_C = 5.804 \text{ M var} \quad (4.41)$$

Alor :

$$C = 10.13 \mu F \quad (4.42)$$

Lorsque notre charge et consommé leur puissance, on a un trot de puissance réactive écoulé dans le réseau qui nous provoque une augmentation de tension se qui transformé a des pertes pour cella on a utilisé le compensateur statique SVC de configuration TCR/FC pour absorbé cette puissance comme le montre dans la figure.4.6.

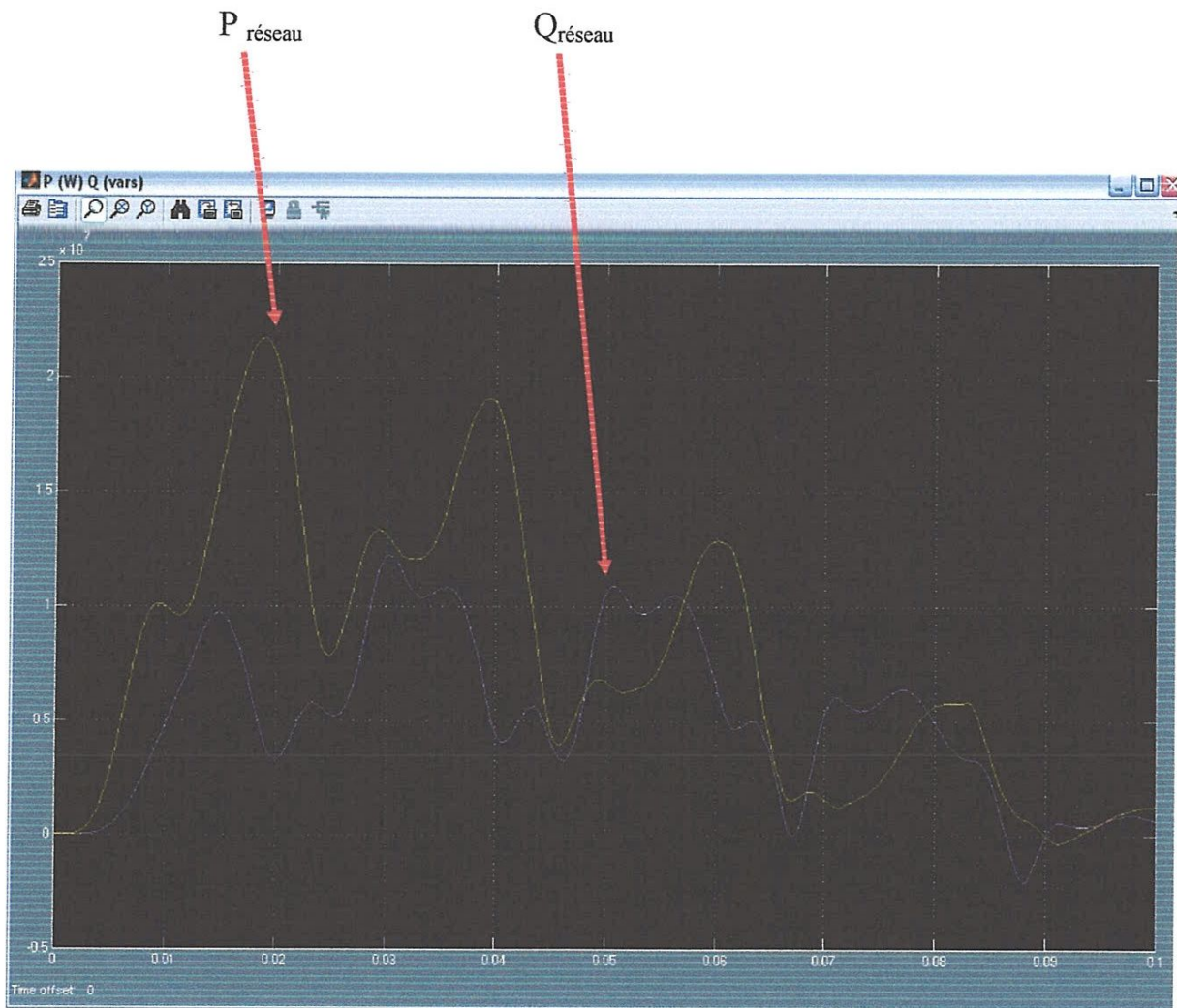


Fig.4.6.la Lure de Pet Q de réseau

L'allure

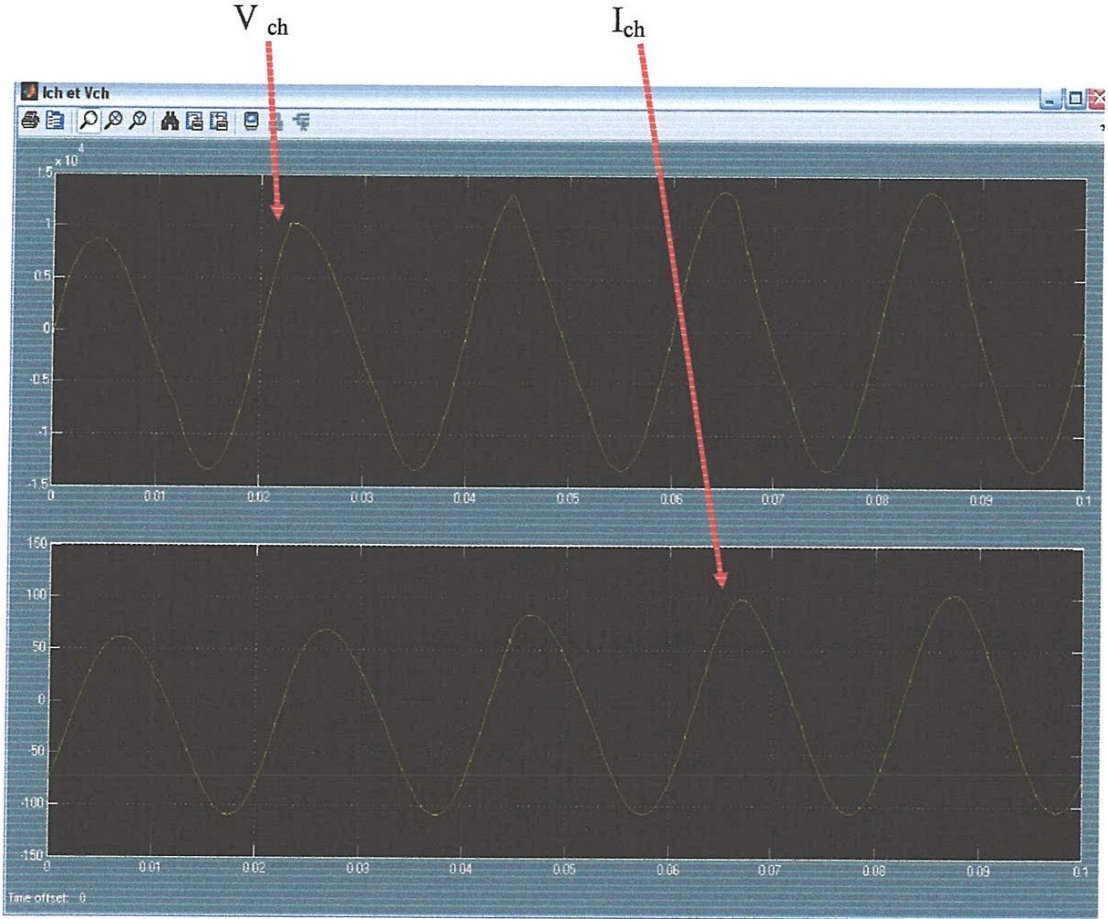


Fig.4.7. Tension et courant de la charge

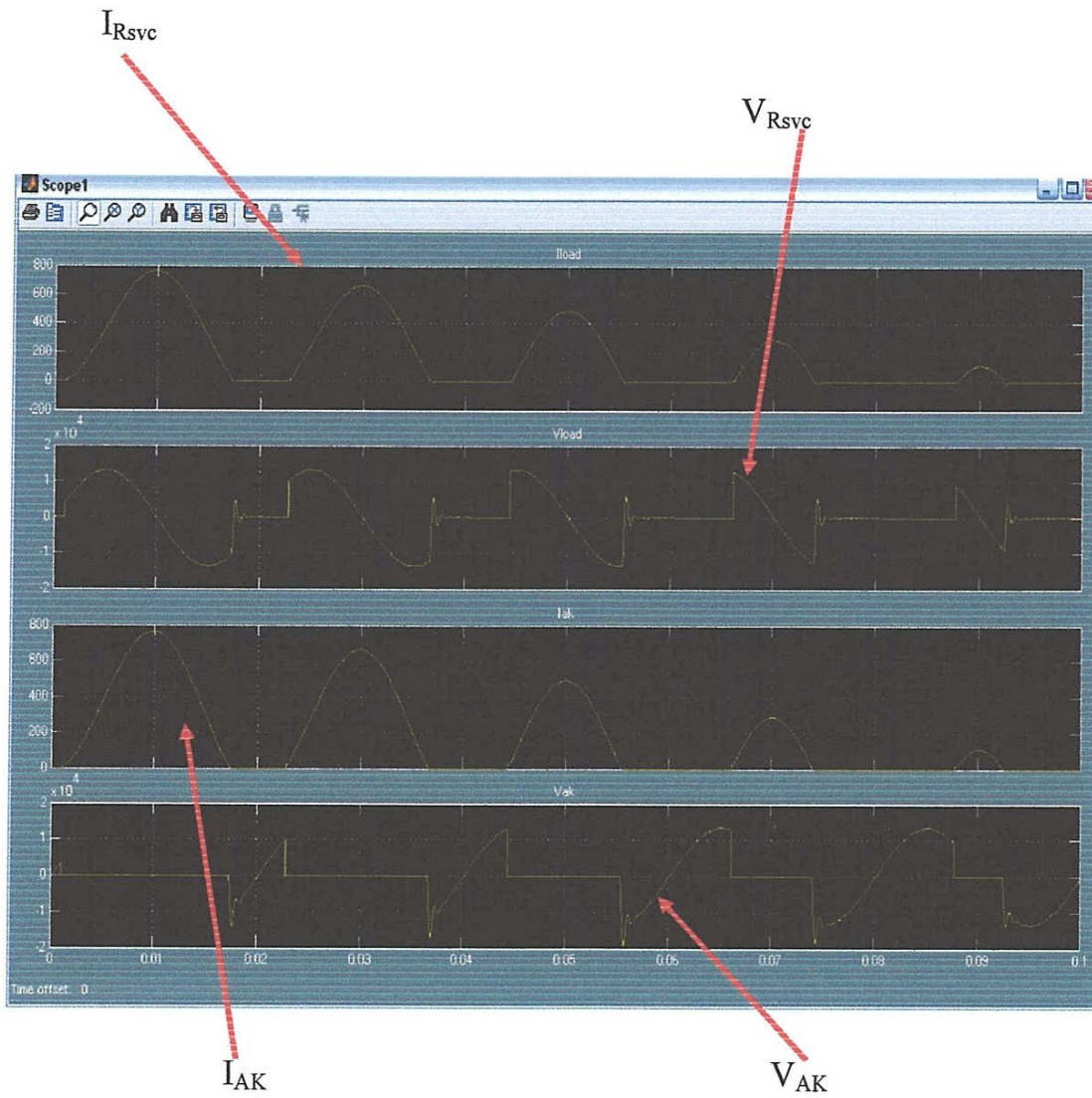


Fig.4.8. Tension et courant du TCR

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons développé un modèle de compensateur statique à thyristors nommé le SVC, ce dispositif fait partie du système FACTS utilisé pour contrôler de puissances active et réactive dans un réseau électrique, par le changement des paramètres de TCR avec la variation de l'angle d'amorçage de thyristor.

Pour cela nous avons réécrit les équations du modèle du SVC ainsi que permettant de déterminer la puissance soit fournie ou absorbée par le compensateur puis effectuer les essais de simulation et observer le comportement de ce contrôleur dans deux cas de fonctionnement envisagés inductif et capacitif.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Pour les applications à moyenne et à haute tension on a développé des d'inductances shunt dans le courant et réglé par des thyristors montés en série ^{dont}

L'utilisation de cette technique ou bien le system FACTS pour la compensation de puissance garantit une réponse et un maximum de flexibilité au contrôle par échelons de l'écoulement de la puissance réactive dans le réseau électrique.

Le travaille présenté dans ce mémoire portait sur l'étude et modélisation de compensateur statique a thyristors qui présenté l'un des moyens les plus utilisés dans le système FACTS.

L'utilisation de ce genre de dispositif se justifie par la limitation de puissance des batteries fixes à installer eu sous station et pour répondre à la variation rapide de la puissance réactive demandées par les charges perturbatrices.

Bibliographie :

- [1]-Cahier technique de Schneider.
- [2]-Benramden Nadir , Haouam Feriel (**compensation de la puissance réactive dans un réseau électrique**) mémoire de fin d'étude juin 2006.
- [3]-Bouznad Samir , Zighed Fateh Bachir (**qualité de l'énergie électrique compensation de l'énergie réactive**) mémoire de fin étude juin 2003.
- [4]-**Reactive-Power Control in Electrical Power Transmission System**, copyright materials jonh Wiley 2002.
- [5]- HAIMOUR Rachida (**Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique**) thèse de magistère. Université d'Oran2009.
- [6]-Abdelaàli ALIBI (**Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)**) thèse de magistère. Université de Batna2009.
- [7]- DELENDI LOUARDI (**CONTROLE DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE ACTIVE PAR SYSTEME FACTS**) thèse de magistère. Université de Batna2009.
- [8]- Technique de l'ingénieur.
- [9]-Understanding FACTS R(Robert J Herick)
- [10]-Mémoire de master2 (la puissance réactive et la relation avec la qualité d'énergie électrique) sous la direction de Mr Bloucif Faycel