

Résumé de mémoire d'ingénieurs
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Intitulé du mémoire :

Base de fonctionnement des dispositifs FACTS
-Application d'un STATCOM pour la régulation de la tension-

Option :
Machines électriques

Présenté par :
IMADOUCHE Smail.

Et
Hocini Nassim.

Encadré par :
Mr. NAHI Ahmed.

Année : 2009-2010

Résumé :

Ce mémoire traite d'un sujet d'actualité puisqu'il traite des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.

Nous avons commencé, au premier chapitre, par présenter les problèmes (stabilité, variations de tension, circulation de la puissance réactive...etc.) que nous rencontrons souvent dans les grands réseaux électriques. Ensuite, nous avons cité les moyens traditionnels pour compenser la puissance réactive dans ces réseaux (compensateurs traditionnels).

Puisque le sujet principal traité ici est le fonctionnement des dispositifs FACTS, un tour par l'électronique de puissance s'est imposé ; nous avons cité : le thyristor, le GTO, l'IGBT

et le principe de fonctionnement des gradateurs et des onduleurs (Ils sont, presque, à la base de tous les dispositifs FACTS). C'est ce qui sera traité au deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons certains dispositifs FACTS : ceux à bas de thyristors et GTO. Sont cités : Le SVC et le STATCOM (compensateurs shunt), le SSSC et le GCSC (compensateurs série) et enfin l'UPFC ((compensateurs hybride série-shunt). Ces dispositifs modernes ont tendances à supplanter les compensateurs traditionnels.

Dans le quatrième chapitre, nous avons cité les modèles courants du compensateur shunt STATCOM.

On a clos par la présentation d'une simulation d'un STATCOM dans un réseau de transport d'énergie constitué de deux sources triphasées reliées entre elles par une ligne modélisée en PI ; cette simulation montre comment le STATCOM arrive à réguler la tension sur le point auquel il est connecté : en injectant ou fournissant de la puissance réactive pendant la perturbation (chute ou augmentation de la tension du réseau).

Pour cela trois cas sont considérés:

- Le réseau de transport seul en fonctionnement normal (Pas de perturbations).*
- Le réseau de transport en fonctionnement perturbé (Chute puis augmentation de la tension de l'une des sources à des instants choisis).*
- Le réseau de transport toujours en fonctionnement perturbé mais en présence, cette fois, du STATCOM.*

Effectivement, le troisième cas nous a montré que la chute ou l'augmentation de la tension est moindre que si le réseau était sans STATCOM (deuxième cas).

REMERCIEMENTS

*Nous remercions infiniment nos **parents** qui nous ont donné la force et l'intelligence pour faire ce travail....*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et particulièrement **Mr .A. NAHI** pour sa disponibilité et son engagement.*

Nous remercions nos deux familles pour leurs soutiens et tous nos amis pour la bonne ambiance....

Moi Smail, je dédie ce travail à ma fiancée Saliha qui m'a donné tout son soutien et son aide.

*Je dédie ce travail à mes chers parents et mes deux petites sœurs **Lydia** et **Katia** ainsi à tout mes vrais amies de digne et de la fois (Mohande.B, Aomar.D, Mami. CH ...) et à ma chère femme inconnu de la part de **Nassim**.*

-Sommaire-

Listes des symboles et des acronymes	01
Listes des figures	03

Introduction générale	06
-----------------------------	----

Chapitre I : Puissance réactive et tension dans les réseaux électriques

Introduction	10
I.1-les caractéristiques générales des perturbations électriques	11
I.1.1-La qualité de la tension	11
I.1.1.1-Dégradation de la qualité de la tension	11
I.1.1.2-Creux de tension et coupure brève	11
I.1.1.3-Fluctuation lente de la tension (Flicker)	12
I.1.1.4-Déséquilibre du système triphasé de tensions	13
I.1.1.5-Surtensions temporaires ou transitoires.....	14
I.1.1.6-Harmoniques et interharmoniques.....	15
I.2-Stabilité des réseaux électriques.....	16
I.2.1-La stabilité transitoire	16
I.3-Notion d'énergie électrique	19
I.3.1-Puissance active, réactive et apparente	19
I.3.2-Puissance dans un récepteur monophasé	20
I.3.3-Puissance dans un récepteur triphasé	21
I.3.4-Facteur de puissance	24
I.4-Effet de la circulation de la puissance réactive	24
I.4.1-Pertes joule	24
I.4.2-Chute de tension	26
I.5-Les compensateurs traditionnels	28
I.5.1-les batteries de condensateurs	28
A- Le condensateur série	28

B- Le condensateur shunt	30
C-Raccordement des condensateurs au réseau	30
I.5.2-le compensateur synchrone	32
I.5.3-Les transformateur déphaseurs (PST)	34
Conclusion.....	37

Chapitre II:L'électronique de puissance

Introduction	39
II.1- Les composants d'électronique de puissance	40
II.1.1- Thyristor	40
II.1.2- GTO (<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>)	40
II.1.3- IGBT (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)	41
II.2- Avenir des semi-conducteurs dans l'électronique de puissance	42
II.2.1- Le silicium	42
II.2.2- Le carbure de silicium (SiC)	42
II.2.3- Le diamant	42
II.3- Convertisseurs d'électronique de puissance	43
II.3.1- Le gradateur	44
II.3.1.1- Gradateur monophasé	44
II.3.1.2- Gradateur triphasé	47
II.3.2- L'onduleur	49
II.2.2.1- Onduleur monophasé	49
II.3.2.2- Onduleur triphasé multi-niveaux	53
Conclusion	56

Chapitre III: Les dispositifs FACTS

Introduction	58
III.1 Présentation du concept FACTS	59
III.1.1- Dispositifs FACTS Shunt	59
III.1.1.1- Compensateur statique de puissance réactive SVC	59

III.1.1.1.1- Réactance commandée par thyristors (TCR)	60
III.1.1.1.2- Condensateur commuté par thyristors (TSC)	63
III.1.1.1.3- Caractéristique de réglage du SVC	66
III.1.1.2- Compensateur statique synchrone STATCOM	68
III.1.2- Dispositifs FACTS série	70
III.1.2.1- Compensateur statique série synchrone SSSC	70
III.1.2.2- GTO Thyristor-Controlled Series Capacitor GCSC	71
III.1.3- Dispositifs FACTS série-shunt	73
III.1.3.1- Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC	73
III.2- Synthèse	75
Conclusion	76

Chapitre IV : Modélisation du STATCOM

Introduction	78
IV.1- Le STATCOM, schéma et Principe de Fonctionnement	79
IV.1.1 Structure des STATCOM sur les réseaux de transport	80
IV.2- Modèles du STATCOM	83
IV.2.1 Modèle statique du STATCOM	81
IV.2.1.1- Zone de régulation	81
IV.2.1.2- Zone de surcharge capacitive	81
IV.2.1.3- Zone de surcharge inductive	82
IV.2.2- Modèle dynamique	82
Conclusion	83

Chapitre V : Partie simulation

Introduction	85
V.1- Présentation du réseau	86
V.1.1- Valeurs de bases	87
V.2- Fonctionnement normale	89
V.3- Avec la source perturbatrice	93
V.4- La perturbation avec l'intervention du STATCOM	97
Conclusion	103
Conclusion générale	104

- Liste des symboles et acronymes –

Acronyms:

GTO	Gate Turn-Off Thyristor.
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor.
SiC	Silicon Carbide.
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems.
TCR	Thyristor Controlled Reactor.
TSC	Thyristor Switched Capacitor.
SVC	Static Var Compensator.
STATCOM	Static Compensator.
SSSC	Static Synchronous Series Compensator.
GCSC	GTO Thyristor-Controlled Series Capacitor.
UPFC	Unified Power Flow Controller.
PST	Phase-Shifter Transformer.
TG	Transformateur de Groupe.
TT	Transformateur de Tension.

Symboles :

$v(t)$	Tension instantanée.
$\bar{V}$	Tension complexe.
V	Valeur efficace de la tension.
V_{dc}	Tension continue
$i(t)$	Courant instantané.
$\bar{I}$	Courant complexe.
I	Valeur efficace du courant.
C_e	Couple électrique.
P	Puissance active.
Q	Puissance réactive.
t	Temps.
T	Période.
ω	Pulsation.
Z	Impédance.
X	Réactance.
B	Susceptance (inverse de la réactance).
L	Inductance.
C	Condensateur.
β	Angle de la commande décalée.
φ	Argument de l'impédance $\bar{Z}$
α	Angle de retard à l'amorçage des thyristors.

σ	Angle de conduction des thyristors et GTO.
σ	Angle de conduction des thyristors et GTO.
γ	Angle de retard à l'ouverture des GTO.
ρ	Angle de tension série injectée par l'UPFC.
d (indice)	La composante sur l'axe d du repère d-q.
q (indice)	La composante sur l'axe q du repère d-q.
p.u (indice)	La grandeur en unité relative (grandeur réduite).

Listes des figures

N°	Titres	pages
I.1	Creux de tension et coupure	12
I.2	fluctuation lente de la tension	13
I.3	Déséquilibre de tension	13
I.4	Exemple de cas de surtensions transitoires	14
I.5	Représentation temporelle d'une onde déformée	15
I.6	Groupe raccordé en antenne à un réseau très puissant	17
I.7	Perturbation du fonctionnement d'un alternateur	18
I.8	Composition vectorielle des courants	19
I.9	composition vectorielle des puissances	20
I.10	Récepteur monophasé	21
I.11	Elément de réseau triphasé	23
I.12	Réseau monophasé	24
I.13	Schéma équivalent d'une ligne de transport	26
I.14	Diagramme vectoriel des tensions	27
I.15	Schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne	29
I.16	profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation	29
I.17	schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne	30
I.18	Diagramme des courants et Tensions d'un compensateur shunt	30
I.19	Schéma de branchement d'un condensateur série	31
I.20	Schéma de couplage de condensateurs shunt	31
I.21	Schéma équivalent de la machine synchrone	32
I.22	Représentation vectorielle des tensions du compensateur synchrone	33
I.23	Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau	35
I.24	schéma d'un transformateur déphaseur (PST)	35
II.1	Symbole du thyristor	40
II.2	Symbole du GTO	40
II.3	Symbole d'un IGBT	41

II.4	Diagramme de fonctionnement des convertisseurs	43
II.5	Schéma de montage d'un gradateur monophasé	44
II.6	Allures de la tension et du courant d'un gradateur monophasé pour $\alpha > \pi/2$	46
II.7	Schéma de montage d'un gradateur triphasé en triangle	48
II.8	Formes d'onde des courants de lignes et du courant de phase d'un gradateur triphasé couplé en triangle	48
II.9	Schéma de montage d'un onduleur monophasé en pont	49
II.10	Tension et courant de charge à la sortie d'un onduleur en pont	50
II.11	la commande décalée d'un onduleur monophasé en pont	51
II.12	le THD en fonction de l'angle de commande	51
II.13	Structure d'un onduleur polygonal	52
II.14	Tensions recueillies à la sortie d'un onduleur polygonal	53
II.15	La structure d'une phase d'un onduleur multi-niveaux en cascade	54
II.16	Tensions de sortie aux bornes d'un onduleur multi-niveaux	55
III.1	Schéma de base d'un SVC	60
III.2	Réactance commandée par thyristors	60
III.3	Variation de la susceptance du TCR en fonction de α	61
III.4	Caractéristique (V-I) du TCR	62
III.5	TCR à 12 impulsions (dodécaphasé).	63
III.6	Condensateur commandé par thyristor TSC	64
III.7	Schéma de connexion d'un TSC	64
III.8	Caractéristique (V-I) du TSC	66
III.9	Caractéristique de réglage du SVC	66
III.10	Schéma équivalent de Thévenin	66
III.11	Fonctionnement du SVC	67
III.12	Schéma de base d'un STATCOM	68
III.13	Comportement inductif	69
III.14	Comportement capacitif	69
III.15	Caractéristique (V-I) du STATCOM	70
III.16	Schéma de base d'un SSSC	71
III.17	Schéma de base d'un GCSC	71

III.18	Structure de base d'un UPFC	73
III.19	Diagramme des tensions pour différents fonctionnements de l'UPFC	74
IV.1	Schéma de base d'un STATCOM	79
IV.2	Schéma de base d'un STATCOM à 48 impulsions	80
IV.3	Modèle statique du STATCOM	81
IV.4	Synoptique du modèle dynamique de base du STATCOM	82
V.1	Réseau de base.	89
V.2	Tension de la source	90
V.3	Agrandissement d'une partie de la figure V.2	90
V.4	Courant de la source	91
V.5	Tension de la source perturbatrice	91
V.6	Agrandissement d'une partie de la figure V.5	92
V.7	Courant de la source perturbatrice	92
V.8	Tension de la source perturbatrice	93
V.9	Courant de la source perturbatrice.	94
V.10	Tension de la source principale	94
V.11	Agrandissement d'une partie de la figure V.10–zoom1.	95
V.12	Agrandissement d'une partie de la figure V.10 –zoom2	95
V.13	Agrandissement d'une partie de la figure V.10 –zoom3	96
V.14	Courant de la source principale	96
V.15	Le réseau de base associé au le STATCOM.	97
V.16	Réaction du STATCOM	98
V.17	Détail du comportement capacitif du STATCOM-zoom1	99
V.18	Détail du comportement inductif du STATCOM- zoom2	99
V.19	Tension régulée	100
V.20	Puissance réactive du STATCOM	100
V.21	Déphasage des tensions réseau-STATCOM.	101
V.22	Tension aux bornes des condensateurs.	101
V.23	La puissance active du STATCOM.	102

Introduction Générale

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 charges sont très sensible aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations: une perte d'alimentation peut causer l'interruption des différents processus de production; et devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et de meilleur qualité, les entreprises de production de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement régulier de cette demande, et sans interruption, à travers un réseau maillé et interconnecté afin de prouver une fiabilité dans leurs service.

D'autre part plus que le réseau augmente plus qu'il devient complexe et plus difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que: le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau...etc. et de ce fait le potentiel 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 Current Transmission 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 réseaux et 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.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont classés en compensateurs shunt, série et hybride tels que: STATCOM, SSSC, UPFC respectivement.

Dans le premier chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques ensuite nous présenterons les normes de l'énergie électrique et les effets de transit

de la puissance réactive à la fin de ce chapitre on présentera les différents moyens de compensation traditionnelle.

Dans le deuxième chapitre, on donnera un aperçu sur les principaux composants de l'électronique de puissance, l'avenir des semi-conducteurs et on clos ce chapitre par la présentation du gradateur et de l'onduleur qui sont à la base de presque tout les convertisseurs.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la structure des principaux dispositifs (SVC, STATCOM, SSSC, GCSC, UPFC,...etc), une explication en détail des principes de leurs fonctionnements et puis la contribution de ces derniers et leurs effets dans le contrôle des réseaux électriques est montrée.

Nous avons présenté plusieurs modèles du dispositif STATCOM dans le quatrième chapitre. Nous avons souligné la caractéristique de chacun d'eux.

Dans le cinquième chapitre, afin de souligner le rôle du STATCOM dans le maintien de la tension du réseau auquel il est connecté, nous avons simulé, sous Matlab-Simulink, un réseau contenant une source perturbatrice pour voir son comportement et sa réponse.

A la fin de ce travail est une conclusion est tirée est une recommandation est proposée.

Chapitre I :
Puissance réactive et tension dans les
réseaux électriques

Introduction:

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes.

Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs,
- les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des Perturbations électriques. Ainsi, nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations.

Dans une deuxième partie, nous présenterons les normes de l'énergie électrique et les effets de transit de la puissance réactive qui sont les pertes joule et les chutes de tension

La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation des différents moyens de compensation traditionnelle.

I.1.les caractéristiques générales des perturbations électriques :

I.1.1.La qualité de la tension : [FE-01] [CH]

Les critères de qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques. On parle de Compatibilité Electromagnétique (C. E. M.) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.

La CEM classe ces perturbations selon deux groupes :

- basses fréquences (< 9 kHz).
- hautes fréquences (≥ 9 kHz).

D'autre part, ces phénomènes sont caractérisés selon leur mode de transmission : on parlera de perturbations conduites et de perturbations rayonnées.

De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à la basse fréquence dont la transmission est conduite.

Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter-harmoniques, tensions continues dans les réseaux alternatifs, ...

Ils peuvent être regroupés en quatre catégories selon qu'ils affectent :

- l'amplitude.
- la forme d'onde.
- la fréquence.
- la symétrie du système triphasé.

I.1.1.1. Dégradation de la qualité de la tension : [HA-09]

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain, etc., ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillissement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...)

Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils...

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

I.1.1.2.Creux de tension et coupure brève : [FE-01]

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension.
Il est caractérisé par

- sa *profondeur* (ΔV).
- sa *durée* (Δt).

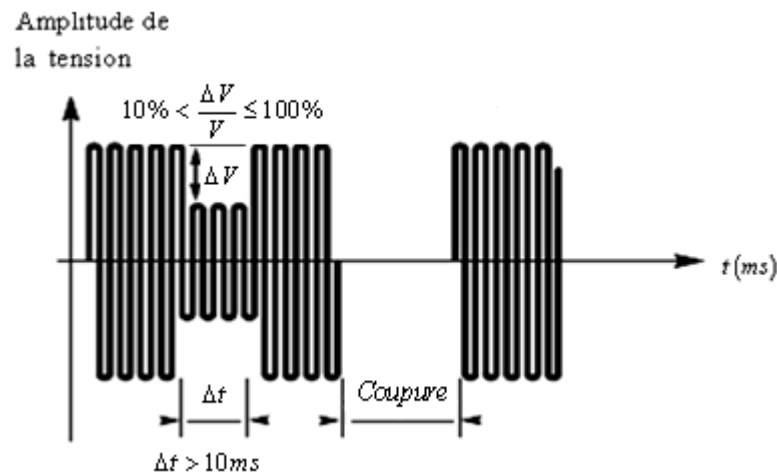


Figure I.1: Creux de tension et coupure [CA-01].

La norme fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % (CIE) de la tension nominale pendant une durée d'une demi période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute (les phénomènes de durée inférieure sont considérés comme des phénomènes transitoires) et usuellement inférieure à 3 min.

Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur, supérieur à 99 % (CIE) elles sont caractérisé par un seul paramètre, la durée.

Les creux de tension et les coupures brèves sont causés par des phénomènes aléatoires. Ces phénomènes concernent soit le réseau du distributeur, soit le réseau de l'utilisateur.

Des défauts d'isolement qui affectent les réseaux de transport, de répartition ou de distribution sont provoqués par des causes externes ou internes au réseau de distribution.

Les causes externes sont les conditions atmosphériques (dans plus de 70 % des cas pour un réseau aérien), les amorçages avec des corps étrangers (végétation, animaux, percussions de véhicules, travaux de terrassement, etc.).

Les causes internes correspondent principalement à des défaillances de matériel (lignes, câbles, transformateurs, etc.).

I.1.1.3.Fluctuation lente de la tension (Flicker) : [CH]

La fluctuation lente de la tension est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10 %. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0,5 et 25 Hz. Le phénomène est dû à la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide (les fours à arcs, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents, ...).

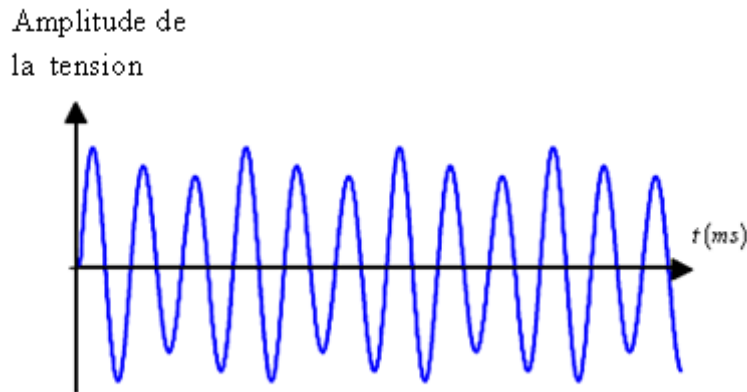


Figure I.2 : fluctuation lente de la tension [CH].

Les conséquences de la fluctuation lente de la tension s'observent essentiellement sur des lampes à incandescence où elle provoque un papillotement du flux lumineux (Flicker). Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1 % de la tension.

I.1.1.4. Déséquilibre du système triphasé de tensions :

Un système de tensions triphasées est réputé équilibré ou symétrique si les tensions et les courants présents sur les trois phases ont la même amplitude et sont déphasés les uns par rapport aux autres de 120° . Si une ou plusieurs de ces conditions ne sont pas respectées, le système est dit déséquilibré ou asymétrique. Il est ici implicite que les formes d'ondes soient sinusoïdales et donc ne contiennent pas d'harmoniques.

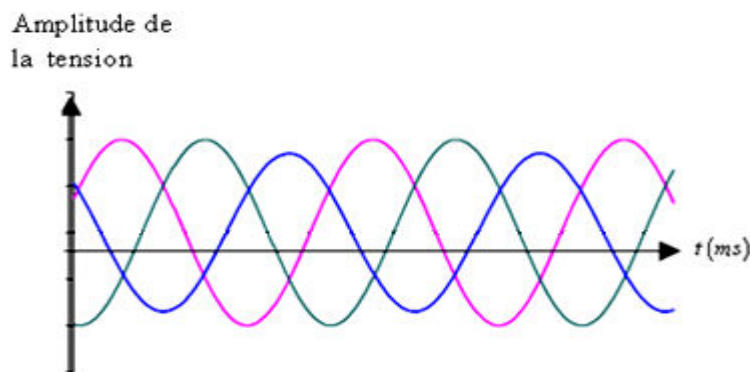


Figure I.3 : Déséquilibre de tension [CH].

Dans la plupart des cas en pratique, l'asymétrie des charges est la cause principale du déséquilibre. Pour les niveaux de hautes et de moyennes tensions, les charges sont

usuellement triphasées et équilibrées, bien qu'il puisse exister des charges mono ou diphasées, comme en traction ferroviaire AC (par exemple les trains à grande vitesse) ou les fours à induction (grands systèmes de fusion des métaux utilisant de puissants arcs électriques irréguliers pour générer de la chaleur).

I.1.1.5. Surtensions temporaires ou transitoires : [FE-01] [HA-09]

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension.

La norme fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation:

- réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance) : la surtension ne devra pas dépasser 1,7 fois la tension nominale U_n .
- réseaux à neutre isolé ou résonant : la surtension ne devra pas dépasser 2 U_n .

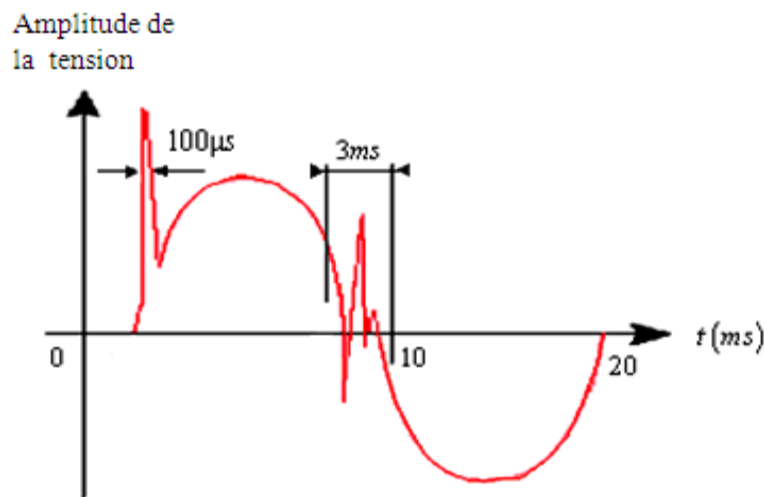


Figure I.4 : Exemple de cas de surtensions transitoires [HA-09].

Les surtensions sont de trois natures : surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz) ; surtensions de manœuvre ; surtensions atmosphériques.

Elles apparaissent selon deux modes : mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre) ; mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase – phase ou phase – neutre).

Les surtensions à la fréquence industrielle prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une ferrorésonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur.

Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau : mise en service de gradins de condensateur, d'une ligne à vide.

Les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

I.1.1.6. Harmoniques et inter-harmoniques : [FE-01]

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz.

Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension.

Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du fondamental (50 Hz pour le réseau de distribution). Chaque composante est caractérisée par son rang (par exemple rang 5 pour une composante à la fréquence de 250 Hz, soit 5 x 50 Hz) et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental.

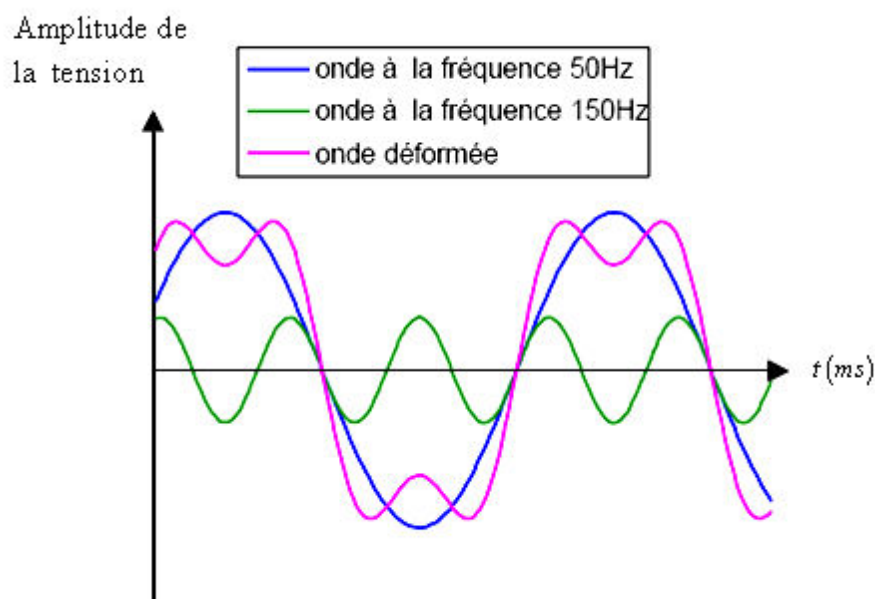


Figure I.5 : Représentation temporelle d'une onde déformée [CH].

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant (THD) :

$$THD_u = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad [I-01]$$

C'est le rapport, exprimé en pourcent, entre la valeur efficace des composantes harmoniques et l'amplitude du fondamental.

La borne supérieure est fixée par la norme au 40e rang, c'est-à-dire à 3 kHz pour la fréquence industrielle.

Les inter-harmoniques sont des signaux non multiples de la fréquence industrielle. Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arcs sont les principaux générateurs d'inter-harmoniques.

On distingue les effets instantanés et les effets à terme de ces harmoniques. Les effets instantanés font suite à un phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateurs, disjoncteur). D'autres troubles fonctionnels sont liés à la déformation de l'onde de tension tels que : couples pulsations sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesure (selon leur bande passante), perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation. Les effets à termes se traduisent par une fatigue prématurée du matériel ; des lignes et amènent un déclassement des équipements.

Des solutions de dépollution harmoniques existent :

- le filtrage passif qui consiste à installer un circuit L, C séries accordées sur la fréquence de la composante à éliminer.
- le filtrage actif génère des composantes harmoniques aux mêmes fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées.
- le filtrage hybride combine les solutions passives et active.
- l'utilisation d'appareils à absorption sinusoïdale (appareils dits « propres »).

I.2. Stabilité des réseaux électriques :

La stabilité est définie comme la propriété d'un système à retrouver un point de fonctionnement stable (point d'équilibre) après avoir subi une ou plusieurs perturbations. Un réseau électrique a en général une stabilité globale qui se manifeste par l'équilibre production-consommation. Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et de la fréquence.

I.2.1. La stabilité transitoire :

La figure I.6 représente le schéma d'un cas très simplifié d'une variation brusque de la charge d'un alternateur due à une variation de la réactance X_l de liaison de la machine à réseau supposé de puissance infinie.

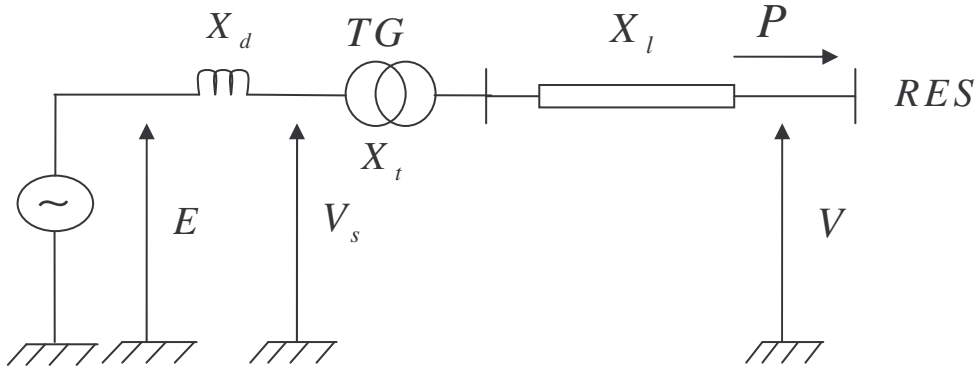


Figure I.6 : Groupe raccordé en antenne à un réseau très puissant. [BO-PA]

$$X = X_d + X_t + X_l$$

La tension fictive E_r aux bornes de la réactance transitoire X_d de la machine reste constante pendant un temps relativement court.

Pendant la perturbation, la puissance électrique active fournie par la machine s'écrit comme suit :

$$P'_e = 3 \frac{E_r V}{X'} \sin \delta'_e \quad [I-02]$$

Avec : $X' = X_d + X_t + X_l$ et $\delta'_e = (\vec{V}, \vec{E}_r)$

Au moment de la perturbation (figure I.7), le point de fonctionnement passe brusquement du point P ($P_e = P_m$) au point P' correspondant à une autre puissance électrique équivalente mais étant inférieure à la puissance mécanique (restée constante), L'accélération de la machine augmente l'angle δ . Elle accumule de l'énergie cinétique jusqu'en P'', puis l'accélération devient négative. Le mouvement s'arrête en N lorsque .Le point N est tel que l'énergie cinétique accumulée entre P 'et P '' est restituée entre P'' et N. Nous allons montrer que les aires S1 et S2 sont égales. [BO-PA]

L'équation dynamique de la machine après perturbation est :

$$j \frac{dw}{dt} = C_m - C'_e \quad [I-03]$$

Avec $w = w_0 + \frac{d\delta'_e}{dt}$

C'_e étant la nouvelle valeur du couple électrique.

On en tire :

$$\frac{d^2 \delta'_e}{dt^2} = \frac{1}{w_0 j} (P_m - P'_e)$$

Multipliant l'équation précédente par $2 \frac{d\delta'_e}{dt}$:

$$2 \frac{d\delta'_e}{dt} \frac{d^2 \delta'_e}{dt^2} = \frac{2}{w_0 j} \frac{d\delta'_e}{dt} (P_m - P'_e)$$

Intégrant entre P' et N :

$$\left(\frac{d\delta'_e}{dt} \right)^2 = 0 = \frac{2}{w_0 j} \int_{P'}^N (P_m - P'_e) d\delta'_e = S_2 - S_1 \quad [\text{I-04}]$$

Le fonctionnement sera stable si le point de fonctionnement N ne franchit pas le point M ($P_e = P_m$ avec $\delta'_e > \frac{\pi}{2}$)

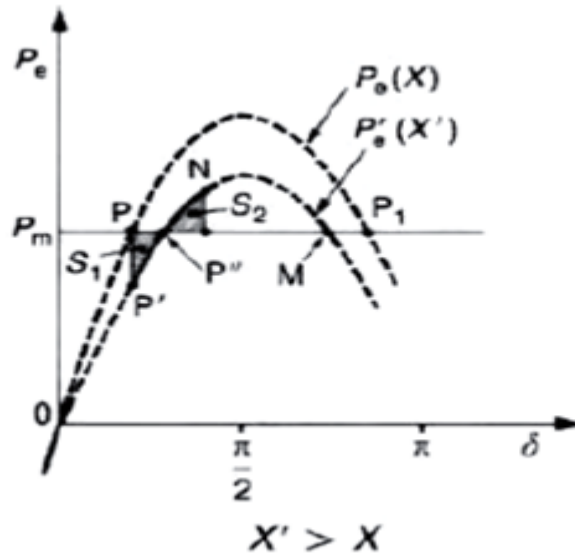


Figure I.7 : Perturbation du fonctionnement d'un alternateur correspondant à une brusque variation de l'impédance de liaison [BO-PA]

On retrouvera donc un point de fonctionnement stable en régime établi si S_1 est inférieur à l'aire $P''NM$ compris entre P_m et P'_e .

La **limite de stabilité transitoire** dépend donc de différents paramètres :

- les caractéristiques du groupe (caractéristiques électriques de l'alternateur, temps de lancer, réponse de l'ensemble système d'excitation et régulation de tension et réponse de la régulation de vitesse...).
- les impédances de liaison entre les machines.
- le type et la durée des défauts.
- l'état initial des machines (par exemple l'absorption de puissance réactive est un facteur défavorable).
- le plan de tension du réseau.

I.3. Notion d'énergie électrique :

I.3.1. Puissance active, réactive et apparente : [GA-06]

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

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

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

- Composantes active et réactive du courant :

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

Le courant apparent (I_t) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel. Ces courants se composent alors vectoriellement comme représenté à la figure I.8 :

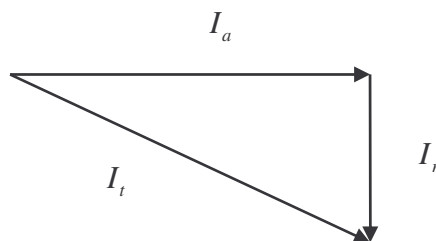


Figure I.8 : Composition vectorielle des courants

$$I_t = \sqrt{I_\alpha^2 + I_r^2} \quad [\text{I-05}]$$

$$I_\alpha = I \cdot \cos \varphi \quad [\text{I-06}]$$

$$I_r = I_t \cdot \sin \varphi \quad [\text{I-07}]$$

-Composantes active et réactive de la puissance :

Le diagramme précédent (figure I.8) établi pour les courants est aussi valable pour les puissances, en multipliant chacun des courants par la tension commune U. On définit ainsi la (figure I-9) où :

La Puissance apparente: $S = U \cdot I$ (kVA) [I-08]

La Puissance active : $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (kW) [I-09]

La Puissance réactive : $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ (kvar) [I-10]

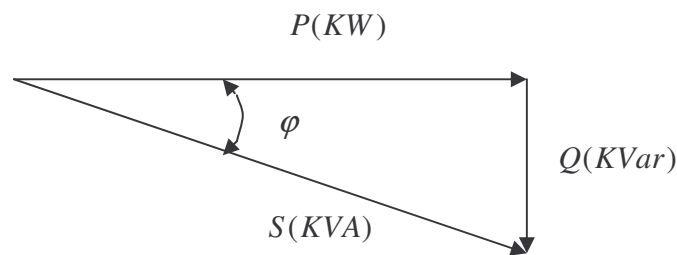


Figure I.9: composition vectorielle des puissances.

I.3.2. Puissance dans un récepteur monophasé :

Sur la figure I.10 on a représenté un récepteur monophasé soumis à une tension alternative v et dans lequel circule un courant alternatif i . φ est le déphasage entre la tension et le courant.

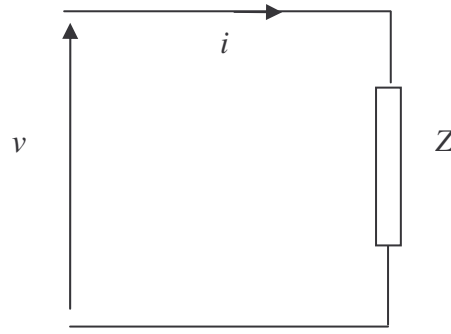


Figure I.10 : Récepteur monophasé.

$$v = V\sqrt{2} \sin \omega t \quad [\text{I-11}]$$

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

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

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

$$p = v.i \quad [\text{I-13}]$$

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

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

Après développement à l'aide de relations trigonométriques, 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 comportant 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 l'origine de pertes et de chutes de tension. En régime sinusoïdal, les puissances réactives produites et consommées se conservent au même titre que la puissance active.

En ce qui concerne la puissance apparente, elle est surtout utilisée pour le dimensionnement des appareils et des machines. Contrairement aux puissances active et réactive, la puissance apparente ne se conserve pas. [GA-06]

I.3.3. Puissance dans un récepteur triphasé :

Sur la (figure I.11) on a représenté un récepteur triphasé symétrique qui est alimenté par un système de tensions triphasées équilibrées.

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 :

$$P = 3VI \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad [\text{I-16}]$$

avec $U = \sqrt{3}V$: tension composée. [I-17]

- **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 :

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad [\text{I-18}]$$

$$Q = 3VI \sin \varphi \quad (\text{Soit 3 fois la puissance d'une phase}). \quad [\text{I-19}]$$

- **Puissance apparente** : À partir des autres puissances déjà vues on définit cette troisième puissance d'expression :

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{I-20}]$$

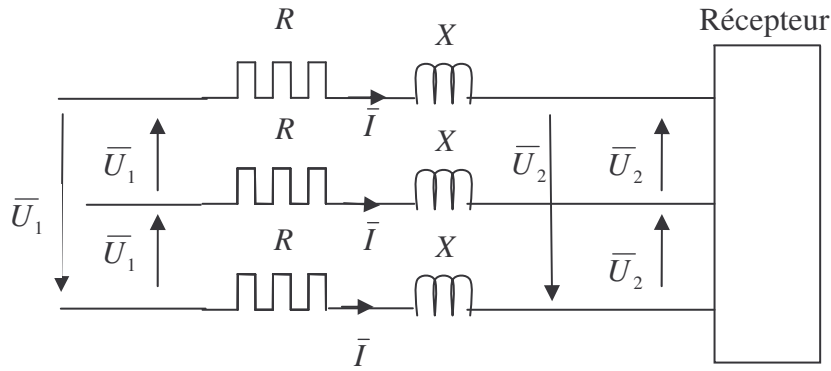


Figure I.11: Élément de réseau triphasé

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

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

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

[Tableau I.1]

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

La résistance pure n'absorbe pas d'énergie réactive alors que par définition, l'inductance absorbe l'énergie réactive et la capacitance en fournit.

I.3.4. Facteur de puissance :

Le facteur de puissance est donné par l'expression suivante :

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{Puissance active}}{\text{Puissance apparente}} \quad [\text{I-21}]$$

$$Fp = \frac{P(\text{KW})}{S(\text{kVA})} \quad [\text{I-22}]$$

IL met en évidence la part utilisable de la puissance installée.

Dans le cas où les courant et tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal à $\cos \varphi$.

I.4. Effet de la circulation de la puissance réactive :

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

I.4.1. Pertes joule :

Pour déterminer les pertes joule (P_j) engendrée par le transit d'une puissance réactive Q , on se propose d'étudier le réseau monophasé figurant sur le schéma de la figure I.12.

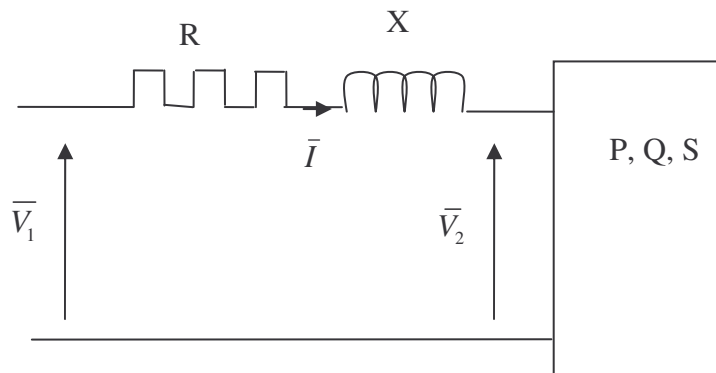


Figure I.12: Réseau monophasé. [BO-PA]

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

Le courant qui traverse le réseau est de valeur efficace I, égal :

$$I = \frac{S}{V_2} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V_2} \quad [\text{I-23}]$$

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

S : Puissance apparente consommée par le récepteur.

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

$$P_j = R.I^2 = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{V_2^2} \quad [\text{I-24}]$$

$$P_j = \frac{RP^2}{V_2^2} + \frac{RP^2.tg^2\varphi}{V_2^2} \quad [\text{I-25}]$$

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

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

$$P_j = 3.R.I^2 \quad [\text{I-26}]$$

En remplaçant la valeur efficace de courant par :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_2} \quad [\text{I-27}]$$

On obtient alors:

$$P_j = 3.R.\left(\frac{S}{\sqrt{3}U_2}\right)^2 = \frac{3.R.(P^2 + Q^2)}{3.U_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{U_2^2} \quad [\text{I-28}]$$

$$P_j = \frac{RP^2}{U_2^2} + \frac{RP^2.tg^2\varphi}{U_2^2} \quad [\text{I-29}]$$

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

Visiblement, le transit 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.

I.4.2.Chute de tension :

Considérant la figure I.13 qui représente de manière très simplifiée le schéma équivalent d'une ligne de transmission, d'impédance complexe $\underline{Z} = R + jX$, destinée à alimenter la charge $\underline{Z}_C$. La tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad [I-30]$$

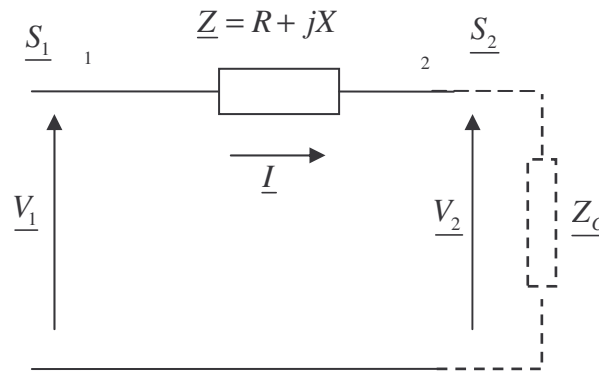


Figure I.13: Schéma équivalent d'une ligne de transport. [BO-PA]

Les puissances apparentes :

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 \quad [I-31]$$

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad [I-32]$$

La relation qui relie les tensions et donnée par :

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_2 + R.\underline{I} + jX.\underline{I} \quad [I-33]$$

Le diagramme vectoriel des tensions est représenté sur la figure I.14:

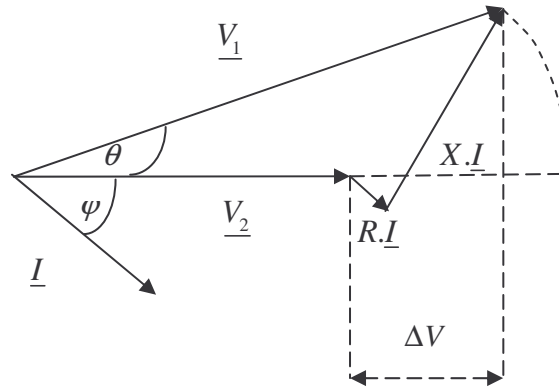


Figure I.14. Diagramme vectoriel des tensions [BO-PA]

Si le réseau n'est pas trop chargé l'angle de transport θ étant petit (réseau peu chargé), le diagramme des tensions conduit à assimiler la chute de tension ΔV à :

$$\Delta V = V_1 \cos \theta - V_2 \quad [\text{I-34}]$$

Si φ désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité réceptrice 2, on peut écrire, pour un réseau monophasé

$$\Delta V = R.I \cos \varphi + X.I \sin \varphi \quad [\text{I-35}]$$

$$\Delta V = R.I \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + X.I \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi \quad [\text{I-36}]$$

$$\Delta V = \frac{R.P_2 + X.Q_2}{V_2} \quad [\text{I-37}]$$

Soit, pour un réseau triphasé et on notant U la tension composée correspondant à V , P et Q les transits triphasé :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2} \quad [\text{I-38}]$$

Pour les lignes de transport THT ou HT, nous pouvons admettre que $R \ll X$ ($R \rightarrow 0$).

L'écart de tension entre deux points du réseau sera réduit à :

$$\Delta U = \frac{X.Q}{U} \quad [\text{I-39}]$$

Cette relation illustre le fait que ce sont les transits de puissances réactives qui sont à l'origine des plus importantes chutes de tension. Et-cela n'arrange pas les investisseurs étant

donné que le courant admissible traversant le réseau est limité par les échauffements thermiques, tout transit de puissance réactive conduira à une diminution du transport de la puissance active. Pour satisfaire une même consommation de puissance réactive, il faut donc augmenter la capacité des matériaux utilisés ou leur nombre, ce qui conduira inévitablement à une augmentation des investissements. [BO-PA]

I.5. Les compensateurs traditionnelles :

I.5.1. les batteries de condensateurs :

La batterie de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans les réseaux 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. On distingue deux types de matériels :

-Batteries de condensateurs HT :

Raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT; leur rôle essentiel est compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT, mais une partie d'entre elles participent également à la compensation des charges; leur puissance est de l'ordre de 20 à 30 MVar et représente environ 20% du parc de condensateurs installés.

-Batteries de condensateurs MT :

Raccordées aux jeux de barres HT/MT des postes HT/MT ou THT/MT; leur rôle principal est de compenser l'appel total de l'énergie réactive fait par les réseaux de distribution aux réseaux de transport ; en fonction du réglage de la tension de la MT, leur installation et dimensionnement sont faits individuellement pour chaque cas. En pratique, les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins de 2,4 ou 3 MVar, chaque gradin à sa propre commande et l'ensemble dépend de la puissance des transformateurs HT/MT auxquels ils sont raccordés. Le dimensionnement de la taille des gradins est fait de manière à limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barres MT au moment de la manœuvre d'un gradin. Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt. En ce qui suit nous allons donner ces deux types d'installation :

A. Le condensateur série :

La compensation série permet d'ajouter une chute de tension capacitive qui s'oppose à la chute de tension inductive de la ligne. En aval du condensateur, la tension de la ligne est supérieure à la tension en amont.

Pour une puissance transitée donnée, le courant sera donc plus faible et les pertes par effet Joule réduites.

La figure I.15 représente le schéma équivalent d'un condensateur monté en série sur une ligne.

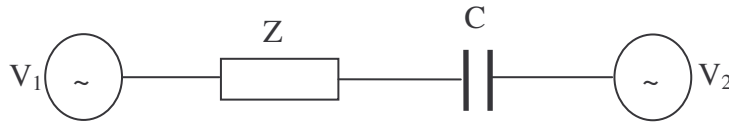


Figure I.15 : schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne.

Les condensateurs série peuvent être placés à différents endroits de la ligne (milieu, tiers, postes d'extrémité, . . .). La figure I.16 montre par exemple le profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation en son centre. On voit que la compensation réduit la chute de tension.

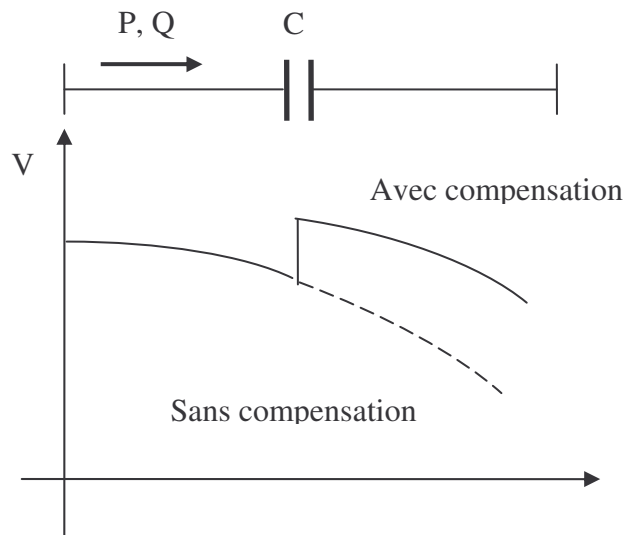


Figure I.16: profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation.

Les inconvénients possibles de la compensation série sont:

- des protections de réseau plus complexes;
- Le risque de résonance subsynchrone. La mise en série du condensateur avec l'inductance de la ligne forme un circuit résonant série. Pour les taux usuels de compensation, ce circuit a une fréquence naturelle inférieure à 50 Hz, dite *subsynchrone*. Usuellement les courants correspondants s'amortissent rapidement. Par contre une situation dangereuse est celle où un arbre d'alternateur situé à proximité a une fréquence d'oscillation torsionnaire proche. Ce phénomène est appelé *résonance subsynchrone*. Son analyse requiert une représentation des transitoires électromagnétiques dans le réseau et dans les machines synchrones.

B. Le condensateur shunt :

Il permet de compenser les énergies réactives consommées par les clients et d'optimiser le courant en amont de la charge. Il est possible de faire transiter une puissance active plus importante sur une même installation.

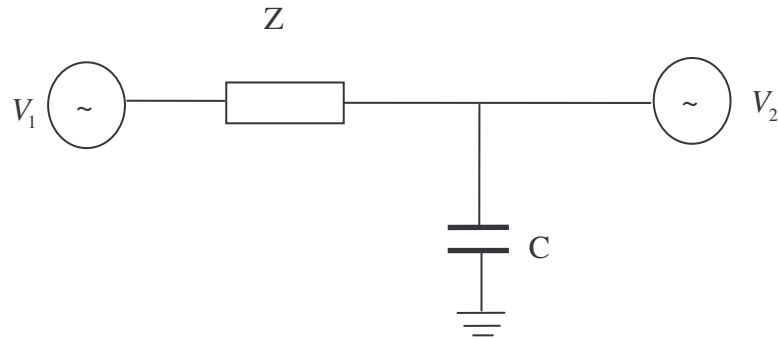


Figure I.17 : schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne

Il est nécessaire de s'assurer, qu'en cas de défaut de fonctionnement de la batterie de condensateurs, les protections interviendront pour ne pas surcharger l'installation

L'ajout d'une batterie de condensateurs shunt permet de réduire le courant qui circule dans les lignes.

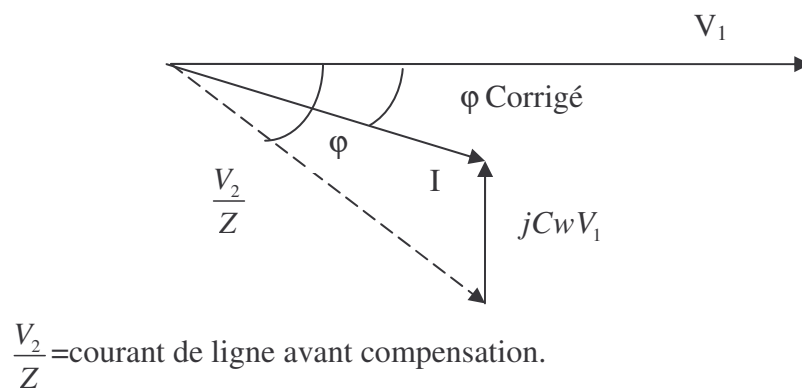


Figure I.18 : Diagramme des courants et Tensions d'un compensateur shunt

Le courant circulant dans la ligne est plus faible, les pertes Joule sont donc réduites.

C. Raccordement des condensateurs au réseau :

La figure I.19 représente le schéma de branchement d'un condensateur série à travers des disjoncteurs. P étant un parafoudre pour assurer la protection et le transformateur TT permet la mise à la terre des charges partielles après le débranchement du condensateur

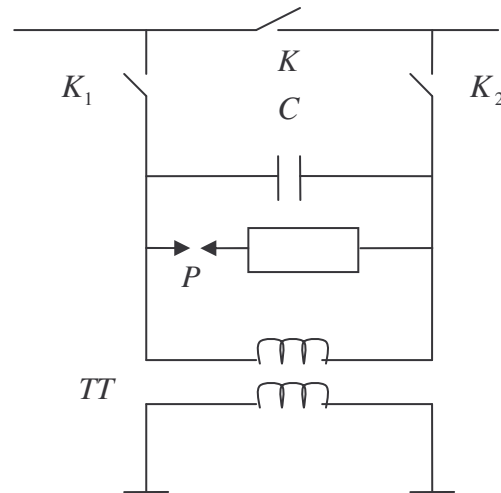


Figure I.19: Schéma de branchement d'un condensateur série.

Les condensateurs shunt sont habituellement couplés en triangle avant d'être raccordés au réseau. Le choix du système triangle est fait pour des raisons économiques ; la puissance produite par des condensateurs en triangle (Q_{Δ}) est trois fois plus importante que la puissance produite par les mêmes condensateurs couplées en étoile ($\frac{Q_{\Delta}}{3} = Q_Y$). La (figure I.20) représente un gradin de condensateurs couplés en triangle sur une ligne triphasée :

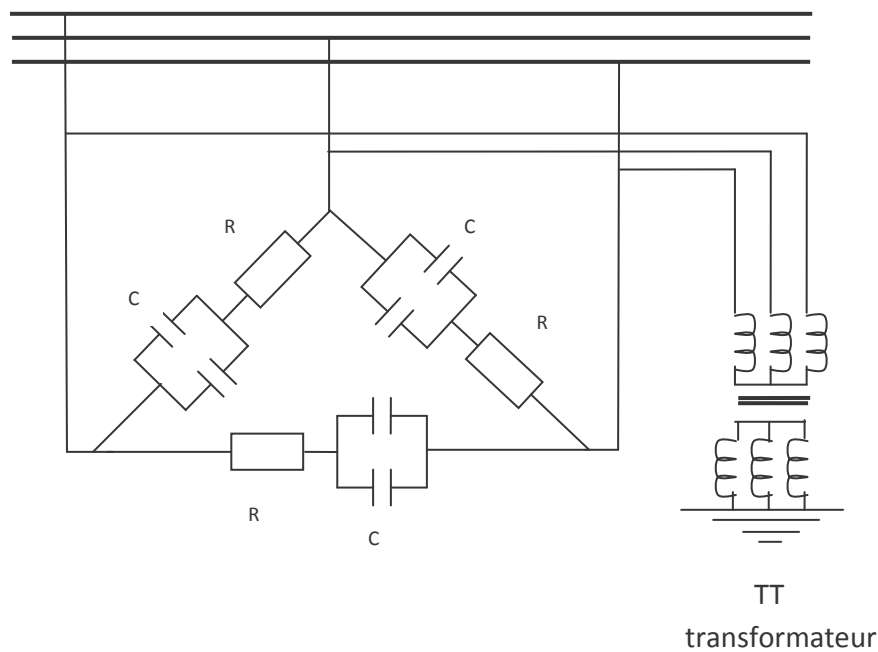


Figure I.20: Schéma de couplage de condensateurs shunt.

En cas de claquage d'un condensateur sur la (figure I.20), la résistance R connectée en série, permet d'éviter le court-circuit des autres condensateurs.

-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.

-Désavantage des batteries de condensateurs :

Les inconvénients que présentent les batteries de condensateurs peuvent être résumés

Comme suite :

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

I.4.2.le compensateur synchrone :

Le compensateur synchrone est un moteur synchrone qui tourne à vide et dont l'excitation est réglable. Ce compensateur se comporte comme une capacité en générant de la puissance réactive (en régime sur-excité) et en bobine en absorbant de la puissance réactive (en régime sous-excité). Donc le fonctionnement du compensateur synchrone dans l'un des régimes est du à la charge de la ligne. Si la ligne est au régime de surcharge celui-ci doit être surexcité et au régime de sous-charge, sous-excité.

D'après la théorie de Potier, le modèle simplifié d'une machine synchrone est représenté par une source de tension E en série avec une inductance X_d ($R \ll X_d$) (fig. I.21).

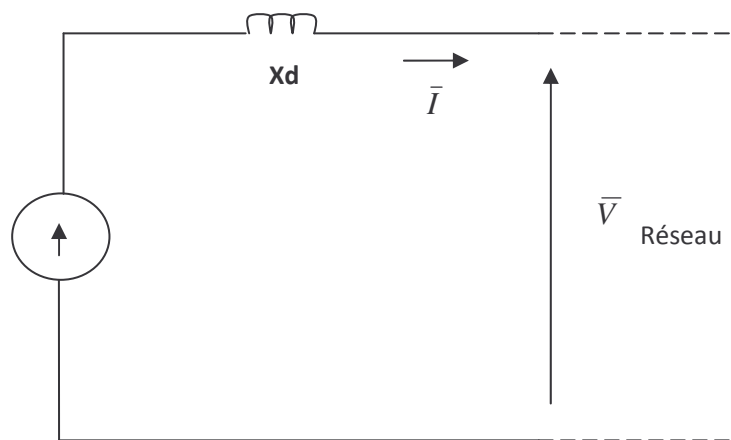


Figure. I.21: Schéma équivalent de la machine synchrone.

De la figure I.21, on tire l'équation des tensions suivante :

$$\bar{E} = \bar{V} + jX_d \bar{I} \quad [\text{I-40}]$$

Avec :

- E , f e m du 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 compensateur est :

$$P = 3VI \cos \varphi \quad [\text{I-41}]$$

La puissance réactive aussi est :

$$Q = 3VI \sin \varphi \quad [\text{I-42}]$$

La représentation vectorielle de l'équation [I-40] donne :

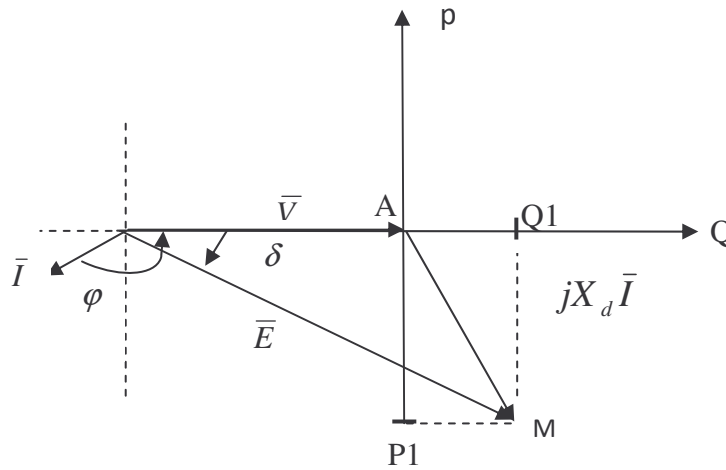


Figure : I.22: Représentation vectorielle des tensions du compensateur synchrone

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

$$AP_1 = X_d I \cos \varphi = E \sin \delta \quad [\text{I-43}]$$

$$[I-38] \Rightarrow I \cdot \cos \varphi = \frac{P}{3 \cdot V} = \frac{AP_1}{X_d} \quad [I-44]$$

$$\Rightarrow P = \frac{3 \cdot V}{X_d} \cdot AP_1 \quad [I-45]$$

En remplace AP_1 par $E \cdot \sin \delta$ à partir de [I-43], on trouve :

$$P = \frac{3 \cdot V}{X_d} \cdot E \sin \delta \quad [I-46]$$

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

$$AQ_1 = X_d I \sin \varphi = E \cos \delta - V \quad [I-47]$$

$$[I-42] \Rightarrow I \sin \varphi = \frac{Q}{3 \cdot V} = \frac{AQ_1}{X_d} \quad [I-48]$$

$$\Rightarrow Q = \frac{3 \cdot V}{X_d} \cdot AQ_1 \quad [I-49]$$

En remplaçant AQ_1 par $E \cos \delta - V$ à partir de [I-47], obtient:

$$Q = \frac{3EV}{X_d} \cos \delta - \frac{3V^2}{X_d} \quad [I-50]$$

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

$$P = 0 \Rightarrow Q = \frac{3 \cdot V \cdot (E - V)}{X_d} \quad [I-51]$$

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

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

Sous-excité, donc il absorbe de l'énergie réactive.

Le raccordement du compensateur synchrone au réseau se fait à travers un transformateur survolteur comme le montre la figure I.23 ; le compensateur est branché à côté de la charge pour réduire la portée du transit de la puissance réactive.

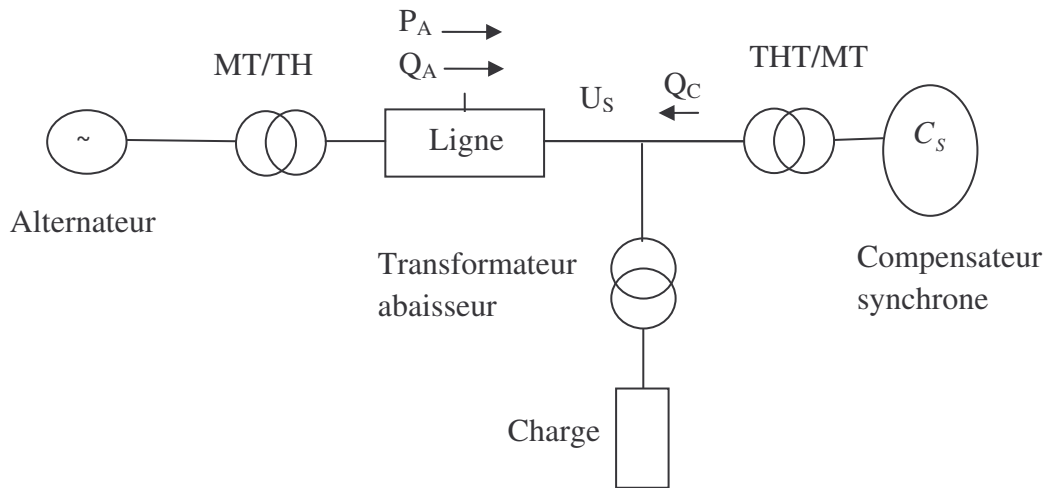


Figure I.23: Schéma de branchement du compensateur synchrone sur le réseau.

I.4.3. Les transformateurs déphaseurs (PST) :

Les transformateurs déphaseurs sont des machines statiques dont les caractéristiques constructives générales sont à quelques détails près identiques aux transformateurs classiques. Ils en possèdent donc toutes les qualités de fiabilité et rendement. De part leurs connexions internes, ils permettent d'obtenir un déphasage entre les tensions en entrée et en sortie. Un tel déphaseur est montré dans la figure I.24 :

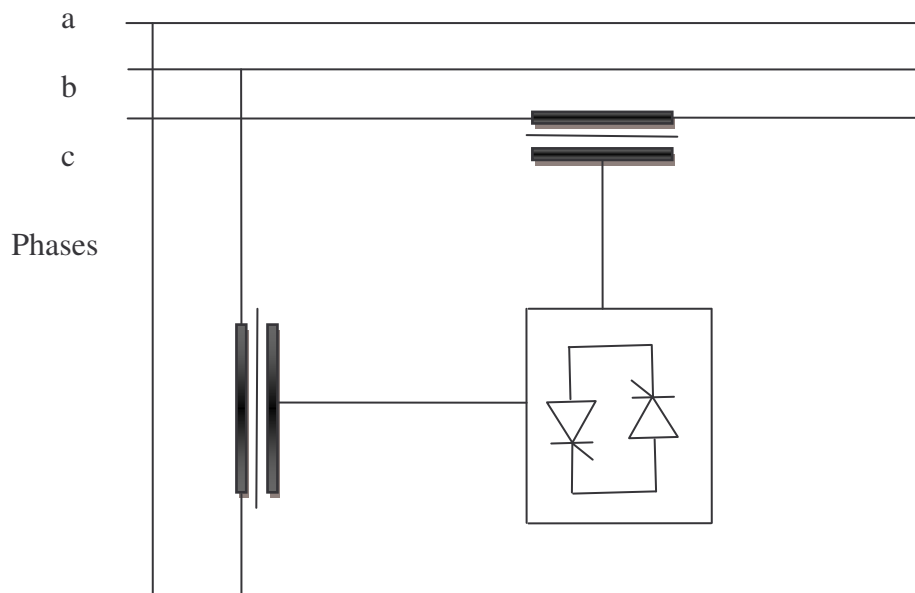


Figure I.24: schéma d'un transformateur déphaseur (PST).

Une autre application est la régulation du transfert de puissance entre deux réseaux indépendants.

Il faut noter que le comportement des transformateurs déphaseurs diffère sensiblement en fonction de la charge qui les traverse. En effet non seulement les transformateurs déphaseurs créent un angle de déphasage à vide qui génère une tension de nature à modifier le transfert de puissance, mais aussi ceux ci par construction ajoute une impédance au circuit.

En fonction du sens de déphasage ces deux phénomènes peuvent s'additionner pour produire un déphasage en charge supérieure à celui à vide ou se retrancher pour obtenir l'effet inverse.

Conclusion :

Les réseaux électriques subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de tenue de tension et toute manière un accroissement des pertes.

Les moyens classiques de contrôle des réseaux (batteries de condensateurs, moteurs synchrone ...etc.) pourront dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations de réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra donc, dans l'avenir, compléter leurs actions en mettant en œuvre des dispositifs d'électronique de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Système) pour le contrôle des réseaux.

*Chapitre II:
L'électronique de puissance*

Introduction:

L'électronique de puissance occupe actuellement une place de choix dans la conversion des énergies dans le monde et encore plus demain. Elle connaît d'énormes évolutions vu les recherches menées dans différents centres de recherches à travers le monde. De nouveaux matériaux de demain sont à promouvoir.

Un domaine d'application de l'électronique de puissance est le transport de l'énergie à haute tension(FACTS) et récemment dans les réseaux de distribution (power conditioner).

En 1981, EPRI (Electric Power Research Institute), a entrepris une recherche dans le domaine d'application des dispositifs de l'électronique de puissance à la compensation de l'énergie réactive et à l'amélioration de transit de puissance dans les réseaux de transport, ce qui a abouti à la naissance de nouveaux dispositifs à base d'électronique de puissance rangés sous l'acronyme(FACTS)

Dans la première partie de ce chapitre on donnera un bref aperçu sur les principaux composants de l'électronique de puissance existants (Thyristor, GTO, IGBT). Ensuite, on parlera du silicium qui est le premier matériau utilisé à l'heure actuelle en électronique de puissance. Avec l'évolution technologique, certains nouveaux matériaux sont apparus et sont envisagés de remplacer le silicium et qui sont encore en phase d'expérimentation seront cités (notamment le SIC et le diamant).

Enfin, on clos ce chapitre par la présentation du gradateur et de l'onduleur qui sont à la base de presque tous les convertisseurs; sont la base de presque tous les dispositifs FACTS.

II.1- Les composants d'électronique de puissance:

II.1.1- Thyristor:

C'est un composant de l'électronique de puissance dont la mise en conduction est contrôlée par un courant de gâchette.

- *Mise en conduction* :

Quand la tension anode(A)-cathode(K) est positive, le thyristor est dit polarisé en direct et devient, dans ce cas, passant si on envoie un courant à travers la gâchette(G).

- *Blocage* :

Le blocage ne peut pas se faire par la gâchette. L'arrêt de conduction du thyristor survient quand le courant qui le traverse s'annule.

Le thyristor travaille en fortes puissances mais sa fréquence d'utilisation est basse.

La figure II.1 représente le symbole du thyristor.

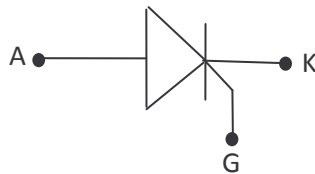


Figure II.1 : Symbole du thyristor [HI-00]

II.1.2- GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*):

Le GTO est un composant important de l'électronique de puissance dont la mise en conduction et le blocage sont commandés par la gâchette.

La figure II.2 représente un symbole d'un GTO.

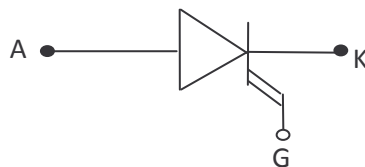


Figure II.2 : Symbole du GTO [HI-00]

- *Amorçage:*

Comme le thyristor classique, le GTO est mis en conduction par application d'un courant de gâchette quand la tension anode-cathode devient positive.

- *Blocage:*

Pour bloquer un GTO, il faut détourner la quasi-totalité du courant d'anode dans la gâchette. Une fois la séquence de blocage démarrée (par application d'une tension négative sur la gâchette), il ne faut en aucun cas l'arrêter avant qu'elle ne soit entièrement terminée (risque de casse du composant). Il y a donc un temps minimal de blocage (typiquement 100µs), ce qui est l'une des limitations en fréquence de commutation du GTO.

Le GTO est employé pour les applications concernant les fortes tensions (quelques kV) et les forts courants (quelques kA) et des fréquences de commutation allant de quelques centaines de Hz à 10kHz.

II.1.3- IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*):

De la famille des transistors, l'IGBT est né de l'association d'un MOS et d'un transistor bipolaire. Depuis les années 1990, c'est le composant le plus utilisé pour réaliser des convertisseurs fonctionnant avec des tensions de quelques centaines de volts à quelques kV.

L'IGBT, de part ses caractéristiques, est un composant avantageux pour les applications utilisant la commutation. Il est le composant le plus utilisé dans la moyenne puissance.

La figure II-3 représente le symbole de l'IGBT.

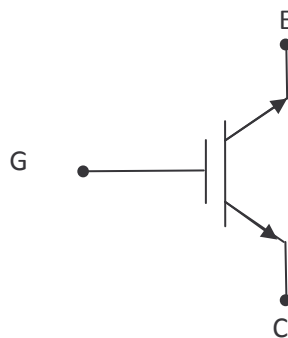


Figure II.3 : Symbole d'un IGBT [HI-00]

II.2- Avenir des semi-conducteurs dans l'électronique de puissance:

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité, intermédiaire entre celle des isolants et des conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux utilisés dans les composants de l'électronique de puissance, le plus utilisé est le silicium. Mais, ces dernières années, de nouveaux matériaux avec des propriétés plus intéressantes, sont apparus et pouvant certainement détrôner le silicium.

II.2.1- Le silicium [CI-05]:

De nos jours, le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé en électronique de puissance. De par ses qualités non négligeables de tenue en tension et de conductivité thermique, il occupe, depuis les années 50, la première place dans la réalisation des composants de l'électronique de puissance (Thyristors, GTO, IGBT,...etc.).

Pour les applications en haute tension, plusieurs composants à base de silicium peuvent être mis en série. Les composants en silicium permettent d'obtenir de très bonnes performances en basse tension (<1kV). En haute tension (>5kV), les pertes à l'état passant deviennent importantes, les dispositifs à base de silicium chauffent ce qui nécessite de gros systèmes de refroidissement.

Mais, vu ses limites intrinsèques, ces dernières années des recherches sont menées dans différents laboratoires pour promouvoir de nouveaux matériaux : le carbure de silicium (SiC) et le diamant, qui sont les plus en vue de succéder, dans un avenir proche, au silicium.

II.2.2 - Le carbure de silicium (SiC) [VA-07]:

Le SiC n'est pas un nouveau venu sur la scène des semi-conducteurs. En effet, le premier compte rendu sur ce matériau date de 1824. Les propriétés de ce matériau étaient alors inconnues.

L'association du silicium et du carbone offre de nouvelles perspectives pour améliorer les caractéristiques physiques obtenues avec du silicium seul. Employé depuis longtemps dans d'autres applications, ce composé possède une tension de tenue et une conductivité thermique plus élevées comparativement au silicium. Donc, il permet d'avoir des composants avec des tenues en tension plus grandes, de travailler à hautes températures et hautes fréquences de commutation. Tout cela permet de réduire les pertes lors des commutations et de réduire le système de refroidissement.

De nos jours, certains composants expérimentaux à base de SiC sont mis au point et testés dans les laboratoires et ont donné de bons résultats.

I.2.3- Le diamant [OR-05] :

Outre ses propriétés optiques, mécaniques et thermiques bien connues, le diamant possède des propriétés électroniques exceptionnelles. Une large bande interdite, une très haute fréquence de commutation et une densité de courant 5 à 10 fois plus grande que celle des composants actuels. La combinaison de ces propriétés fait du diamant un candidat idéal pour la fabrication de composants d'électronique de puissance

Grâce aux propriétés intrinsèques du diamant, les chercheurs commencent à s'intéresser à son application large dans les composants de l'électronique de puissance.

Le diamant reste dans le domaine de la recherche pour son application en électronique de puissance, sa vulgarisation ne pourra survenir que d'ici une dizaine d'année quand on pourra maîtriser sa technologie quant à son utilisation dans ce domaine.

II.3- Convertisseurs d'électronique de puissance :

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

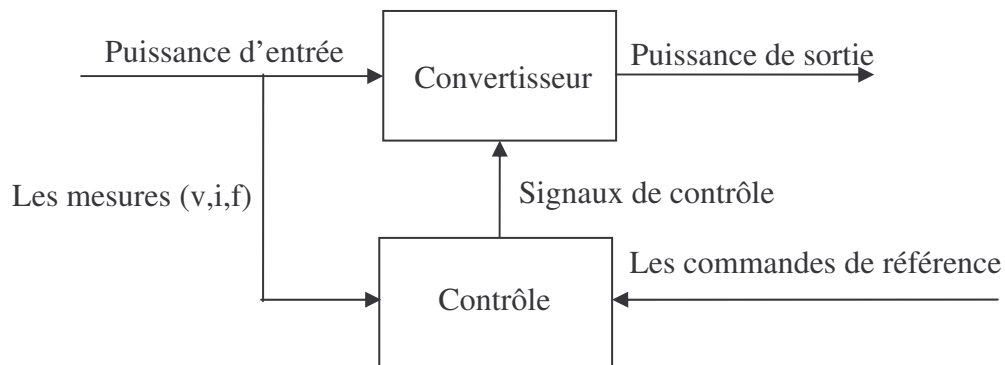


Figure II-4 : Diagramme de fonctionnement des convertisseurs [OR-05]

II.3.1- Le gradateur:

II.3.1.1- Gradateur monophasé:

Le schéma de montage de la figure II-5 représente le schéma d'un gradateur monophasé représenté par une tension alternative sinusoïdale fixe v reliée à l'impédance Z par l'intermédiaire de deux thyristors montés en tête-bêche. V_L est la tension alternative variable obtenue aux bornes de l'impédance.

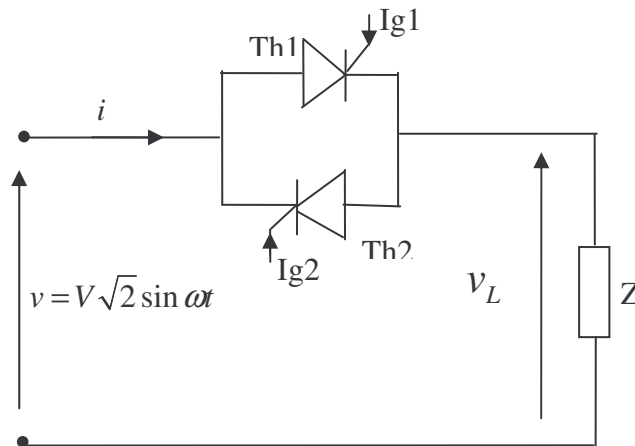


Figure II.5 : Schéma de montage d'un gradateur monophasé [AN-09]

Pour une impédance :

$$Z = R + jX_L$$

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

- Débit sur charge inductive pure :

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

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

Quand l'un des thyristors conduit:

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

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

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

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

Où A est une constante qu'on détermine à partir de la condition $i(\omega t = \alpha) = 0$:

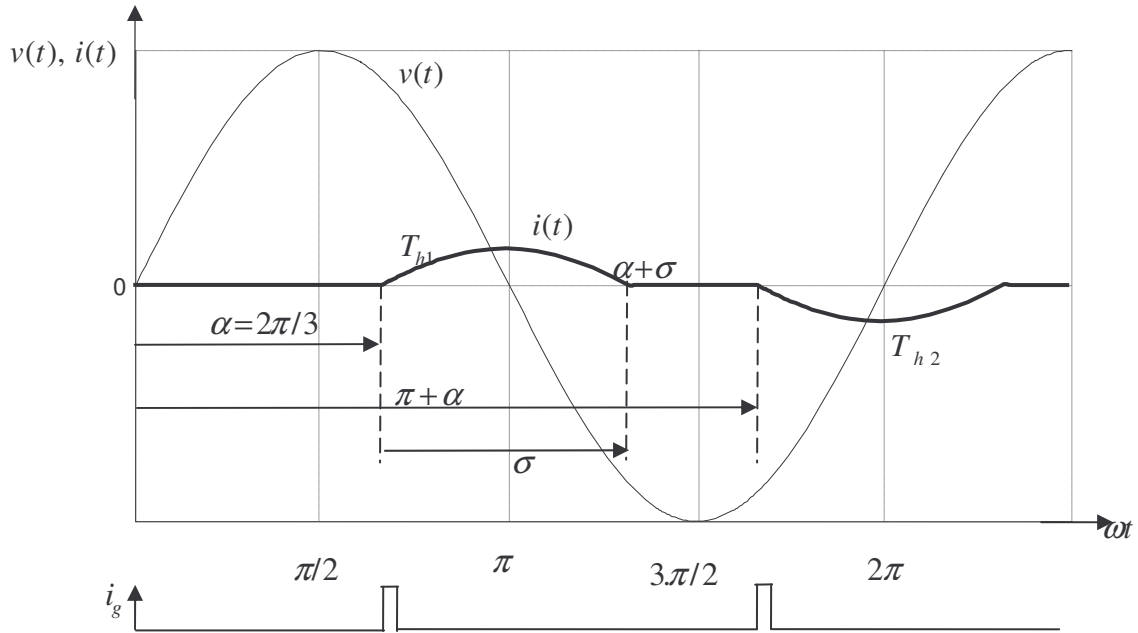
$$A = \frac{\sqrt{2}V}{L\omega} \cos(\alpha) \quad [\text{II.4}]$$

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

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

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

La figure II-6 représente les formes d'ondes de tension et du courant de source du gradateur pour un angle d'amorçage : $\alpha > \pi/2$.


 Figure II.6 : Allures de la tension et du courant d'un gradateur monophasé pour $\alpha > \pi/2$ [AN-09]

Pour obtenir la forme d'onde de courant symétrique par rapport à π avec alternance de séquences positives et négatives comme sur la figure II.6, il faut amorcer les thyristors à un angle α tel que : $\alpha > \varphi$. (Pour une inductance pure, $\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \alpha \geq \frac{\pi}{2}$).

Les deux thyristors mis en antiparallèle agissent comme des interrupteurs bidirectionnels ; ils conduisent chacun une demi-période: T1 pour la demi-période positive et T2 pour la demi-période négative.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

II.3.1.2- Gradateur triphasé:

Il existe trois types de montages:

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

Ce type de gradateur nécessite six thyristors par groupe de deux pour chaque phase.

La source et le récepteur sont montés en étoile et à neutres reliés à la terre.

La figure II-7 représente le montage de ce type de gradateur.

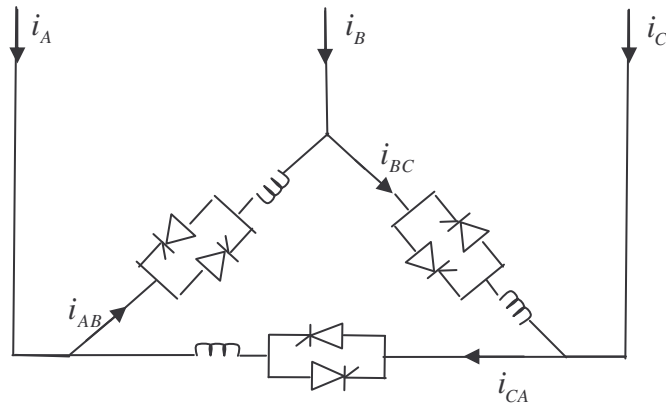


Figure II-7 : Schéma de montage d'un gradateur triphasé en triangle [MA-02]

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

Les figures II-8 montrent les formes d'onde des courants de lignes et du courant de phase d'un gradateur triphasé couplé en triangle.

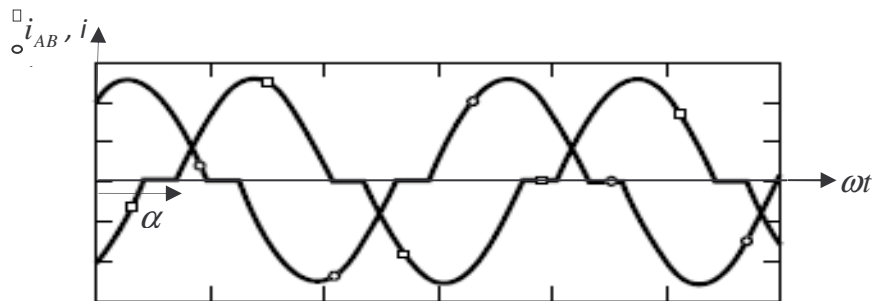


Figure II-8-a-Allure des courants de phases pour $\alpha = 105^\circ$ [MA-02].

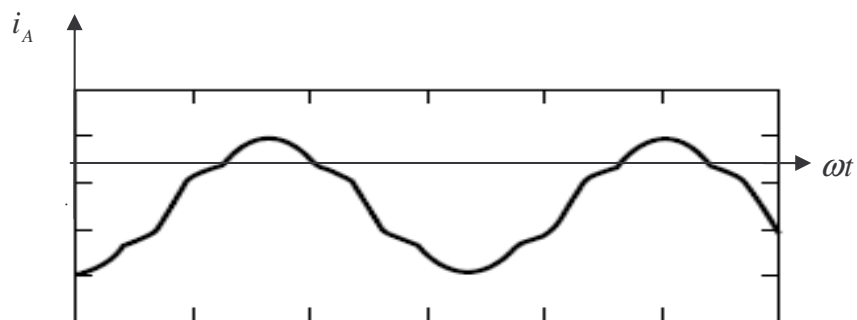


Figure II-8-b- Allure du courant de ligne pour $\alpha = 105^\circ$ [MA-02].

II.3.2- L'onduleur:

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif. Son principe de fonctionnement est qu'à partir d'une tension continue on obtient en sortie des tensions alternatives. Il existe deux types d'onduleurs:

- Onduleur autonome.
- Onduleur non autonome ou assisté.

Les onduleurs autonomes (ou oscillateurs) qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée

Pour les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle .elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternative du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre.

On va se limiter à l'étude de l'onduleur autonome.

III.3.2.1-Onduleur monophasé:

La figure II-9 représente un onduleur monophasé en pont constitué de deux ensembles transistor-diode, d'une source de tension continue, de deux bras constitués chacun par deux IGBT en série et de deux diodes.

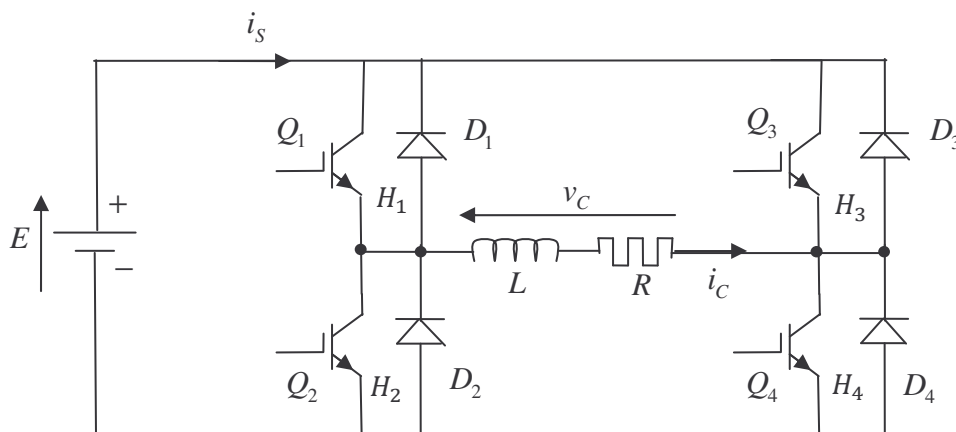


Figure II-9 : Schéma de montage d'un onduleur monophasé en pont [AN-09].

- Si on ferme H_1 et H_4 alors : $v_C = E$

- Si on ferme H_2 et H_3 alors : $v_C = -E$

Etant donné que le courant ne peut subir de discontinuité en présence d'une inductance, le circuit est muni de diodes de récupération, de telle sorte que, lors de la commutation des interrupteurs, elles assurent la réversibilité du courant :

-si le courant i_c est positif $\Rightarrow$ passage par Q_2 et Q_3
 -si i_c est négatif $\Rightarrow$ passage par D_1 et D_4

} H_1 et H_4 fermés.

-si le courant i_c est positif $\Rightarrow$ passage par D_2 et D_3
 -si i_c est négatif $\Rightarrow$ passage par Q_1 et Q_4

} H_2 et H_3 fermés.

La figure II-10 représente l'allure de la tension et du courant de charge aux bornes d'un onduleur commandé en créneaux.

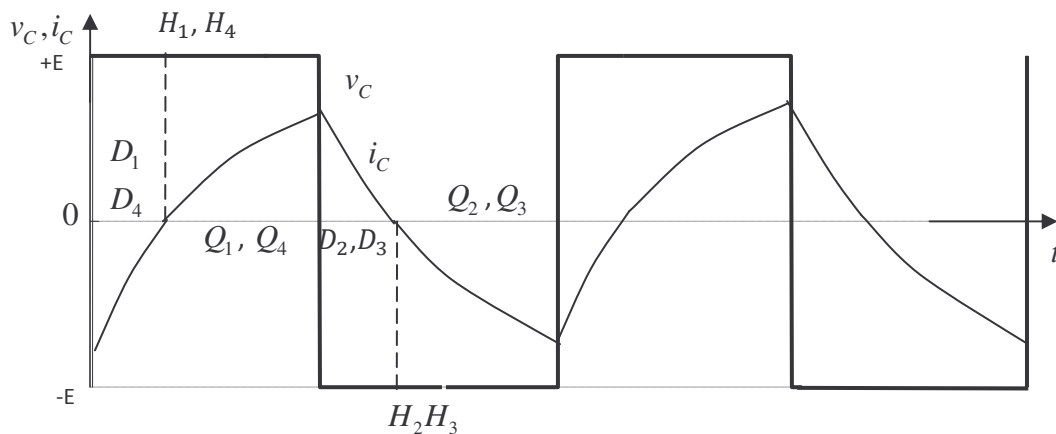


Figure II-10 : Tension et courant de charge à la sortie d'un onduleur en pont [AN-09].

A partir de l'onduleur en pont qui nous permet d'obtenir une tension alternative formée de créneaux rectangulaires de période et de largeur réglables, on peut en combinant plusieurs signaux obtenir une tension alternative proche de la sinusoïde et ainsi avec un taux d'harmoniques réduit.

La commande décalée (utilité de β) :

β est l'angle de commande. la figure II.11 représente la commande décalée d'un onduleur monophasé en pont.

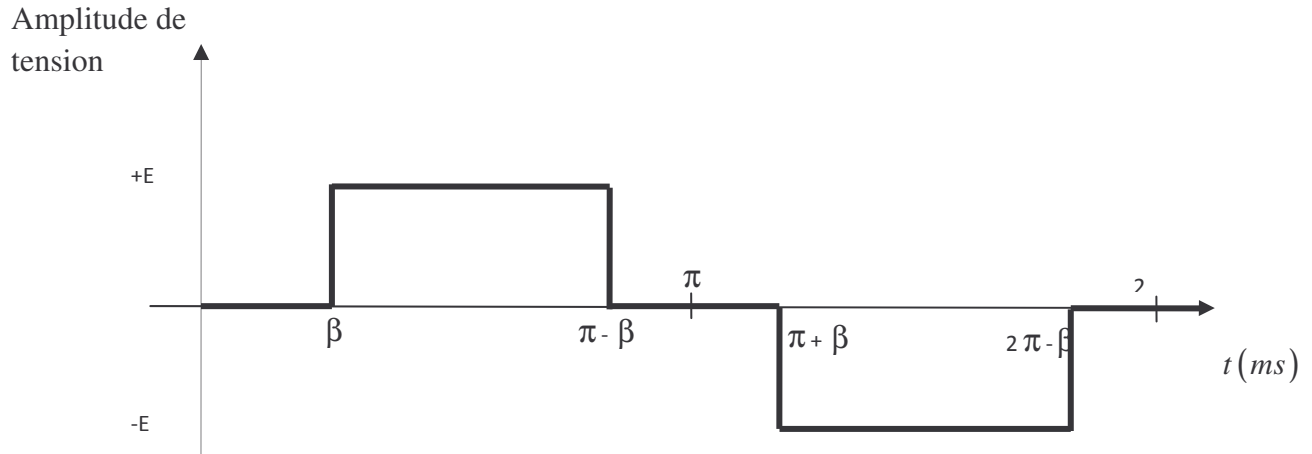


Figure II-11 : la commande décalée d'un onduleur monophasé en pont. [PI-06]

Le THD dépend de l'angle de commande β . Pour $\beta = 23^\circ$, sa valeur minimum est de 29%. Comme la montre la figure II-12.

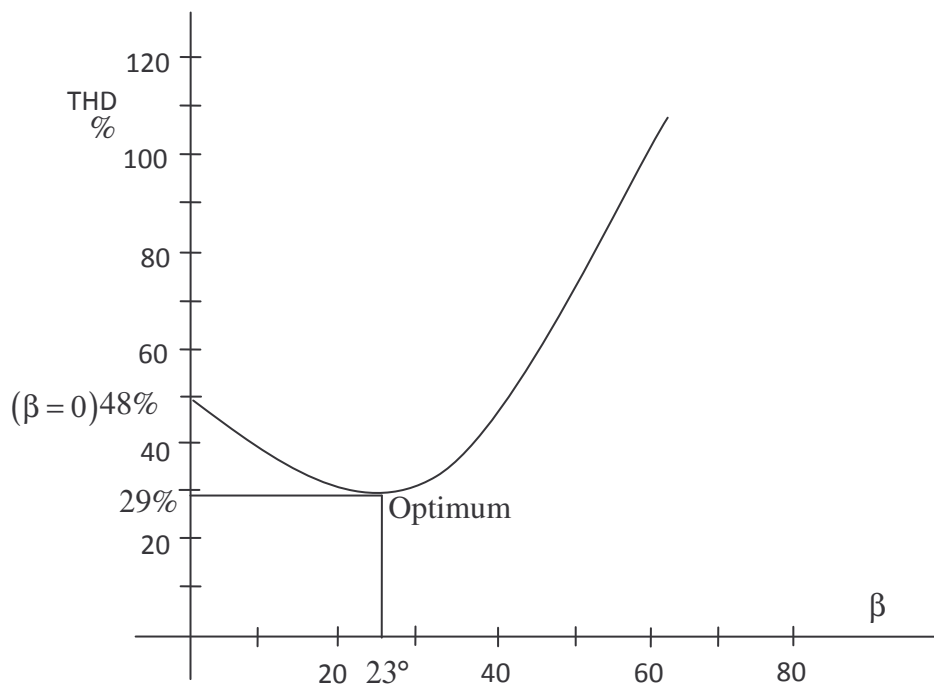


Figure II-12 : le THD en fonction de l'angle de commande β [PI-06]

Comme : $V_{eff}^2 = V_{1eff}^2 + V_{2eff}^2 + V_{3eff}^2 + \dots etc$ [II.14]

Il vient : $THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{neff}^2}}{V_{1eff}^2} = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 - V_{1eff}^2}}{V_{1eff}^2}$ [II.15]

Sachant que : $V_{1eff} = E \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \beta$ et que : $V_{eff} = E \sqrt{1 - \frac{2\beta}{\pi}}$, [II.16]

On en déduit : $THD_{\%} = 100 \frac{\sqrt{\pi^2 - 2\pi\beta - 8\cos^2 \beta}}{2\sqrt{2}\cos \beta}$. [II.17]

La figure II-13 Montre un exemple d'addition de trois tensions d'amplitudes différentes grâce aux rapports des transformateurs, et de largeurs différentes, grâce aux angles β égaux respectivement à : 0 , $\pi/5$ et $\pi/3$

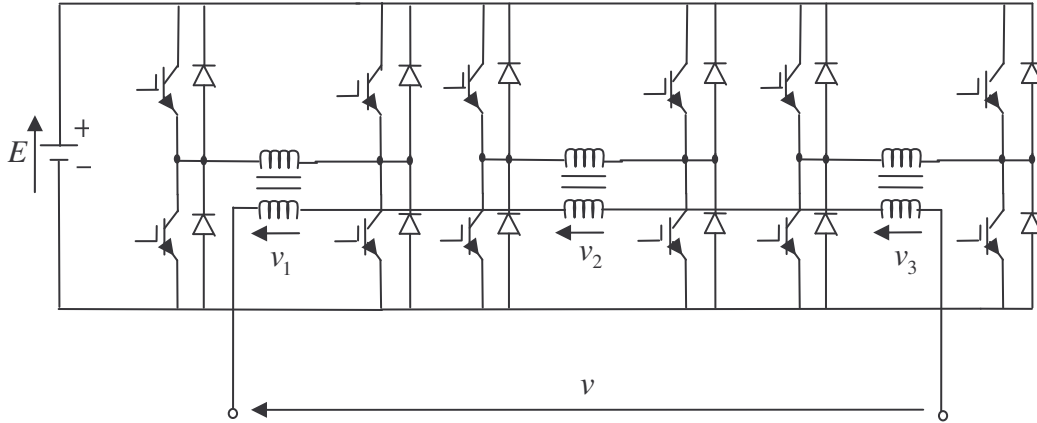


Figure II-13 Structure d'un onduleur polygonal [GU-83].

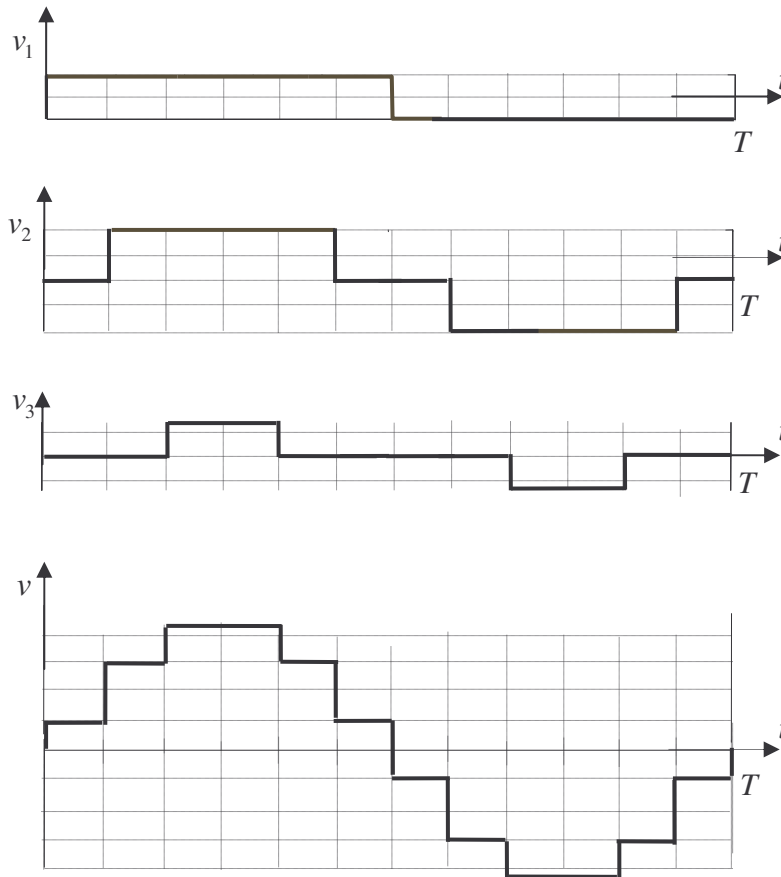


Figure II-14 Tensions recueillies à la sortie d'un onduleur polygonal [GU-83].

II.3.2.2- Onduleur triphasé multi-niveaux:

Dans le but d'obtenir une tension qui se rapproche le plus d'une tension sinusoïdale, on utilise un autre type d'onduleur appelé: onduleur multi-niveaux.

Son principe consiste en la mise en cascade de plusieurs onduleurs en pont.

Cette structure est faite pour pouvoir utiliser l'onduleur sous de grandes tensions dans les réseaux électriques et ainsi élargir son champ d'opération.

Avec ce type d'onduleur, on obtient une tension de sortie proche de la sinusoïde et avec moins d'harmoniques facilitant ainsi son filtrage. Généralement, on utilise la commande en marches d'escalier surtout quand la tension et la fréquence sont fixes; elle est simple à mettre en œuvre.

La figure II-15 montre la structure d'une phase d'un onduleur multi-niveaux en cascade.

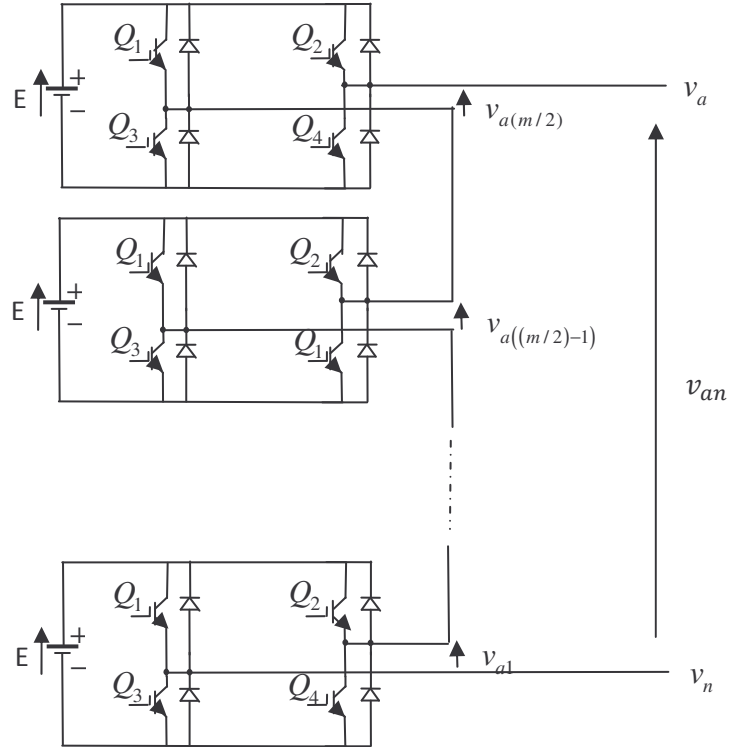


Figure II-15 : La structure d'une phase d'un onduleur multi-niveaux en cascade. [OR-05]

La tension de sortie d'une phase d'un tel onduleur vaut :

$$v_{an} = v_a + \dots + v_{a((m/2)-1)} + v_{a(m/2)} \quad [\text{II.18}]$$

$$m = 2S + 1 \text{ (Niveau)}$$

S : Nombre de sources de tension continue

La figure II-16 représente la tension obtenue à la sortie d'une phase d'un onduleur 5 niveaux.

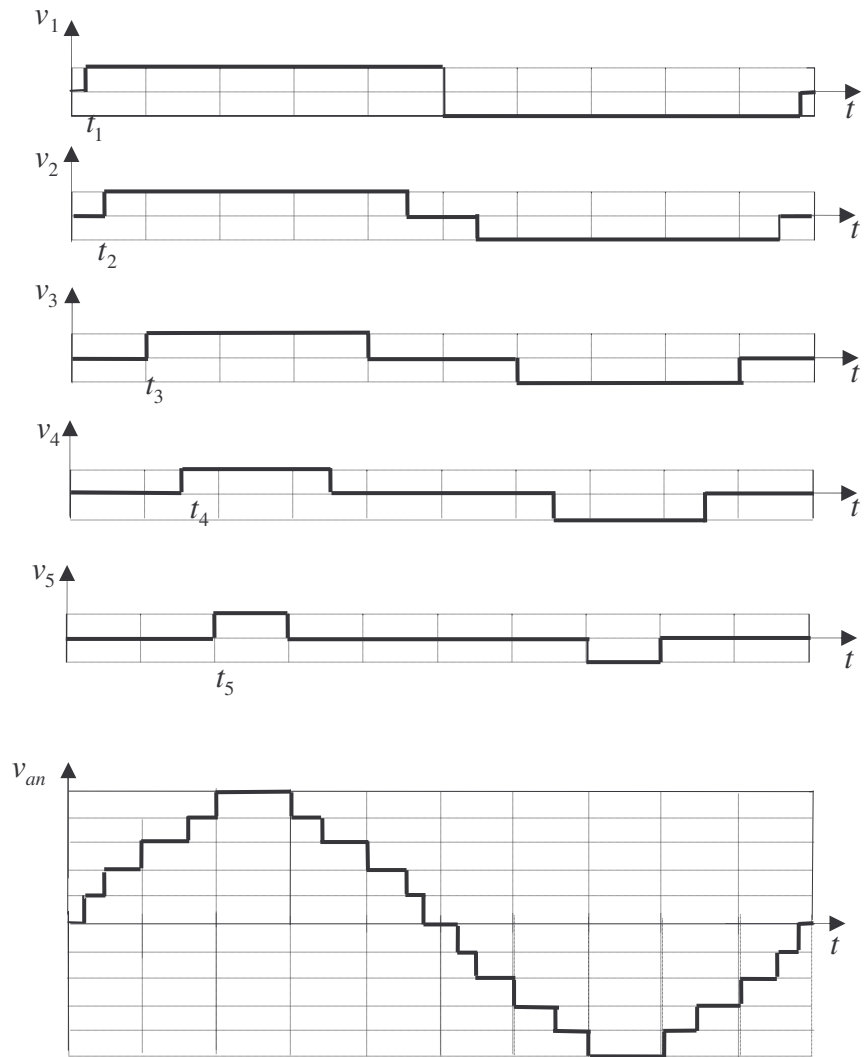


Figure II-16 : Tensions de sortie aux bornes d'un onduleur multi-niveaux [OR-05]

Conclusion :

L'électronique de puissance est en évolution constante pour ouvrir de nouvelles voies et rendre les convertisseurs plus performants en augmentant les puissances de travail, en minimisant les pertes et en augmentant les fréquences de commutation des composants de puissance. Cela se concrétise par des recherches sur de nouveaux matériaux semi-conducteurs qui peuvent atteindre ces performances recherchées.

Les onduleurs et les gradateurs induisent des harmoniques sur le réseau qui le polluent. Pour les éliminer, plusieurs techniques existent. Pour le gradateur, on utilise le couplage en triangle de trois gradateurs monophasés et obtenir ainsi un gradateur à 6 pulsation ou associer deux gradateurs à 6 pulsation pour obtenir un gradateur à 12 pulsations plus propres (contient les harmoniques de rang $12k \pm 1$) ce qui permet d'éliminer l'harmonique de rang 3 et ses multiples du réseau. Pour l'onduleur, on utilise plusieurs topologies parmi les quelles la mise en cascade de plusieurs onduleurs en pont ce qui permet d'obtenir une tension de sortie proche de la sinusoïde et avec moins d'harmoniques facilitant ainsi son filtrage.

Les FACTS ne sont que des convertisseurs travaillant sur de grandes puissances. Toute nouvelle avancée sur les semi-conducteurs ne peut être que bénéfique : plus de performance et plus d'économie.

Chapitre III :
Les dispositifs FACTS

Introduction:

Avec l'augmentation de la demande en énergie dans le monde, la construction de nouvelles lignes devient inévitable. Mais, face aux difficultés administratives et écologiques qui existent pour développer de nouveaux réseaux, les compagnies d'énergie exploitent les réseaux existants de plus en plus près des limites de sécurité. Alors, se tourner vers d'autres alternatives permettant de mieux les exploiter, sans en construire de nouvelles lignes, devient un choix stratégique et dicté par la nécessité.

Avec l'arrivée des dispositifs FACTS (flexible AC transmission system), les transits de puissances seront mieux contrôlés sur les réseaux de transport, ce qui se traduira par l'augmentation de la marge de stabilité. On ajoute à cela, leurs temps de réponse extrêmement courts qui les rend très efficaces pour l'amortissement des oscillations de puissances.

Ce chapitre a pour but de présenter la base de fonctionnement des principaux dispositifs FACTS employés dans les grands réseaux de transport, selon leurs différentes classifications : shunt, série et enfin combiné shunt-série.

III.1- Présentation du concept FACTS :

Les lignes électriques doivent transporter, en permanence, l'énergie active et réactive aux besoins du consommateur.

Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés il est nécessaire de compenser la puissance réactive sur des points bien définis du réseau. L'apparition d'équipements utilisant l'électronique de puissance revient vers la fin des années soixante 60. L'avantage de ces dispositifs est qu'ils permettent d'éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction lente. Leur développement devient essentiel. C'est pour cela qu'un consortium pour la recherche scientifique EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1989 aux Etats-Unis, le projet du concept FACTS (flexible AC transmission system). Il vise une recherche et un développement sur les dispositifs FACTS pour faire face aux besoins grandissants des consommateurs.

Les dispositifs FACTS se scindent en trois catégories:

- Les dispositifs FACTS shunt.
- Les dispositifs FACTS série.
- Les dispositifs FACTS hybrides.

III.1.1- Dispositifs FACTS Shunt:

Les dispositifs FACTS shunt comme leur nom l'indique se connectent en parallèle sur le réseau électrique via un transformateur de couplage. En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau à travers les points de raccordement. La connexion d'une impédance variable en parallèle sur le réseau électrique résulte en une consommation ou une injection d'un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne.

Parmi ces compensateurs parallèles on peut citer:

III.1.1.1- Compensateur statique de puissance réactive SVC (*Static Var Compensator*):

Le SVC est un dispositif de compensation shunt basé sur l'électronique de puissance ; il se compose essentiellement d'un **TSC** (*Thyristor Switched Capacitor*) et d'un **TCR** (*Thyristor Controlled Reactor*) en plus d'un filtre harmonique connectés en parallèle sur le nœud à travers un transformateur de couplage.

La figure III.1 montre le schéma de base d'un SVC connecté au réseau via un transformateur de couplage.

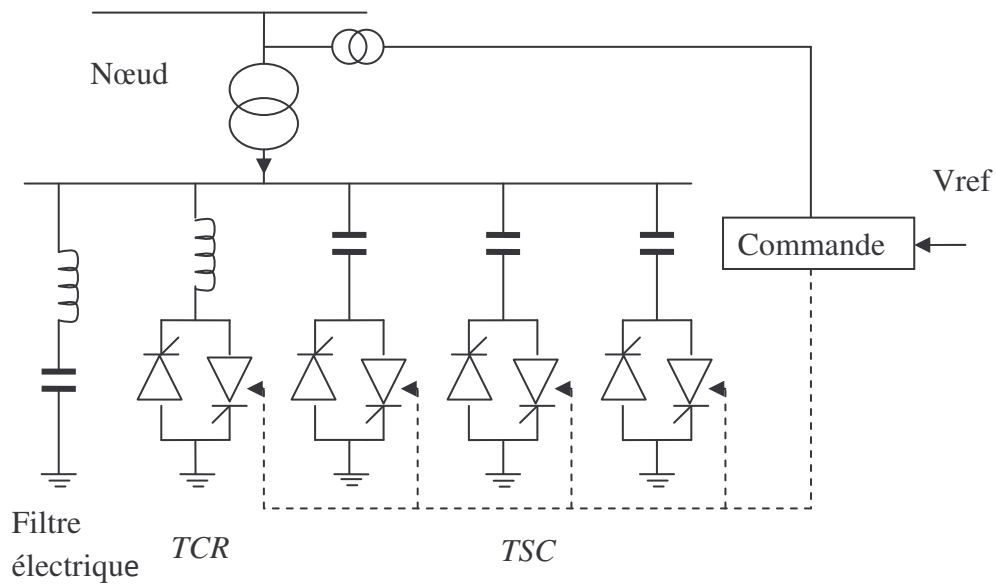


Figure III.1: Schéma de base d'un SVC [RI-98]

La commande compare à tout instant la tension réseau à la tension de référence, au besoin, un courant de gâchette est envoyé vers les thyristors et de là, elle peut mettre en service le TSC ou le TCR pour faire augmenter ou diminuer la tension sur le nœud.

Le SVC fait diminuer ou augmenter la tension du nœud en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive. On va, dans ce qui suit, se pencher sur ces deux modes de fonctionnement.

III.1.1.1.1- Reactance commandée par thyristors (TCR), (*Thyristor Controlled Reactor*):

Le TCR est obtenu par l'association d'une inductance en série avec deux thyristors en antiparallèle comme le montre la figure III.2.

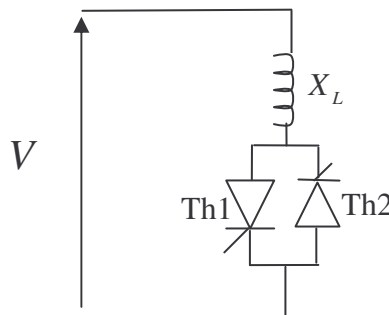


Figure III.2 : Réactance commandée par thyristors [RI-98].

Le TCR est un gradateur et comme ça été mentionné dans le second chapitre (équation II.9), la composante fondamentale de son courant est fonction de l'angle de conduction σ des thyristors. On rappelle que l'amplitude de ce fondamental est exprimée par :

$$I_1 = \frac{V}{\pi} \cdot \frac{\sigma - \sin(\sigma)}{X_L} \quad [\text{RI-98}] \quad [\text{III-1}]$$

A ce fondamental correspond une puissance réactive consommée:

$$Q_L = \frac{(\sigma - \sin \sigma)V^2}{\pi X_L} \quad [\text{RI-98}] \quad [\text{III-2}]$$

La valeur effective de la susceptance est donnée en fonction de l'angle d'amorçage α par la formule suivante:

$$B_L(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi X_L} \quad [\text{III-3}]$$

La figure III.3 représente la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage α

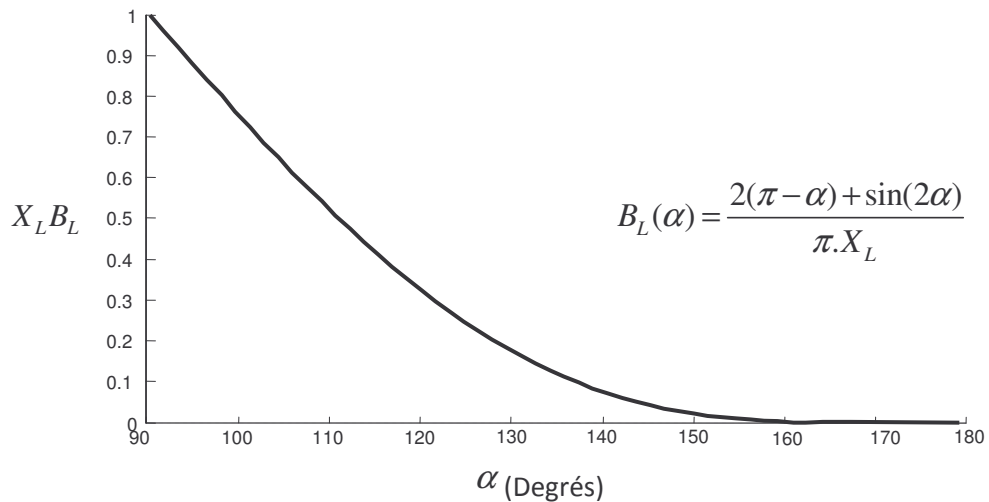


Figure III.3 : Variation de la susceptance du TCR en fonction de α [MA-02].

Cela nous permet de dire que l'augmentation de l'angle d'amorçage α a donc pour effet la diminution de la valeur effective de la susceptance du TCR.

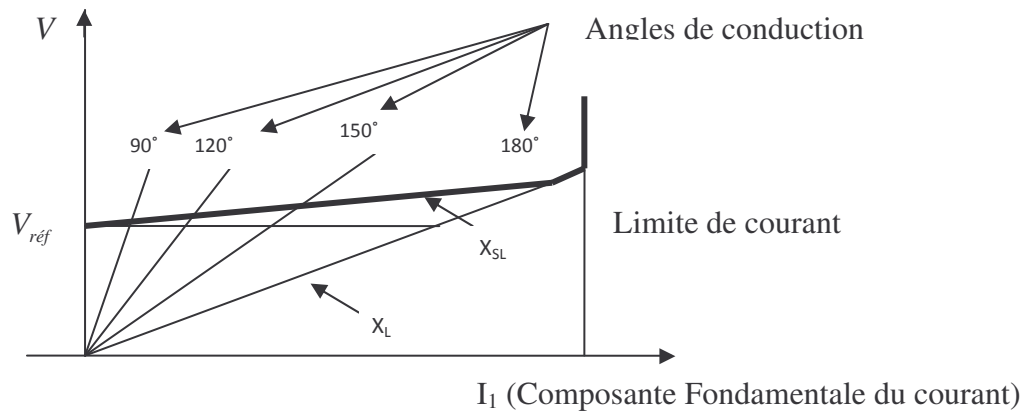


Figure III.4 : Caractéristique (V-I) du TCR. [RI-98]

La figure III.4 représente la caractéristique statique $V(I)$ du TCR tracée à partir de la formule suivante :

$$V = V_{réf} + X_{SL} \cdot I_1. \quad [III-4]$$

$V_{réf}$: Tension de référence du SVC.

I_1 : Courant du SVC.

X_{SL} Est la pente de la caractéristique (V-I) du TCR ; elle se situe entre 1 % et 5 %.

On voit que la fermeture du thyristor se traduit par une circulation d'un courant du nœud de connexion vers le TCR. La tension aux bornes du TCR est proportionnelle au fondamental du courant d'une constante appelée X_{SL} . En ajoutant la tension aux bornes du TCR à la tension de référence $V_{réf}$ nous obtiendrons la tension au nœud de connexion.

On sait que le TCR génère beaucoup d'harmoniques dans le réseau à cause de la forme non-sinusoïdale du courant. Si l'angle de conduction (σ) est identique pour les deux thyristors, seuls subsistent les harmoniques impaires. Pour y remédier, on piège la troisième

harmonique et ses multiples en faisant un couplage en triangle du TCR (à 6 impulsions), (voir la figure II.5, page).

En ce qui concerne les harmoniques d'ordre 5 et 7, on emploie un autre type de montage pour les éliminer du réseau. Ce montage est constitué de deux TCR à 6 impulsions couplés en triangle et reliés aux deux secondaires d'un transformateur de couplage triphasé, dont l'un couplé en étoile et l'autre en triangle. La figure III.6 représente ce type de montage.

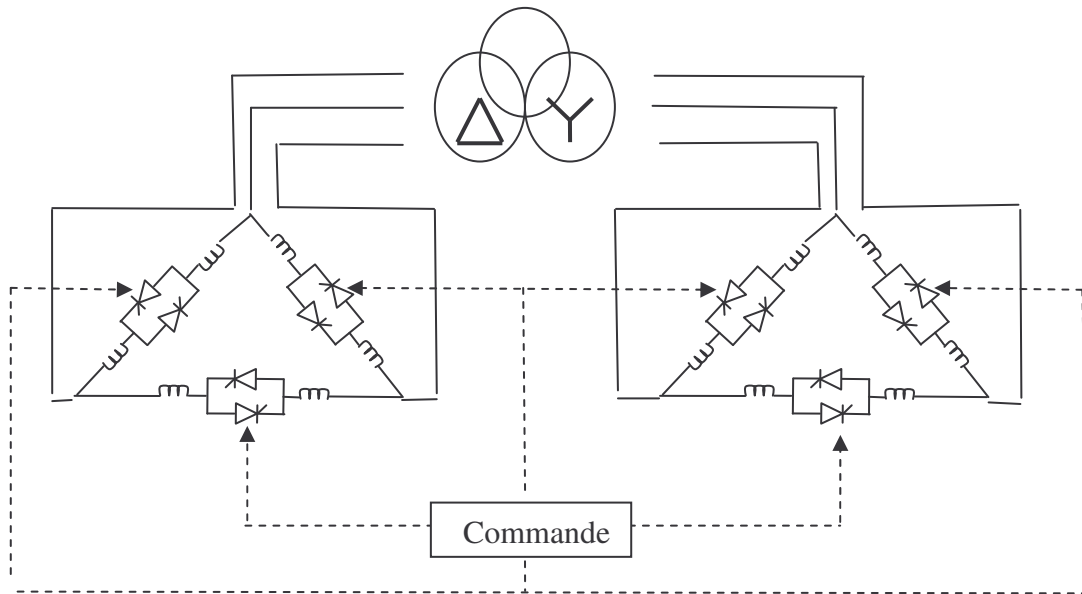


Figure III.5: TCR à 12 impulsions (dodécaphasé). [RI-98]

III.1.1.1.2- Condensateur commuté par thyristors (TSC), (*Thyristor switched capacitor*) :

Le TSC est constitué d'un banc de condensateurs, chacun est commandé par deux thyristors disposés en tête-bêche et en série avec une inductance de limitation qui sert, notamment, à limiter les impulsions de courant dans certaines conditions de fonctionnement anormal, comme elle sert aussi à éviter que le condensateur n'entre en résonance avec l'impédance du réseau sous certaines fréquences.

Le schéma d'un TSC est donné par la figure III.6.

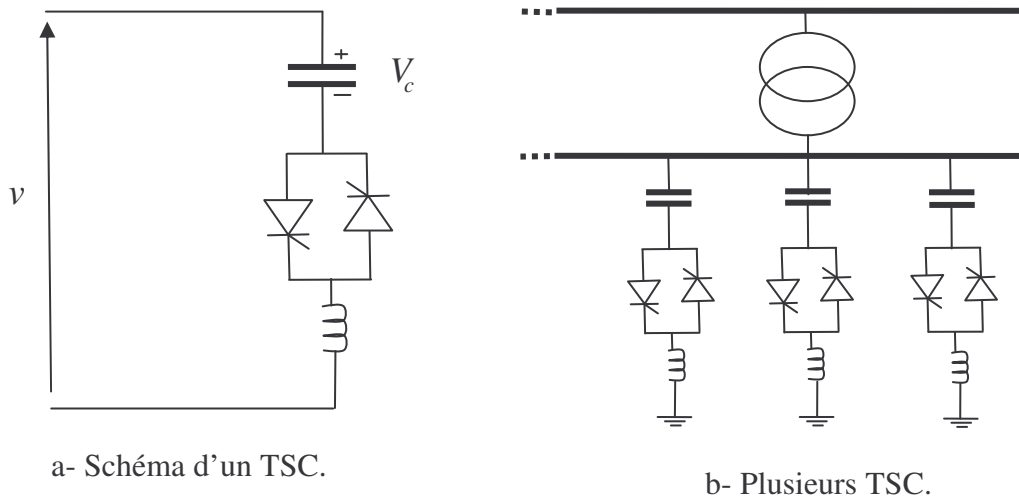


Figure III.6: Condensateur commandé par thyristor TSC. [RI-98]

En fonction de la variation de la tension sur le jeu de barre par rapport à la tension de référence le TSC connecte ou déconnecte un ou plusieurs bancs de condensateurs.

Au début, les condensateurs sont chargés à la valeur de crête de la tension du réseau. Quand la tension aux bornes du condensateur est égale à la tension du réseau, le thyristor est amorcé et un courant se met à circuler du condensateur vers le réseau. Il y'aura une impulsion de courant néfastes pour les thyristors ce qui justifie la présence de l'inductance pour l'atténuer. Si le condensateur est débranché, il reste chargé avec son énergie stockée. Pour le brancher de nouveau, il faut attendre que la tension à ses bornes soit égale à celle du réseau. Le TSC utilise le même mode de couplage que le TCR (Δ à 6 ou à 12 impulsions). La figure III.7 représente le schéma de connexion d'un TSC sur un réseau triphasé.

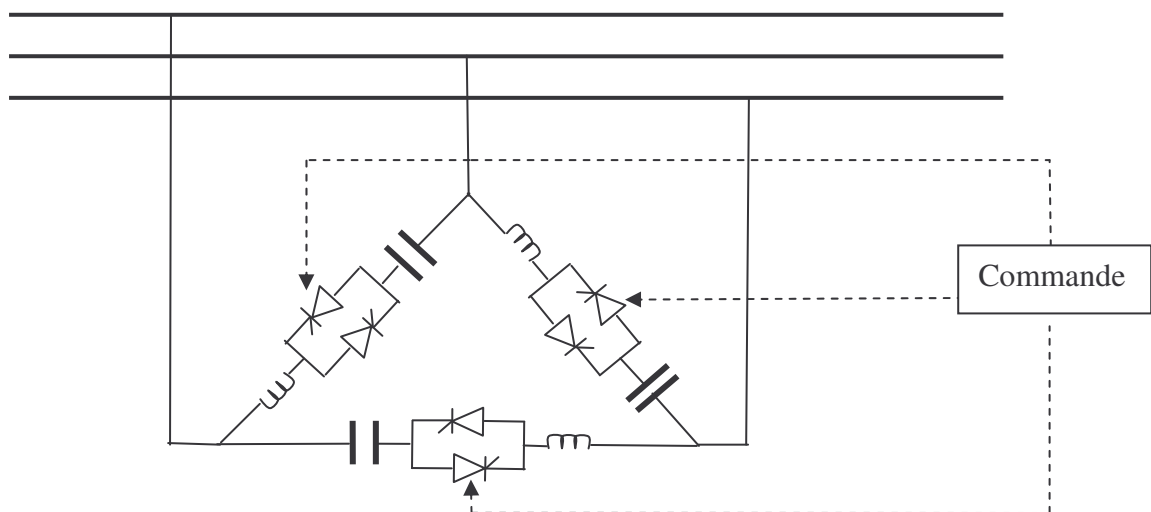


Figure III.7 : Schéma de connexion d'un TSC. [RI-98]

La valeur de la réactance ne varie que d'un pas discret. Plus on a de condensateurs branchés, plus le courant capacitif fourni au réseau sera grand. La valeur que peut prendre cette réactance équivalente peut être exprimée par :

- Pour 1 condensateurs connecté :

$$X_c = \frac{1}{\omega C_1} \quad [\text{III-5}]$$

- Pour n condensateurs connectés :

$$X_c = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2 + \dots + C_n)} \quad [\text{III-6}]$$

La caractéristique statique du TSC est donnée par la figure III.8

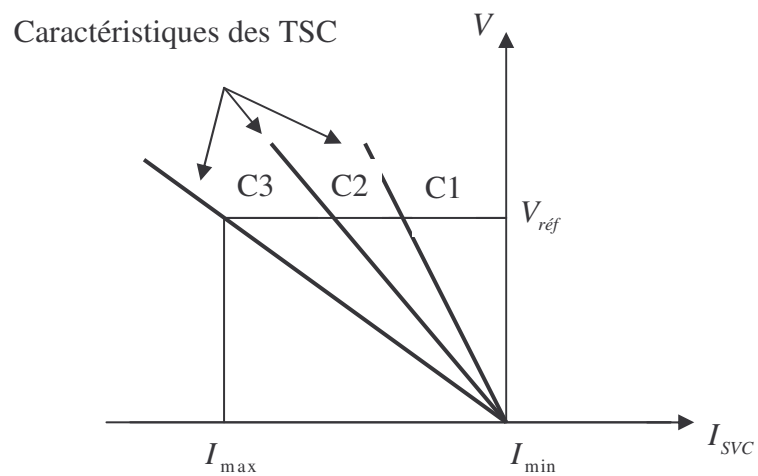


Figure III.8 : Caractéristique (V-I) du TSC. [RI-98]

III.1.1.1.3- Caractéristique de réglage du SVC :

En combinant les caractéristiques (V-I) du TCR et du TSC on obtient la caractéristique complète du SVC qui est représentée sur la figure III.9.

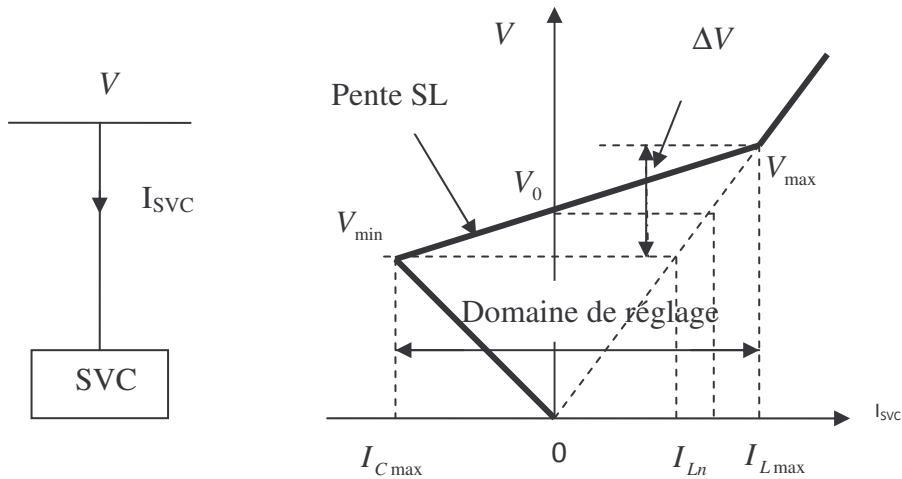


Figure.III.9: Caractéristique de réglage du SVC [RI-98]

Pour bien comprendre le fonctionnement du SVC connecté au réseau, on remplace un réseau électrique par son schéma équivalent de Thévenin:

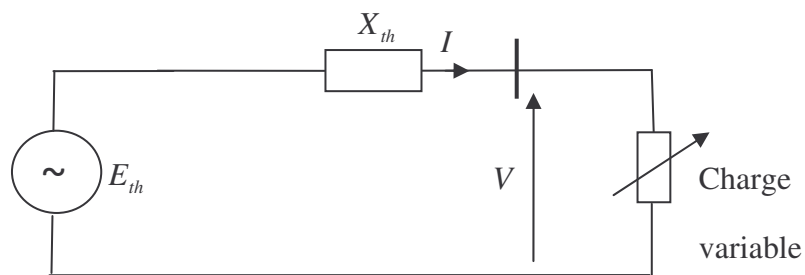


Figure III.10: Schéma équivalent de Thévenin [RI-98]

En appliquant la loi des mailles au réseau de la figure, on obtient l'équation suivante:

$$V = E_{th} - X_{th} \cdot I \quad [III-7]$$

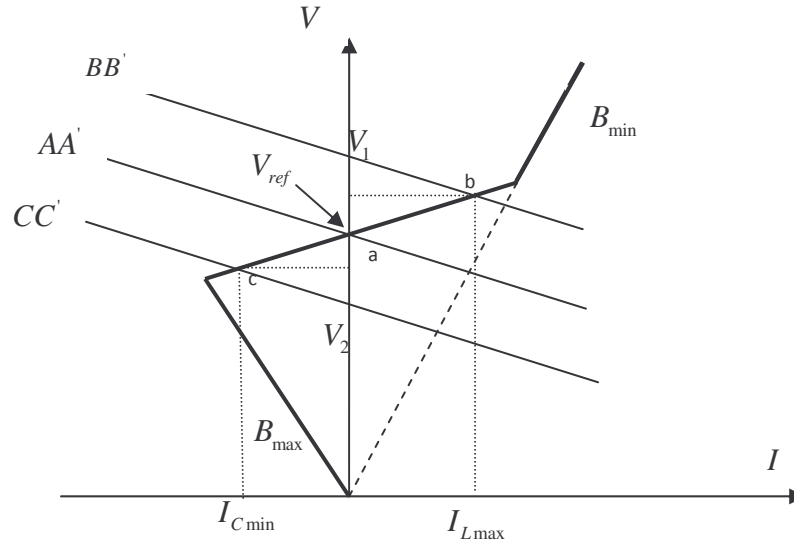


Figure III.11 : Fonctionnement du SVC. [RI-98]

L'installation d'un SVC au nœud de connexion réalise une commande de la tension.

- Si la tension E_{Th} augmente suite à une diminution de la charge du système par exemple, la caractéristique (V-I) du système va subir un changement. Elle va se déplacer de la droite (AA') à la droite (BB') comme le montre la figure III.11

En l'absence du SVC la tension sera égale à (V_1), mais grâce au SVC, le nouveau point de fonctionnement sera un peu plus bas, au point b (intersection de la caractéristique du système (BB') avec celle du SVC). Donc il y'a absorption de courant et de puissance réactive par l'inductance, ce qui réduit l'écart entre la tension du réseau et la tension de référence.

- D'autre part, si la tension E_{Th} diminue suite à une augmentation de la charge du système par exemple, la nouvelle caractéristique du système va devoir changer. Elle va passer à la droite (CC'). Sans le SVC la tension du réseau sera égale à (V_2), mais grâce à l'action du SVC, le nouveau point de fonctionnement est un peu plus haut, au point c, ce qui correspond à une génération de courant réactif par le SVC. Donc le SVC vient de réduire l'effet d'une sous-tension.

Connecté au milieu d'une ligne de transport entre deux alternateurs, le SVC permet de réguler la tension dans ce point en y injectant ou en absorbant de la puissance réactive. Cela est appelé la segmentation de la ligne, et le SVC est vu comme un alternateur qui essaye de maintenir sa tension au même niveau qu'aux bouts de la ligne. L'effet direct observé est que la puissance active pouvant être transmise par la ligne se trouve augmentée.

En augmentant le pouvoir de transmission de la puissance active d'une ligne, le SVC contribue ainsi à améliorer la stabilité transitoire en augmentant sa marge de stabilité.

Enfin, le SVC amortit les oscillations subsynchrones (SSR) qui sont dangereuses pour l'ensemble mécanique des alternateurs.

III.1.1.2- Compensateur statique synchrone STATCOM, (STATic COMpensator) :

Le STATCOM est un compensateur shunt basé sur la technologie d'onduleur de tension triphasé. Il est ainsi appelé car il correspond exactement à un compensateur synchrone classique, mais sans inertie. Son principe de fonctionnement est qu'il engendre des tensions sinusoïdales contrôlables en amplitude et sont en phase avec les tensions aux nœuds de connexion. L'onduleur est branché au réseau par l'intermédiaire d'inductances de fuite représentant les inductances du transformateur de couplage.

En réalité, on introduit un léger déphasage entre les deux tensions pour couvrir les pertes internes des GTO. Et avec le même principe, quand la tension à la sortie du STATCOM augmente on charge le condensateur et quand elle diminue par rapport à celle du réseau le condensateur est déchargé. De ce fait, l'onduleur absorbe une petite puissance active.

Le STATCOM est constitué d'un ensemble d'onduleur en pont complet mis en cascade pour avoir une structure d'onduleur multi-niveaux (voir la figure II.15).

La figure III.12 représente le schéma triphasé de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle.

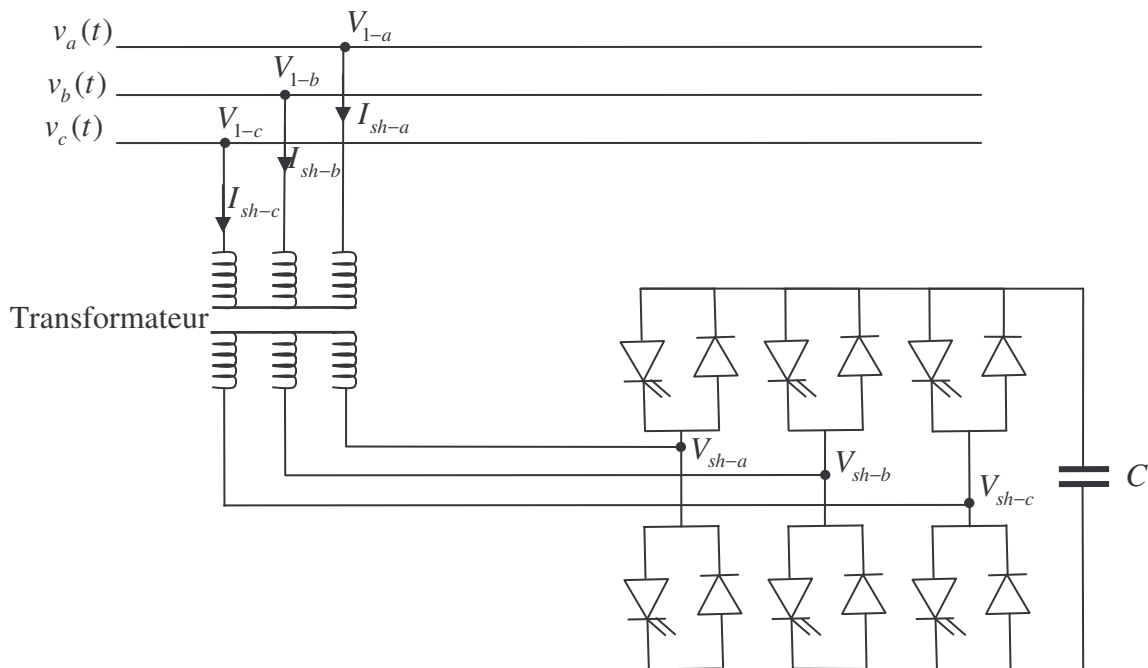


Figure III.12: Schéma de base d'un STATCOM. [LO-09]

Le STATCOM absorbe ou fournit un courant réactif au réseau, donc il y a un échange permanent de puissance réactive entre eux.

Le réglage de la puissance réactive circulant entre le réseau et le STATCOM se fait à travers la variation de la tension de sortie de l'onduleur.

- Ainsi, quand la tension de sortie est inférieure à celle du point de connexion au réseau (figure III.13), le courant circule du réseau vers le STATCOM, alors il absorbe une puissance réactive (comportement inductif). Ce qui fait diminuer la tension du réseau.

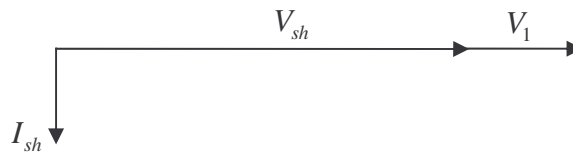


Figure III.13: Comportement inductif. [LO-09]

- Si au contraire la tension de sortie est supérieure à celle du point de connexion au réseau (figure III.14), le courant circule cette fois du STATCOM vers le réseau, alors il absorbe une puissance réactive (comportement capacitif).

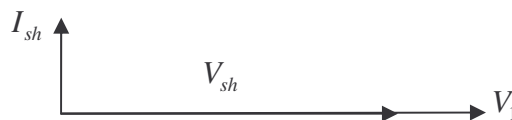


Figure III.14 : Comportement capacitif. [LO-09]

Si elles ont la même valeur, l'échange d'énergie réactive est nul.

La caractéristique statique du STATCOM est représentée sur la figure III.15

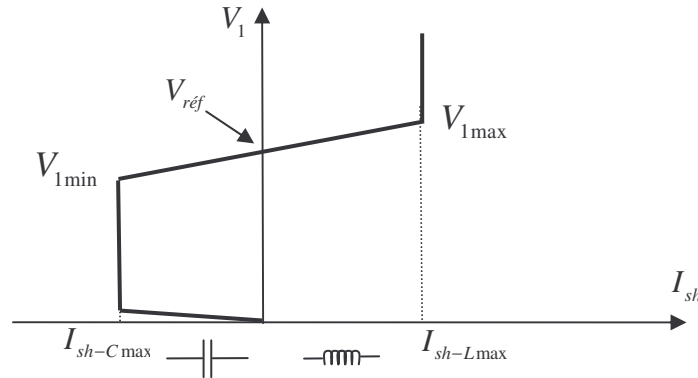


Figure III.15 : Caractéristique (V-I) du STATCOM- [RI-98].

Cette caractéristique ressemble à celle du SVC, à une différence près que, le STATCOM comme on le voit peut continuer à fournir un courant capacitif maximal $I_{C\max}$ même sous de faible tension et donc offre une meilleure régulation, ce qui constitue un avantage majeur par rapport au SVC.

Tout comme le SVC, le STATCOM placé au milieu d'une ligne de transport permet d'augmenter la puissance transmise et ainsi améliorer la stabilité transitoire.

III.1.2- Dispositifs FACTS série:

Contrairement aux dispositifs FACTS shunt, ces dispositifs se connectent au réseau en série via un transformateur de couplage. Ils y injectent des tensions pour contrôler l'un de ces paramètres qu'est l'impédance. Ils se comportent comme des sources de tensions vis-à-vis du réseau.

Parmi ces compensateurs série on peut citer :

III.1.2.1- Compensateur synchrone statique série SSSC, (*Static Synchronous Series Compensator*):

Comme le STATCOM, le SSSC est basé sur la structure d'onduleur de tension. Mais contrairement au STATCOM, qui est placé en parallèle sur le réseau électrique, le SSSC est placé en série.

Avec cette configuration, le SSSC injecte des tensions en série dans les phases du réseau mais déphasées par rapport aux courants de lignes d'un angle de 90° , en avance ou en retard.

Le schéma de la figure III.16 représente le schéma de base d'un SSSC.

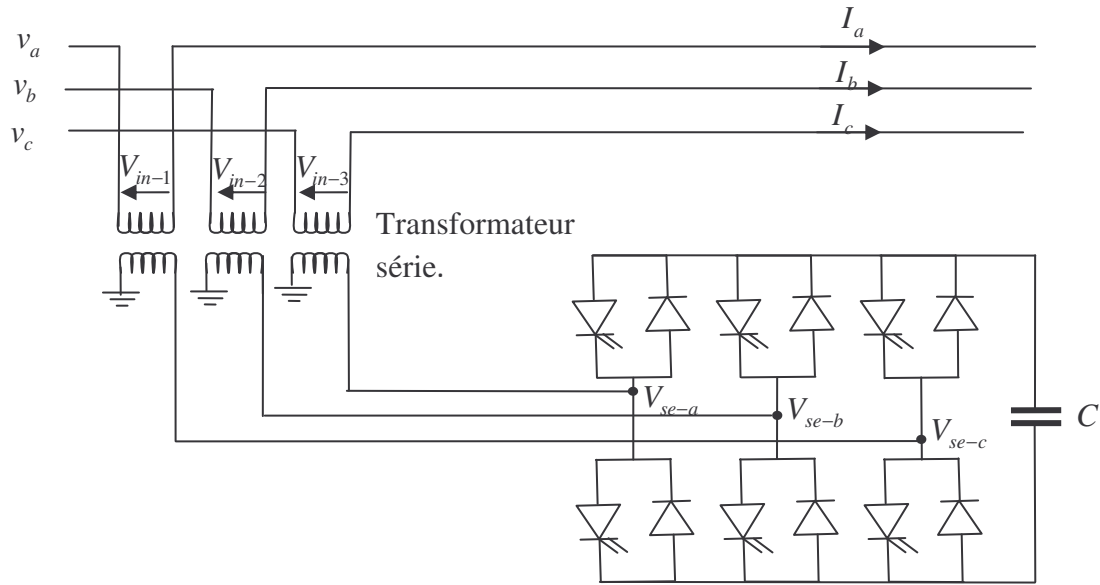


Figure III.16 Schéma de base d'un SSSC. [LO-09]

Le principe de fonctionnement du SSSC se base sur l'injection d'une tension en quadrature avec le courant de ligne. Cette tension est indépendante de ce courant, c'est-à-dire qu'elle est contrôlée en amplitude et en sens quel que soit le courant de ligne. De ce fait, en contrôlant la tension injectée on peut contrôler l'impédance de la ligne.

Le SSSC crée un léger déphasage que ce soit pour augmenter ou diminuer la tension injectée. Ce

Le SSSC augmente la puissance transmissible sur les lignes de transport d'énergie. Il améliore la stabilité transitoire et lorsqu'il est muni de batterie de stockage d'énergie, il permet d'amortir les oscillations de puissance en stockant ou en fournissant de la puissance active.

Le SSSC, en lui-même, ne cause pas de résonance subsynchrone puisqu'il n'introduit pas de condensateur dans la ligne et ne fait qu'injecter une tension en série.

III.1.2.2- Le GCSC, (GTO Thyristor-Controlled Series Capacitor):

Le GCSC est constitué d'un condensateur fixe mis en parallèle avec deux thyristors GTO en tête-bêche. Ce système est branché en série sur le réseau électrique comme le montre la figure III.17

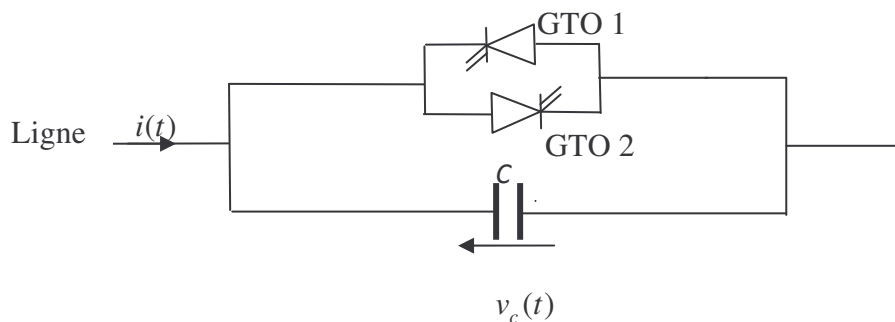


Figure.III.17 : Schéma de base d'un GCSC. [HI-00]

L'utilisation des GTO sur le GCSC est justifiée. Ainsi, le contrôle du fondamental de la tension $v_c(t)$ se fait par le contrôle de l'angle de retard à l'ouverture des GTO. L'un des GTO se ferme au passage de la tension $v_c(t)$ par zéro et cela pour éviter le court-circuit du condensateur.

Supposons que l'angle de retard à l'amorçage (γ) est compté à partir du moment du passage du courant de ligne par zéro lequel est donnée par l'expression : $i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t)$. Puisque la tension aux bornes du condensateur est liée au courant on peut, donc, écrire:

$$v_c(t) = \frac{1}{C\omega} \int_{\gamma}^{\omega t} i(t).dt \quad [\text{III-8}]$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C\omega} \int_{\gamma}^{\omega t} I\sqrt{2} \sin(\omega t).dt = \frac{I\sqrt{2}}{C\omega} \int_{\gamma}^{\omega t} \sin(\omega t).dt \quad [\text{III-9}]$$

Finalement:

$$v_c(t) = \begin{cases} \frac{I\sqrt{2}}{C\omega} (\cos(\gamma) - \cos(\omega t)) & \text{pour } \gamma < \omega t < \gamma + \sigma. \\ 0 & \text{pour } \gamma + \sigma < \omega t < \gamma + T. \end{cases} \quad [\text{III-10}]$$

L'amplitude de la composante fondamentale de la tension aux bornes du condensateur est donnée, en fonction de l'angle de conduction σ , par la formule suivante :

$$V_{CF}(\sigma) = I. \frac{\sigma - \sin(\sigma)}{\pi C\omega} \quad [\text{HI-00}] \quad [\text{III-11}]$$

La valeur effective de la réactance du condensateur est donnée en fonction de γ par:

$$X_c(\gamma) = \frac{2(\pi - \gamma) + \sin(2\gamma)}{\pi C\omega} \quad [\text{III-12}]$$

L'effet d'une augmentation de l'angle γ est une diminution de la valeur effective de la réactance $X_c(\gamma)$, donc de la valeur de la composante fondamentale de la tension $V_{CF}(\sigma)$.

On contrôle la réactance équivalente de la ligne en maîtrisant l'angle de retard à l'ouverture des GTO. Ce qui permet d'augmenter la puissance transmissible sur les lignes de transport. La marge de stabilité se trouve augmentée.

Vu la présence d'un condensateur dans Le GCSC, celui-ci peut induire la résonance subsynchrone.

III.1.3- Dispositif FACTS série-shunt:

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent le contrôle d'un seul des trois paramètres permettant un contrôle dynamique des puissances : active et réactive.

Une nouvelle génération de compensateur construit à partir des compensateurs déjà existants est née. L'UPFC, compensateur hybride né de l'association d'un STATCOM et d'un SSSC en est la parfaite illustration puisque, en associant deux onduleurs, il permet un contrôle simultané des trois paramètres (tension, impédance, déphasage).

III.1.3.1- Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC, (*Unified Power Flow Controller*):

Ce compensateur est parmi les plus importants des dispositifs FACTS. Il est constitué de deux onduleurs triphasés à base de GTO (STATCOM et SSSC) interconnectés via une liaison à courant continu constituée d'un condensateur ou plusieurs condensateurs.

Sa structure de base est représentée sur la figure III.18

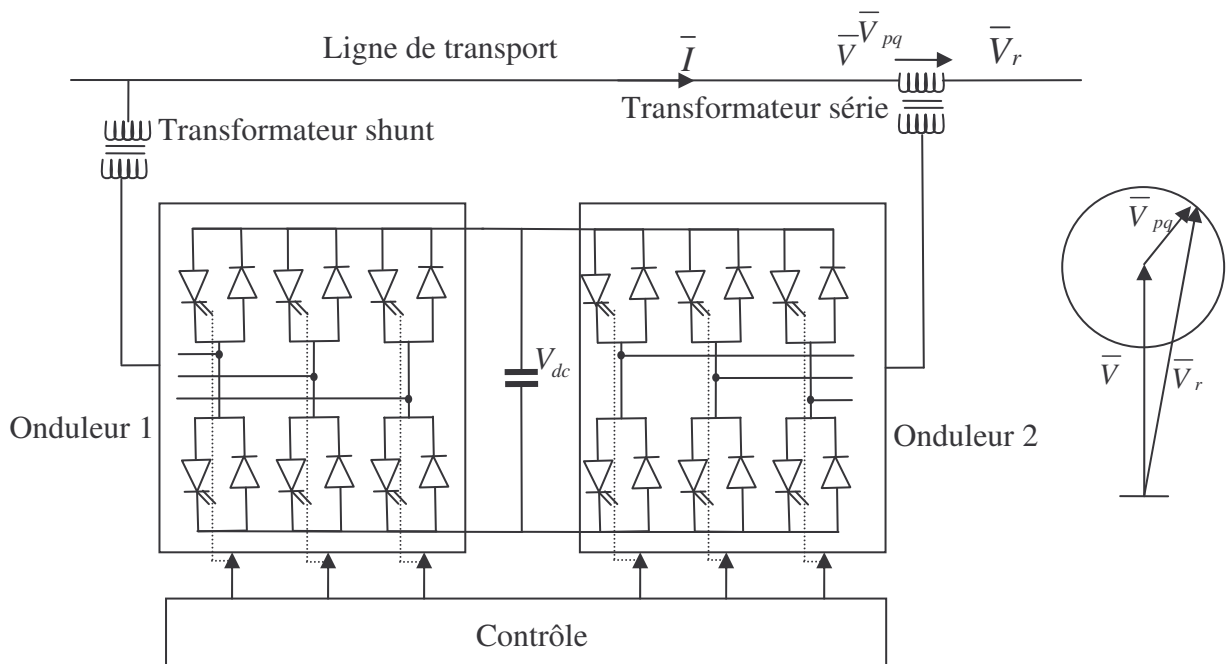


Figure III.18 Structure de base d'un UPFC [HI-00]

L'onduleur 1 sert à fournir la demande de puissance active de l'onduleur 2 à travers la liaison à courant continu et fait aussi la compensation de l'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive indépendamment de la puissance active qui le traverse.

En faisant varier la tension $\bar{V}_{pq}$ de l'onduleur en série en phase et en module, on peut faire varier la tension $\bar{V}_r$ en phase et en module. Il existe trois modes de fonctionnement:

- Régulateur de tension si la tension injectée $\bar{V}_{pq} = \pm \Delta \bar{V}$ ($\rho = 0$) est en phase avec la tension $\bar{V}$, (Figure III.19.a).

- Régulateur d'impédance si la tension $\bar{V}_{pq} = \bar{V}_q$ est perpendiculaire au courant $\bar{I}$,

(Figure III.19.b).

- Régulateur d'angle de phase si la tension $\bar{V}_{pq} = \bar{V}_\rho$ injectée est calculée de sorte à avoir un même module de la tension avant et après l'UPFC, (Figure III.19.c).

Comme, aussi, il peut combiner tous ces modes de fonctionnement en basculant d'un mode à l'autre, (Figure III.19.d).

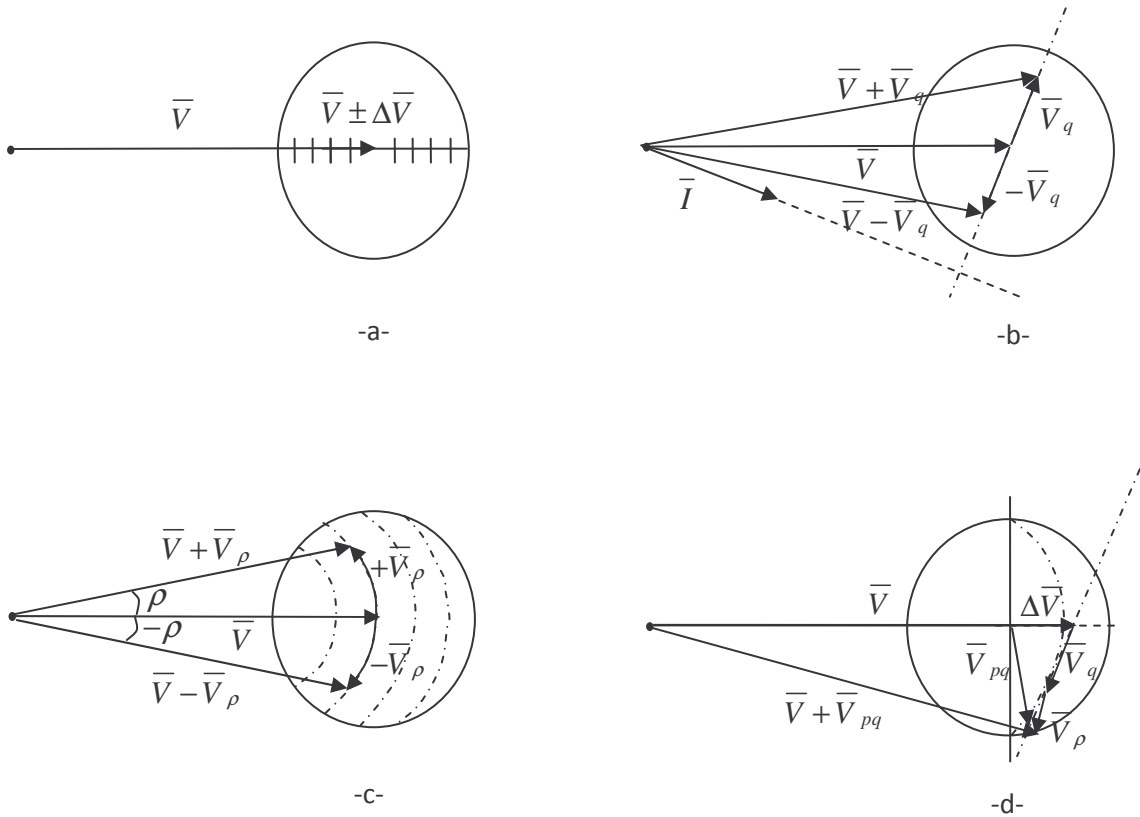


Figure III.19 : Diagramme des tensions pour différents fonctionnements de l'UPFC [[HI-00]

III.3- Synthèse :

Tableau III.1 : Avantages techniques des dispositifs FACTS.

Le dispositif	Contrôle du transit de puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire
SVC	+	+++	+
STATCOM	+	+++	++
SSSC	++	+	+++
GCSC	++	+	+++
UPFC	+++	+++	+++

Tableau III.1. [HI-00]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux dispositifs FACTS ainsi que leurs bases de fonctionnement dans les réseaux électriques.

En particulier, les dispositifs de type STATCOM qui ont pour rôle de maintenir la tension dans des plages admissibles, d'augmenter la puissance transmise dans les grandes lignes de transmission et l'amortissement des oscillations de puissances. Ils présentent certains avantages par rapport à d'autre dispositif de compensation tels leur aptitude à contrôler la tension de manière efficace en fournissant du courant réactif même sous de basses tensions du réseau, leur flexibilité, leur rapidité et leur état statique qui réduit leur maintenance.

Donc la qualité essentielle de ces dispositifs leur revient grâce à leurs performances dynamiques, ce qui les rend plus compétitifs et mieux adaptés aux utilisations modernes d'énergie électrique.

Dans le chapitre qui suit, nous allons montrer, à travers la simulation sur un réseau électrique, le fonctionnement du STATCOM.

Chapitre IV : Modélisation du STATCOM

Introduction :

La plus différence entre les systèmes FACTS et la première génération de ces systèmes dits conventionnels pour la compensation shunt réside dans le fait que les FACTS utilisent des systèmes à base de convertisseurs statiques contrôlés DC-AC (les onduleurs) pour réaliser l'échange de la puissance active ou réactive avec le réseau électriques au.

Il est à noter que ces convertisseur statique sont des onduleurs réversibles qui transforment l'énergie électrique de sa forme alternative en continu et vis versa (DC-AC et AC-DC), donc pour leurs applications dans les systèmes FACTS le transfert de la puissance d'effectue également du coté DC vers le coté AC et du coté AC vers le coté DC, selon la fonction à laquelle ils sont installées.

Le STATCOM tout comme tout autre système électrique peut être représenté par des équations mathématiques qui rendent compte de son fonctionnement. Sa modélisation consiste à mettre ces équations en relation dans le but est d'aboutir à des lois de commandes reliant les grandeurs de sortie aux grandeurs d'entrée.

La modélisation est essentielle. Ainsi, on peut résoudre des systèmes électriques à plusieurs paramètres (tensions, courants, puissances...) par des modèles qui remplacent les relations physiques entre ces paramètres par des relations mathématiques équivalentes.

Dans ce chapitre, nous allons voir le fonctionnement du STATCOM et quelques modèles utilisés pour sa représentation.

IV.1- Le STATCOM, schéma et Principe de Fonctionnement :

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent dans la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Au lieu d'être créée par un groupe tournant, la tension alternative triphasée, synchrone avec la tension du réseau, est créée par le STATCOM à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité d'énergie réactive à échanger avec le réseau. Le schéma de base du STATCOM est donné par la figure IV.1

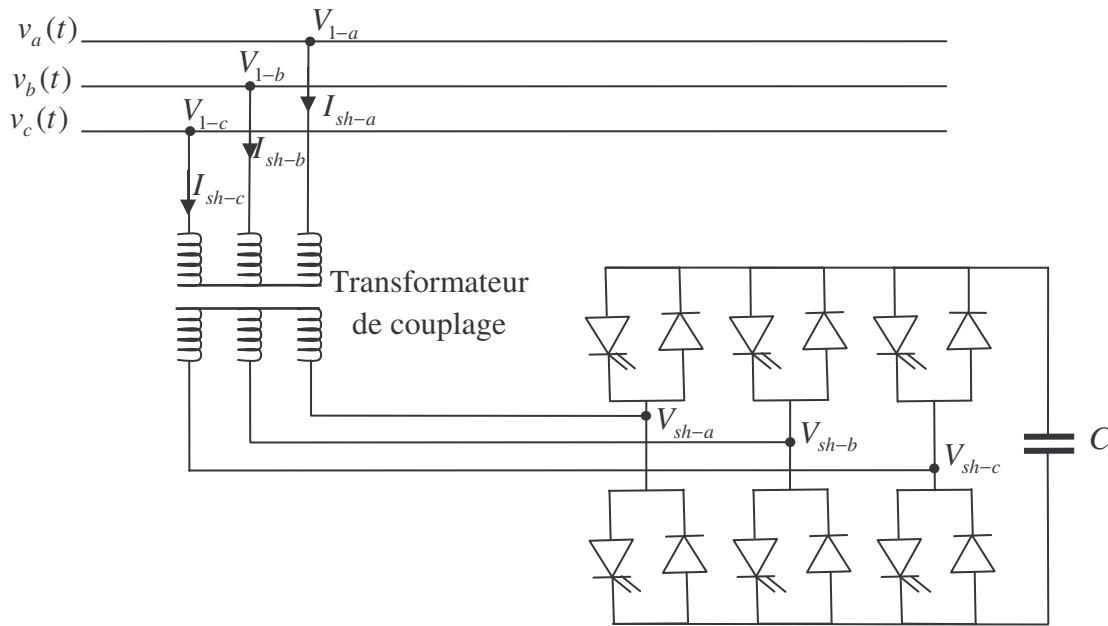


Figure IV.1: Schéma de base d'un STATCOM. [LO-09]

Pour pouvoir combler les pertes engendrées par les GTO et le transformateur, la tension du STATCOM V_{sh} injectée est légèrement déphasée par rapport à la tension V_l de la ligne et dans ce cas il y a un petit échange d'énergie active avec le réseau.

Le réglage de la puissance réactive circulant entre le réseau et le STATCOM se fait à travers la variation de la tension de sortie de l'onduleur.

Le STATCOM échange de la puissance réactive avec le réseau sous certaines conditions que voici :

- Ainsi, quand la tension de sortie est inférieure à celle du point de connexion au réseau, le courant circule du réseau vers STATCOM, alors il absorbe une puissance réactive (comportement inductif). Ce qui fait baisser la tension du réseau.

- Si au contraire la tension de sortie est supérieure à celle du point de connexion au réseau (figure III.14), le courant circule cette fois du STATCOM vers le réseau, alors il absorbe une puissance réactive (comportement capacitif).
- Si elles ont la même valeur, l'échange d'énergie réactive est nul.

IV.1.1 Structure des STATCOM sur les réseaux de transport :

L'installation de STATCOM sur les réseaux de transport doit comporter un grand nombre d'onduleurs. Pour éviter l'ajout de filtre passif, le nombre d'impulsions doit être au moins de 24 (association de 4 onduleurs chacun à 6 impulsions à base de GTO) ou à 48 impulsions (association de 4 onduleurs chacun à 12 impulsions à base de GTO). Ces structures nécessitent un transformateur de couplage pour s'insérer dans le réseau.

La structure multi-niveaux évoquée au chapitre II est aussi intéressante puisque, avec seulement plus de condensateurs pré-chargés pour la reconstitution de la tension de sortie de l'onduleur (voir figure II), ils ne nécessitent pas de transformateurs de couplage comme c'est le cas des deux structures déjà évoquées.

La figure suivante représente la structure d'un onduleur à 48 impulsions à base de GTO.

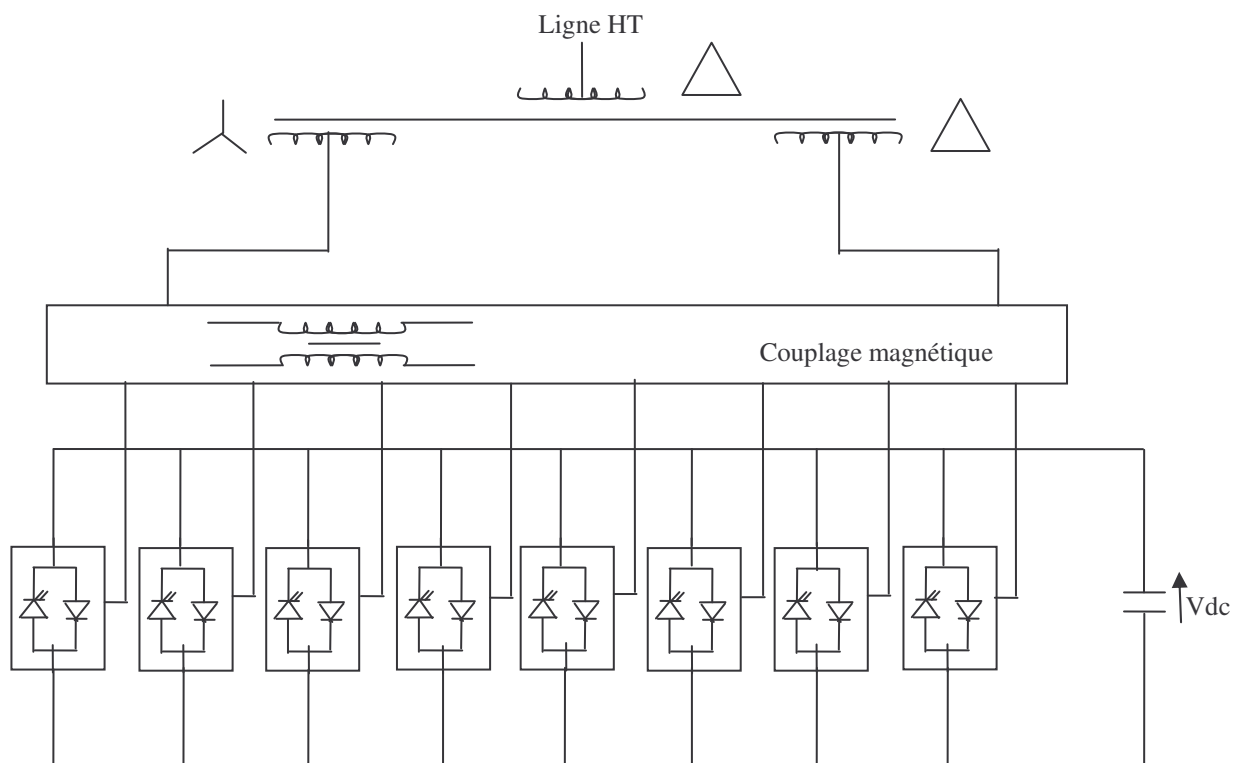


Figure IV.2: Schéma de base d'un STATCOM à 48 impulsions. [CP-98]

IV.2- Modèles du STATCOM :

Plusieurs modèles existent pour décrire le fonctionnement du STATCOM, on peut citer les deux modèles suivants :

IV.2.1 Modèle statique du STATCOM :

Ce modèle simple est destiné à l'étude statique des réseaux électriques sur des logiciels de répartition de charge.

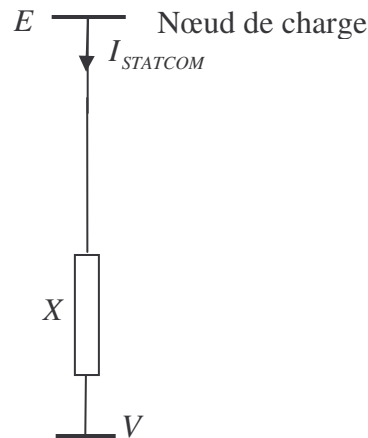


Figure V.3 Modèle statique du STATCOM [PP-97].

IV.2.1.1- Zone de régulation ($V_{\min} < E < V_{\max}$), la caractéristique est linéaire et régie par l'équation... On aura dans la zone de régulation :

$$E = V_{\text{réf}} + X_{SL} \cdot I_{\text{STATCOM}} \quad [\text{IV.1}]$$

X_{SL} : Est la pente de la caractéristique statique du STATCOM.

E : Est la tension au point de connexion du STATCOM.

$V_{\text{réf}}$: Est la tension de référence.

I_{STATCOM} : Est le Courant fournit par le STATCOM.

IV.2.1.2- Zone de surcharge capacitive ($E < V_{\min}$) :

Dans cette zone, le courant du STATCOM (éq.IV.2) est maintenu à son courant $I_{C_{\max}}$.

$$I_{STATCOM} = \frac{E - V}{X} \quad [IV.2]$$

IV.2.1.3- Zone de surcharge inductive ($E > V_{\max}$) :

Dans cette zone, le courant du STATCOM est maintenu à son courant $I_{L\max}$ défini de la même façon qu'en charge capacitive.

Ce modèle restitue la caractéristique statique du STATCOM, il a pour inconvénient une grande erreur sur le courant en s'éloignant trop de la référence.

IV.2.2- Modèle dynamique :

Il représente la caractéristique statique du STATCOM. Son courant $I_{STATCOM}$ est limité à $I_{L\max}$ et $I_{C\max}$ afin de représenter cette caractéristique. Son synoptique est représenté sur la figure V.2

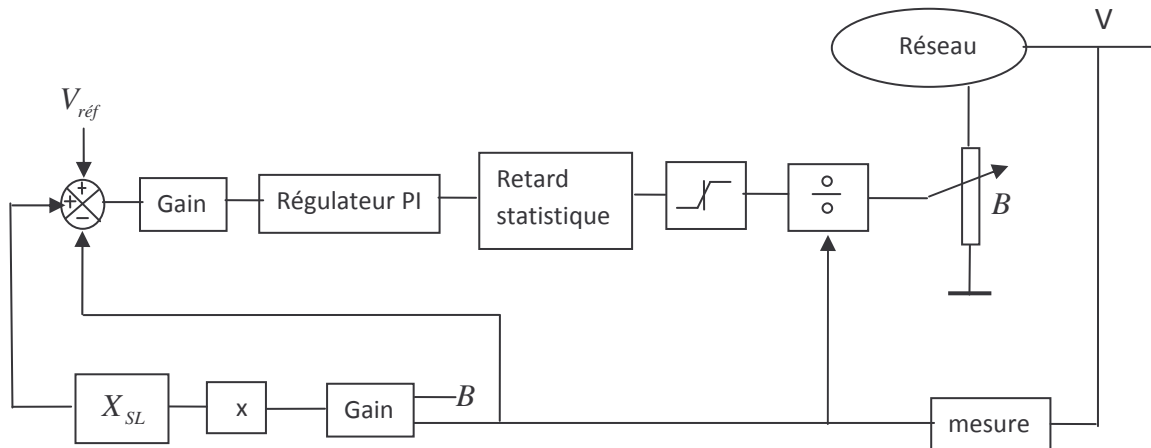


Figure V.4: Synoptique du modèle dynamique de base du STATCOM [CP-98].

Pour ce modèle, les pertes ne sont pas prises en comptes et la dynamique du convertisseur statique est représentée seulement par un retard statistique.

La loi de commande est donnée par un régulateur PI classique. Ce modèle est très simple et utilisable pour l'étude dynamique lente des réseaux comme, par exemple, les augmentations progressives de charge.

Conclusion :

Nous avons, dans ce chapitre, présenté certains modèles appliqués au STATCOM. Le modèle statique est simple mais manque de précision et commet une erreur non négligeable sur le courant pour des variations importantes de la tension du réseau. Alors que le modèle statique n'a pas de limitation de courant pour les zones de surcharges capacitives et inductives, le modèle dynamique limite les courants (capacitif et inductif) et prend en compte la dynamique du convertisseur statique.

Dans le chapitre qui suit, nous simulerons le fonctionnement d'un STATCOM dans un réseau qui subit des perturbations de la tension.

Chapitre V :
Partie simulation

Introduction :

Après avoir présenté dans le quatrième chapitre le principe de fonctionnement et la structure de base du STATCOM, on a vu aussi sa conception et les modèles mathématiques qui traduisent son comportement.

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons le réseau étudié, qui est un réseau de transport de tension 500 KV reliant deux sources de tension. L'une est supposée stable et désignée par « la source principale », et une autre pouvant varier sa tension et désignée par « la source perturbatrice ».

La simulation est faite sous l'environnement SIMULINK/MATLAB, à la fin de ce chapitre on présentera les résultats obtenus des simulations.

V.1- Présentation du réseau :

Le réseau étudié est constitué de deux sources de tension triphasées reliées par une ligne de transport d'énergie électrique de 200 km de long. La puissance de chacune des sources est de 5000MA. Deux charges sont connectées aux deux bouts de la ligne.

Le réseau de base est constitué :

- D'une source de tensions alternatives triphasée principale de tension efficace entre phases :

$$V_{s_{eff}} = 500.1,01 \text{ kV.}$$

- De résistance interne totale:

$$R_s = 500.1,01.10^3 / 6000.10^6 / 10 = 4,174 \text{ } \Omega$$

- De réactance interne totale:

$$X_s = 10.R_s \text{ } \Omega \quad [V-1]$$

La tension instantanée de la phase A de la source est alors :

$$v_{sa}(t) = 500.1,01.10^3 .\sin(314t+30^\circ). \quad [V-2]$$

- D'une source de tensions alternatives triphasée à variation d'amplitudes programmable :

$$V_{p_{eff}} = 500 \text{ kV}$$

La tension instantanée de la phase A de la source perturbatrice en régime nominale est alors :

$$V_{pa}(t) = 500.10^3 .\sin(314t). \quad [V-3]$$

- De résistance interne totale:

$$R_p = 500.10^3 / 6000.10^6 / 10 = 4,17 \Omega$$

- De réactance interne totale:

$$X_p = 10.R_p \text{ } \Omega \quad [V-4]$$

- D'une ligne en π modélisée par :

- Une résistance de $0.27 \Omega/\text{km}$
- Une inductance de 0.0083 H/km
- Une capacité de $8.9.10^{-9} \text{ F/km}$
- Une longueur de 200 km .
- Nombre de sections de conducteurs = 1.

- De deux charges caractérisées par :

- Une tension nominale de 500 kV .
- Une puissance active de 250 MW .
- Une puissance réactive inductive de 0.16 Mvar .

IV.1.1- Valeurs de bases :

Pour faciliter les calculs nous avons choisi des valeurs de base pour la tension et le courant, celle du courant sera déduite. En raison de la présence du STATCOM, deux bases sont nécessaires : l'une pour le réseau, l'autre pour le STATCOM,

* Le réseau :

- Tension de base du réseau :

$$V_b = 500 \text{ kV}$$

- Puissance de base pour le réseau:

$$S_b = 6000 \text{ MVA}$$

$$P_b = 6000 \text{ MW} \text{ et } Q_b = 6000 \text{ Mvar}.$$

- Courant de base :

$$I_b = \frac{S_b \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot V_b} \quad [V-5]$$

$$I_b = \frac{60000\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot 5} = 9780,3 \text{ A}$$

- Impédance de base :

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} \quad [V-6]$$

$$Z_b = \frac{500 \cdot 10^3}{9780,3} = 51,12 \Omega$$

*** Le STATCOM:**

- La tension:

La même que celle du réseau : $V_{bST} = 500 \text{ kV}$

- Puissance de base pour le STATCOM :

$$S_{bST} = 100 \text{ MVA.}$$

$$P_{bST} = 100 \text{ MW et } Q_{ST} = 100 \text{ MVar.}$$

- Courant de base :

$$I_{bST} = \frac{S_{bST} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot V_b} \quad [V-7]$$

$$I_{bST} = \frac{1000\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot 5} = 163 \text{ A}$$

Nous allons faire les simulations suivantes :

- En premier lieu, un fonctionnement en régime normal, c'est-à-dire la source perturbatrice fonctionne dans son régime normal avec absence du STATCOM du réseau.

- Le cas de perturbation consiste à actionner la source de tension perturbatrice pour varier son amplitude à des instants donnés. Initialement à 1 pu, à l'instant $t=0.03s$, l'amplitude de la tension à ses bornes chute brusquement à 0.96 pu (4% de la tension nominale). Ensuite, à $t=0.17s$ l'amplitude monte jusqu'à atteindre 1,04 pu. Enfin, à l'instant $t=0,3s$ la tension regagne sa valeur nominale (1pu).

- Enfin, on insère le STATCOM en shunt aux bornes de la source perturbatrice pour voir sa réaction face à la perturbation.

V.2- Fonctionnement normal :

Nous allons effectuer une simulation en considérant que la source perturbatrice garde sa tension nominale fixe, c'est-à-dire $V_p=500kV$.

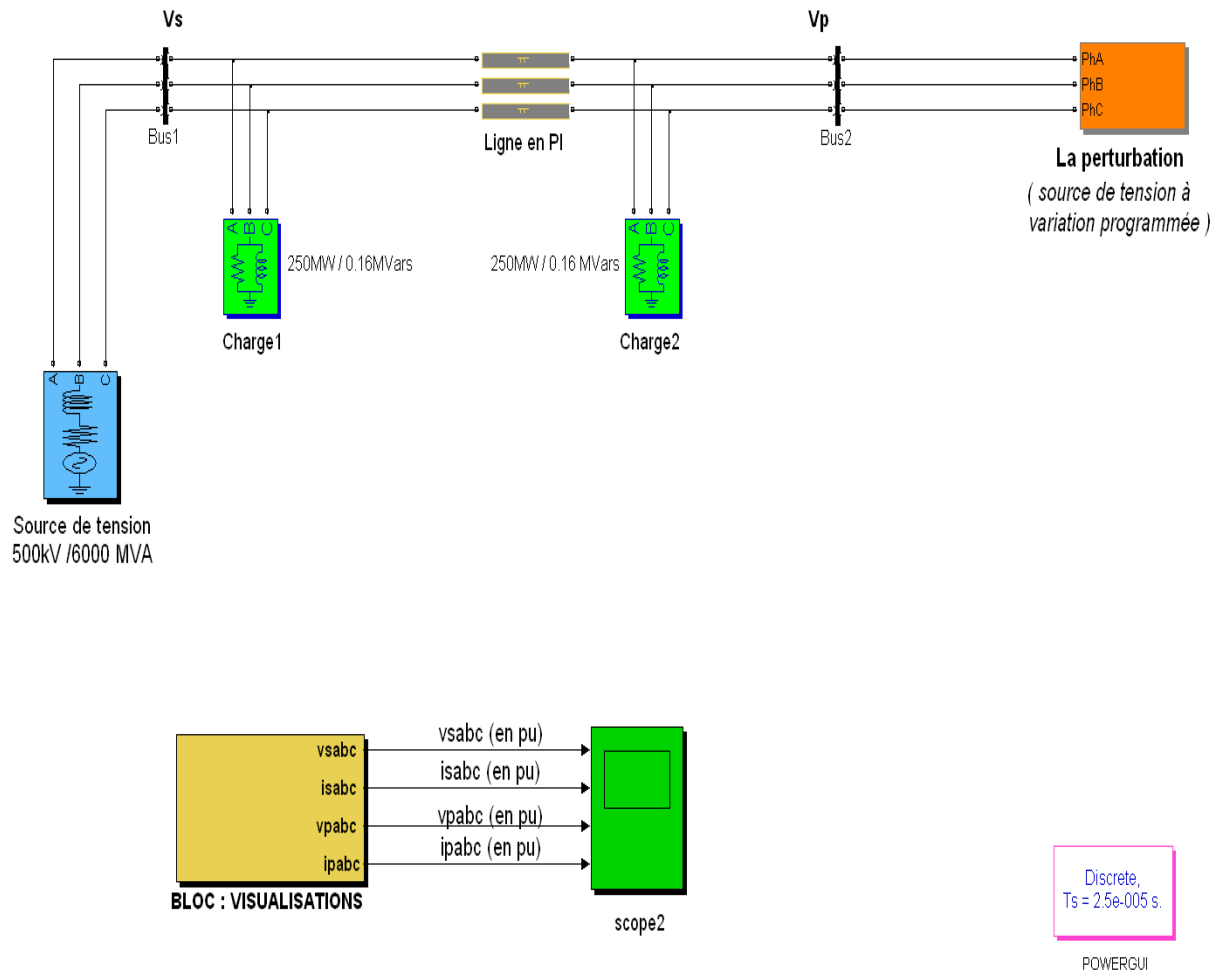


Figure V.1: Réseau de base.

- Tension de la source principale :

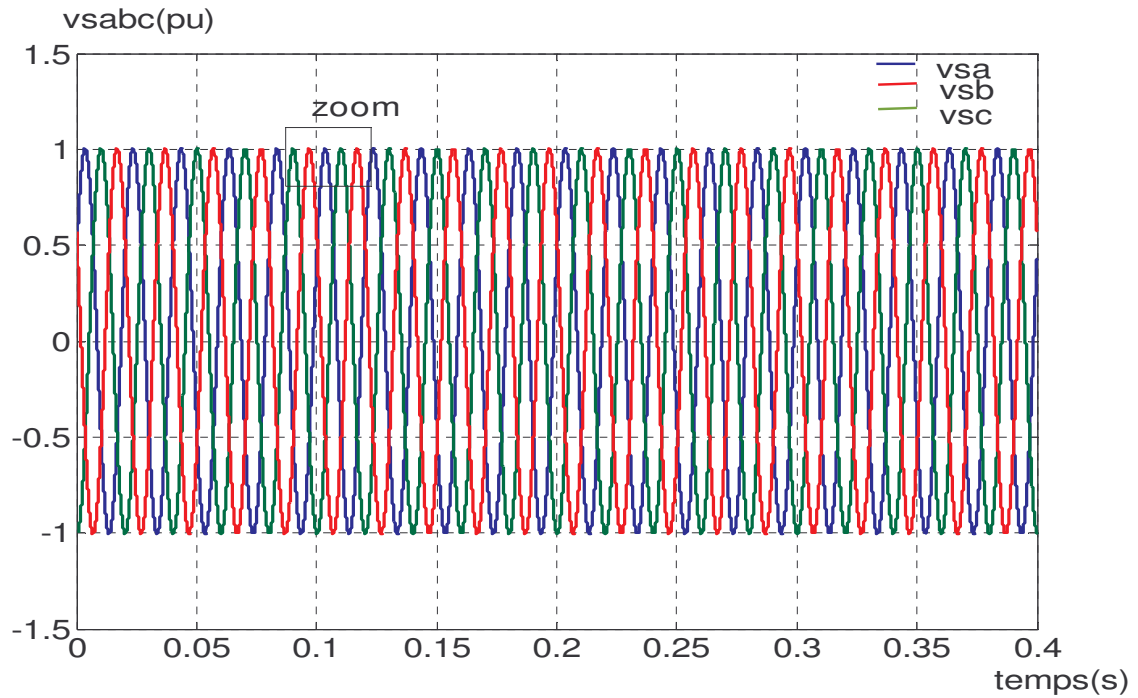


Figure V.2: Tension de la source

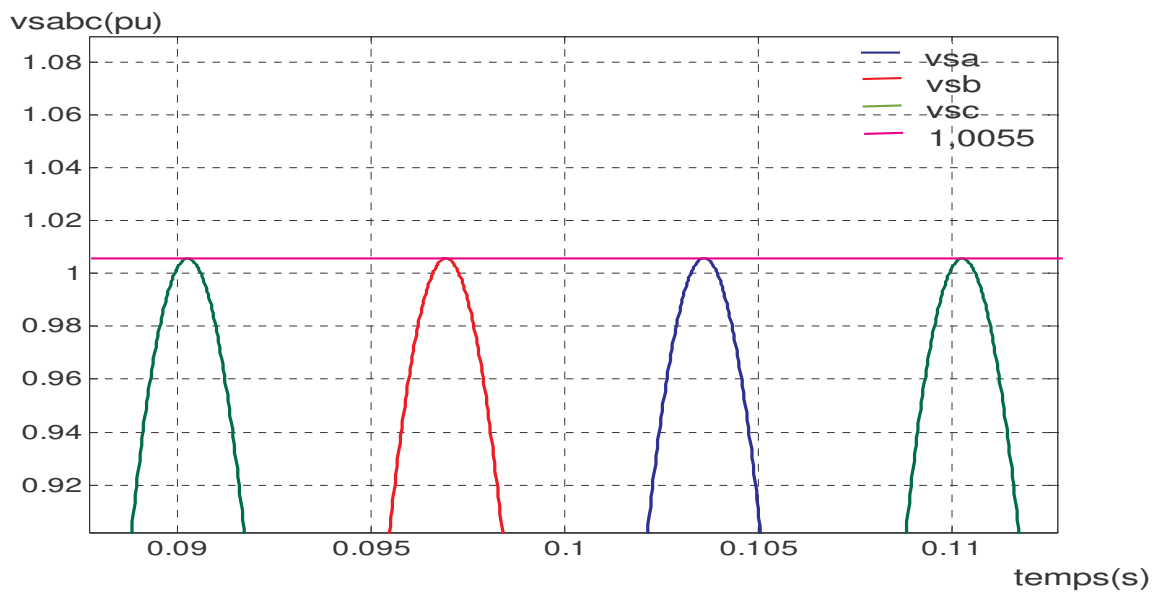


Figure V.3: Agrandissement d'une partie de la figure V. 2

L'amplitude de la tension s'établit à 1,0055pu. D'après la figure V.2, l'amplitude de la tension de la source principale chute en fonctionnement normale à cause de la chute de tension sur son impédance interne.

- Courant de la source principale :

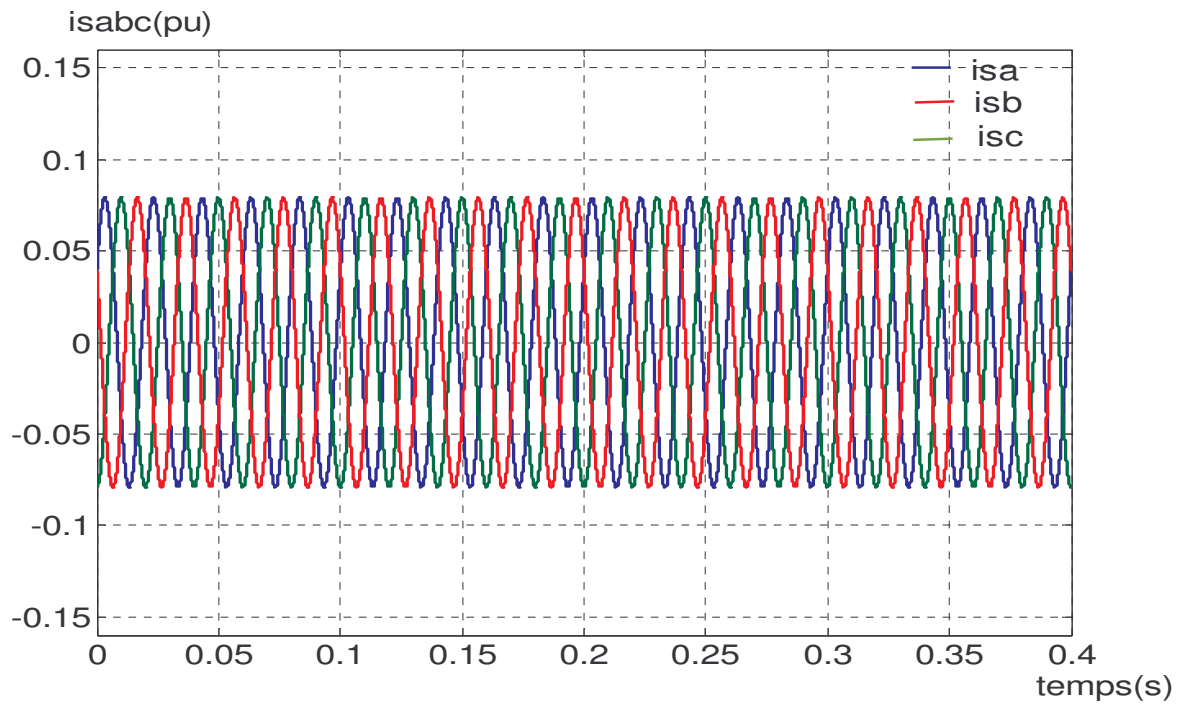


Figure V.4: Courant de la source

Le courant débité par la source principale s'établit à 0,0792pu

- Tension de la source perturbatrice :

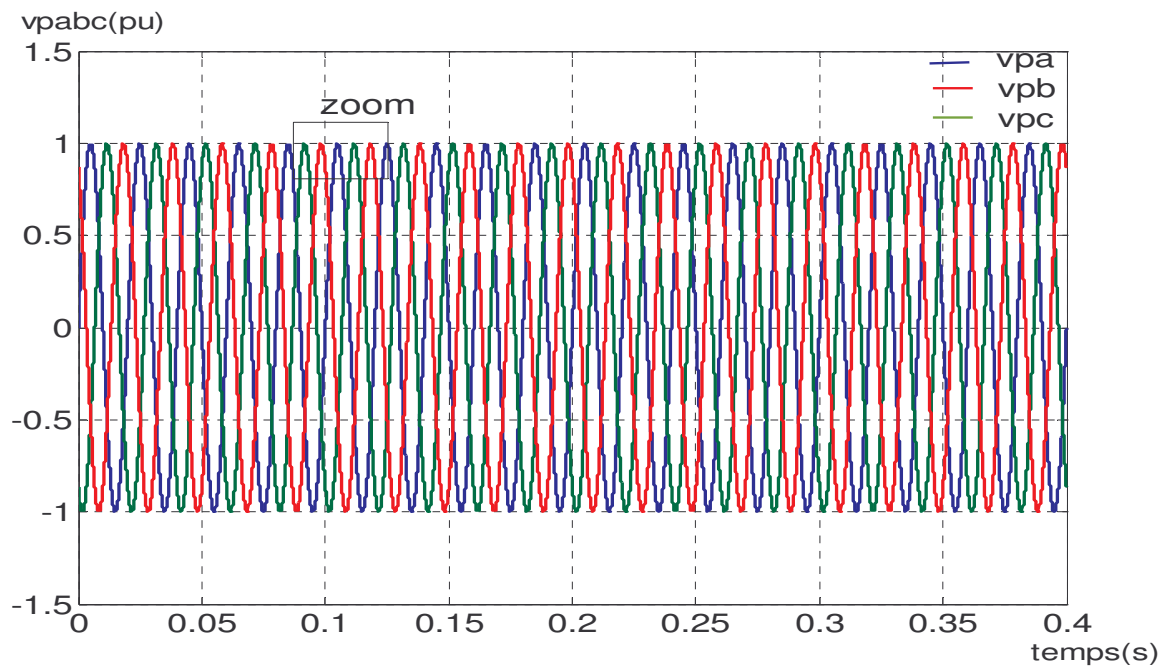


Figure V.5: Tension de la source perturbatrice.

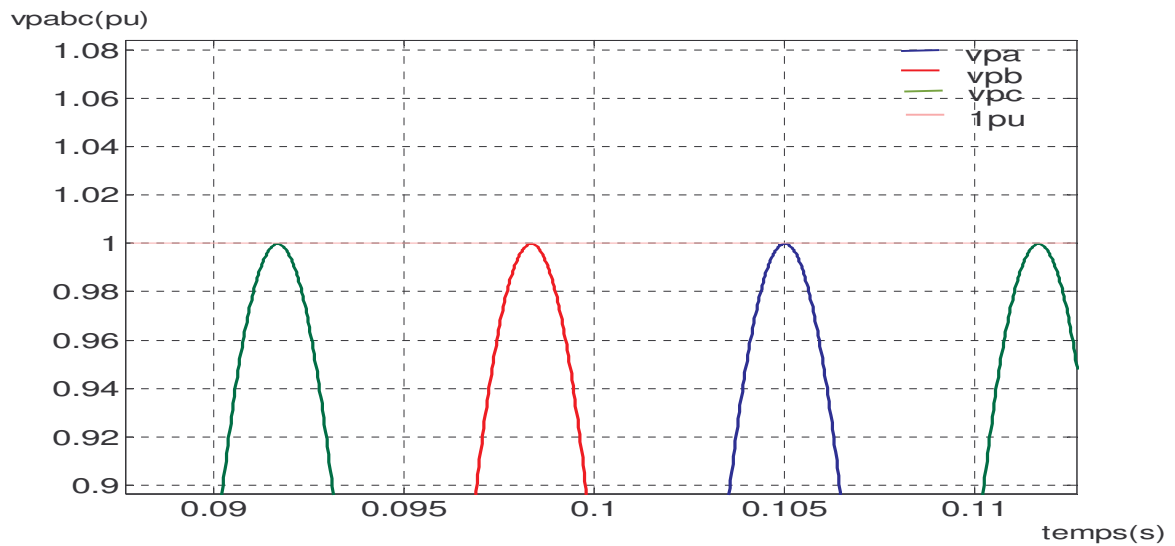


Figure V.6: Agrandissement d'une partie de la figure V.5

L'amplitude de la tension de la source perturbatrice reste sensiblement égale à 1pu.

- Courant de la source perturbatrice :

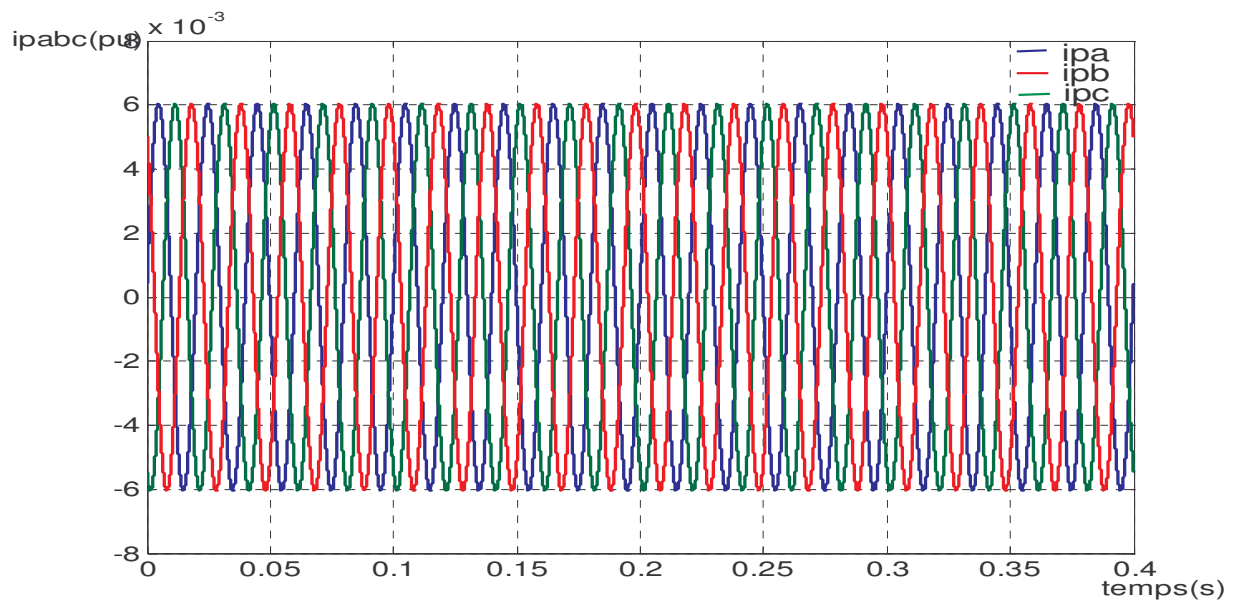


Figure V.7: Courant de la source perturbatrice.

Comme montre la figure V.7 pour un fonctionnement normale, le courant débité par la source perturbatrice s'établit à $6,05 \cdot 10^{-3}$ pu.

V.2- Avec la source perturbatrice :

Toujours avec le schéma de la figure [V.1] on va, cette fois-ci, programmer la source perturbatrice pour varier sa tension à des instants donnés :

- Initialement: la tension à 1pu.
- A $t=0,03$ s : la tension chute à 0,96 pu.
- A $t=0,17$ s : la tension augmente pour atteindre 1,04 pu.
- A $t=0,3$ s : Retour à l'état initial.

La figure qui suit représente la variation d'amplitude de la tension de la source perturbatrice.

- Tension de la source perturbatrice :

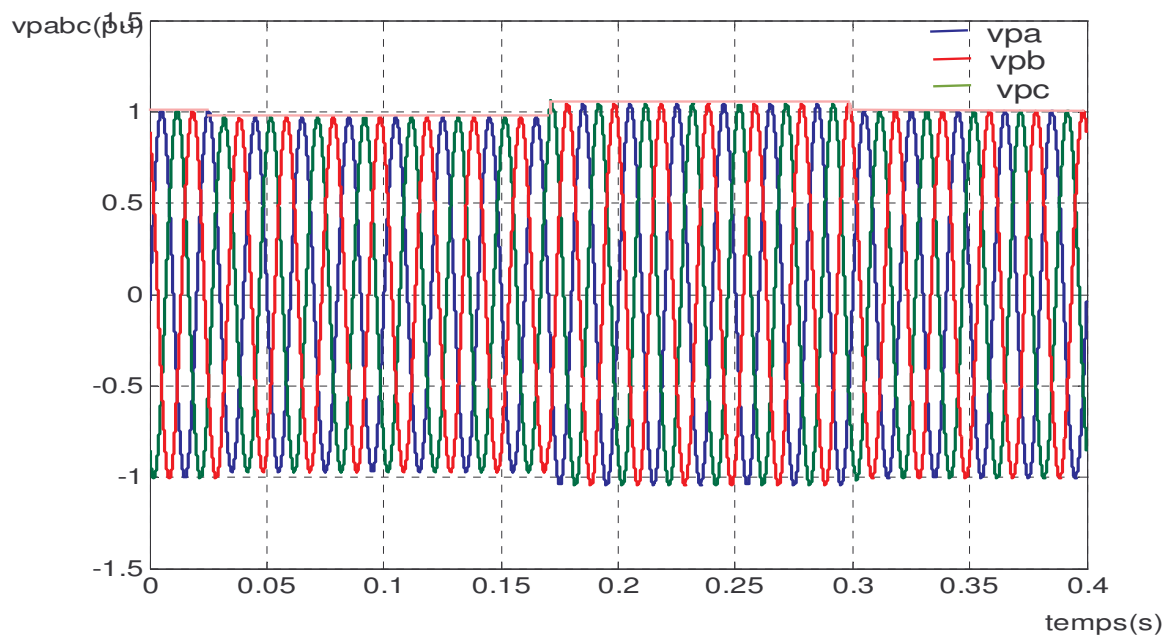


Figure V.8: Tension de la source perturbatrice.

La figure V.8 montre les formes d'ondes de courants débités par la source perturbatrice suivant les variations d'amplitudes de tensions affectant celle-ci.

- Courant de la source perturbatrice :

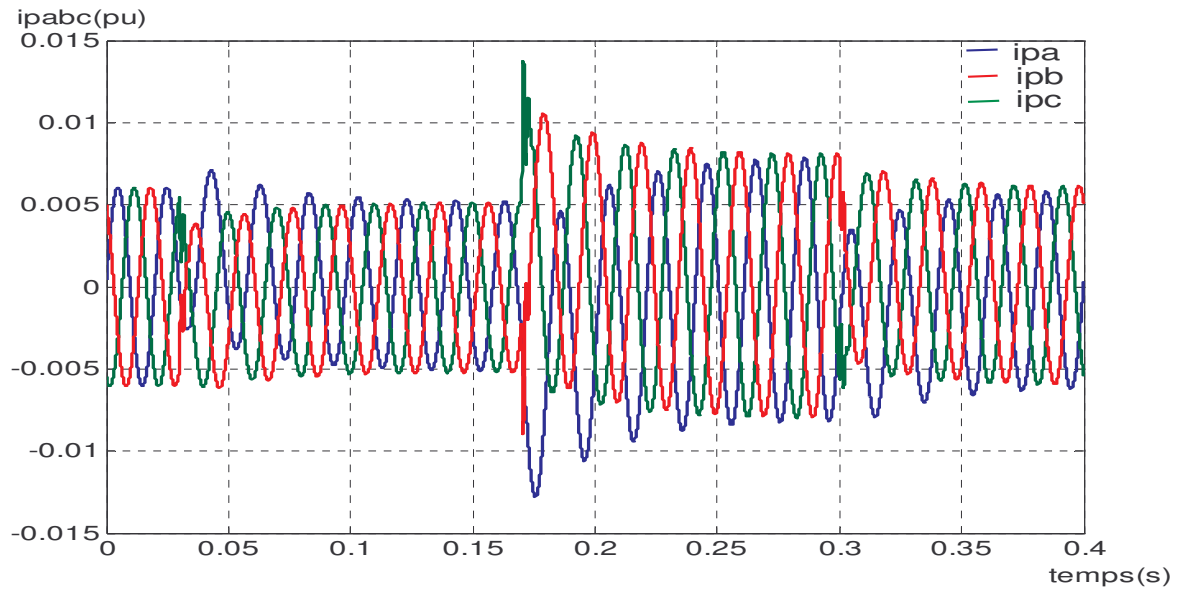


Figure V.9: Courant de la source perturbatrice.

- Tension de la source principale :

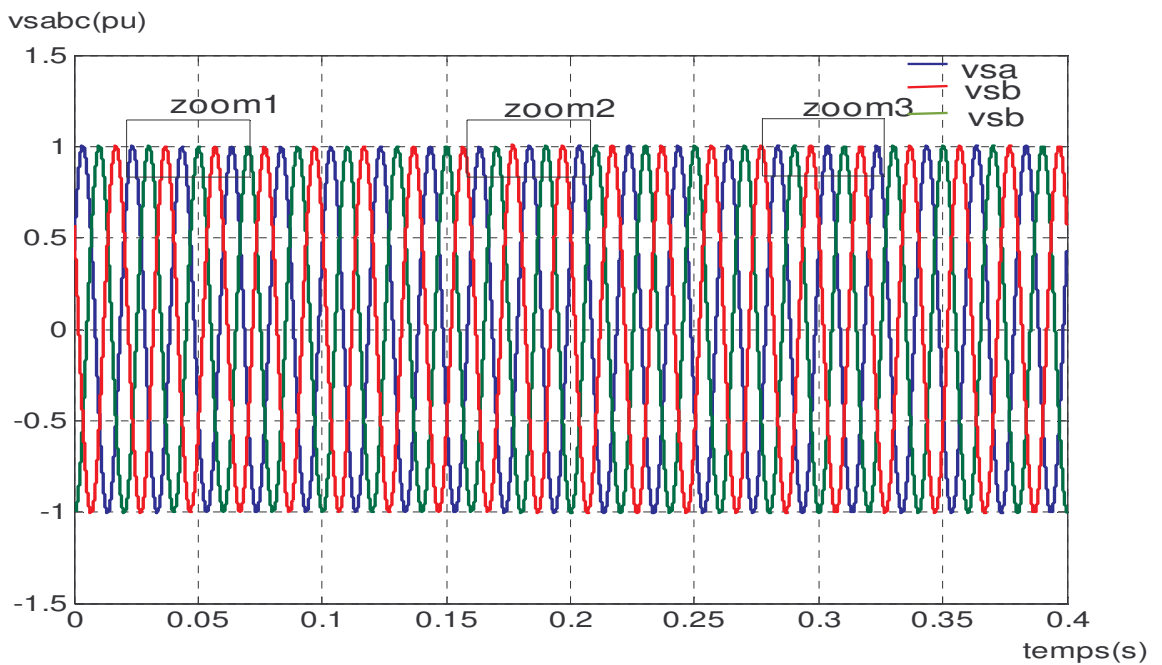


Figure V.10: Tension de la source principale.

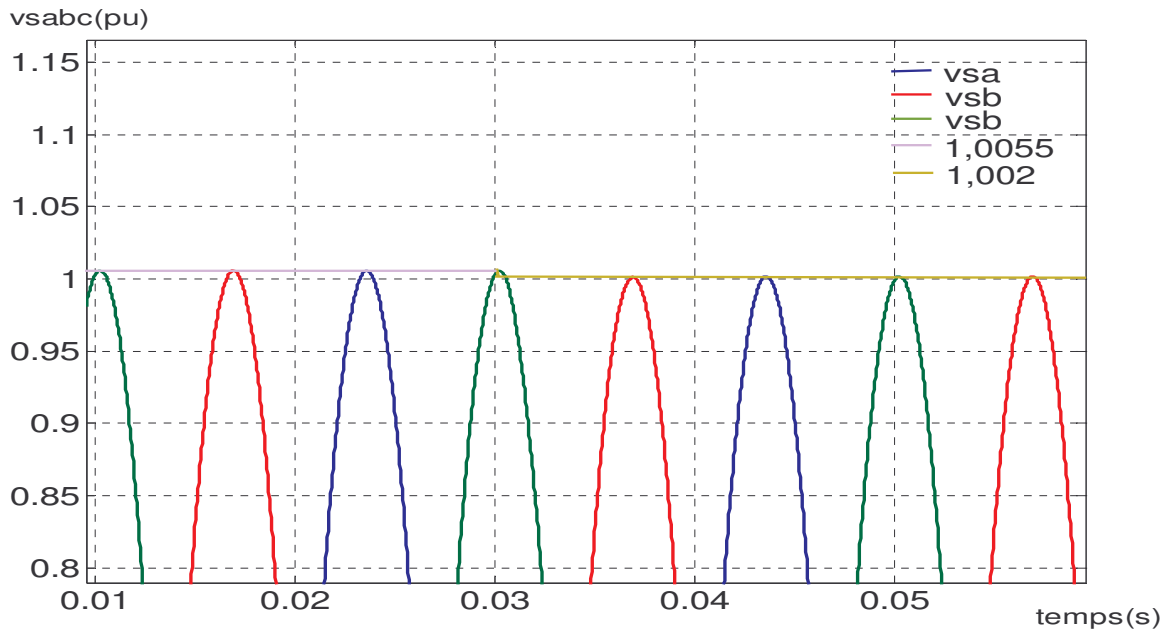


Figure V.11: Agrandissement d'une partie de la figure V.10 –zoom1.

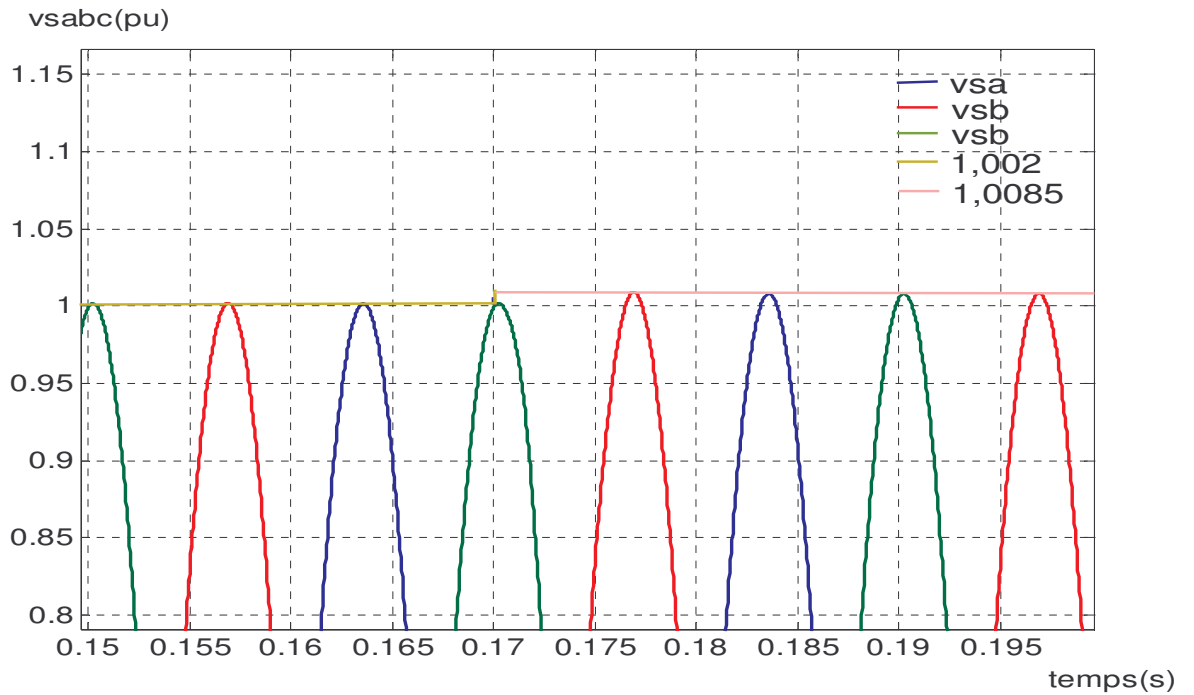


Figure V.12: Agrandissement d'une partie de la figure V.10 –zoom2.

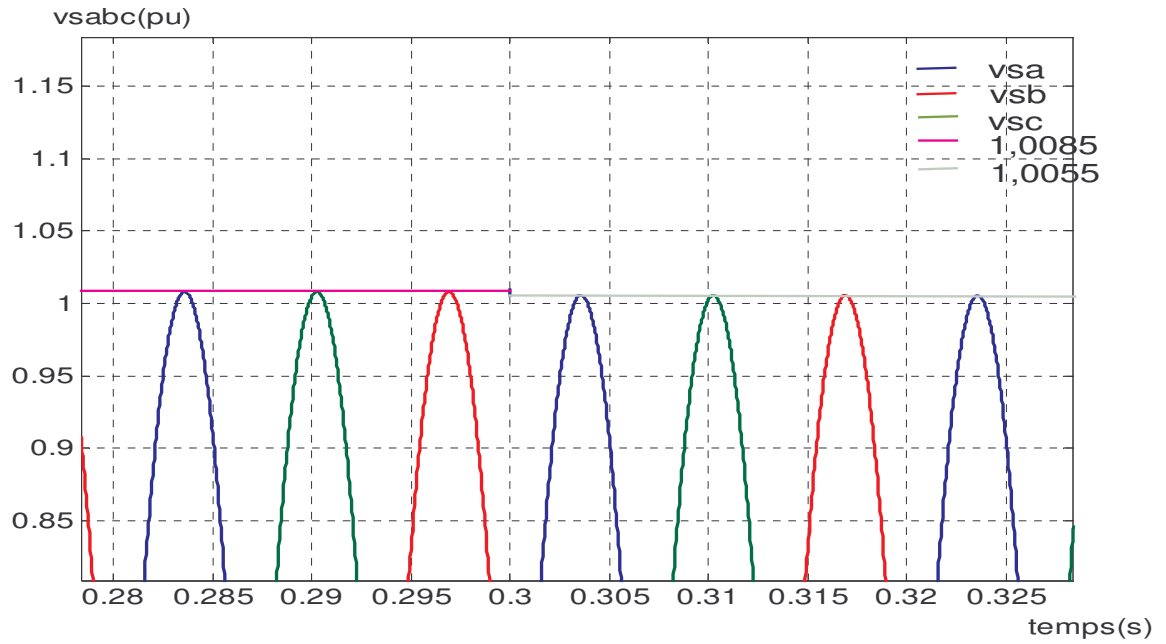


Figure V.13: Agrandissement d'une partie de la figure V.10 –zoom3.

- Courant de la source principale:

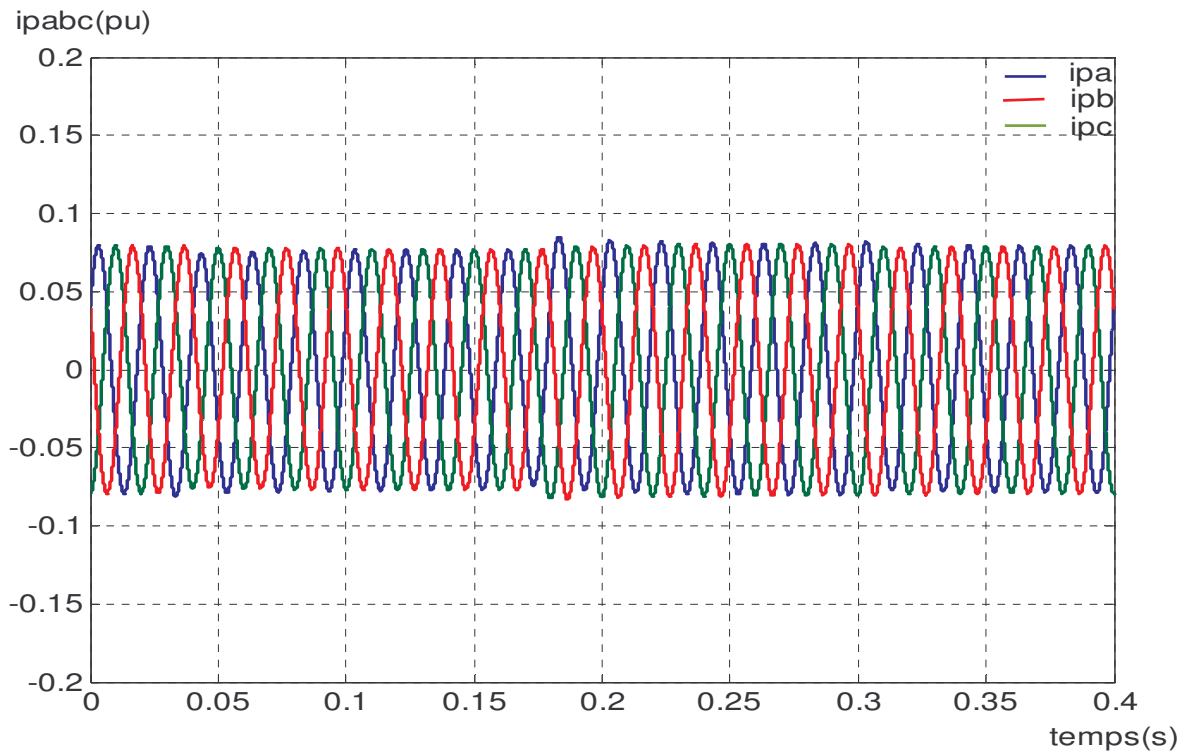


Figure V.14: Courant de la source principale.

V.4- La perturbation avec l'intervention du STATCOM :

Dans cette partie, on fait brancher le STATCOM en shunt par rapport à la source à l'origine de la perturbation. Ensuite, on simule la perturbation (2^{ème} cas) pour voir la réaction du STATCOM vis-à-vis de la chute ou de l'augmentation de la tension dues au bloc que constitue la perturbation.

La figure suivante représente le réseau de base associé au STATCOM.

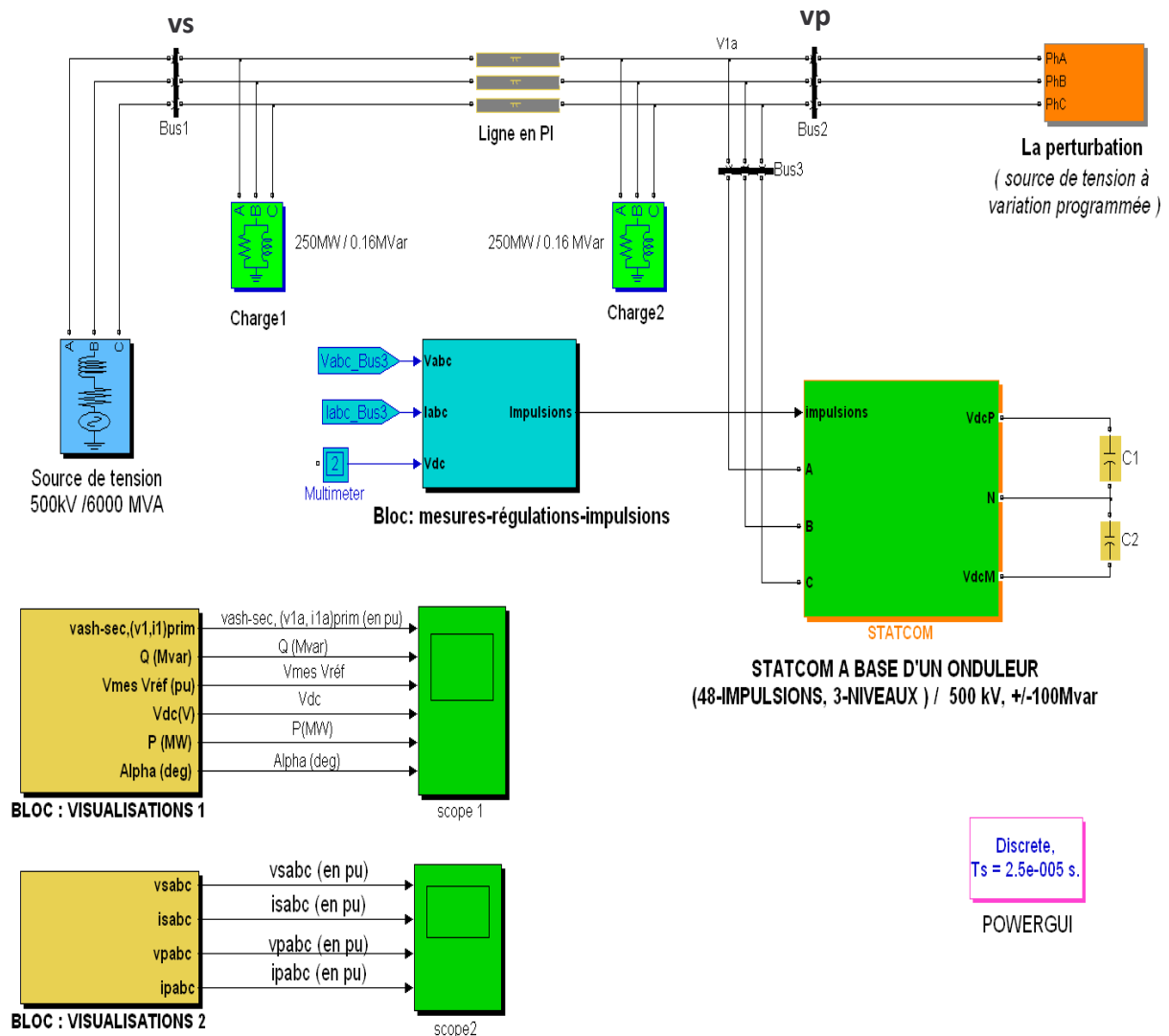


Figure V.15: Le réseau de base associé au le STATCOM.

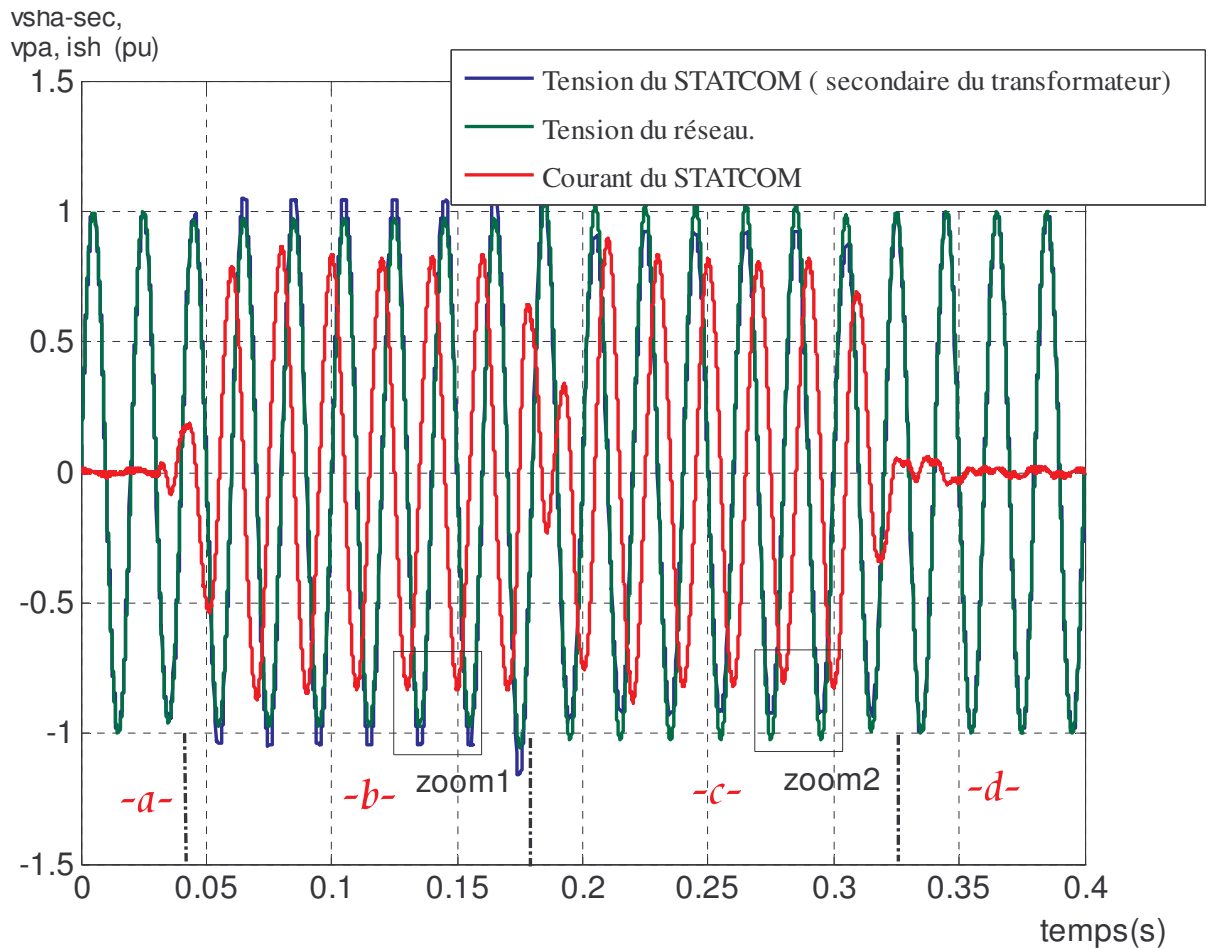


Figure V.16 : Réaction du STATCOM :

- a) Avant la perturbation.
- b) et c) Pendant la perturbation
(Respectivement : capacitif et inductif).
- d) Après la fin de la perturbation.

La figure V.16 montre bien qu'au moment où la tension chute (partie b), le STATCOM réagit par l'injection d'un courant capacitif d'amplitude 0,8 pu au réseau. A $t=0,17s$ (partie c), la tension augmente subitement, le STATCOM réagit par l'injection d'un courant inductif de même amplitude que dans cas capacitif. Quand la perturbation cesse à $t=0,3s$ et que la tension revient à sa valeur nominale, le STATCOM arrête l'injection de courant.

Les figures suivantes montrent en détails tension réseau-STATCOM et du courant de celui-ci pendant les deux marches, à savoir : marche en mode capacitif (Figure V.17) et inductif (Figure V.18)

- Comportement capacitif du STATCOM :

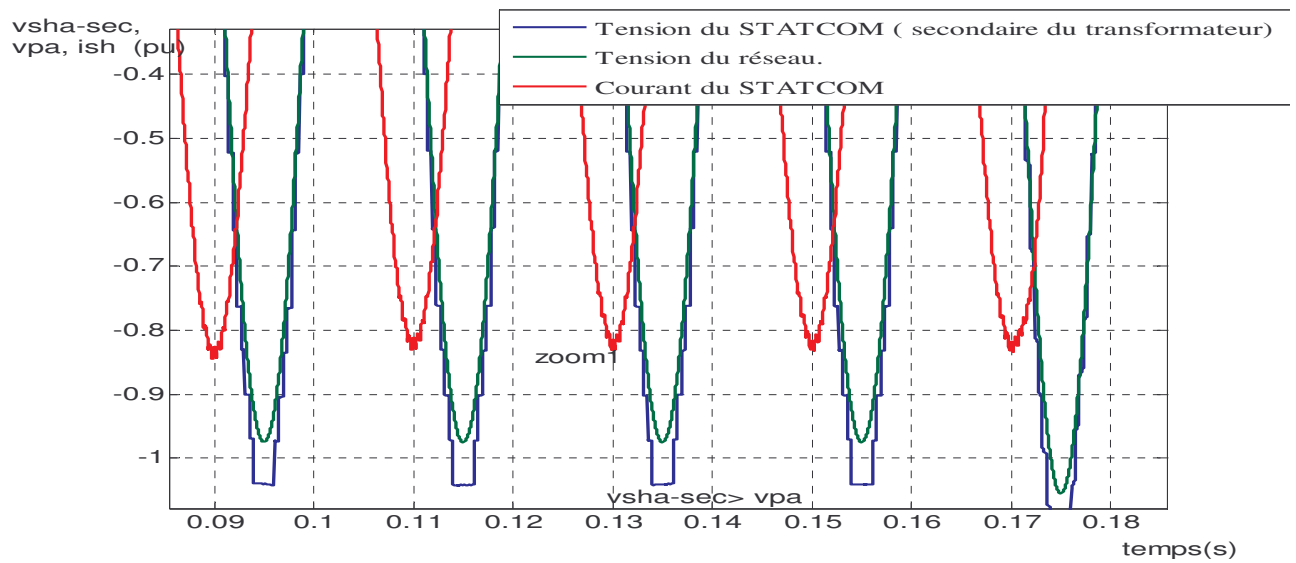


Figure V.17: Détail du comportement capacitif du STATCOM-zoom1

La figure V.17 nous montre que la tension du STATCOM est bien supérieure à celle du réseau. Ce qui correspond à l'injection d'un courant capacitif. La tension réseau se situe à 0,975 pu.

- Comportement inductif du STATCOM :

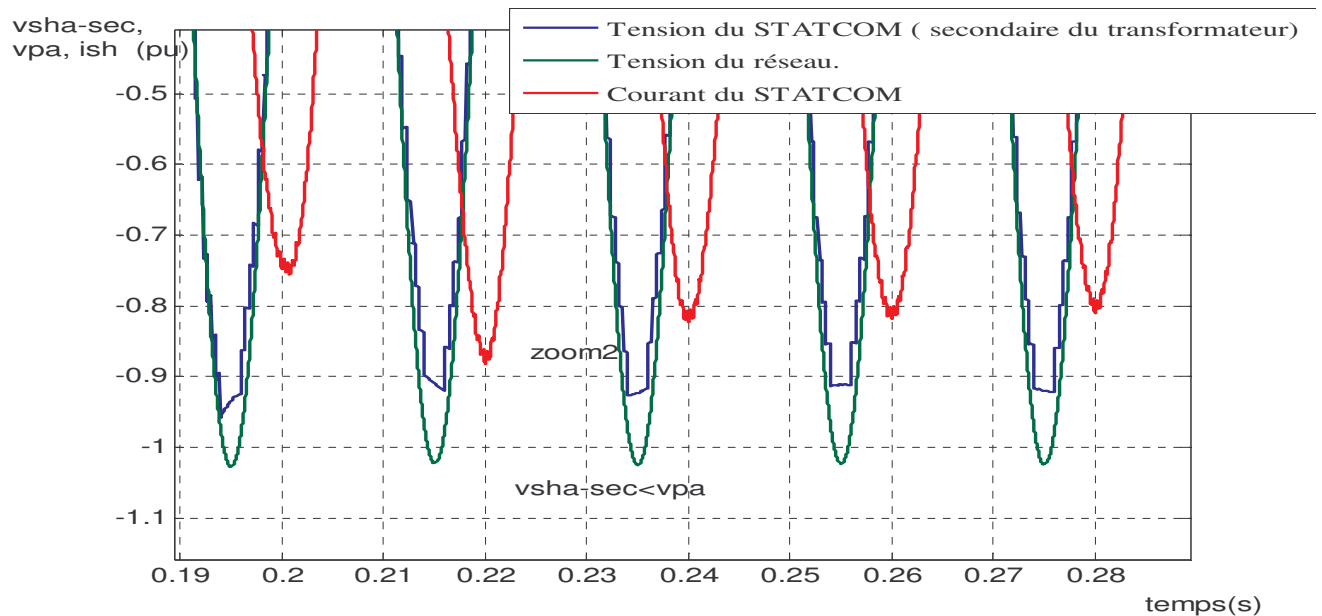


Figure V.18: Détail du comportement inductif du STATCOM-zoom2

Contrairement à la figure V.17, sur la figure V.18 la tension du réseau est bien inférieure à celle du STATCOM. Celui-ci injecte un courant inductif. La tension réseau se situe à 1,025pu

La figure qui suit montre la comparaison en amplitude entre la tension de référence et la tension réelle mesurée au niveau du point de connexion du STATCOM.

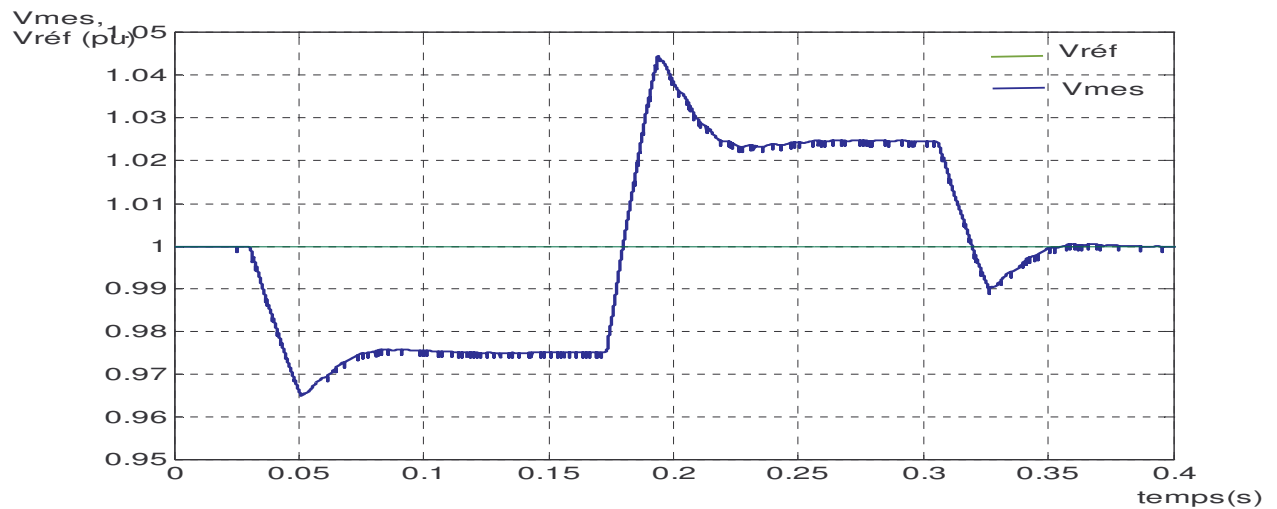


Figure V.19: Tension régulée

La figure V.19 illustre bien comment le STATCOM régule la tension après les perturbations. Quand la tension chute, le STATCOM la ramène de 0,96 pu à 0,975. Quand elle augmente à 1,04 pu, il la ramène à 1,025 pu.

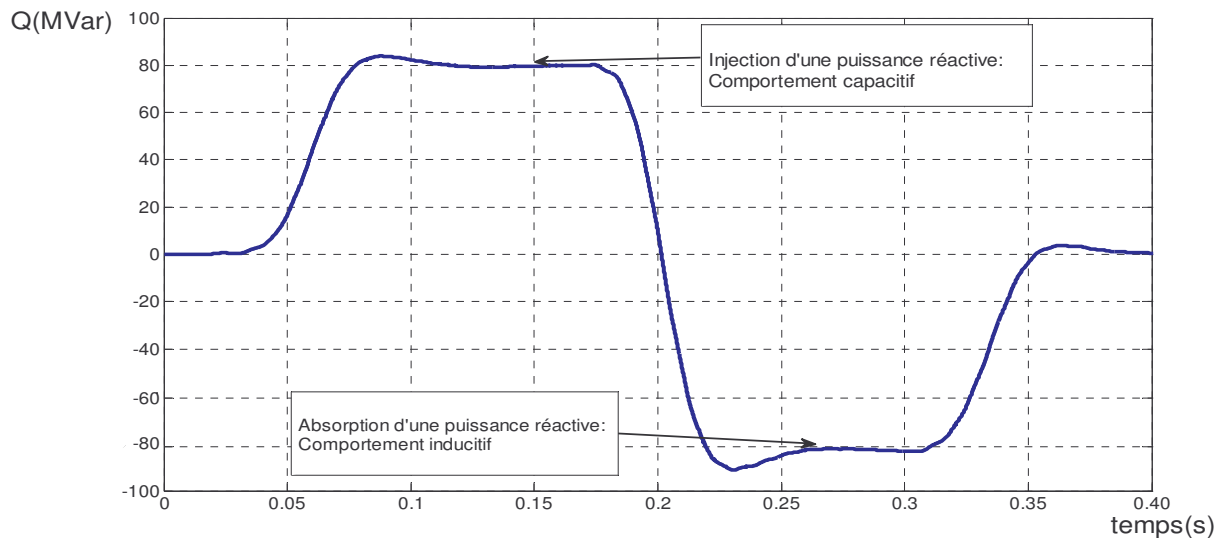


Figure V.20: Puissance réactive du STATCOM.

La figure V.20 montre la puissance réactive injectée ou absorbée pendant les perturbations. Le STATCOM, comme il apparaît, injecte une puissance réactive de 80MVar au réseau quand la tension chute à 0,96 pu pour la maintenir à 0,975 pu. La même quantité est absorbée quand la tension à augmentée pour la maintenir à 1,025 pu.

- Déphasage α_{RST} tension réseau (v_p) - tension générée par le STATCOM (v_{sh-sec}) :

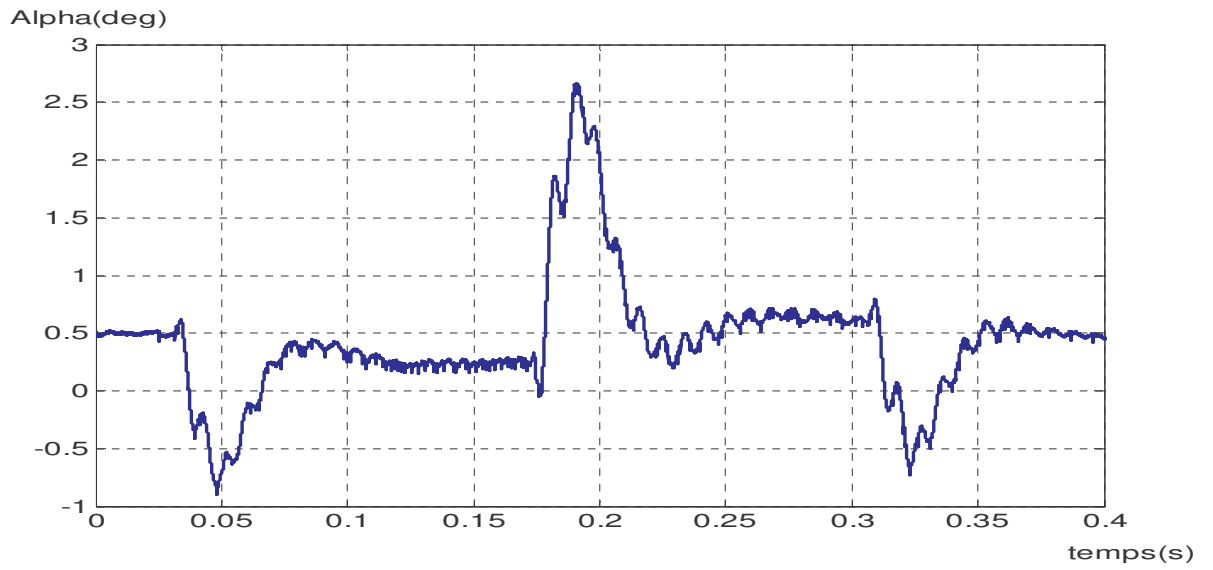


Figure V.21: Déphasage des tensions réseau-STATCOM.

- Tension continue :

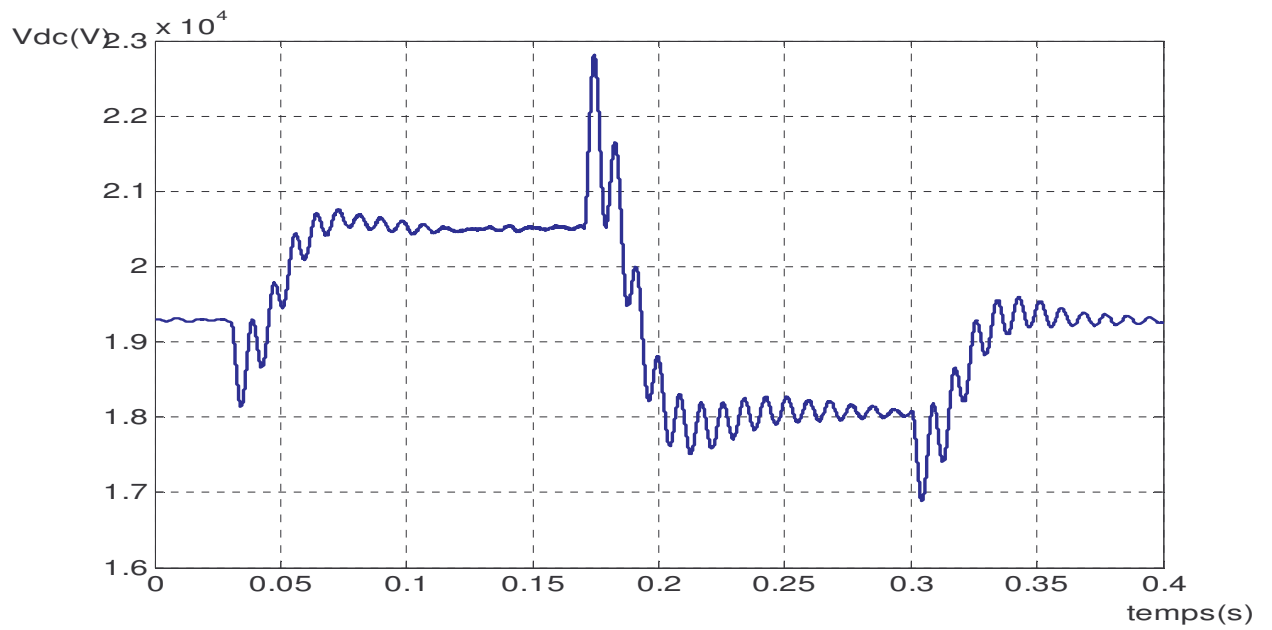


Figure V.22: Tension aux bornes des condensateurs.

- Puissance active du STATCOM :

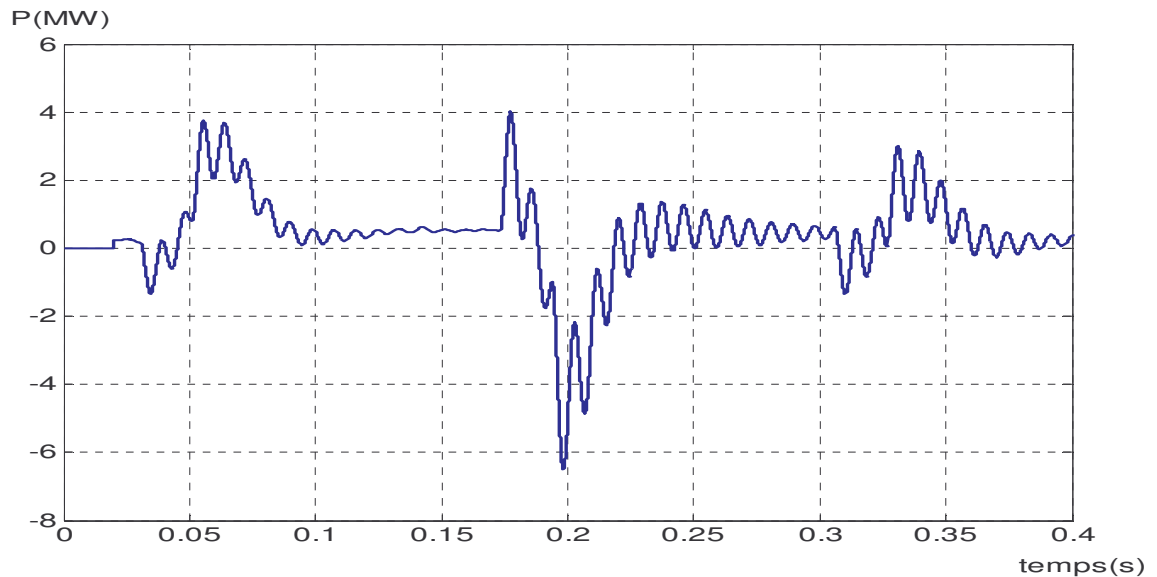


Figure V.23: La puissance active du STATCOM.

Pour maintenir la tension des condensateurs proche de 19,3kV et compenser les pertes des GTO et des quatre transformateurs-déphaseurs, le STATCOM introduit un léger déphasage ($0,5^\circ$) entre sa tension et celle du réseau (Figure V.21) ; sa tension est en retard de $0,5^\circ$ par rapport à celle du réseau, une puissance active de 270 kW est constamment absorbée (Figure V.23).

Quand la tension du réseau chute, le système de régulation du STATCOM rajoute un déphasage de $0,25^\circ$ (Figure V.21) pour s'établir à $0,75^\circ$. Dans ce cas, le STATCOM soutire un surplus de puissance active du réseau de 250 kW (Figure V.23), cela permet d'augmenter la tension des condensateurs et par là la tension générée par le STATCOM (Figure V.17).

Quand la tension du réseau augmente, le déphasage diminue de $0,25^\circ$ (Figure V.21) pour s'établir à $0,25^\circ$. Dans ce cas, le STATCOM absorbe toujours une puissance active du réseau mais elle n'est que de 180 kW (Figure V.23). Cela permet de abaisser la tension des condensateurs et par là la tension générée par le STATCOM (Figure V.18).

Conclusion :

Nous avons, dans ce chapitre, présenté certains modèles appliqués au STATCOM. Le modèle statique est simple mais manque de précision et commet une erreur non négligeable sur le courant pour des variations importantes de la tension du réseau. Alors que le modèle statique n'a pas de limitation de courant pour les zones de surcharges capacitives et inductives, le modèle dynamique limite les courants (capacitif et inductif) et prend en compte la dynamique du convertisseur statique.

Dans le chapitre qui suit, nous simulerons le fonctionnement d'un STATCOM dans un réseau qui subit des perturbations de la tension.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par le système de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible appelée FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge des lignes, sont atteints et performés par l'injection des tensions (ou courants) des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes commandés en ouverture et en fermeture tels que les GTO, IGBT concernant la nouvelle génération de ces systèmes FACTS.

L'augmentation des capacités de transport de l'énergie électrique aux limites thermiques des lignes par les dispositifs FACTS représente une solution précieuse au problème de construction de nouvelles lignes électriques confronté par des contraintes environnementales, écologiques et économiques.

Dans certaines applications, la tension ou le courant dans la ligne de transport sont déformés et contiennent des harmoniques de hautes fréquences, par conséquent un filtrage approprié de la tension et du courant sera nécessaire pour mener à bien le fonctionnement de ces dispositifs, une telle étude peut être un autre champ de recherche qui complétera au futur ce travail.

Le STATCOM, compensateur shunt par excellence, sert à maintenir la tension dans les réseaux électriques mais aussi à augmenter la capacité de transport des lignes de transport. Grâce à la simulation que nous avons effectuée nous avons démontré qu'il peut maintenir la tension sur son point de connexion à des niveaux acceptables à travers une réaction dynamique.

Enfin, Cette étude peut être continuée aussi par une recherche concernant la contribution des systèmes FACTS (en particulier le STATCOM, le SSSC et l'UPFC) dans l'amélioration de la stabilité des systèmes énergétiques surtout dans les conditions de fonctionnement critiques et inattendues tels que les courts-circuits.

BIBLIOGRAPHIE:

- [AN-09]: Mihail Hristov Antchev, “Technologies For Electrical Power Conversion, Efficiency, and Distribution: *Methods and Processes*”
Technical University of Sofia, Bulgaria
Edition: Engineering Science, 2009
- [BO-PA]: Pierre BORNARD et Michel PAVARD, “Réseaux d’interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement”
Technique de l’ingénieur, traité Génie électrique D4 090,
- [CA-01]: Roland CALVAS, “es perturbations électrique en BT “
Cahier Technique Schneider Electric n° 141, édition mai 2001.
- [CI-05] : Gabriel Civrac “ Vers la réalisation de composants haute tension, forte puissance sur diamant CVD. Développement des technologies associées”
Thèse de doctorat.
INP de Toulouse, 5 Novembre 2005.
- [CH]: Bertrand CHARIER, “Qualité de l’énergie électrique et Enseignement de l’Electrotechnique “, Guide Technique.
- [CP-98]: J-C. PASSELERGUE “Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques”
Thèse de doctorat
LEG de l’INPG, France du 26 Novembre 1998.
- [FE-01] : Philippe FERRACCI, “La qualité de l’énergie électrique”
Technique de l’ingénieur, traité Génie électrique n° 199, édition octobre 2001.
- [HI-00]: Narrain G.Hingorani, Laszio Gyugyi, “Understanding FACTS *Concepts And Technology of Flexible AC Transmission System*”
Sponsorisé par IEEE Power Engineering Society.
Edition A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.
- [HA-09] : Haimour Rachida “Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique”
Thèse de Magistère.
ENSET-ORAN.2009
- [GA-06]: Gérard Gay, ”La compensation d’énergie réactive “
Guide Technique, intersection septembre 2006.

[GU-83] : Guy SEGUIER ‘‘L’électronique de puissance’’ 5^{ème} édition
Les fonctions de base et leurs principales applications.
Edition DUNOD 1983

[LO-09] : D.Louardi ‘‘Contrôle de l’écoulement de puissance active par système FACTS’’
Thèse de Magistère 2009.
Université de BATNA.

[MA-02] : R.Mohan Mathur, Rajiv K. Varma ‘‘Thyristor Based-FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems’’
Editions: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION 2002.

[MS-05] : M. S. El-Moursi, A. M. Sharaf ‘‘ Novel Controllers for the 48-Pulse VSC STATCOM and SSSC for Voltage Regulation And Reactive Power Compensation’’
IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 20, NO. 4, Novembre 2005

[RI-98] : Mario ALBERTO Rios ‘‘Modélisation pour analyse dynamique des réseaux électriques avec compensateur de puissance réactive SVC’’
Thèse de doctorat.
LEG de l’INPG, France Septembre 1998.

[OR-05]: Team of Engineering Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ‘‘Power Electronics For Distributed Energy Systems And Transmission And Distribution Applications ’’
The University of Tennessee-Knoxville
ORNL/TM-2005/230

[OT-RTE]: Roger OTT, ‘‘Qualité de la tension, creux et coupure brèves’’
Technique de l’ingénieur, traité Génie électrique D4 262,
EDF recherche et développement avec collaboration de France de CHATEAU VIEUX (RTE).

[PI-06]: G. Pinson , ‘‘ Physique Appliquée, onduleurs’’
ISBN .2006

[PP-97]: Patrice PETITCLAIR ‘‘Modélisation et commande des structures FACTS’’
Application au STATCOM (Static Compensator).
Thèse de doctorat
LEG de l’INPG, France du 16 Juillet 1997

[VA-07]: Vang Heu, ‘‘Optimisation des étapes technologiques pour la fabrication des composants de puissance en SiC’’
Thèse de doctorat.
INSA Lyon- Laboratoire Ampère/ Institut St-Louis, 2007.