République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministere de l'Enseignement Superieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Fares De MEDEA

Faculté des sciences et de la technologie

Département de Génie Eléctrique et de l'Informatique

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Electrique.

***Option** : Automatique des systémes.*

Théme :

Modélisation et commande d'un D-STATCOM

Réalisé par :

- **Remidi Rabah**
- **Messaoudi youcef**

Promoteur :

Dr: Tlemçani Abdelhalim

Co-promoteur:

Dr: Sebaa karim

Année universitaire :

2012-2013

Laboratoire de recherche en electronique et en automatique (LREA)

Remerciements

Ce modeste travail résume la fin de notre formation en vue de l'obtention du Diplôme de Master en automatique des systèmes.

C'est aussi l'occasion, pour nous de remercier toutes les personnes physiques et morales qui ont contribué à sa réalisation.

Nous tenons à remercier en tout et pour tout notre Dieu tout puissant.

Nous tenons aussi fortement à remercier et exprimer notre reconnaissance au Dr TLEMCANI Abdelhalim, promoteur du présent travail, pour avoir accepté de nous encadrer. Ses conseils et observations nous ont été d'une grande utilité ; ses efforts de suivi et son intérêt de voir ce mémoire s'accomplir.

Merci monsieur.

Nos remerciements s'adressent aux Drs : Sebaa et Moulahoum.

On tient à remercier tous les membres de jury, d'honorer par leur présence à l'examen de ce travail

Nos sentiments vont également à tous les personnes qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chères parents, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et

que Dieu les gardes.

A mes sœurs.

A toutes les familles ***Remidi*** *et sur tous le petit fils de mon frère* ***abdelraouf***

Et mon collage ***youcef***

A mes chers amis de mon quartier.

A tous mes amis de près ou de loin sans exception.sur tous ***Khaled zaouak***

A mes chers amis de l'université de Médéa ***Amine Mustapha Abdelmalek***

A tous mes amis de résidence universitaire,

A toute la promotion 2ème années mastère option Automatique des systèmes

Rabah

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chères parents, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et

que Dieu les gardes.

A mon grand père et mon grand-mère.

A mes sœurs.

Amon frère, Sid ali.

A toutes les familles ***Messaoudi****.*

A tous mes amis de près ou de loin sans exception, sur tout Khaled Zaouak.

A mes chers amis de l'université de Médéa, Amine moulouad, Moustapha Rahmani, Abd elmalek Moussaoui.

A tous mes amis de résidence universitaire.

A toute la promotion 2ème années mastère option Automatique des systèmes

** youcef **

ملخص :في الشبكة الكهربائية ذات الجهد المنخفض, اضطرابات التيار والجهد الكهربائيين و رد الفعل لها آثار سلبية على المعدات الكهربائية.
في هذه المذكرة قمنا بدراسة جهازمعدل ثابت الموزعة (D-STATCOM) من ناحية اضطرابات التيار . وبالإضافة إلى ذلك وبهدف تحسين نوعية الطاقة الكهربائية مما يجعلها تتفق مع قيود تنظيمية جديدة قمنا باستعمال وسيلة مراقبة تعتمد على وحدة التحكم النسبي (PI) وهذا الأخير يجعل معدل ثابت الموزعة (D-STACOM) يعوض كل من قوة رد الفعل المطلوبة من قبل الحمل وبالتالي ضمان التشغيل في عامل قوة وحدة الجانب المصدر.

المفتاح :جهازمعدل ثابت الموزعة ' التحكم النسبي.

Résumé : Dans un réseau électrique basse tension, les perturbations du courant et de tension et la puissance réactive ont des effets néfastes sur les équipements électriques.

Dans ce mémoire, nous avons abordé les structures de dispositif FACTS shunt (D-STATCOM, *Distributed STATic COMponsator*) en vue d'étudier la compensation des types de perturbations à courant.
De plus, dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, en la rendant conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous avons également été amené à appliquer une méthode de commande par un régulateur proportionnel intégral (*PI*), cette dernier est rendre le D-STATCOM à compenser la totalité de la puissance réactive demandée par la charge et par conséquent, il assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire coté source.

Les mots clés : Distribution Statique Compensateur, régulateur proportionnel intégrale.

Abstract: In a low-voltage grid, disruption of current and voltage and reactive power have adverse effects on electrical equipment.

In this memory, we discussed the shunt FACTS device structures (D-STATCOM, Distributed Static COMponsator) to study the compensation of current types of disturbances.

In addition, with the aim of improving the quality of electric power, making it consistent with the new regulatory constraints, we were also required to develop and implement a method of control by a

proportional integral (PI) controller, the latter is to make the D-STATCOM to offset all of the reactive power required by the load and therefore, ensure operation at unity power factor source side.

KEY WORDS: Distributed Static Componsator, proportional integral (PI) controller.

Introduction général ……...1

Chapitre I : Perturbation et qualité d'énergie……..3

I.1 Introduction……...4
I.2 Qualité de l'énergie électrique ……..…..5
I.3 Dégradation de la qualité de l'énergie……..6
I.4 Les perturbations……..7
I.4.1 Perturbations harmoniques en courant et en tension…….……..…7
I.4.1.1 Origine des harmoniques…….…..…7
I.4.1.2 Conséquences des harmoniques……...……8
I.4 .2 Déséquilibre du courant et de la tension……..…12
I.4.2.1 Origine du déséquilibre……...12
I.4.2.2 Conséquences du déséquilibre……...……12
I.4.3 Creux de tension……...13
I.4.3.1 Origine des creux de tension……...14
I.4.3.2 Conséquences des creux de tension……...14
I.4.4 Fluctuation de tension (flicker)……..15
I.4.4.1 Origine de fluctuation de tension (flicker)…….15
I.4.4.2 Conséquences de fluctuation de tension (flicker)…….15
I.4.5 Tension et/ou courant transitoire…….16
I.4.5.1Origine du Tension et/ou courant transitoire……...…16
I.4.5.2 Conséquences de la tension et/ou courant transitoire……16
I.5 les solutions pour améliore la qualité de l'énergie……...17
I.5.1 Solutions de dépollution traditionnelles……..……17
I.5.1.1 Dépollution des courants perturbateurs……17
I.5.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices……....20
I.5.2 Solutions de dépollution modernes ……20
I.5 Conclusion……...22

Chapitre II : Généralité sur le D-STATCOM…….23

II.1 Introduction..…….24
II.2 Les Systèmes FACTS……...……..25
II.2.1Concept Générale et Définition…….25
II.2.2 Différentes Catégories des FACTS ……..…..25

II.3 Structure des Principaux Dispositifs FACTS ……....28
II.3.1 Contrôleur parallèles ……..28
II.3.1 .1 SVC (Static Var Compensator).....28
II.3.1.2 STATCOM (STATic COMpensator) ……30
II.3.2 Contrôleur séries ……...32
II.3.2 .1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) ……..33
II.3.2.2 TCSR (Thyristor Controlled Serie Reactor)……... .33
II.3.2.3 SSSC (Static Synchronous Series Compensator)…….34
II.3.3 Contrôleurs hybrides…….35

II.3.3.1 SPS (Static Phase Shifter)……..35
II.3.3.2 UPFC (unified power flow controller) ……...36
II.4 Static Synchronous Compensator (STATCOM) ……...37
II.4.1 Description…… .37
II.4.2Principe de fonctionnement ……... 39
II.4.3 Description en repère tournant …….. .43
II.5 Onduleur de tension à deux niveaux ……....48
II.5.1 Structure générale ……..48
II.5.2Fonction de commutation ……..49
II.5.3 La tension de sortie ……...49
II.5.4 Représentation vectorielle……..... 50
II.5.6 Commande de l'onduleur par MLI vectorielle ……..52
II.5.6.1 Calcul des temps d'applications des vecteurs ……....53
II.5.6.2 Exemple de réalisation du vecteur de référence ……...54
II.5.7 Génération des impulsions de commande……55
II.6 Conclusion……..56

Chapitre III : Modélisation du D-STATCOM ……58

III.1 Introduction ……59
III.2 Modélisation du D-STATCOM ……59
III.2.1 Structure d'un D-STATCOM……..59
III.2.2 Le modèle équivalent du bus continu……60
III.2.3 Modélisation dans le repère (a b c)……61
III.2.4 Modélisation dans le repère (d q)……..63
III.3 Commande du DSTATCOM……64

III.3.1 Synthèse des régulateurs des courants ……..67
III.3.2 Régulateur de tension continue……..……68
III.3.3 Calcule de la référence du courant actif……..70
III.4 Simulations numériques……..71
III.4.1 Les paramètres du système……...71
III.4.2 Résultats de simulation……73
III.5 Conclusion ……77
Conclusion général ……79

Liste des figures

Figure	Désignation	page
Figure (I.1)	caractéristiques des harmoniques	8
Figure (I.2)	Diagramme de Fresnel des puissances	11
Figure (I.3)	Caractéristiques déséquilibre de tensions	12
Figure (I.4)	caractéristiques de Creux de tension	14
Figure (I.5)	caractéristique de variations rapide de la tension	15
Figure (I.6)	Caractéristiques de surtensions transitoires	16
Figure(I.7)	Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage	18
Figure(I.8)	Filtre passif résonnant	19
Figure(I.9)	Filtre passif amorti	19
Figure(II.1)	les catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques	26
Figure(II.2)	structure d'un SVC	29
Figure (II.3)	Caractéristique d'un SVC	30
Figure(II.4)	structure d'un STATCOM	31
Figure (II.5)	Caractéristique du STATCOM	32
Figure (II.6)	Structure du TCSC	33
Figure(II.7)	structure d'un TCSR	34
Figure(II.8)	structure d'un SSSC	34
Figure (II.9)	Structure d'un SPS	35
Figure(II.10)	structure d'un UPFC	37
Figure(II.11)	structure de base d'un STATCOM	38
Figure(II.12)	Schéma équivalant de D-STATCOM	40
Figure(II.13.a)	courbes de courant et de tension de D-STATCOM en mode capacitif	42
Figure(II.13.b)	courbes de courant et de tension de D-STATCOM en mode inductif	43
Figure(II.14)	passage de modèle triphasé (abc) au modèle biphasé (α-β)	44
Figure (II.15)	Diagramme vectorielle des tensions	45
Figure (II.16)	Fonctionnement en mode inductif	47
Figure (II.17)	Fonctionnement en mode capacitif	47

Figure (II.18)	Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux	48
Figure (II.19)	diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux	51
Figure (II-20)	Représentation du vecteur de tension de référence l'onduleur	55
Figure (III.1)	structure du D-STATCOM à deux niveaux	60
Figure (III.2)	schéma du bus continu	61
Figure (III.3)	schéma simplifie du D-STATCOM	62
Figure (III.4)	diagramme vectoriel de la tension du point PCC	63
Figure (III.5)	structure de contrôle d'un D-STATCOM	65
Figure(III.6)	boucle interne de contrôle de courant	66
Figure (III.7)	schéma bloc de régulation de courant	67
Figure (III.8)	schéma bloc de régulation de tension continue	69
Figure (III.9)	détermination de la référence du courant actif i^*_{shd}	70
Figure (III.10)	schéma bloc complet de commande du D-STATCOM	71
Figure (III.11)	schéma unifilaire du réseau étudie	72
Figure (III.12)	courant réactif injecté par le D-STATCOM dans le réseau et sa référence	74
Figure (III.13)	courant actif injecté par le D-STATCOM dans le réseau	74
Figure (III.14)	courant de la première phase injecté par le D-STATCOM et la tension de *PCC*	75
Figure (III.15)	tension du bus continu du D-STATCOM et sa référence	76
Figure (III.16)	composantes actif et réactif du courant de la source	76

Liste des figures

Liste de tableaux

N^0	Désignation	page
Tableau II-1	Type de connexion et applications associées	28
Tableau II.2	Les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α β)	50
Tableau II.3	tempe de commutation pour chaque secteur	54
Tableau II.4	Application des vecteurs d'état suivant le secteur de l'hexagone	56
Tableau III.1	paramètres du système à simuler	72
Tableau III.2	paramètre de transformateur de couplage	73
Tableau III.3	paramètre des régulateurs *PI* .	73

Liste des symboles

i_{abc} : Le courant de l'onduleur.
$i_{sh(abc)}$: Les courants du D-STATCOM.
$i_{sh(\alpha\beta)}$: Les courants du D-STATCON dans le repère (αβ).
$i_{sh(dq)}$: Les courants du D-STATCON dans le repère (dq).
$i^*_{sh(dq)}$: Les courants de référence du D-STATCON dans le repère (dq).
$i_{s(abc)}$: Les courants de la source.
$i_{s(dq)}$: Les courants de la source dans le repère (dq).
$i_{t(abc)}$: Les courants de charge.
$i_{t(dq)}$: Les courants de la charge dans le repère (dq).
i_c : Le courant de la bus continu.
i^*_c : la référence de courant de bus continu.
v_{abc} : les tensions de sortie de l'onduleur.
v^*_{abc} : les tension de référence.
$v_{\alpha\beta}$:les tensions de sortie de l'onduleur dans le repère (αβ).
v_i : le vecteur tension de la sortie de l'onduleur.
v^* : le vecteur tension de référence.
$v^*_{\alpha\beta}$:les projection de vecteur v^* sur les axes (αβ).
v^*_{max} :la valeur maximale de vecteur de sortie .
$v_{sh(abc)}$: les tension de sortie du D-STATCOM.
$v_{sh(\alpha\beta)}$: les tension de sortie du D-STATCOM dans le repère (αβ).
$v_{sh(dq)}$: les tension de sortie du D-STATCOM dans le repère (dq).
$v^*_{sh(dq)}$: les références des tension de sortie du D-STATCOM dans le repère (dq).
$v_{s(abc)}$: les tension de la source.
$v_{t(abc)}$: les tensions de la charge.
$v_{t(dq)}$: les tensions de la charge dans le repère (dq).
v_{dc} : la tension globale du bus continu.
v^*_{dc} : la tension de référence de bus continu.
S : la puissance apparente.
P : la puissance active.
Q : la puissance réactive.
θ : l'ongle de tension du *PCC* .

l_{sh} : l'inductance de filtre.

R_{sh} : la résistance de filtre.

X_{sh} : la réactance de filtre .

l_s : l'inductance de la source.

R_s :la résistance de la source.

l_{ch} : l'inductance de la charge.

R_{ch} : la résistance de charge.

C_{ch} : la capacité de la charge.

l_1, l_2 :les inductances du primaire et de secondaire de transformateur.

R_1, R_2 : les résistances du primaire et de secondaire de transformateur.

m_t : le rapport de transformation du transformateur.

C : la capacité de condensateur du bus continu.

T_{mli} : le période de commutation.

t_i :le temps d'application du vecteur v_i

t_{i+1} :le temps d'application du vecteur v_{i+1}

f_{mli} : la fréquence de commutation.

T_e :la période d'échantillonnage.

f_e :la fréquence d'échantillonnage.

ω : la pulsation électrique.

FP : facteur de puissance.

K :semi-conducteur bidirectionnel.

S : fonction de commutation.

F : fonction de connexion.

S_i : i=1…6 secteur de l'coalisation de vecteur v^*

k_{pdc}, k_{idc} : les gain du régulateur PI de la tension continue.

ω_{ndc} : la pulsation de coupure régulateur PI de la tension continue.

k_{pc}, k_{ic} : les gain du régulateur PI des courant actif et réactif.

ω_{nc} : la pulsation de coupure régulateur PI des courant actif et réactif.

ζ : coefficient d'amortissement.

P : l'operateur de *laplace*.

Abréviations

FACTS : flexible AC transmission Systems.
STATCOM : STATic COMponsator.
D-STATCOM : Distributed STATic COMponsator.
SVC : STATic var COMponsator.

TCSC : Thyristor Controlled Series Capasitor.
SSSC : Static Synchronous Series COMponsator.
SPS : Statcic Phase Shifter.
UPFC : Unefied Power controller.
HVDC : High Voltage Direct Current.
TCR : Thyristor Controlled reactor.
TSC : thyristor Swithed Capasitor.
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transitor.
IGCT : Insulated Gate Commutated.
GTO : Gate Turn-off Thyristor.
AC : Alternative Courant.
DC :Direct Courant.
SVM : Space Vector Modulation.
THD : Total harmonic distorsion.

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences [1]. Durant les dernières années, l'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les systèmes actuels, la cogénération de l'énergie, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité et le respect de l'environnement [2].
Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharge de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux par 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 Currant Transmission Systems* [3].

L'un des dispositifs FACTS les plus connus est le *STATCOM* (*STATic COMponsator*), c'est une source à base de semi-conducteur capable de fournir ou d'absorber d'énergie réactive. La commande de ce dispositif est effectuée pour maintenir la tension de réseau, pour compenser la

puissance réactive ou pour les deux au même temps. Le *D-STATCOM* (*Distributed STATic COMponsator*), destiné pour les réseaux de distribution, réalise les mêmes fonctions que le STATCOM.

L'objectif de ce travail est d'étudier la compétence du *D-STATCOM* à deux niveaux dans la compensation de la totalité de puissance réactive demandée par la charge afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire coté source.

Ce mémoire est consisté en trois chapitres, comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la perturbation et la qualité de l'énergie électrique.

Dans le deuxième chapitre, au premier lieu, nous présentons les dispositifs *FACTS* : leurs définitions et conceptions générales, leurs applications et leurs catégories. Dans le second lieu, nous allons présenter la description de la structure du *D-STATCOM* en détaillant le principe de fonctionnement en modes inductif et capacitif. Et en dernier lieu, nous allons présenter la modélisation et la modulation vectorielle de l'onduleur à deux niveaux.

Dans le troisième chapitre, nous montrons les déférents modèles mathématiques du *D-STATCOM* et la stratégie de commande par des régulateurs *PI,* adopté pour le contrôle des courants actif et réactif, ainsi que la tension de bus continue.

I.1 Introduction :

Le développement croissant des applications de l'électronique de puissance conduit, dans certains secteurs industriels, à une prolifération de convertisseurs statiques. Aujourd'hui, le nombre de ces dispositifs raccordés aux réseaux électriques est en constante progression. Ces convertisseurs statiques apportent une plus grande souplesse et des économies d'énergie par rapport aux solutions antérieures. Ils sont principalement destinés à la conversion et au traitement de l'énergie électrique entre une source (réseau électrique, générateurs synchrone ou asynchrone, batterie, renouvelable, …) et une charge (charge passive, machines alternatives, réseau de bord, …). Le traitement consiste en une modification des caractéristiques électriques liées à la forme d'onde de la source d'énergie électrique, dans l'objectif de l'adapter aux spécifications de la charge. En tenant compte des niveaux de puissance traités, cette modification doit être réalisée avec le meilleur rendement possible [6].

Un convertisseur statique est constitué d'un ensemble d'éléments passifs réactifs qui ne consomment pas de puissance active (inductances, condensateurs), utilisés comme moyens de filtrage ou de stockage intermédiaire d'énergie, et de composants semi-conducteurs utilisés comme interrupteurs de puissance pour gérer le transfert d'énergie. Le fonctionnement en régime de commutation de ces interrupteurs est la raison pour laquelle les convertisseurs statiques se comportent vis-à-vis de la source d'alimentation comme des charges non linéaires. Même si la topologie du convertisseur est généralement invariable, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs provoquent un comportement à impédance variable par rapport à la source d'alimentation. Ainsi, les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux et pour la plupart consomment de la puissance réactive ce qui pose de nombreux problèmes aux réseaux électriques [6].

Partant de ce fonctionnement en commutation, on peut identifier deux sortes de perturbations provoquées par les convertisseurs statiques :

- la première catégorie comprend les émissions d'ondes électromagnétiques. L'amplitude du phénomène est directement liée au

mode de commutation des interrupteurs, au câblage, et à la qualité de blindage ;

• la seconde catégorie comprend les perturbations électriques (en courant et en tension) conduites par les lignes d'alimentation dont l'origine se trouve dans le comportement non linéaire de ces dispositifs. Elles peuvent être classées, suivant la fréquence, en deux familles :

- perturbations conduites haute fréquence (supérieure à 2 kHz) qui peuvent être atténuées par les lignes de distribution ;
- perturbations conduites basse fréquence (inférieure à 2 kHz) dont les différentes techniques de contrôle tentent de les minimiser.

L'objet de ce premier chapitre est d'analyser, dans un premier temps, la qualité d'énergie dans le réseau électrique. Nous présentons également dans cette partie l'origine et les conséquences des perturbations adoptées dans ce domaine. Dans un second temps, nous étudierons les différentes solutions traditionnelles et avancées permettant l'atténuation des effets les plus néfastes.

I.2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [4].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions

sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude,
- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes,
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période..

I.3 Dégradation de la qualité de l'énergie [17, 18]

Les perturbations dégradant la qualité de l'énergie peuvent résulter de:

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

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

Dans ce qui suite nous restreindrons à la présentation de chaque type de ces perturbations ainsi que leurs origines, caractéristiques et leurs conséquences qui permet de dégrader la qualité de l'énergie.

I.4 Les perturbations

I.4.1 Perturbations harmoniques en courant et en tension

I.4.1.1 Origine des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental.

En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. Comme le représente la figure (I.1)

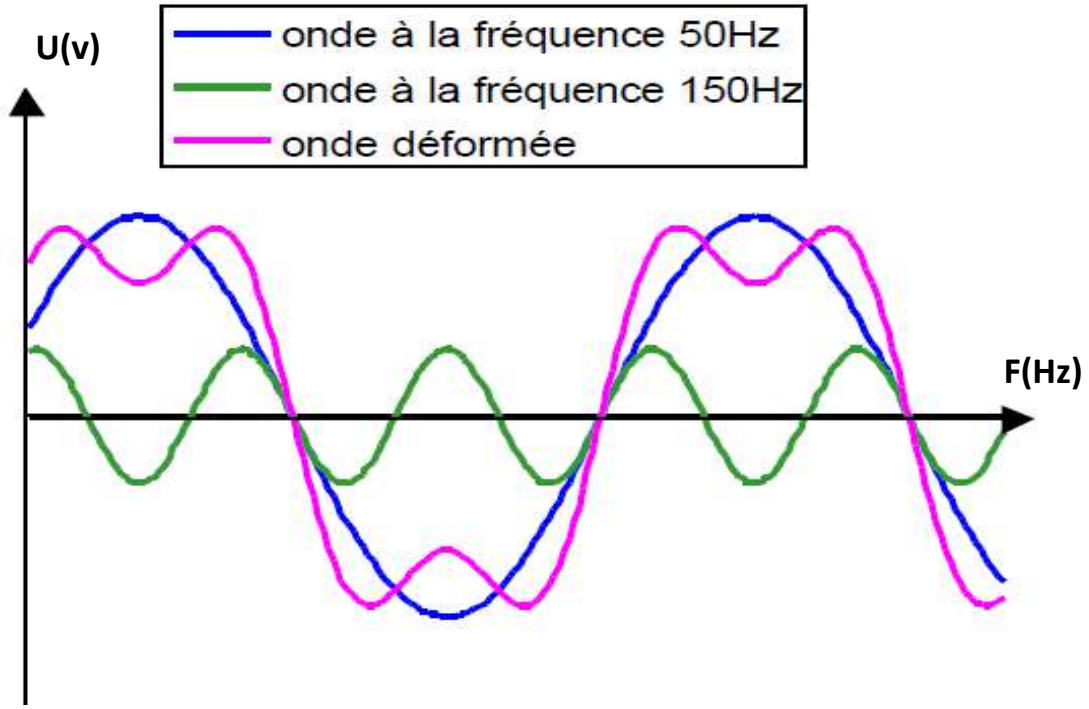


Figure I.1 : Caractéristiques des harmoniques

I.4.1.2 Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance :

- ***L'échauffement*** : Les pertes totales par *effet Joule* sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$I^2.\mathrm{R} = \sum_{h=1}^{\infty} {I^2}_h.\mathrm{R} \qquad \text{I.1}$$

Avec I le courant total, I_h le courant harmonique de rang h qui représente le fondamental pour $h=1$, et R la résistance traversée par le courant I.

Les harmoniques augmentent aussi les *pertes fer* (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...).

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

- ***L'interférence avec les réseaux de télécommunication*** *:*

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable.

- ***Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques :***

En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.

- ***Le risque d'excitation de résonance :***

Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques. Différentes grandeurs sont

définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

- le taux harmonique de rang h *:*

$$S_h = \frac{c_h}{c_1} \qquad \text{I.2}$$

Avec c_h représente la composante harmonique de rang h, C1 représente la composante fondamentale,

- le taux global de distorsion harmonique **:**

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{c^2{}_h}{c^2{}_1}} \qquad \text{I.3}$$

- le facteur de puissance *:*

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active *P* et la puissance apparente *S*. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (*D*), donnée par la relation (I.4), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la Figure (I.2).

$$D = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I^2{}_h} \qquad \text{I.4}$$

Le facteur de puissance (F.P.) devient :

$$F.P = \frac{p}{\sqrt{p^2+Q^2+D^2}} = \cos\varphi_1 \cos\gamma \qquad \text{I.5}$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

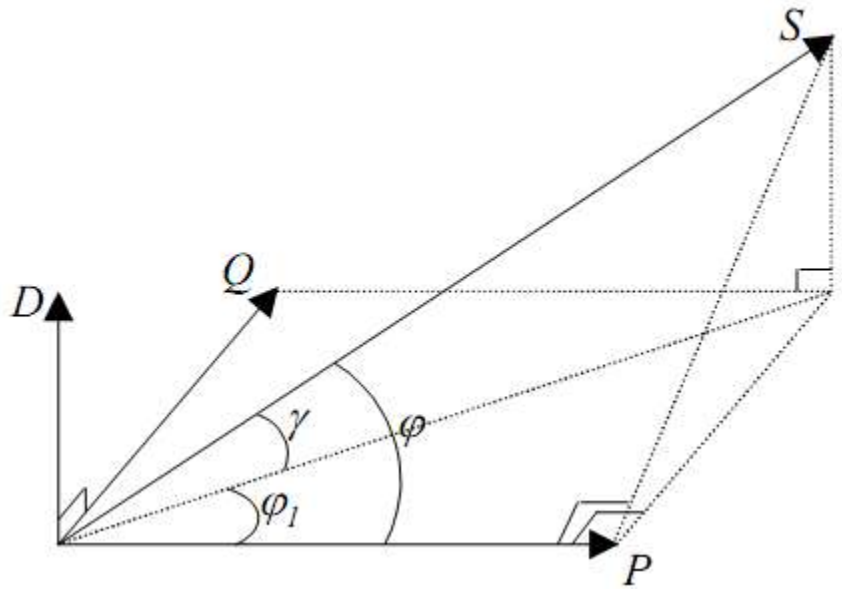


Figure I.2 : Diagramme de Fresnel des puissances

S : Puissance apparente ;

P : Puissance active ;

Q : Puissance réactive ;

D : Puissance déformante ;

Φ : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente ;

γ : Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire S et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S ;

φ_1: Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S;

I.4 .2 Déséquilibre du courant et de la tension

I.4.2.1 Origine du déséquilibre

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. La figure (I.3) représente les caractéristiques de déséquilibre de la tension et de courant

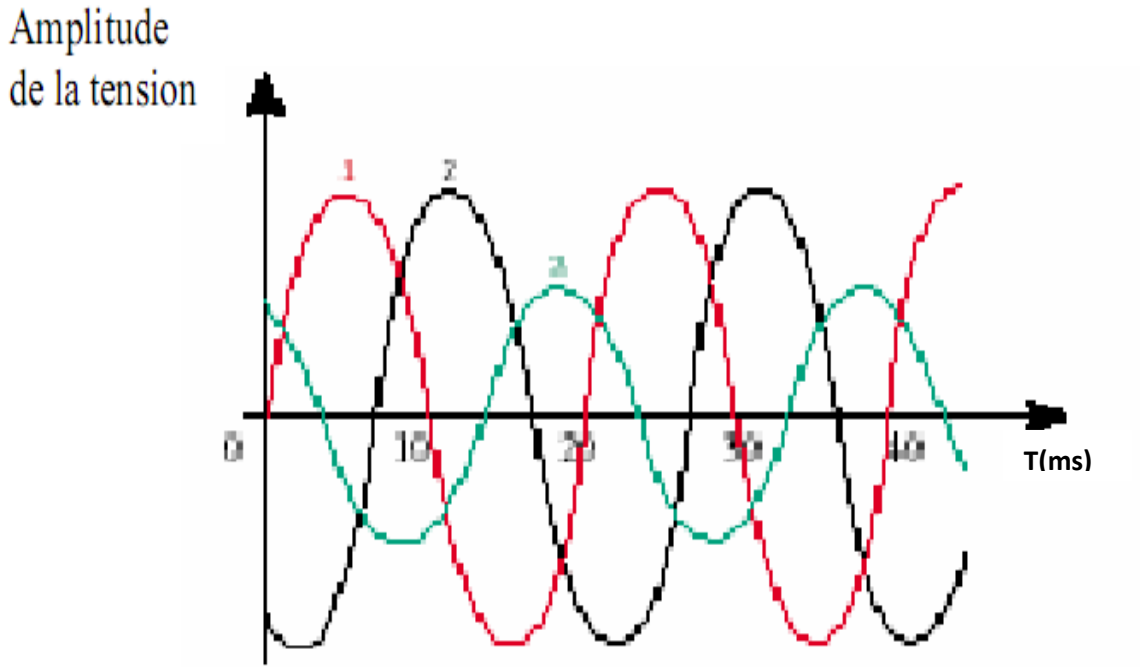


Figure I.3: Caractéristiques déséquilibre de tension

I.4.2.2 Conséquences du déséquilibre

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés :

- Mauvais fonctionnent d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande.

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

I.4.3 Creux de tension

I.4.3.1 Origine des creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture U_f . Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominaleU_n, est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn.[1]

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms.

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

- ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs…etc.),
- ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Comme le représente la figure (I.4).Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

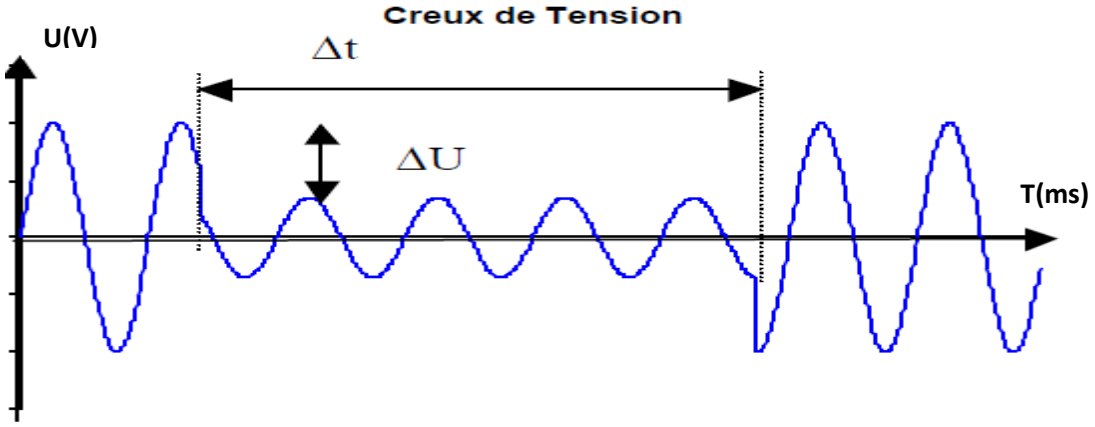


Figure I.4: caractéristiques de Creux de tension

I.4.3.2 Conséquences des creux de tension

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

I.4.4 Fluctuation de tension (flicker)

I.4.4.1 Origine de fluctuation de tension (flicker) [16, 7]

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires figure (I.5), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

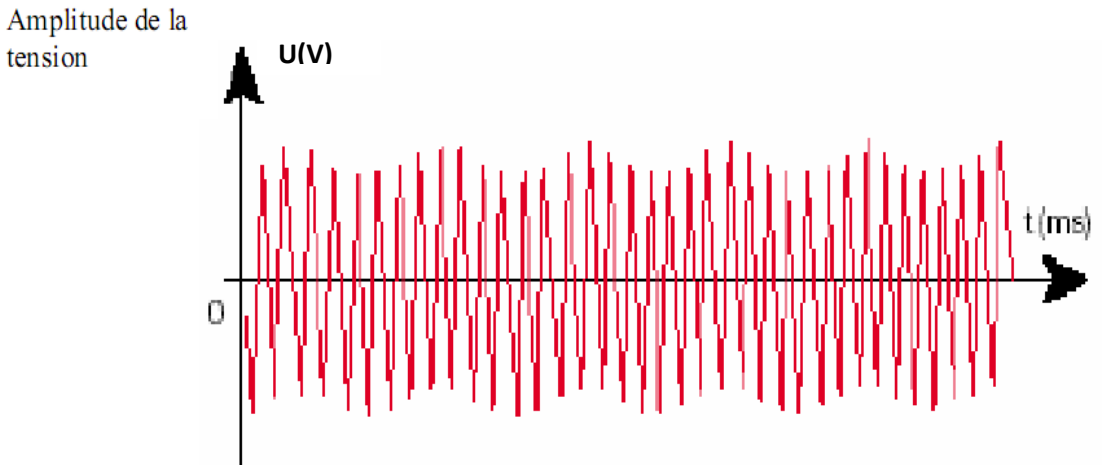


Figure I.5 : caractéristique de variations rapide de la tension

I.4.4.2 Conséquences de fluctuation de tension (flicker)

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 %.

Les premiers à s'intéresser aux conséquences de ce phénomène sont les organismes de santé publique et de sécurité des personnes. En effet, le scintillement d'un éclairage provoque fatigue physique et psychique pour les usagers. Le flicker est d'autant plus important lorsque l'éclairage est situé à proximité d'une charge perturbatrice. De plus, le flicker concerne essentiellement les lampes à incandescence. Il est plus ou moins important selon le type de source lumineuse.

I.4.5 Tension et/ou courant transitoire

I.4.5.1 Origine du Tension et/ou courant transitoire

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure (I.6) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde [2]. Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants/tensions transitoires.

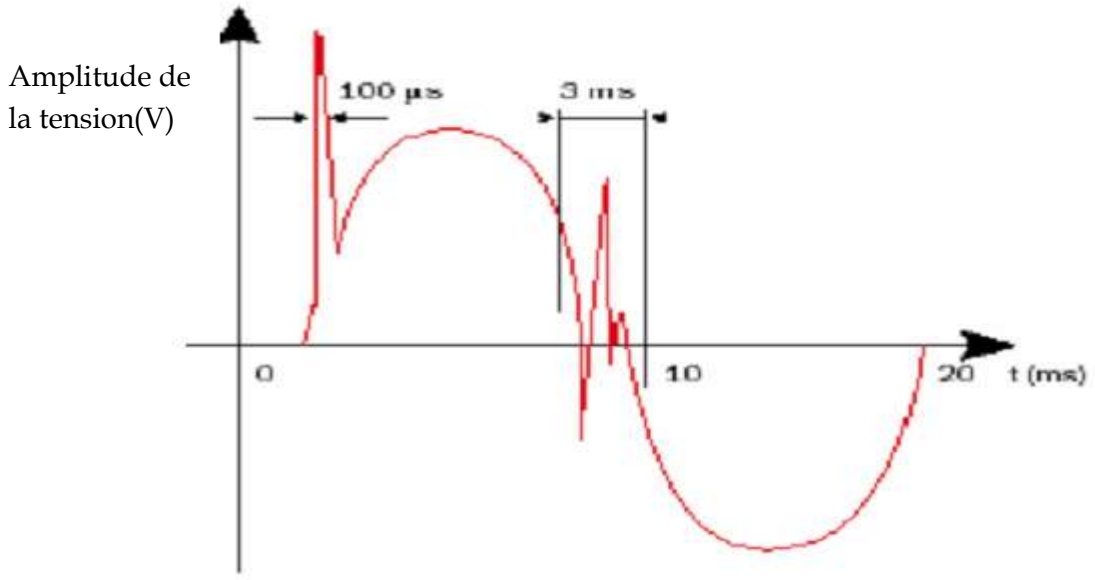


Figure I.6 : Caractéristiques de surtensions transitoires

I.4.5.2 Conséquences de la tension et/ou courant transitoire

Les appareils électroniques peuvent fonctionner de façon erratique. Équipement pourrait se bloquer ou produit des résultats incohérents. Ces types de perturbations peut être difficile à diagnostiquer parce que la spécification incorrecte et l'installation des équipements de suppression de tension transitoire peut en fait augmenter les incidents de défaillance.

Les appareils électroniques peuvent fonctionner selon des rendements diminués. Dommage n'est pas facilement visible et peut provoquer des défaillances prématurées des appareils concernés. Inhabituellement haute fréquence des défaillances dans les alimentations électroniques sont le symptôme le plus commun.
Circuits intégrés (parfois appelés "puces électroniques") peut échouer immédiatement ou une défaillance prématurée. La plupart du temps, l'échec est attribué à «l'âge de l'équipement". Appareils électroniques modernes fourni une énergie propre et filtrée devrait durer plus longtemps que les dispositifs mécaniques qu'ils contrôlent.

I.5 Les solutions pour améliore la qualité de l'énergie [5]

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, on a proposé deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées. L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif sera détaillée par la suite.

I.5.1 Solutions de dépollution traditionnelles

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées.

I.5.1.1 Dépollution des courants perturbateurs

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

- **Rééquilibrage des courants du réseau électrique**

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées

mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La Figure(I.7) montre ce compensateur, appelé *montage de Steinmetz*. Ce montage permet de présenter à *50 Hz* une impédance équilibrée. Cependant, le *montage de Steinmetz* provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de *50 Hz*, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques.

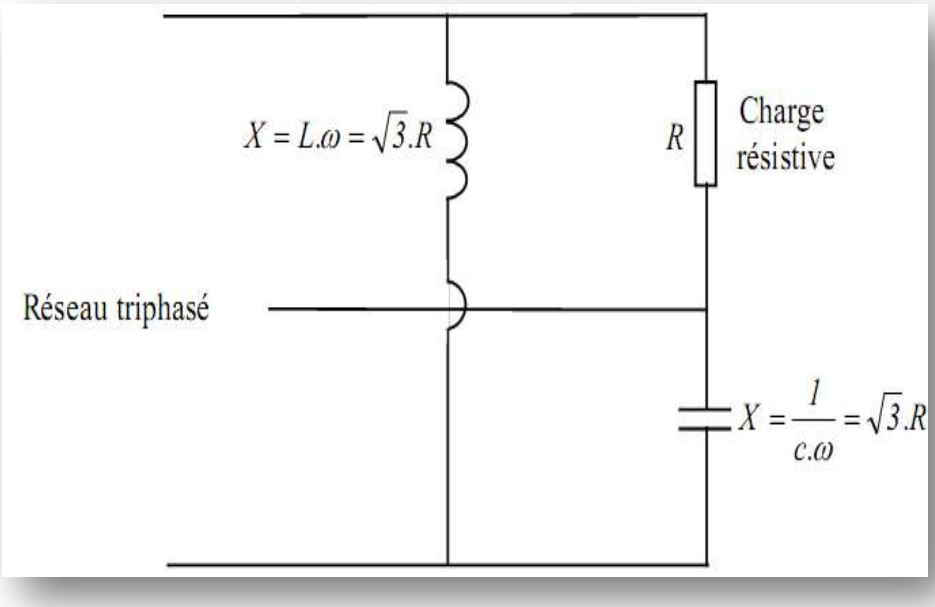


Figure I.7 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

- **Compensation de la puissance réactive**

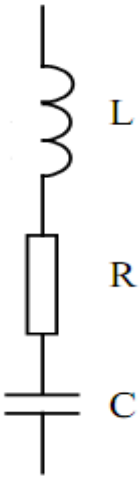
La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les

condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

- **Compensation des courants harmoniques**

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :
- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant Figure (I.8) et le filtre passif amorti ou passe-haut Figure(I.9).



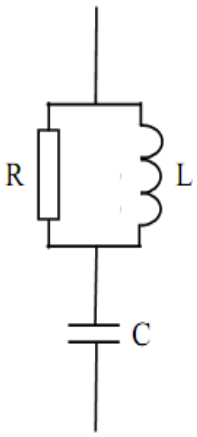


Figure I.8 : Filtre passif résonnant **Figure I.9 :** Filtre passif amorti

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,

- équipements volumineux,

- problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

I.5.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.
Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.
Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels…etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.
Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

I.5.2 Solutions de dépollution modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

- **Dépollution des tensions perturbatrices**

D'autres solutions modernes pour la compensation des creux de tension se basent sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASIs (Alimentation Sans Interruption).

Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

Afin de réaliser une solution flexible universelle de dépollution de toutes les perturbations de tension des réseaux électriques, une famille de dispositif FACTS séries (Static **V**ar **C**OMponsator SVC) a été proposée.

- **Dépollution des courants perturbateurs**

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché. Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de dispositif FACTS shunt (D-STATCOM, *STATic COMponsator*)a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant, cette derrière est l'objectif de notre projet pour bien comprendre voire dans les chapitres suivants.

I.5 CONCLUSION

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau.

Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

Dans ce chapitre, nous avons vu l'origine, les conséquences qui s'appliquent au phénomène des perturbations sur les réseaux électriques. Cette pollution est principalement causée par la présence croissante des convertisseurs statiques qui sont vus par le réseau comme des charges non linéaires. Les dommages causés par la présence des harmoniques peuvent être plus ou moins importants selon la configuration du réseau et les équipements présents.

II.1 Introduction

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institue) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques.
Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux. Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories suivantes [3] :

- les compensateurs parallèles
- les compensateurs séries
- les compensateurs hybrides (série - parallèle)

Dans la première partie de ce chapitre, nous introduisons quelque dispositif FACTS et citons le rôle important qu'ils jouent dans l'exploitation et la gestion des réseaux électrique, en donnant pour chacun d'entre eux sa configuration, son principe de fonctionnement et ses applications et puis la description de la structure de dispositif D-STATCOM, une explication en détail des principes de leurs fonctionnements et puis la contribution de ce dernier et son effet dans le contrôle des réseaux électrique est montrée. Et ensuite, on présente la structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux et sa commande afin d'introduire les grandeurs nécessaires à la compréhension du manuscrit.

II.2 Les Systèmes FACTS :

II.2.1 Concept Générale et Définition :

D'après IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers)*, FACTS qui est l'abréviation de «Flexible AC Transmission Systems» est défini comme suit: Les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes [8]. La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau : tension, impédance, déphasage …etc. Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie [2],[3].

II.2.2 Différentes Catégories des FACTS [3]

Le tableau de la figure (II.1) représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitues de composant de base R, L et C et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

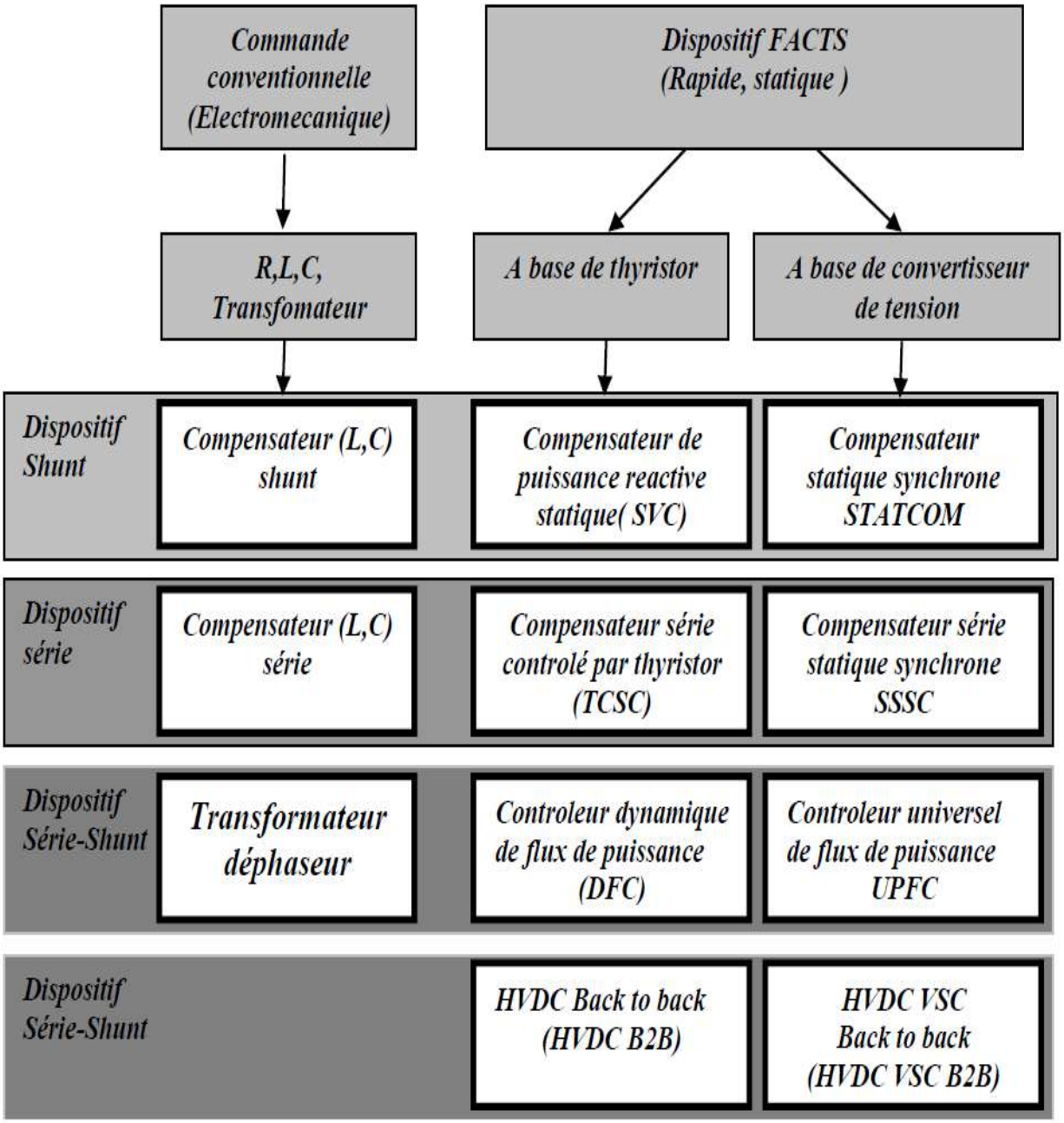


Figure II.1 : les catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de

compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.
Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gâte Bipolaire Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gâte Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle.
Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau, en général les FACTS sont divisés en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries:**

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission [3].

- **Compensateurs shunts:**

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquence contrôler de tension des nœuds [2], [3].

- **Compensateurs hybrides série-shunt:**

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie [2].

Le tableau suivant montre les applications des systèmes en fonction de leur type de connexion et du type de réseau.

Type de connexion	applications
série	Réduction des creux et déséquilibres de tenions, Compensation harmonique de tension, Réglage d'impédances de ligne et de flux de puissance …
shunt	Filtrage actif de courant, réglage de plan de tension, Compensation de réactif, soutien de réseau, Réduction de l'effet de Flicker, équilibrage de charge…

Tableau II.1 : Type de connexion et applications associées.

II.3 Structure des Principaux Dispositifs FACTS

II.3.1 Contrôleur parallèles

II.3.1 .1 SVC (Static Var Compensator) [8]

La structure de base de ce contrôleur est l'association des dispositifs TCR et TSC en parallèles connectés au réseau à travers un transformateur de couplage figure (II.2)

- TCR (Thyristor controlled reactor): c'est une réactance en série avec un gradateur, sa valeur est continuellement variable selon l'angle d'amorçage des thyristors.

- TSC (Thyristor swithed capacitor): des capacités commandées par thyristors fonctionnant en pleine onde.

Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud

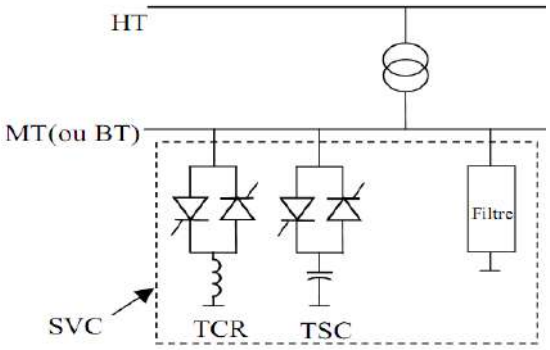


Figure II.2 : structure d'un *SVC*

Les compensateurs statiques de puissance réactive (*SVC*) permettent de stabiliser la tension de réseau à la valeur de consigne. La tension mesurée est comparée avec la valeur de référence. Si la tension changée à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau, l'erreur est détectée par le système de commande. Celui – ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, en sélectionnant le nombre approprie de condensateur ou d'inductance a mètre en service et la valeur de l'angle d'amorçage α des thyristors. Ce ci a pour effet d'améliorer la qualité de service et contribue à l'amélioration de la stabilité du réseau l'action rapide des thyristors fait que le temps de réponse du compensateur statique (*SVC*) est très court [10].

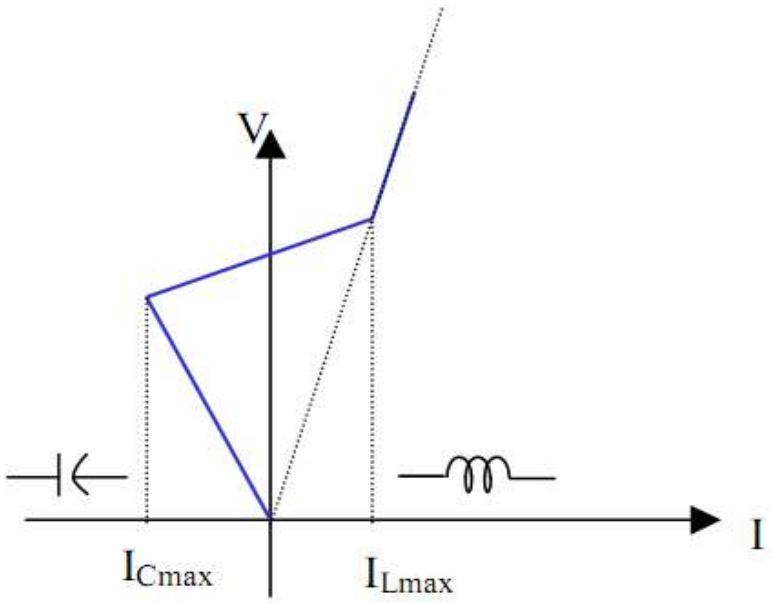


Figure II.3 : Caractéristique d'un SVC

Les courants qui circulent dans l'inductance et dans le condensateur sont réglés de façon continue par les thyristors. En pratique, l'effet inductif du *SVC* est petit par rapport à son effet capacitif. La figure (II.3) représente la caractéristique tension – courant du *SVC*. Si on débranche le condensateur du compensateur statique le courant dans les inductances est alors à sa valeur maximale. La droite le montre la relation entre la tension V et la courant I lorsque l'inductance est débranchée et que le condensateur est en service, on donne au courant capacitif le signe (-) pour le distinguer du courant capacitif.

II.3.1.2 STATCOM (STATic COMponsator)

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage Figure (II.4). Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone; et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques tel que sa dynamique rapide et son faible coût

d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones [2],[3].

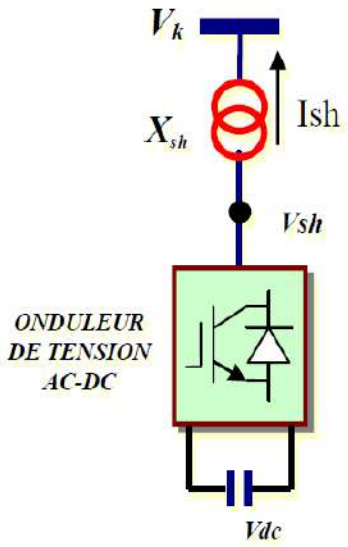


Figure II.4 : structure d'un STATCOM

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (II.5). Ce dispositif a l'avantage, contrairement au SVC, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension V_k diminue [3].

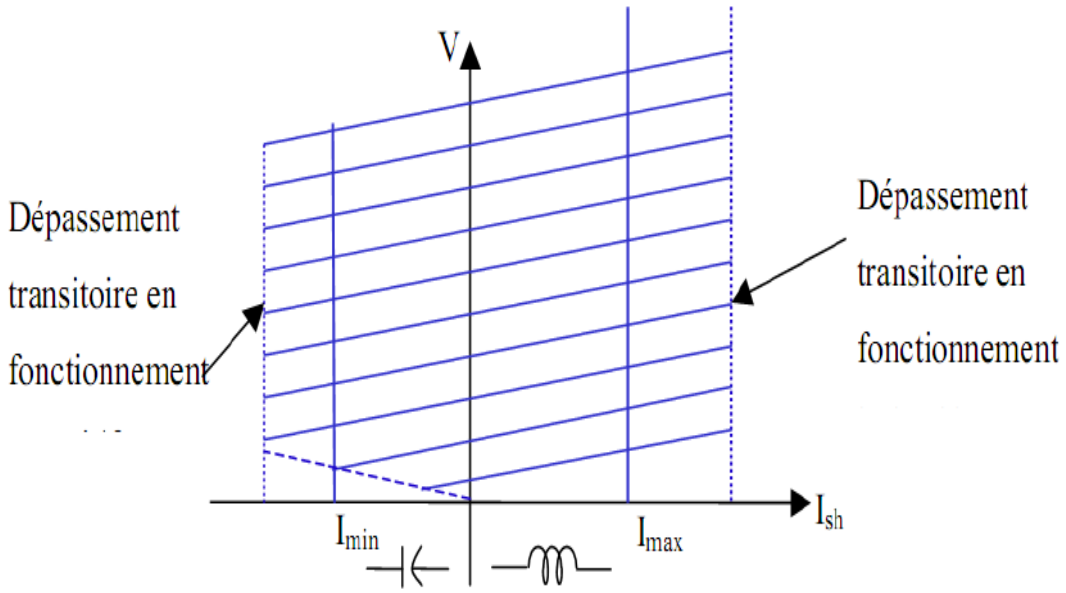


Figure II.5 : Caractéristique du STATCOM

Les principales applications des compensations shuntes sont [10] :

- soutien de la tension en régime permanent
- compensation rapide de la puissance réactive
- stabilisation statique et transitoire de la tension
- réduction de risques de résonance hypo-synchrone
- équilibrage dynamique décharge
- amélioration de la stabilité synchrone

II.3.2 Contrôleur séries

Dans cette catégorie Le compensateur série commuté par thyristors (TCSC: thyristor controlled séries COMponsator) est un FACTS série, utilisé dans le réseau sous forme d'éléments variables, et réglables très rapidement au moyen des thyristors. Il sert surtout à répartir des flux de puissances entre les lignes parallèles et améliorer la stabilité transitoire d'alternateurs, en modifiant la réactance globale de la ligne où il est installé. Le circuit est shunté

par un disjoncteur. Les différents types de compensateurs série utilisés aujourd'hui sont [11] :

II.3.2 .1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, tout en parallèle avec un condensateur.

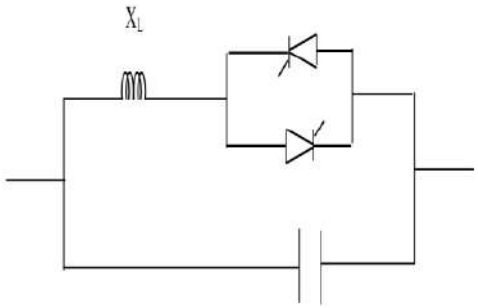


Figure II.6 : Structure du TCSC

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance

II.3.2.2 TCSR (Thyristor Controlled Serie Reactor)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180°, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_t agit comme un limiteur de courant de défaut.

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

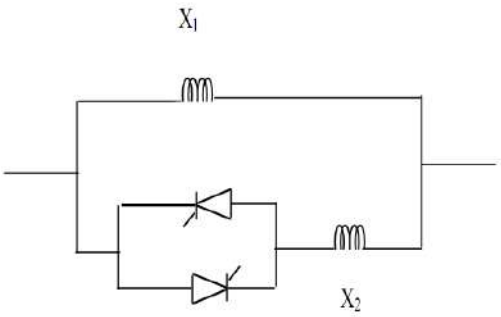


Figure II.7 : structure d'un TCSR

II.3.2.3 SSSC (STATic Synchronous Séries COMponsator)

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduire dans la ligne.

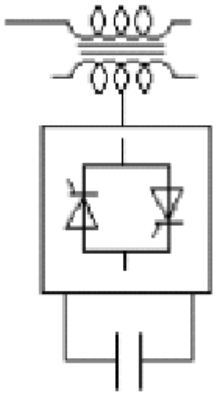


Figure II.8 : structure d'un SSSC

Les principales applications des compensations série sont [10] :

- L'augmentation de transit de puissance sur les lignes.
- La compensation du déséquilibre de courant de charge.
- L'amélioration de stabilité dynamique.
- La réduction des risques de résonance hypo-synchrone.
- L'interconnexion des réseaux.
- La stabilisation de tension.

II.3.3 Contrôleurs hybrides :

II.3.3.1 SPS (Static Phase Shifter):

Le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les anciens transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle, la figure (II.9) donne un schéma de principe de ce dispositif [3].

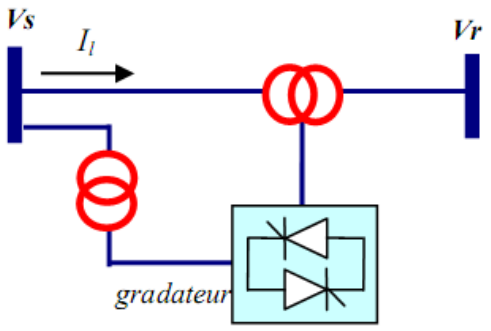


Figure II.9 : Structure d'un SPS

Ce dispositif varie l'angle de phase de la tension aux extrémités de la ligne; son principe est basé sur l'injection d'une tension en quadrature avec la tension de l'extrémité de la ligne à déphaser. Cet équipement permet aussi un contrôle rapide du flux de la puissance active. Ce système ne consomme pas l'énergie réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockées dans les batteries de

condensateur il a l'aptitude de contrôle à la fois la puissance active et réactive.

II.3.3.2 UPFC (unified power flow controller):

Gyugyi a présenté le concept de l'UPFC en 1990. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique [9]:

- la tension,
- l'impédance de la ligne,
- le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne

En effet, l'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension. En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance. Dans la figure II.10, l'onduleur 1 est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur 2. Il réalise aussi la fonction décompensation d'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. L'onduleur.2 injecte la tension V_b et fournit les puissances active et réactive nécessaires à la compensation série L'énorme avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne en un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions.

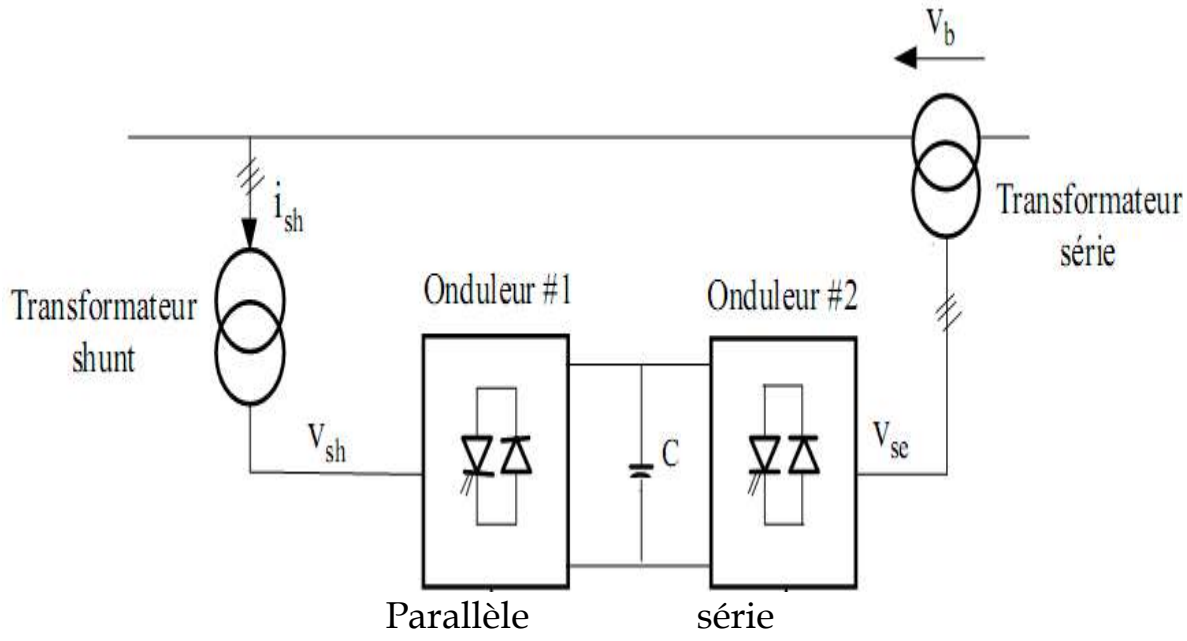


Figure II.10 : structure d'un UPFC

Il pourra alterner différentes fonctions : par exemple, la fonction shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que la partie série pourra être utilisée afin d'amortir les oscillations de puissances.

II.4 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

II.4.1 Description

Les dispositifs STATCOM sont de purs systèmes d'électronique de puissance réalésés avec des convertisseurs de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT). Ils sont raccordes au réseau à travers un filtre inductif et injectent un courant contrôlé dans le système afin de régler la tension au nœud de raccordement et /ou de compenser la puissance réactive d'une Charge / générateur.

Dans ces dernières années, une nouvelle famille de STATCOM de distribution est appelé D-STATCOM ce dernier est dimensionné pour des tensions et puissance plus réduite que les STATCOM de transport. Ils sont basés sur la connexion en série d'interrupteur IGBT. La technologie dérive de celle des connexions HVDC mais elle est adapte

aux applications MT (Moyenne Tension). Ces dispositifs arrivant au niveau de la MT directement sans l'utilisation d'un transformateur. Ils sont généralement basé sur des technologies NPC multi niveaux avec l'objectif d'améliorer la qualité du courant injecté ; ils travaillent avec des technologies MLI vectorielle, avec des fréquences de commutation de 1 à 2 KHz.

Le D-STATCOM est la version des SVC composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme représenté dans la figure (II.11).

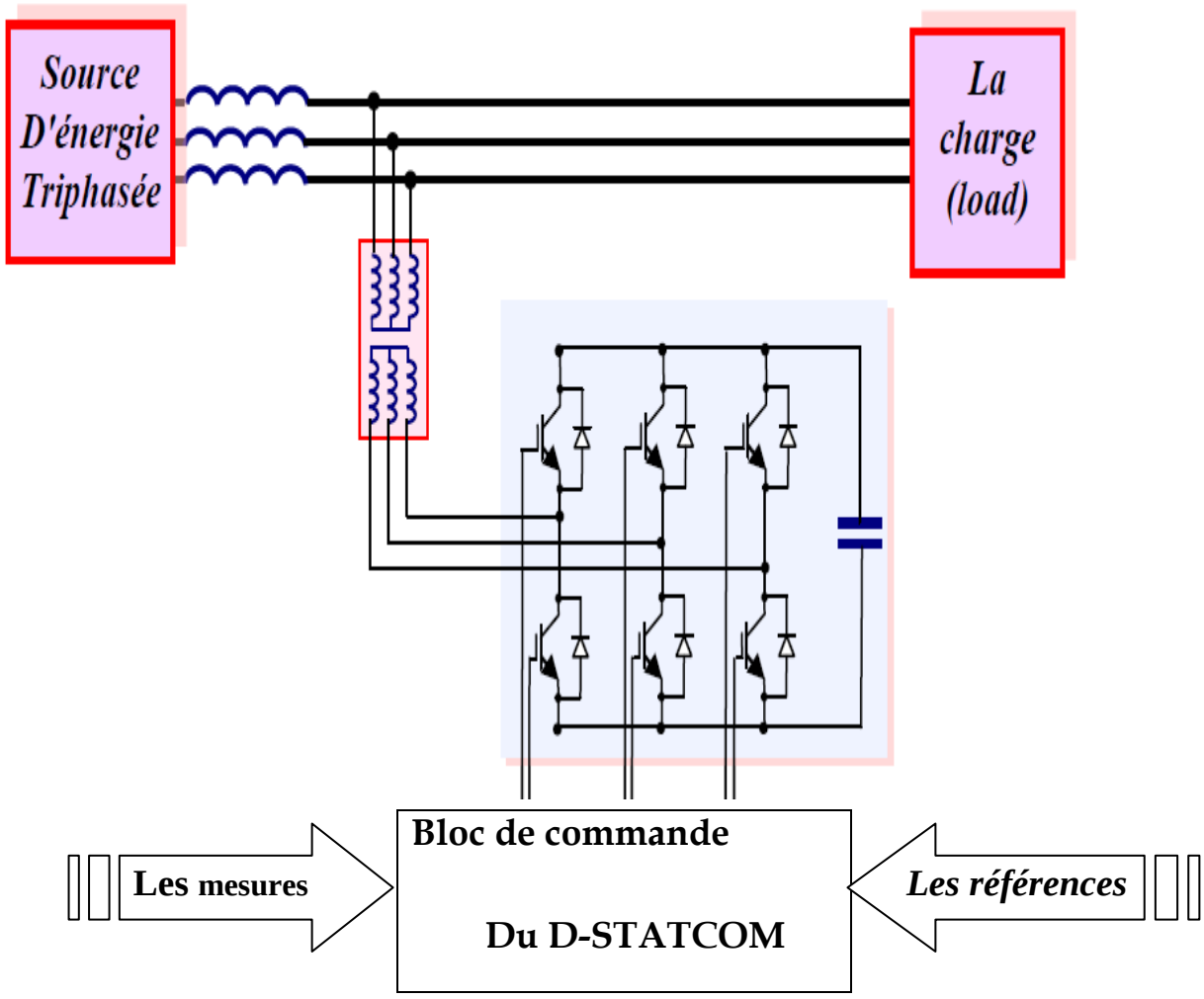


Figure II.11 : structure de base d'un STATCOM

La figure (II.11) représente la structure de base d'un D-STATCOM couplé au réseau de distribution. Ce dispositif se compose de quatre parties principales :

- **Onduleur de tension :**

  C'est le noyau du D-STATCOM qui permet de générer une tension alternative en phase avec celle du PCC (*point of Common coupling*) et totalement contrôlable en module, la déférence entre ces deux tension résulte un courant réactive injecté dans le réseau.

- **Bus continu :**

  Il compose des condensateurs afin d'injecter une puissance réactive dans le réseau. La tension aux bornes de ce bus doit être maintenue constante par une fiable consommation de la puissance réactive.

- **Filtre :**

  La modulation vectorielle utilisée pour la commande de l'onduleur donne une tension ondulée ce qui résulte un courant injecté dans le réseau riche en harmonique, donc le filtre inductif doit être installé entre l'onduleur et le PCC pour filtre ces harmonique.

- **Bloc de commande :**

  Le contrôleur calcule les tensions de références de l'onduleur et par conséquent des impulsions d'ouverture et de fermeture des *IGBT.*

II.4.2 : Principe de fonctionnement :

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquence la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le D-STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension

continue. L'amplitude de la tension du D-STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.

En général la tension du D-STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le D-STATCOM comme le représente la figure (II.12).

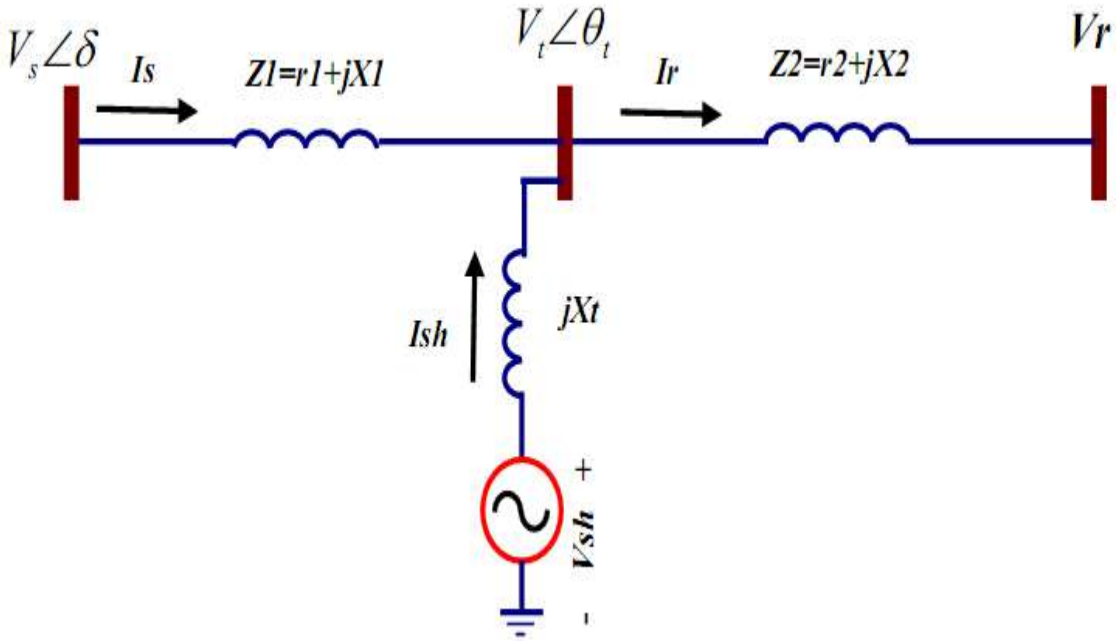


Figure II.12 : Schéma équivalant de D-STATCOM

Le courant injecté par le D-STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{sh} = \frac{(\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t)}{jX_t} \qquad \text{II.1}$$

La puissance apparente injecte par le D-STATCM au point de raccordement commun (PCC) est donnée par :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t{}^* \bar{V}_{sh} - \bar{V}_t{}^2}{-jX_t} \qquad \text{II.2}$$

D'où on abouti aux puissances active et réactive injectées par le D-STATCOM au point de raccordement commun (PCC) :

$$p_{sh} = \frac{-V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} \quad \text{II.3}$$

$$Q_{sh} = \frac{-V_{sh}(V_t \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_{sh})}{X_t} \quad \text{II.4}$$

Avec l'hypothèse d'un D-STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le D-STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

$$p_{sh} = \frac{-V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} = 0 \quad \text{II.5}$$

Avec $\theta_t = \theta_{sh} = \theta$

D'après cette condition la tension injectée par le D-STATCOM V_t doit être en phase avec la tension V_{sh} de point de raccordement commun.

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du D-STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante.

Comme les tensions V_{sh} et V_t sont en phase le courant I_{sh} du D-STATCOM, en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif son amplitude et les puissances active et réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations suivantes:

$$|\mathrm{I}_{sh}| = \mathrm{I}_{shq} = \frac{V_{sh} - V_t}{\mathrm{j}X_t} \quad \text{II.6}$$

$$p_{sh} = 0$$

$$Q_{sh} = V_{sh} * \mathrm{I}_{shq} = \frac{{V_{sh}}^2}{X_t}(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}) \qquad \text{II.7}$$

A partir de l'équation (II.7) l'échange de puissance réactive entre l'onduleur et le réseau est contrôlé par l'amplitude de la tension produite à la sortie de l'onduleur. On distingue les cas suivants [8] :

Si $V_{sh} > V_t$ donc $Q_{sh} > 0$, le D-STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau. Fig. II.13 (a), et si $V_t > V_{sh}$ alors $Q_{sh} < 0$, le D-STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductive Figure (II.13) (b).

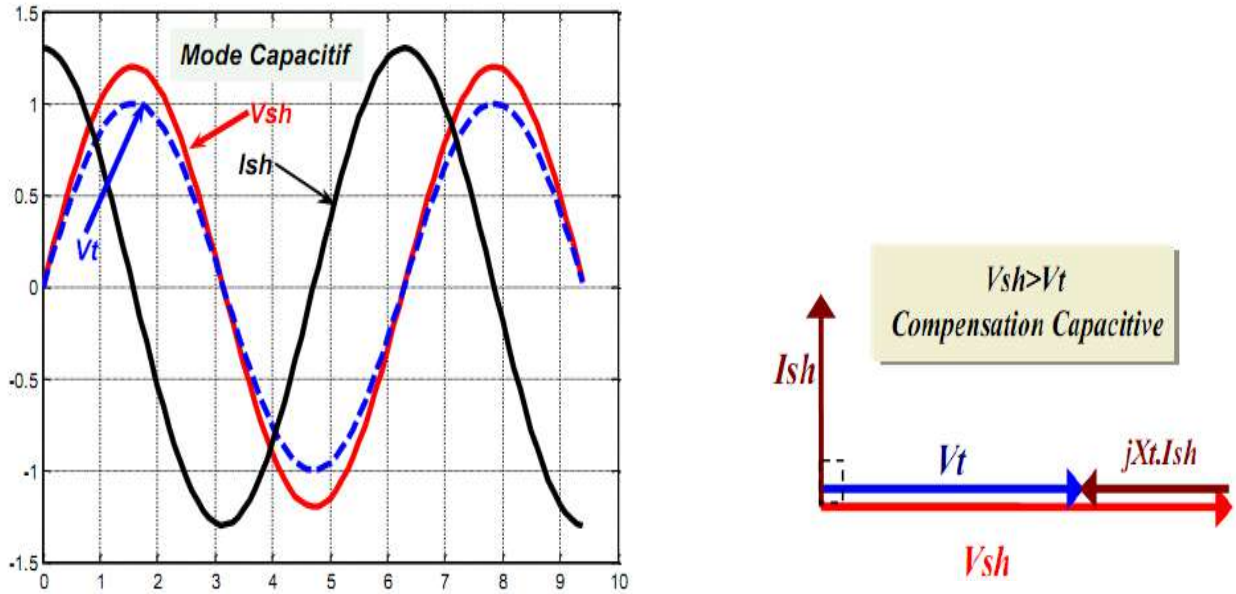


Figure II.13.a : courbes de courant et de tension de D-STATCOM mode capacitif

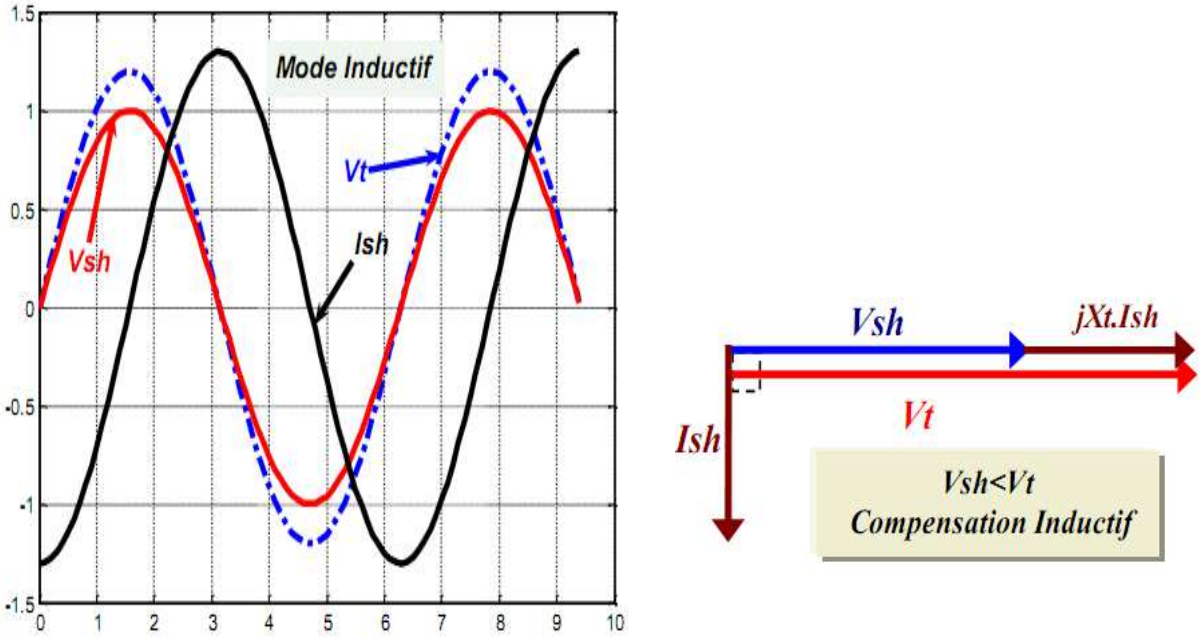


Figure II.13.b : courbes de courant et de tension de D-STATCOM en mode inductif

II.4.3 Description en repère tournant

Pour détailler bien le principe de compensation du D-STATCOM on a utilisé les composantes de Park des tensions et des courants.

Le passage du modèle triphasé (abc) au le modèle biphasé (α-β) des tensions du point de raccordement commun est réalisé à laide de transformation de *Concordia* suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{t\alpha} \\ V_{t\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ta} \\ V_{tb} \\ V_{tc} \end{bmatrix} \quad \text{II.8}$$

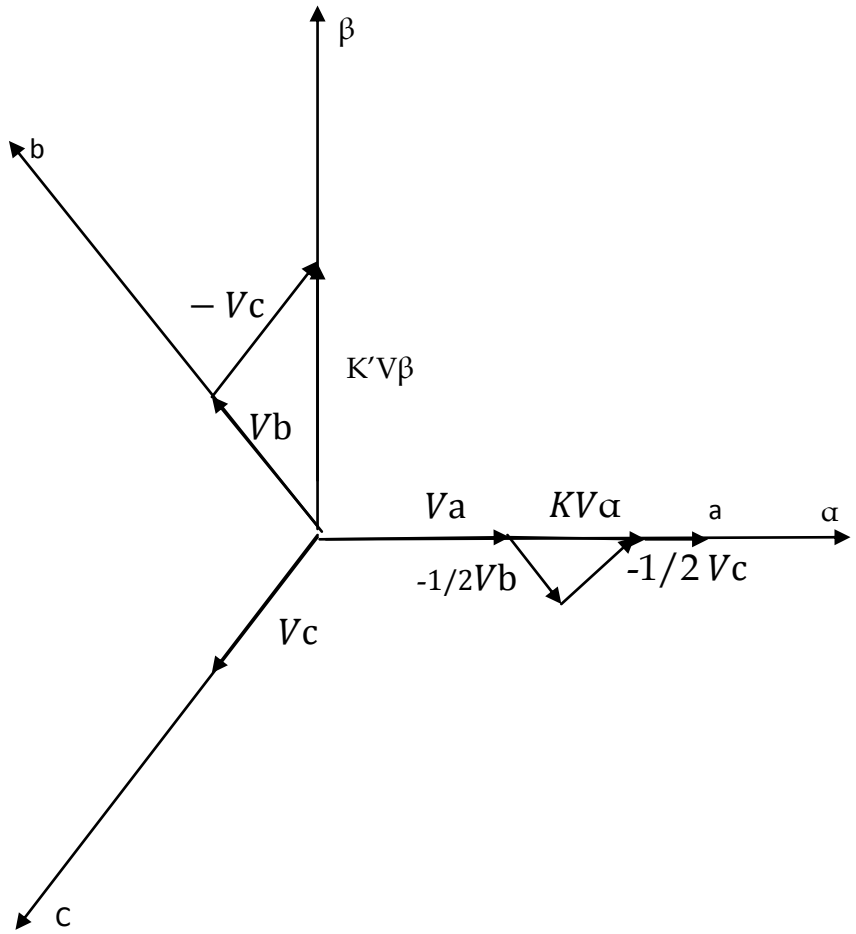


Figure II.14 : passage de modèle triphasé (abc) au modèle biphasé (α-β)

Avec : K=$\sqrt{\frac{3}{2}}$, K'=$\sqrt{2}$

Les courants et les tensions du D-STATCOM suivant la transformation de Concordia sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{sh\alpha} \\ V_{sh\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} \qquad \text{II.9}$$

la transformation du système biphasé des équations (II.7) , (II.8) et (II.9) dans le repère (d-q) nécessite la matrice de rotation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{shd} \\ V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta \\ -sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{sh\beta} \end{bmatrix} \qquad \text{II.10}$$

Avec θ =ωt : l'angle de vecteur tension du point de raccordement dans le repère (α-β), il est donné par :

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_{t\alpha}}{V_{t\beta}}\right) \qquad \text{II.11}$$

Le vecteur $\overline{V_t}$ tourne dans le plan (α-β) avec une vitesse angulaire égale à la pulsation des tensionsV_{sha}, V_{shb} et V_{shc}. Sur le diagramme de la figure (II.15), le vecteur de référence est repéré par sa position arbitraire θ.

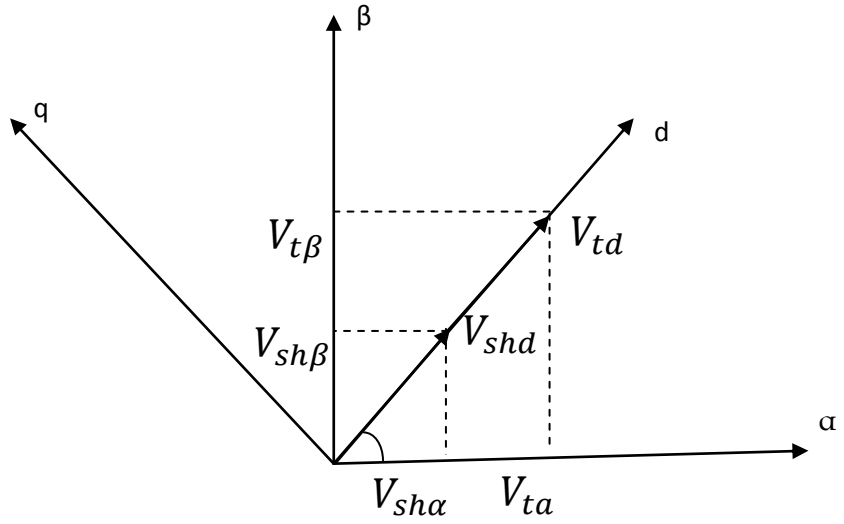


Figure II.15 : Diagramme vectorielle des tensions

L'axe direct (d) de repère (d q) est typiquement fixé sur la vectrice tension du point de raccordement V_t . Afin d'annuler la composante V_{tq} le vecteur V_{sh} est en phase avec le vecteur V_t mentionné précédemment.

La puissance apparente complexe S_{sh} de la sortie de D-STATCOM est donnée par l'expression suivante :

$$\overline{S}_{sh} = p_{sh} + jQ_{sh} \qquad \text{II.12}$$

Avec :

$$p_{sh} = v_{t\alpha}\, i_{sh\alpha} + v_{t\alpha} i_{sh\beta}$$

II.13

$$Q_{sh} = v_{t\beta}\, i_{sh\alpha} - v_{t\beta} i_{sh\beta}$$

Les expressions des puissances dans le repère de Park sont données par :

$$p_{sh} = v_{td}\, i_{shd} + v_{tq} i_{shq}$$

II.14

$$Q_{sh} = v_{tq}\, i_{shd} - v_{td} i_{shq}$$

Afin d'annuler la composante V_{tq} comme nous allons présenter dans la figure (II.15), alors $V_t = V_{td}$ donc l'équation (II14) devient :

$$p_{sh} = v_{td}\, i_{shd}$$

II.15

$$Q_{sh} = -v_{td} i_{shq}$$

On remarque que la puissance active p_{sh} est varie en fonction de courant i_{shd} et la puissance réactive est varie en fonction de courant i_{shq}.

Si le courant i_{shq} est en retard, le signe de composante en quadratique du courant $\bar{i}_{sh}$ est négatif. Ce qui en résulte une puissance réactive positive, c.-à-d. le D-STATCOM absorbe de la puissance réactive (mode inductif) comme le présente la figure (II.16).

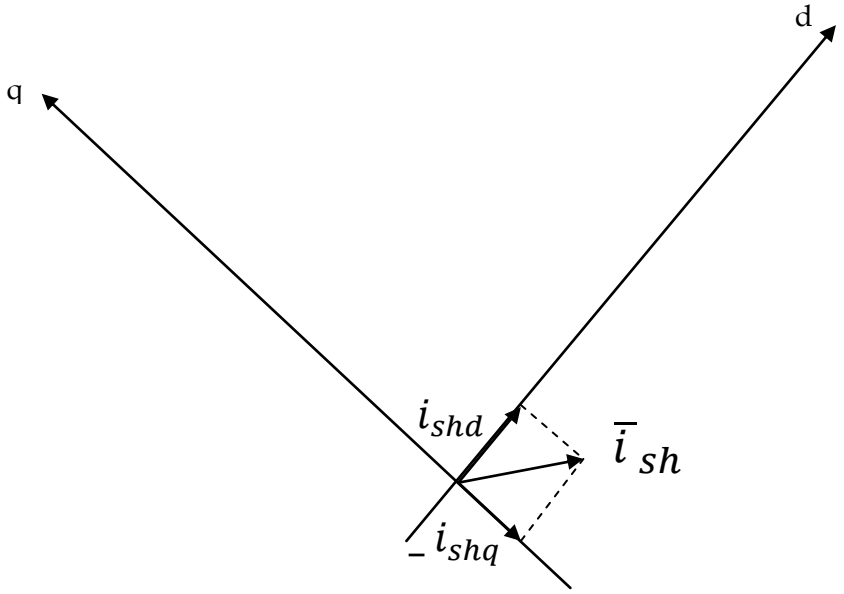


Figure II.16 : Fonctionnement en mode inductif

Si le courant i_{shq} est en avance, le signe de composante en quadratique du courant $\overline{i}_{sh}$ est positif. Ce qui en résulte une puissance réactive négative, c.-à-d. le D-STATCOM fournit de la puissance réactive (mode capacitif) comme le présente la figure (II.17).

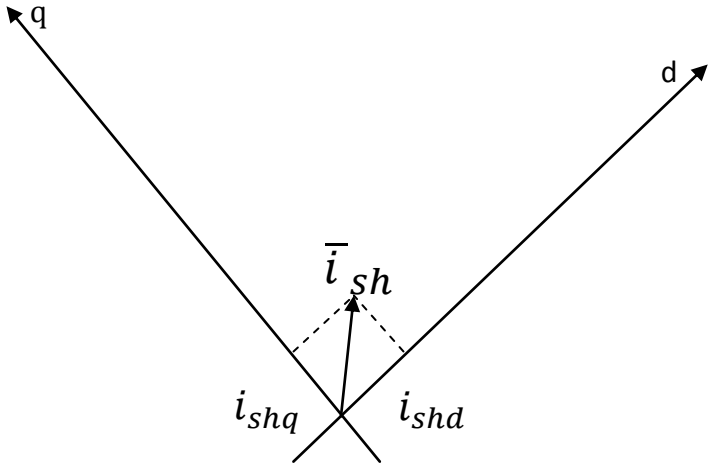


Figure II.17: Fonctionnement en mode capacitif

II.5 Onduleur de tension à deux niveaux

II.5.1 Structure générale

La structure générale d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle pour assure la circulation bidirectionnelle de courant, comme la représente la figure (II.18).

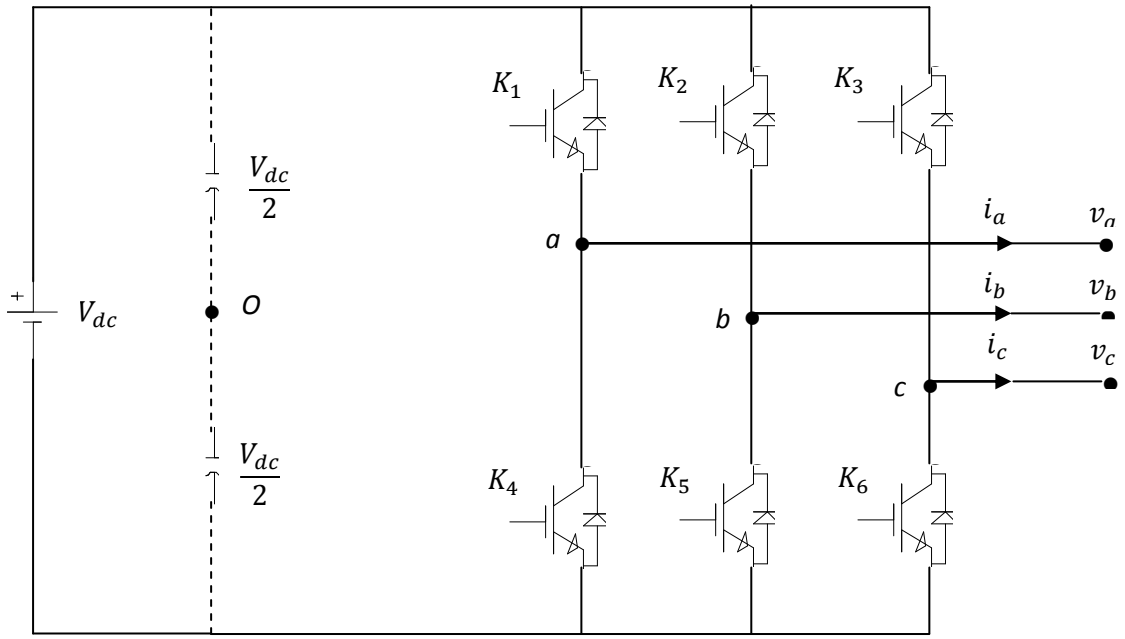


Figure II.18 : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations.

II.5.2 Fonction de commutation

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur sont décrites par une fonction de connexion, chaque interrupteur à associe une fonction de connexion S_x suivante :

$$S_1 = \begin{cases} 1 \text{ si } k_1 \text{ fermé } et\ k_4\ ouvert \\ 0 \text{ si } k_1\ ouvert \text{ et } k_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 \text{ si } k_2 \text{ fermé } et\ k_5\ ouvert \\ 0 \text{ si } k_2\ ouvert \text{ et } k_5 \text{ fermé} \end{cases} \quad \text{(II.16)}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 \text{ si } k_3 \text{ fermé } et\ k_6\ ouvert \\ 0 \text{ si } k_3\ ouvert \text{ et } k_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Avec x=1, 2,3 indicateur de phase ;

II.5.3 La tension de sortie

L'onduleur de tension à deux niveaux délivre deux niveaux de tensions $\frac{v_{dc}}{2}$ ou $-\frac{v_{dc}}{2}$ suivant la fonction de connexion K_{i} comme illustré dans l'équation (II.17).

$$v_{xo} = \begin{cases} \frac{v_{dc}}{2} \text{ si } K_{\mathrm{i}} = 1\ (K_{\mathrm{i+3}} = 0) \\ -\frac{v_{dc}}{2} \text{ si } K_{\mathrm{i}} = 0\ (K_{\mathrm{i+3}} = 1) \end{cases} \quad \text{II.17}$$

Les tensions composés entre phasesv_{ab}, v_{bc}, v_{ca}est donnée comme suit

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = v_{dc} \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} \quad \text{II.18}$$

Les tensions simples sont données, en fonction des fonctions de connexions par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{II.19}$$

Les tensions simple (v_a , v_b , v_c) dans le repère (α β) et suivant la transformation de Concordia vérifient la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \qquad \text{II.20}$$

Ces composantes peuvent être exprimées en fonctions des fonctions de connexions par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \qquad \text{II.21}$$

II.5.4 Représentation vectorielle

Le tableau (II.2) représente les coordonnées du vecteur de tension de sortie v_i dans le plan (α β) suivant les fonctions des connexions.

S_1	S_2	S_3	v_α	v_β	v_i
0	0	0	0	0	v_0
1	0	0	$\sqrt{1/3}v_{dc}$	0	v_1
1	1	0	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_2
0	1	0	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_3
0	1	1	$-\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	v_4
0	0	1	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_5
1	0	1	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_6
1	1	1	0	0	v_7

Tableau II.2 : Les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α β)

À partir de tableau (II.2) on va voir les vecteurs v_0, v_7 correspondant aux combinaisons (000) et (111) sont toujours nuls.

La figure (II.19) représente les vecteurs non nuls. Ils divisent le plan (α β) en six déférents secteurs (notés de S_1 à S_6), qui peuvent être générés par l'onduleur, et qui forment le diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux.

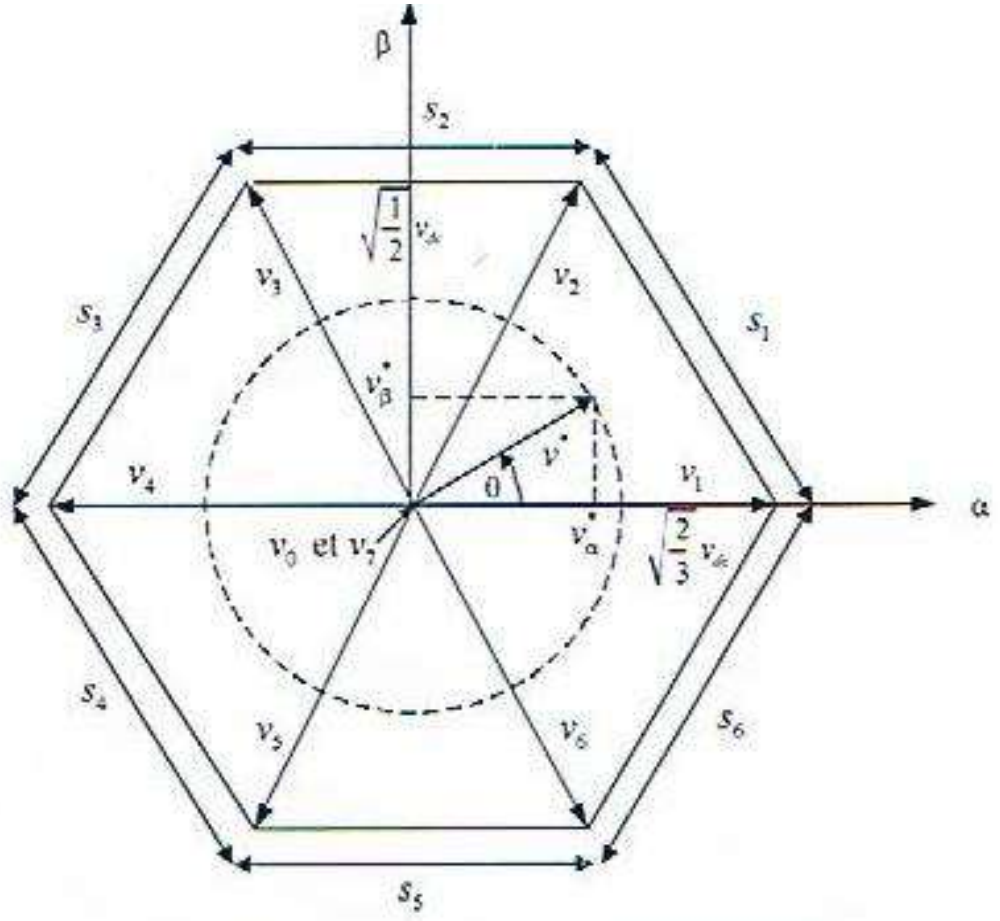


Figure II.19 : diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux

L'objectif de la commande de l'onduleur est rendre les tensions de sortie v_a, v_b et v_c assez proches que possible des trois tensions de référence sinusoïdales $v_a{}^*$, $v_b{}^*$ et $v_c{}^*$.ces vecteur peut être représenté par un vecteur de référence $\overrightarrow{v^*}$ d'amplitude v^* est égale à l'amplitude des tension simples, ce vecteur est donné par :

$$\overrightarrow{v^*} = v^* e^{j\theta} \quad \text{II.22}$$

Avec θ est l'ongle de rotation du vecteur de référence, il est donnée par :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_{\beta}{}^*}{v_{\alpha}{}^*}$$

On a attribue au vecteur de référence $\overrightarrow{v^*}$ les six positions représenté dans la figure (II.19), Le module maximal du vecteur de référence est :

$$v^*{}_{max} = \sqrt{\frac{2}{3}}\, v_{dc} \cos(\frac{\pi}{6}) = \sqrt{\frac{1}{2}}\, v_{dc} \quad \text{II.23}$$

II.5.6 Commande de l'onduleur par MLI vectorielle

La MLI vectorielle (en anglais : Space Vector Modulation) élabore les signaux de commandes en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur en même temps (contrôle du vecteur d'état de l'onduleur) [12].
L'objectif du contrôle vectoriel est de générer des tensions assez proches que possible de la tension de référence v^* que l'on fixe. Si ces références sont sinusoïdales triphasées équilibrées, alors le vecteur de référence tournera à une vitesse constante et son module suivra une trajectoire circulaire.

- **Localisation du vecteur de référence**

L'hexagone de commutation peut étre divisé en six secteur, chaque secteur étant formé d'un triangle dont les sommets sont le point milieu ,et les fins des deux vecteur consécutifs (v_i et v_{i+1}).ces secteurs sont déterminés par la méthodes suivantes :

$$S = \begin{cases} 1 & si\ \theta \in \left[0, \frac{\pi}{3}\right] \\ 2 & si\ \theta \in \left[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right] \\ 3 & si\ \theta \in \left[\frac{2\pi}{3}, \pi\right] \\ 4 & si\ \theta \in \left[\pi, \frac{4\pi}{3}\right] \\ 5 & si\ \theta \in \left[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}\right] \\ 6 & si\ \theta \in \left[\frac{5\pi}{3}, 2\pi\right] \end{cases} \quad \text{II.24}$$

II.5.6.1 Calcul des temps d'applications des vecteurs

La vecteur tension de contrôle v^* est approché, sur la période de modulation, T_{MLI} par un vecteur de tension moyen $\overline{v^*}$ élaboré par application des vecteurs d'état de l'onduleur v_i et v_{i+1} adjacents pendant les temps T_i, T_{i+1} respectivement et des vecteurs nuls v_0 pendant (1-i_0). T_0 et v_7 pendant (i_0 . T_0). Les signaux de commandes MLI vont donc permettre de recréer en valeur moyenne sur une période T_{MLI} un vecteur tension égal à celui défini comme référence. Par ailleurs, le vecteur tension de référence v^* est échantillonné à la fréquence f_{MLI}=1/T_{MLI}. La valeur échantillonnée de la tension de référence est ensuite utilisée pour résoudre les équations (II-23).

$$\overrightarrow{v^*} = \frac{1}{T_{MLI}}\left\{\int_0^{T_i} \overrightarrow{v_i}\, dt + \int_0^{T_{i+1}} \vec{v}_{i+1}\, dt + \int_0^{(1-i_0)T_0/2} \overrightarrow{v_0}\, dt + \int_0^{(i_0.T_0)/2} \overrightarrow{v_7}\, dt\right\} \quad \text{II-25}$$

Puisque les vecteurs $v_i$et v_{i+1} sont des vecteur fixes on a :

$$\overrightarrow{v^*} = \frac{1}{T_{MLI}}\{\overrightarrow{v_i}\, T_i + \vec{v}_{i+1}\, T_{i+1}\} \quad \text{II.26}$$

Avec $v_0 = v_7$=0 ;
A partir de l'équation (II.24), la tension de référence est donné par :

$$T_{MLI}\ \overline{v^*} = \overline{v_i}\, T_i + \bar{v}_{i+1}\, T_{i+1} \quad \text{II.27}$$

Pendant le reste de la période de commutation T_{MLI} on applique les vecteurs nuls chaque dure de T_0 , car

$$T_0=\frac{T_{MLI}-(T_i+T_{i+1})}{2} \qquad \text{II.28}$$

Afin de simplifier l'analyse, on définit les trois variables **e**, **l** et **k** suivants

$$\begin{cases} e = T_{MLI}\dfrac{\sqrt{3}v_\alpha{}^*+v_\beta{}^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ l = T_{MLI}\dfrac{\sqrt{3}v_\alpha{}^*-v_\beta{}^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ k = T_{MLI}\dfrac{\sqrt{2}v_\beta{}^*}{2v_{dc}} \end{cases} \qquad \text{II.29}$$

Les tempes T_i, T_{i+1}pour chaque secteur sont exprimes on fonction des variables e, l et k dans le tableau (II.3) suivant :

secteur	1	2	3	4	5	6
T_i	e	l	k	-e	-l	-k
T_{i+1}	k	-e	-l	-k	e	l

Tableau II.3 : tempe de commutation pour chaque secteur

II.5.6.2 Exemple de réalisation du vecteur de référence :

Dans cet exemple, le vecteur peut être réalisé à partir des vecteurs v_1 *et* v_2 par les vecteurs nuls $v_0$et v_7. Les temps d'application des différents vecteurs sont alors calculés pour s'approcher le plus possible du vecteur de référence. De nombreux algorithmes, qui ne seront pas détaillés ici, permettent de calculer les temps de conduction des interrupteurs [13].

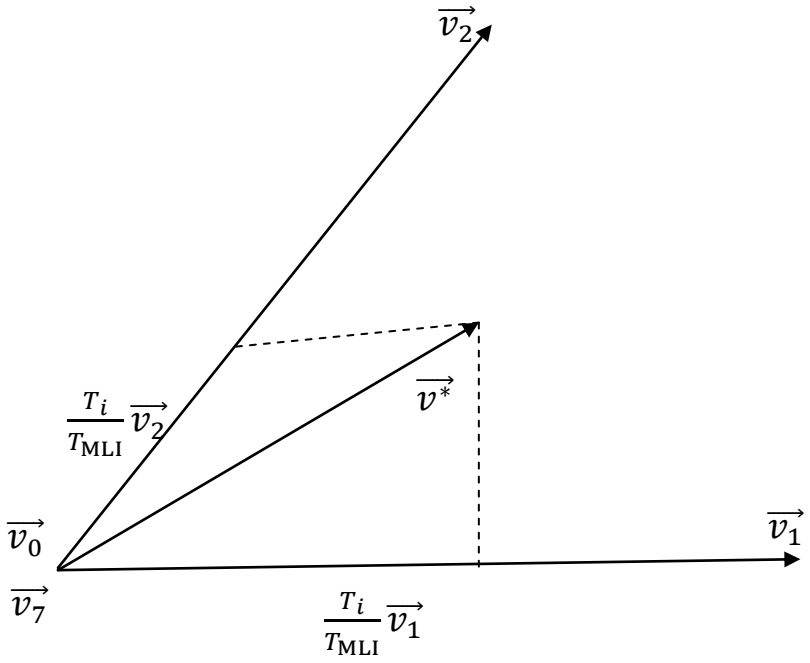


Figure II-20 : Représentation du vecteur de tension de référence l'onduleur

II-5.7 : Génération des impulsions de commande

L'application des vecteurs d'états durant une période de découpage car l'application du vecteur d'état v_i pendant une durée t_i ,le vecteur v_{i+1} pondant une durée t_{i+1} et le vecteur nul pendant le reste de la période .on applique v_0 aux extrémités de la période de découpage et v_7 au centre de cette période.

Vecteurs appliqués	V0	V1	V2	V7	V7	V2	V1	V0	V0	V3	V2	V7	V7	V2	V3	V0
Temps d'application	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_1}{2}$	$\frac{T_2}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_2}{2}$	$\frac{T_1}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_3}{2}$	$\frac{T_2}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_2}{2}$	$\frac{T_3}{2}$	$\frac{T_0}{4}$
Secteur i	1				2											

Vecteurs appliqués	V0	V3	V4	V7	V7	V4	V3	V0	V0	V5	V4	V7	V7	V4	V5	V0
Temps d'application	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_3}{2}$	$\frac{T_4}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_4}{2}$	$\frac{T_3}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_5}{2}$	$\frac{T_4}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_4}{2}$	$\frac{T_5}{2}$	$\frac{T_0}{4}$
Secteur i	3				4											

Vecteurs appliqués	V0	V5	V6	V7	V7	V6	V5	V0	V0	V1	V6	V7	V7	V6	V1	V0
Temps d'application	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_5}{2}$	$\frac{T_6}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_6}{2}$	$\frac{T_5}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_1}{2}$	$\frac{T_6}{2}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_6}{2}$	$\frac{T_1}{2}$	$\frac{T_0}{4}$
Secteur i	5				6											

Tableau II-4 : Application des vecteurs d'état suivant le secteur de l'hexagone

II.6 Conclusion

Dans le premier partie de ce chapitre, nous avons vu une vue globale sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS, d'une structure principalement à base d'onduleurs conçus avec les interrupteurs IGBT/GTO de technologie très avancée et caractérisés par un temps de réaction très court, qui permet une flexibilité du courant transité et par conséquence l'habilité de ces dispositifs de performer le fonctionnement du système énergétique et d'améliorer sa stabilités.

Dans la deuxième partie, nous avons focalisé sur le dispositif D-STATCOM constitué principalement par un onduleur de tension. Le mode de fonctionnement du D-TATCOM est attaché à la puissance réactive échangé avec le réseau ; il est inductif si la puissance est positive ou capacitif dans le cas inverse.

Dans la troisième partie nous avons présente la structure et la modalisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux ainsi que leur modalisation vectoriel.

III.1 Introduction

Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour connexions parallèle dans un réseau électriques, sont très utiles sinon obligatoire pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande des ces convertisseurs [3].

La description mathématique de D-STATCOM est basée sur la transformation du système triphasé à un système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par les transformations de CONCORDIA et PARK respectivement. Afin d'aboutir à un système d'équations différentielles dans le plan (d, q), la transformation de PARK est utilisée pour la commande du D-STATCOM.

Dans la première partie de ce chapitre nous allons détailler le modèle mathématique du D-STATCOM dans le repère triphasé (abc) ainsi que dans le repère tournant (d, q). La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la commande du bus continu ainsi que des courants en utilisant des régulateurs de type PI.

III.2 Modélisation du D-STATCOM :

III.2.1 Structure d'un D-STATCOM :

la structure d'un D-STATCOM à deux niveaux est donnée comme le représente la figure (III.1), ce dispositif est basé sur la topologie de l'onduleur de tension, le D-STATCOM est utilisé dans les réseaux de distribution à moyenne tension (MT), et connecté avec le réseau par l'intermédiaire d'un transformateur abaisseur et un filtre RL, le réseau électrique est représenté par trois tensions simples (V_{sa} V_{sb} et V_{sc}) et ses impédances internes. La charge est une charge inductive triphasée couplée en étoile.

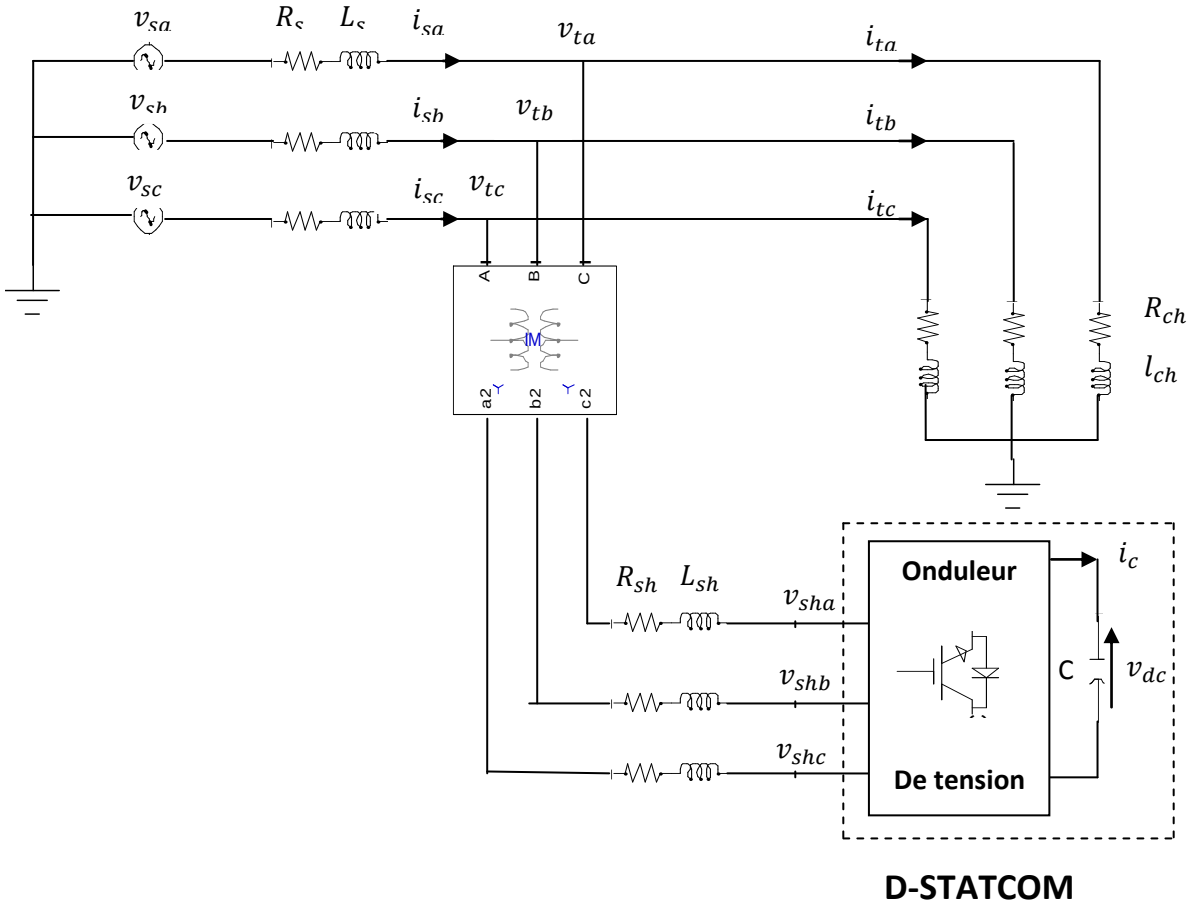


Figure III.1 : Structure du D-STATCOM à deux niveaux

III.2.2 Modèle équivalent du bus continu

Le bus continu est représenté par un condensateur fictif C comme il est représente dans la figure (III.2)

La puissance cotée continu est donnée comme suit :

$$p = v_{dc}\, I_c \qquad \text{III.1}$$

$$p = C v_{dc}\, \frac{dv_{dc}}{\mathrm{dt}} \qquad \text{III.2}$$

Le bus continu peut être représenté par un condensateur qui est traversé par un courant continu I_c comme le montre la figure (III.2).

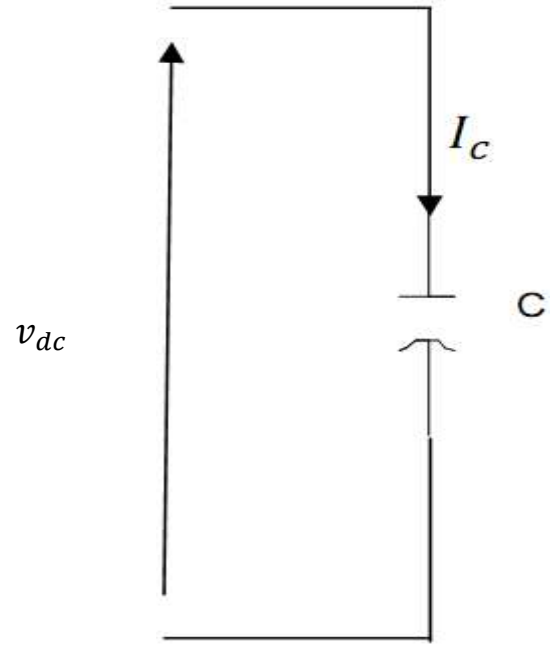


Figure III.2 : Schéma du bus continu

III.2.3 Modélisation dans le repère (a b c)

La figure III.3 représente le model simplifie du D-STATCOM par trois sources de tension sinusoïdales connectés au PCC par un filtre RL. Le côté continu est représenté par une source de courant connecté avec condensateur C.

Ce modèle permet obtenir le modèle mathématique du D-STATCOM dans le repère triphasée (a b c).

Le courant dans une phase du D-STATCOM dépend de la différance entre la tension v_t (tension au nœud) et la tension ajustable au D-STATCOM v_{sh}[3]. En appliquant la loi des mailles on obtient :

$$\begin{cases} v_{sha} = R_{sh} i_{sha} + L_{sh} \frac{di_{sha}}{\mathrm{dt}} + v_{ta} \\ v_{shb} = R_{sh} i_{shb} + L_{sh} \frac{di_{shb}}{\mathrm{dt}} + v_{tb} \\ v_{shc} = R_{sh} i_{shc} + L_{sh} \frac{di_{shc}}{\mathrm{dt}} + v_{tc} \end{cases} \quad \text{III.3}$$

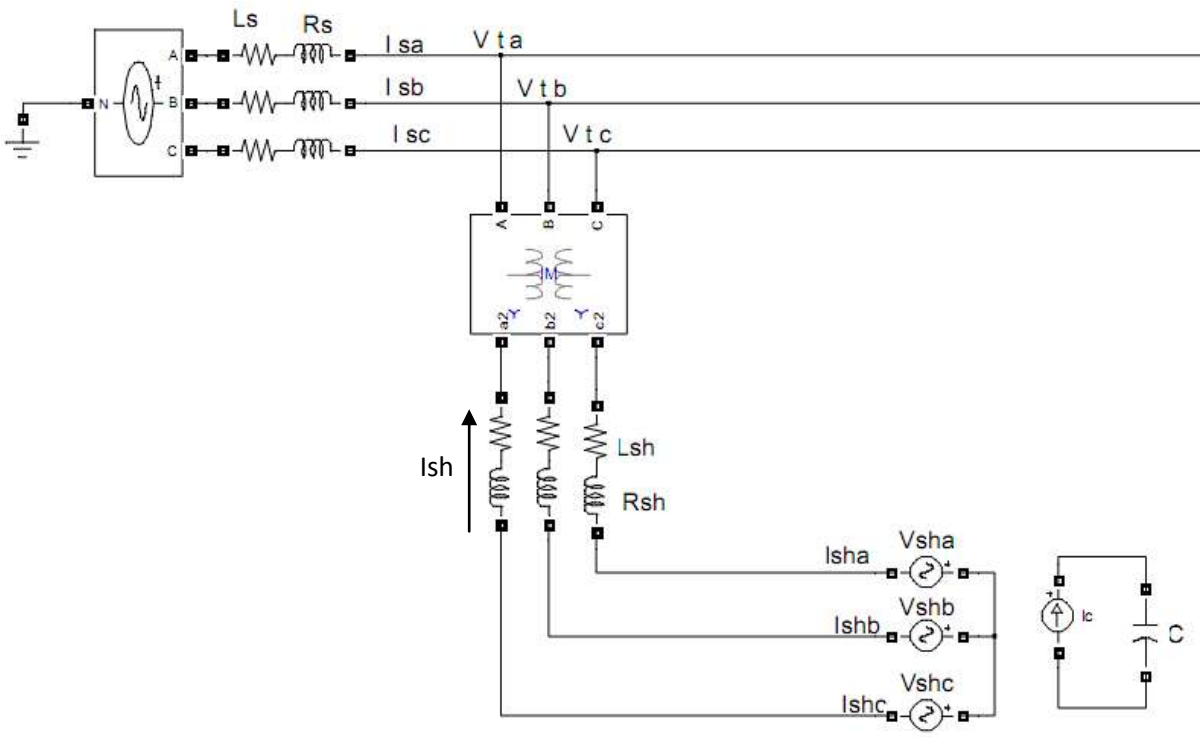


Figure III.3 : Schéma simplifie du D-STATCOM

Pour le coté continu du D-STATCOM, on exprime l'équation du courant continu I_c en fonction de la tension continu v_{dc} comme suit :

$$I_c = \mathrm{C}\ \frac{dv_{dc}}{\mathrm{dt}} \qquad \text{III.4}$$

En basant sur le principe de conservation des puissances entre les coté continu et alternatif et en négligeant les pertes de commutation de l'onduleur, l'expression de courant I_c en fonction des tensions côté alternatif comme suit :

$$I_c = -\frac{1}{v_{dc}}(v_{sha}i_{sha} + v_{shb}i_{shb} + v_{shc}i_{shc}) \qquad \text{III.5}$$

Si on néglige la puissance dissipée dans le filtre, on peut dire que la puissance de sortie de l'onduleur est la même que celle du point PCC, ce qui donne :

$$I_c = -\frac{1}{v_{dc}}(v_{ta}i_{sha} + v_{tb}i_{shb} + v_{tc}i_{shc}) \qquad \text{III.6}$$

III.2.4 Modélisation dans le repère (d q)

A partir du modèle triphasé du D-STATCOM, en utilisant la transformation de Park, pour obtenir le modèle biphasée, cette transformation a été effectue pour transférer les grandeurs triphasée de coté alternatif (a b c) vers des grandeurs biphasée (d q).

La transformation de Park est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_c \\ x_c \end{bmatrix} \quad \text{III.7}$$

A partir du calcul des tensions $v_{t\alpha}$, $v_{t\beta}$ par transformation de concordia des tensions du PCC, l'angle θ est donné par :

$$\theta = \text{atan}(\frac{v_{t\alpha}}{v_{t\beta}}) \quad \text{III.8}$$

L'axe direct du repère tournant (d q) est typiquement fixé sur le vecteur tension du PCC v_t. afin d'annuler la composant v_{tq}, [13] comme le représente la figure (III.4).s

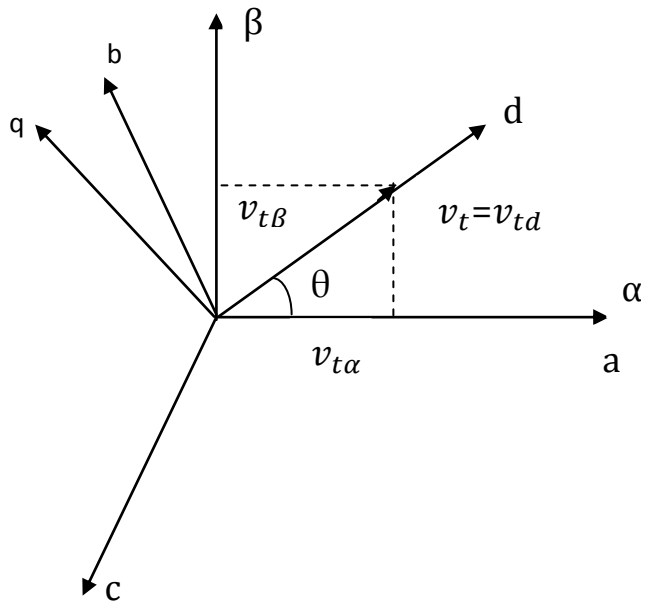


Figure III.4 : Diagramme vectoriel de la tension du point PCC

Après la transformation de l'équation III.3, on aboutit aux équations dynamiques du D-STATCOM dans le repère (d q) :

$$\begin{cases} v_{shd} = R_{sh} i_{shd} + L_{sh} \frac{di_{shd}}{\mathrm{dt}} + v_{td} \\ v_{shq} = R_{sh} i_{shq} + L_{sh} \frac{di_{shq}}{\mathrm{dt}} + v_{tq} \end{cases} \quad \text{III.9}$$

L'expression de courant de coté continu dans le repère (d q) est comme suit :

$$I_c = -\frac{1}{v_{dc}} (v_{td} i_{shd} + v_{tq} i_{shq}) \quad \text{III.10}$$

Et on a v_{tq}=0, il résulte :

$$I_c = -\frac{1}{v_{dc}} (v_{td} i_{shd}) \quad \text{III.11}$$

Les équations (III.9), (III.11) forment le modèle mathématique du D-STATCOM dans le repère tournant (d q), ce modèle est utilisé pour synthétiser la commande du D-STATCOM.

III.3 Commande du DSTATCOM

Le D-STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive, la structure de contrôle générique d'un D-STATCOM est constituée d'une double boucle de contrôle imbriquée : une boucle externe de génération de consigne de courant et une boucle interne de contrôle de courant (figure III.4)

Les puissances active et réactive échangées entre le D-STATCOM et le réseau sont contrôlées par la régulation des composantes direct et quadratique du courant (i_{shd}, i_{shq}).

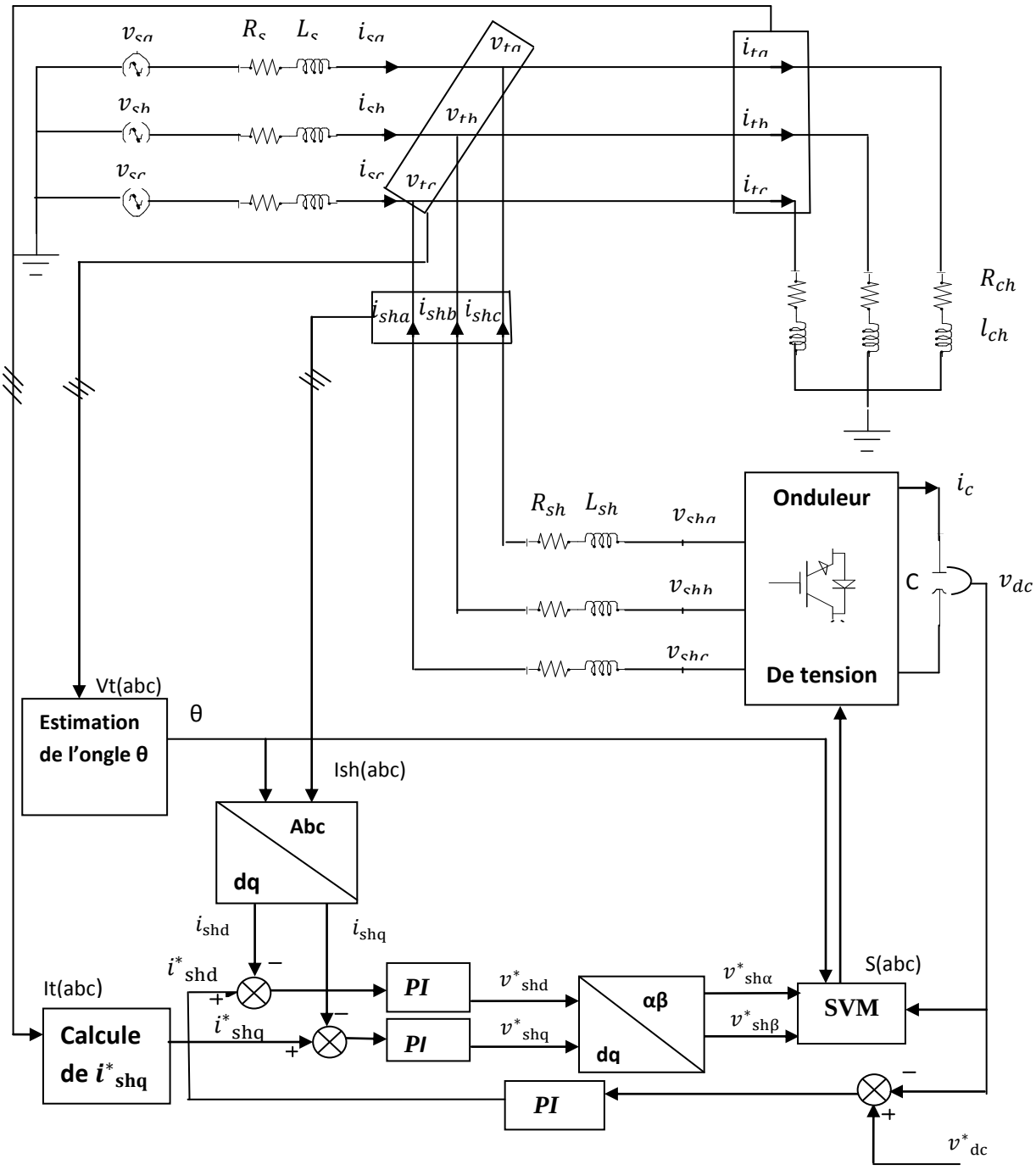


Figure III.5 : Structure de contrôle d'un D-STATCOM

Les composants v_{shd} et v_{shq}sont les variables de commande et v_{td}, v_{tq} sont les variables de perturbation.

L'équation (III.9) peut être découplée par le changement des variables suivantes :

$$\begin{cases} v_{shd} = v_d + L_{sh}\omega i_{shq} + v_{td} \\ v_{shq} = v_q + L_{sh}\omega i_{shd} + v_{tq} \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

Par comparaison entre l'équation (III.9) et (III.12) on peut déduire les relations de v_d et v_q comme suit :

$$\begin{cases} v_d = R_{sh} i_{shd} + L_{sh} \frac{di_{shd}}{\mathrm{dt}} \\ v_q = R_{sh} i_{shq} + L_{sh} \frac{di_{shq}}{\mathrm{dt}} \end{cases} \qquad \text{III.13}$$

A partir de l'équation (III.13), on définit les deux équations de découplage de premier ordre

$$\begin{cases} \frac{di_{shd}}{\mathrm{dt}} = \frac{1}{L_{sh}} v_d - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{shd} \\ \frac{di_{shq}}{\mathrm{dt}} = \frac{1}{L_{sh}} v_q - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{shq} \end{cases} \qquad \text{III.14}$$

Pour maintenir la modélisation vectorielle on a besoin de calculer les tensions de référence nécessaires pour calculer les signaux d'ouverture et de fermeture des IGBTs de l'onduleur. Dans cette étude, on utilise deux régulateurs PI dans le repère tournant pour contrôler les courants de sortie du D-STATCOM et les faire suivre leurs consignes v^*_{shd}, v^*_{shq} comme le représente le schéma bloc de la figure III.5.

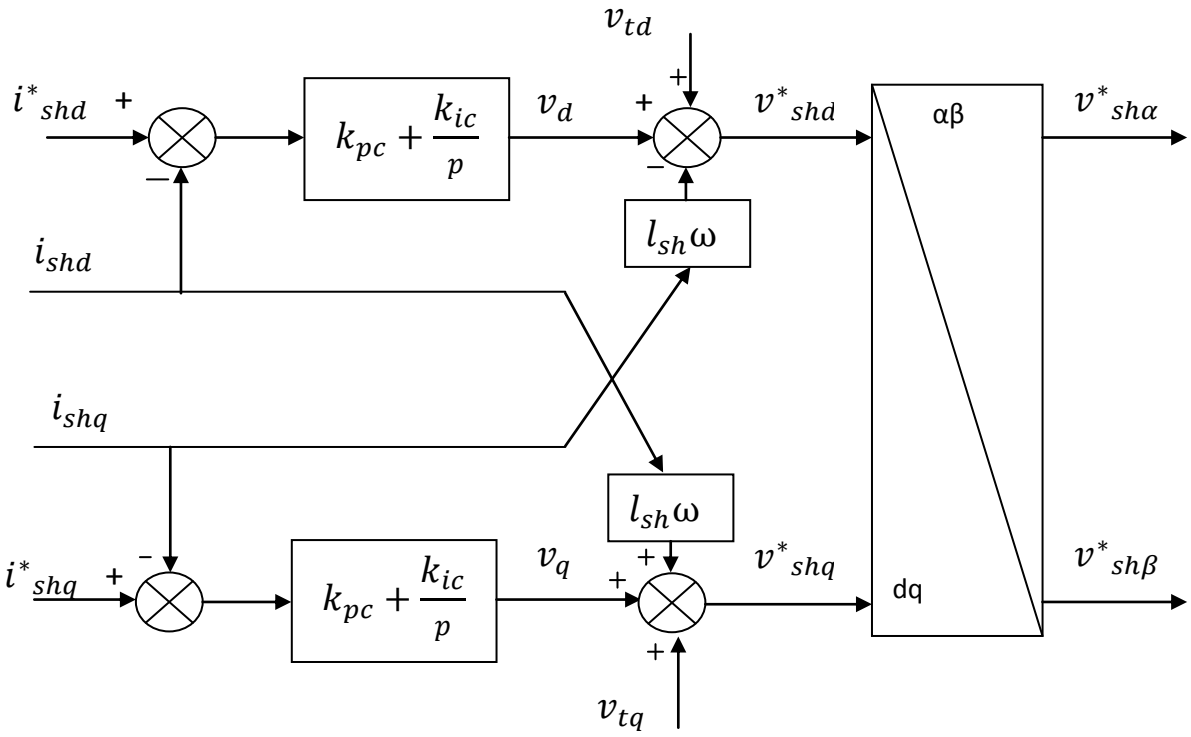


Figure III.6 : Boucle interne de contrôle de courant

III.3.1 Synthèse des régulateurs des courants

Le régulateur proportionnel-intégrale est le plus utilisé pour le contrôle du courant. L'équation temporelle de ce régulateur est donnée comme suit :

$$u(t)= k_p e(t)+ k_i \int e(t)dt \qquad \text{III .15}$$

Avec :

e(t) : l'erreur à l'instant *t*

u(t) : la commande

k_p : le gain proportionnel

k_i : le gain intégral

La fonction de transfert de ce régulateur est donnée par :

$$R(p)=\frac{k_p P+k_i}{P} \qquad \text{III.16}$$

p : l'operateur de la place

Le schéma de régulation du courant est représenté sur la figure III.7

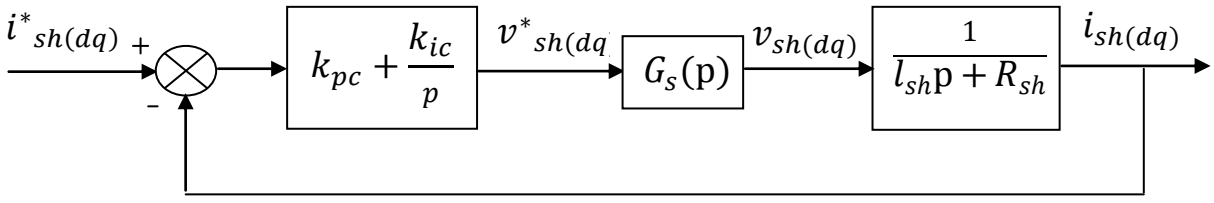


Figure (III.7) : Schéma bloc de régulation de courant

$G_s(p)$ est la fonction de transfert de l'onduleur

La fonction de transfert en boucle ouverte de ce système est :

$$F(p)= \frac{k_{pc}p+k_{ic}}{p} \frac{1}{l_{sh}p+R_{sh}} G_s(p) \qquad \text{III.17}$$

La fonction de transfère de l'onduleur est généralement choisie égale à G_s(p)=1 afin d'assure que la valeur de la tenions de sortie soit égale à sa référence.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$H(p) = \frac{k_{pc}p+k_{ic}}{l_{sh}p^2+(R_{sh}+k_{pc})p+k_{ic}} \quad \text{III.18}$$

Pour assuré la commande de système on a besoin de calculer les coefficients k_{pc} et k_{ic} par comparaison entre le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée H(p) et un système de deuxième ordre en boucle fermée donnée par :

$$G(p) = p^2+2\xi\,\omega_{nc}p+{\omega_{nc}}^2 \quad \text{III.19}$$

Donc les valeurs des coefficients du régulateur sont :

$$k_{pc} = 2\xi\omega_{nc}l_{sh} - R_{sh}$$

$$k_{ic} = l_{sh}{\omega_{nc}}^2 \quad \text{III.20}$$

III.3.2 Régulateur de tension continue

La tension v_{dc} aux bornes de condensateur doit être maintenue à une valeur constante. Pour effectue cette régulation, nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique.
Le courant du bus continue i_C peut être s'écrire sous la forme suivante :

$$i_C = C\frac{dv_{dc}}{dt} \quad \text{III.21}$$

La transformation de la place de l'équation (III.21) est donnée par :

$$i_C(p) = Cpv_{dc}(p) \quad \text{III.22}$$

La tension du bus continu est donnée par :

$$v_{dc}(p) = \frac{1}{C\,p}\,i_C(p) \quad \text{III.23}$$

Le bus continu peut alors être représenté sous forme de schémas blocs, comme le montre la Figure III-7.

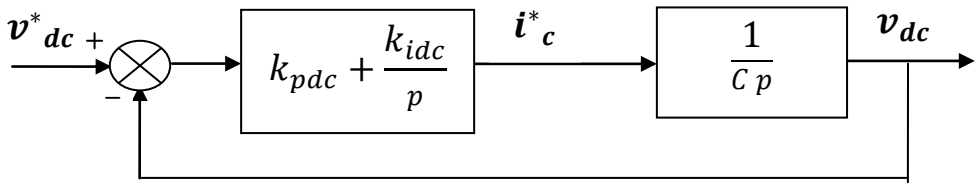


Figure III.8 : Schéma bloc de régulation de tension continue

Nous avons la fonction de transfert en boucle ouverte

$$F_{dc}\,(\mathrm{p}) = \frac{k_{pdc}p + k_{idc}}{\mathrm{p}} \;\; \frac{1}{C\,p} \qquad \text{III.24}$$

La fonction de transfert en boucle fermé est donnée par :

$$H_{dc}\,(\mathrm{p}) = \frac{k_{pdc}p + k_{idc}}{\mathrm{C\,p^2} + k_{pdc}p + k_{idc}} \qquad \text{III.25}$$

On doit faire une analogie entre l'équation de la fonction de transfert H_{dc}et celle de la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermé qui est donnée par :

$$G_{dc}(\mathrm{p}) = \mathrm{p^2} + 2\xi\,\omega_{ndc}p + {\omega_{ndc}}^2 \qquad \text{III.26}$$

Donc on trouve les valeurs des coefficients du régulateur

$$k_{pc} = 2\xi\omega_{ndc}\,\mathrm{C}$$

$$k_{ic} = \mathrm{C}\,{\omega_{ndc}}^2 \qquad \text{III.27}$$

Pour une bonne réponse du système on choisit la valeur du ξ =0.707.

Après la régulation du bus continu, on trouve la référence de courant ${i^*}_c$, puis on calcule la référence de courant actif du coté alternatif $\boldsymbol{i^*_{shd}}$, qui est donnée par :

$$i^*_{shd} = -\frac{v_{dc}}{v_t} i^*_c \qquad \text{III.28}$$

Le schéma bloc de la détermination de la référence du courant actif de cote alternatif est représente par la figure (III.8).

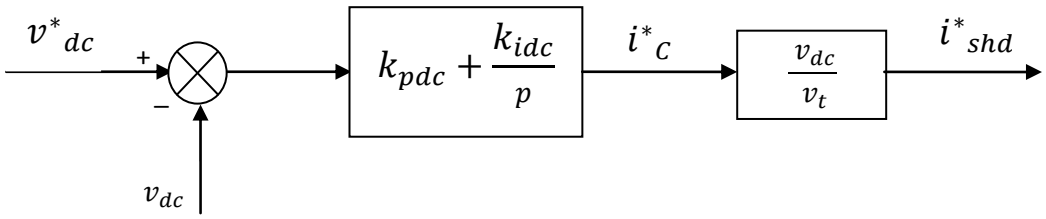


Figure III.9 : détermination de la référence du courant actif i^*_{shd}

III.3.3 Calcul de la référence du courant actif

La référence du courant réactif i^*_{shq}peut être déterminée selon le mode de fonctionnement du D-STATCOM, soit par la régulation de la tension du *PCC* [14], soit par la régulation de la puissance réactive échangée entre le D-STATCOM et le réseau [15], cette dernière méthode a été adoptée dans ce travail. La détection de la puissance réactive consommée ou délivrée par la charge permet de commander le D-STATCOM de sortie qu'il délivrée ou consomme cette puissance, dans ce cas, la référence du courant réactif n'est que la composante imaginaire du courant de la charge, enfin le schéma complet de la commande du D-STATCOM est représenté par la figure (III.11)

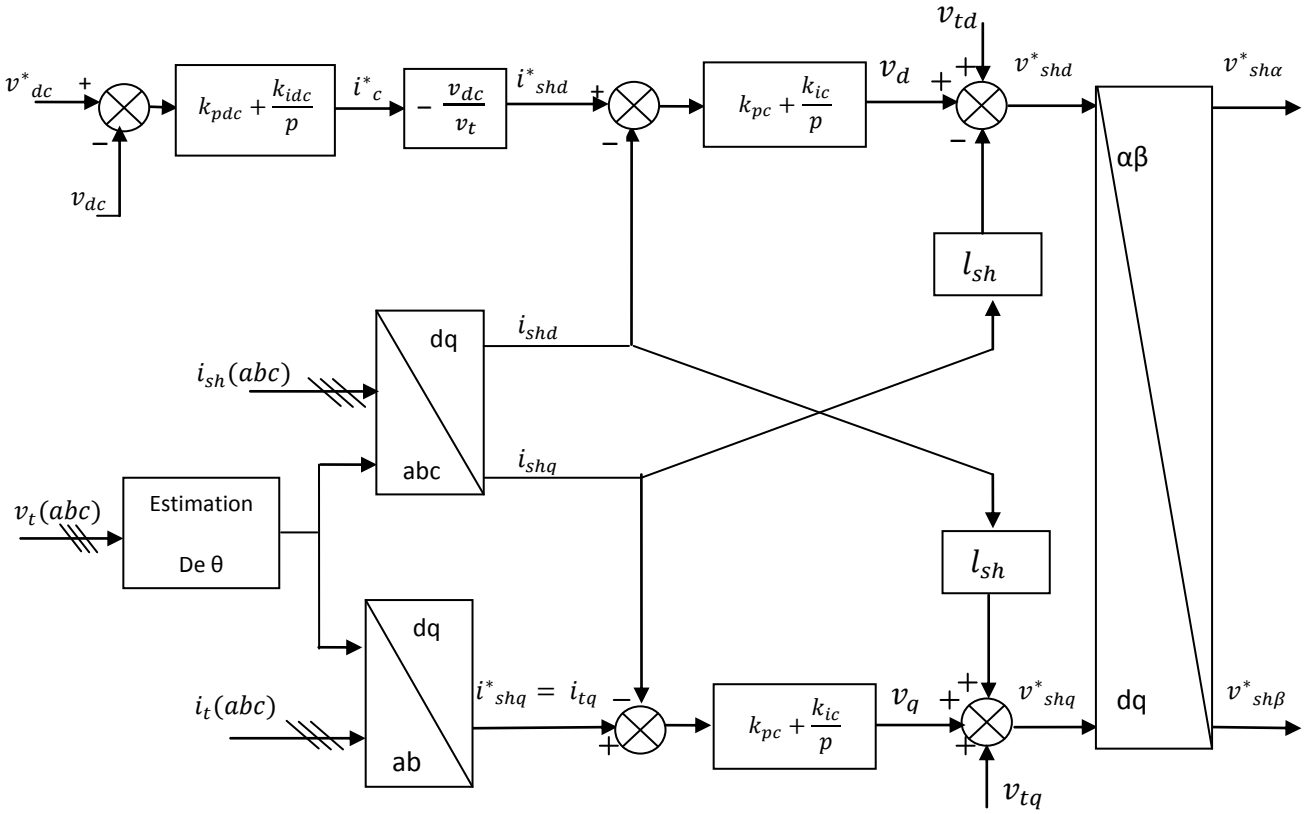


Figure III.10 : Schéma bloc complet de commande du D-STATCOM

III.4 Simulations numériques

Dans ce notre projet on utilisé un onduleur de tension à deux niveaux pour examiné les comportements du D-STATCOM, la simulation de cette dernier sera présenté dans cette section.

III.4.1 Les paramètres du système

Le schéma unifilaire du réseau simple de transport d'énergie électrique utilisé pour valider le fonctionnement du D-STATCOM est représenté par la figure (III.12).

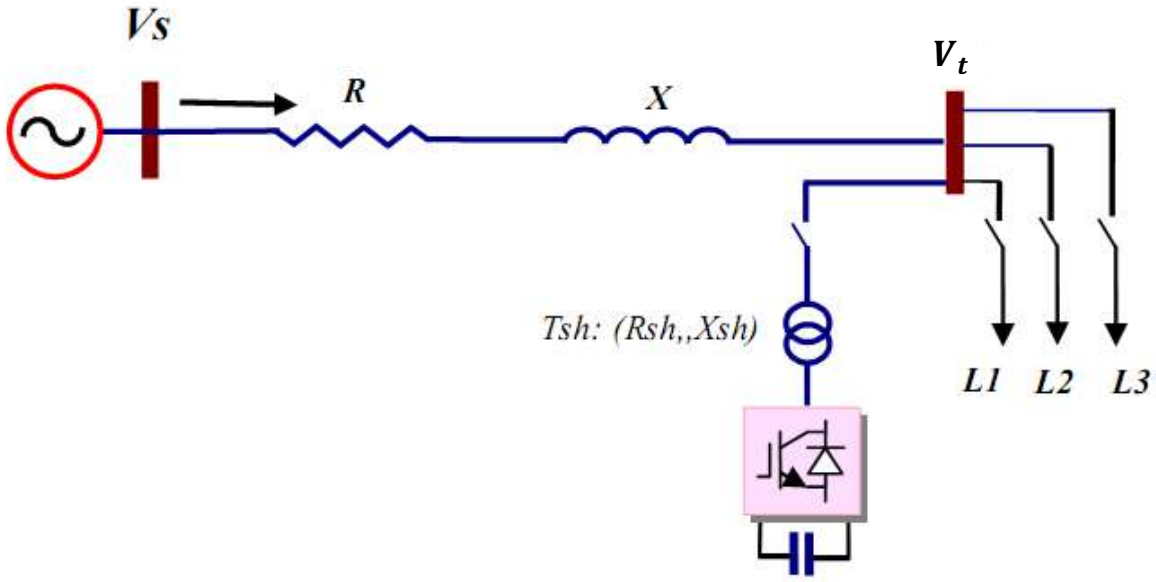


Figure III.11 : Schéma unifilaire du réseau étudié

L1 : charge inductive (L_{ch1}+R_{ch1}) ;

L2 : charge inductive (L_{ch2}+R_{ch2}) ;

L3 : charge capacitive (L_{ch3}+R_{ch3}+C_{ch});

T_{sh} : Transformateur de couplage.

Les paramètres du système à simuler sont donnés par le tableau suivant :

paramètre	Valeur	paramètre	valeur
v_{seff}	5.5 kv	C	5 mF
L_s	0.1mH	L_{sh1}	65 mH
R_s	0.1 mΩ	R_{sh1}	50 Ω
f_s	50 Hz	L_{sh2}	110 mH
L_{sh}	10 mH	R_{sh2}	50 Ω
R_{sh}	0.1 mΩ	L_{sh3}	13 mH
v^*_{dc}	20 kv	R_{sh3}	15 Ω
f_h	5 k Hz	C_{ch}	0.18 mF

Tableau III.1 : Paramètres du système à simuler

Dans ce cas, l'utilisation d'un transformateur abaisseur de rapport de transformation m_t=1/4 est indispensable, les paramètres de ce transformateur sont donnés par le tableau III.2 :

Transformateur	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
	S_n	*3 MVA*	f_n	*50 HZ*
	(L_1, R_1)	*(0.1mH,70mΩ)*	(L_2, R_2)	*(2μF,4mΩ*

Tableau III.2 : Paramètre de transformateur de couplage.

Les paramètres des régulateurs *PI* utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Régulateur	ω_n	ξ
Tension continue	*100*	*0.707*
Courants	*50000*	*1*

Tableau III.3 : Paramètres des régulateurs *PI.*

III.4.2 Résultats de simulation

Initialement le condensateur de bus continu est chargé et la tension aux bornes de cette dernière est de *5 KV*. Au début de la simulation, le réseau électrique alimente la charge (ch_1). La deuxième charge (ch_2) est connectée au réseau à l'instant *(t=0.25s)* ; et à l'instant *(t=0.5s)* on charge la ligne par la charge (ch_3). Et finalement à l'instant (*t=0.75s)* on déconnecte les deux charges (ch_1) et (ch_2).

La figure (III.13) montre l'allure du courant réactif échangé entre le D-STACOM et le réseau. Avant l'instant *(t=0.25s),* le courant réactif de la sortie de D-STATCOM I_{shq}est négatif puis il augmente en chargement la ligne par un autre charge inductive (ch_2), dans ce cas le D-STATCOM fonctionne en mode inductive, et comme la puissance réactive est de signe inverse de courant (équation II.15), donc le D-STATCOM délivre une puissance réactive vers le réseau. Après l'instant *(t=0.5s),* le temps de brochage la charge capacitive et le temps de déconnexion les deux charges inductive le courant réactif devient positif, donc le D-STATCOM

fonctionne en mode capacitive, et absorbe la puissance réactive depuis le réseau.

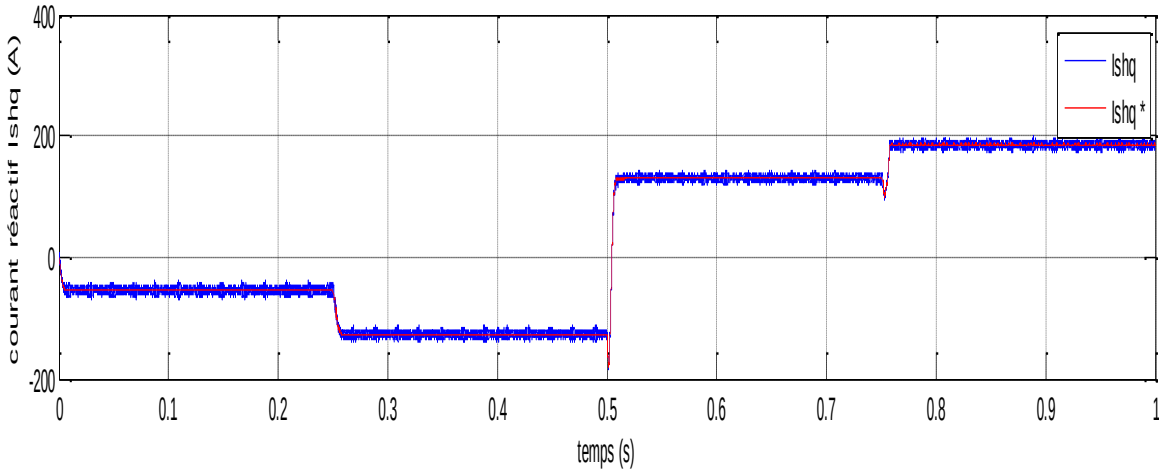


Figure III.12 : Courant réactif injecté par le D-STATCOM dans le réseau

La figure III.13 représente le courant actif échangé entre le D-STATCOM et le réseau. Ce courant généralement faible puisqu'il ne représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension au borne de condensateur plus les pertes de commutation des semi-conducteurs.

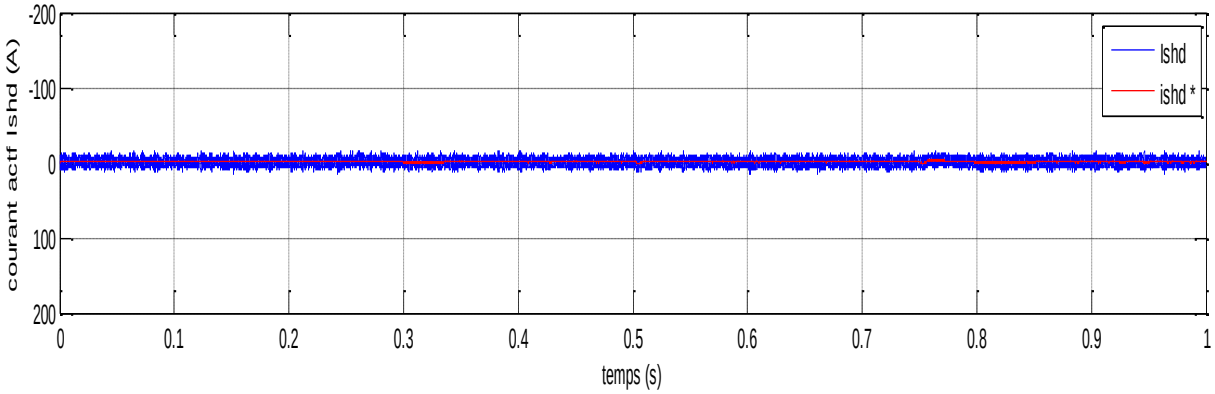


Figure III.13 : Courant actif injecté par le D-STATCOM dans le réseau

On constante que les courants du D-STATCOM, I_{shd} et I_{shq}suivent leur grandeurs de références calculés à partir des puissances réactive et active nécessaires à compenser la puissance réactive dans la ligne et à maintenir la tension continue constante. Ces résultats prouvent l'efficacité des régulateurs utilisés.

La tension V_{td} représente la tension du *PCC*, dans ce cas le D-STATCOM à deux niveaux, cette tension représente la tension du secondaire du transformateur utilisé. En effet, elle représente le quart de la tension du *PCC*. Par conséquent, le courant injecté au réseau est abaissé de quatre fois par rapport de celui généré par le D-STATCOM. Ce dernier et doit débute donc un courant égale à quatre fois le courant réactif demandé par la charge (i^*_{shq} =4 i_{tq}), comme il illustré dans les figure (III.12) et (III.14).

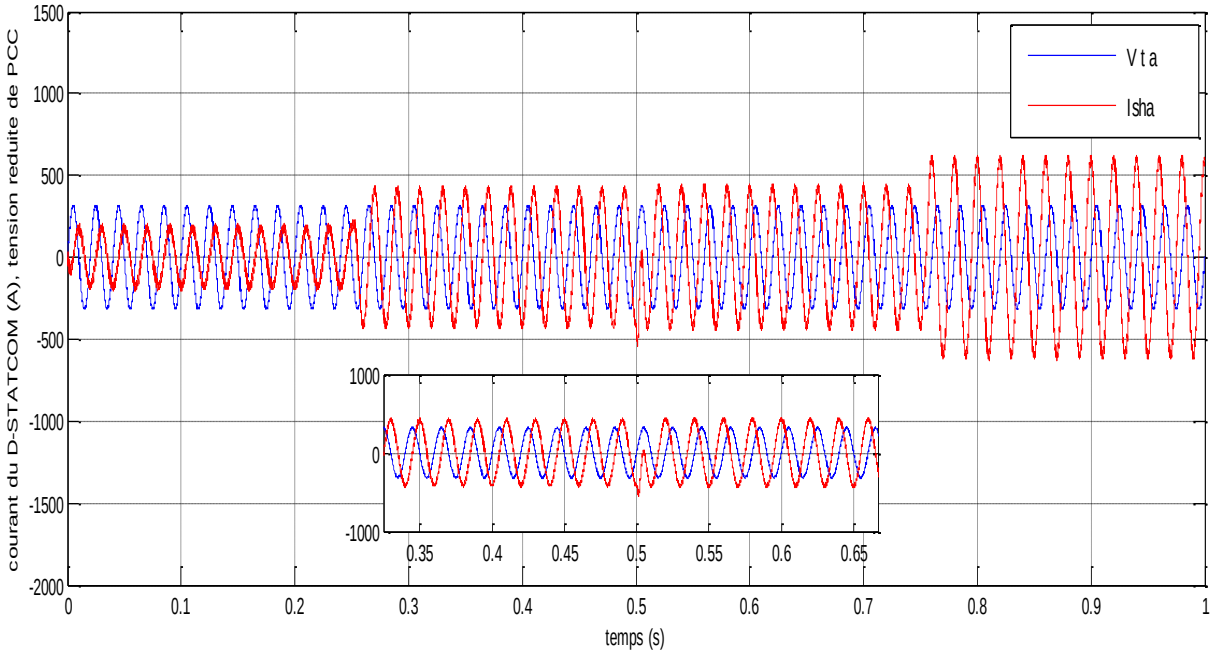


Figure II.14 : Courant de la première phase injecté par le D-STATCOM et la tension de *PCC*

Sur la figure III.14. On remarque que le courant augmente lorsque la ligne est chargée par la charge inductive (ch_2). Avant l'instant (t=0.5s) le courant de premier phase est en avance par rapport à la tension de *PCC* du fait que le D-STATCOM fonctionne en mode inductive. Après l'instant (t=0.5) le courant est en arrière par rapport à la tension de *PCC* . c-à-d le D-STATCOM fonctionne en mode capacitif. En effet, la charge capacitive délivre une puissance réactive dans le réseau, une partie de cette puissance compense le besoin réactif des charge inductive (ch_1 ch_2) et la partie restante est absorbée par le D-STATCOM. Et à l'instant (t=0.75s) les deux charge (ch_1 et ch_2) sont déconnectées et la totalité de la

puissance réactif délivrée par la charge (ch_3) est absorbée par le D-STATCOM.

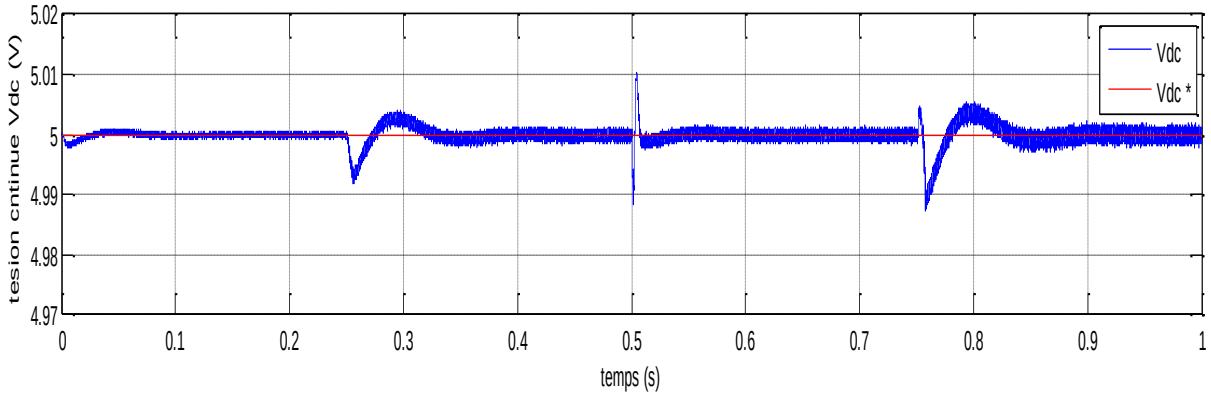


Figure II.15 : Tension du bus continu du D-STATCOM et sa référence

Après la courbe de la figure III.15, il parait très claire que le bloc de régulation continue à prouver son efficacité dans le maintien d'un tension constante aux bornes de bus continu. La tension passe par un régime transitoire d'une durée inferieure à 0.05s lors de la variation de la charge avant qu'elle revienne à sa référence avec une erreur statique presque nulle.

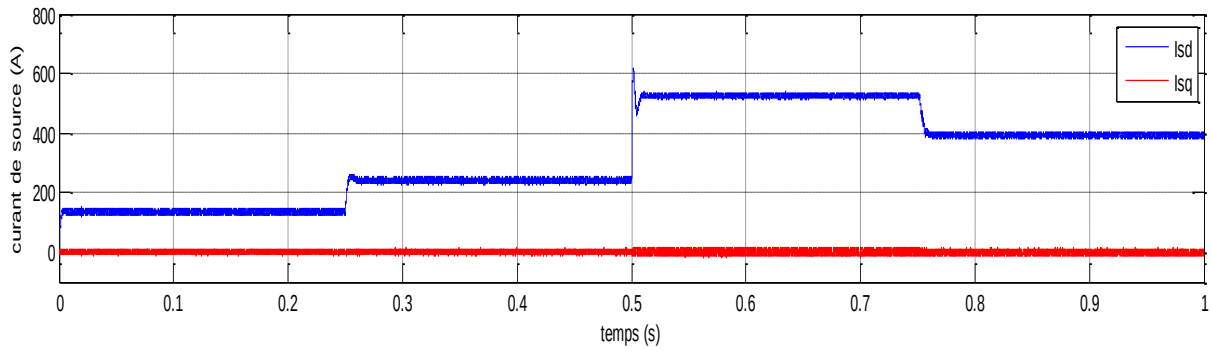


Figure II.16 : Composantes actif et réactif du courant de la source

La figure III.16 représente les deux composantes actif et réactif du courant de source. La composante réactive est toujours nulle, ce qui montre que le D-STATCOM compense la totalité de la puissance réactive demandée par la charge et par conséquent, il assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire de la source.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le comportement d'un D-STATCOM connecté à un réseau de distribution fonctionnant en mode capacitif ou en mode inductif. Au début nous avons modélisé le D-STATCOM pour obtenir les synthèses des régulateurs indispensables pour le bon fonctionnement de ce dispositif. Et enfin, nous avons présenté les résultats de simulation.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la méthode adoptée dans la régulation des puissances active et réactive à travers le contrôle des courants actif et réactif correspondants. Le contrôle de ces derniers par des régulateurs proportionnel-intégrale a conduit à des résultats satisfaisants.

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'amélioration de la gestion des réseaux électriques de distribution et porte sur le contrôle de la tension par compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif *FACTS* à base d'onduleur de tension à deux niveaux commandé par *SVM* (D-STATCOM). Notre objectif étant de compenser la puissance réactive absorbée ou fournie par la charge afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire ou *PCC*.

Le premier chapitre, est consacré à la qualité d'énergie électrique et les différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les dispositifs FACTS, shunt (D-STATCOM), série (SVC) et hybride (UPFC) et leurs combinaisons, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension.

Dans la première partie du deuxième chapitre, nous avons commencé par un bref rappel sur les dispositifs FACTS, en présentant leurs définitions, leurs applications et leurs différentes catégories selon le type de connexion. Après, on a cité quelques dispositifs en présentant pour chacun d'eux sa configuration, son principe de fonctionnement et ses application. La deuxième partie a fait l'objet d'une étude plus détaillée sur le compensateur shunt D-STATCOM. En effet, sa structure, son principe de fonctionnement et son action sur le réseau de distribution d'énergie sont revus. Enfin dans la troisième partie, une étude approfondie sur la modélisation et la modulation vectorielle de

l'onduleur de tension à deux niveaux. Nous avons vu que la qualité de tension de sortie dépend des paramètres de la modulation.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique d'un D-STATCOM connecté à un réseau électrique. Afin d'analyser l'influence de D-STATCOM sur le réseau, nous avons démontré les relations entre les différentes variables du réseau en fonction des paramètres du contrôle du D-STATCOM.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle de D-STATCOM peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives , il assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire de la source.

Comme perspectives nous proposons:

- La commande d'un D-STATCOM multiniveaux
- L'application des méthodes de commandes non linéaires ;
- L'étude d'autres dispositifs FACTS.

Annexes

TRANSFORMATION DE PARK

1 Transformation de CONCORDIA

Cette transformation permet le passage d'un système triphasé équilibré à un système biphasé selon la figure suivante:

Soit les trois grandeurs d'un réseau électrique (tension par exemple Vs) équilibrées:

$V_{sa} = V_s \sin(\omega t)$

$V_{sb} = V_s \sin(\omega t + 2\pi/3)$

$V_{sc} = V_s \sin(\omega t + 4\pi/3)$

Avec: Vs la tension efficace du système de tension.

ω La pulsation de ces tensions.

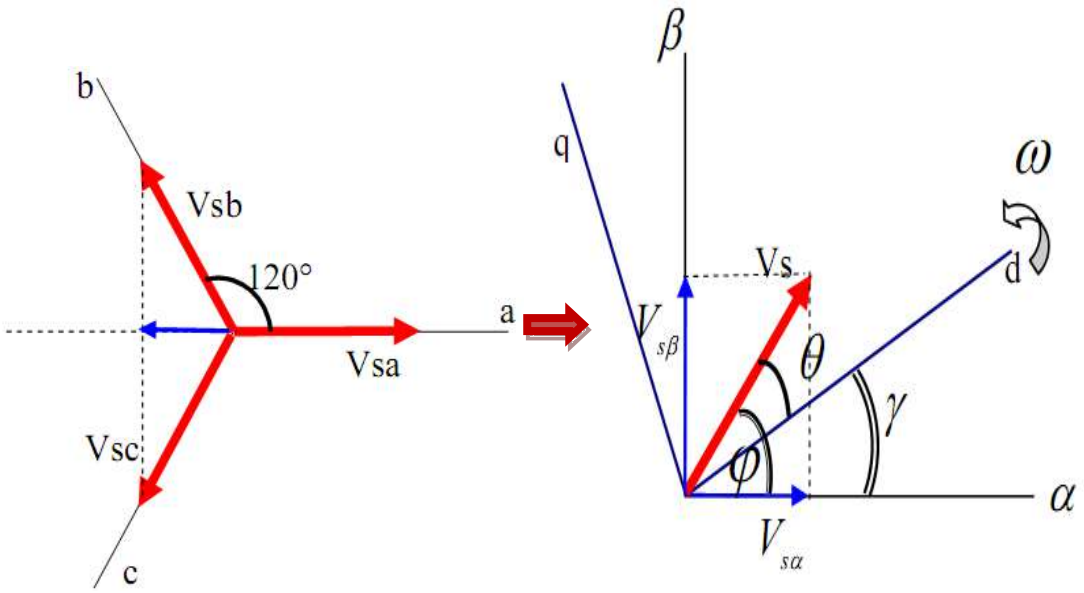


Figure 1 : passage de modèle triphasé au le modèle biphasé

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

passage du repère fixe (αβ) au repère synchrone (d-q)

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Le passage inverse est exprimer par

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \\ -\cos(\gamma) & \sin(\gamma) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}$$

[1] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI,'' Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques, thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I ,13 oct. 2003

[2]H. Rachida '' Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique'', mémoire de magistère, université de Oran, 2009.

[3] Abdelaàli ALIBI,'' Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)'' mémoire de magister, université de Batna, juin 2009.

[4] BOUAFIA ABDELOUAHAB,'' technique de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseur a mli '', université de FERHAT ABBAS – SETIF, 06-10-2010.

[5] M. Alaa Eddin Alali, "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension" thèse de doctorat l'Université Louis Pasteur – Strasbourg 2002

[6] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet « Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l'ingénieur D 4 315.

[7] Abdelmalek BOULEHIA, '' Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique'' thèse magister université de Constantine, 2009.

[8] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho," FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.

[9] Haizea Gaztanaga Arantzamendi, '' étude de structure d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux microréseaux'', thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, décembre 2010.

[10] Brahim Bekki, ''contribution du SMES, dispositif FACTS à la stabilisation d'un réseau électrique haute tension '', mémoire de magister, Ecole nationale supérieure polytechnique Alger, sep 2006.

[11] Haibaoui ; Taybi « Etude Modélisation et Application des dispositifs –FACTS- dans les réseaux d'énergie électriques » Mémoire de fin d'étude 2007

[12] The Dung NGUYEN, '' Etude de stratégies de modulation pour onduleur triphasé dédiées à la réduction des perturbations du bus continu en environnement embarqué'', Laboratoire d'Electromécanique, EA1006, 30 novembre 2011

[13] M.Bouzidi et A.Bensaadi, ''commande non linéaire d'un redresseur PWM triphasé '' Mémoire de magistère de fin d'études, université de m'sila, 2009.

[14] Maryam Saeedifard, ''Space Vector modulation of multi-level and multi-module converters for High power applications'' thèse de doctorat, université de toronto, canada, 2008.

[15] Yidan li and Bin Wu,''a novel DC voltage detection technique in the CHB inverter-based STATCOM'',IEEE translations on power delivery, vol,23,No,3,july2008,pp.1613-1619.

[16] Philippe Ferracci « La Qualité de l'énergie électrique » Cahier Technique n° 199.

[17] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.

[18] Hanane Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.