

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



**Université de Batna 2**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'Électrotechnique**



## **Mémoire**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de  
MAGISTER en Électrotechnique**

### **OPTION**

**RESEAUX ELECTRIQUE**

**Par**

**BOUKARANA LEILA**

**Thème**

---

# **Impact des Convertisseurs Statique Multi Niveaux sur les Performances des Systèmes UPFC (Unified Power Flow Controller)**

---

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. FETHA Cherif	Prof.	Université de Batna	Président
Pr. ARROUF Mohamed	Prof.	Université de Batna	Rapporteur
Pr. BENDAAS Mohamed Lokmane	Prof.	Université de Batna	Examineur
Dr. LABED Djamel	M.C.A.	Université de Constantine	Examineur



# DIDICACE

*Un très grand honneur.*

*Un très grand respect.*

*Et surtout beaucoup d'amour.*

*Je dédie se modeste travail*

*A tout ceux qui me connu et aimé.*

*Boukarana Lilia.*

# *REMERCIEMENT*

Je dois remercier tous d'abord en premier mon dieu puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il ma donnée dans ma vie.

A cette occasion, je tien à témoigner ma reconnaissance à toute personne ayant aidé, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Au terme de ce travail, je voudrais exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Mohamed ARROUF, Professeur au département d'électrotechnique de l'Université de Batna d'avoir accepter d'être le rapporteur de ce mémoire, pour ces précieux conseils et encouragements tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur Cherif FETHA professeur de l'enseignement supérieur au département d'électrotechnique de l'Université de Batna qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

J'adresse mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce mémoire en lui apportant de l'intérêt, Monsieur Djamel LABED Maître de Conférences à l'Université de Constantine, et Monsieur Mohamed Lokmane BENDAAS Professeure au département d'électrotechnique de l'Université de Batna.

# Mon dieu

- ✚ *Accorde-moi un esprit souple afin que j'accepte de paraître faible et sans défense, plutôt que de peiner ou de briser.*
- ✚ *Accorde-moi un esprit droit afin que je n'interprète jamais en mal la peine que l'on me fait.*
- ✚ *Accorde-moi un esprit simple afin que je ne sois pas un poids pour ceux qui m'entourent.*
- ✚ *Accorde-moi un cœur ardent afin que je reste ouvert à ceux qui pourraient me haïr, m'envier ou me jalouser.*
- ✚ *Accorde-moi un cœur humble afin que je ne raidisse pas devant les critiques, les procédés déloyaux, les jugements durs ou hâtifs.*
- ✚ *Accorde-moi un cœur large afin que je supporte les étroitures d'esprit et les égoïsmes révoltants.*
- ✚ *Accorde-moi une volonté ferme afin que je persévère malgré la fatigue et malgré l'ingratitude.*
- ✚ *Accorde-moi une volonté patiente afin que j'aime mes frères malgré leurs défauts, malgré leurs faiblesses.*
- ✚ *Accorde-moi une volonté rayonnante afin qu'autour de moi personne ne se décourage, personne ne désespère.*
- ✚ *Accorde-moi de ne jamais croire au mal que l'on me dit des autres et surtout, de ne jamais le répéter.*
- ✚ *Accorde-moi surtout de savoir écouter, de savoir deviner, de savoir pardonner afin que mes frères soient plus heureux.*

*Amen*

*Boukarana.Lilia*

# Liste des symboles et abréviations



## Abréviation.

❖ FACTS	Flexible Alternatif Curant Transmission Systems.
❖ TCR	Thyristor Controlled Reactor.
❖ TSC	Thyristor Switched Capacitor.
❖ SVC	Static Var Compensator.
❖ STATCOM	Static Compensator.
❖ TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor.
❖ TSSC	Thyristor Switched Serie Capacitor.
❖ TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor.
❖ TSSR	Thyristor Controlled Series Reactor.
❖ SSSC	Static Synchronous Series Compensator.
❖ IPFC	Interline Power Flow controller.
❖ UPFC	Unified Power Flow controller.
❖ MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.



## Variables

❖ $V_s$	Tension au point de départ (génération).
❖ $V_R$	Tension au point d'arrivée (le récepteur).
❖ $V_{abc\_Ch}$	Tension composé de la charge.
❖ $I_{abc\_Ch}$	Courant de la charge.
❖ $I_{abc\_f}$	Courant du filtre.
❖ $V_{abc\_S}$	Tension de la source.
❖ $V_{se}$	Tension générée par le compensateur série (SSSC).
❖ $V_{sed}$	La composante directe de la tension générée par le compensateur série.
❖ $V_{pq}$	La tension à la sortie du transformateur série.
❖ $V_{sh}$	La tension générée par le compensateur shunt (STATCOM).
❖ $V_{shd}$	La composante directe de la tension générée par le compensateur shunt.
❖ $V_{shq}$	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt.
❖ $I_s$	Courant de la ligne.
❖ $I_{sd}$	Composante du courant de la ligne selon l'axe d.

- 
- ❖  $I_{sq}$  Composante du courant de la ligne selon l'axe q.
  - ❖  $I_{sh}$  Courant fournit par le compensateur shunt.
  - ❖  $I_{shd}$  Composante directe du courant fournit par le STATCOM.
  - ❖  $I_{shq}$  Composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.
  - ❖  $P_s$  Puissance active fournit par la source.
  - ❖  $Q_s$  Puissance réactive fournit par la source.
  - ❖  $P_R$  Puissance active au point d'arrivée (le récepteur).
  - ❖  $Q_R$  Puissance réactive au point d'arrivée (le récepteur).
  - ❖  $P_0$  Puissance active sans compensation.
  - ❖  $Q_0$  Puissance réactive sans compensation.
  - ❖  $P_{se}$  Puissance active fournit par le compensateur série (SSSC).
  - ❖  $P_{sh}$  Puissance active fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
  - ❖  $Q_{se}$  Puissance réactive fournit parle compensateur série (SSSC).
  - ❖  $Q_{sh}$  Puissance réactive fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
  - ❖  $\delta$  L'angle de charge (l'angle entre la tension de départ et la tension d'arrivée).
  - ❖  $\delta_{se}$  Le déphasage de la tension fournit par le compensateur série (SSSC).
  - ❖  $\delta_{sh}$  Le déphasage de la tension fournit par le compensateur shunt (STATCOM).



## Paramétrés

- ❖  $R_1$  Résistance au début de la ligne.
- ❖  $L_1$  Inductance au début de la ligne.
- ❖  $R_2$  Résistance à la fin de la ligne.
- ❖  $L_2$  Inductance à la fin de la ligne.
- ❖  $R_{se}$  La résistance du compensateur série.
- ❖  $L_{se}$  L'inductance du compensateur série.
- ❖  $R_{sh}$  La résistance du compensateur shunte.
- ❖  $L_{sh}$  L'inductance de fuit du compensateur shunt.
- ❖  $C$  La capacité du circuit commun DC.

# *Sommaire*

*Dédicace*

*Remerciements*

*Supplémentaire*

*Liste des symboles*

*Conférences et Communication*

*Introduction Général*

---

## ***Chapitre I :***

### **Etats de l'Art sur les Systèmes FACTS**

I-1-Introduction.....	1
I-2-Application des FACTS.....	2
I-3-Différentes catégories des FACTS.....	3
I-3-1-Dispositifs séries.....	4



I-3-2-Dispositifs shunts.....	5
I-3-3-Dispositifs hybrides série-shunt.....	5
I-4-Structure des principaux dispositifs FACTS.....	6
I-4-1-Dispositifs shunts.....	6
✚ SVC (Static Var Compensator).....	6
✚ STATCOM.....	9
I-4-2-Dispositifs séries.....	12
✚ TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).....	12
✚ SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	14
I-4-3-Dispositifs hybrides.....	16
I-5-Unified Power Flow Controller (UPFC).....	18
I-5-1-Description .....	18
I-5-2-Principe de fonctionnement.....	20
I-6-Conclusion.....	25

## **Chapitre II :**

# Modélisation et commande d'un Système de Contrôle Série – Parallèle : (UPFC)

II-1-Introduction.....	26
II-2- Structure et conception de base de l'UPFC.....	27
II-2-1-Principe de fonctionnement de l'UPFC.....	28
II-2-2- Modélisation de la partie shunt de l'UPFC .....	28
II-2-2-1-Contrôle du STATCOM .....	30
II-2-2-2-Détermination des Références .....	31
II-2-2-3-Synthèse des régulateurs des courants.....	33
II-2-2-4-Synthèse du régulateur de la tension continue.....	35
II-2-3-Modélisation de la partie série de l'UPFC.....	37
II-2-3-1-Contrôle de l'SSSC.....	39
II-2-3-2-Identification des références.....	39
II-2-3-3-Calcul des Régulateurs PI .....	42

II-2-3-4-Régulation de la tension continue Udc .....	42
--	----

II-4-Conclusion.....	43
----------------------	----

### ***Chapitre III :***

## **Modélisation et Commande des Onduleurs de Tension à deux et Trois Niveaux, Structure (NPC)**

III-1-introduction.....	44
-------------------------	----

III-2-Etat de l'art des onduleurs multi-niveaux.....	44
--	----

III-3-Onduleur de tension à deux niveaux.....	47
---	----

III-3-1-Modélisation de l'onduleur.....	47
---	----

III-3-1-1-Structure générale.....	47
-----------------------------------	----

III-3-1-2-Fonction de commutation.....	48
--	----

III-3-1-3-Commande complémentaire des interrupteurs.....	48
--	----

III-3-1-4-Tension de sortie.....	49
----------------------------------	----

III-3-1-5-Représentation vectorielle.....	51
III-3-2-Commande de l'onduleur à deux niveaux.....	55
III-3-2-1-MLI vectorielle (SVM).....	55
III-3-2-1-1-Principe de la MLI vectorielle.....	55
III-3-2-1-2-Calcul des temps de commutation.....	60
III-3-2-1-3-Génération des impulsions de commande.....	62
III-3-2-1-4-Schéma bloc da la MLI vectorielle.....	64
III-3-2-2-MLI classique (PWM) sans injection de l'harmonique trois.....	67
III-3-2-2-1-La technique triangulo-sinusoidale.....	67
III-3-2-2-2-La technique triangulo-sinusoidale à une seule porteuse bipolaire.....	68
III-4-Onduleur à trois niveaux.....	72
III-4-1-Modélisation de l'onduleur.....	72
III-4-1-1-Structure générale.....	72
III-4-1-2-Modèle de l'interrupteur bidirectionnel en courant.....	73
III-4-1-3-Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur.....	75
III-4-1-4-Commandabilité d'un bras d'onduleur.....	75

III-4-1-5-Les différentes configurations électriques d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	76
III-4-1-6-Fonction de commutation.....	80
III-4-1-7-Commande complémentaire des interrupteurs.....	80
III-4-1-8-Tension de sortie.....	81
III-4-2-Commande de l'onduleur à trois niveaux.....	82
III-4-2-1-MLI classique (PWM) sans injection de l'harmonique trois.....	82
III-4-2-1-1-La technique triangulo-sinusoïdale à deux porteuses unipolaires triangulaires....	82
III-4-2-2-1-La stratégie triangulo-sinusoïdale à une seule porteuse unipolaire.....	86
III-5-Taux de distorsion harmonique.....	89
III-6-Conclusion.....	93

## ***Chapitre IV :***

# Simulation et Résultats du Système UPFC, deux et trois Niveaux

IV-1-Introduction.....	94
IV-2-Description du réseau étudié.....	95
IV-3-Simulation du réseau électrique sans compensation .....	97

IV-4-Impact du STATCOM sur le contrôle du réseau électrique.....	99
IV-4-1-Un onduleur classique à deux niveaux.....	100
IV-4-1-1-Les caractéristiques de la ligne.....	100
IV-4-1-2-Les caractéristiques du STATCOM.....	103
IV-4-1-3-Les caractéristiques de la commande du STATCOM.....	105
IV-4-2-Simulation du STATCOM avec un onduleur à trois niveaux du type NPC.....	106
IV-4-2-1-Les caractéristique de la ligne.....	106
IV-4-2-2-Les caractéristiques du STATCOM.....	108
IV-4-2-3-Les caractéristique du bloc de commande.....	110
IV-4-3-Etat de comparative.....	113
IV- 5-Impact du compensateur série SSSC sur le contrôle du réseau électrique.....	121
IV-5-1-Caractéristiques des tensions.....	121
IV-5-2-Contrôle du flux de puissance.....	123
IV-4-Conclusion.....	124

---

*Conclusion général*

*Annexes*

*Bibliographiés*

# Introduction Générale

# *Introduction général*

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 cout 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.

Dans une ligne de transmission le flux de puissance est déterminé par trois paramètres électriques essentiels à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport. Le changement d'un de ces paramètres électrique, produit une variation de la puissance à travers la ligne de transmission.

Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateurs à prises réglables en charge, transformateurs à décalage d'angle, condensateurs et inductances additionnelles commutés par disjoncteurs pour compensation série ou shunt, modification des consignes de production de puissance active et réactive des générateurs et changement de la topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Une évolution des interrupteurs à la base de semi-conducteur a permis un meilleur contrôle d'écoulement de la puissance et du système électrique entier. Depuis une vingtaine d'années, de nombreux semi-conducteurs ont été développés, et grâce à eux les dispositifs



d'électronique de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux. Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Des exemples de FACTS sont le SVC (Static Var Compensator), le STATCOM (Static Compensator), le TCSC (Thyristor Controlled Series Compensators), le SSSC (static Synchronous Series compensator), l'UPFC (Unified Power Flow Controller). Ces dispositifs agissent sur la tension et / ou l'impédance de la ligne en injectant la quantité de la puissance active et / ou réactive nécessaire à la compensation.

Le système UPFC combine à la fois la compensation série et la compensation shunt. C'est le dispositif le plus puissant, dans la mesure où il est permis de régler les trois grandeurs électriques du réseau.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les performances de l'UPFC comme étant un variateur de charge universel permettant de contrôler l'écoulement de puissance à travers une ligne de transmission et de compenser la puissance réactive. Cette étude est organisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre donne une brève revue sur l'état de l'art sur les systèmes FACTS.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté l'analyse et la modalisation du système de contrôle série et parallèle UPFC.

Le troisième chapitre, présenté de la modélisation et la commande des onduleurs de tension à deux et trois niveaux, structure NPC.

La dernière partie sera consacrée à l'analyse par la simulation de l'impact de l'UPFC sur le contrôle de la tension et du flux de puissance des lignes électriques.

**« Continue à travailler fort et tu pourras obtenir tout ce que tu voudras ! »**

***Aaliyah***

# *Chapitre I*

## **Etat de l'Art sur les systèmes FACTS**

# Chapitre I

## *Etats de l'Art sur les Systèmes FACTS*

### **I-1-Introduction :**

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques, [1].

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 (à base d'interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils 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 :

Les compensateurs parallèles

Les compensateurs séries

Les compensateurs hybrides (série - parallèle)

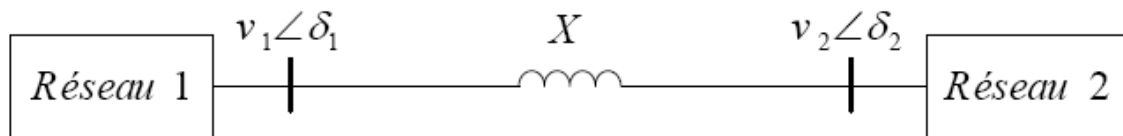
Dans ce chapitre nous parlerons de ces compensateurs en général et de l'UPFC en particulier [1].

## I-2-Application des systèmes FACTS

Les systèmes FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissance moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance.

L'aide principale des dispositifs FACTS peut être expliquée par l'équation de base (I-1) de la puissance active (P) transitée entre deux réseaux de tensions  $V_1$  et  $V_2$ , présentant un angle de transport ( $\delta$ ) (déphasage entre  $V_1$  et  $V_2$ ) et connectés par une liaison d'impédance X est donnée par l'équation suivante, [1] :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \quad (\text{I-1})$$



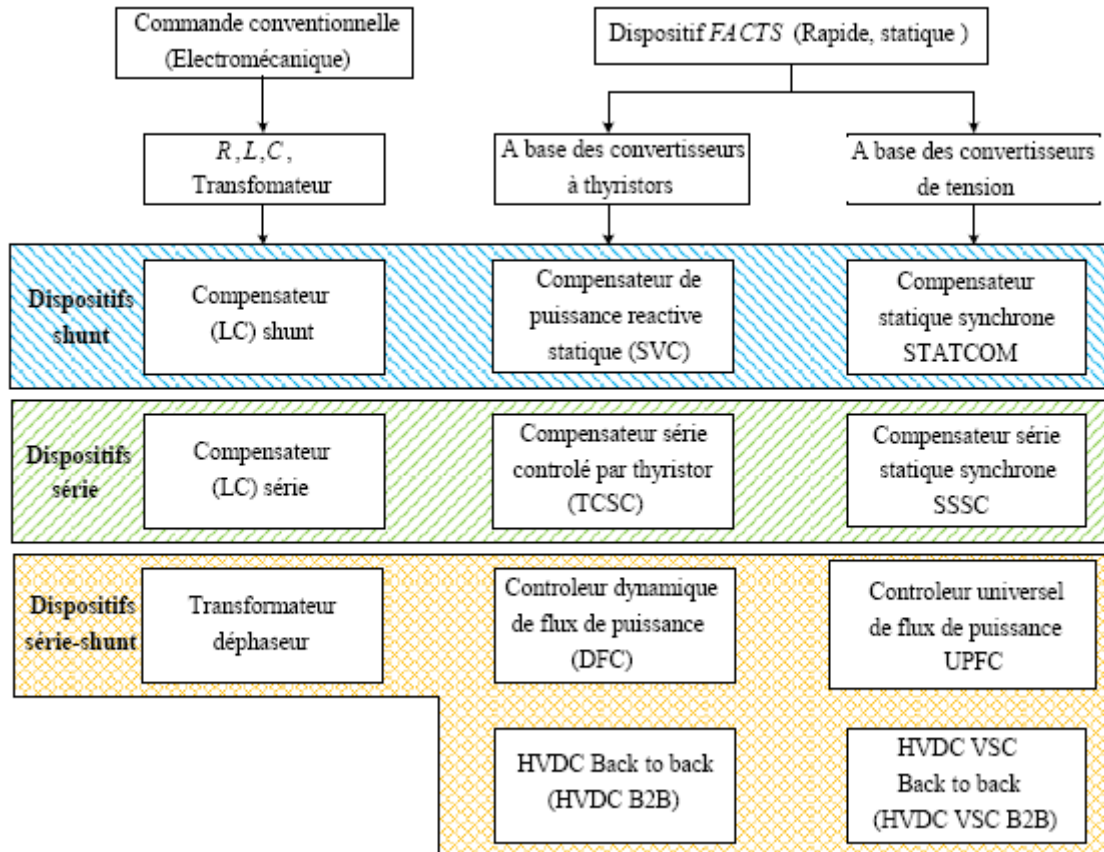
**Figure (I-1) :** Circuit équivalent de deux réseaux connectés par une ligne de transmission.

Cette équation montre qu'il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en augmentant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive

et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements [2].

### **I-3-Différentes catégories des dispositifs FACTS**

L'organigramme de la figure (I-2) représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques [3] ; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composants de base (R, L et C) et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs électro-mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance. La colonne de gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base de convertisseurs à thyristors tel que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leurs fiabilités dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs à base de interrupteurs statiques tels que les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) pour donner naissance à des nouveaux dispositifs comme le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs fournissent ou injectent une tension ou un courant totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle, dans le réseau selon les exigences de contrôle [3].



**Figure (I-2) :** Grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.

En générales les dispositifs FACTS sont divisé en trois grandes catégories principales :

### I-3-1-Dispositifs séries

Ces dispositifs 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].



### I-3-2-Dispositifs shunts

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

### I-3-3-Dispositifs 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-variable, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

Le tableau (I-1) montre les applications de ces dispositifs en fonction de leur type de connexion avec le réseau [3].

<i>Type de connexion</i>	<i>Application</i>
<b>Série</b>	Réduction des creux et déséquilibres des tensions, compensation des harmonique de tension, réglage d'impédances de lignes et de flux de puissance...etc.
<b>Shunt</b>	Filtrage actif de courant, réglage de plan de tension, compensation du réactif, soutien du réseau, réduction de l'effet de Flicker, équilibrage de charge...etc.

**Tableau (I-1) :** Type de connexion et applications associées.

## I-4-Structure des principaux dispositifs FACTS :

### I-4-1-Dispositifs shunts :

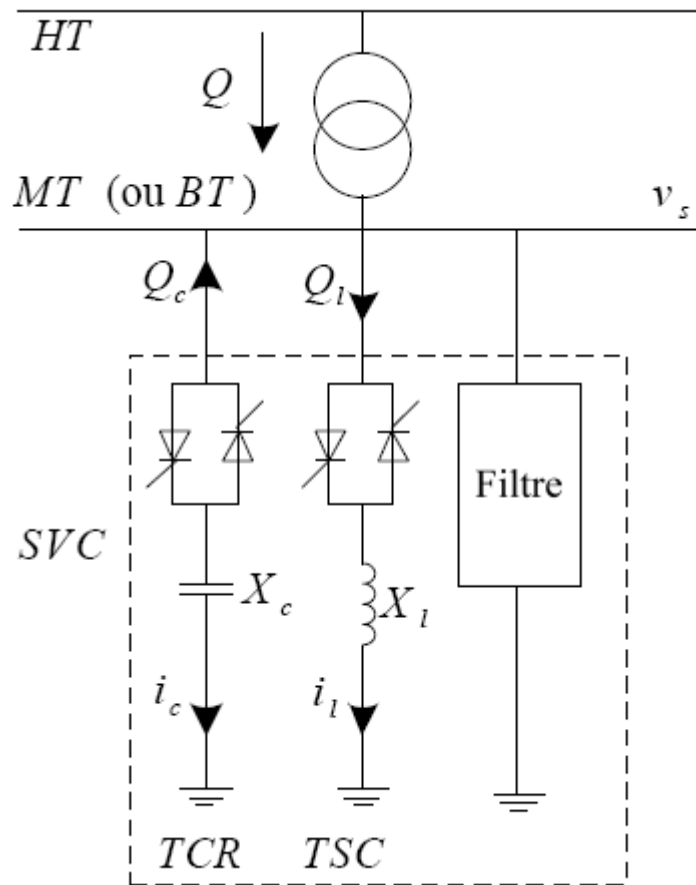
#### ✚ SVC (Static Var Compensator), [3]

Appartenant à la famille des compensateurs parallèles à base de thyristors, le dispositif SVC est un moyen shunt de compensation réactive. Il est utilisé pour sa grande influence sur la tension. Le terme « statique » indique que le SVC ne contient pas de parties tournantes ou mécaniques.

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 comme le montre la figure (I-3) :

- ✓ 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, [3].
- ✓ TSC (Thyristor Swithed Capacitor): des capacités commandées par thyristors fonctionnant en pleine onde, [3].

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



**Figure (I-3) :** Structure d'un SVC

Le compensateur statique de puissance réactive est considéré comme un commutateur qui peut fixer le signe de la puissance réactive. Cette dernière est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Par contre lorsque le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), le courant et la puissance réactive prennent un signe négatif.

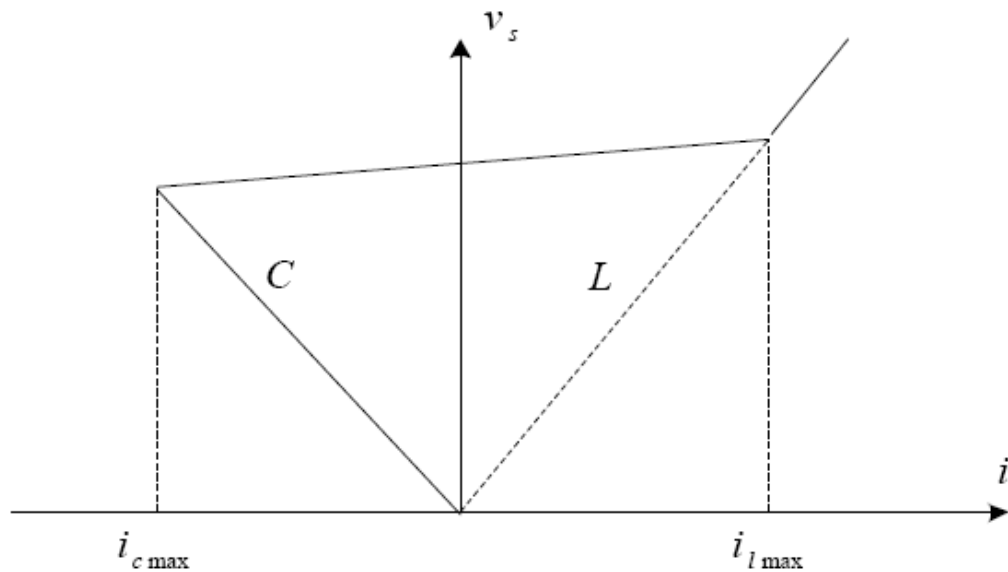
Les compensateurs statiques de puissance réactive (SVC) permettent de stabiliser la tension du réseau à la valeur de consigne. La tension mesurée est comparée avec la valeur de référence. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau, l'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la

puissance réactive absorbée ou générée, en sélectionnant le nombre approprié de condensateurs ou d'inductances à mettre en service et la valeur de l'angle d'amorçage  $\alpha$  des thyristors. Ceci 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 [3].

D'après la figure (I-3), la puissance réactive absorbée sur cette branche est telle que :

$$Q = \frac{v_s^2}{X_L} - \frac{v_s^2}{X_C} \quad (\text{I- 2})$$

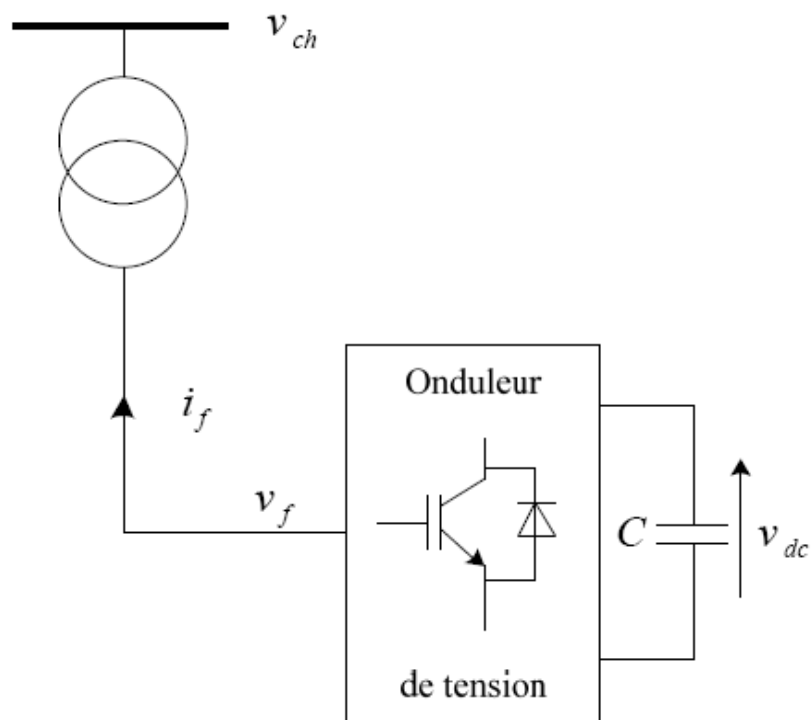
Les courants qui circulent dans l'inductance et dans le condensateur sont réglés de façon continue par les thyristors. En pratique, l'effet inductif du SVC est petit par rapport à son effet capacitif. La figure (I-4) représente la caractéristique tension-courant du SVC. Si on débranche le condensateur du compensateur statique le courant dans les inductances est alors à sa valeur maximale. La droite montre la relation entre la tension  $V_s$  et le 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. La relation entre le courant et la tension est une nouvelle droite désignée par (C). Les droites (L) et (C) forment une courbe en V qui correspond aux limites inductives et capacitives du compensateur statique, [3].



**Figure (I-4) :** Caractéristique V-I d'un SVC

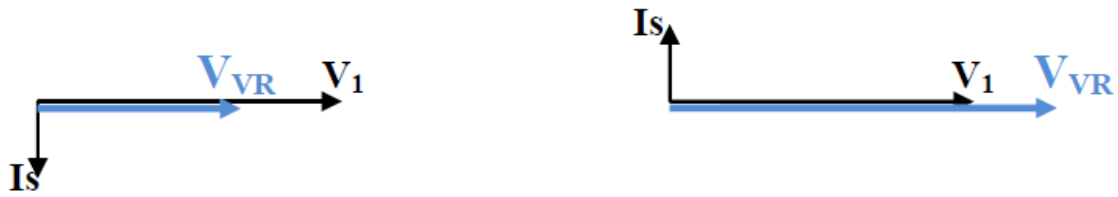
#### ✚ STATCOM

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO ou d'IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage comme le montre la figure (I-5). Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie électro-mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques telles que sa dynamique rapide et son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones [4].



**Figure (I-5) :** 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 de liaison. Comme on peut le voir de la figure (I-6), ce dispositif peut travailler avec son courant nominal même à des tensions réduites. Donc, sa puissance réactive varie linéairement avec la tension. Par contre, le courant injecté par le SVC diminue linéairement avec la tension et par conséquent la puissance réactive diminue quadratiquement. Cette caractéristique montre que le STATCOM est mieux adapté aux transitoires comme les creux de tension [5].



**Figure (I-6) :** Caractéristique V-I d'un STATCOM,

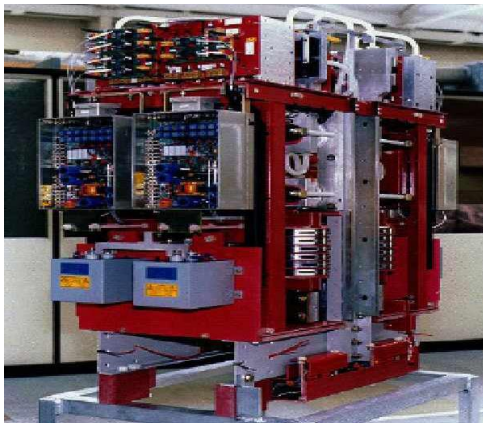
(a) : Courant inductive, (b) : courant capacitif.

Les principales applications des compensations shuntées sont [6] :

- ✓ Soutien de la tension en régime permanent.
- ✓ Compensation rapide de la puissance réactive.
- ✓ Stabilisation statique et transitoire de la tension.
- ✓ Réduction des risques de résonance hypo-synchrone.
- ✓ Equilibrage dynamique des charges.
- ✓ Amélioration de la stabilité transitoire.



Emplacement d'un STATCOM.



Une cellule STATCOM



Une phase d'un STATCOM.

**Figure (I-7) :** Exemple d'un STATCOM.

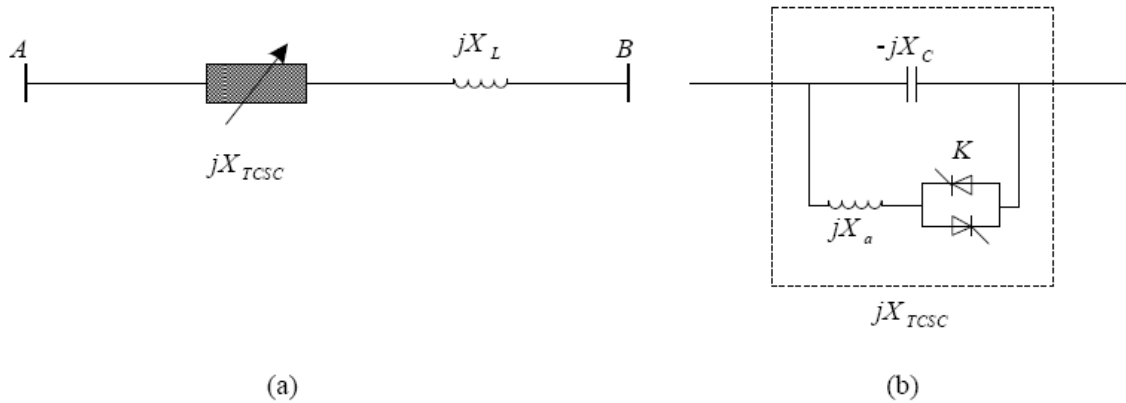
#### I-4-2-Dispositifs séries

##### ✚ TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), [6]

Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité comme le montre la figure (I-8). Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes



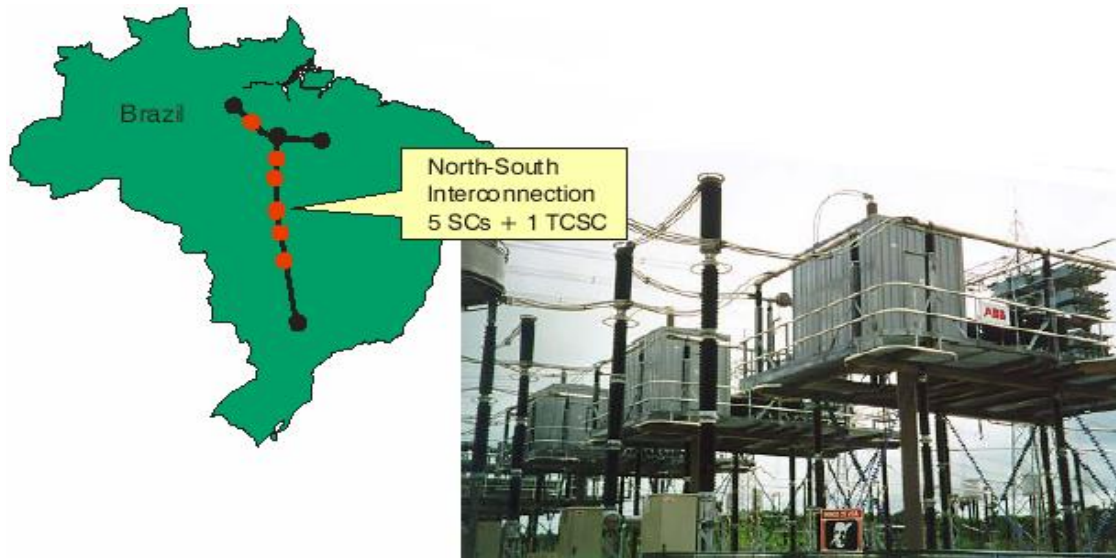
en agissant sur la réactance  $X_{TCSC}$  qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors  $\alpha$ .



**Figure (I-8) :**(a) Schéma équivalent d'une ligne équipée d'un TCSC, (b) Structure d'un TCSC

La nouvelle réactance du réseau  $X_t$  variée en fonction de la réactance  $X_{TCSC}$ , ce qui permet, après l'équation (I-1), de contrôler la puissance transitée par la ligne de transport.

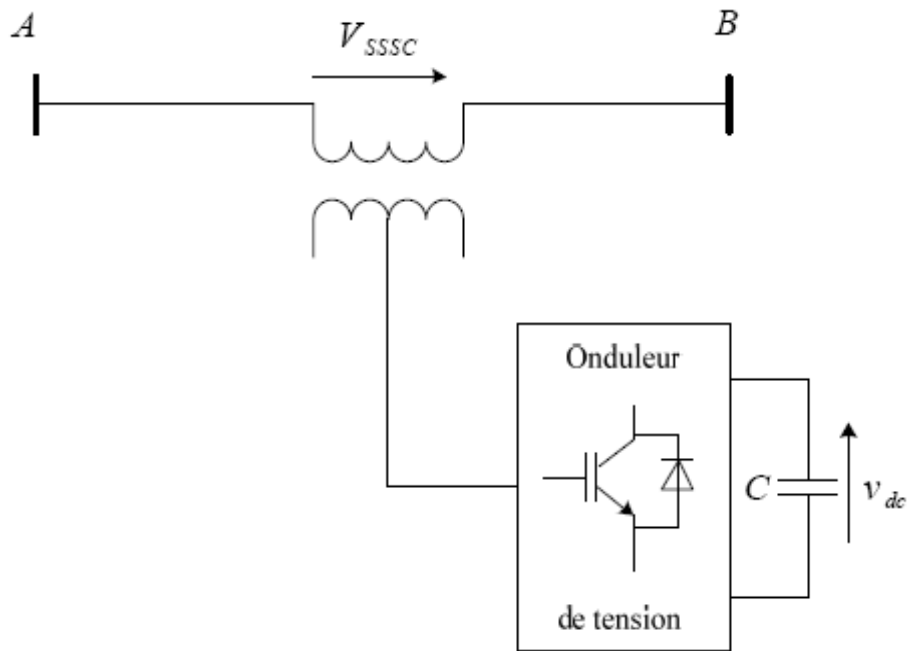
Le condensateur série commandé par thyristors peut donc produire plusieurs valeurs distinctes de  $X_t$ . Par conséquent, pour un angle de déphasage  $\delta$  donné, la puissance active  $P$  peut aussi avoir plusieurs valeurs distinctes. Le changement d'une puissance à l'autre se fait presque instantanément car l'amorçage des valves s'effectue en moins d'un demi-cycle. Ce changement ultra-rapide de la puissance constitue un avantage lorsqu'on doit maintenir la stabilité de l'un ou l'autre des deux réseaux connectés aux deux extrémités de la ligne [5-6].



**Figure (I-9) :** Exemple d'un TCSC.

#### **SSSC (Static Synchronous Series Compensator)**

C'est l'un des plus importants dispositifs FACTS; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure (I-10). Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants [3].



**Figure (I-10) :** Structure d'un SSSC.

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (Static Phase Shifter) ou d'une impédance série variable de compensation.

Il injecte une tension en quadrature avec le courant de la ligne pour contrôler le flux de puissance active. Et comme ce système ne consomme pas de réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockées dans les batteries de condensateur il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive.

Les principales applications de la compensation série sont [4]:

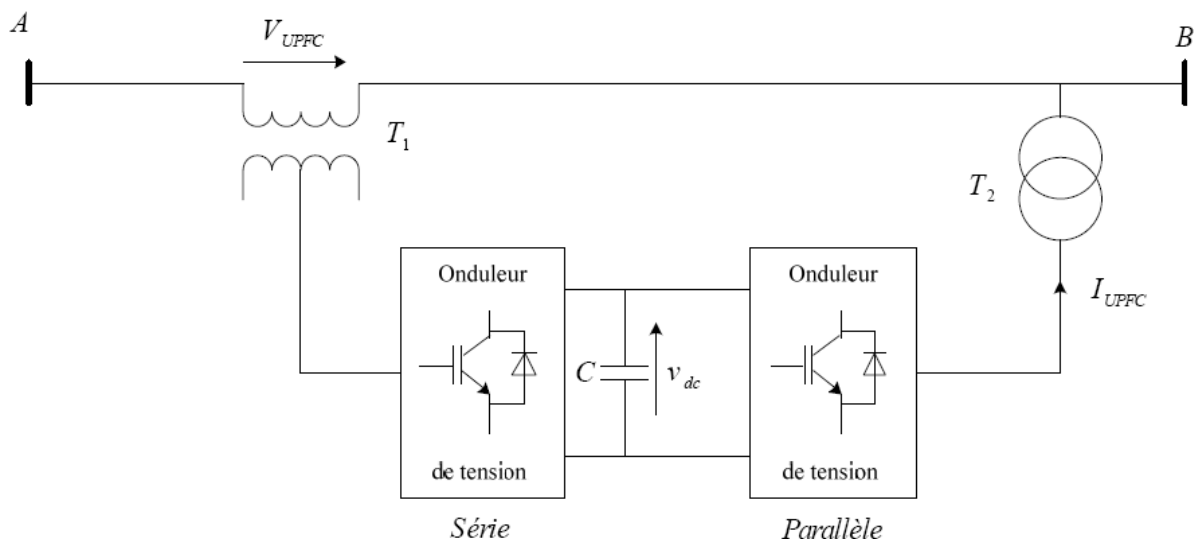
- ✓ L'augmentation du transit de puissance sur les lignes.
- ✓ La compensation du déséquilibre des courants de charge.
- ✓ L'amélioration de la stabilité dynamique.
- ✓ L'amortissement des oscillations de puissance.
- ✓ La réduction des risques de résonance hypo-synchrone.

- ✓ L'interconnexion des réseaux.
- ✓ La stabilisation de la tension.

### I-4-3-Dispositifs hybrides

Le contrôleur de puissance universel UPFC (Unified Power Flow Controller) appelé aussi variateur de charge universel est représenté par la figure (I-11). Il est constitué de deux onduleurs triphasés de tension qui partagent le même condensateur dans leurs côtés continus et possédant un système de commande unifié, l'onduleur 1 qui est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur  $T_1$  fonctionne comme un redresseur quatre quadrants afin de maintenir la tension fixe sur les condensateurs, l'onduleur 2 est connecté en série avec le réseau et permet d'injecter une tension série avec la ligne à travers le transformateur  $T_2$  [1].

Le premier concept a été présenté par Gyugyi en 1999. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler simultanément la puissance active, la puissance réactive et les tensions aux extrémités de la ligne.



**Figure (I-11) :** Structure d'un UPFC.

On constate que l'UPFC de la figure (I-12) est un contrôleur de puissance extrêmement flexible. Etant donné qu'il peut commander le flux de puissance sur la ligne et lors d'un changement sur les réseaux, l'UPFC peut réagir en quelques millisecondes. A cause de sa réponse ultra rapide, qui dépend uniquement de la vitesse de commutation des GTO, ce contrôleur peut réagir efficacement à n'importe quelle perturbation. Les principales applications du contrôleur de puissance universel sont :

- ✓ La commande des transits de puissances sur les lignes.
- ✓ L'amélioration de la stabilité des réseaux électriques.
- ✓ L'exploitation à pleine capacité des équipements et des lignes.
- ✓ L'interconnexion des réseaux.

Le tableau (I-2) résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique [2].

	<i>Contrôle de Charge</i>	<i>Contrôle de Tension</i>	<i>Stabilité Transitoire</i>	<i>Amplitude des Oscillations</i>
<i>SVC</i>	+	++	+	++
<i>STATCOM</i>	+	+++	+	++
<i>TCSC</i>	++	+	+++	++
<i>SSSC</i>	+++	++	+++	++
<i>UPFC</i>	+++	+++	+++	+++
(+): Petite, (++) : Moyenne, (+++) : Forte				

**Tableau (I-2) :** Application des *FACTS* à la résolution des problèmes dans le réseau.

Les lignes de transport constituent une composante importante du réseau. Elles sont constituées d'impédances série et shunt. L'impédance série peut affecter le maximum de puissance transitée à travers la ligne et l'impédance shunt est à prédominance capacitive, et possède une influence sur la tension le long de la ligne de transport. L'impédance série de la ligne, les tensions de départ et d'arrivée ainsi que le déphasage entre les tensions, déterminent la puissance transitée. Les FACTS sont utilisés afin de changer les paramètres série et shunt ainsi que le déphasage des tensions d'arrivée des lignes de transport dans le but de contrôler l'écoulement de puissance, [6].

Dans cette étude; le choix s'est porté sur le dispositif UPFC, que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

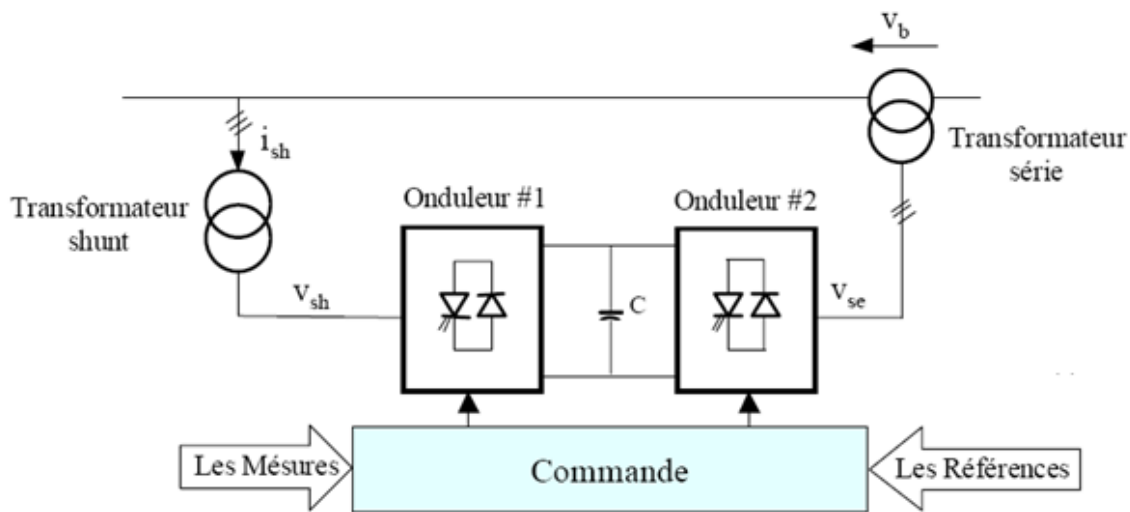
## **I-5-Unified Power Flow Controller (UPFC):**

### **I-5-1- Description :**

En effet, l'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne. 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 [1].

Dans la figure (I-13), 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 de compensation 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 [6].

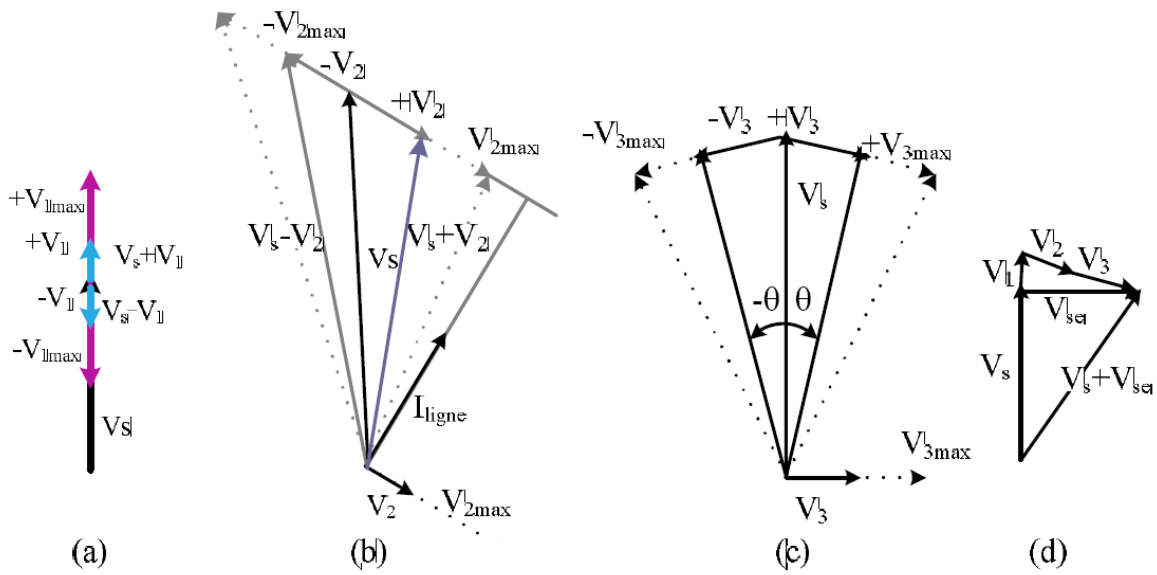


**Figure (I-13) :** Schéma de base de l'UPFC

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, [6].

### I-5-2-Principe de fonctionnement

Comme il a été déjà mentionné l'UPFC peut contrôler indépendamment ou séparément tous les paramètres affectant le flux de puissance sur une ligne de transmission. L'UPFC peut avoir différents modes de fonctionnement quand la tension injectée en série a différentes amplitudes et angle de phase, [7-8-9].



**Figure (I-14) :** Les différents modes de fonctionnement d'un UPFC.

Régulation de tension : figure (I-14-a). La tension de départ  $V_s$  est augmentée (ou diminuée) en injectant une tension série  $V_1$ , en phase avec  $V_s$ . La tension  $V_1$  est réglable en module et possède une amplitude maximale  $V_{1max}$ .

- Compensation série (régulateur d'impédance), figure (I-14-b). La tension injectée  $V_2$  est en quadrature avec le courant de ligne. La tension  $V_2$  possède une amplitude maximale  $V_{2max}$ . Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase, figure (I-14-c). L'angle de la tension injectée  $V_3$  est variable alors que l'amplitude de la tension  $V_s$  reste constante.
- Contrôle simultané, figure (I-14-d). Il est possible à l'UPFC d'accomplir trois fonctions à savoir le réglage de la tension, la compensation série et le réglage de l'angle de phase simultanément c'est le mode de fonctionnement automatique. L'angle de phase et



l'amplitude de la tension injectée  $V_{se} = V_1 + V_2 + V_3$  sont choisis d'une manière à produire un courant de ligne qui permet d'obtenir les puissance active et réactive désirées, [5].

Donc, le convertisseur l'UPFC peut être opérer dans les quatres modes :

- Réglage de la tension.
- Compensation série.
- Réglage de l'angle de phase.
- Mode automatique.

La figure (I-15), résume l'influence des différentes parties de l'UPFC sur le flux de puissance.

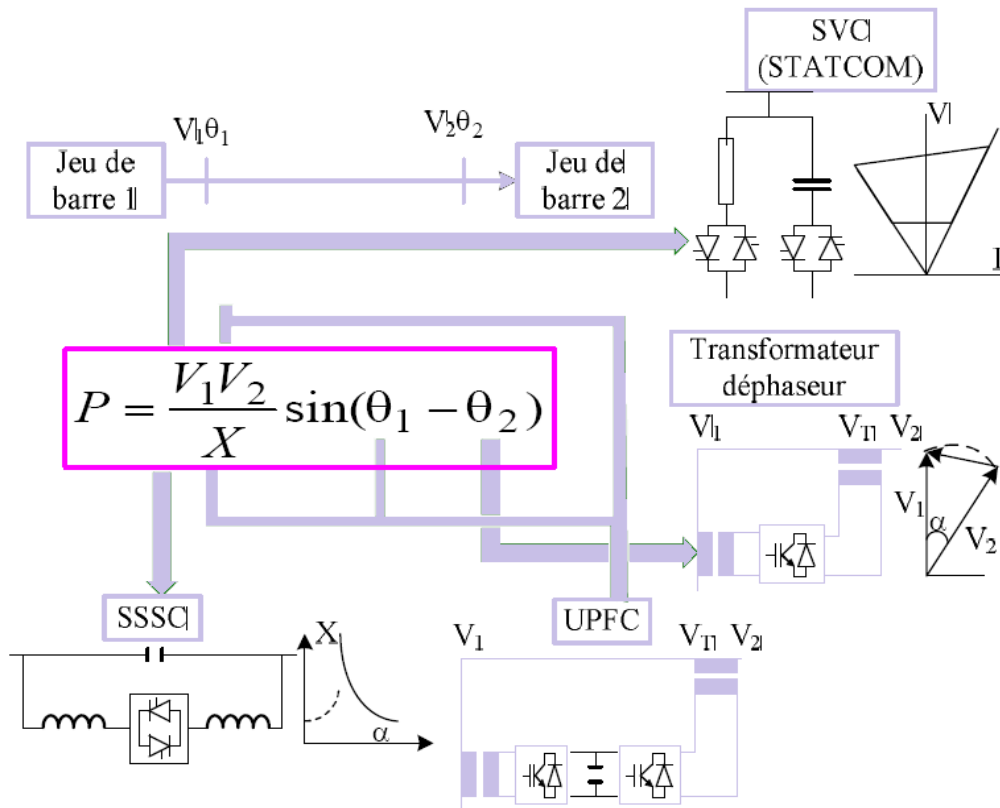
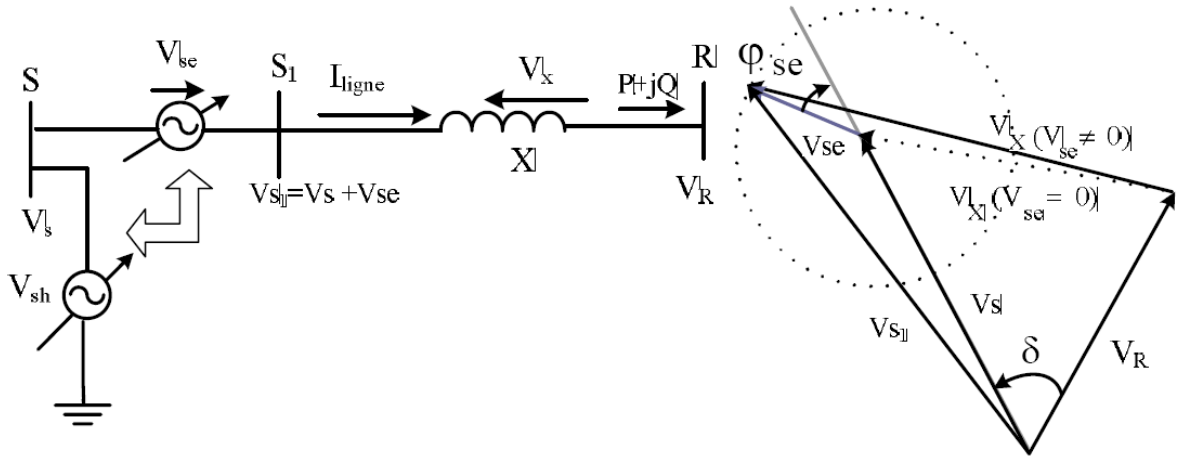


Figure (I-15) : Actions possibles sur le flux de la puissance active.

Le mode automatique ne peut être accompli par des compensateurs conventionnel. Pour montrer comment l'UPFC peut affecter le flux de puissance dans ce mode l'UPFC est connecté au point de départ **S**, figure (I-16). L'UPFC est représenté par deux sources de tension idéales. Les bus **S** et **R** représentent l'entrée et la sortie de l'UPFC respectivement, [10-11-12-13].



**Figure (I-16) :** Une ligne de transmission avec UPFC.

Dans ce cas là, la puissance au point R est donné par :

$$S = \bar{V}_R \bar{I}_{\text{ligne}}^* = \bar{V}_R \left( \frac{\bar{V}_s + \bar{V}_{se} - \bar{V}_R}{jX} \right)^* \quad (I-3)$$

Avec:

$$\bar{V}_{se} = V_{se} \angle (\delta_s - \phi_{se}) \quad (I-4)$$

Le conjugué de cette puissance est:

$$S^* = P - jQ = \bar{V}_R \bar{I}_{\text{ligne}} = \bar{V}_R \left( \frac{\bar{V}_s + \bar{V}_{se} - \bar{V}_R}{jX} \right) \quad (I-5)$$

Une simple transformation de ces deux relations nous amène à tirer les composantes réelles et imaginaires de (I-5). Les expressions suivantes représentent les puissances active et réactive au point d'arrivée de la ligne, [14].

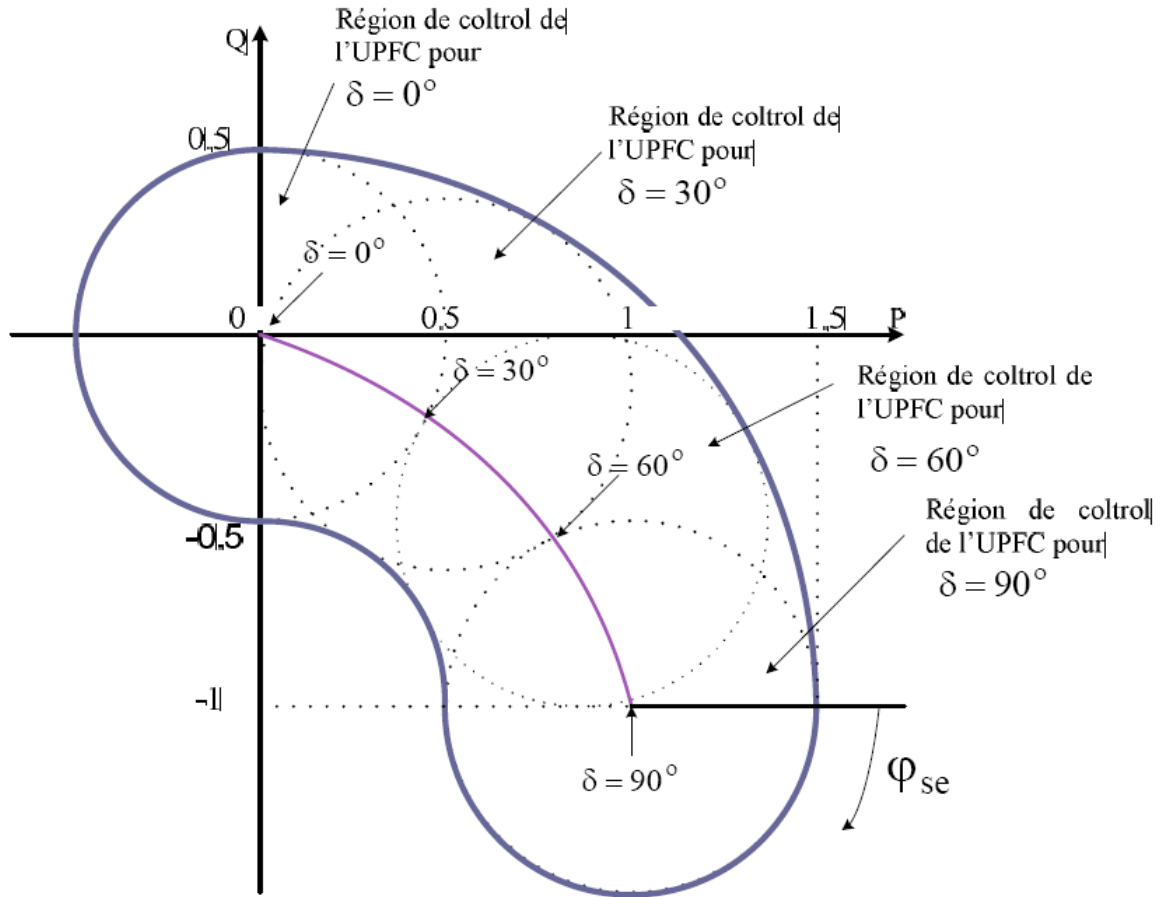
$$\begin{cases} P = \frac{V_s V_R}{X} \sin \delta + \frac{V_s V_R}{X} \sin(\delta - \varphi_{se}) = P_0(\delta) + P_{se}(\delta, \varphi) \\ Q = -\frac{V_R^2}{X} + \frac{V_s V_R}{X} \cos \delta + \frac{V_s V_R}{X} \cos(\delta - \varphi_{se}) = Q_0(\delta) + Q_{se}(\delta, \varphi) \end{cases} \quad (I-6)$$

Il a été déjà prescrit que l'amplitude de la tension série de l'UPFC  $V_{se}$  peut être réglé de 0 jusqu'à  $V_{se-max}$ , et son angle de phase est réglable entre 0 et 360 degrés. De (I-6) on voit que les puissances active et réactive reçu au point d'arrivée  $R$  d'une ligne de transmission avec un UPFC sont contrôlable entre, [14] :

$$\begin{cases} P_{min}(\delta) \leq P \leq P_{max}(\delta) \\ Q_{min}(\delta) \leq Q \leq Q_{max}(\delta) \end{cases} \quad (I-7)$$

Ou:

$$\begin{cases} P_{min}(\delta) = P_0(\delta) - \frac{V_R V_{se \max}}{X} ; P_{max}(\delta) = P_0(\delta) + \frac{V_R V_{se \max}}{X} \\ Q_{min}(\delta) = Q_0(\delta) - \frac{V_R V_{se \max}}{X} ; P_{max}(\delta) = Q_0(\delta) + \frac{V_R V_{se \max}}{X} \end{cases} \quad (I-8)$$



**Figure (I-17) :** La dépendance P-Q pour un système à deux bus avec un UPFC, [14].

La rotation du vecteur de tension série  $V_{se}$  avec une amplitude de  $V_{se\max}$  de 0 à 360 degrés permet le réglage du flux de puissance active et réactive dans les limites d'un cercle possédant un rayon de,  $\frac{V_R V_{se\max}}{X}$ , et un centre au point  $(P_0(\delta), Q_0(\delta))$ . ce cercle est défini par l'équation suivante, [14] :

$$(P(\delta, \varphi_{se}) - P_0(\delta))^2 + (Q(\delta, \varphi_{se}) - Q_0(\delta))^2 = \frac{V_R V_{se\max}}{X} \quad (I-9)$$

La figure (I-17), représente la caractéristique de la puissance réactive demandée au bus **S** en fonction de la puissance active (la puissance active est fonction de l'amplitude de la tension  $V_{se}$  et de son angle de phase  $\varphi_{se}$ ), pour quatre valeurs de l'angle de transmission,  $\delta$ .

$$\delta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ \text{ et } 90^\circ, \text{ avec } V_s = V_R = V, \frac{V^2}{X} = 1 \text{ et } \frac{V_R V_{se \max}}{X} = 0.5$$

L'aptitude de l'UPFC à contrôler indépendamment les puissances active et réactive pour n'importe quel angle de transmission  $\delta$ , est illustrée sur la figure (I-17).

#### **I-6-Conclusion :**

Les dispositifs FACTS offrent un contrôle rapide et efficace aux différents paramètres du système de puissance pour augmenter leur limite de stabilité. L'UPFC est le dispositif FACTS le plus flexible, qui offre un contrôle indépendant de la tension, la puissance active et réactive. L'UPFC fera l'objet d'une étude détaillée au prochain chapitre.

*« Je peux accepter l'échec, tout le monde peut échouer, mais je n'accepterai  
jamais de ne pas avoir essayé »*

*Michael Jordan*

## *Chapitre II*

**Modélisation et commande  
d'un système  
de contrôle  
Série - Parallèle : (UPFC)**

## *Chapitre II*

# *Modélisation et commande d'un Système de Contrôle Série – Parallèle : (UPFC)*

### **II-1-Introduction :**

L'utilisation des convertisseur SVC dans le contrôle d'écoulement de puissance pour les systèmes de transport d'énergie électrique à courant alternatif est une pratique établie, l'UPFC est une union de deux SVC l'un est un dispositif shunt STATCOM et l'autre est un composant série SSSC, les deux dispositifs peuvent fonctionner indépendamment, ils agissent sur le contrôle de la tension et/ou l'impédance de la ligne en injectant la quantité de la puissance active et /ou réactive nécessaire, ou simultanément, [15].

L'UPFC combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle, c'est le dispositif le plus puissant dans le contrôle de flux de puissance, ou il permet de régler les trois grandeurs du réseau à savoir, la tension, l'angle de charge et l'impédance de la ligne.

Le but de ce chapitre est la modélisation et la commande des dispositifs FACTS.



## II-2- Structure et conception de base de l'UPFC

### II-2-1-Principe de fonctionnement de l'UPFC

Le dispositif UPFC est le plus sophistiqué des dispositifs FACTS, il présente une structure de puissance en cascade, les principales caractéristiques de l'UPFC sont :

- ✚ Il peut contrôler le flux des puissances, pour le contrôle des tensions, l'impédance de la ligne ou l'angle de charge.
- ✚ Ne présente aucune inertie mécanique.
- ✚ Caractérisé par une réponse très rapide.

La structure de base d'un UPFC connecté au réseau d'énergie électrique est représentée par la figure (II-1), [16]. Elle consiste en deux onduleurs triphasés, l'un connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés entre eux, en étoile, et l'autre connecté en parallèle avec le réseau via un transformateur triphasé. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur C.

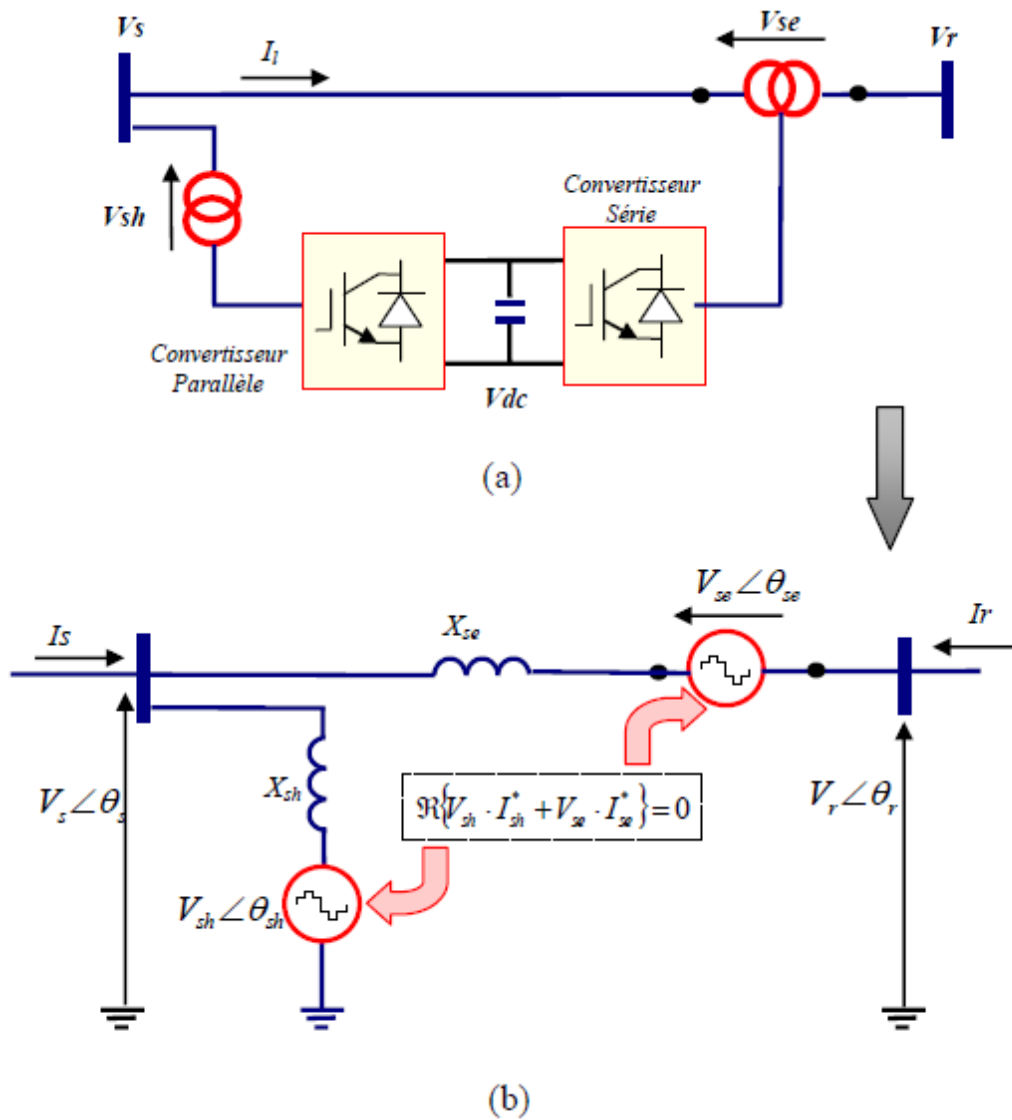


Figure (II-1) : (a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC.

### II-2-2-Modélisation de la partie shunt de l'UPFC

La figure (II-2) représente la structure triphasée de la partie shunt de l'UPFC nommée (STATCOM). L'onduleur est modélisé par des interrupteurs idéaux. Les tensions simples ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) représentent les tensions des points auxquels le STATCOM est raccordé avec la ligne de transport. Le bus de tension continu (DC) est représenté par la capacité (C), [17].

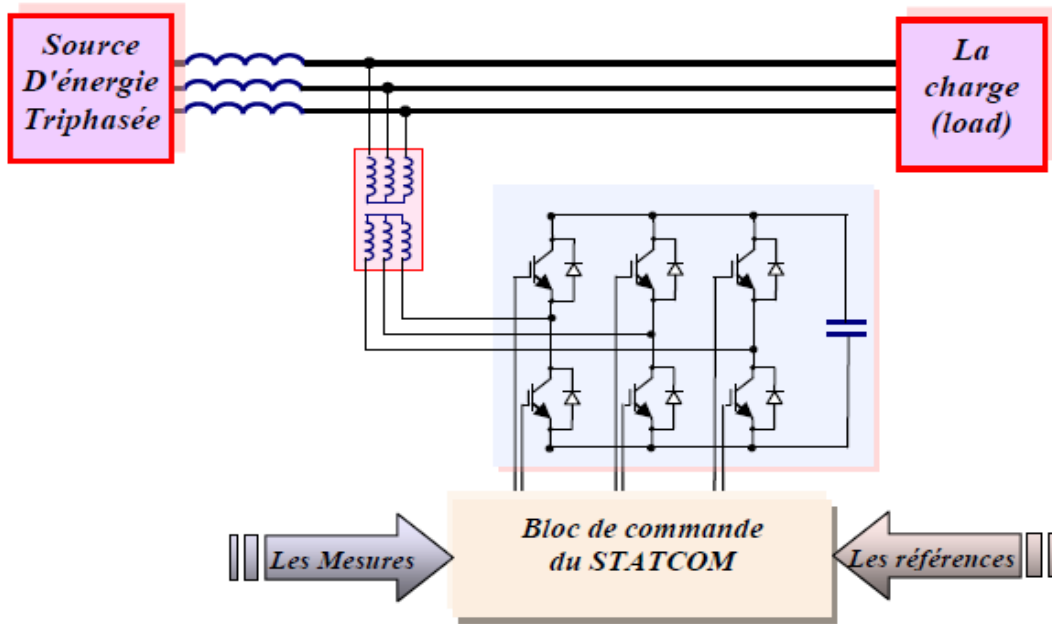


Figure (II-2) : Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

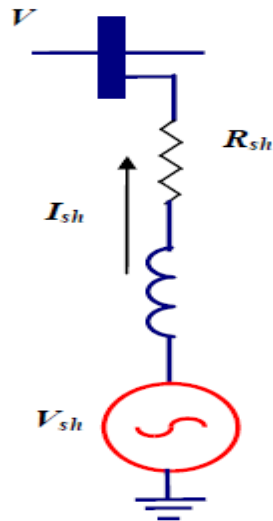


Figure (II-3) : Schéma équivalent du STATCOM

L'équation (II-1) illustre la relation vectorielle entre les courants et les tensions d'une phase, côté alternatif.

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (II-1)$$

Où les grandeurs sont en triphasé :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix}; \quad I_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix}$$

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (II-2)$$

Où le vecteur  $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$  représente le vecteur de commande du système.

### II-2-2-1-Contrôle du STATCOM

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquent maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant  $I_{sh}^*$ , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants ( $I_{shd}^*$ ,  $I_{shq}^*$ ) sont donc les grandeurs de références du STATOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.

### II-2-2-2-Détermination des Références:

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive  $Q_{sh}^*$  calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active ( $P_{sh}^* = 0$ ) représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur, [18], [19].

Ces puissances qui sont les images des courants ( $I_{shd}^*, I_{shq}^*$ ) active et réactive qu'on détermine depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

Où les tensions  $V_d$  et  $V_q$  sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure (II-4) suivante:

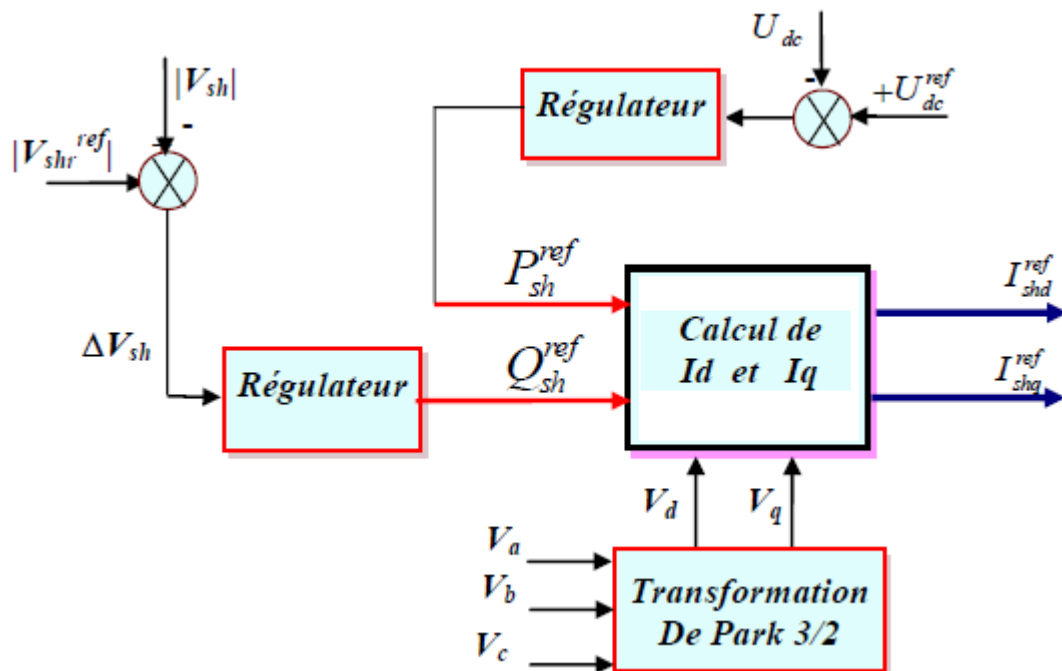


Figure (II-4) : Identification des Courants de Référence.

D'après le système d'équation (II-2), on voit qu'il y a un couplage entre les deux composantes du courant  $i_{sh}$ . Pour pouvoir aboutir à une commande aisée du système, il est indispensable de procéder à un découplage des deux composantes, [20].

On pose :

$$\begin{cases} X_1 = \frac{1}{L_{Sh}} (V_d - V_{Shd}) \\ X_2 = \frac{1}{L_{Sh}} (V_q - V_{Shq}) \end{cases} \quad (II-4)$$

Avec :

$$\begin{cases} X_1 = \left( K_P + \frac{K_i}{S} \right) \cdot (i_{Shd}^* - i_{Shd}) - \omega i_{Shq} \\ X_2 = \left( K_P + \frac{K_i}{S} \right) \cdot (i_{Shq}^* - i_{Shq}) + \omega i_{Shd} \end{cases} \quad (II-5)$$

$X_1$  et  $X_2$  étant les sorties des deux régulateurs PI (Proportionnel Intégral) des courants  $i_{Shd}$  et  $i_{Shq}$  respectivement.

Les valeurs des courants  $i_{Shd}^*$  et  $i_{Shq}^*$  sont les références des courants actif et réactif. En substituant les équations (II-4) et (II-5) dans le système d'équation (II-2) après avoir appliqué la transformation de Laplace, on aboutit à un système de deux équations découplées ayant les fonctions de transfert en boucle fermée suivante :

$$F_{11}(S) = \frac{i_{Shd}}{i_{Shd}^*} = \frac{K_i + SK_P}{K_i + S \left( \frac{R_{Sh}}{L_{Sh}} + K_P \right) + S^2} \quad (II-6)$$

$$F_{22}(S) = \frac{i_{Sh-q}}{i_{Sh-q}^*} = \frac{K_i + SK_P}{K_i + S \left( \frac{R_{Sh}}{L_{Sh}} + K_P \right) + S^2} \quad (II-7)$$

Le schéma bloc de la méthode watt-var découplé est représenté sur la figure (II-5). Comme nous l'avons déjà montré, le découplage s'effectue par la séparation du système en deux boucles fermées, où le contrôle est optimal par rapport au critère quadratique de l'erreur dynamique si les gains sont maximaux, [21].

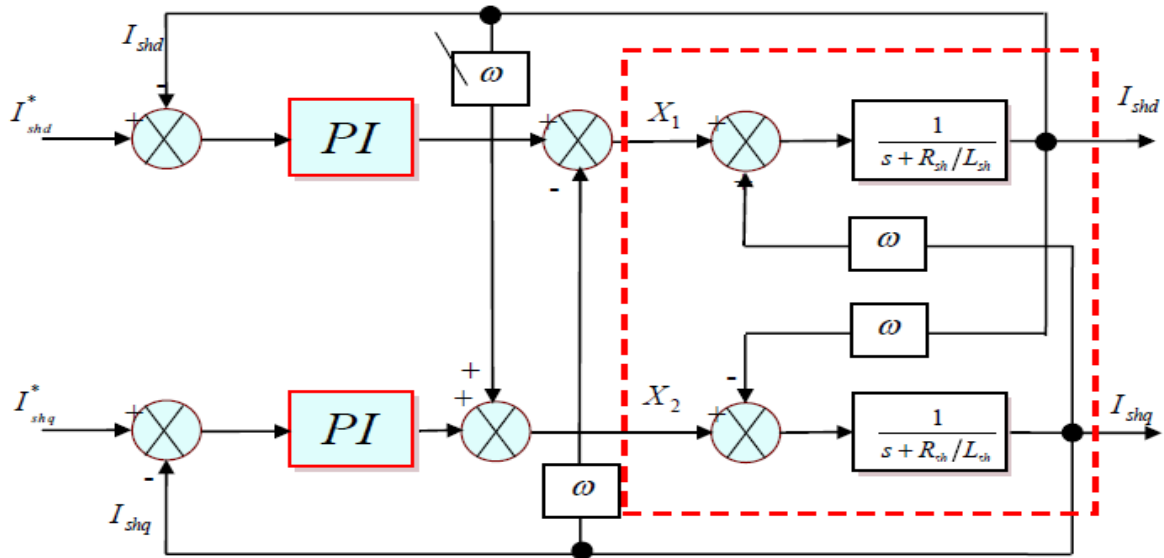


Figure (II-5) : Schéma de régulation du STATCOM (watt-var découplée).

La figure (II-6) représente le schéma global du contrôle par la méthode watt-var découplé.

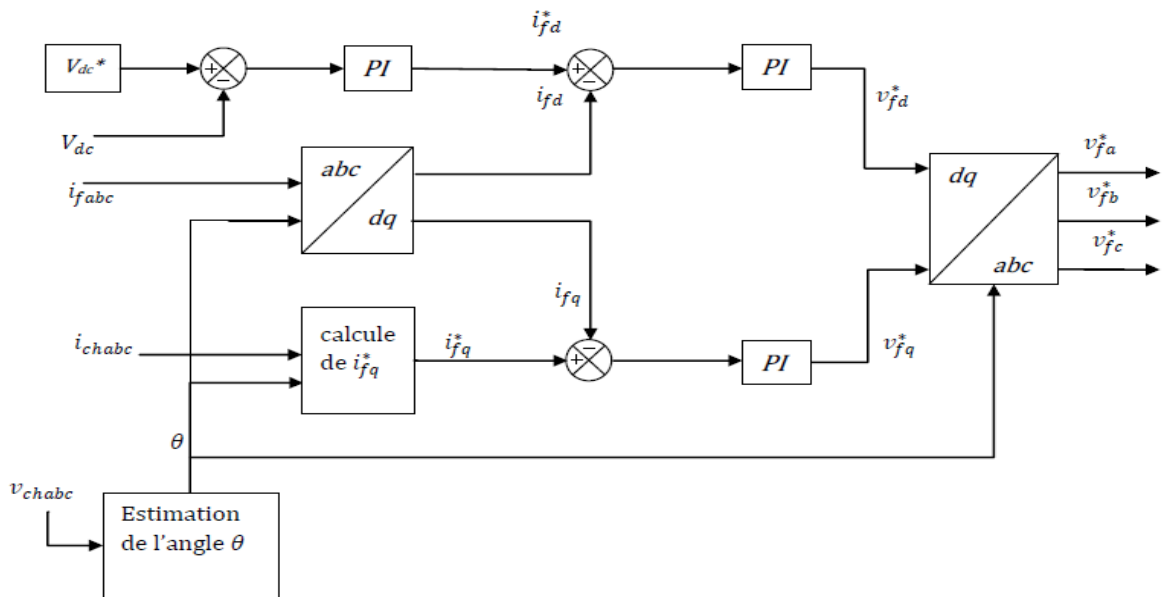


Figure (II-6) : Schéma global du contrôle par la méthode watt-var découplé du STATCOM.

### II-2-2-3-Synthèse des régulateurs des courants :

Les Puissances actives et réactives échangées entre le D-STATCOM et le réseau sont contrôlées par la régulation des composantes directe et quadratique du ( $i_{f\_d}$  et  $i_{f\_q}$ ). Le modèle des équations (II-8) peut être décuplé par les étapes suivant :

$$\begin{cases} v_{fd} = v_d - L_f \omega i_{fq} + v_{cha} \\ v_{fq} = v_q + L_f \omega i_{fd} + v_{cha} \end{cases} \quad (II-8)$$

Avec :

$$\begin{cases} v_d = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} \\ v_q = R_f i_{fq} + L_f \frac{di_{fq}}{dt} \end{cases} \quad (II-9)$$

Alors la fonction de transfert de l'équation (II-9) définie comme suit :

$$F(P) = \frac{1}{L_f P + R_f} \quad (II-10)$$

La commande de régulation de type PI générée par un gain proportionnel avec un gain intégral en parallèle. La fonction de transfert de ce correcteur est :

$$R(p) = \frac{K_{pc}P + K_{ic}}{P} \quad (II-11)$$

La fonction de transfert de l'onduleur est généralement choisie égale à  $G_{ond}(P) = 1$ . Donc la fonction de transfert globale en boucle ouvert est :

$$H_{BO}(P) = \frac{K_{pc}P + K_{ic}}{P} \frac{1}{L_f P + R_f} \quad (II-12)$$

A partir d'équation (II-12), en déduire la fonction de transfert en boucle fermée peut être comme suit :

$$H_{BF}(P) = \frac{K_{pc}P + K_{ic}}{L_f P^2 + (R_f + K_{pc})P + K_{ic}} \quad (II-13)$$



Pour un bon choix des coefficients  $K_{pc}$  et  $K_{ic}$ , on applique la méthode de placement des pôles. Les systèmes de régulation est un système du deuxième ordre :

$$G(p) = p^2 + 2\xi\omega_{nc}p + \omega_{nc}^2 \quad (\text{II-14})$$

Et par identifications, on peut écrire :

$$\begin{cases} K_{pc} = 2\xi\omega_{nc}L_f - R_f \\ K_{ic} = L_f\omega_{nc}^2 \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

Le schéma simplifié de la boucle fermée est donnée par la figure suivante :

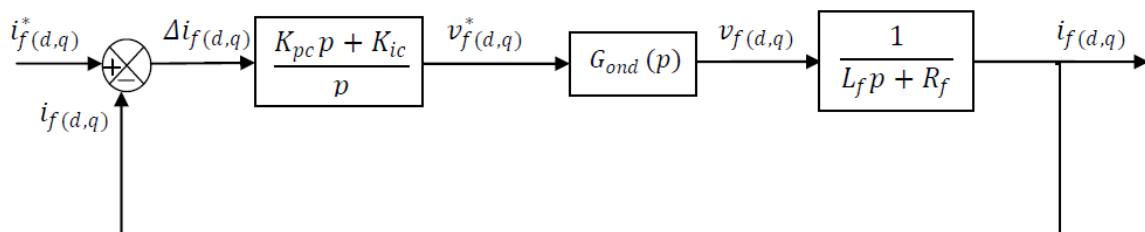


Figure (II-7) : Schéma bloc de régulation des courants

#### II-2-2-4-Synthèse du régulateur de la tension continue :

Pour la régulation de la tension continue aux bornes des condensateurs par un régulateur PI, on applique la transformation de Laplace sur l'équation de courant équivalent du bus continu suivant :

$$i_{c\acute{e}q}(p) = C_{\acute{e}q}pv_{dc}(p) \quad (\text{II-16})$$

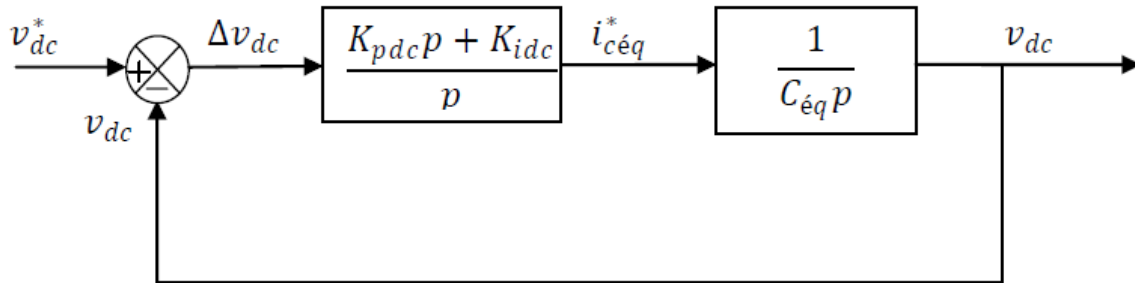
L'application de la transformation de Laplace sur l'équation (II-16) donnée :

$$i_{c\acute{e}q}(p) = C_{\acute{e}q}p \cdot v_{dc}(p) \quad (\text{II-17})$$

La tension aux borne du condensateur est donnée par :

$$v_{dc} = \frac{1}{C_{\acute{e}q}p} i_{c\acute{e}q}(p) \quad (\text{II-18})$$

Alors la boucle fermée de régulation de la tension continue est représentée par le schéma suivant :



**Figure (II-8) :** Schéma bloc de régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée correspondante à la Figure (II-8) est :

$$H_{dc}(p) = \frac{K_{pdc}p + K_{idc}}{C_{\acute{e}q}p^2 + K_{pdc}p + K_{idc}} \quad (\text{II-19})$$

La fonction de transfert  $H_{dc}(P)$  c'est un système du deuxième ordre représentée généralement comme suit :

$$G_{dc}(p) = p^2 + 2\xi\omega_{ndc}p + \omega_{ndc}^2 \quad (\text{II-20})$$

Et par identification on trouve :

$$\begin{cases} K_{pdc} = 2\xi\omega_{ndc} \cdot C_{\acute{e}q} \\ K_{idc} = C_{\acute{e}q} \omega_{ndc}^2 \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

La régulation du bus continu fournit la référence du courant côté continu  $i_{c\acute{e}q}^*$  puis on calcule la référence du courant du côté alternatif  $i_{fd}^*$

$$i_{fd}^* = -\frac{v_{dc}}{v_{chd}} i_{c\acute{e}q}^* \quad (\text{II-22})$$

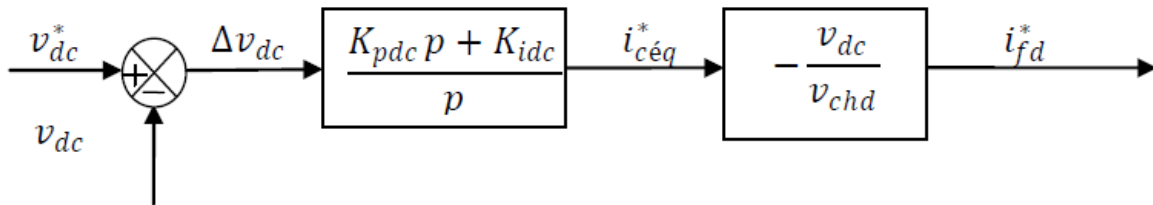


Figure (II-9) : Génération du courant référence actif  $i_{fd}^*$

### II-2-3-Modélisation de la partie série de l'UPFC

Comme il est représenté sur la figure (II-10), la structure de cette partie est identique à celle de la partie parallèle. Le bus de la tension continue est le même. Pour le côté alternatif de cette partie, le transformateur de couplage est composé de trois transformateurs monophasés élévateurs, [22].

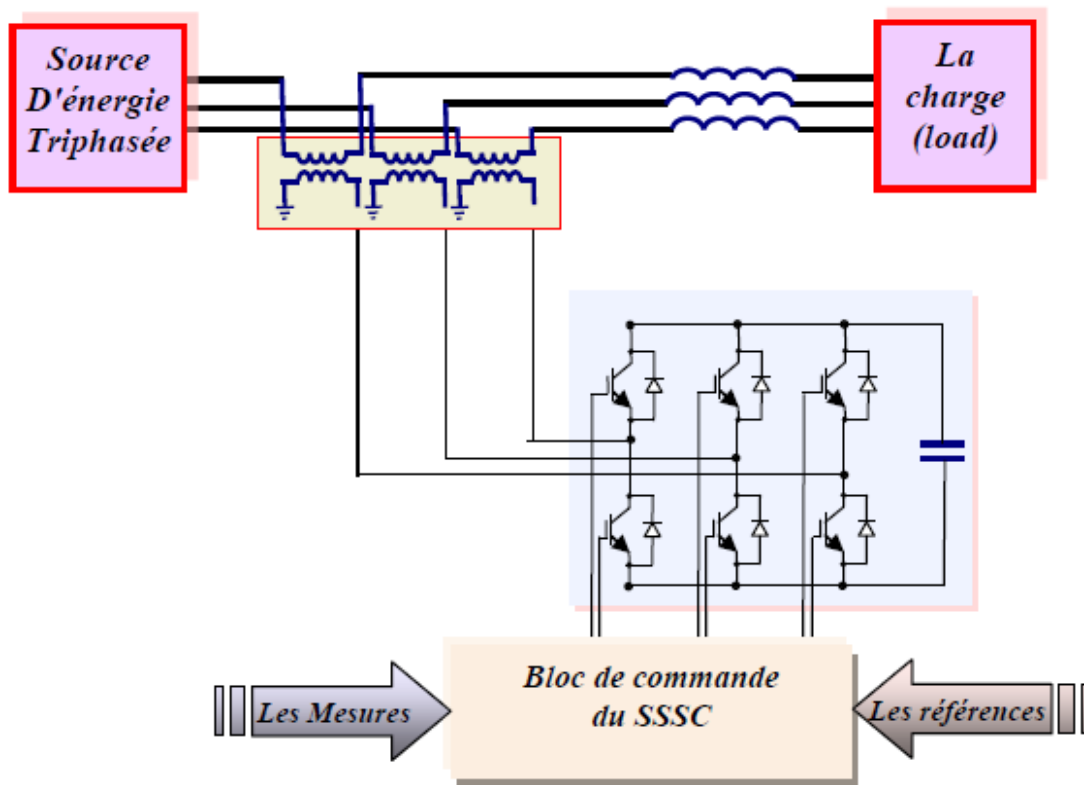


Figure (II-10) : Structure de base d'un SSSC couplé au réseau

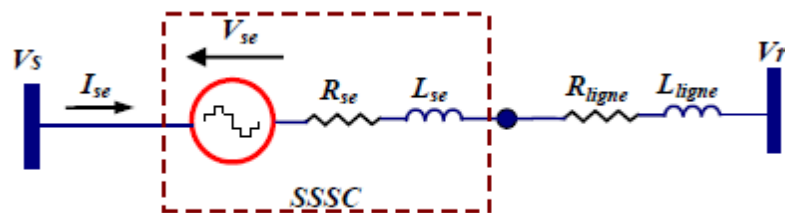


Figure (II-11) : Schéma équivalent de l'SSSC.

Le courant dans la ligne dépend en premier de la différence du potentiel des deux extrémités de la ligne et en second de la tension série injectée, L'équation vectorielle régissant ce circuit donc est :

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = (R_{se} + R_{lig})\bar{I}_{se} + (L_{se} + L_{lig}) \frac{d\bar{I}_{se}}{dt} \quad (\text{II-23})$$

Avec :  $R_{se}$ ,  $L_{se}$  sont la résistance représentant les pertes des interrupteurs de l'onduleur et dans le transformateur de couplage, et l'inductance du transformateur série respectivement.

En passant au référentiel (d,q) avec la transformation de Park l'équation (II-23) devient sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{rd} - V_{sed} \\ V_{sq} - V_{rq} - V_{seq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

Avec :

$$R = R_{se} + R_{ligne} \quad , \quad L = L_{se} + L_{ligne}$$

Le système d'équations différentielles (II-24) représente le modèle d'état simplifié de l'SSSC dans le référentiel synchrone (d, q) qui présente un couplage entre les deux grandeurs  $I_{sed}$  et  $I_{seq}$  par le terme  $\omega$ .

### II-2-3-1-Contrôle de l'SSSC

La partie série de l'UPFC est utilisée pour le contrôle des puissances active et réactive transitées dans la ligne de transmission, on contrôlant l'amplitude et l'angle de phase de la tension injectée par le convertisseur série [24]. La détermination des références est nécessaire pour la commande de cette partie. Il existe plusieurs méthodes d'identification des références. Comme pour la partie shunt on va utiliser la méthode watt-var découplé.

Les valeurs d'entrée du régulateur permettant d'obtenir une commande séparée de la puissance active  $P$  et la puissance réactive  $Q$  qui transitent dans la ligne sont :

- ✚ Les valeurs instantanées des tensions  $V_s$  et  $V_r$ .
- ✚ Le courant de la ligne  $i_r$ .
- ✚ Les valeurs de référence des puissances  $P_r^*$  et  $Q_r^*$ .

### II-2-3-2-Identification des références

Comme nous l'avons déjà expliquée dans le contrôle du STATCOM, cette méthode consiste à contrôler la puissance active et réactive séparément l'une de l'autre. On considérant les équations du système (II-9) nous pouvons appliquer une commande par découplage des courants  $I_{sed}$  et  $I_{seq}$  de la manière suivante, [19] [22] :

Comme pour la partie shunt, à fin d'aboutir à une commande facile du système, on va procéder au découplage des deux composantes de courant de la ligne  $i_r$ , Pour cela on pose :

$$\begin{cases} X_1 = \frac{1}{L}(V_{sd} - V_{rd} - V_{sed}) \\ X_2 = \frac{1}{L}(V_{sq} - V_{rq} - V_{seq}) \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

Avec :

$$\begin{cases} X_1 = \left(K_P + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (i_{rd}^* - i_{rd}) - \omega \cdot i_{rq} \\ X_2 = \left(K_P + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (i_{rq}^* - i_{seq}) + \omega i_{rd} \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

$X_1$  et  $X_2$  étant les sorties des deux régulateurs PI des courants  $i_{sed}$  et  $i_{seq}$  respectivement.

Les valeurs des courants  $i_{sed}^*$  et  $i_{seq}^*$  sont les références des courants actif et réactif de la ligne de transmission.

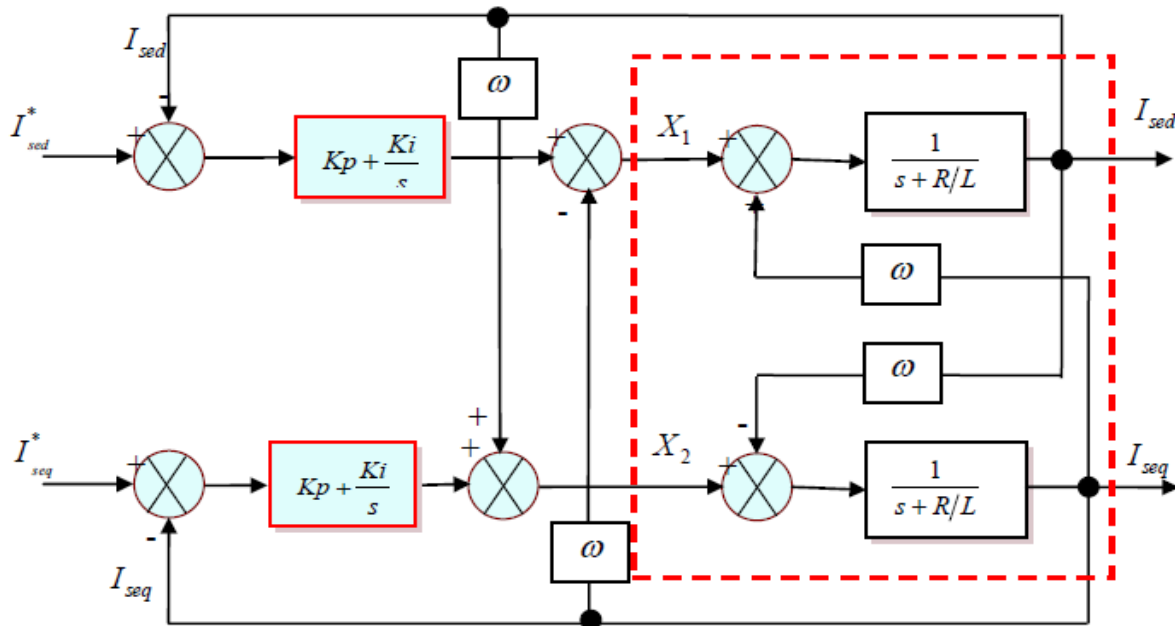
En substituant les équations (II-24), et (II-25) dans le système d'équation (II-23) après avoir appliqué la transformation de Laplace, on aboutit à un système de deux équations découplées ayant les fonctions de transfert en boucle fermée suivantes :

$$F_{33}(S) = \frac{i_{sed}}{i_{sed}^*} = \frac{K_i + SK_P}{K_i + S\left(\frac{R}{L} + K_P\right) + S^2} \quad (II-27)$$

$$F_{44}(S) = \frac{i_{seq}}{i_{seq}^*} = \frac{K_i + SK_P}{K_i + S\left(\frac{R}{L} + K_P\right) + S^2} \quad (II-28)$$

Comme nous l'avons déjà montré dans la partie parallèle, le contrôle est optimal si les gains  $K_p$  et  $K_i$  sont maximaux, [22].

Le schéma bloc de la méthode watt-var découplé est représenté sur la figure (II-12).



**Figure (II-12) :** Schéma de régulation du SSSC (watt-var découplée).

La figure (II-10) représente le schéma global de contrôle par la méthode watt-var découplé.

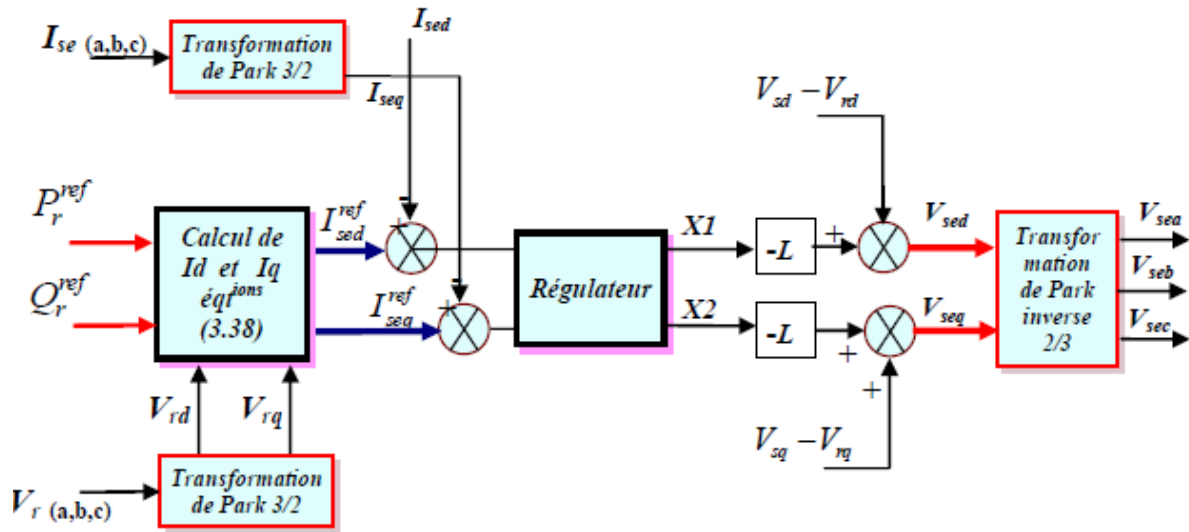


Figure (II-13) : Schéma globale de contrôle l'SSSC par la méthode Watt-Var découplée

### II-2-3-3-Calcul des Régulateurs PI:

La régulation proportionnelle intégrale utilisée dans le modèle de la figure (II-12) assure un contrôle optimal par rapport au critère quadratique de l'erreur dynamique si les gains sont maximaux donc:[22]

$$K_p = K_{pmax} ; K_i = K_{imax}$$

De même que pour les régulateurs du STATCOM, et sans refaire tout le détail de la méthode, en introduisant la condition (II-8) liant les paramètres du régulateur nous aurons ce

qui suit :  $\frac{K_i}{K_p} = \frac{R}{L} = \frac{1}{\tau_{BO}}$

$$K_i = \frac{R_{se} + R_{lig}}{L_{se} + L_{lig}} K_p \tag{II-29}$$



La fonction de transfert en boucle fermée sera:

$$F(S) = \frac{K_p}{S+K_p} \quad (\text{II-30})$$

Et on obtient :

$$K_p = 3 \frac{R}{L} ; K_i = K_p \frac{R}{L}$$

#### II-4-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord développé le modèle mathématique de l'UPFC, nous avons également choisi la méthode watt-var découplé pour identifier les références du système de commande des deux parties (STATCOM et le SSSC), ensuite nous avons pris la méthode basée sur la MLI pour le contrôle des deux onduleurs de l'UPFC, on choisissant le régulateur

PI avec compensation de pôles pour la partie shunt et pour la partie série. En fin nous avons calculé les coefficients des régulateurs utilisés.

***« J'admire ceux qui continuent à danser même lorsque la musique s'est  
arrêtée, car ce sont ceux qui continuent d'avancer lorsque tout espoir est  
perdu »***

***Wilson Kanadi***

# *Chapitre III*

## **Modélisation et Commande des Onduleurs de Tension à deux et Trois Niveaux, Structure (NPC)**

## Chapitre 3

# *Modélisation et Commande des Onduleurs de Tension à deux et à Trois Niveaux, de type NPC*

### III-1-Introduction

Selon leurs applications, les onduleurs peuvent être à deux niveaux ou multiniveaux. Pour ce faire on a consacré ce chapitre à l'analyse, la modélisation et la commande des onduleurs à deux niveaux et à trois niveaux de type NPC.

### III-2-Etat de l'art des onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), [25-26-27], ainsi que les progrès réalisés dans le domaine de la micro-informatique. Malgré leurs avantages, les onduleurs conventionnels (à deux niveaux) sont limités aux applications de faibles et de moyennes puissances et basse tension seulement (1.4kV, 1MVA) et présentent d'autres inconvénients tels que, [28-29]:

- Mauvaise qualité de la tension de sortie avec un contenu spectral riche en harmoniques.
- Rayonnement électromagnétique important dû aux échelons de tension délivrés dont l'amplitude est égale à la totalité de la tension continue.
- Pertes par conduction dans les semi-conducteurs qui dépendent du courant de charge;
- Pertes par commutation qui dépendent de la fréquence de commutation ce qui provoque leur échauffement.

Pour remédier à ces inconvénients, la solution naturelle consiste à utiliser des onduleurs multi-niveaux réalisés par la mise en série des éléments semi-conducteurs. Parmi les topologies multi-niveaux les plus répandues on peut évoquer la structure dite à diodes flottantes. Cette topologie a été initialement proposée par A. Nabae, [30] pour la génération de trois niveaux de tension (structure NPC : Neutral Point Clamped), puis elle est généralisée à N niveaux.

Plusieurs groupes de recherche ont proposé son application dans le domaine de la traction électrique, de la transmission en C.C, et dans la compensation de la puissance réactive, [31].

Les onduleurs multi-niveaux à diodes flottantes présentent plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous, [29,-32-33]:

- Une tension de sortie possédant une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur conventionnel.
- Les contraintes en tension supportés par les interrupteurs sont divisés par N-1, (car N : nbr de niveau).

- Permet d'éviter l'insertion d'un filtre en sortie de l'onduleur ou tout au moins une réduction de son coût et de son volume puisque l'augmentation de la fréquence apparente de découpage permet d'augmenter la fréquence de coupure du filtre.
- On peut monter en tension et par conséquent en puissance.
- Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie.
- Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur.

La topologie à diodes flottantes présente également plusieurs limitations, parmi lesquelles, [32-33] :

- Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs devient très difficile, car il est intimement lié au facteur de puissance de la charge et l'indice de modulation.
- L'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes de clamp.
- L'inégalité de commutations entre interrupteurs situés à l'extérieur de la structure par rapport aux autres.
- Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés, ce qui résulte une augmentation du coût de réalisation.
- La complexité de leur structure et leur commande s'en trouve augmentée et leur fiabilité relativement réduite.

Afin d'arriver à la topologie à diodes flottantes et avant d'en observer l'évolution de sa structure de base, il est judicieux de bien comprendre les séquences de fonctionnement du montage classique d'un onduleur à deux niveaux.

### III-3-Onduleur de tension à deux niveaux

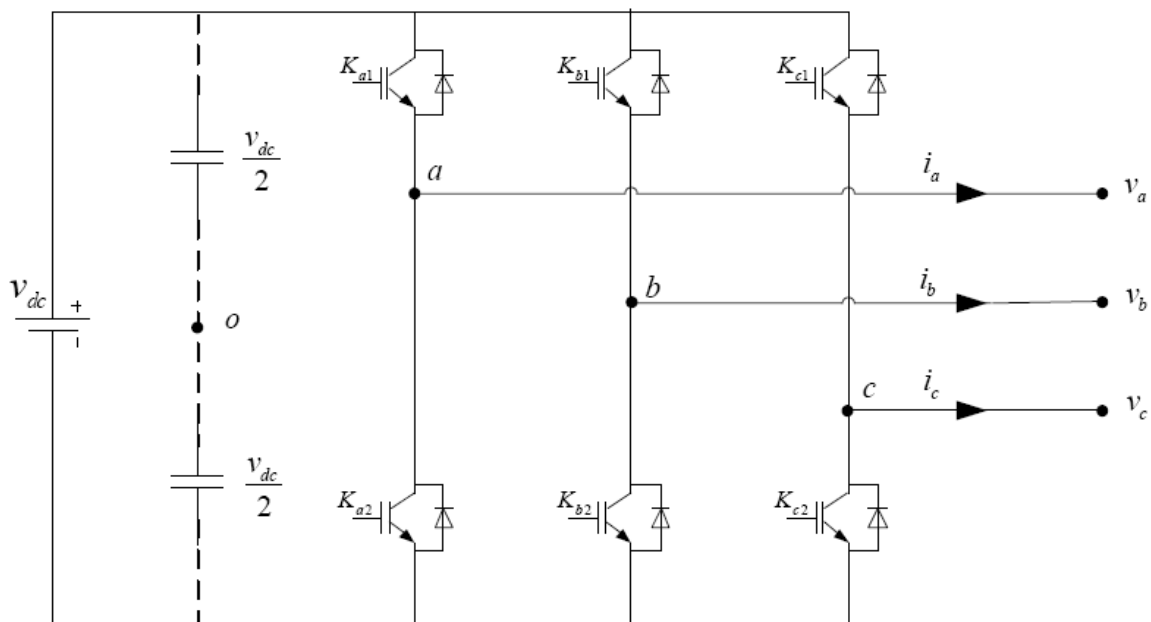
#### III-3-1-Modélisation de l'onduleur

##### III-3-1-1-Structure générale

La structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux est représentée dans la Figure (III-1).

L'onduleur est composé de trois bras chacun comportant deux interrupteurs bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences moins élevées, [34-35], misent en antiparallèle avec des diodes pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant.

Pour simplifier l'étude on crée un point milieu fictif « o » par deux condensateurs fictives chacune prend la moitié de la tension continue  $v_{dc}$ .



**Figure (III-1) :** Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

### III-3-1-2-Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé. Chaque interrupteur  $K_{xi}$  est associé à une fonction de connexion  $S_{xi}$ , tel que :

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 \text{ si } K_{xi} \text{ fermé} \\ S_{xi} = 0 \text{ si } K_{xi} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

- $x=a,b,c$  : Indicateur de phase.
- $i=1, 2$  : Numéro de l'interrupteur du bras x.

### III-3-1-3-Commande complémentaire des interrupteurs

Sachant que la fermeture où l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs soit par surintensité soit par surtension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs  $K_{x1}$  et  $K_{x2}$ , du même bras, [28-33]. Ce qui conduit à la relation logique suivante :

$$S_{x2} = \bar{S}_{x1} = 1 - S_{x1} \quad (\text{III-2})$$



### III-3-1-4-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  $S_{x1}$  comme illustré dans l'équation (III-3).

$$V_{xo} = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 1 (S_{x2} = 0) \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 0 (S_{x2} = 1) \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Avec :

- $v_{xo}$  : c'est la tension entre la phase x et le point milieu o.

L'équation (III-3) peut être écrite sous la forme suivante :

$$V_{xo} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_{x1} - 1) \quad (\text{III-4})$$

Les trois tensions phases-point milieu  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$  et  $v_{co}$ , sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - 1 \\ 2S_{b1} - 1 \\ 2S_{c1} - 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-5})$$

Les tensions composées entre phases  $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$  et  $v_{ca}$ , deviennent donc :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} - V_{ao} \end{bmatrix} = v_{dc} \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

Les grandeurs que l'on souhaite contrôler grâce à l'onduleur sont les tensions simples côté charge ( $v_a$ ,  $v_b$  et  $v_c$ ). Pour une charge triphasée équilibrée, ces tensions vérifient la relation suivante :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{III-7})$$

Les tensions phases-neutre sont données, en fonction des tensions composées et des tensions phases-point milieu, par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

Et en fonction des fonctions de connexions par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad (\text{III-9})$$

La forme complexe de la tension de sortie est donnée par :

$$v = v_a e^{j0} + v_b e^{-j2\pi/3} + v_c e^{j2\pi/3} \quad (\text{III-10})$$

Après avoir transformé le système triphasé dans un système biphasé par la transformation de Concordia, on peut représenter le vecteur  $v$  dans un espace à deux dimensions  $(\alpha, \beta)$  par :

$$v = v_{\alpha} + v_{\beta} \quad (\text{III-11})$$

Où

-  $v_{\alpha}$  et  $v_{\beta}$  : sont les projections du vecteur  $\bar{v}$  dans le système fixe  $(\alpha, \beta)$  données par :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-12})$$

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

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad (\text{III-13})$$

### III-3-1-5- Représentation vectorielle

Le tableau (III-1) représente les différents états de l'onduleur et les coordonnées du vecteur de tension de sortie  $v_i$  correspondant à chaque état.

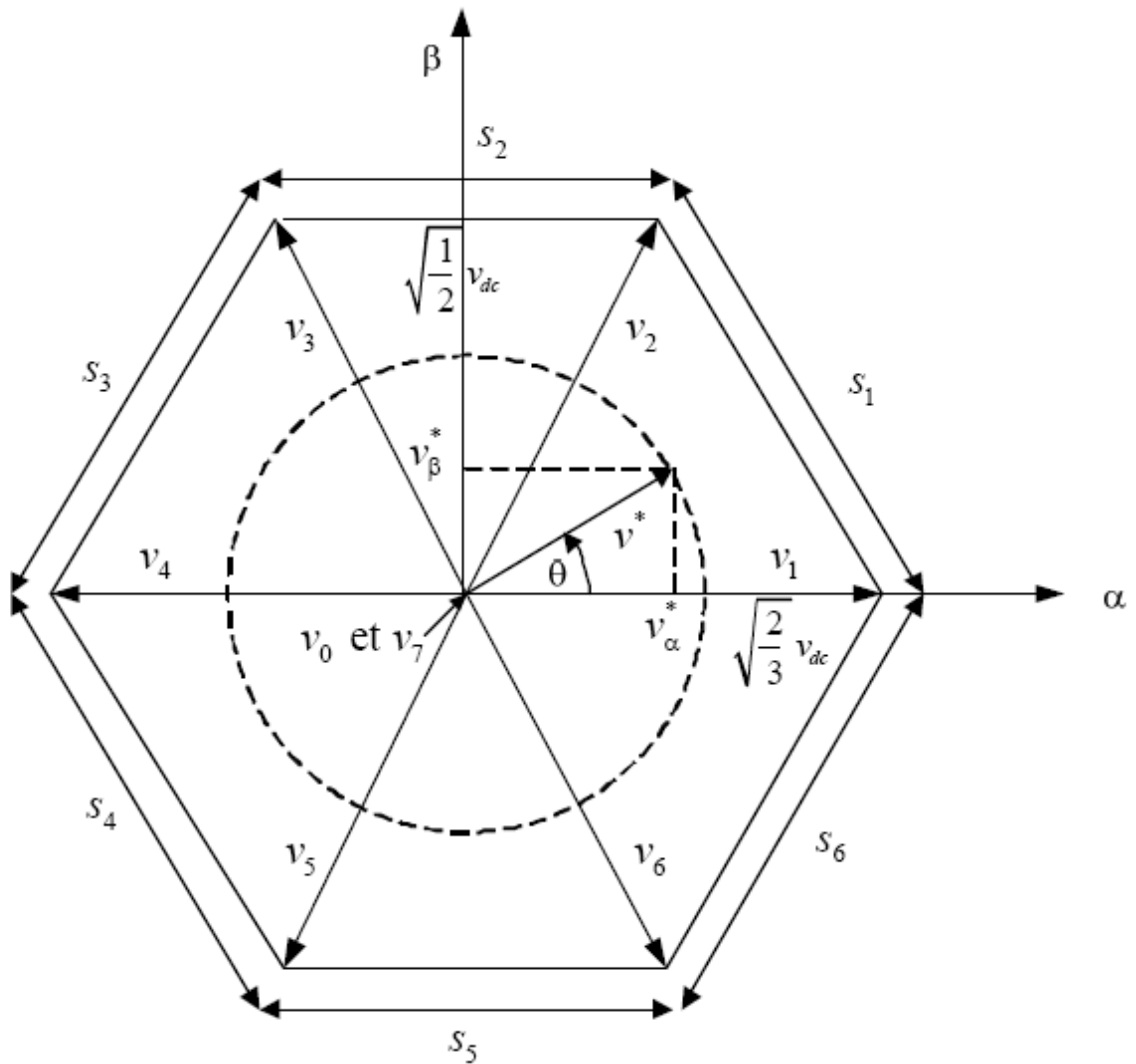
$S_{a1}$	$S_{b1}$	$S_{c1}$	$V_\alpha$	$V_\beta$	$V_i$
0	0	0	0	0	$V_0$
1	0	0	$\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	$V_1$
1	1	0	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	$V_2$
0	1	0	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	$V_3$
0	1	1	$-\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	$V_4$
0	0	1	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	$V_5$
1	0	1	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	$V_6$
1	1	1	0	0	$V_7$

**Tableau (III-1)** : Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur  $v_i$  dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .

Comme on peut le voir, les combinaisons (111) et (000) donnent toujours des vecteurs nuls. La figure (III-2) montre la représentation dans le plan complexe des six vecteurs non nuls, qui peuvent être générés par l'onduleur, et qui forment le diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux ou l'hexagone de commutation [36].

L'objectif de la commande de l'onduleur est de rendre les tensions de sortie  $v_a$ ,  $v_b$  et  $v_c$ , aussi proches que possible des trois tensions de référence sinusoïdales  $v_a^*$ ,  $v_b^*$  et  $v_c^*$ . Comme il est illustré dans la Figure (III-2), ces vecteurs peuvent être représentés dans le plan  $(\alpha, \beta)$  par un seul vecteur de référence noté  $\vec{v}^*$ , d'amplitude  $v^*$  constante et égale à l'amplitude souhaitée des tensions simples, et tournant autour du centre de l'hexagone avec une vitesse angulaire  $\omega = d\theta/dt$ , constante correspondante à la pulsation électrique souhaitée. Ce vecteur est défini par :

$$\bar{v}^* = v^* e^{j\theta} \quad (\text{III-14})$$



**Figure (III-2) :** Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux.

Si on attribue au vecteur de référence  $\vec{v}^*$ , uniquement les six positions discrètes de la figure (III-2), la tension de sortie sera riche en harmoniques. Afin de réduire le taux d'harmoniques de la tension de sortie résultante de la forme non circulaire de cet hexagone, on impose au vecteur  $\vec{v}^*$ , de se positionner à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone. Ainsi, le module maximal admissible du vecteur  $\vec{v}^*$ , est :

$$v_{\max}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{\frac{1}{2}} v_{dc} \quad (\text{III-15})$$

L'équation (III-14) devient :

$$\vec{v}^* = m v_{\max}^* e^{j\theta} \quad (\text{III-16})$$

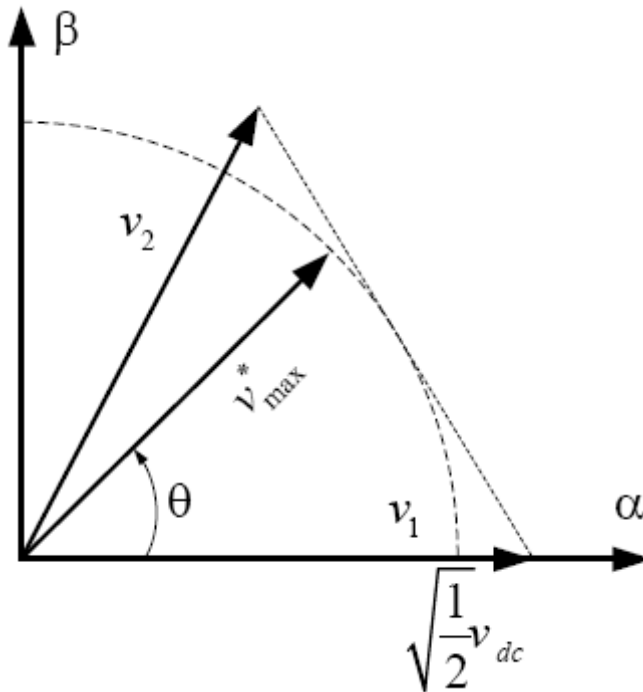


Figure (III-3) : Limite du vecteur  $\vec{v}^*$ .

Avec

- $m$  : Le taux de modulation qui a une valeur entre 0 et 1 et défini par la relation suivante :

$$m = \frac{\sqrt{2} v_{\max}^*}{v_{dc}} \quad (\text{III-17})$$

- $\theta$  : la position angulaire du vecteur  $\vec{v}^*$  calculée comme suit :

$$\theta = \text{arctg} \left( \frac{v_{\beta}^*}{v_{\alpha}^*} \right) \quad (\text{III-18})$$

### III-3-2-Commande de l'onduleur à deux niveaux

#### III-3-2-1-MLI vectorielle (SVM)

Les techniques de modulations permettent de générer un signal quantifié, image du signal de référence.

Le signal de référence à l'entrée du modulateur est l'image du signal qu'il faudrait idéalement appliquer au dispositif à contrôler pour obtenir l'effet désiré. Le signal généré à la sortie du modulateur (le signal modulé) est l'image du signal le plus proche que l'onduleur est capable d'imposer à l'aide des niveaux dont il dispose.

La modulation de largeurs d'impulsions est largement utilisée dans la commande des onduleurs. On rencontre plusieurs stratégies de ce type de commande, telles que la modulation triangulo-sinusoïdale, [28], la modulation par hystérésis, [40], et au milieu des années quatre-vingt, la modulation vectorielle (Space Vector Modulation : SVM) a été proposée par, [41]. Cette dernière offre des avantages significatifs par rapport à la MLI naturelle et à échantillonnage régulier du point de vue performances de simplicité d'implantation et un rapport de transfert maximal. La modulation vectorielle est reconnue aussi comme étant la plus performante et la plus utilisée, [42]. L'algorithme de cette modulation devient de plus en plus compliqué lors de son application sur les onduleurs multiniveaux, [42].

#### III-3-2-1-1-Principe de la MLI vectorielle

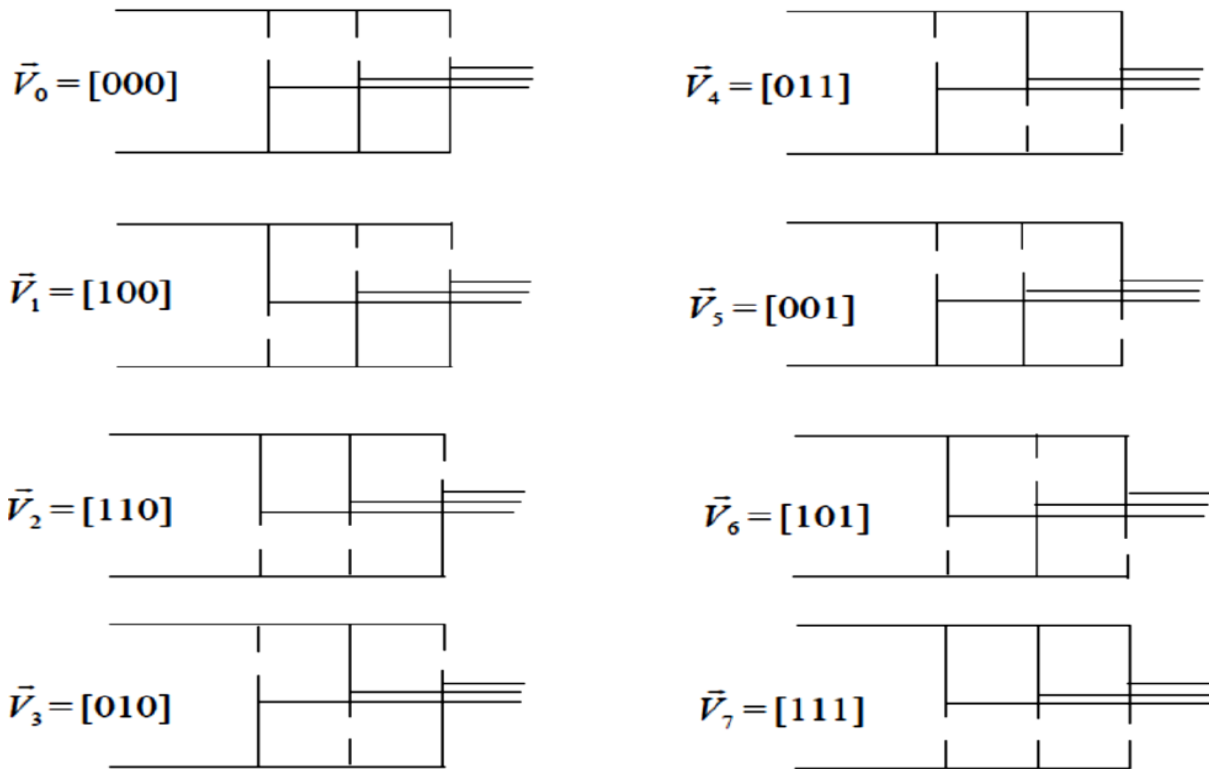
Le principe de la MLI vectorielle consiste à projeter le vecteur de tension de référence  $\vec{v}^*$ , désiré sur les deux axes du plan  $(\alpha, \beta)$ . Ces projections sont utilisées dans le calcul des temps de commutations désirées de deux états non nuls de l'onduleur. Si on désigne par  $t_i$  et  $t_{i+1}$ , les

deux temps de commutation en question, leur somme doit être forcément inférieure à la période de commutation de l'onduleur  $T_h$ .

Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué durant le reste de la période  $T_h$ . Afin de connaître dans quel secteur se trouve le vecteur de tension  $\vec{v}^*$ , une série de tests sur  $\vec{v}_\alpha^*$  et  $\vec{v}_\beta^*$ , assure la localisation de celui-ci. A l'intérieur d'une période de commutation de l'onduleur, il existe différentes stratégies d'application des vecteurs assurant l'obtention de la tension désirée. Afin de réduire les harmoniques, il est préférable de générer des tensions centrées sur la période de commutation de l'onduleur, [43].

Dans les cas où le système de commande exige des tensions supérieures à la valeur maximum de l'algorithme MLI vectorielle, il sera nécessaire de développer un mécanisme de limitation des tensions de sortie, [42].





**Figure (III-8):** Les états de l'onduleur à deux niveaux et les vecteurs des tensions correspondants.

Il s'agit alors de déterminer la position du vecteur de consigne dans ce repère  $(\alpha, \beta)$ , et le secteur dans lequel il se trouve figure (III-9). Celui-ci est limité par les deux vecteurs  $(v_i$  et  $v_{i+1})$ , définis dans le Tableau (III-1). Les tensions de référence sont reconstituées en effectuant une moyenne temporelle de ces vecteurs.

Les vecteurs tensions des six états actifs, peuvent s'écrire en fonction des portions de l'hexagone appelés secteur  $k$ , où  $k = 1, \dots, 6$  :

$$v_i = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} \quad (\text{III-19})$$

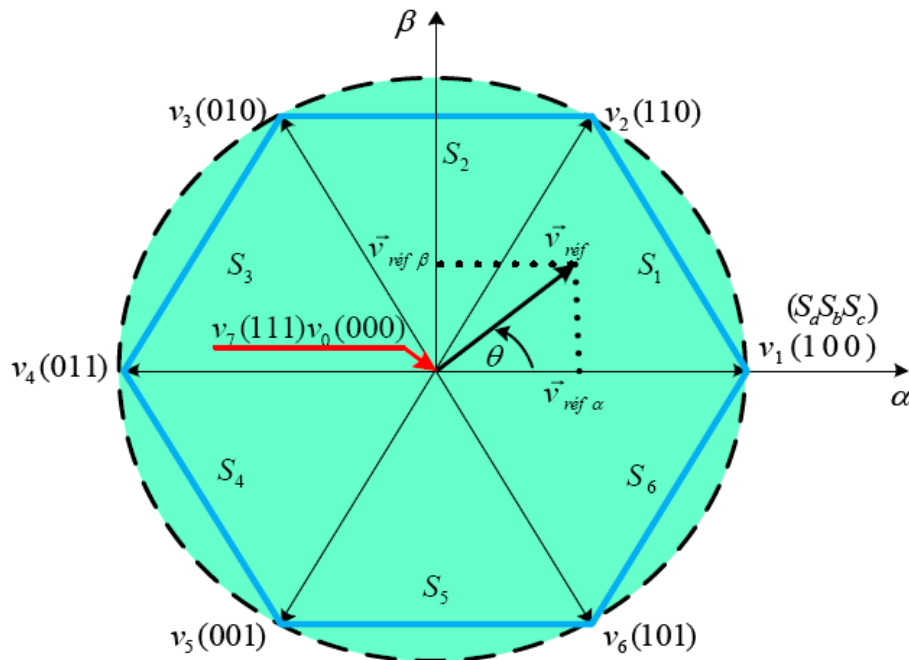
Chaque vecteur de référence  $\vec{v}^*$ , dans l'hexagone peut être exprimé comme combinaison de deux vecteurs tensions actifs adjacents et de vecteur tension d'états nuls. En se reportant à la figure (III-9), si le vecteur de référence est dans le secteur k, les vecteurs actifs adjacents sont  $v_i$  et  $v_{i+1}$  ).

La représentation dans le plan  $(\alpha, \beta)$ , de ces vecteurs equi-répartis tous les  $60^\circ$ , permet de déterminer un hexagone à l'intérieur duquel le vecteur tension de référence  $\vec{v}^*$  doit s'y trouver pour éviter la saturation de la grandeur de commande.

$$\vec{V}^* = v_\alpha + jv_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}}(v_{am} + av_{bn} + a^2v_{cm}) = \sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}(S_a + aS_b + a^2S_c) \quad \text{(III-20)}$$

Avec :

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$



**Figure (III-9) :** Représentation d'un hexagone de commutation et le vecteur de tension de référence.

Le vecteur  $\vec{v}^*$ , tourne dans le plan  $(\alpha, \beta)$  à une vitesse angulaire égale à la pulsation des tensions  $\vec{v}_a^*$ ,  $\vec{v}_b^*$  et  $\vec{v}_c^*$ . Sur le diagramme de la Figure (III-9), on a représenté une position arbitraire du vecteur  $\vec{v}^*$ , et on a indiqué l'angle  $\theta$  correspondant à cette position. A partir de l'angle  $\theta$ , on déduit le secteur triangulaire contenant ce vecteur de la manière suivante:

$$s = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \theta < \frac{3}{\pi} \\ 2 & \text{si } \frac{3}{\pi} \leq \theta < \frac{2\pi}{3} \\ 3 & \text{si } \frac{2\pi}{3} \leq \theta < \pi \\ 4 & \text{si } \pi \leq \theta < \frac{4\pi}{3} \\ 5 & \text{si } \frac{4\pi}{3} \leq \theta < \frac{5\pi}{3} \\ 6 & \text{si } \frac{5\pi}{3} \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (\text{III-21})$$

Le tableau (III-2) résume les définitions suscitées :

Notons que toutes les valeurs des tensions doivent être multipliées par,  $v_{dc}$ .

Vecteurs d'état	Valeur en $(\alpha, \beta)$	Tensions simples			Tensions composées		
		$v_{am}$	$v_{bm}$	$v_{cm}$	$v_{ab}$	$v_{bc}$	$v_{ca}$
$\vec{v}_0(S_a S_b S_c)$	$v_i$	$v_{am}$	$v_{bm}$	$v_{cm}$	$v_{ab}$	$v_{bc}$	$v_{ca}$
$\vec{v}_0(000)$	0	0	0	0	0	0	0
$\vec{v}_1(100)$	$e^{j0}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	1	0	-1
$\vec{v}_2(110)$	$e^{j\frac{2\pi}{3}}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	1	-1
$\vec{v}_3(010)$	$e^{j\frac{\pi}{3}}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	-1	1	0
$\vec{v}_4(011)$	$e^{j\frac{4\pi}{3}}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	0	1
$\vec{v}_5(001)$	$e^{j\frac{5\pi}{3}}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	-1	1
$\vec{v}_6(101)$	$e^{j\pi}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	-1	0
$\vec{v}_7(111)$	0	0	0	0	0	0	0

**Tableau (III-2) :** Valeurs des tensions correspondantes.

La méthode SVPWM peut être implémentée par les étapes suivantes:

- Déterminer  $v_\alpha^*$  et  $v_\beta^*$  et par conséquent  $\vec{v}^*$  et l'angle  $\theta$ .
- Déterminer les temps d'application des états de l'onduleur.
- Déterminer les séquences d'impulsions pour chaque bras de l'onduleur.

### III-3-2-1-2-Calcul des temps de commutation

Dans le cas général, l'onduleur n'est pas capable de générer directement le vecteur  $\vec{v}^*$ , car il ne peut prendre que les huit états discrets illustrés précédemment. On doit donc construire  $\vec{v}^*$  à l'aide d'une combinaison des vecteurs nuls ( $v_0$  ou  $v_7$ ) et des deux vecteurs adjacents  $v_i$  et  $v_{i+1}$  du secteur qui contient le vecteur de référence ( $i=s$ ). Ces vecteurs sont appliqués individuellement pendant certaines durées  $t_0$ ,  $t_i$  et  $t_{i+1}$  de sorte que  $\vec{v}^*$  soit égale à la valeur moyenne de ces vecteurs pendant une période de découpage :

$$\bar{v}^* = \bar{v}_i + \bar{v}_{i+1} + \bar{v}_0 \quad (\text{III-22})$$

Avec :

$$\bar{v}^* = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+T_h} \vec{v}^* dt \quad (\text{III-23})$$

Puisque la période de découpage  $T_h$  est très faible, la valeur moyenne de tension  $\vec{v}^*$  peut être considérée comme constante.

Et puisque les vecteurs  $v_i$  et  $v_{i+1}$ , sont des vecteurs fixes on a :

$$\bar{v}_i = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+t_i} v_i dt = \frac{1}{T_h} v_i t_i \quad (\text{III-24})$$

Et :

$$\bar{v}_{i+1} = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+t_{i+1}} v_{i+1} dt = \frac{1}{T_h} v_{i+1} t_{i+1} \quad (\text{III-25})$$

L'équation (III-22) devient :

$$T_h v^* = t_{i+1} v_{i+1} + t_i v_i + t_0 v_0 \quad (\text{III-26})$$

Par comparaison des parties réelles et imaginaires des deux membres on obtient :

$$\begin{cases} T_h v_\alpha^* = t_{i+1} v_{i+1}^\alpha + t_i v_i^\alpha \\ T_h v_\beta^* = t_{i+1} v_{i+1}^\beta + t_i v_i^\beta \end{cases} \quad (\text{III-27})$$

Connaissons les valeurs des coordonnées des vecteurs de sortie  $v_i^\alpha$  et  $v_i^\beta$ , (Tableau III-3).

On peut calculer les temps de commutation  $t_i$  et  $t_{i+1}$  en fonction des coordonnées du vecteur de référence par la résolution du système d'équation (III-27).

Pendant le reste de la période de commutation on applique les vecteurs nuls chacun pendant la moitié de ce temps, donc :

$$t_0 = t_7 = \frac{T_h - t_i - t_{i+1}}{2} \quad (\text{III-28})$$

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

$$\begin{cases} e = T_h \frac{\sqrt{3}v_\alpha^* + v_\beta^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ l = T_h \frac{\sqrt{3}v_\alpha^* - v_\beta^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ k = T_h \frac{\sqrt{2}v_\beta^*}{v_{dc}} \end{cases} \quad (III-29)$$

Les temps  $t_i$  et  $t_{i+1}$  pour chaque secteur sont exprimés en fonction du variable  $e$ ,  $l$  et  $k$  suivant le tableau (III-3) :

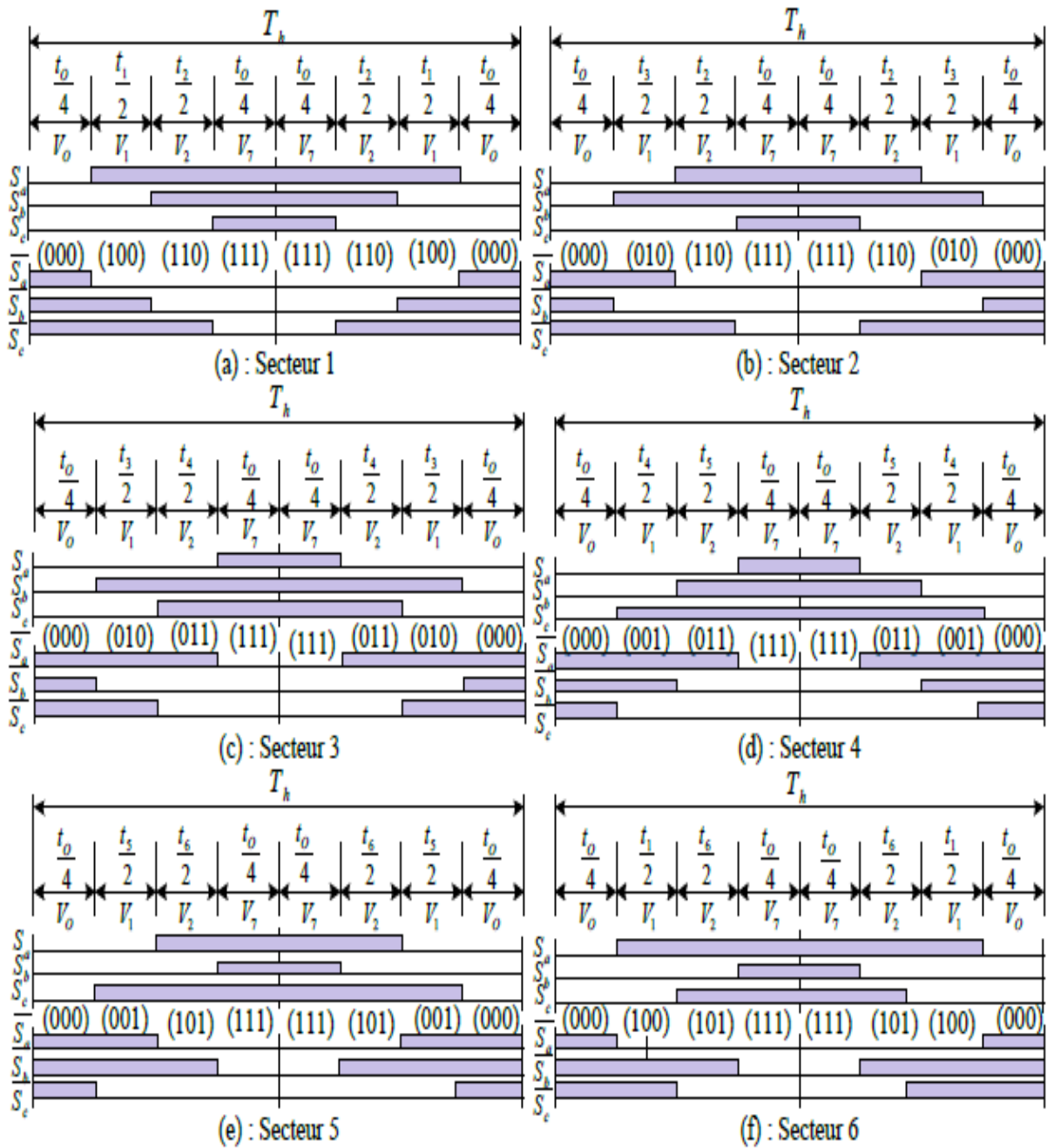
Secteur	1	2	3	4	5	6
$t_i$	$e$	$l$	$k$	$-e$	$-l$	$-k$
$t_{i+1}$	$k$	$-e$	$-l$	$-k$	$e$	$l$

**Tableau (III-3) :** Temps de commutation pour chaque secteur.

### III-3-2-1-3-Génération des impulsions de commande

L'application des vecteurs d'états durant une période de découpage doit tenir en compte de deux critères:

- a- Minimisation des harmoniques, par la génération d'une tension de sortie la plus proche que possible de la tension de référence, par l'application du vecteur d'état  $v_i$ , pendant une durée  $t_i$  le vecteur  $v_{i+1}$ , pendant 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 [44].
- b- Minimisation des pertes dans les interrupteurs par la réduction du nombre de commutation de chaque interrupteur, par l'application du vecteur d'indice impair avant l'application du vecteur d'indice pair pendant la demi période de découpage et inversement durant l'autre demi période [44].



**Figure (III-10) :** Principe de génération des impulsions de commande par MLI vectorielle.

Cette figure permet de donner la relation entre ton et  $t_{off}$  de chaque interrupteur et les durées de conduction  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_0$  pour le secteur 1, d'après la figure (III-10) on a les relations suivantes, [45-46]:

$$\begin{cases} t_{a \text{ on}} = \frac{t_0}{4}, & t_{a \text{ off}} = T_h - T_{a \text{ on}} = \frac{3t_0}{4} + t_1 + t_2 \\ t_{b \text{ on}} = \frac{t_0}{4} + \frac{t_1}{2}, & t_{b \text{ off}} = T_h - t_{b \text{ on}} = \frac{3t_0}{4} + \frac{t_1}{2} + t_2 \\ t_{c \text{ on}} = \frac{t_0}{4} + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2}, & t_{c \text{ off}} = T_h - T_{c \text{ on}} = \frac{3t_0}{4} + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \end{cases} \quad (\text{III-30})$$

De la même manière on peut déterminer les instants de commutation  $t_{\text{on}}$ ,  $t_{\text{off}}$  de chaque interrupteur pour les autres secteurs.

L'état de chaque interrupteur est déduit par une simple comparaison entre l'instant  $t$  et les instants  $t_{\text{on}}$ ,  $t_{\text{off}}$ .

$$\begin{cases} \text{Si } t_{a \text{ on}} \leq t < t_{a \text{ off}}, & S_a = 1; & \text{Si non, } S_a = 0 \\ \text{Si } t_{b \text{ on}} \leq t < t_{b \text{ off}}, & S_b = 1; & \text{Si non, } S_a = 0 \\ \text{Si } t_{c \text{ on}} \leq t < t_{c \text{ off}}, & S_c = 1; & \text{Si non, } S_c = 0 \end{cases} \quad (\text{III-31})$$

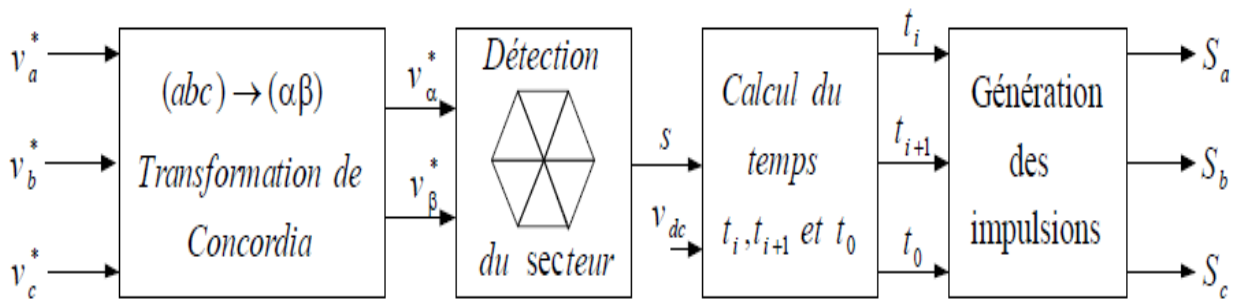
#### III-3-2-1-4-Schéma bloc de la MLI vectorielle

Si on veut résumer la méthode de calcul de la MLI vectorielle, on peut énumérer les points suivants :

- 1- A partir des tensions de référence  $v_a^*$ ,  $v_b^*$  et  $v_c^*$ , on déduit les composantes du vecteur référence  $v_\alpha^*$  et  $v_\beta^*$  dans le repère de  $(\alpha, \beta)$ .
- 2- Calcul du numéro du secteur  $s$  où se situe le vecteur de référence.
- 3- Calcul des temps  $(t_i, t_{i+1}$  et  $t_0)$ , d'application des vecteurs  $(v_i, v_{i+1}$  et  $v_0)$ .
- 4- Génération des impulsions de commandement des interrupteurs.

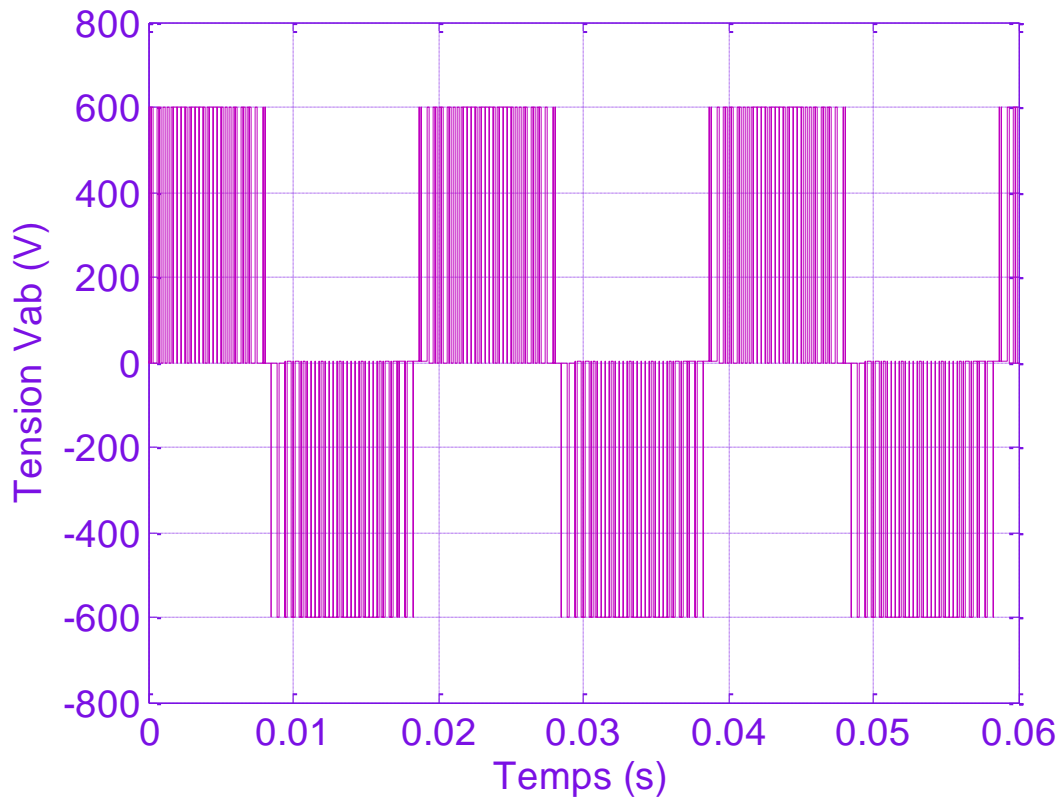


Sur la figure (III-11), apparaît le schéma bloc de la MLI vectorielle.

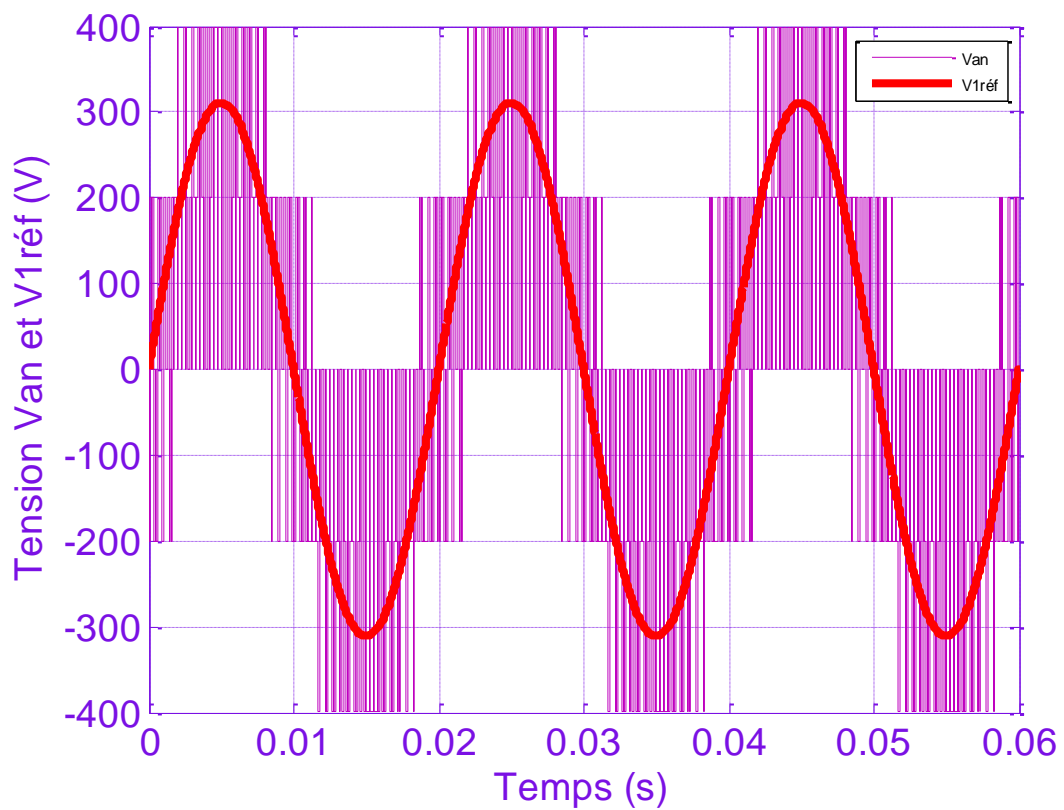


**Figure (III-11):** Schéma bloc de la MLI vectorielle.

Le schéma bloc de la modulation vectorielle de l'onduleur à deux niveaux est représenté à la Figure (III-11). A partir des tensions de références,  $v_a^*$ ,  $v_b^*$  et  $v_c^*$ , on calcule le vecteur tension de référence  $v^*$ , et on déduit le taux de modulation  $r$  et la position angulaire  $\theta$  dans le diagramme vectoriel (équation (III-20)), On déduit par la suite le secteur  $S$  contenant le vecteur de référence (équation (III-21)), et on déduit les états de fermeture et ouverture des interrupteur de chaque bras de l'onduleur (figure III-8).



**Figure (III-12) :** Tension composée  $V_{ab}$  d'un onduleur à deux niveaux à MLI vectorielle.



**Figure (III-13) :** Tension composée  $V_{an}$  et sa référence d'un onduleur à deux niveaux à MLI vectorielle.

### III-3-2-2-MLI classique (PWM) sans injection de l'harmonique trois

La modulation de largeur d'impulsions (MLI) consiste à générer par alternance de la tension alternative, une tension composée de plusieurs créneaux de largeur variables. Elle permet ainsi, d'obtenir un fondamentale de tension variable en amplitude et en fréquence, [37].

#### III-3-2-2-1-La technique triangulo-sinusoidale

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire ( $V_p$ ) d'amplitude fixe, et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, aux trois signaux sinusoïdaux ( $V_{réf1}$ ,  $V_{réf2}$ ,  $V_{réf3}$ ), d'amplitude variable et de fréquence  $f$ , appelée référence. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs figure (III-14), [38].

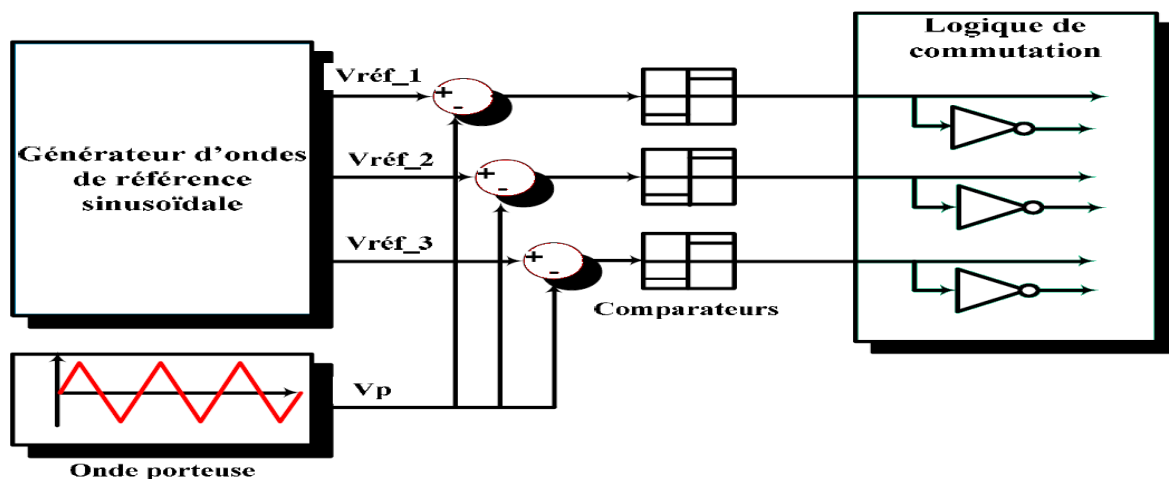


Figure (III-14) : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale.

La technique triangulo-sinusoidale présente deux avantages importants :

- Elle repousse les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences élevées, ce qui facilite leur filtrage.
- Elle permet de faire varier l'amplitude du fondamental de la tension de sortie.

Cette technique se caractérise par deux paramètres :

- L'indice de modulation  $m$ , est défini comme étant le rapport de fréquence de la porteuse ( $f_p$ ) à celle de la référence ( $f$ ).
- Le coefficient de réglage (taux de modulation) en tension ( $r$ ) est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la référence ( $V_{rmax}$ ) à celle de la porteuse ( $V_{pmax}$ ).

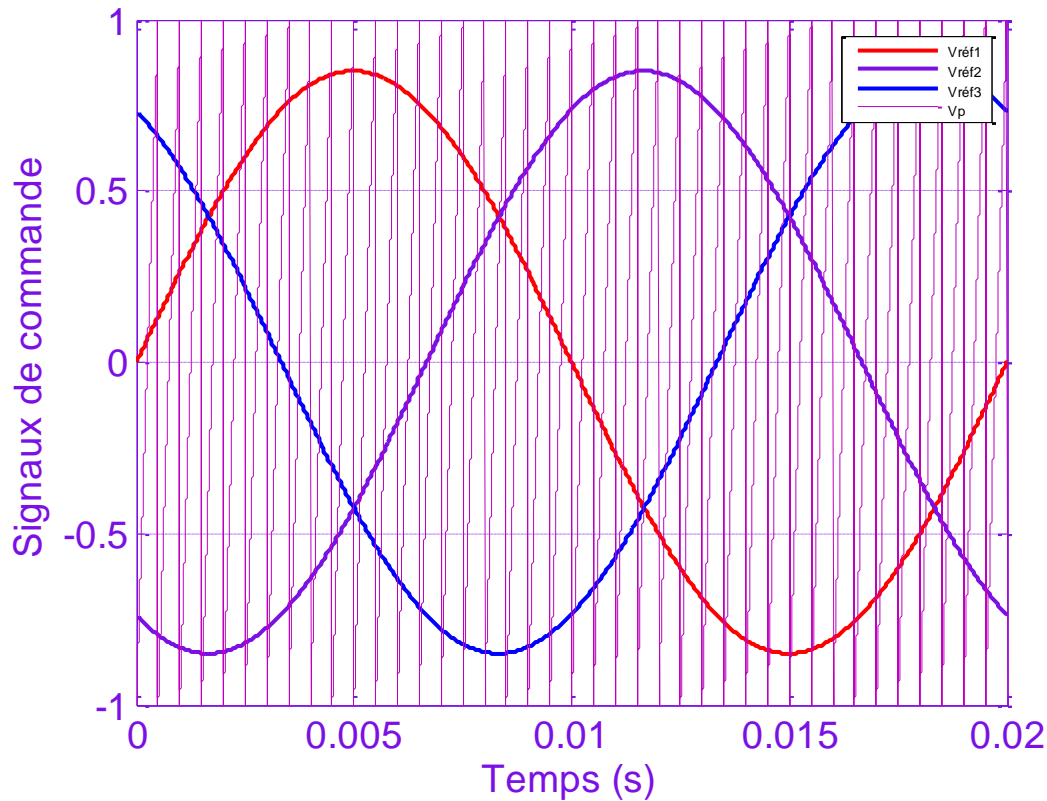
L'essor de la MLI est lié aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance, l'augmentation du nombre de commutations entrainerait des pertes excessives si on n'avait pas réussi à réduire les pertes à chacune des commutations.

Les tensions de référence, qui permettent d'obtenir un système triphasé équilibré, sont de formes sinusoidales, [37] :

$$V_{réfk} = V_{max} \sin \left( 2\pi ft - (k - 1) \frac{2\pi}{3} \right), k = 1, 2, 3 \quad (\text{III-32})$$

### III-3-2-2-2-La technique triangulo-sinusoidale à une seule porteuse bipolaire

Cette stratégie est très connue pour les onduleurs à deux niveaux, [39]. Dans cette partie on donnera l'algorithme correspondant à l'onduleur à deux niveaux. Son principe général est de comparer une tension de référence à une porteuse bipolaire triangulaire.



**Figure (III-15) :** Principe de la commande SPWM avec une seule porteuse bipolaire pour  $r=0.85$  et  $m=40$ .

La figure (III-15) montre la porteuse et les tensions de références pour  $r=0.85$  et  $m=40$ .

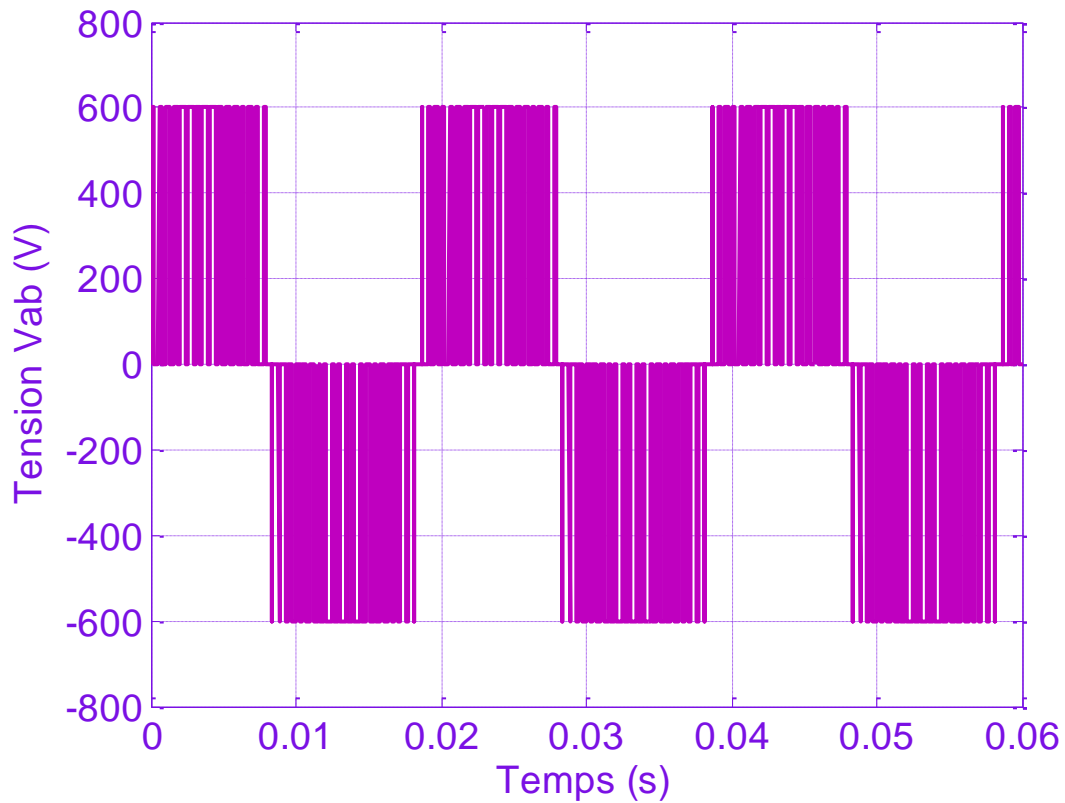
L'onde porteuse est définie par les équations suivantes :

$$V_p = \begin{cases} V_{p,\max} \left( 4 \frac{t}{T_p} + 1 \right); & \text{pour } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{p,\max} \left( -\frac{4}{T_p} + 3 \right); & \text{pour } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{III-33})$$

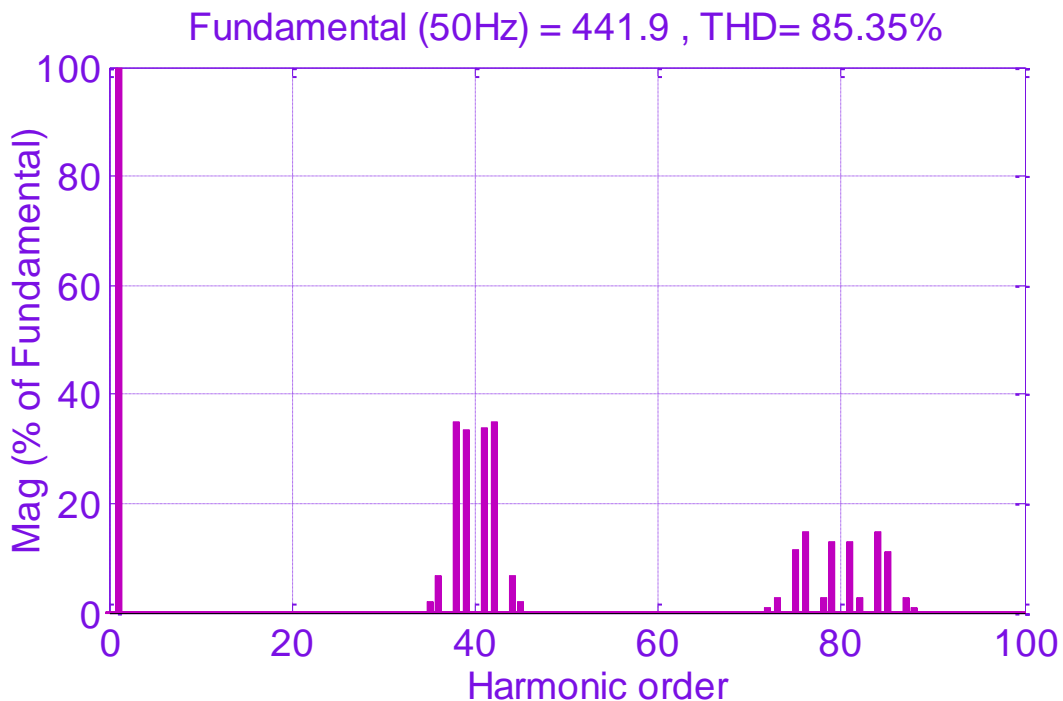
L'algorithme qui nous permet de réaliser cette technique de modulation est le suivant :

$$\begin{cases} \text{if } (V_{\text{réfk}} > U_p) \text{ then } S_{k1} = 1 \\ \text{else } S_{k1} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-34})$$

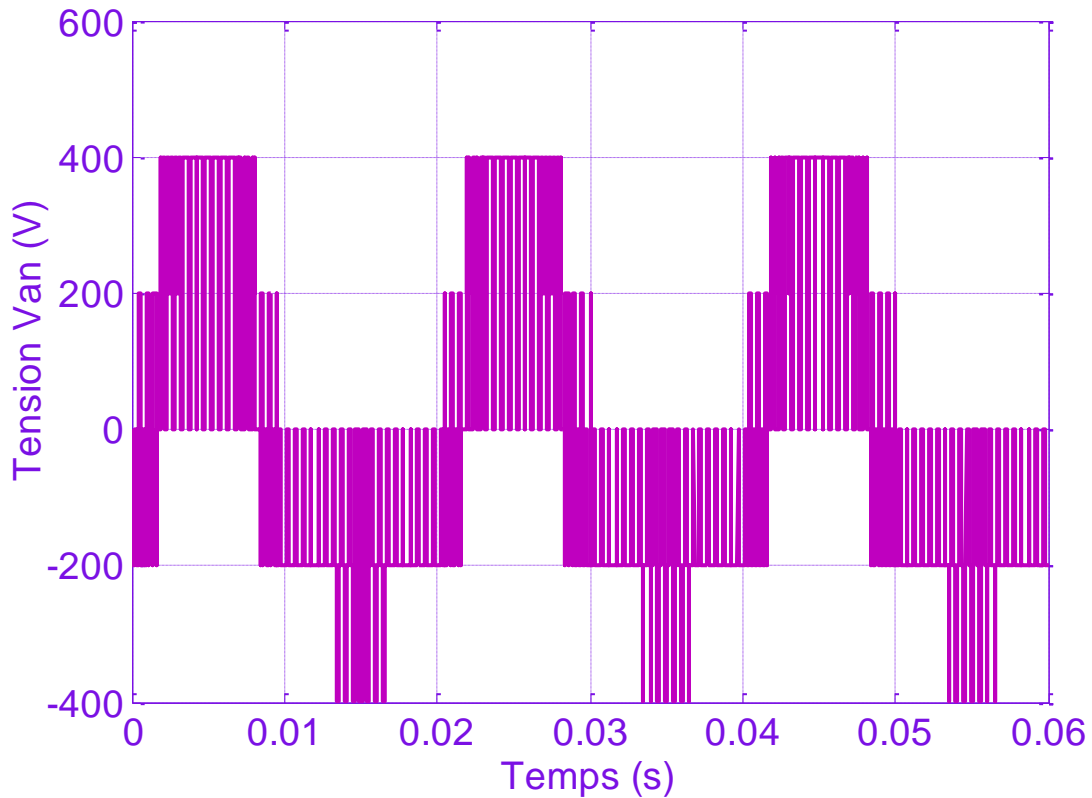
Avec :  $S_{k2} = \bar{S}_{k1}$



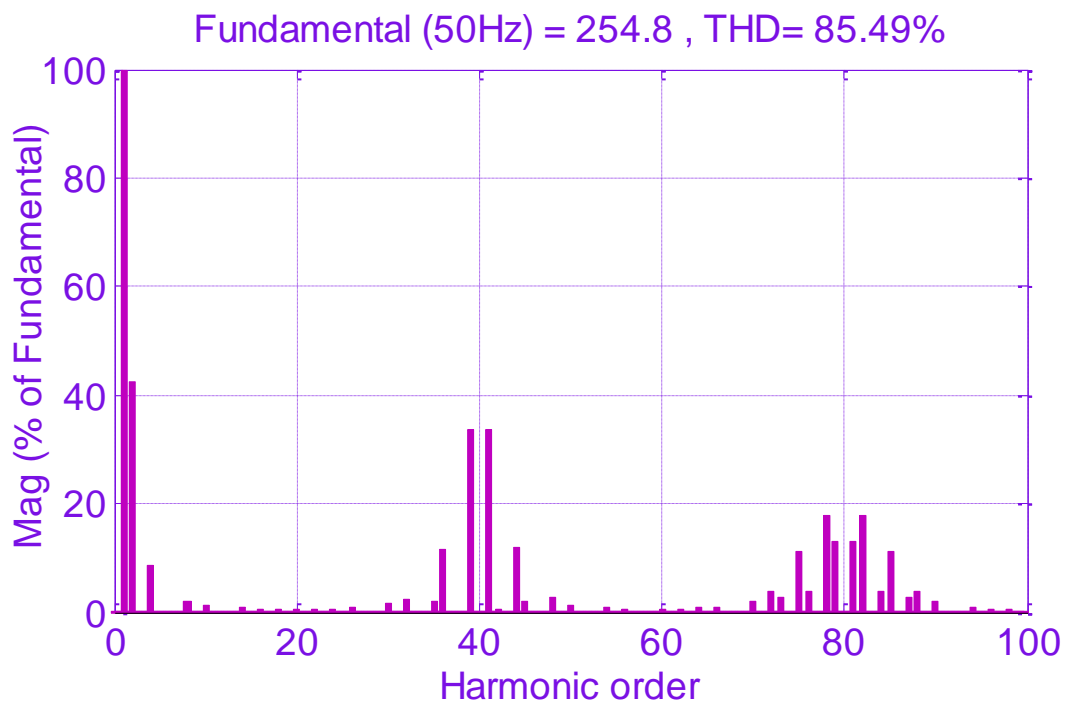
**Figure (III-16) :** Tension composée  $V_{ab}$  d'un onduleur à deux niveaux à MLI à une seule porteuse pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$ .



**Figure (III-17) :** Spectre harmonique de  $V_{ab}$  d'un onduleur à deux niveaux à MLI à une seule porteuse pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$ .



**Figure (III-18) :** Tension simple  $V_{an}$  d'un onduleur à deux niveaux à MLI à une seule porteuse pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$ .



**Figure (III-19) :** Spectre harmonique de  $V_{an}$  d'un onduleur à deux niveaux à MLI à une seule porteuse pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$ .

### III-4-Onduleur à trois niveaux

#### III-4-1-Modélisation de l'onduleur

##### III-4-1-1-Structure générale

La figure (III-20) représente la structure générale de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes, appelé aussi onduleur NPC (Neutral Point Clamped). Cette structure est composée de deux condensateurs identiques à point milieu commun notée  $o$  qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux, [47].

La tension totale du bus continu vaut  $v_{dc}$ , dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux condensateurs qui possèdent alors une tension  $v_{dc} / 2$ , à leurs bornes (c'est l'hypothèse que l'on retiendra dans cette section). La sortie est reliée à une charge triphasée équilibrée couplée en étoile avec un neutre isolé. L'onduleur possède trois bras  $a, b$  et  $c$ . Chacun se compose de quatre interrupteurs totalement commandables ( $K_{x1}$ ,  $K_{x2}$ ,  $K_{x3}$  et  $K_{x4}$  avec  $x$  : indice du bras) misent en série, en antiparallèles avec quatre diodes principales afin assurer la réversibilité des courants dans la charge, et deux diodes de clamp ( $D_{x1}$  et  $D_{x2}$ ) connectées au point milieu du bus continu.



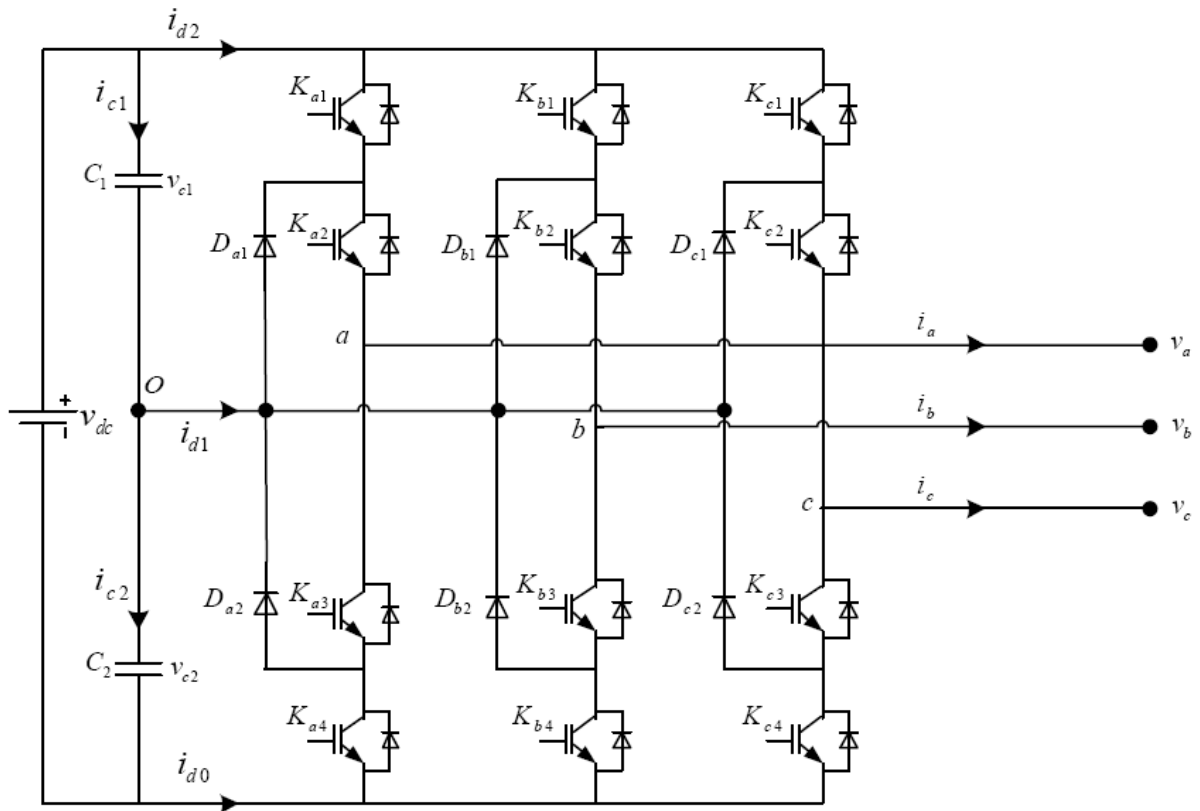


Figure (III-20) : Structure de puissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.

III-4-1-2-Modèle de l'interrupteur bidirectionnel en courant

La symétrie de l'onduleur triphasé à trois niveaux permet sa modélisation par bras, et afin de faciliter l'étude on remplace chaque paire diode-transistor par un seul interrupteur bidirectionnel en courant Figure (III-21).

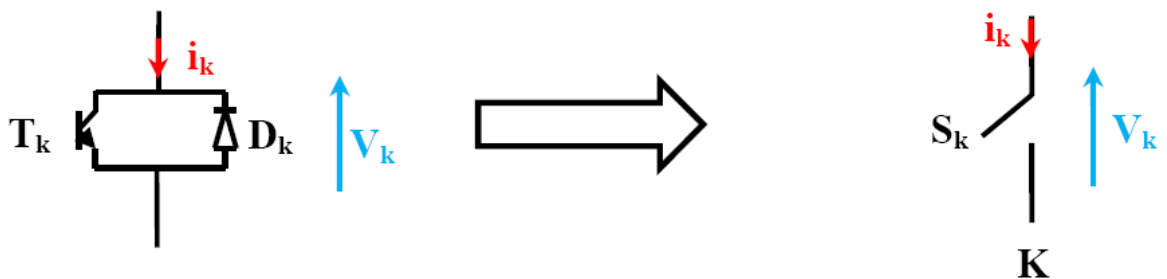


Figure (III-22) : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor.

Avec :

- $S_k$  la commande de l'interrupteur (K)

La synthèse de l'interrupteur bidirectionnel en courant est illustrée par les caractéristiques statiques ci-dessous, [48].

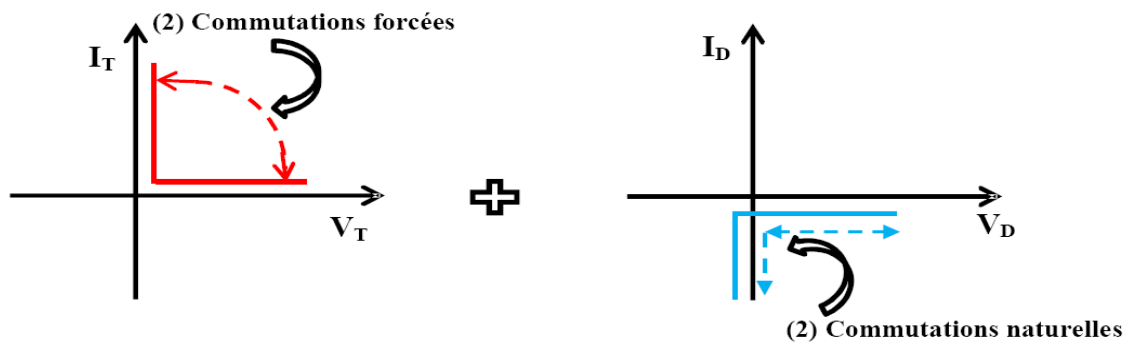


Figure (III-23) : Caractéristique statique de l'interrupteur (T) et la diode (D).

La combinaison des deux caractéristiques statiques conduit à :

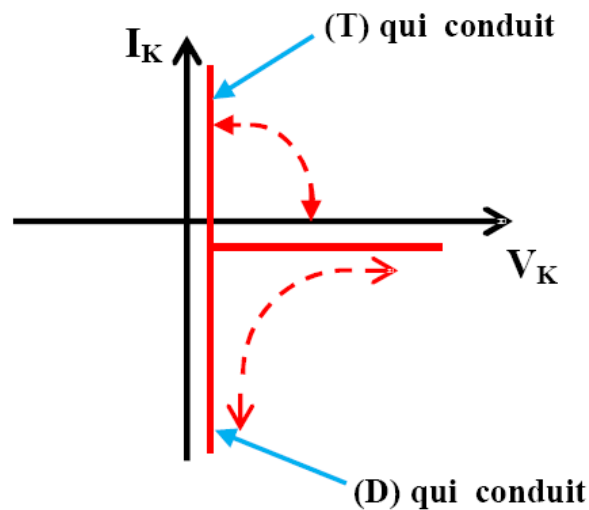


Figure (III-24) : caractéristiques statiques de l'interrupteur bidirectionnel en courant.

On définit deux états stables pour l'interrupteur (K) :

- (1) pour l'état fermé de l'interrupteur (K).
- (0) pour l'état ouvert de l'interrupteur (K).

### III-4-1-3-Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur du type NPC, on étudie le comportement d'un seul bras, [48].

La tension polaire VAM entre la borne A de la charge et le point neutre M est entièrement défini par l'état des quatre interrupteurs bidirectionnels en courant (K) du bras d'onduleur, cette tension doit prendre les trois potentiels  $(-v_{dc}, 0, +v_{dc})$  d'où l'appellation onduleur triphasé à trois niveaux.

### III-4-1-4-Commandabilité d'un bras d'onduleur

Afin d'avoir un fonctionnement totalement commandables qui permet à l'onduleur de délivrer les trois niveaux de tensions désirés. On doit le faire fonctionner en son mode commandables.

C'est-à-dire les transitions entre ses différentes configurations dépendant uniquement de la commande externe des transistors, [33].

Trois commandes complémentaires peuvent être appliquées sur un bras :

$$\begin{cases} S_{k1} = \bar{S}_{k2} \\ S_{k3} = \bar{S}_{k4} \end{cases} \quad \begin{cases} S_{k1} = \bar{S}_{k3} \\ S_{k2} = \bar{S}_{k4} \end{cases} \quad \begin{cases} S_{k1} = \bar{S}_{k4} \\ S_{k2} = \bar{S}_{k3} \end{cases} \quad (\text{III-35})$$

Cette dernière est la seule qui donne les trois niveaux de tensions  $v_{dc}$ ,  $0$ ,  $-v_{dc}$  donc qui permet le fonctionnement en mode commandables.

#### III-4-1-5-Les différentes configurations électriques d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Vu la symétrie de la structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux, la modélisation de ce dernier se fait par bras figure (III-25) :

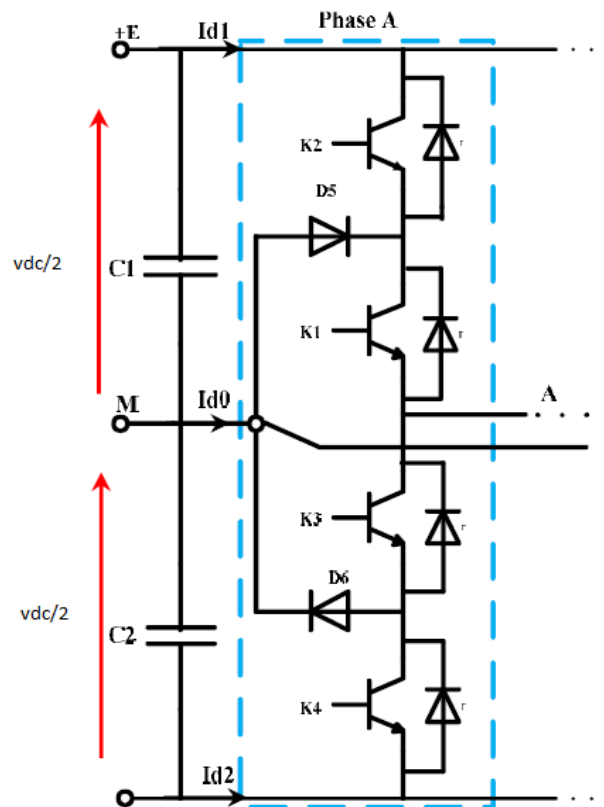


Figure (III-25) : Bras d'onduleur à trois niveaux.

Le sens positif ou négatif des courants  $I_{d0}$ ,  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le

courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant.

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont représentées dans le tableau (III-4). (Avec M origine des potentiels et  $V_k$  le potentiel du nœud K du bras i).

Avec  $i = 1, 2, 3$

Configuration	$V_k$
$E_0$	Dépend de la charge
$E_1$	$V_k = V_{dc}$
$E_2$	<b>0</b>
$E_3$	$V_k = -V_{dc}$
$E_4$	<b>0</b>

**Tableau (III-4) :** Grandeurs connues pour chacune des configurations d'un bras k d'onduleur triphasé à trois niveaux.

Les configurations possibles d'un seul bras de 4 interrupteurs sont de  $2^4 = 16$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1 suivant l'état des interrupteurs  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$ .

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux montre qu'il existe cinq configurations possibles en mode commandables, la figure (III-23) représente Les différentes configurations électriques possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux, [33].

- **Configuration E0 :**  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (0 0 0 0)$

Les interrupteurs  $(K_1, K_2)$  et  $(K_3, K_4)$  sont bloqués et la tension de sortie  $a_o$  est imposé par la charge, cette configuration indésirable pour la commande de l'onduleur.

- **Configuration E1** :  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (1\ 1\ 0\ 0)$

Les interrupteurs  $(K_1, K_2)$  sont passants et  $(K_3, K_4)$  sont bloqués et la tension de sortie :  $V_{ao} = +v_{dc} = +v_{dc} / 2$ .

- **Configuration E2** :  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (1\ 0\ 0\ 0)$

L'interrupteur  $K_1$  est passant et  $(K_2, K_3, K_4)$  sont bloqués et la tension de sortie :  $V_{ao} = 0$ .

- **Configuration E3** :  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (0\ 0\ 1\ 1)$

Les interrupteurs  $(K_1, K_2)$  sont bloqués et  $(K_3, K_4)$  sont passants et la tension de sortie :  $V_{ao} = -v_{dc} = -v_{dc} / 2$ .

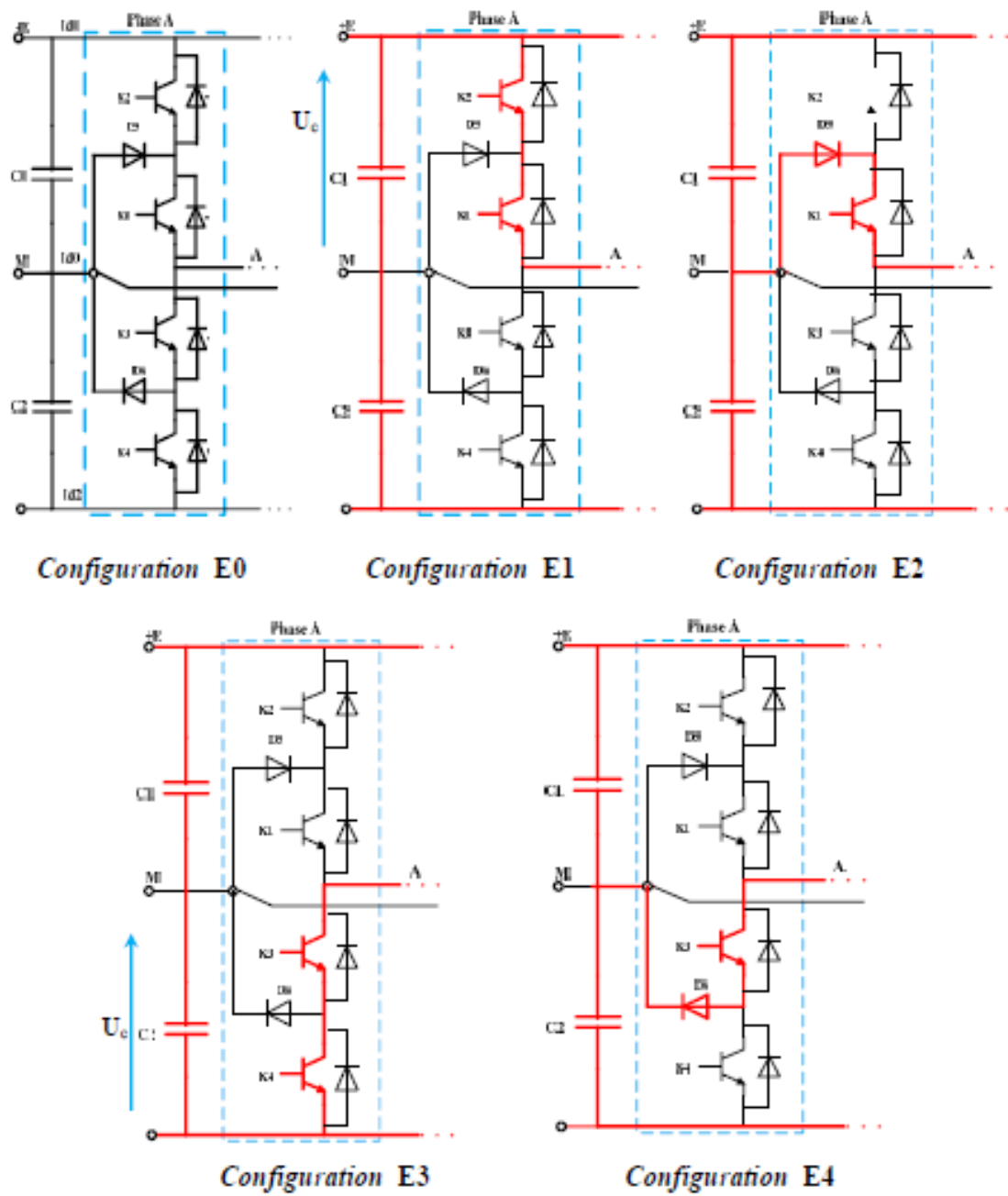
- **Configuration E4** :  $(S_{11} S_{12} S_{13} S_{14}) = (0\ 0\ 1\ 0)$

L'interrupteur  $K_3$  est passant et  $(K_2, K_1, K_4)$  sont bloqués et la tension de sortie :  $V_{ao} = 0$ .

En effet, elles provoquent, soient, des court-circuits des sources de tension continue :

- Court-circuit de  $v_{C1}$  et de  $v_{C2}$  avec les configurations [1111] et [1001].
- Court-circuit de  $v_{C1}$  avec les configurations [1110], [1000] et [1010].
- Court-circuit de  $v_{C2}$  avec les configurations [0111], [0001] et [0101].

Soient, elles provoquent la déconnexion de la charge pour la configuration [0000]. Soient encore, elles ne permettent pas d'assurer la connexion de la charge au point neutre pour les configurations [0100] et [0010].



**Figure (III-26) :** Les différentes configurations électriques possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux.

### III-4-1-6-Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouverts ou fermés. Chaque interrupteur  $K_{xi}$  est associé à une fonction de connexion  $S_{xi}$ , tel que :

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 \text{ si } K_{xi} \text{ fermé} \\ S_{xi} = 0 \text{ si } K_{xi} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{III-36})$$

Avec

- $i = 1, 2, 3, 4$  : numéro de l'interrupteur du bras x

### III-4-1-7-Commande complémentaire des interrupteurs

Afin d'éviter la destruction des composants soit par surintensité soit par surtension lors de la fermeture ou l'ouverture simultanées des quatre interrupteurs d'un seul bras, il est indispensable de prévoir une commande complémentaire entre les interrupteurs du même bras. Cette commande complémentaire est définie comme suit:

$$S_{x(j+2)} = \bar{S}_{xj} = 1 - S_{xj} \quad (\text{III-37})$$

Nous définissons pour chaque état h du bras x une fonction de connexion. Elle est notée,  $F_x^h$ , et s'exprime au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :



$$\begin{cases} F_x^2 = S_{x1} S_{x2} \\ F_x^1 = S_{x2} \bar{S}_{x1} \\ F_x^0 = \bar{S}_{x2} \bar{S}_{x1} \end{cases} \quad (\text{III-38})$$

### III-4-1-8-Tension de sortie

L'onduleur de tension à structure NPC délivre trois niveaux de tensions ( $v_c$ , 0,  $-v_c$ ), suivant les fonctions de connexion  $F_x^2$ ,  $F_x^1$ , et  $F_x^0$ , comme illustré dans l'équation (III-39).

$$v_{xo} = \begin{cases} v_c & \text{si } F_x^2 = 1 \\ 0 & \text{si } F_x^1 = 1 \\ -v_c & \text{si } F_x^0 = 1 \end{cases} \quad (\text{III-39})$$

L'équation (III-39) peut être exprimée par la forme suivante :

$$v_{xo} = v_{c0}(F_x^2 - F_x^0) \quad (\text{III-40})$$

Et pour les trois tensions phases-point milieu, et  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$ , et  $v_{co}$  on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = v_c \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (\text{III-41})$$

Les tensions composées  $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$ , et  $v_{ca}$ , et peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bo} - v_{co} \\ v_{co} - v_{ao} \end{bmatrix} = v_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (\text{III-42})$$

Les tensions simples aux bornes de la charge seront données, en fonction des tensions c imposées puis en fonction des tensions phases-point milieu, par:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{III-43})$$

A partir des relations (III-41) et (III-43), nous obtenons le système matriciel donnant l'expression des tensions simples aux bornes de la charge en fonction des fonctions de connexions.

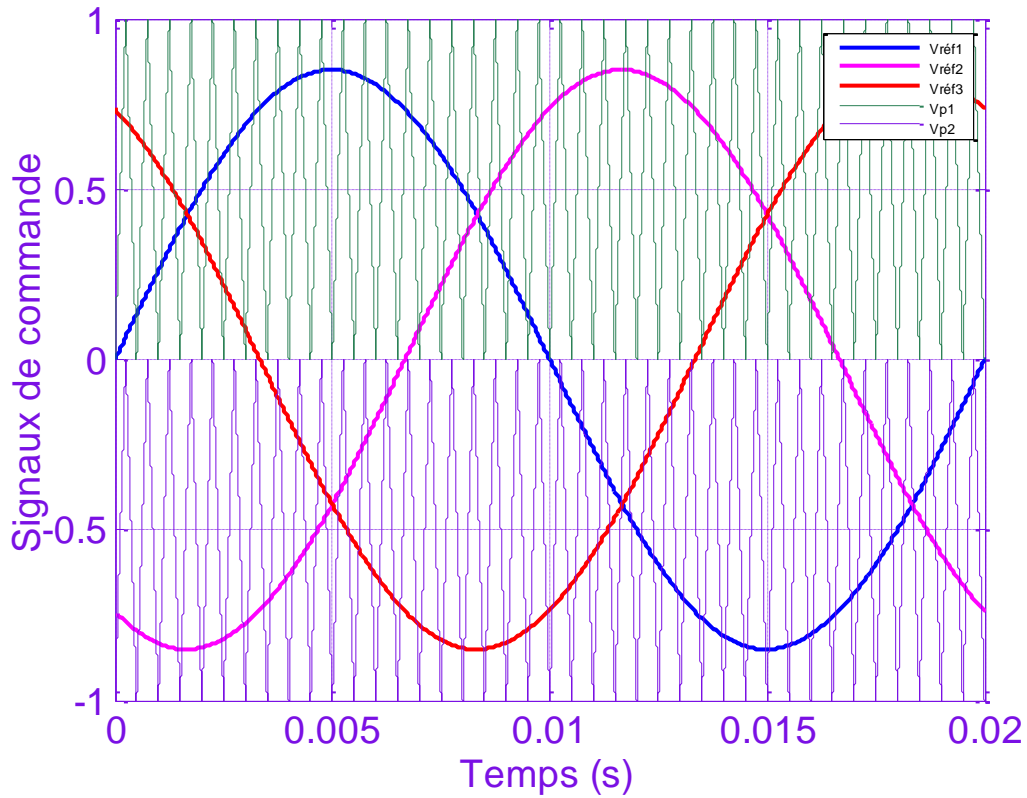
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{v_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (\text{III-44})$$

### III-4-2-Commande de l'onduleur à trois niveaux

#### III-4-2-1-MLI classique (PWM) sans injection de l'harmonique trois

##### III-4-2-1-1-La technique triangulo-sinusoidale à deux porteuses unipolaires triangulaires

Les signaux de commande d'un bras de l'onduleur sont déterminés par la comparaison de deux porteuses triangulaires et d'une référence sinusoidale figure (III-27).



**Figure (III-27) :** Principe de la commande SPWM avec deux porteuses unipolaires.

Les deux ondes porteuses sont définies par les équations suivantes :

$$U_{p1} = \begin{cases} 2U_{p \max} \frac{t}{T_p} ; \text{ pour } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_{p \max} \left( -\frac{t}{T_p} + 1 \right) ; \text{ pour } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{III-45})$$

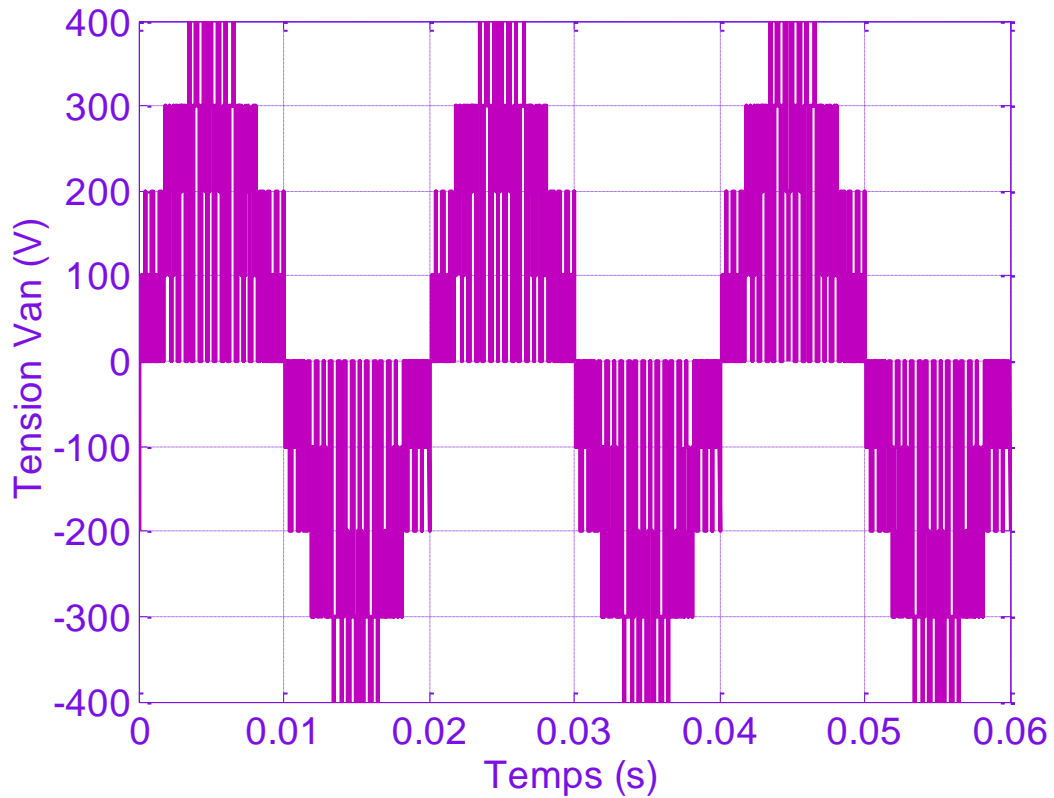
Et :

$$U_{p2} = U_{p1} - U_{p \max}$$

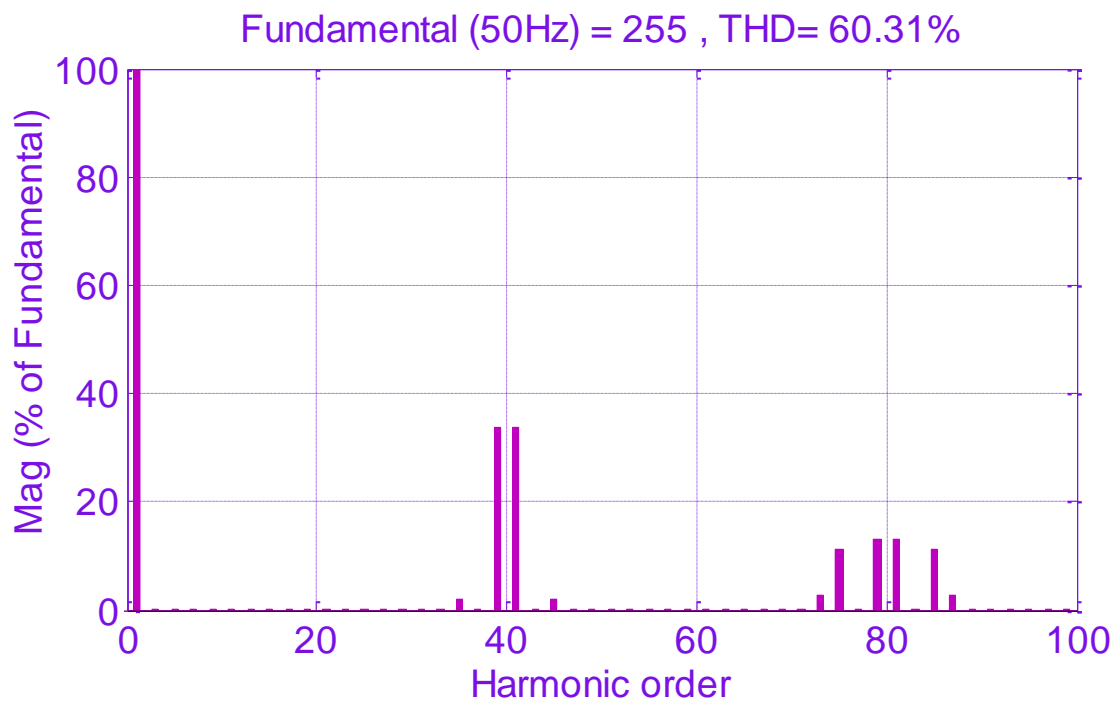
L'algorithme qui nous permet de réaliser cette technique de modulation est le suivant :

$$\begin{cases} \text{if } (V_{\text{réfk}} > U_p) \ \& \ (V_{\text{réfk}} > U_{p2}) \text{ then } S_{k1} = 1 \\ \text{else } S_{k1} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-46})$$

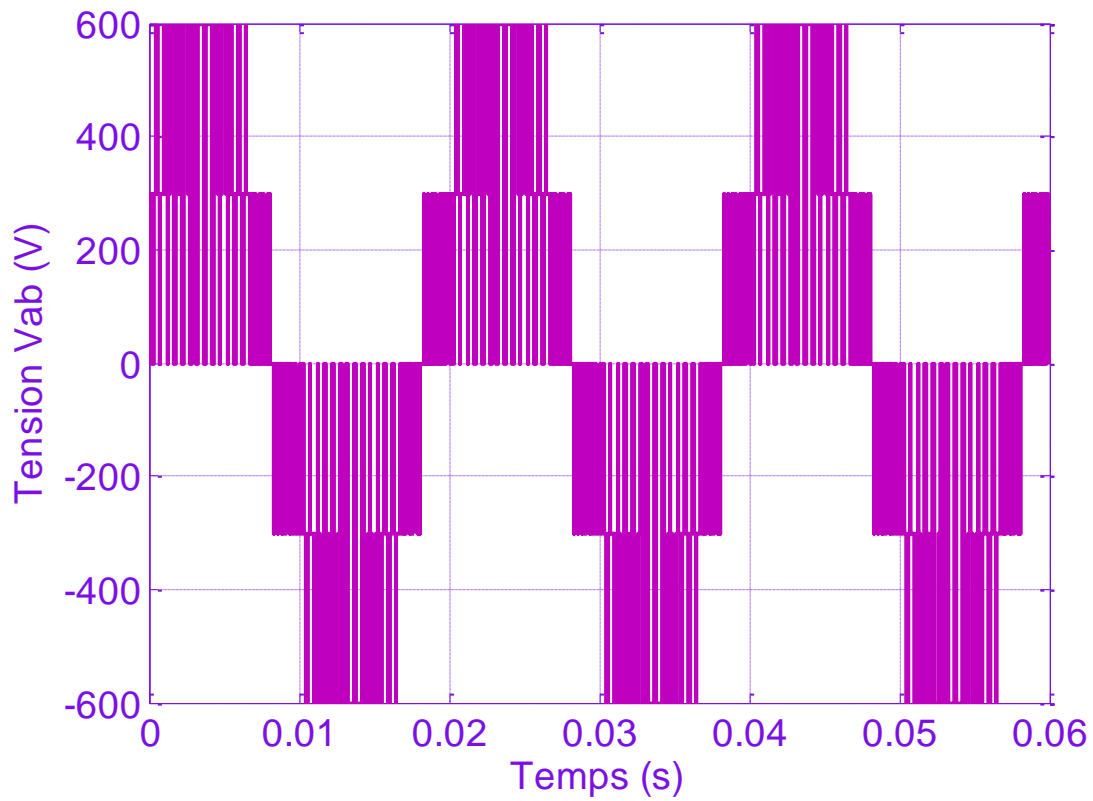
Avec :  $S_{k2} = \bar{S}_{k1}$



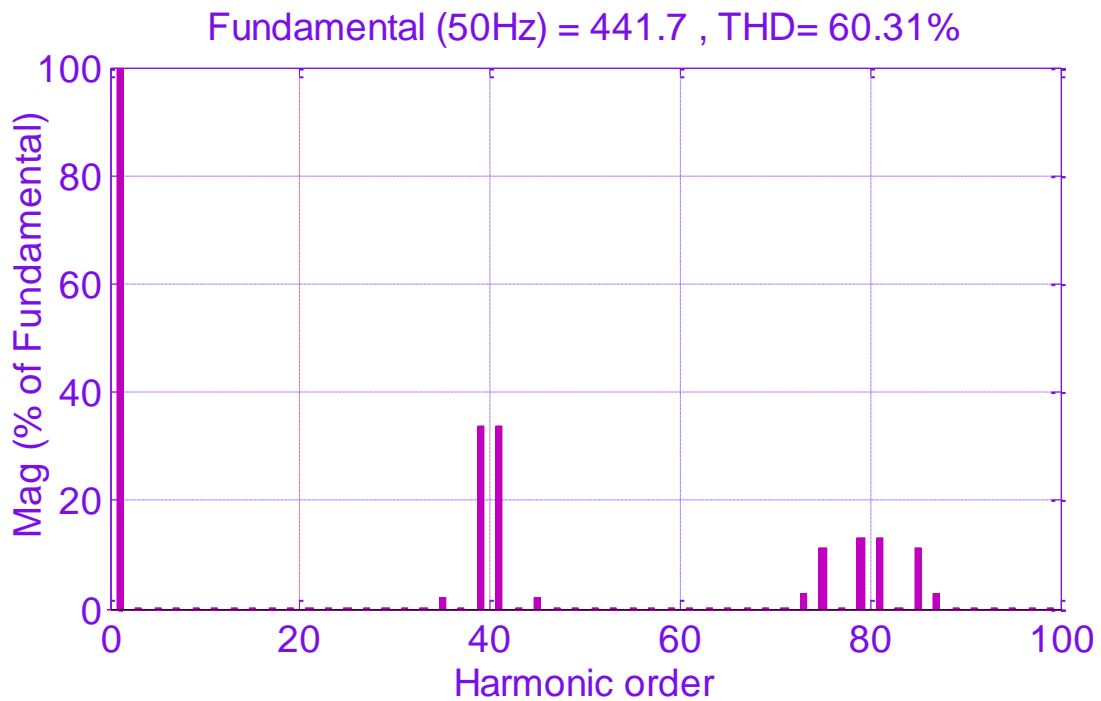
**Figure (III-28) :** Tension simple  $V_{an}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à deux porteuses unipolaire pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$ .



**Figure (III-29) :** Spectre harmonique de  $V_{an}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à deux porteuses pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$ .



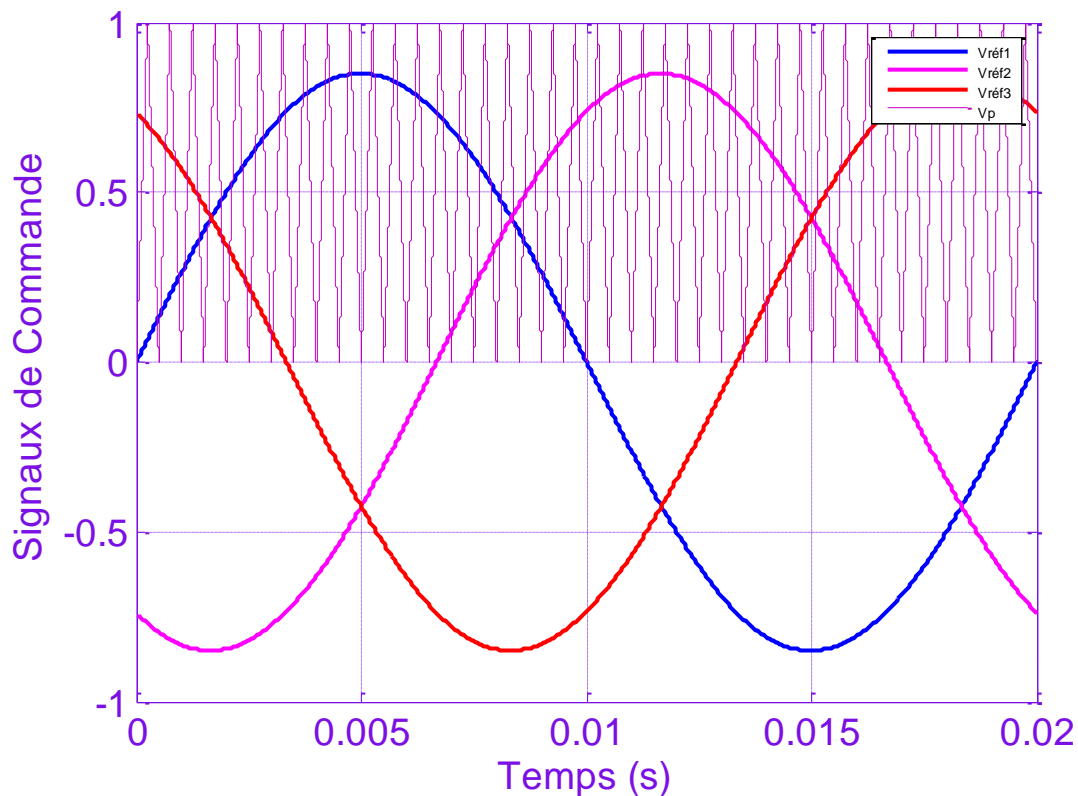
**Figure (III-30) :** Tension composée  $V_{ab}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à deux porteuses unipolaire pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$



**Figure (III-30) :** Spectre harmonique de  $V_{ab}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à deux porteuses pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$ .

### III-4-2-2-1-La stratégie triangulo-sinusoidale à une seule porteuse unipolaire

Pour déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on fait appel à l'électronique de commande analogique ou numérique ou les deux simultanément, [49]. Le principe consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire. D'où l'appellation triangulo-sinusoidale figure (III-31).



**Figure (III-31) :** Principe de la commande SPWM avec une seule porteuse unipolaire pour  $r=0.85$  et  $m=40$ .

La figure (III-31) montre la porteuse et les tensions de références pour  $r=0.85$  et  $m=40$ . L'onde porteuse est définie par les équations suivantes :

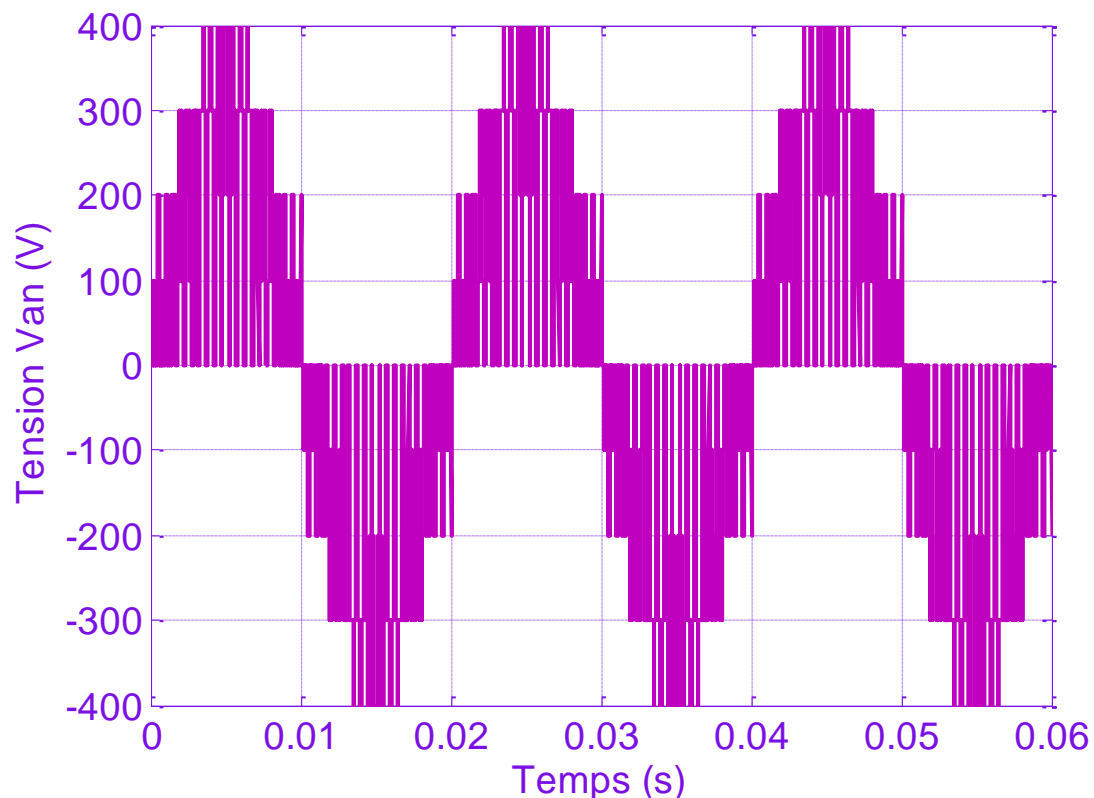
$$U_p = \begin{cases} 2U_{p \max} \frac{t}{T_p}; & \text{pour : } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_{p \max} \left(1 - \frac{t}{T_p}\right); & \text{pour : } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{III-47})$$

L'algorithme qui nous permet de réaliser cette technique de modulation pour les trois niveaux se résume pour un bras K (K=A, B, C) par le système d'équations (III-48), comme suit :

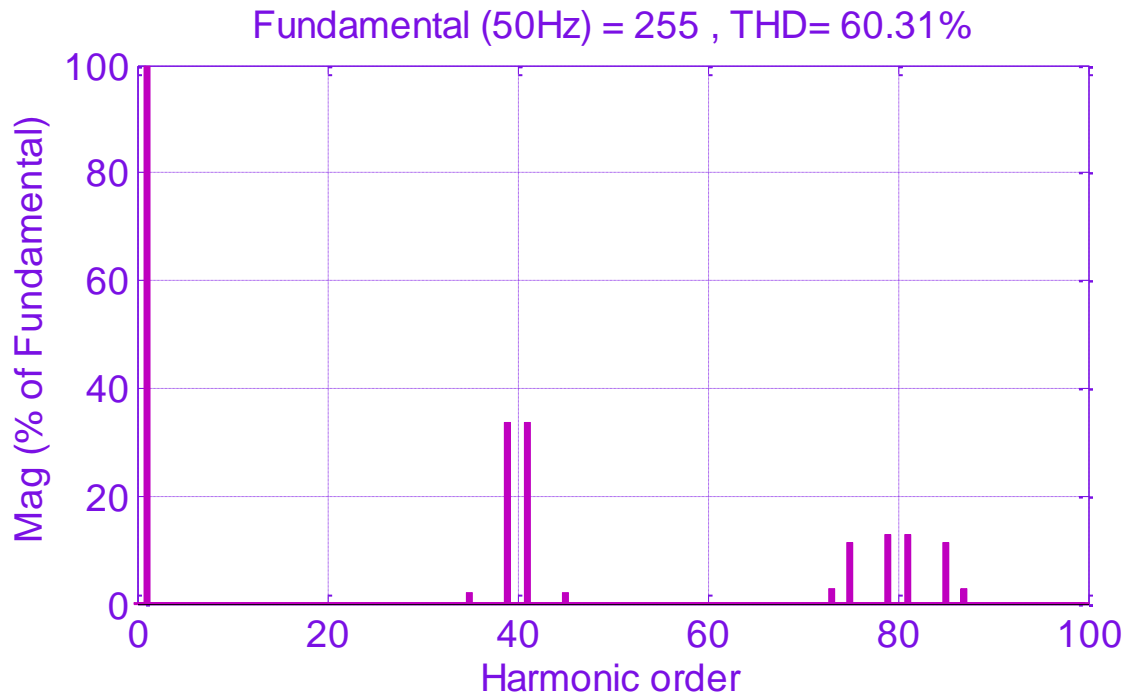
$$\begin{cases} \text{if}(V_{\text{réf } k} \leq U_p) & \text{then } S_{k1} = 1 \ \& \ S_{k2} = 0 \\ \text{if}(V_{\text{réf } k} > U_p) \ \& \ (V_{\text{réf } k} > 0) & \text{then } S_{k1} = 1 \ \& \ S_{k2} = 1 \\ \text{if}(V_{\text{réf } k} > U_p) \ \& \ (V_{\text{réf } k} < 0) & \text{then } S_{k1} = 0 \ \& \ S_{k2} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-48})$$

Avec :

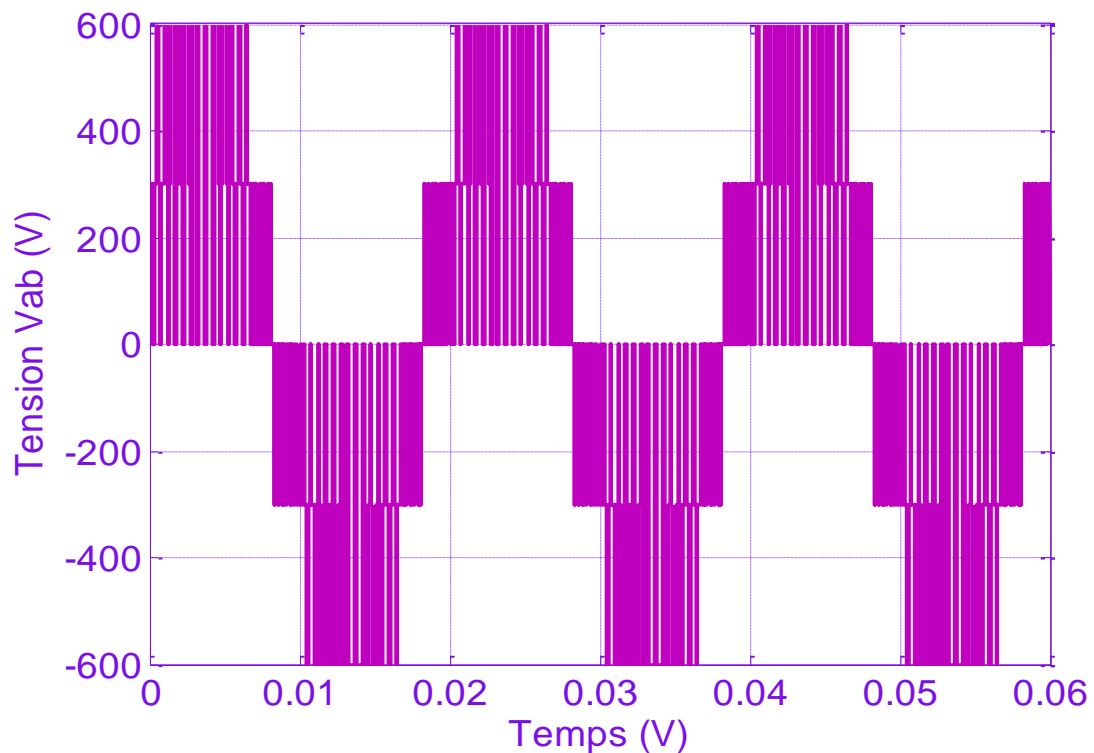
$$\begin{cases} S_{k3} = \bar{S}_{k2} \\ S_{k4} = \bar{S}_{k1} \end{cases} \quad (\text{III-49})$$



**Figure (III-32) :** Tension simple  $V_{an}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à une seule porteuse unipolaire pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$

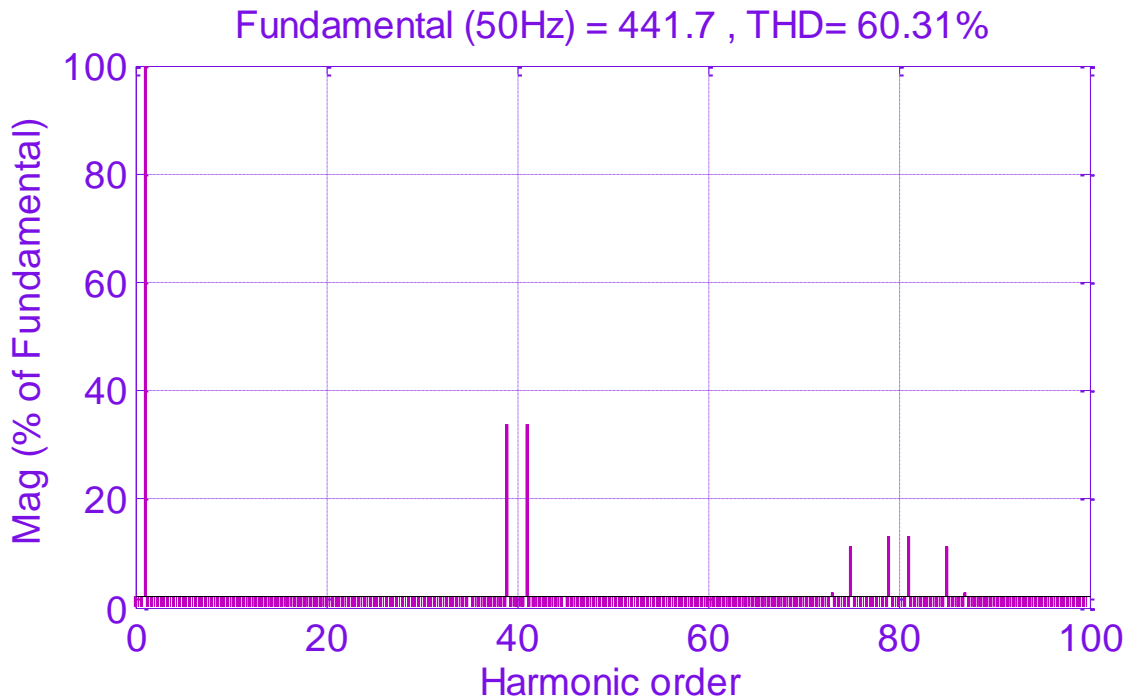


**Figure (III-33) :** Spectre harmonique de  $V_{an}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à une seule porteuse unipolaire pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$



**Figure (III-34) :** Tension composée  $V_{ab}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à une seule porteuse unipolaire pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$





**Figure (III-35) :** Spectre harmonique de  $V_{ab}$  d'un onduleur à trois niveaux à MLI à une seule porteuses unipolaire pour  $r = 0.85$  et  $m = 40$

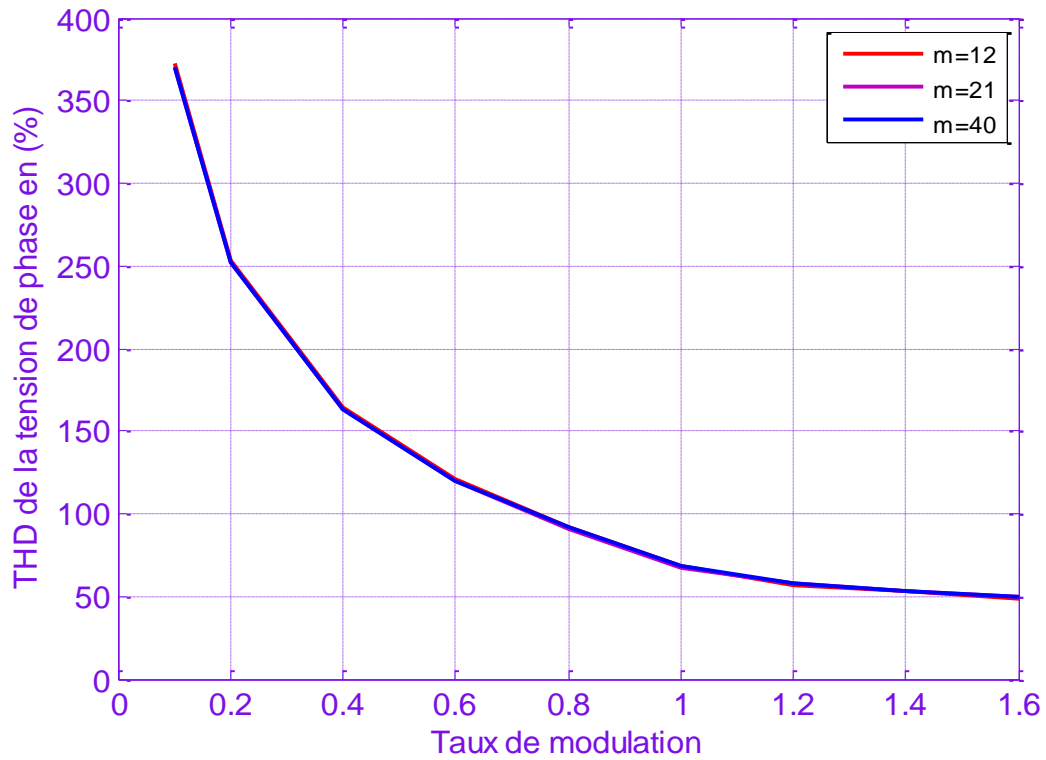
### III-5-Taux de distorsion harmonique

Le taux de distorsion harmonique (Total Harmonic Distorsion : THD) est une mesure qui permet de déterminer l'altération d'un signal par rapport à un signal purement sinusoïdal. Le THD est défini comme suit, [50] :

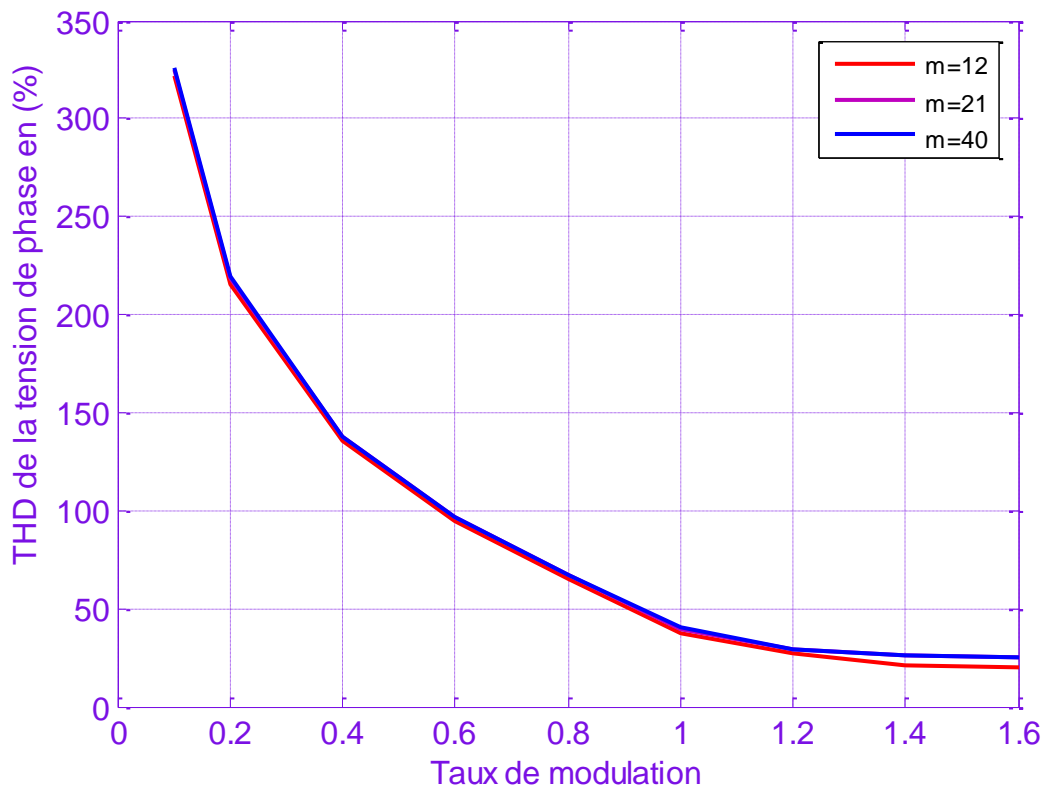
$$\text{THD \%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_f} \times 100 \quad (\text{III-50})$$

Avec :

- $V_f$  : est la valeur efficace du fondamental.
- $V_h$  : est la valeur efficace de l'harmonique d'ordre  $h$ .
- $N$  : est le nombre d'harmoniques retenues. Dans cette étude  $N$  est fixé à 100.

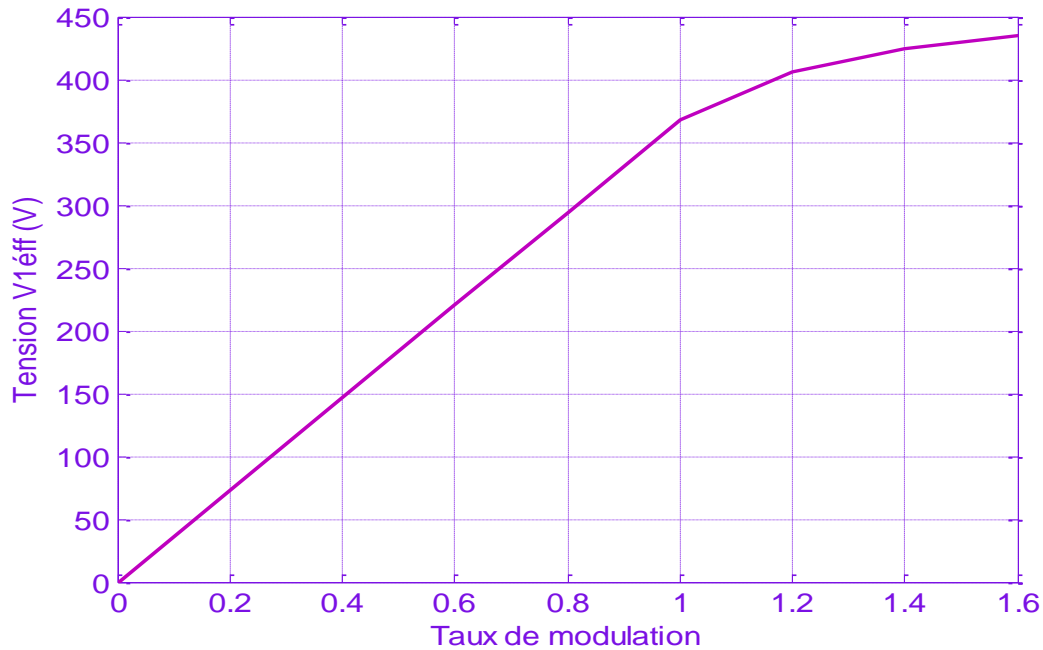


**Figure (III-36) :** Taux de distorsion harmonique de la tension de phase. Onduleur à deux niveaux.

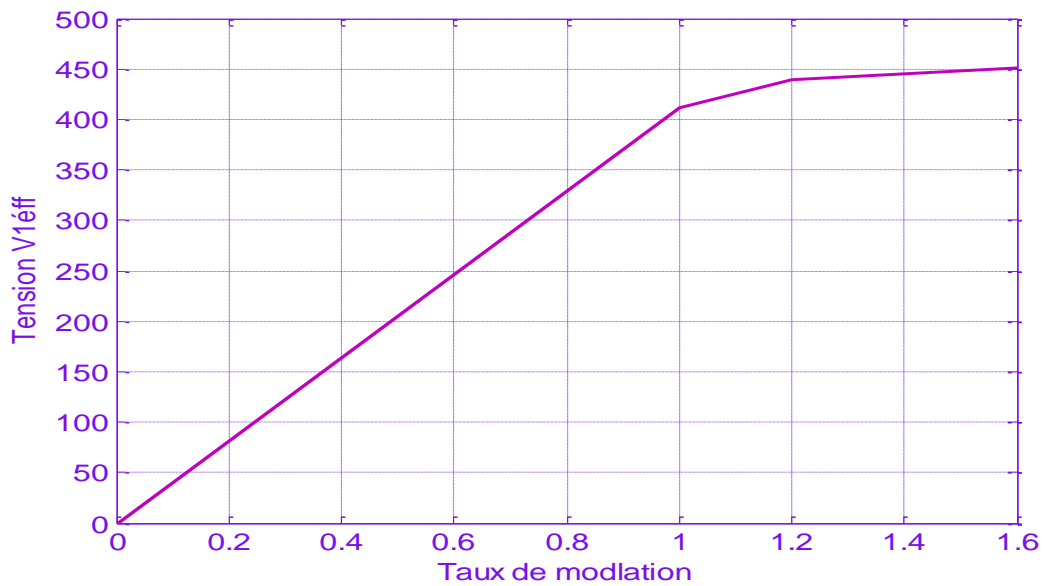


**Figure (III-37) :** Taux de distorsion harmonique de la tension de phase. Onduleur à trois niveaux.

L'augmentation de l'indice de modulation permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées. Cependant, les figures (III-36) et (III-37) montrent que cette augmentation n'altère pas le taux de distorsion harmonique qui diminue plutôt en fonction de l'augmentation du taux de modulation.

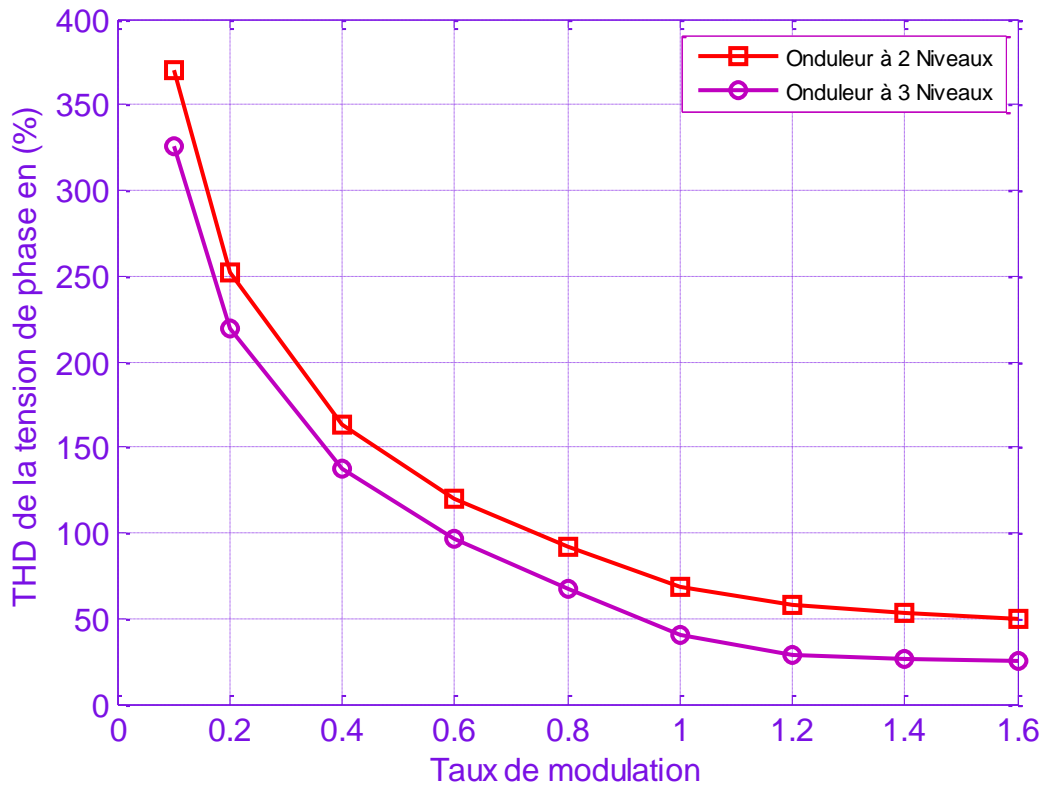


**Figure (III-38) :** Caractéristique de réglage pour  $m=40$ , onduleur à deux niveaux sans injection de l'harmonique trois.



**Figure (III-39) :** Caractéristique de réglage pour  $m=40$ , onduleur à trois niveaux sans injection de l'harmonique trois.

A partir des figures (III-38) et (III-39), il est possible de déduire que le taux de modulation permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental dans l'intervalle  $r \in [0, 1]$ .



**Figure (III-40) :** Taux de distorsion harmonique de la tension simple pour  $m=40$ , sans injection de l'harmonique trois.

Les figures (III-40), présentent une étude comparative entre les taux de distorsion harmonique des deux onduleurs. Nous constatons que le contenu harmonique des formes d'onde à trois niveaux est bien inférieur à celui des formes d'onde à deux niveaux. Ainsi, l'utilisation des onduleurs à trois niveaux pour l'application à l'UPFC semble une solution assez intéressante. Cette figure montrent que :

- L'augmentation du taux de modulation ( $r = 0 \dots 1.2$ ) permet de diminuer le THD.
- L'augmentation du taux de modulation  $r$  permet d'augmenter le nombre des harmoniques dans une famille et en même temps de diminuer l'amplitude de ces derniers.

- La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamental ne dépend pas de la variation de l'indice de modulation  $m$ .

Pour montrer l'utilité de l'onduleur à trois niveaux adopté par rapport à l'onduleur conventionnel à deux niveaux, nous simulons le fonctionnement des deux onduleurs dans les mêmes conditions en termes de tension continue et de fréquence.

### III-6-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation des onduleurs de tension triphasés à deux niveau et à trois niveaux de type NPC, ainsi que les différents techniques de modulation (MLI classique et MLI vectorielle).

La modulation sinusoïdale adoptée pour la commande de l'onduleur, en plus du réglage de la tension, elle contrôle le contenu harmonique de la tension de sortie en repoussant les harmoniques d'ordre supérieur vers les fréquences les plus élevées. De ce fait, le filtrage de la tension devient plus facile et moins coûteux, car la taille des composants du filtre est réduite. Cependant, notant que la technique de modulation de largeurs d'impulsions a des limites par rapport à la fréquence de commutation propre des composants à semi-conducteurs.

Plus cette fréquence est élevée, plus le sont aussi les pertes dues à la commutation des interrupteurs.

Les performances de l'onduleur à trois niveaux ont démontré un gain substantiel par rapport à l'utilisation de l'onduleur à deux niveaux. Ces performances concernent en particulier la réduction du taux d'harmonique et la réduction des contraintes de tension aux niveaux des interrupteur semi-conducteurs.

*« Aime la vie intensément et tu n'auras plus de temps pour la haine, le regret  
ou la peur »*

*Karen Salmansohn*

## *Chapitre IV*

**Résultats de simulation  
de l'UPFC,  
associé à un  
réseau électrique de  
400 KV**

## Chapitre 4

### *Résultats de simulation de l'UPFC, associé à un réseau électrique de 400 KV*

#### IV-1-Introduction

Ce chapitre comprend deux parties essentielles :

- La première partie est consacré à l'impact du STATCOM sur le contrôle de tension de la ligne et de la compensation de la puissance réactive de cette dernière.
- La seconde partie montre la possibilité de contrôler la capacité de transit des puissances de la ligne par l'utilisation du SSSC.

Après avoir présenté dans le deuxième chapitre le principe de fonctionnement et la structure de base d'un réseau de transport d'énergie électrique équipé d'un UPFC, on a traité sa conception et le modèle mathématique qui traduit son comportement, on a vu également la synthèse des lois de commande qui régissent le contrôle du système.

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons le réseau étudié, qui est un réseau de transport de 400 KV, associé à un UPFC, on montrera le fonctionnement transitoire des systèmes de commande à l'aide de simulations qu'on va effectuer sous l'environnement simpower/MATLAB, des résultats de simulations seront illustrés et commentés.



IV-2-Description du réseau étudié

Le schéma unifilaire du réseau simple de transport d'énergie électrique utilisé pour valider le fonctionnement du STATCOM est représenté par la figure (IV-1).

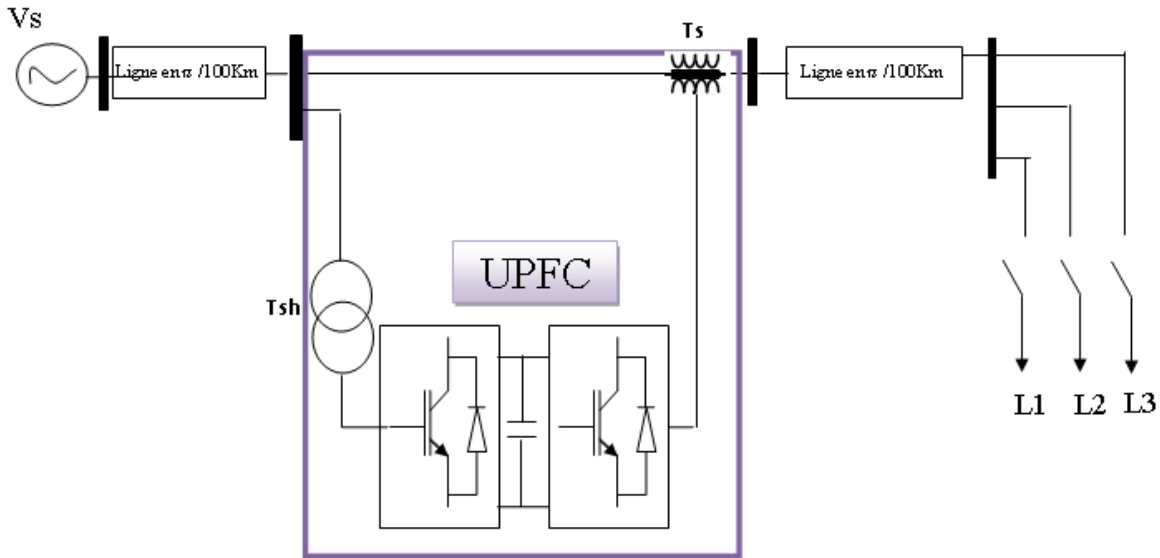


Figure (IV-1) : Schéma unifilaire du réseau étudié.

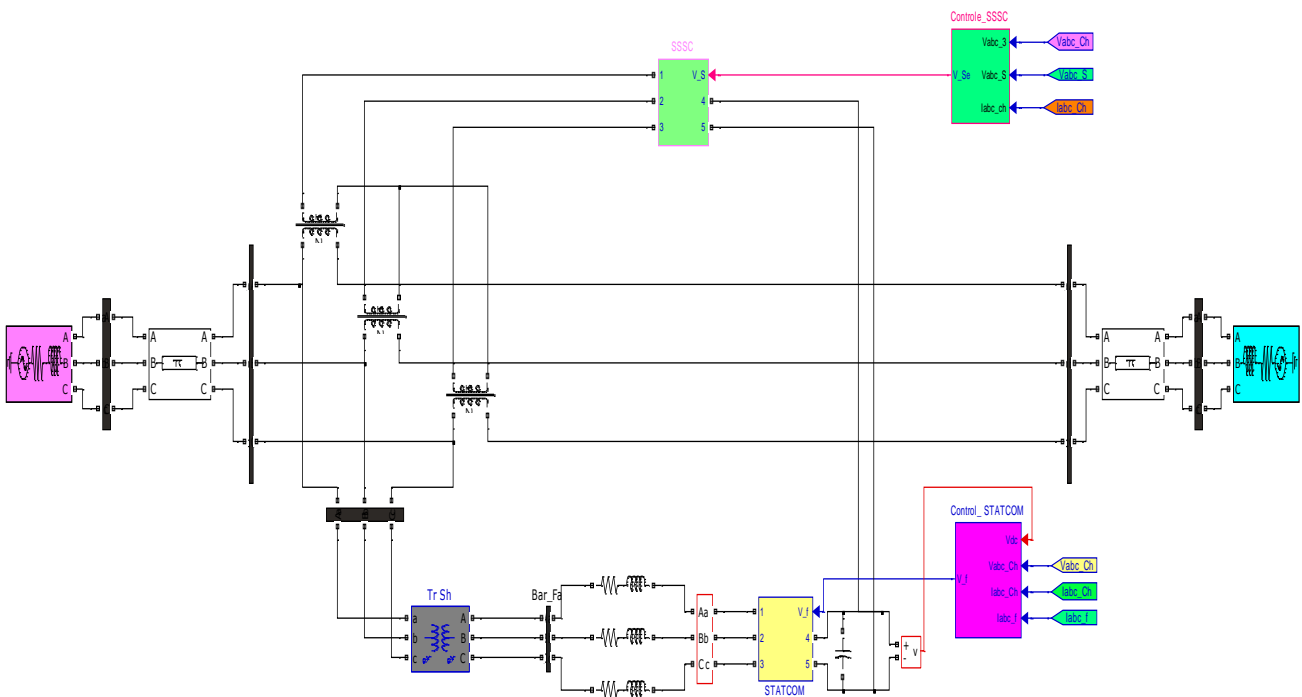


Figure (IV-2) : Schéma global du système : Réseau électrique –UPFC.

Le réseau est constitué d'un générateur de 400 KV avec une puissance nominale de 3000MVA, connecté au réseau infini par le transformateur T et d'une ligne de transmission de 500Km modalisée en  $\pi$  pour chaque 100Km.

Le transformateur Tsh sert à baisser la tension de réseau (400 KV) à 34 KV (tension d'entrée du convertisseur shunt STATCOM). Tse sert d'une part à isoler le convertisseur série SSSC à la tension du réseau (400 KV) et d'autre part à adapter la tension de sortie de ce convertisseur (20 KV) à la tension à injectée en série.

La fonction de transfert des courants avec un régulateur PI sera de celle de l'équation suivante:

$$F(s) = \frac{I_d}{I_d^*} = \frac{I_q}{I_q^*} = \left( K_P + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{s + \frac{R_{sh}\omega}{X_{sh}}} \quad (IV-1)$$

Les coefficients des régulateurs calculés avec compensation des pôles et en prenant le temps de réponse en boucle fermé  $TBF=1/3*TBO$  seront donnés comme suit:

$$K_i = \frac{R_{sh}\omega}{X_{sh}} K_p \quad (IV-2)$$

Nous allons calculer les coefficients du régulateur pour chaque partie de l'UPFC dans les sections suivantes.

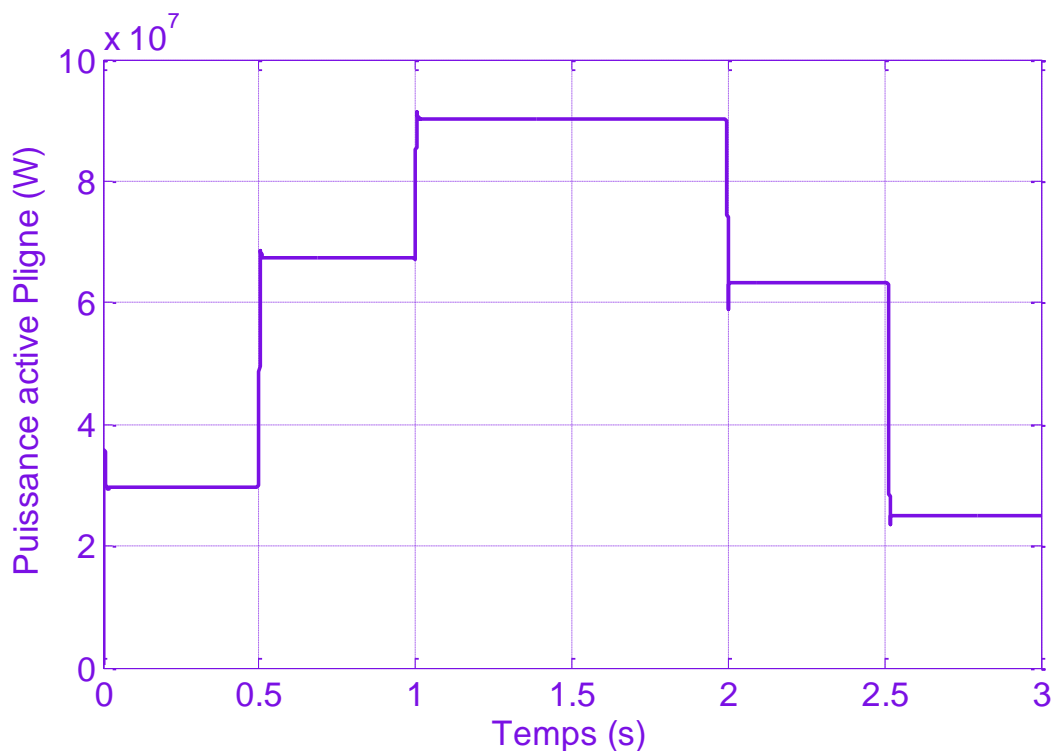
### IV-3-Simulation du réseau électrique sans compensation

Dans cette partie, on va présenter le comportement du réseau électrique, sans système de compensation, pour différents points de fonctionnement, relatifs à différentes valeurs des puissances active et réactive transmises :

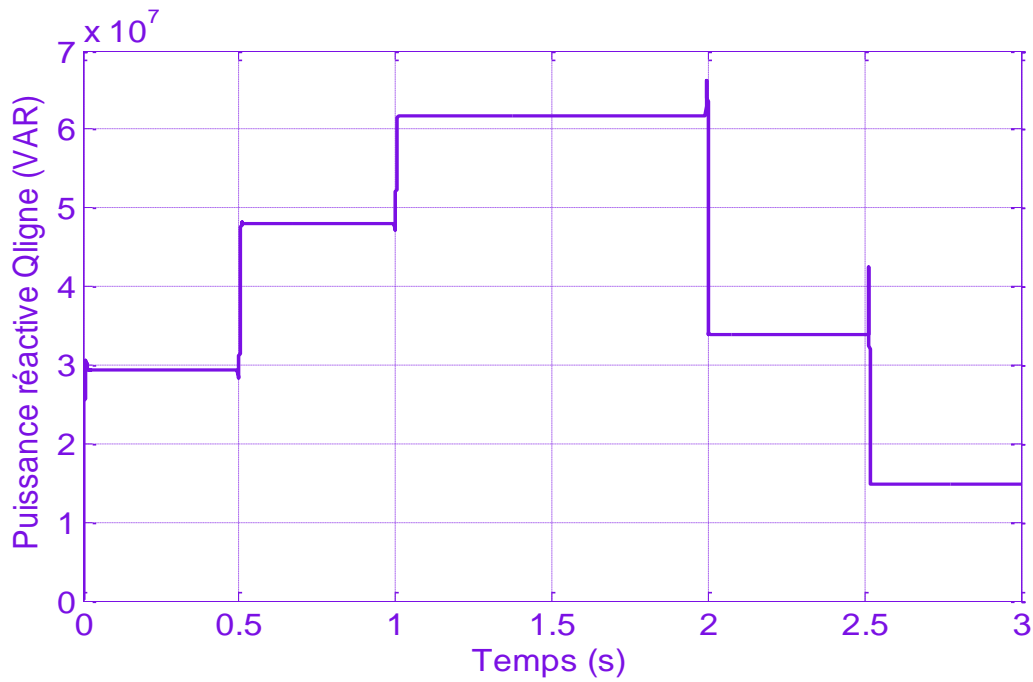
- à  $t = 0s$  ; on applique une charge de (30MW, 30MVAR).
- à  $t = 0.5s$  ; on augmente la charge à (70MW, 50MVAR).
- à  $t = 1.5s$  ; on augment encore la charge à (95MW, 65MVAR).
- à  $t = 2s$  ; on réduit la charge à (65MW, 30MVAR).
- Et enfin à  $t = 2.5s$  ; on réduit la charge à (25MW, 15MVAR).

L'objectif de cette partie est de montrer la nécessité d'un dispositif de compensation.

Pour ce la on va montrer des résultats de simulations et spécialement : les puissances active et réactive transmises par la ligne, les courants de ligne et les tensions de lignes.

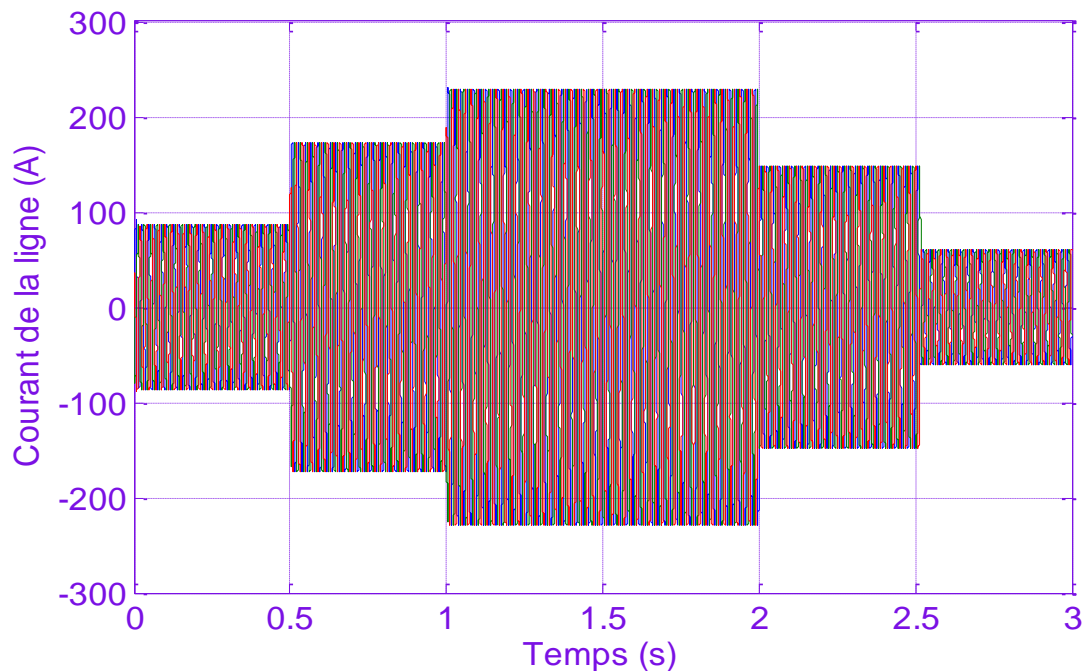


**Figure (IV-3) :** Puissance active de la ligne sans compensation.



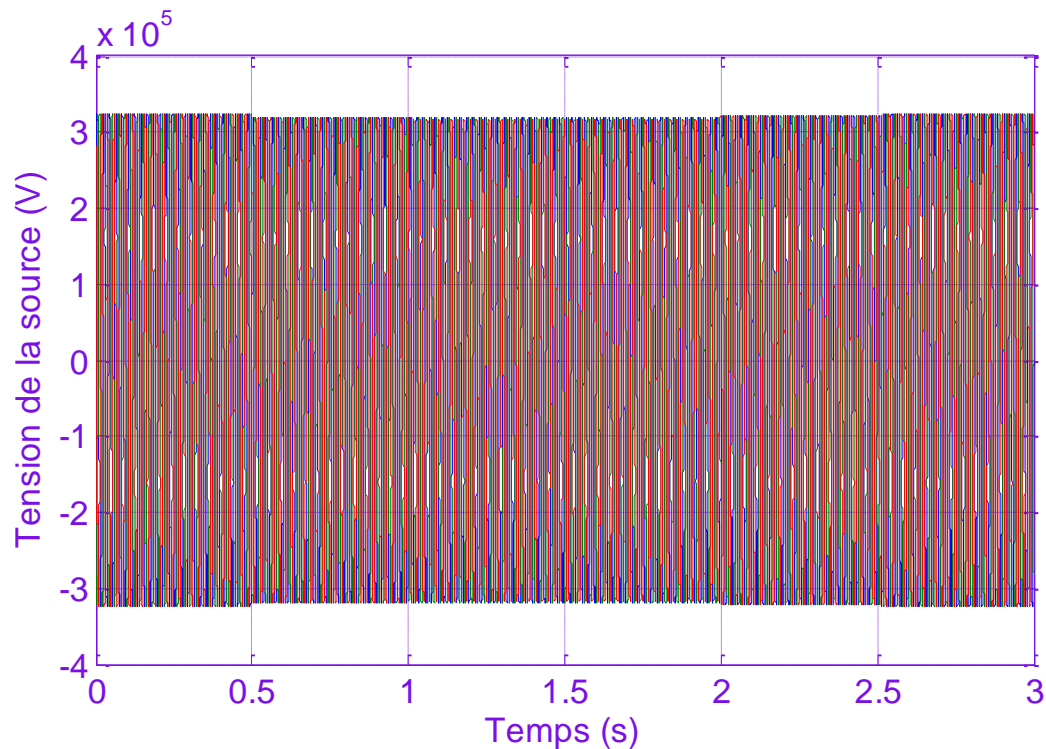
**Figure (IV-4) :** Puissance réactive de la ligne sans compensation.

La figure (IV-4), montre les fluctuations de la puissance réactive transmise par la ligne, ce qui se traduit par un facteur de puissance non unitaire et par conséquent : la chute de tension et la réduction de la capacité de transit des lignes.



**Figure (IV-5) :** Courant de la ligne.

La figure (IV-5) ; montre que les courants suivant le profil de la puissance active.



**Figure (IV-6) :** Tension de la source..

Par contre la figure (IV-6) ; montre les fluctuations de la tension de la ligne et spécialement les chutes de tension, ce qui oblige la société d'exploitation du réseau électrique à utiliser un système de compensation pour :

- Maintenir une tension réseau constante.
- Fonctionner avec un facteur de puissance unitaire.
- Augmenter la capacité de transit de la ligne.

#### **IV-4-Impact du STATCOM sur le contrôle du réseau électrique**

Dans cette partie on va montrer l'importance du STATCOM, pour le contrôle de la tension et la compensation de la puissance réactive des lignes.

Pour cela, on va étudier les résultats de simulation des deux structures :

- STATCOM avec onduleur à deux niveaux.
- STATCOM avec onduleur à trois niveaux du type NPC.

#### IV-4-1-Un onduleur classique à deux niveaux

Pour les mêmes variations des puissances actives, décrite au paravent (IV-5), on va analyser l'impact du STATCOM sur le contrôle du réseau électrique et spécialement :

- La compensation de la puissance réactive.
- Et le contrôle de la tension des lignes.

##### IV-4-1-1-Les caractéristiques de la ligne

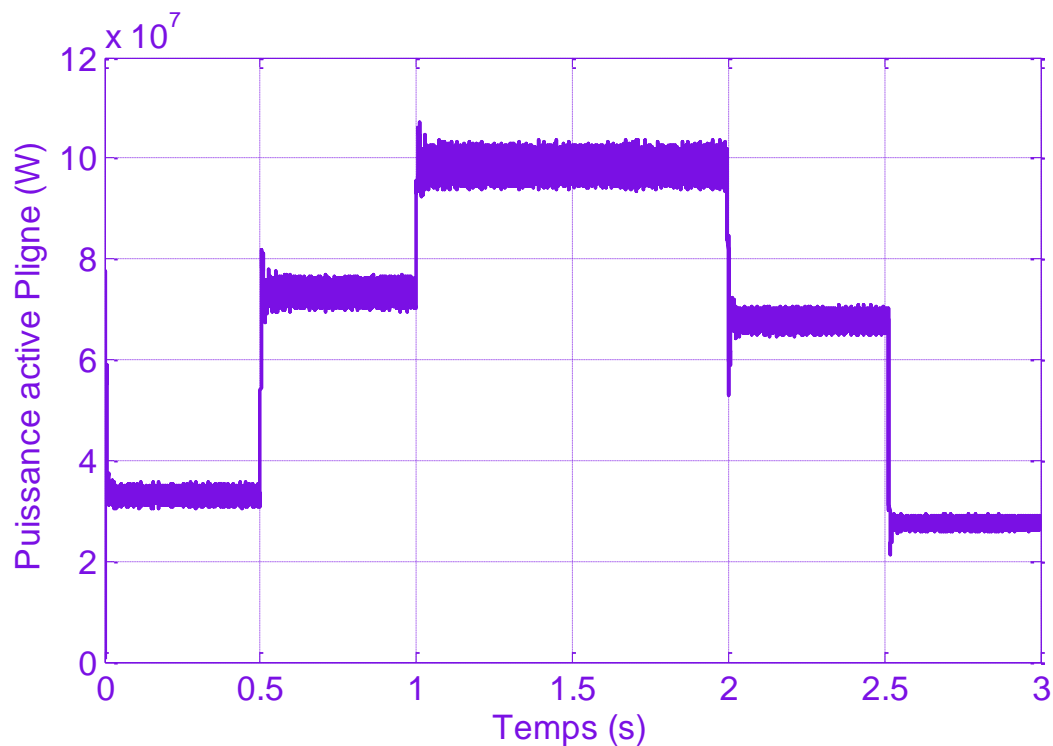
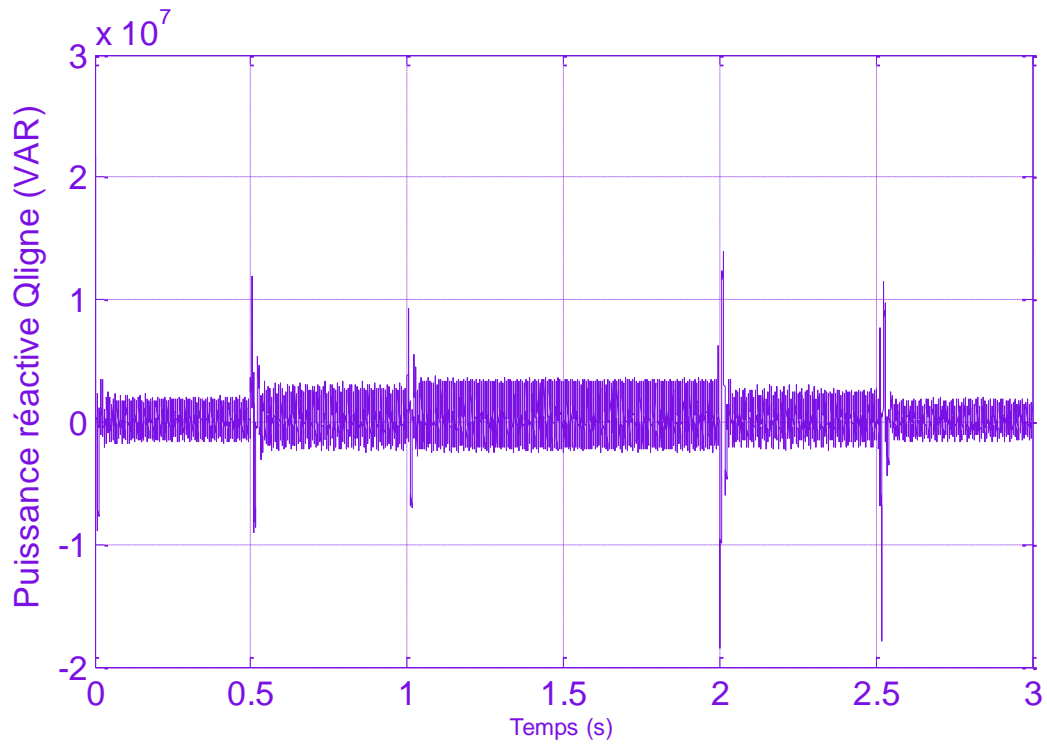
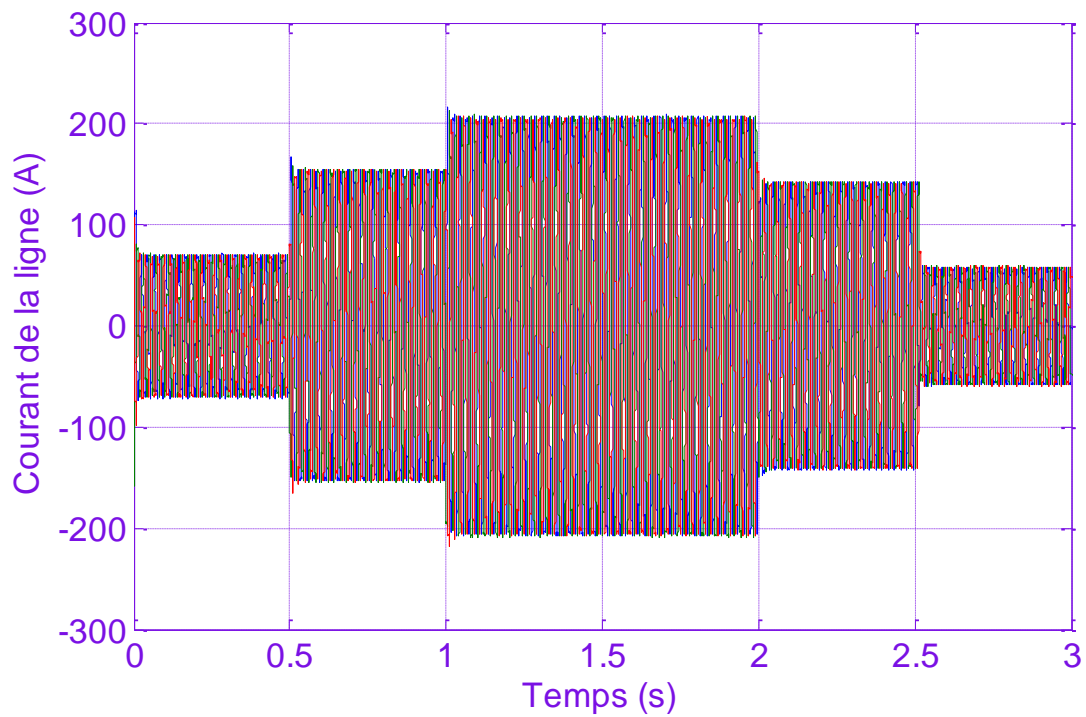


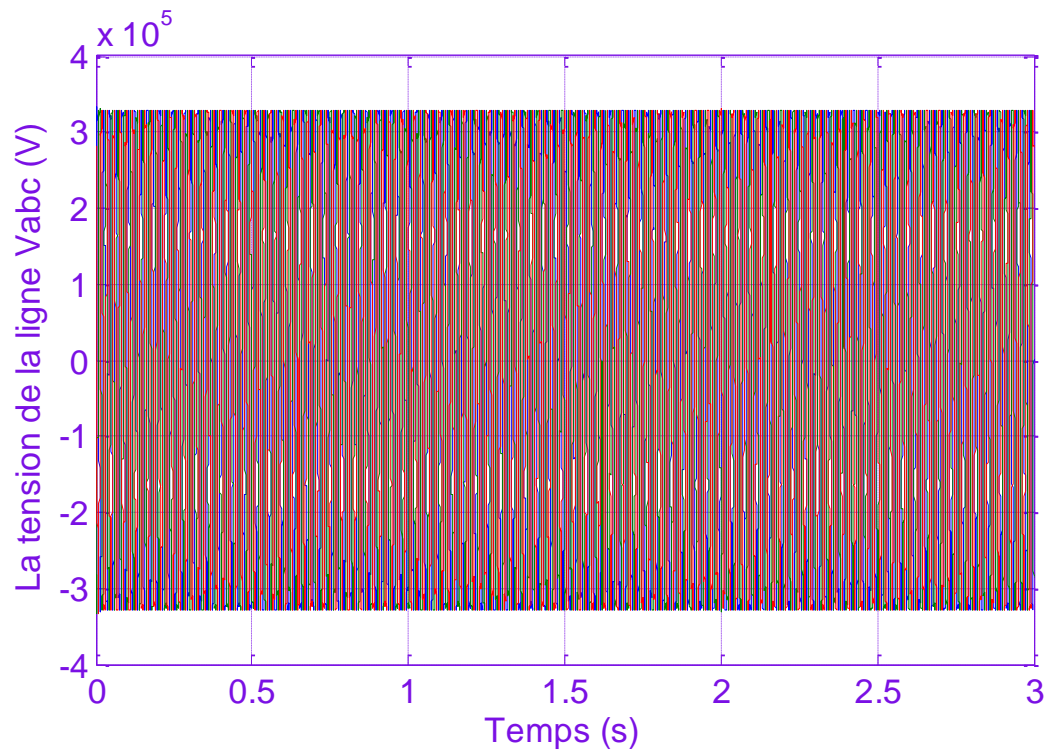
Figure (IV-7) : Puissance active de la ligne.



**Figure (IV-8) :** Puissance réactive de la ligne.



**Figure (IV-9) :** Courant triphasé de la ligne.



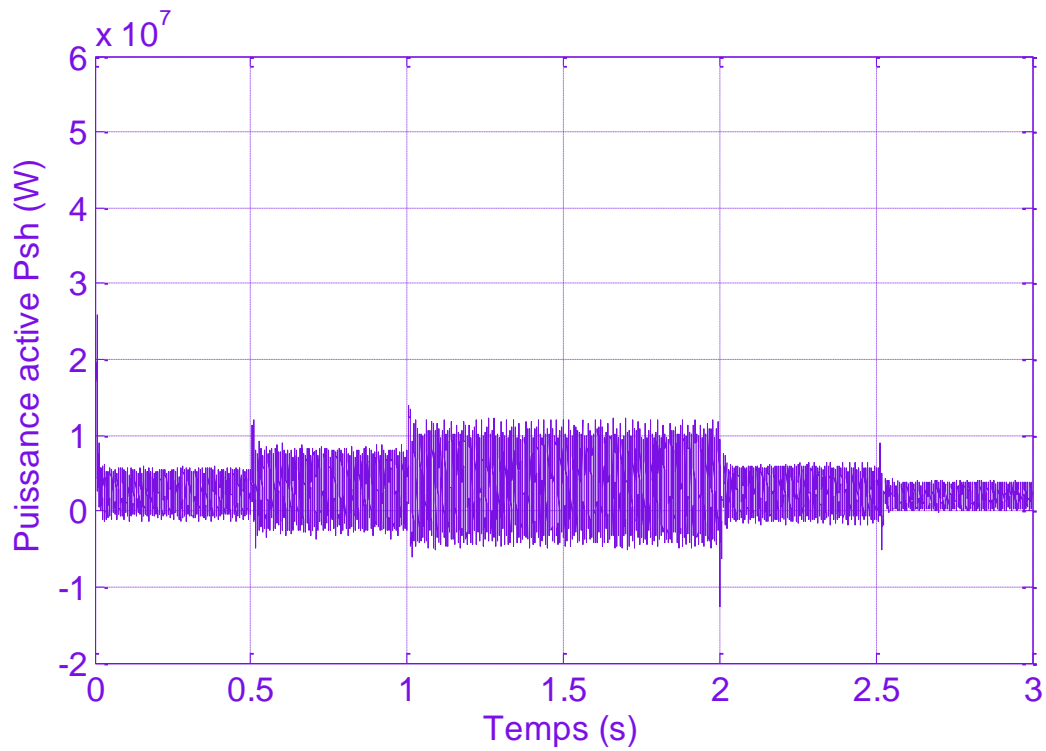
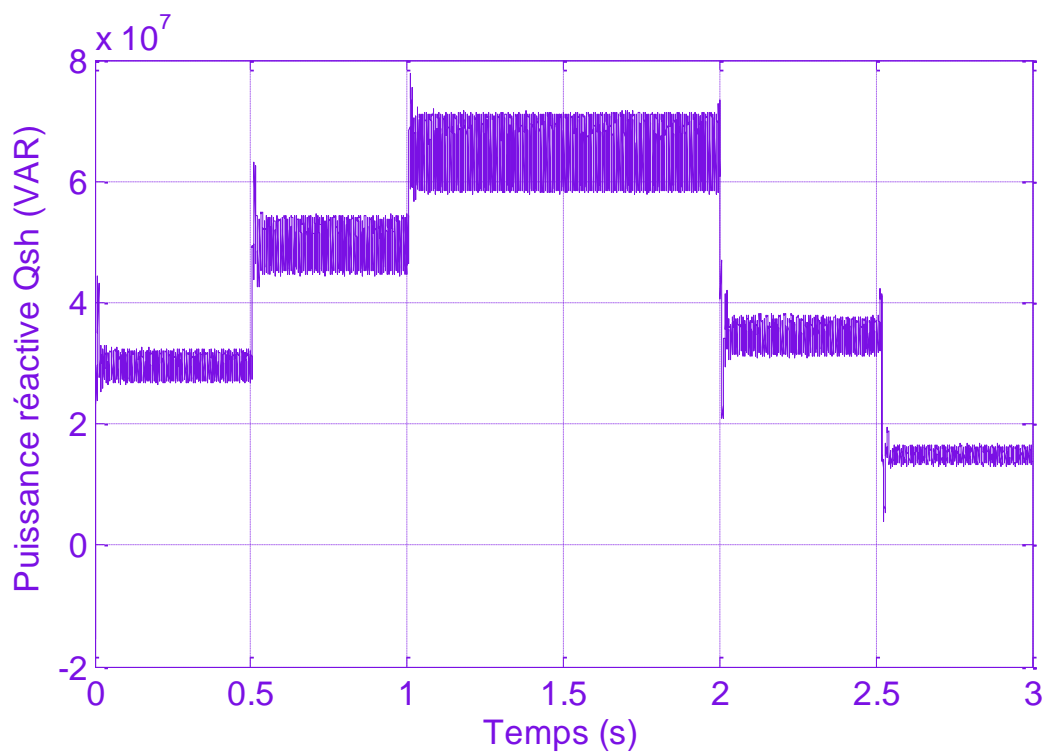
**Figure (IV-10) :** Tension de la ligne.

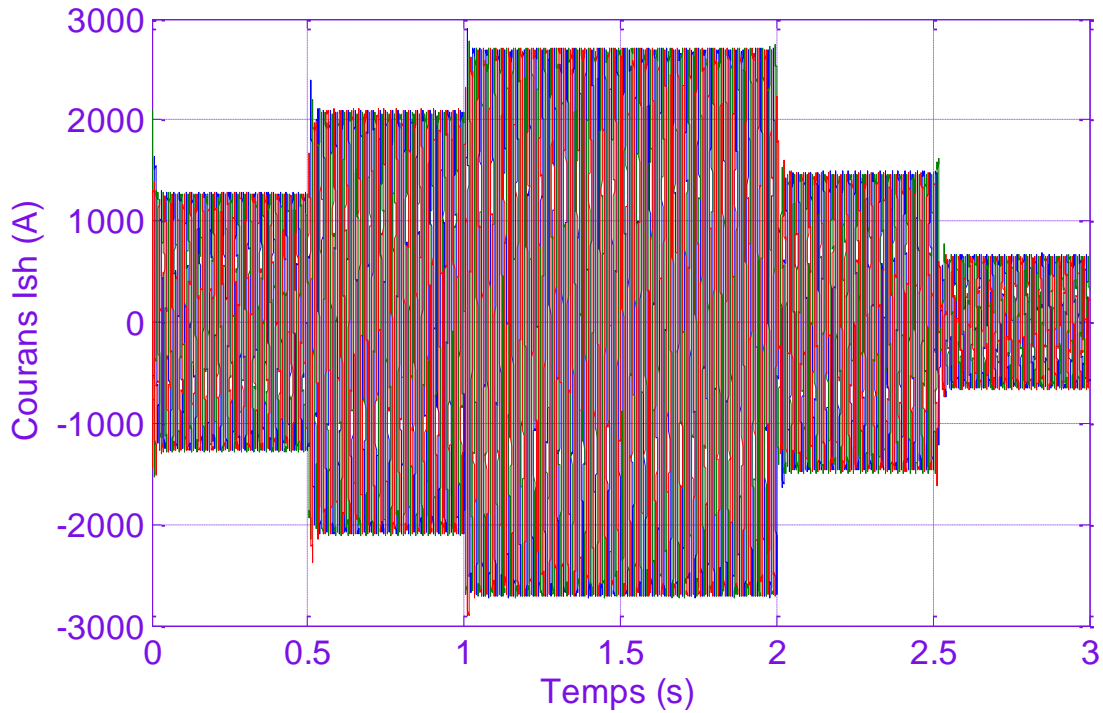
On constat que :

- Les courants de la ligne figure (IV-9) suivant l'évaluation des puissances actives transmises.
- La puissance réactive transmise par les lignes figure (IV-8) oscille autour de zéro, ce qui montre une très bonne compensation de cette énergie et donne la possibilité de fonctionner avec un facteur de puissance unitaire.
- La tension des lignes figure (IV-10), reste constante, malgré les variations de la charge, ce qui montre le bon contrôle de la tension par le STATCOM.



## IV-4-1-2-Les caractéristiques du STATCOM

**Figure (IV-11)** : La puissance active injecté par le STATCOM.**Figure (IV12)** : La puissance réactive injecté par le STATCOM.



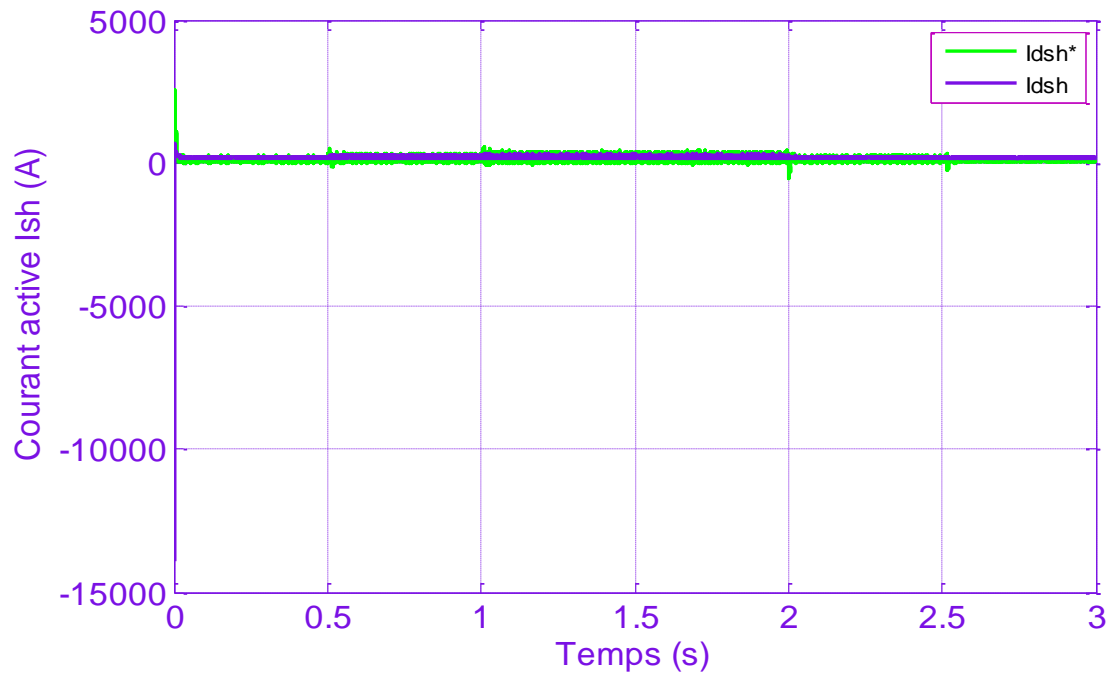
**Figure (IV-13) :** Le courant injecté par le STATCOM.

D'après les résultats de simulation, on peut voir que :

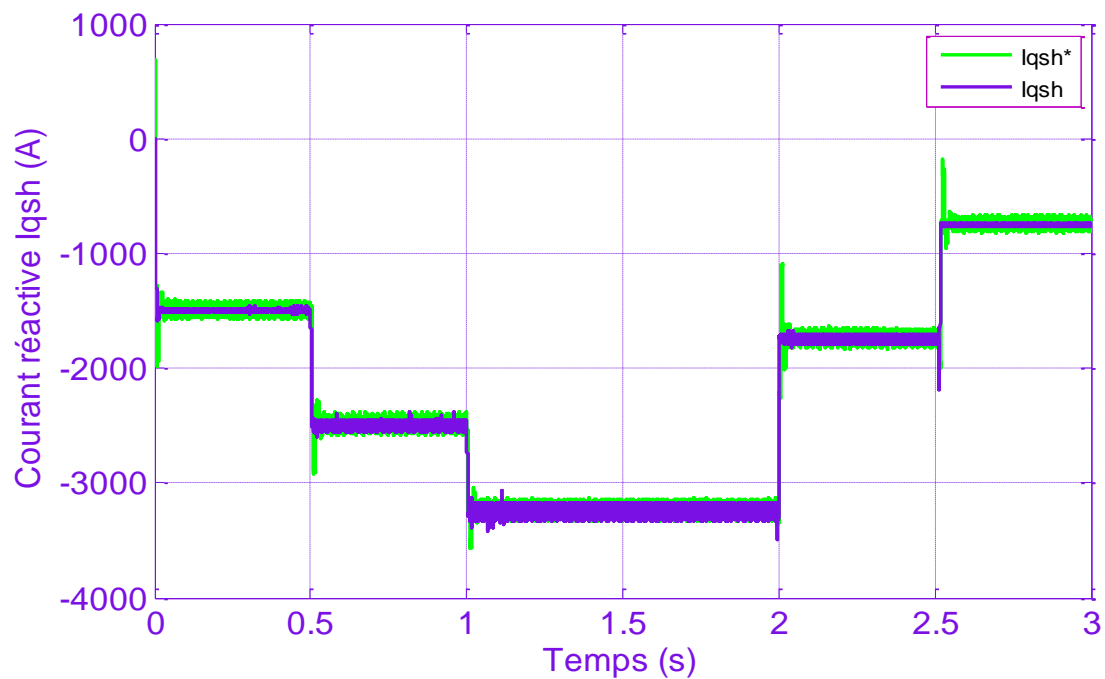
- La puissance active échangée avec le STATCOM, figure (IV-11) est relativement très faible (nulle en théorie) et ne représente que les pertes aux niveaux du transformateur ( $T_{sh}$ ), des interrupteurs semi-conducteurs et des câbles de connexions.
- Par contre le STATCOM injecte de la puissance réactive capacitive figure (IV-12), pour compenser la puissance réactive inductive des lignes.
- La figure (IV-13), montre l'évolution des courants réactifs injectés par le STATCOM et qui suit l'image de la puissance réactive injectée.

### IV-4-1-3-Les caracteristiques de la commande du STATCOM

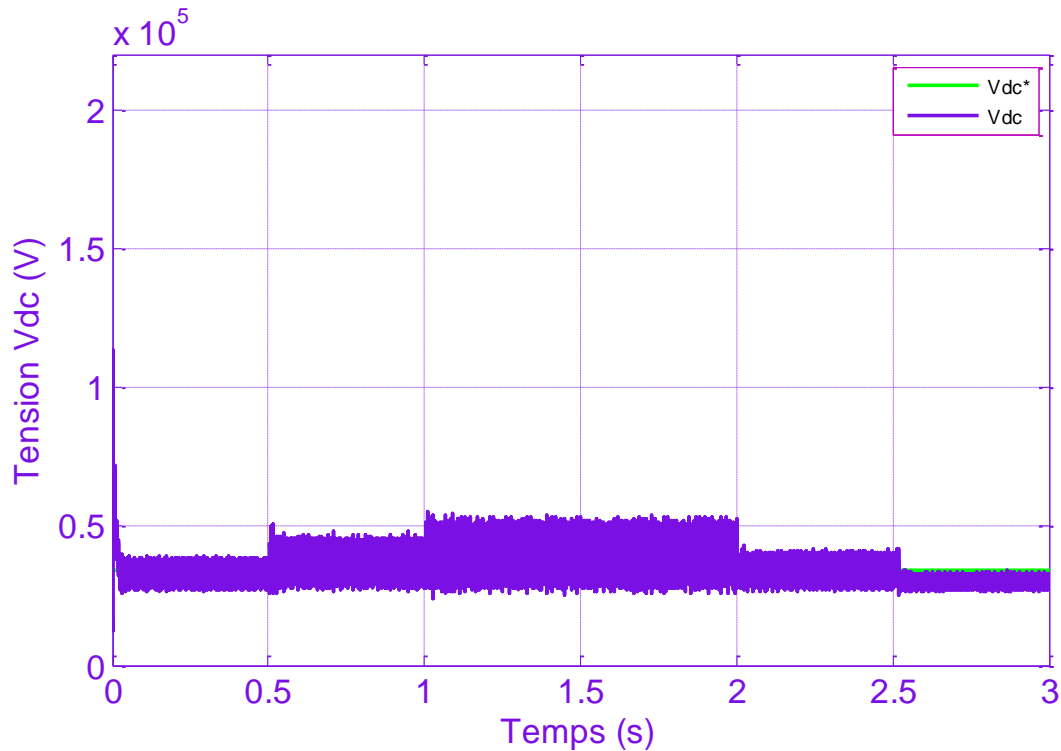
Dans cette partie on s'intéresse au contrôle de la tension du bus continue et le contrôle des courant.



**Figure (IV-14) :** Le courant active et sa référence injectée par le STATCOM.



**Figure (IV-15) :** Le courant réactive et sa référence injectée par le STATCOM.



**Figure (IV-16) :** La tension au borne du condensateur.

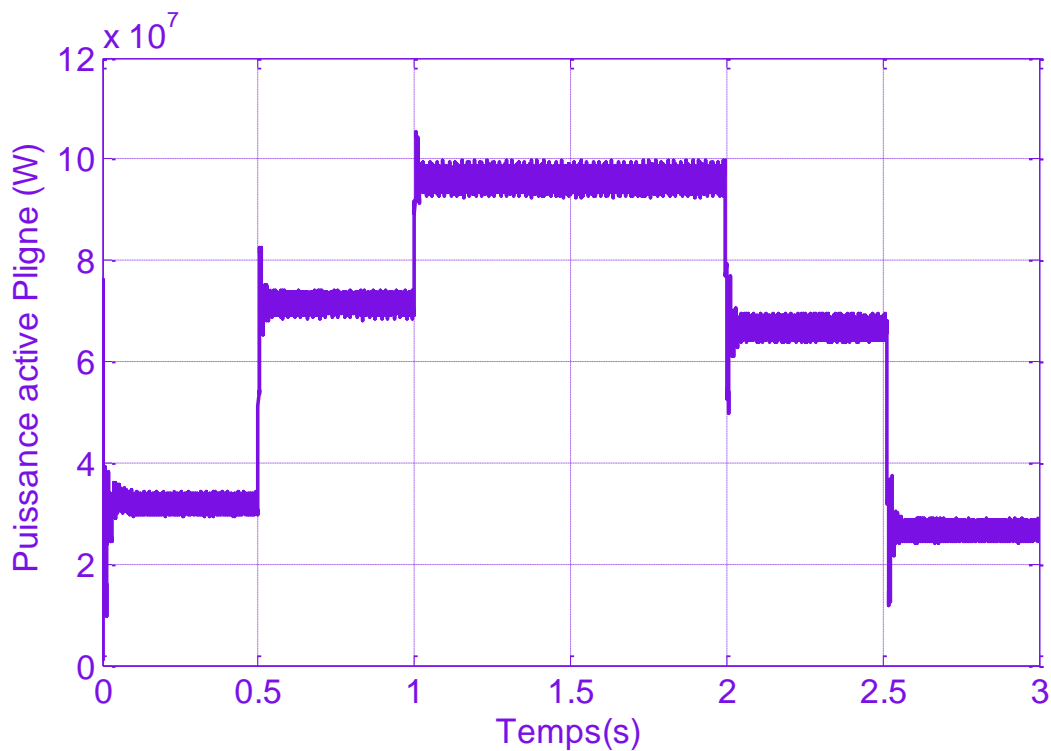
On peut constater que :

- La composante active des courant ( $I_{d-ch}$ ), figure (IV-14) suit parfaitement sa référence qui reste presque nulle, ce qui permet un contrôle efficace de la puissance active injectée par le STATCOM ( $P_{sh} \approx 0$ ).
- Par contre la composante réactive, permet un contrôle dynamique des puissances réactives injectées par le STATCOM, à fin de compenser effectivement les lignes.
- On constate un très bon découplage des courants, des puissances : active et réactive et donc la méthode watt var découplée est valides.
- La figure (IV-16) montré le bon contrôle de la tension du bus continu, qui reste constante, malgré les variations des charges, ce qui dénote de la robustesse de sa commande et du bon choix & des régulateurs.

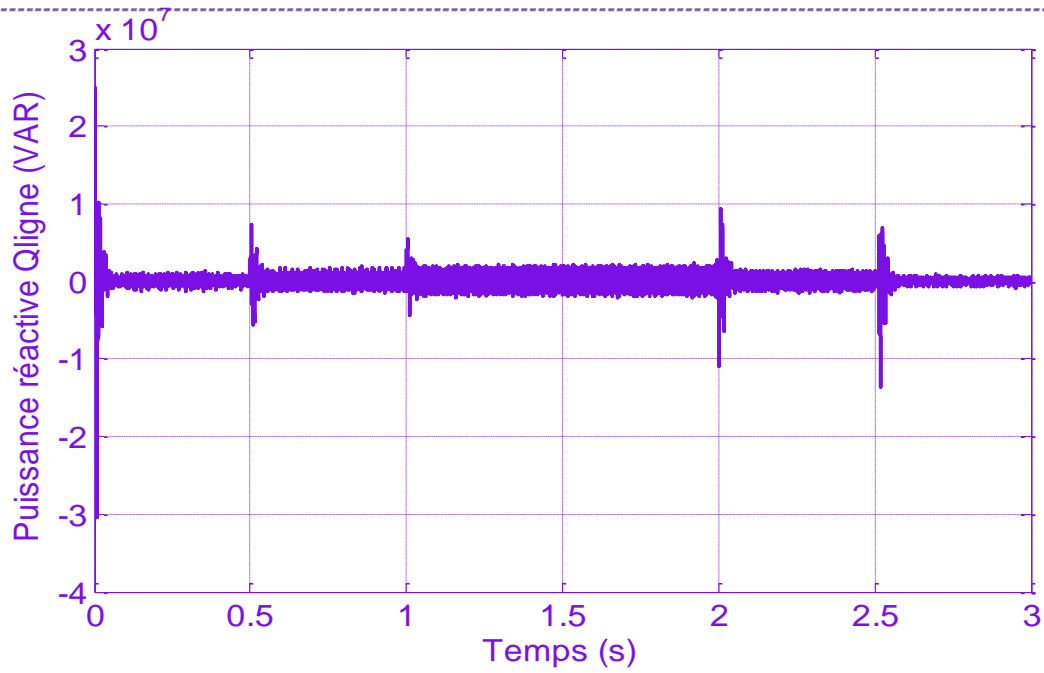
#### IV-4-2-Simulation du STATCOM avec un onduleur à trois niveaux du type NPC

Dans cette partie, on a utilisé un onduleur à trois niveaux du type NPC et on va réaliser des simulations dans les mêmes conditions que celles du STATCOM avec un onduleur à deux niveaux. Une étude comparative sera présentée.

##### IV-4-2-1-Les caractéristique de la ligne



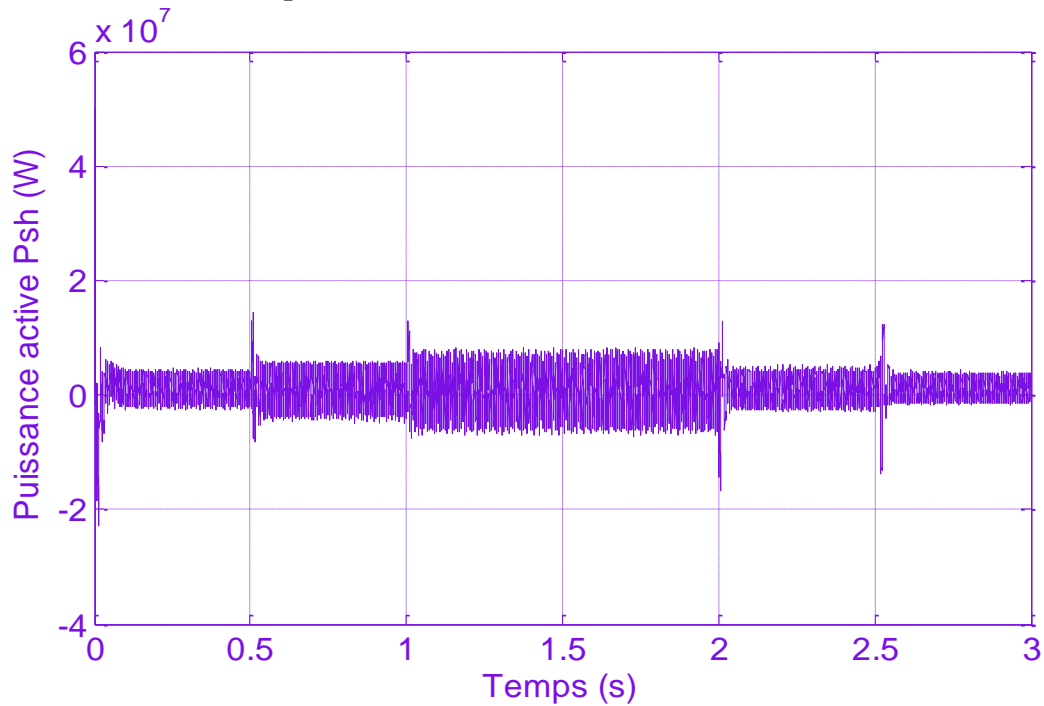
**Figure (IV-17) :** Puissance active de la ligne cotée réseau.



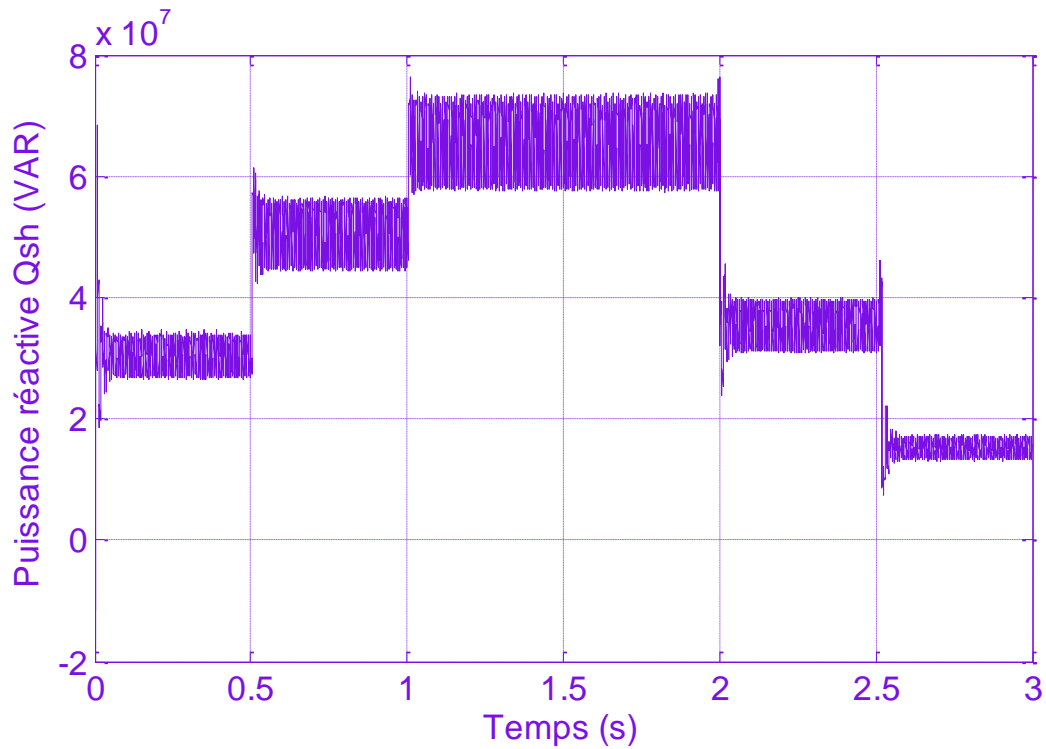
**Figure (IV-18)** : Puissance réactive de la ligne cotée réseau.

On constate la puissance réactive transmise par la ligne est pratiquement nulle, ce qui témoigne de la bonne compensation réactive par le STATCOM.

#### IV-4-2-2-Les caractéristiques du STATCOM



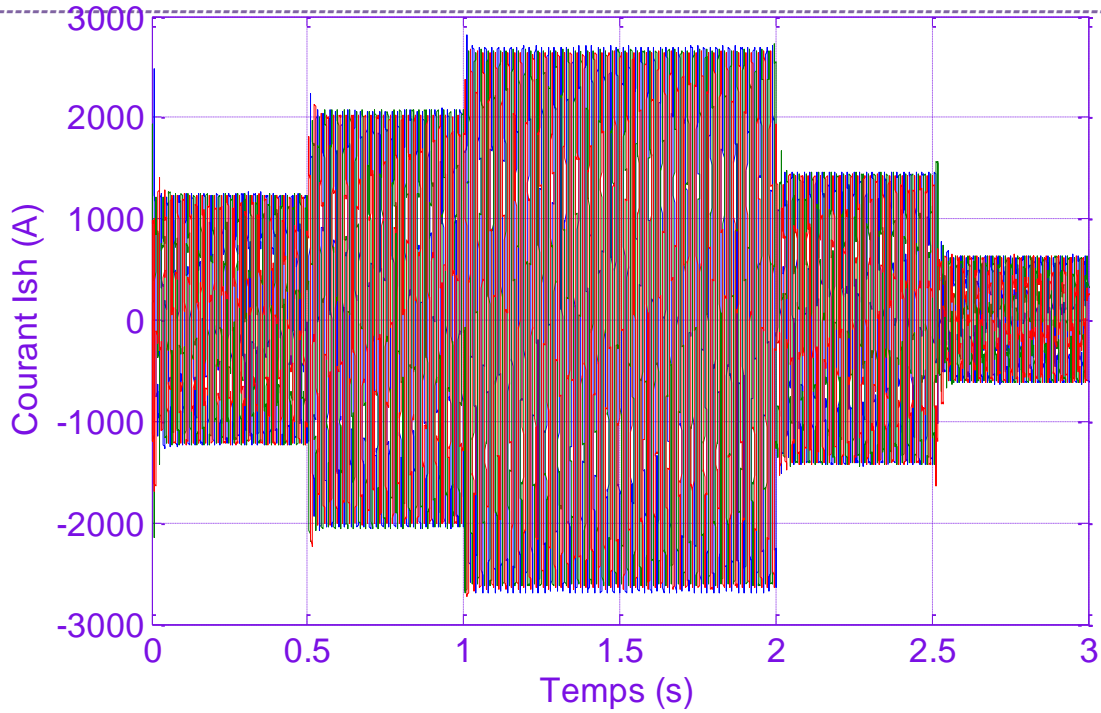
**Figure (IV-19)** : La puissance active injecté par le STATCOM.



**Figure (IV-20) :** La puissance réactive injecté par le STATCOM.

On peut constater que pratiquement le STATCOM n'échange pas de puissance active avec le réseau électrique figure (IV-19), sauf une très faible valeur réactive aux pertes du côté transformateur et celles des interrupteurs de l'onduleur.

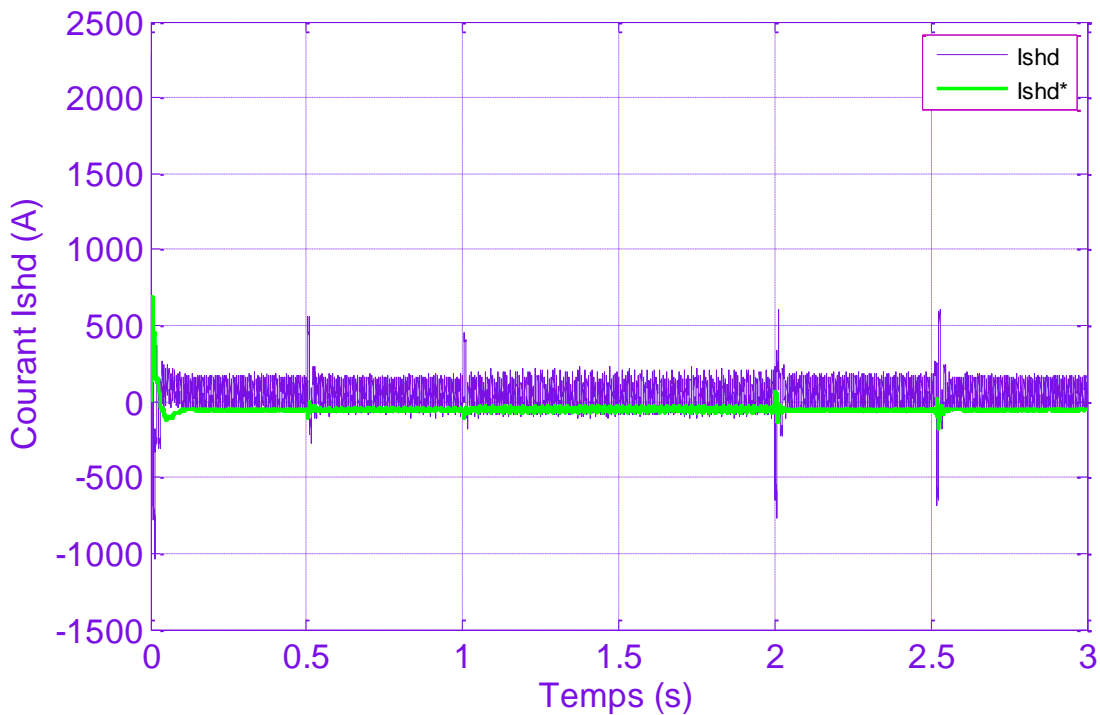
Par contre la figure (IV-20), montre la puissance réactive injectée par le STATCOM, à chaque variation de la charge pour compenser l'énergie réactive inductive de la ligne et permet de fonctionner avec un facteur de puissance unitaire.



**Figure (IV-21) :** Le courant injecté par le STATCOM.

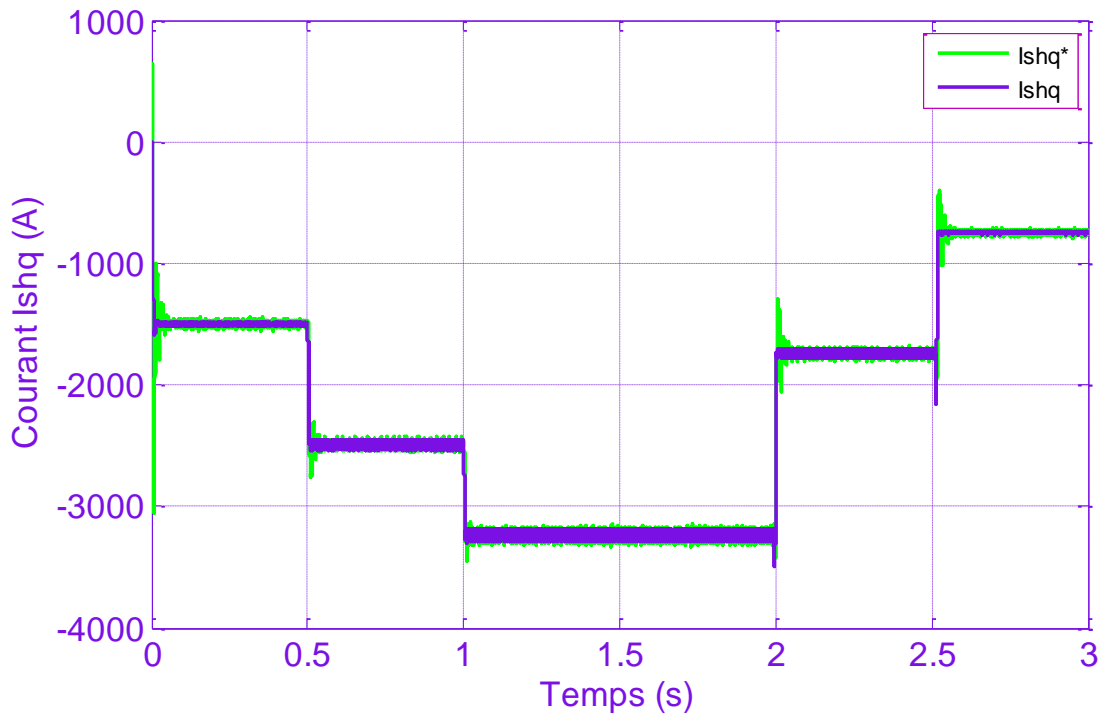
La figure (IV-21), montre l'évolution du courant injecté par le STATCOM, qui suit l'évolution de la puissance réactive injectée par ce dernier.

#### IV-4-2-3-Les caractéristique du bloc de commande



**Figure (IV-22) :** Le courant active et sa référence injectée par le STATCOM.



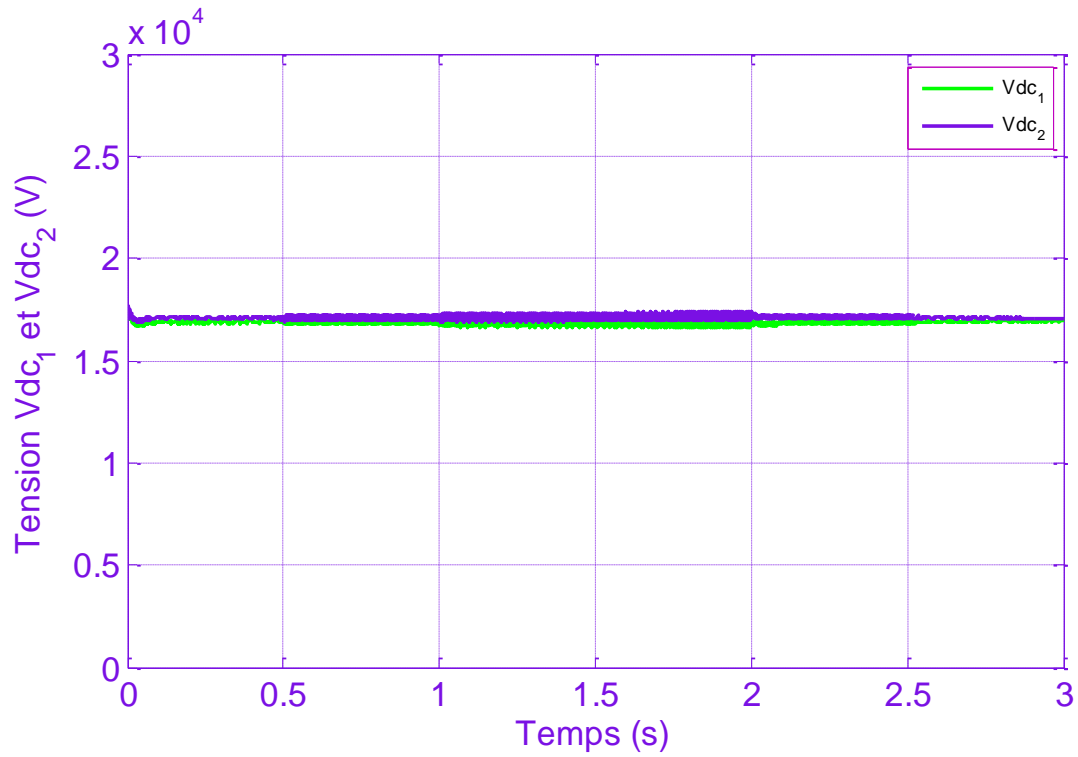


**Figure (IV-23)** : Le courant réactif et sa référence injectée par le STATCOM.

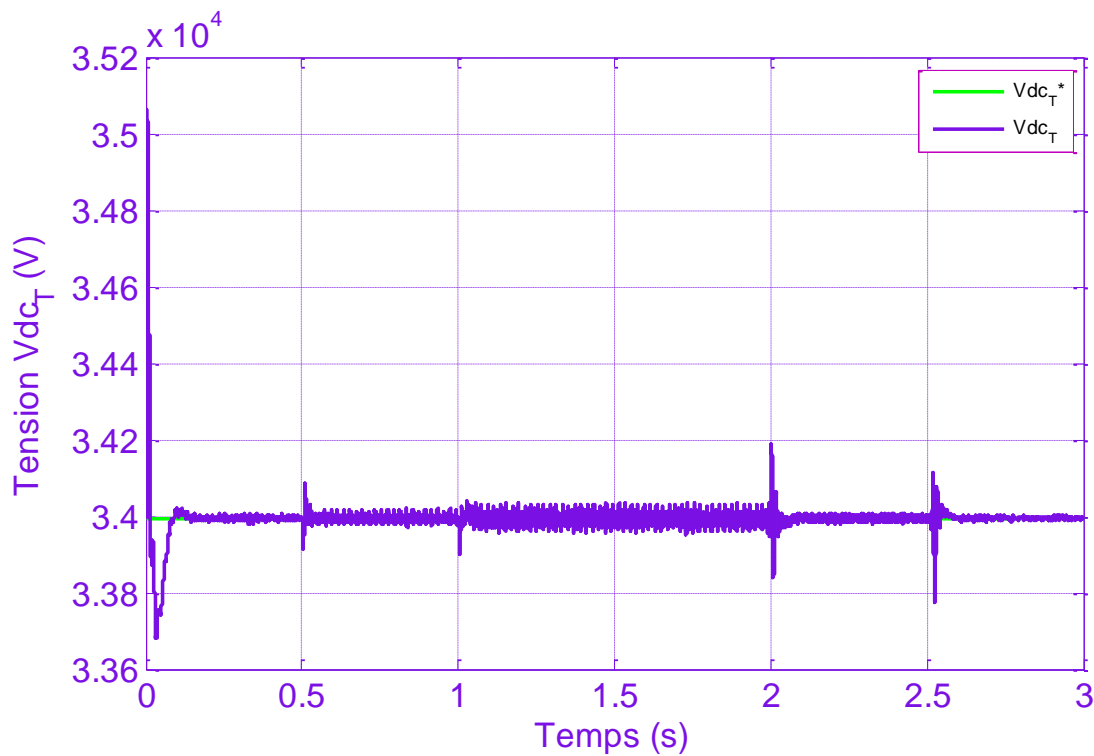
On constate dans la figure (IV-22), que le courant active ( $I_{shd}$ ) suit sa référence qui reste très proche de zéro, ce qui permet un contrôle directe de la puissance active injectée par le STATCOM, qui est très voisine de zéro.

Par contre la figure (IV-23), montre bien l'évolution dynamique du courant réactif ( $I_{shq}$ ) qui suit parfaitement sa référence, à fin de contrôler la puissance réactive injectée par le STATCOM.

En fin on constate un parfait découplage entre ces deux courants, ce qui montre l'efficacité de la méthode watt-var découplée et le bon choix des régulateurs.



**Figure (IV-24)** : La tension aux bornes des deux condensateurs.



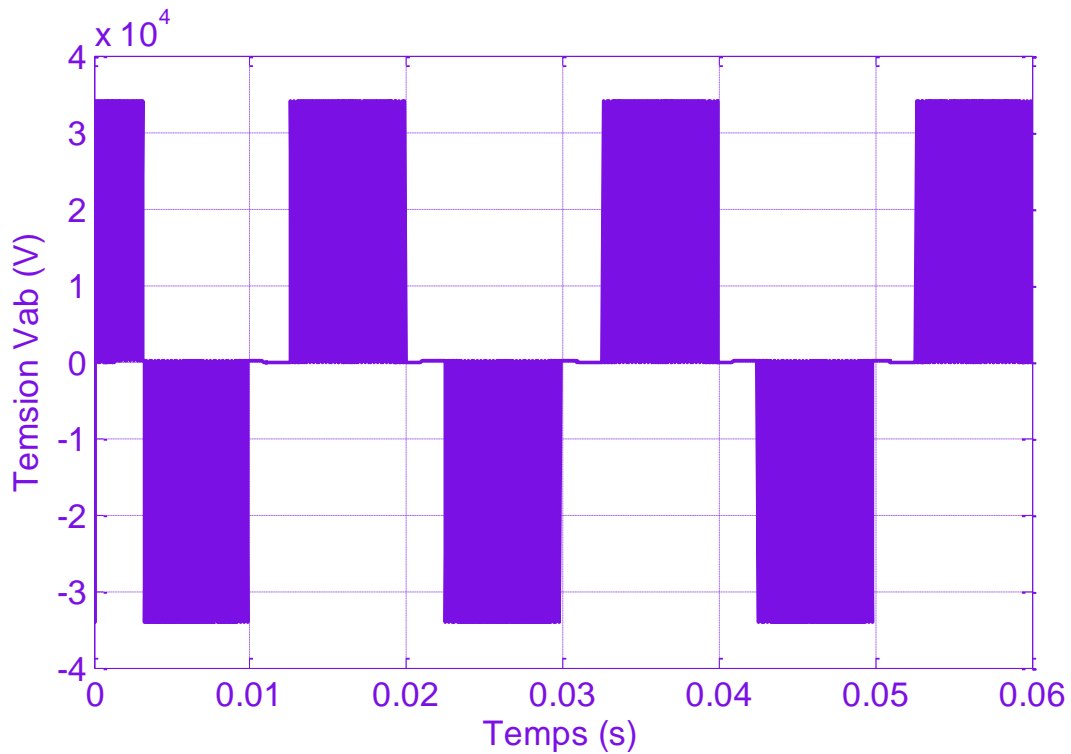
**Figure (IV-25)** : La tension  $V_{dc}$  total.

La figure (IV-24), illustre bien la stabilité et l'équilibre des tensions des deux condensateurs du bus continu.

La figure (IV-25), montre la stabilité de la tension total du bus continu, ce qui témoigne de la robustesse de la commande vis-à-vis des variations de la charge de la ligne.

#### IV-4-3-Etat de comparative

Pour montrer l'utilité de l'onduleur à trois niveaux adopté par rapport à l'onduleur conventionnel à deux niveaux, nous avons simulé le fonctionnement des deux onduleurs dans les mêmes conditions en termes de tension continue et de fréquence.



**Figure (IV-26) :** Tension composée  $V_{ab}$  d'un onduleur à deux niveaux

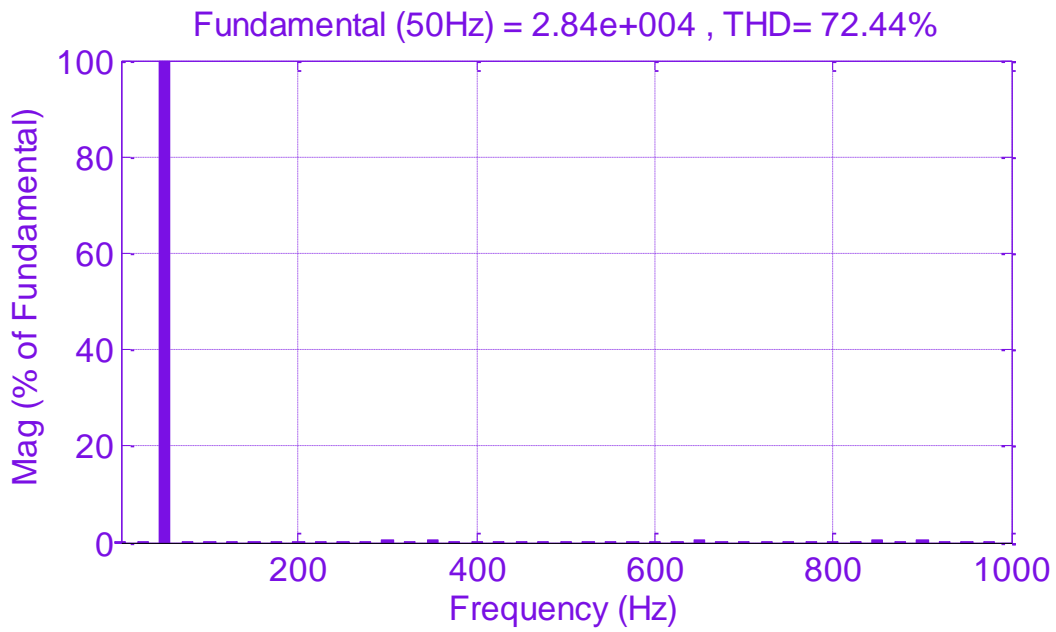


Figure (IV-27) : Spectre harmonique de  $V_{ab}$  d'un onduleur à deux niveaux

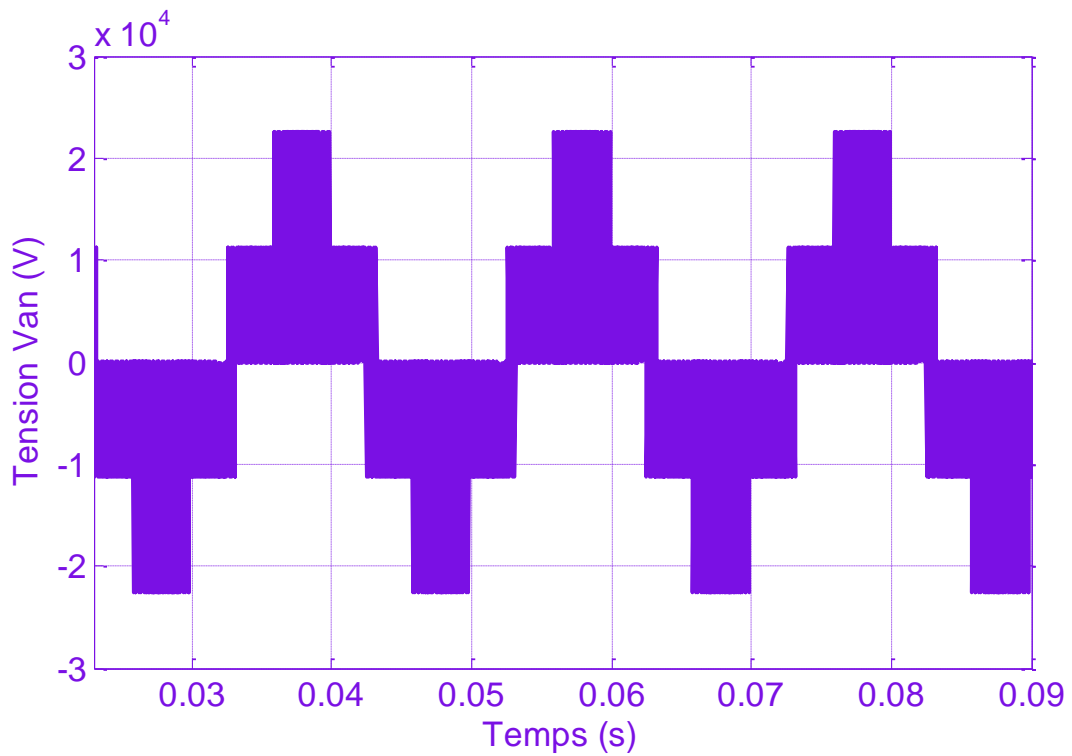
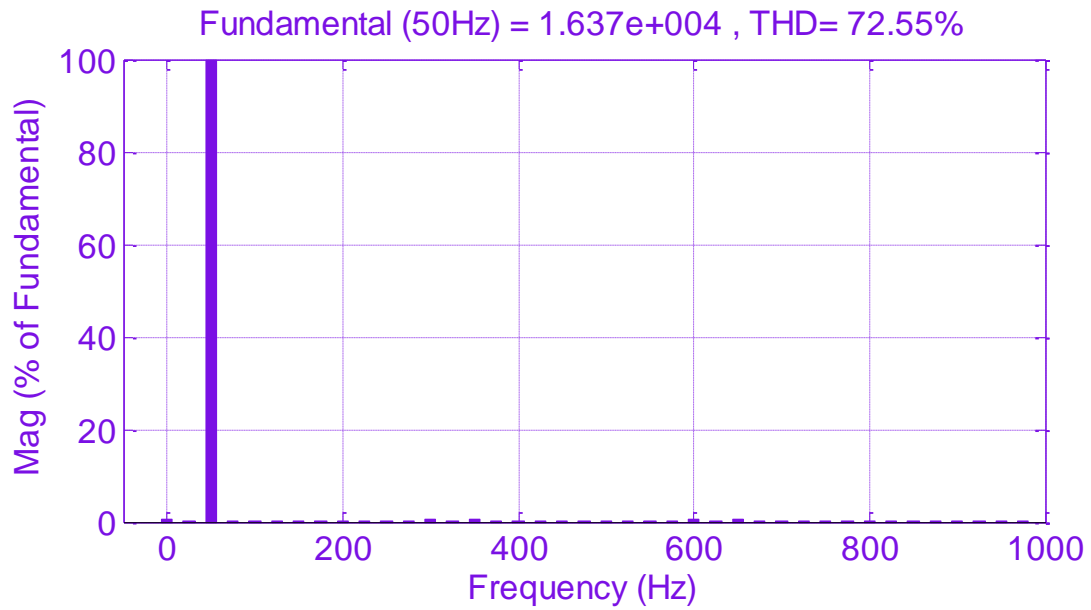
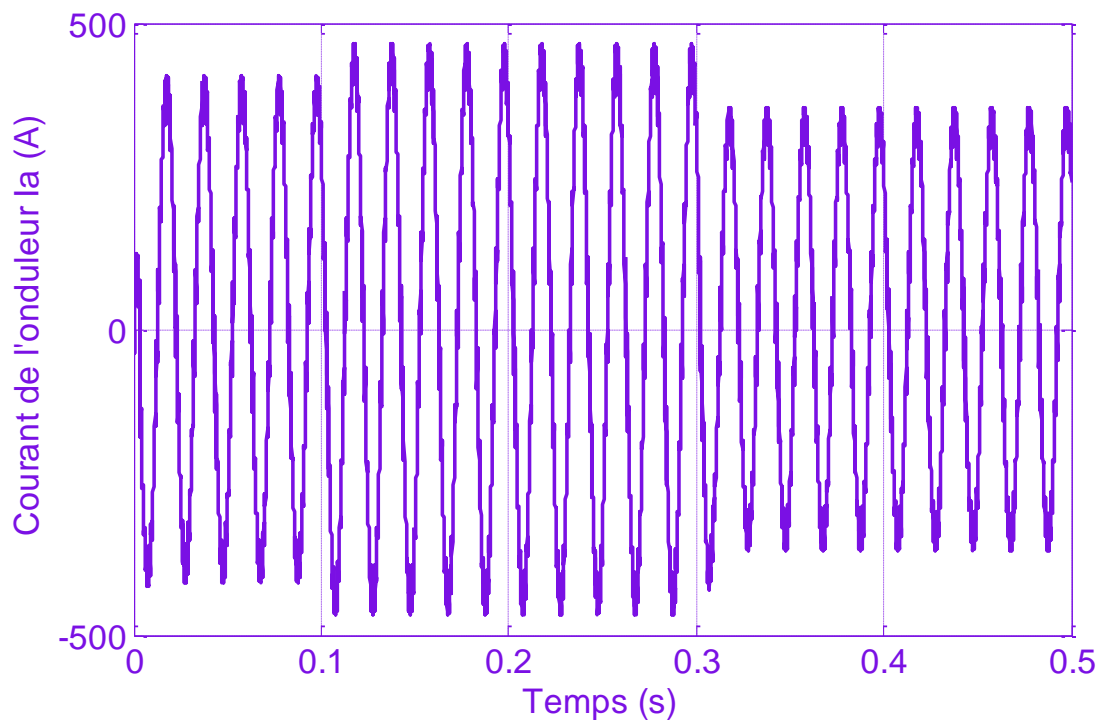


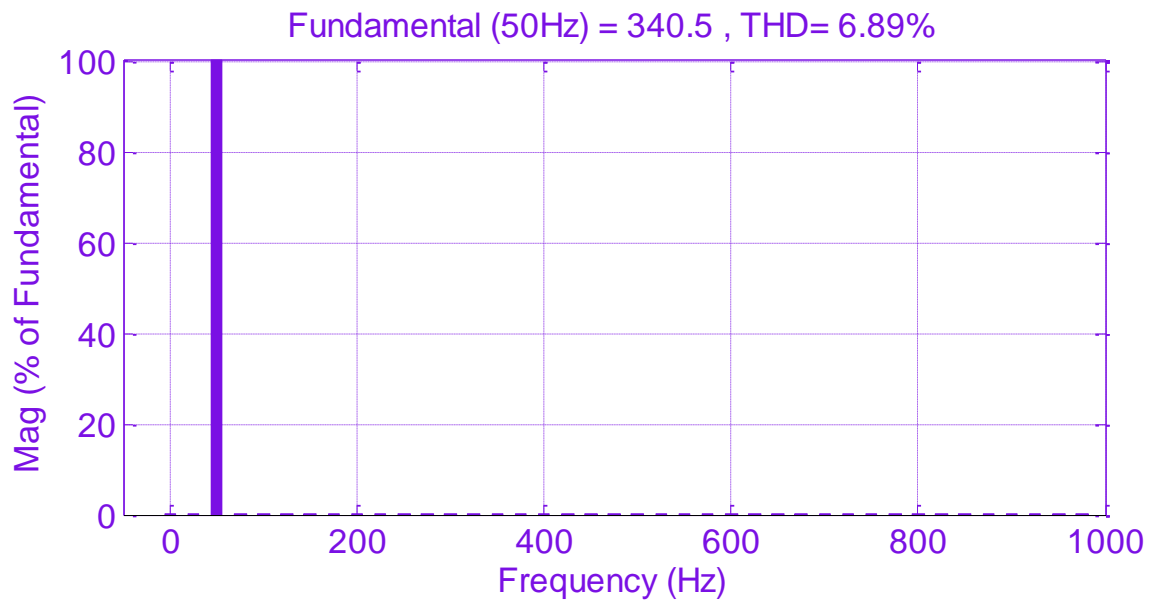
Figure (IV-28) : Tension simple  $V_{an}$  d'un onduleur à deux niveaux.



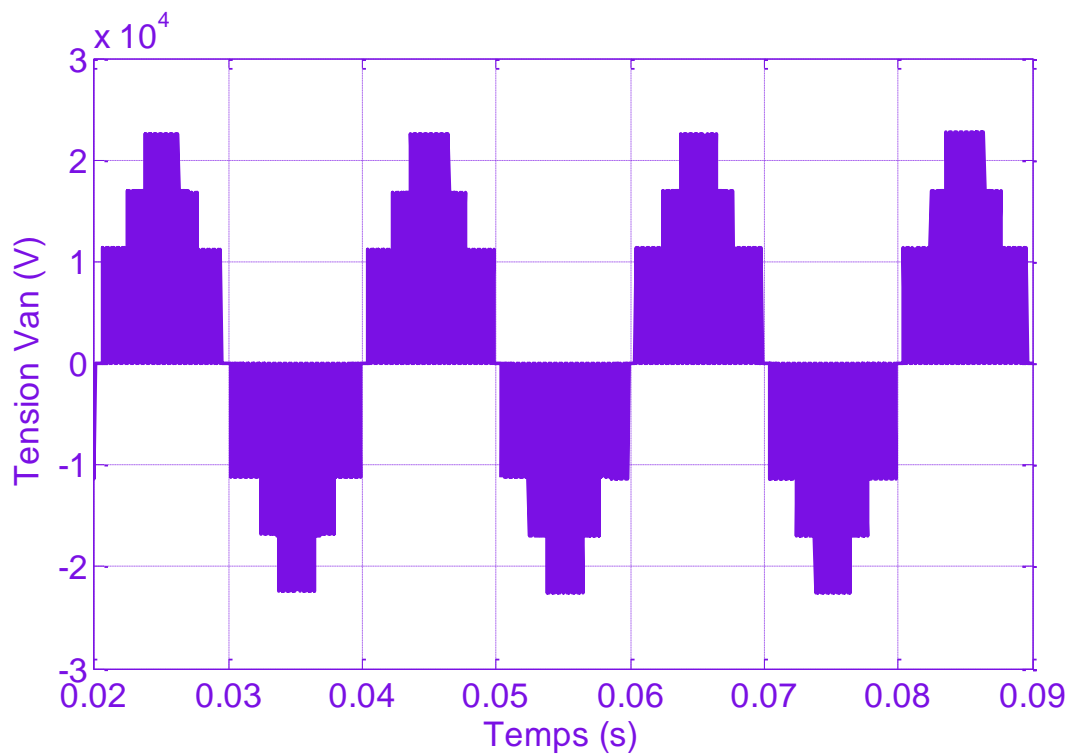
**Figure (IV-29)** : Spectre harmonique de  $V_{an}$  d'un onduleur à deux niveaux



**Figure (IV-30)** : Courant d'une phase  $I_a$  d'un onduleur à deux niveaux.



**Figure (IV-31) :** Spectre harmonique de  $I_a$  d'un onduleur à deux niveaux.



**Figure (IV-32) :** Tension simple  $V_{an}$  d'un onduleur à trois niveaux.

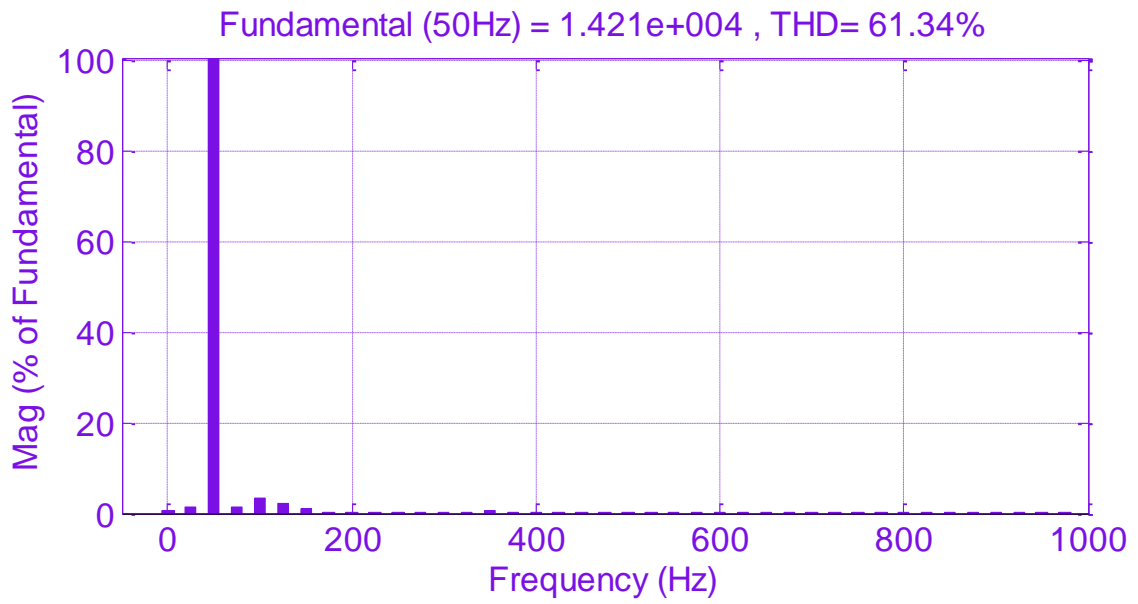


Figure (IV-33) : Spectre harmonique de  $V_{an}$  d'un onduleur à trois niveaux

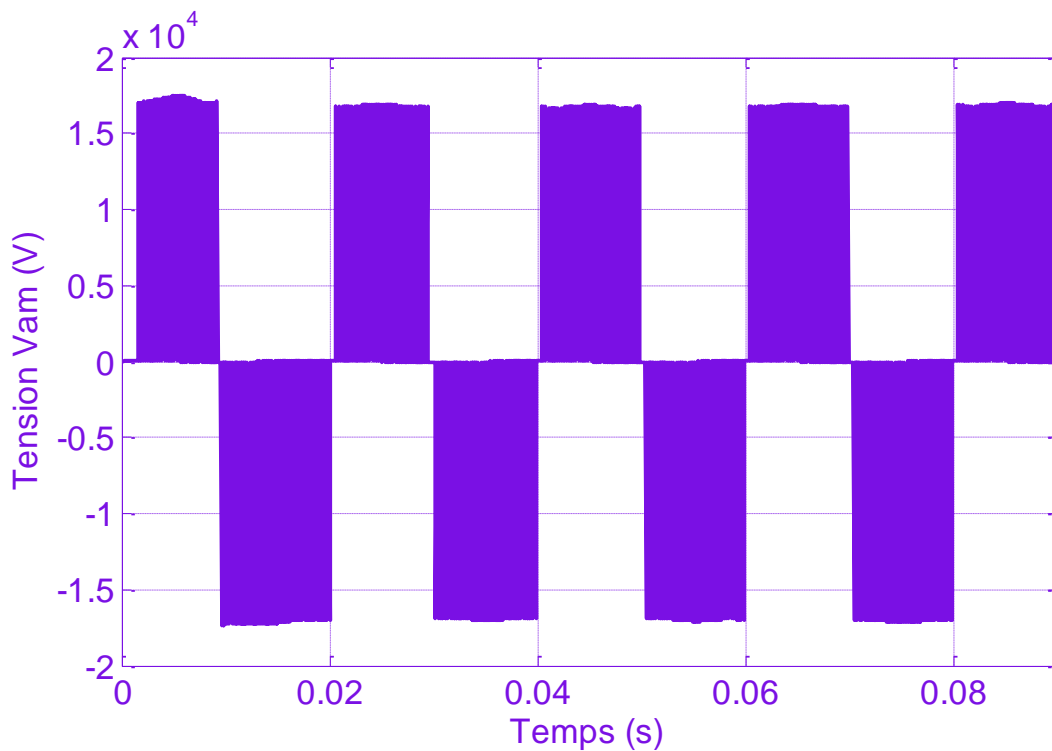


Figure (IV-34) : Tension polaire  $V_{am}$  d'un onduleur à trois niveaux.

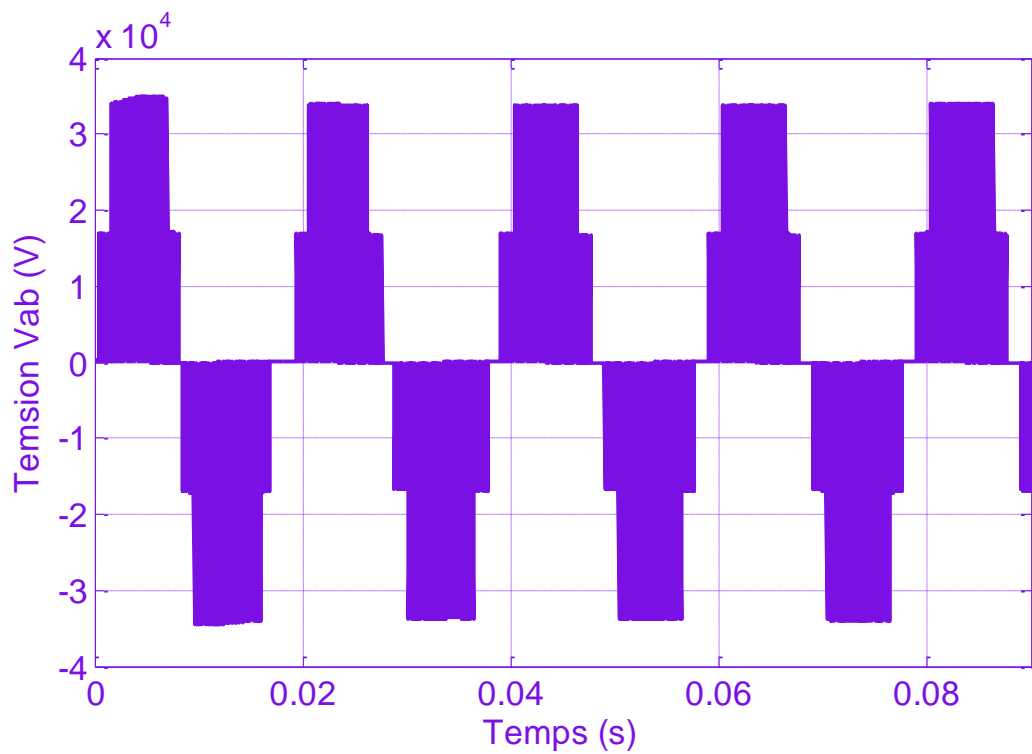


Figure (IV-35) : Tension simple  $V_{ab}$  d'un onduleur à trois niveaux.

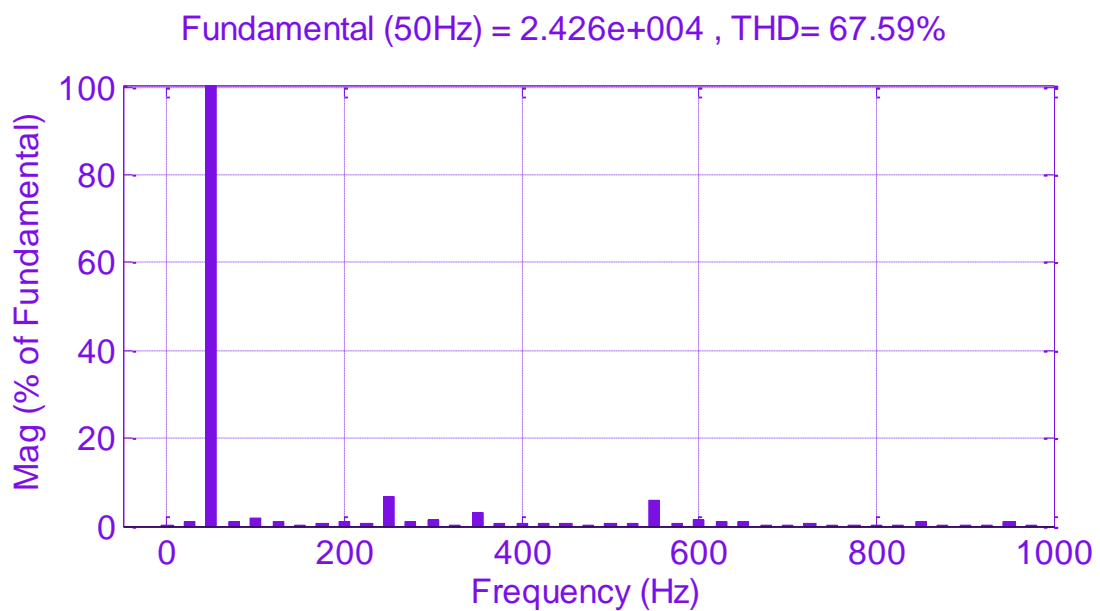
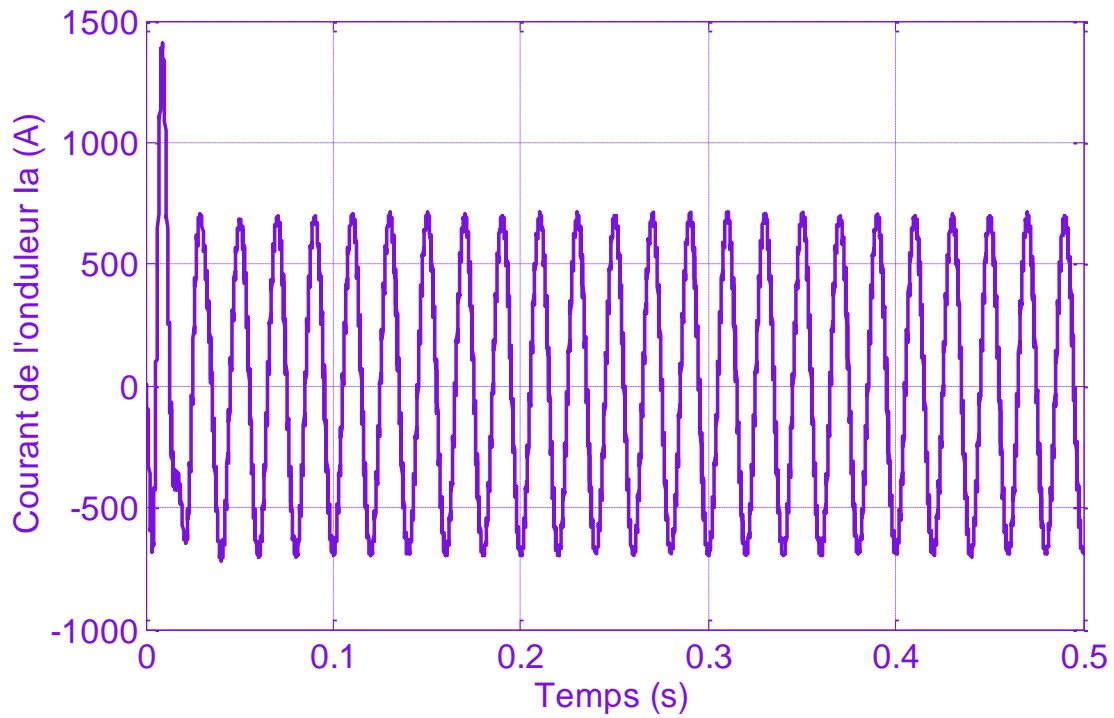
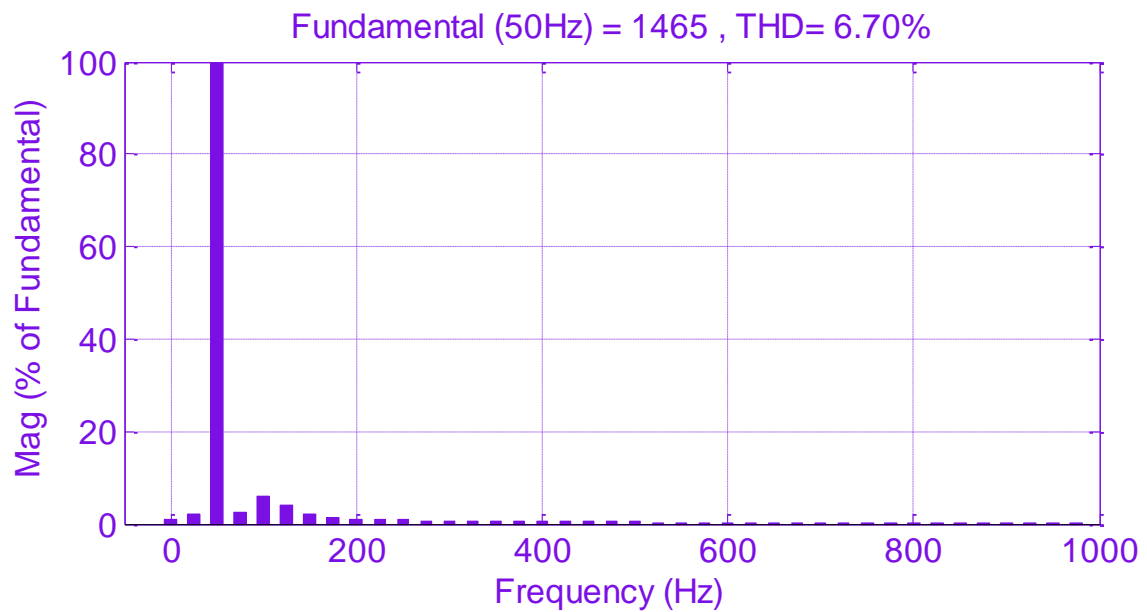


Figure (IV-36) : Spectre harmonique de  $V_{ab}$  d'un onduleur à trois niveaux

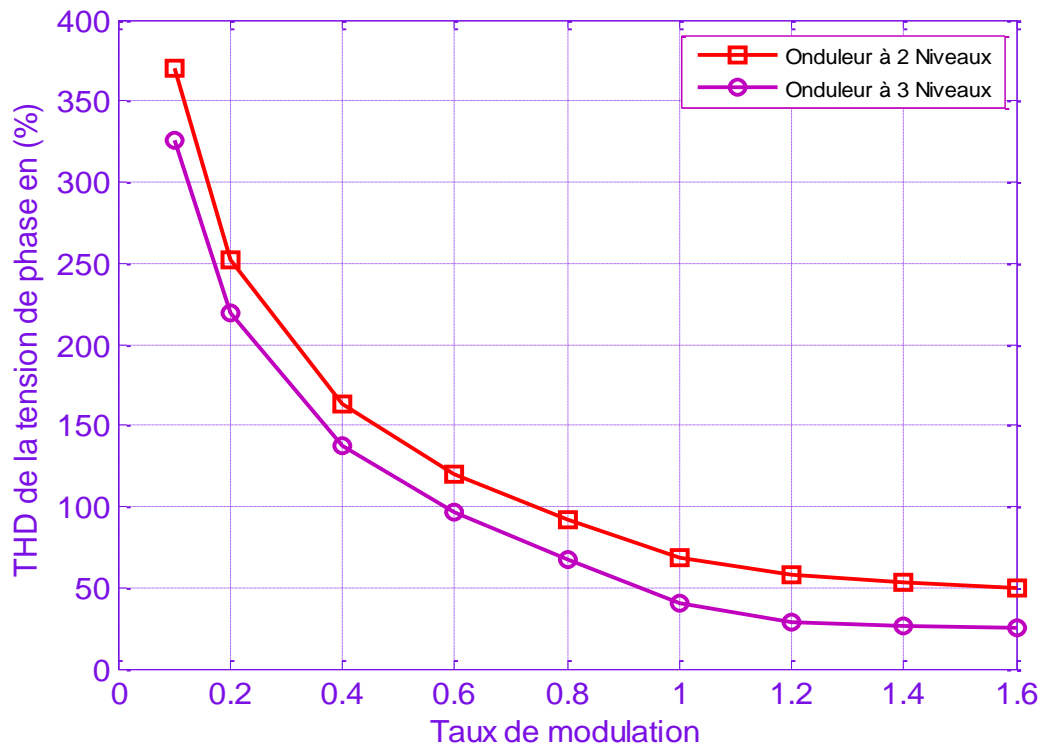




**Figure (IV-37) :** Courant d'une phase  $I_a$  d'un onduleur à trois niveaux.



**Figure (IV-38) :** Spectre harmonique de  $I_a$  d'un onduleur à trois niveaux.



**Figure (IV-39) :** Taux de distorsion harmonique de la tension simple.

Les figures (IV-39) présentent une étude comparative entre les taux de distorsion harmonique des deux onduleurs. Nous constatons que le contenu harmonique des formes d'onde à trois niveaux est bien inférieur à celui des formes d'onde à deux niveaux. Ainsi, l'utilisation des onduleurs à trois niveaux pour contrôler un réseau électrique semble une solution assez intéressante.

Cette figure montre que :

- L'augmentation du taux de modulation ( $r = 0 \dots 1.2$ ) permet de diminuer le THD.
- La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamental ne dépend pas de la variation de l'indice de modulation  $m$ .

Pour montrer l'utilité de l'onduleur à trois niveaux adopté par rapport à l'onduleur conventionnel à deux niveaux, nous simulons le fonctionnement des deux onduleurs dans les mêmes conditions.

Après l'étude comparative entre les deux structures, on a pu voir l'intérêt de l'utilisation de l'onduleur de tension à trois niveaux :

- La diminution du Taux de distorsion harmonique.
- La réduction des ondulations des courants de contrôle du STATCOM, (Ishd-Ishq).
- La réduction des ondulations des puissances injectées par le STATCOM.
- La réduction des ondulations de la tension du bus continu
- Et bien sûr les contraintes en tension sont divisées par deux, au niveau des interrupteurs de l'onduleur.

#### IV- 5-Impact du compensateur série SSSC sur le contrôle du réseau électrique

Dans cette partie, on s'intéresse au contrôle du flux de puissance dans la ligne et la possibilité d'augmenter la capacité de transit des lignes.

##### IV-5-1-Caractéristiques des tensions

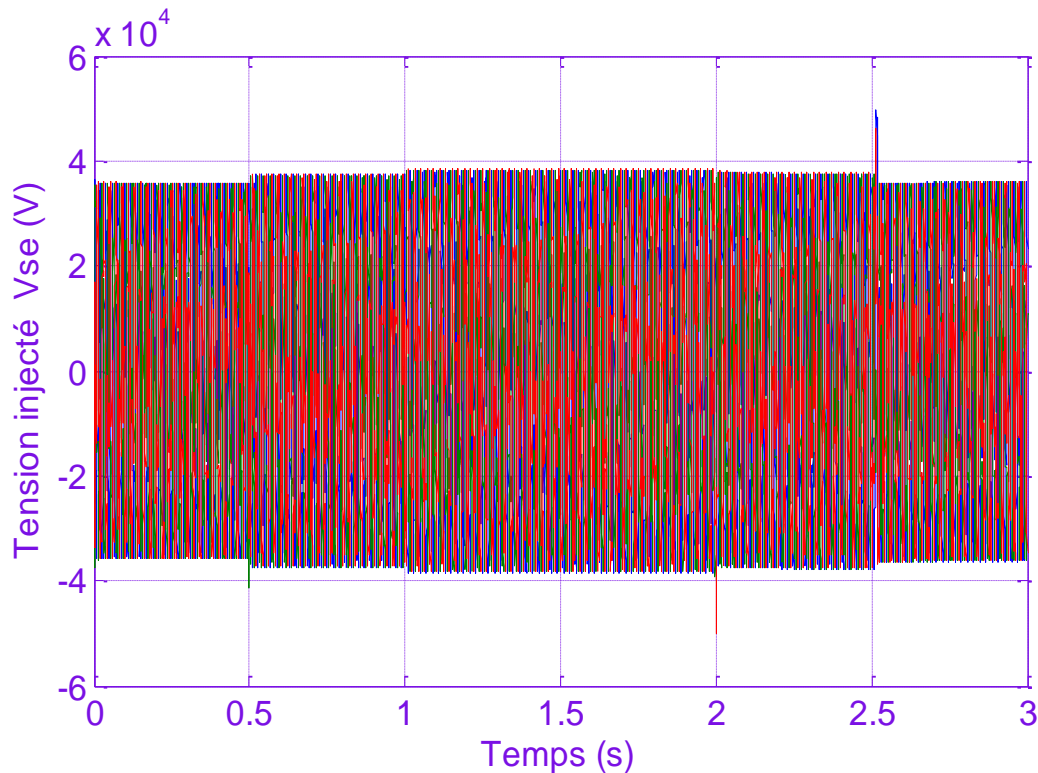
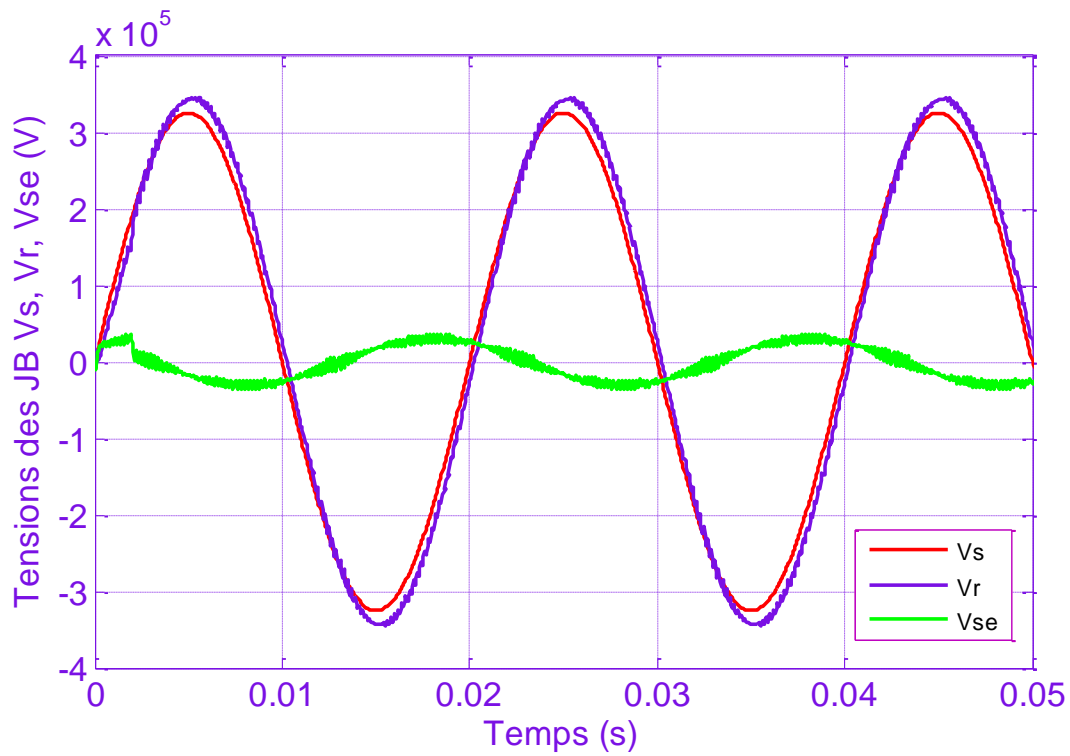


Figure (IV-40) : La tension injectée par le SSSC.

La figure (IV-40), montre l'évolution de la tension injectée par le SSSC, par contrôler le flux des puissances transmises par la ligne.



**Figure (IV-41) :** Les différents tensions Vs, Vr et Vse.

La figure (IV-41), permet de visualiser les différentes tensions au niveau de notre réseau électrique :

- Vs : La tension au début de la ligne.
- Vr : La tension à la fin de la ligne.
- Vse : La tension injectée par le SSSC.

On constate que la tension injectée une tension est en quadrature avec les tensions de la ligne.

Lorsque le SSSC injecte une tension en série avec la ligne, il permet de modifier la réactance de la ligne, et par conséquent il peut contrôler la capacité de transit de la ligne, ainsi que le flux des puissances : active et réactive.

IV-5-2-Contrôle du flux de puissance

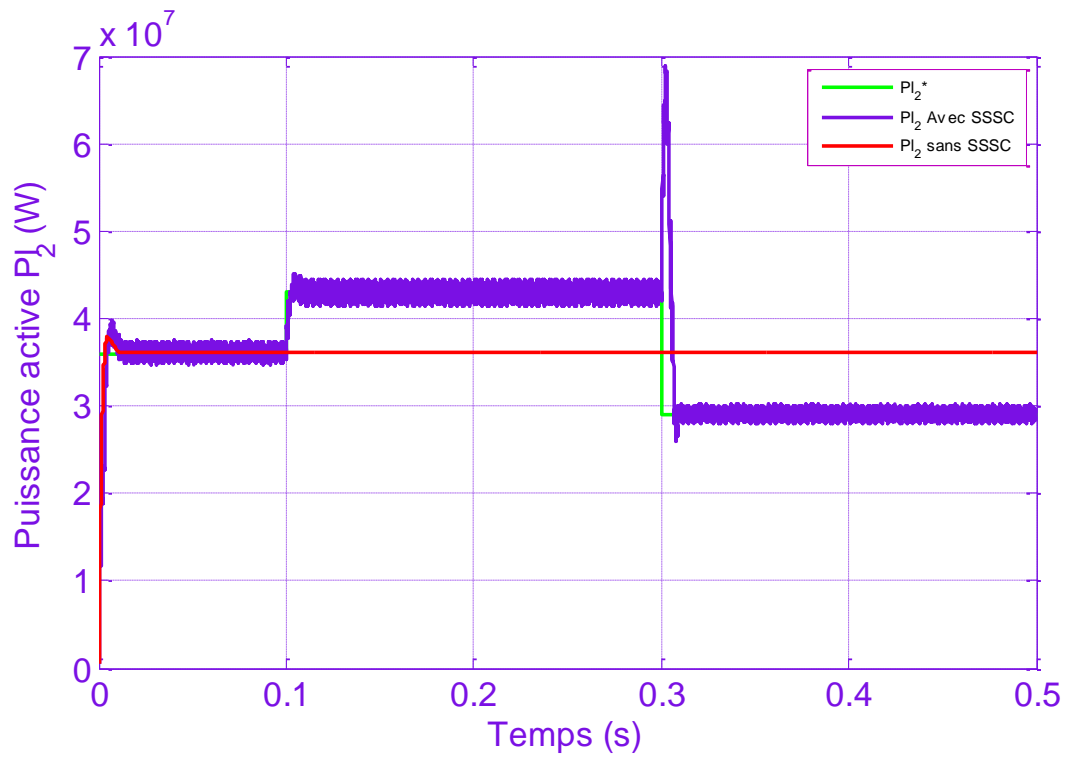


Figure (IV-42) : La puissance active injectée par le SSSC.

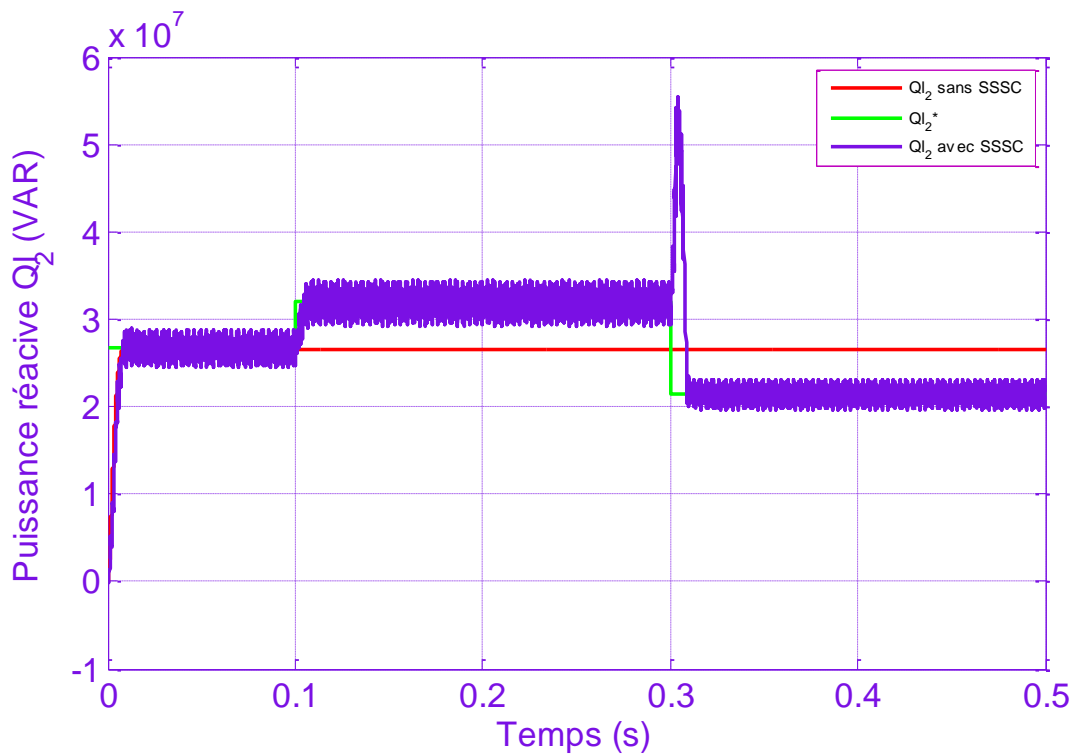


Figure (IV-43) : La puissance réactive injectée par le SSSC.

On peut constater, que le SSSC, peut contrôler efficacement le flux des puissances active et réactive, dans la ligne de transport.

Sans le SSSC le flux de puissance reste constant, par contre lorsqu'on introduit le SSSC, on peut contrôler le flux des puissances, en injectant une tension en série avec la ligne, ce qui se traduit par une modification de la réactance de celle-ci et par conséquent on contrôle de la capacité de transit de la ligne entre 80% et 120% de sa capacité initial.

#### **IV-4-Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté l'impacte des compensateurs série et parallèle, sur le contrôle du flux de puissance et de la tension de la ligne.

Le STATCOM injecte de la puissance réactive capacitive, pour compenser la puissance réactive inductive des lignes.

Le SSSC injecte une tension en série avec la ligne, il permet de modifier la réactance de la ligne, et par conséquent il peut contrôler la capacité de transit de la ligne, ainsi que le flux des puissances : active et réactive.

**« Pour réussir, il ne suffit pas de prévoir. Il faut aussi savoir improviser »**

***I. Asimov***

# Conclusion Générale



# *Conclusion générale*

L'étude du contrôle de flux de puissance dans les réseaux de transport d'énergie électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques, comme nous l'avons constaté tout le long de ce mémoire.

L'étude présentée dans ce modeste travail porte sur, l'application de l'UPFC dans le contrôle de la puissance active et réactive, le rôle de ce dispositif est d'améliorer le transit de puissance par sa capacité de contrôler simultanément ou indépendamment les trois paramètres associé au transit de puissance.

Afin d'atteindre ces objectif, nous somme passé par plusieurs étapes :

D'abord, comme dans toute étude, un rappel théorique et état de l'art sur les différents compensateurs de la famille FACTS et leurs application dans les réseaux électriques. Parmi les quelles, nous avons choisi l'UPFC pour notre étude.

Dans une seconde étape, nous avons présenté le modèle d'un UPFC connecté à un réseau électrique. Afin d'analyser l'influence de UPFC sur le réseau, nous avons montré les relations entre différentes variables du réseau en fonction des paramètres de contrôle de l'UPFC.

Dans la partie modélisation et commande, nous avons étudié et choisie la méthode watt var découplé.

De même pour la partie shunt, nous avons choisi la méthode watt-var découplé, cette méthode est identique à celle de la partie série.

Dans la troisième partie nous avons présenté la modalisation des onduleurs à deux et à trois niveaux de type NPC.

Dans le quatrième chapitre on a présenté l'impacte des compensateurs série et parallèle, sur le contrôle du flux de puissance et de la tension de la ligne.

*« Le rire c'est comme les essuie-glaces, il permet d'avancer même s'il n'arrête pas la pluie »*

**G.Jugnot**

Annex

# Annexe

## Annexe A : Réseau étudié

Le but de cette annexe est la représentation des différents éléments du réseau étudié et de définir le type d'outil de calcul qui permet son étude.

### A-1-Modélisation

Nous avons également considéré qu'un UPFC avec une puissance de 160 MVA est installé au milieu de la ligne. Les caractéristiques du générateur, de la ligne et des transformateurs sont données dans les parties suivantes.

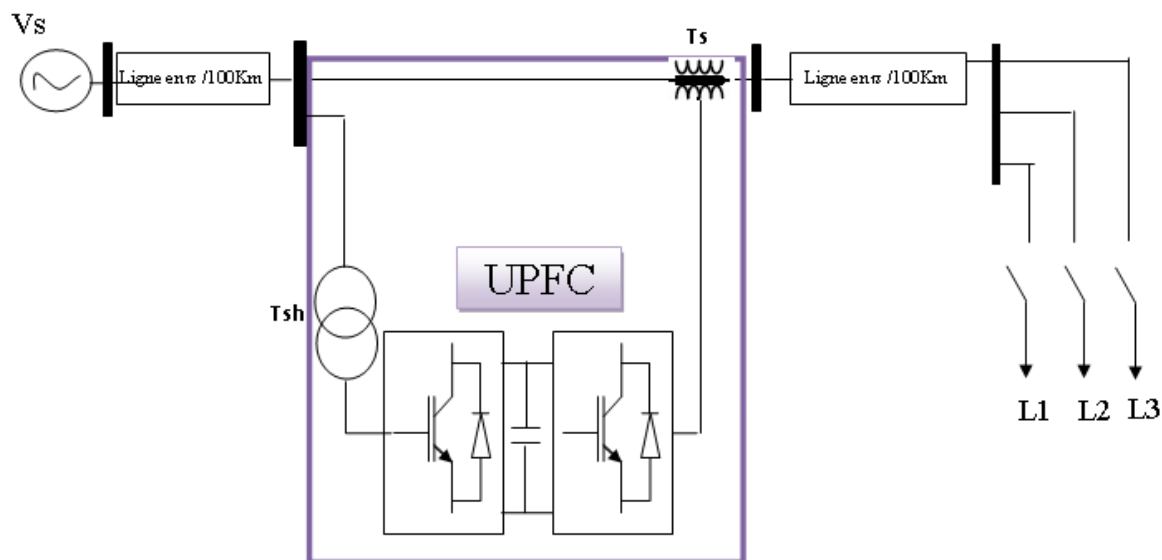


Figure (A-1) : Schéma global de réseau étudié.

### A-1-1-Générateur G

Le générateur G représente 4 générateurs en parallèle. Ses paramètres sont donnés dans le tableau suivant.

Tension Nominal (KV)	Puissance Nominal (MVA)	Fréquence (Hz)
400	3000	50

Tableau (A-1) : Caractéristique du générateur

### A-1-2-Ligne de transmission

La ligne de transmission est de type "CURLEW". Afin de modéliser la ligne avec un modèle en  $\pi$ , nous sommes obligés de considérer la longueur de chaque partie de ligne entre 80 km et 240 km. Pour avoir de bons résultats, nous avons modélisé chaque 100 km de ligne comme suit :

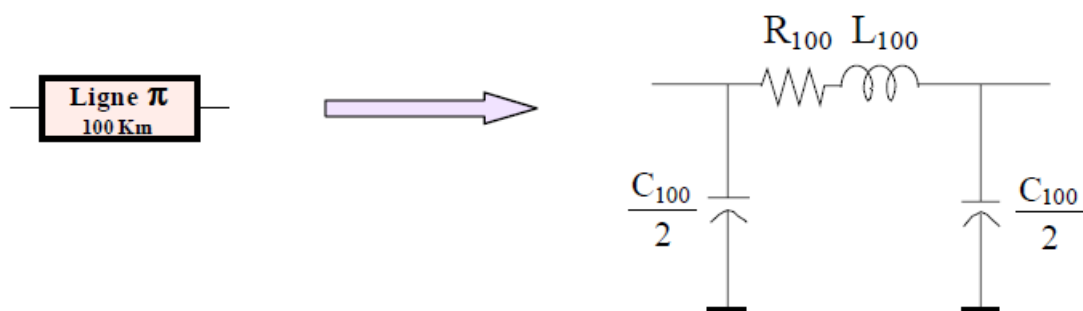


Figure (A-2) : Modèle de la ligne de transport

Ou :  $R_{100} = 3.2\Omega$  ;  $L_{100} = 103.5\text{mH}$  ;  $C_{100} = 1.1\mu\text{F}$ .

### A-1-3-Transformateur Tsh

Nous avons choisi la puissance de Tsh égale à celle de Ts. Les caractéristiques générales de ce transformateur sont :

2 enroulements en étoile,

<b>Puissance apparente</b> (MVA)	160
<b>Rapport de transformation</b> (KV)	20/400
<b>Inductance de fuite</b> (Xcc)	10%
<b>Pertes fer</b> (Pmag)	0.1%Sn
<b>Pertes à courant nominal</b> (Pcu)	0.4%Sn

Tableau (A-2) : Caractéristique du transformateur T<sub>sh</sub>

### A.1.4 Transformateur Ts

Nous avons choisi arbitrairement la puissance de Ts égale à 160 MVA. Les caractéristiques générales de ce transformateur sont :

2 enroulements en étoile,

<b>Puissance apparente</b> (MVA)	160
<b>Rapport de transformation</b> (KV)	20/63
<b>Inductance de fuite</b> (Xcc)	2.5%
<b>Pertes fer</b> (Pmag)	0.2%Sn
<b>Pertes à courant nominal</b> (Pcu)	8%Sn

Tableau (A-2) : Caractéristique du transformateur T<sub>s</sub>

---

**A-1-5-La charge**

Les paramètres des charges RL donnés dans le tableau (A-3)

<b>La charge</b>	<b>P (MW)</b>	<b>QI (MVAR)</b>
<b>Charge 1 (Ch1)</b>	30	30
<b>Charge 2 (Ch2)</b>	40	20
<b>Charge 3 (Ch3)</b>	25	15

**Tableau (A-3) : Les paramètres des charges.**



## Annexe B : Les onduleurs

### B-1-Onduleur à deux niveaux

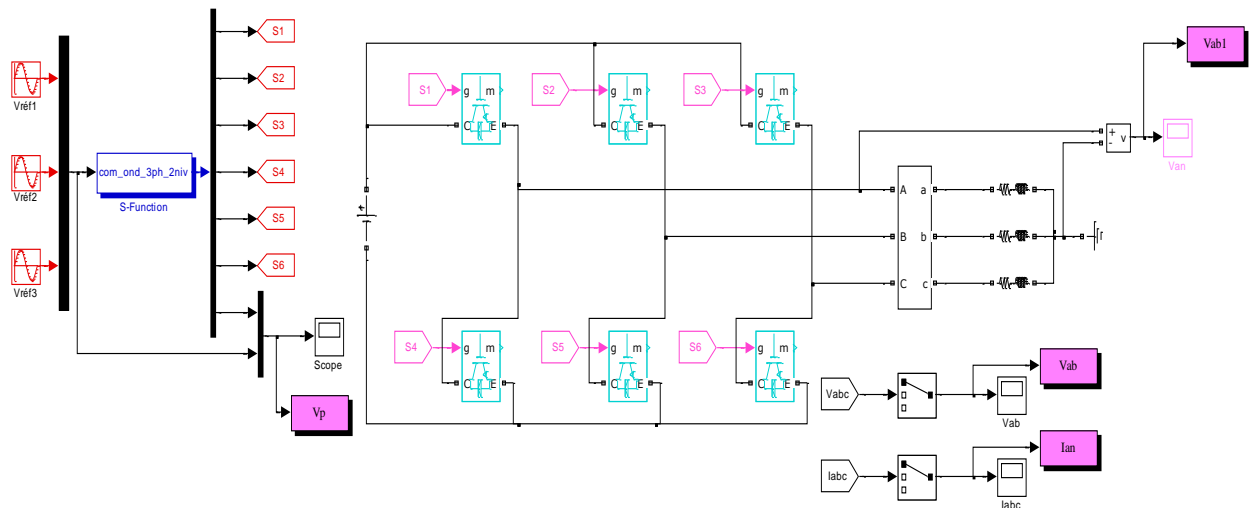


Figure (B-1) : Schéma de principe d'un onduleur à deux niveaux.

### B-1-Onduleur à trois niveaux

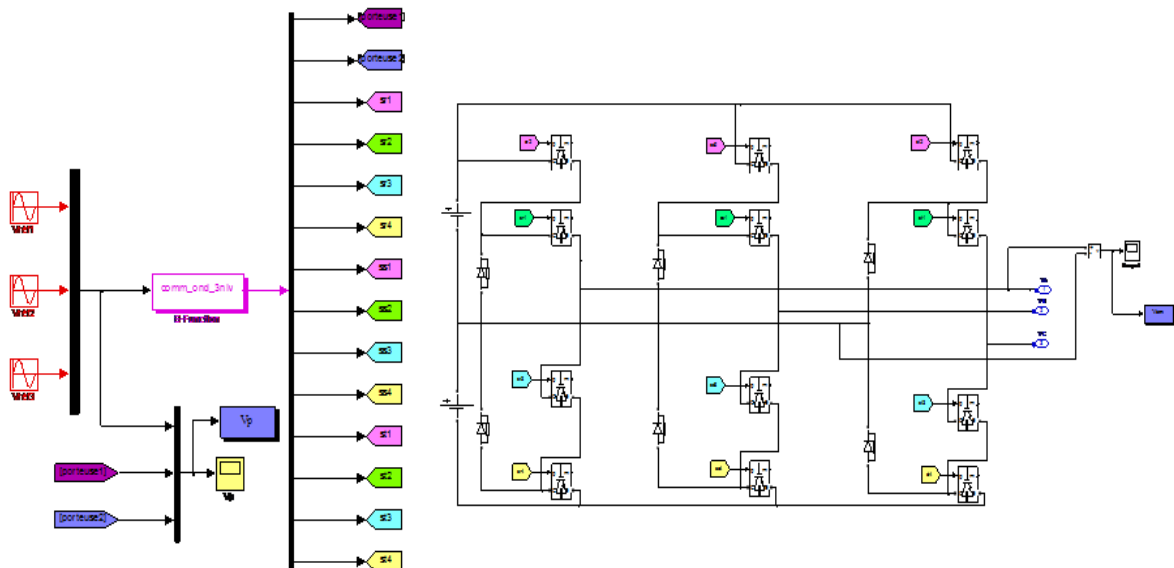


Figure (B-2) : Schéma de principe d'un onduleur à trois niveaux.

### B-3- Stratégie de commande par MLI :

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui consiste à déterminer les instants d'intersections d'une tension de référence sinusoïdale et d'une tension de modulation triangulaire.

La commande MLI de l'onduleur est caractérisée par les deux paramètres suivants :

✓ **L'indice de modulation « m » :**

Egale au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence.

$$m = \frac{f_p}{f_m}$$

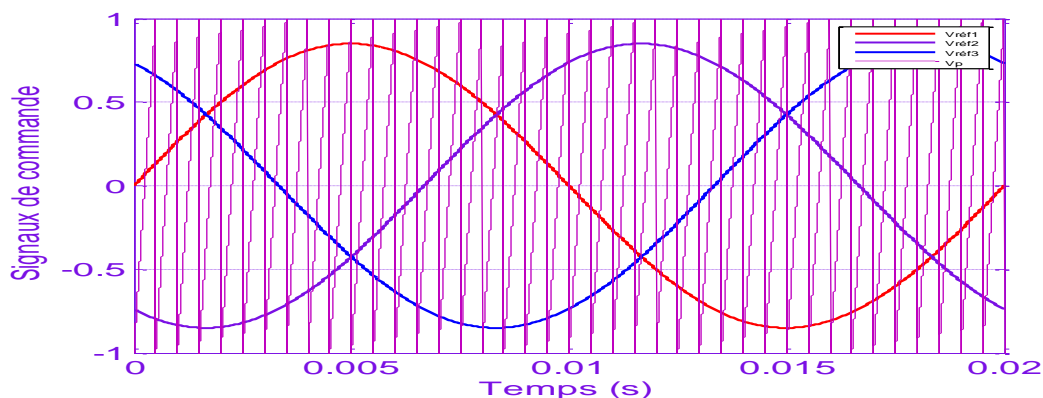
✓ **Le coefficient de réglage en tension « r » :**

Egale au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation.

$$r = \frac{V_m}{V_p}$$

#### B-3-1-La technique triangulo-sinusoïdale à une seule porteuse bipolaire

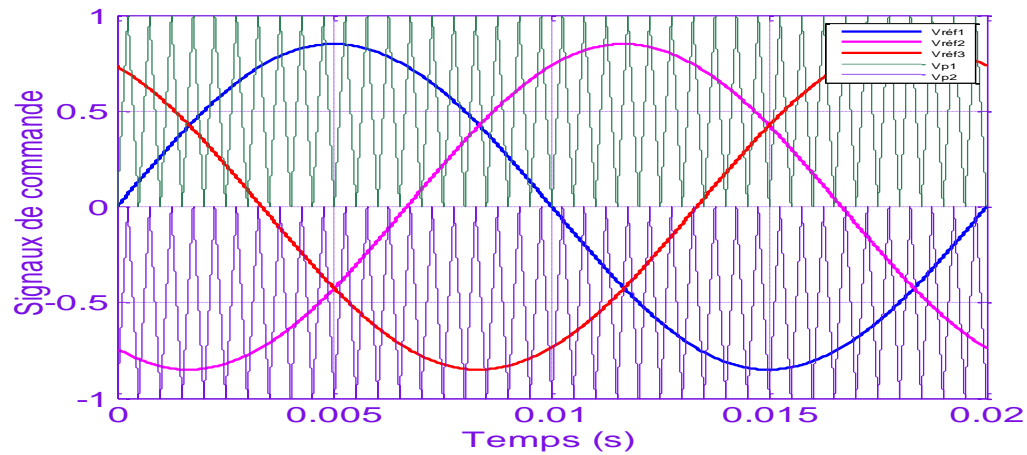
Cette stratégie est très connue pour les onduleurs à deux niveaux, [39]. Dans cette partie on donnera l'algorithme correspondant à l'onduleur à deux niveaux. Son principe général est de comparer une tension de référence à une porteuse bipolaire triangulaire.



**Figure (B-3) :** Principe de la commande SPWM avec une seule porteuse bipolaire.

### B-3-2-La technique triangulo-sinusoidale à deux porteuses unipolaires triangulaires

Cette stratégie est très connue pour les onduleurs à multi niveaux, Les signaux de commande d'un bras de l'onduleur sont déterminés par la comparaison de deux porteuses triangulaires et d'une référence sinusoidale.



**Figure (B-4) :** Principe de la commande SPWM avec deux porteuses unipolaires.

## Annexe C : Transformation de PARK

### C-1-Transformation de CONCORDIA

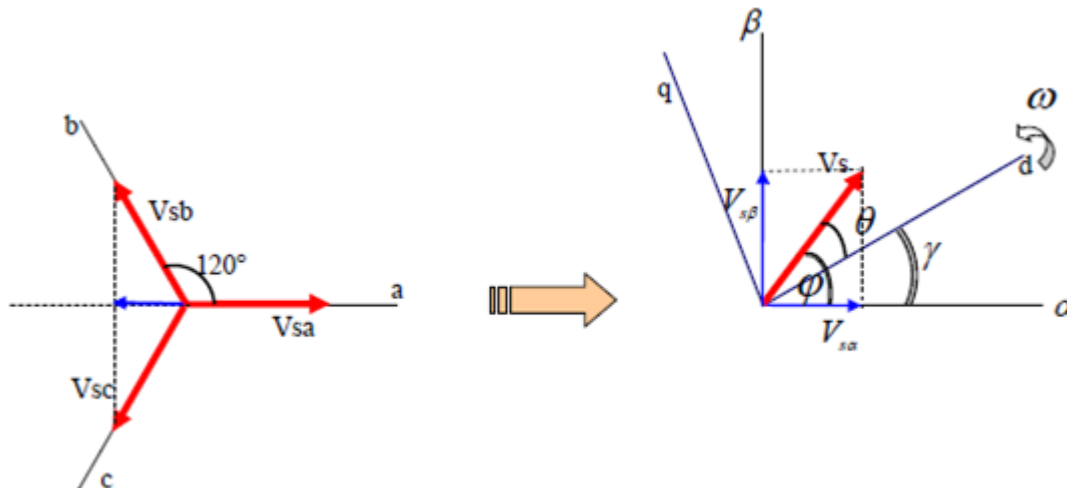
Cette transformation permet le passage d'un système triphasé équilibré à un système biphasé selon la figure suivante:

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

$$\begin{cases} V_{sa} = V_s \sin(\omega t) \\ V_{sb} = V_s \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{sc} = V_s \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Avec:

- $V_s$  : La tension efficace du système de tension.
- $\omega$ : La pulsation de ces tensions.



$$\begin{cases} V_{s\alpha} = K \left( 1V_{sa} - \frac{1}{2}V_{sb} - \frac{1}{2}V_{sc} \right) \\ V_{s\beta} = K \left( 0V_{sa} + \frac{\sqrt{3}}{2}V_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{sc} \right) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

Avec le coefficient de normalisation de Concordia  $K=2/3$

## Annexe D : PLL

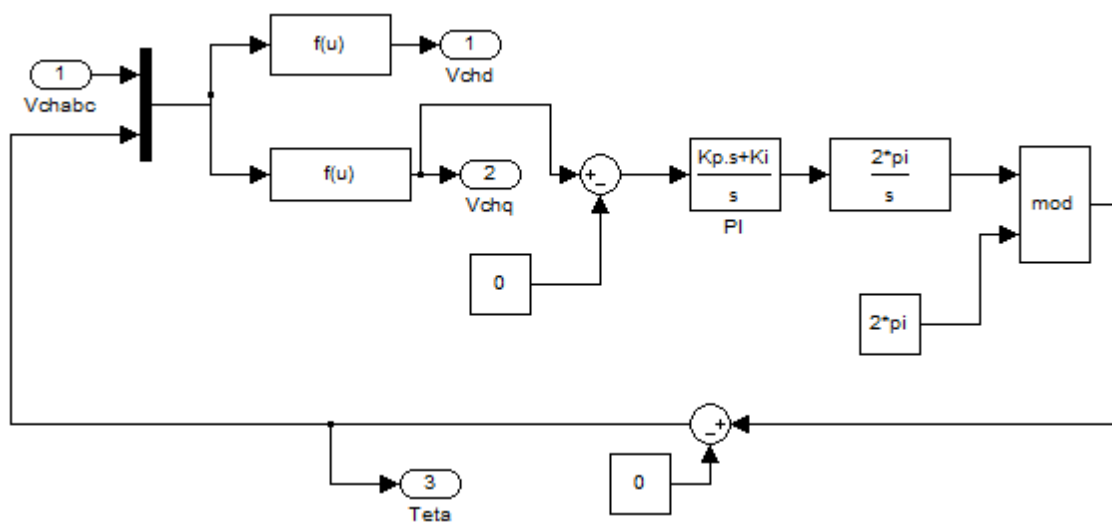
### D-1-Introduction

Etant donné que la tension du réseau est souvent perturbée et/ou déformée, et afin de généraliser l'application de la méthode d'identification à tout type de tension, un système à base de PLL (Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase) est proposé.

Nous avons utilisé deux types de PLL :

- Méthode basée sur la tension.
- Méthode basée sur la puissance.

Dans ce mémoire on utilise la méthode basée sur la tension comme la figure suivant :



**Figure (D-1) :** Schéma de simulation du système PLL

# Références Bibliographes

# *Références*

## *bibliographiques*

[1] : ESKANDAR GHOLIPOUR SHAHRAKI, Apport de l'UPFC à l'Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques, Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré Nancy-1 2003.

[2] : A.BOUZIDI et M.BOUCHAREB, Commande par Mode Glissant Floue d'un D-Statcom Multi-niveaux, Université de M'Sila 2011.

[3] : N. G. HINGORANI and L. GYUGYI, "Understanding FACTS", IEEE Press, New York, 2000.

[4] : Brahim Bekki, "Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d'un Réseau Electrique Haute Tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Septembre 2006.

[5] : L.BOUKARANA, Contrôle du Flux de Puissance d'un Réseaux Electrique 400 KV par l'UPFC, Thèse d'ingénieur d'état, Université de Batna, Mai 2011.

[6]: Z. Huang, Y. Ni, C.M. Shen, et al, "Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems - Modeling, Interface, Control Strategy, and Case Study", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 15, No. 2, pp. 817-824, May 2000.

[7]: L. Gyugui, "A unified power flow control concept for flexible ac transmission systems," IEEE Proceeding-C., Vol. 193, N°4, July 1992, pp.323-331.

- [8]: L. Gyugyl, "The Unified Power Flow Controller. A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No.2, April 1995, pp.1085-1093.
- [9]: L. Gyugyi T. R Rietman A. Edris , D. R Torgerson C. D. Schauda s. L. Williams," the unified power flow controller: a new approach to power transmission control", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995
- [10]: Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Yonggao Zhang, Jian Chen, "Control Scheme and Implementation of a Unified Power Flow Controller" Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and systems, 2005. Volume 2, 27-29 Sept. 2005 Page(s): 1170-1175.
- [11]: Azra Hassanovic, Ali Feliachi, "Modelling and control of the Unified Power Flow Controller (UPFC)" these pour obtention du degre de master en science de l'ingénieur university de Morgantown, West Virginia, 2000.
- [12]: K. Benrehal, A. Chaghi, "Unified Power Flow Control in Power Flow Control", in Proc2008 CEE'08 Electrical and Electronics Engineering, April 21-23, 2008.
- [13]: H. BÜHLER, Réglage de systèmes d'électronique de puissance, Volume 3- Presse Polytechnique Romande 1999.
- [14] : K.Benrehal, " Modélisation et simulation d'un système FACTS : UPFC", thèse de magistère, Université de Batna, Janvier 2009.
- [15]: N. Bruyant, "Etude et commande généralisés de filtres actifs shunt", Thèse de doctorat de l'université de NANTES, 25 Novembre 1999.
- [16] : Brahim Bekki, "Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d'un Réseau Electrique Haute Tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Septembre 2006.



[17]: B. Azzedine, L. Ahmed Amine "Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission En Courant Alternatif FACTS", Projet de fin d'Etudes, Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique. El-Harrache.Alger.

[18]: Eskandar Gholipour Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy 2003.

[19]: Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Jian Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller", publication IEEE 2005.

[20]: Z. Huang, Y. Ni, C.M. Shen, et al, "Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems - Modeling, Interface, Control Strategy, and Case Study", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 15, No. 2, pp. 817-824, May 2000.

[21]: Allaoui Tayeb, "réglage robuste de L'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissance dans un réseau électrique", mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran – 04/2002.

[22]: Nitus Voraphonpiput et Somchai Chatratana, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.

[23]: Eskandar Gholipour Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy 2003.

[24]: H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-20, No. 3, May/June 1984.

- [25]: Boucheritte wafa, « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Thèse de magistère de l'Université de Biskra.
- [26]: B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Edition Practice Hall, 1986.
- [27] : F. Labrique, G. Séguier and R. Bausière, "Les Convertisseurs de L'électronique de Puissance, La Conversion Continu Alternatif", Tec Doc Paris, 1995.
- [28]: O. Bouakaz, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux, Fonctionnement Symétrique et Asymétrique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [29] : Rabia Guedouani, "Etude et Commande des Différentes Cascades Redresseurs de Tension Triphasé MLI - Onduleur de Tension à Cinq Niveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone de Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2009.
- [30]: A. N. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol.1A-17, September/October 1981, pp.518-523.
- [31] : Slaven Kincic, "Onduleur à Niveaux Multiples et son Application en Compensation de la Puissance Réactive", Mémoire de Magister, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, Mai 2000.
- [32] : J. S. Manguelle, "Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques Alimentés par Transformateurs Multi-secondaires Basse-fréquence: Réactions au Réseau d'Alimentation", Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
- [33] : Ouahiba Fadli, "Modélisation et Commande non Linéaire de l'Association : Machine Synchrones à Aimants Permanents-Onduleur de Tension à Trois Niveaux", Mémoire de Magister, Université de Batna, Juin 2006.
- [34] Hind Djeghloud, "Filtrage Actif de Puissance", Thèse de Doctorat, Université Mentouri,

Constantine, Décembre 2007.

[35] A. M. Trzynadlowski, "Introduction to Modern Power Electronics", Chapter 2, pp. 65-91, & Chapter 7, pp. 273-364, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1998.

[36] Djafer Lalili, "MLI Vectorielle et Commande non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multiniveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Avril 2009.

[37] : TOUIL Abdelmalak, « Analyse, Commande et Modélisation des Onduleurs de Tension à deux et à trois Niveaux : Application à la Conduite d'une Machine Asynchrone », Mémoire de Master, Université de Batna, 2011.

[38] : BOUAKEZ Ouahid, « Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multi-Niveaux, Fonctionnement Symétrique et Asymétrique ». Mémoire de Magister 2005.

[39] : K. Ghedamsi, « Étude et Réalisation de Différents Stratégies MLI de Commande de l'Onduleur Triphasé à Trois Niveaux ». Mémoire de Magister E.M.P 2001.

[40] : M. Kamil et S. Nouri, "Commandes non Linéaires d'un Filtre Actif Parallèle", Mémoire de Fin d'Etudes, Université de M'sila, 2010.

[41]: H. W. Van Der Broeck, H. C. Skudelny and G. V. Stanke, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors", IEEE Transactions On Industrial Applications, Vol. 24, No. 1, January/February 1988, pp. 142-150.

[42] : Djafer Lalili, "MLI Vectorielle et Commande non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multi-niveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Avril 2009.

[43] : C. Gombert, "Simulation Temps-réel des Dispositifs d'Electronique de Puissance Dédiés aux Réseaux d'Énergie Electrique", Mémoire de Magister, Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2005.

[44]: P. F. Seixas, M. A. Severo. Mendes, P. Donoso Garcia, and A. M. N. Lima, “An Algebraic PWM Method for Three-level Voltage Source Inverter”, Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, Rome, Italy, Vol. 4, October 2000, pp. 2177-2184.

[45] : BOUZIDI Mansour, BENZAADI Abderrahim, « Commandes non linéaires d’un redresseur PWM triphasé ». Mémoire d’ingénieur, Université de M’sila, 2009.

[46] : S. Rafa, H. Zeroug, L. Hocine, K. Boudjit, « Simulation sur Matlab/Simulink et implémentation sur DSP/FPGA de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (PMSM) alimenté par un onduleur de tension à Modulation vectorielle (SVM) ». Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne. BP N°32 El Alia, Alger, Algérie.

[47] : A. Videt, “Variateur de Vitesse à Impact Electromagnétique Réduit : Onduleur Multi-niveaux et Nouvelles Stratégies de Modulation”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2008.

[47] : K. YAKOUB, « Réduction des effets de la tension homopolaire dans les associations onduleurs multi-niveaux moteur à induction ». Mémoire de Magister, Université de Batna.

[48] : Said .Bentouba, Aek.Slimani, Med.Seghir.Boucherit, « Stratégies de Commande et Modélisation de l’Onduleur à Cinq Niveaux ». Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE’10, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie.

[49] : S. Barkati, “Modélisation et commande d’un onduleur à sept niveaux à diodes flottantes Application à la conduite d’une machine asynchrone”, thèse de doctorat en électrotechnique, ENSP Alger, Juin 2008.

[50]: Zhu. Pengcheng, L. Liming, L. Xiaoyuan, Y. Kang, J. Chen "A Novel Control Scheme For a Unified Power Flow Controller", IEEE Transaction 0-7803-9193-2006.