

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

BENNOUNA CHOUAIB

HADJOU DJ MOHAMMED ISLAM

**Thème:**

Application de la logique floue pour la  
commande d'un contrôleur universel  
de l'écoulement de puissance (UPFC)

Soumis au jury composé de :

M <sup>f</sup>	MAA	Président	UKM Ouargla
M <sup>f</sup> LAROUCI Benyekhlef	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>f</sup>	MAA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

## **Remerciements :**

*Nous tenons à remercier tout d'abord DIEU le tout puissant qui nous adonné, durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi pour arriver a ce jour.*

*Nous ne pouvons réellement trouver, les expressions éloquentes que méritenotre encadreur : Mr LAROUCI BENYEKHLEF, afin de le remercier pour ça sympathie, ses encouragement, son aide, son dévouement pour le travail et sa présence au cours de cette étude*

*Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer, d'examiner, d'enrichir ce travail.*

*Nos remerciements vont également à tous les enseignants et les responsables ayant contribué de a notre formation.*

*Nos remerciements les plus chaleureux vont à nos parents qui sont la plus grande cause de notre réussite, pour ne pas dire la seule, et ce grâce a leur conseils leur sacrifices et tout ce qu'ils nous ont fait, car quoiqu'on fasse on leur sera toujours redevable sans eux ce travail n'aurait jamais pu voir le jour ce diplôme non-plus.*

## **Dédicace :**

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail. Je tiens à remercier :

Nos parents

que ont toujours avec leurs précieuses prières poussé fort vers meilleur,

Nos chers frères et sœurs

Tous nos amis

Tous nos professeurs qui nous ont tant appris.

Pour toute ma famille d'électrotechnique.

Pour tout ce que j'aime

CHOUAIB.B

ISLAM.H

## Sommaire

Introduction générale	
Remerciements	
Sommaire	
Liste Des abréviations	
Nomenclature	
<b>Chapitre I : Les Systèmes FACTS</b>	
I-1.Introduction	4
I-2.Définition et rôle des dispositifs FACTS	4
I-3.Classification des dispositifs FACTS	5
I-4.Types des dispositifs FACTS	7
I-4.1.Compensateurs parallèles	7
I-4-1.1 .Compensateurs parallèles à base de thyristor	8
I-4-1-2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors	11
I-4-2. Compensateurs series	12
I-4-2-1. Compensateurs séries à base de thyristor	12
I-4-2-2. Compensateurs séries à base de GTO thyristor	14
I-4-3.Compensateurs hybrides série-parallèle	15
I-4-3.1. Compensateurs hybrides à base de thyristor	15
I-4-3.2. Compensateurs hybrides à base de GTO thyristor	17
I-5.Coût des dispositifs FACTS	19
I-6.Applications et avantages techniques des différentes technologies des FACTS	20
I-7.Conclusion	21
<b>Chapitre II Modélisation de l'UPFC</b>	
I-2 Introduction	23
II.2.Modélisation de l'UPFC	23
II.2.1.Principe de fonctionnement de l'UPFC	23
II.2. 2.Représentation du système en triphasé	24
II.3.Transformation de Park	25
II.4.Equations dynamiques du compensateur série	26
II.5.Equations dynamiques du compensateur parallèle	28
II.6.Equations dynamiques du circuit continue	29
II.7.Calcul des puissances instantanées de l'UPFC	29
II.9.Conclusion	30
II.8.Control del'UPFC	30
<b>CHAPITRE III : COMMANDE PI DE L'UPFC</b>	
III-1 Introduction	32
III.2.RESULTATSDESSIMULATIONS	33
III.3. Prise en compte de l'augmentation de l'inductance L et de la résistance r	34
III.4. Prise en compte de la diminution de l'inductance L et de la résistance r	39
III.5.Conclusion	47
<b>CHAPITRE IV : COMMANDE FLOUE DE L'UPFC</b>	
IV.1. Introduction	49
IV.1. Logique floue et ensembles flous	49
IV.2. Principe d'une commande floue	50
IV.2.3. Structure du correcteur flou	51

IV.3. Contrôle flou de l'UPFC	52
IV.3.1. Structure des contrôleurs flous utilisés	52
IV.3.1.1. L'opération de défuzzification	52
IV.3.1.2. Base de règles d'inférence	55
IV.3.1.3. L'opération de défuzzification	56
IV.4. Les résultats des simulations	58
IV.4.1. Prise en compte d'une perturbation	62
4.2. Prise en compte de l'augmentation de l'inductance de fuite L	64
IV.5. Conclusion	66
Conclusion gé	
Référence	
Résumé	

## Liste du Figure

Figure : I-1 Système avec un compensateur parallèle	8
Figure I-2. Schéma du TCR	9
Figure I-3. Schéma du TSC	9
Figure I-4. Schéma du SVC	10
Figure I-5. Caractéristique d'un SVC	10
Figure : I-6 Structure du TCBR	11
Figure I-7 : Schema du STATCOM	11
Figure : I-8 Système avec un compensateur série	12
Figure.I-9. Deux schémas de compensations série typiques avec un condensateur série fixe et un TCSC	13
Figure : I-10 Schéma du TSSC	13
FigureI-11 : Schéma du TCSR	14
Figure II-12: Structure et schéma équivalent d'un SSSC	14
Figure II-13: Caractéristique statique du SSSC	15
Fig 1-14 : Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR	16
Figure : I-15 Schéma du TCVR	16
Figure : I-16 schéma du DPFC	17
Figure : I-17: schéma de base d'un UPFC	18
Figure I-18. Schéma de base d'un IPFC	18.....
Fig.I-19. (a) structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS	19
Fig.II. 1. Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique	23
Figure II-2: modèle du système interconnexion et UPFC	24
Fig. II-3 schéma simplifié de la partie série de l'UPFC	27
Fig. II-4 schéma simplifié de la partie parallèle de l'UPFC	28
Fig 1.III- schéma block du contrôleur de la partie shunt de L'UPFC	32
Fig 2.III- schéma block du contrôleur de la partie série de L'UPFC	32
Fig.3. III- schéma block de correcteur PID	33
fig.III.4.Variation du courant triphasé	34
fig.III.5.Variation du courant $i_{rd}(A)$	34
fig.III.6.Variation du courant $i_{rq}(A)$	34
fig.III.7.Variation du courant $i_{sd}(A)$	34
fig.III.8.Variation du courant $i_{sq}(A)$	34
fig.III.9.Variation de tension $V_{abc\text{serie}}(v)$	35
fig.III.10.Variation de tension $V_{abc\text{ shunt}}(v)$	35
fig.III.11.Variation de tension $V_{cd}V_{cdref}(v)$	35
fig.III.12.Variation de tension $V_{cq}V_{cqref1}(v)$	35
fig.III.13.Variation de tension $V_{pd}V_{pdref}(v)$	35
fig.III.14.Variation de tension $V_{pq}V_{pqref1}(v)$	35
fig.III.15. Variation de la puissance réactive $Q_s(VAr)$	36
fig.III.16. Variation de la puissance active $p_s(W)$	36
fig.III.17. Variation de la puissance réactive $Q_r(VAr)$	36
fig.III.18. Variation de la puissance réactive $P_r(W)$	36
fig.III.19.Variation du courant triphasé de la partie série $i_{abc}$	36
fig.III.20.Variation du courant $i_{rd}(A)$	36
fig.III.21.Variation du courant $i_{rq}(A)$	37
fig.III.22.Variation du courant $i_{sd}(A)$	37
fig.III.23.Variation du courant $i_{sq}(A)$	37

fig.III.24.Variation de tension $V_{abcserie}$ (v)	37
fig.III.25.Variation de tension $V_{abcshunt}$ (v)	37
fig.III.26.Variation de tension $V_{cdVcdref}$ (v)	38
fig.III.27.Variation de tension $V_{cqVcqref1}$ (v)	38
fig.III.28.Variation de tension $V_{pdVpdref}$ (v)	38
fig.III.29.Variation de tension $V_{pqVpqref1}$ (v)	38
fig.III.30. Variation de la puissance réactive $Q_r$ (VAR)	38
fig.III.31. Variation de la puissance active $P_s$ (W)	38
fig.III.32. Variation de la puissance active $P_r$ (W)	39
fig.III.33. Variation de la puissance réactive $Q_s$ (Var)	39
fig.III.34.Variation du courant triphasé de la partie série $I_{abc}$	39
fig.III.35.Variation du courant $I_{rd}(A)$	39
fig.III.36.Variation du courant $I_{rq}(A)$	39
fig.III.37.Variation du courant $I_{sd}(A)$	39
fig.III.38.Variation du courant $I_{sq}(A)$	40
fig.III.39.Variation de tension $V_{abcserie}$ (v)	40
fig.III.40.Variation de tension $V_{abcshunt}$ (v)	40
fig.III.41.Variation de tension $V_{cdVcdref}$ (v)	40
fig.III.42.Variation de tension $V_{cqVcqref1}(v)$	40
fig.III.43.Variation de tension $V_{pdVpdref}(v)$	41
fig.III.44.Variation de tension $V_{pqVpqref1}(v)$	41
fig.III.45. Variation de la puissance active $p_r$ (W)	41
fig.III.46. Variation de la puissance active $p_s$ (W)	41
fig.III.47. Variation de la puissance réactive $Q_r$ (W)	41
fig.III.48. Variation de la puissance réactive $Q_s$ (W)	41
Fig.III.49. Variation du courant triphasé de la partie shunt	42
fig.III.50.Variation du courant $I_{rd}$ (A)	42
fig.III.51.Variation du courant $I_{rq}$ (A)	42
fig.III.52.Variation du courant $I_{sd}$ (A)	42
fig.III.53.Variation du courant $I_{sq}$ (A)	42
fig.III.54.Variation de tension $V_{abcserie}$ (v)	43
fig.III.55.Variation de tension $V_{abcshunt}$ (v)	43
fig.III.56.Variation de tension $V_{cdVcdref}$ (v)	43
fig.III.57.Variation de tension $V_{cqVcqref1}(v)$	43
fig.III.58.Variation de tension $V_{pdVpdref}$ (v)	43
fig.III.59.Variation de tension $V_{pqVpqref1}$ (v)	43
fig.III.60. Variation de la puissance réactive $Q_s$ (Var)	44
fig.III.61. Variation de la puissance réactive $Q_r$ (VAR)	44
fig.III.62. Variation de la puissance active $P_r$ (W)	44
fig.III.63. Variation de la puissance active $P_s(W)$	44
Fig.III.64. Variation du courant triphasé de la partie shunt	45
fig.III.65.Variation du courant $I_{rd}$ (A)	45
fig.III.66.Variation du courant $I_{rq}$ (A)	45
fig.III.67.Variation du courant $I_{sd}$ (A)	45
fig.III.68.Variation du courant $I_{sq}$ (A)	45
fig.III.69.Variation de tension $V_{abcserie}$ (v)	46
fig.III.70.Variation de tension $V_{abcshunt}$ (v)	46
fig.III.71.Variation de tension $V_{cdVcdref}$ (V)	46
fig.III.72.Variation de tension $V_{cqVcqref1}$ (V)	46

fig.III.73.Variation de tension $V_{pd}V_{pdref}(v)$	46
fig.III.74.Variation de tension $V_{pq}V_{pqref1}(v)$	46
fig.III.75. Variation de la puissance réactive $Q_r(W)$	47
fig.III.76. Variation de la puissance réactive $Q_s(W)$	47
fig.III.77. Variation de la puissance active $P_s(W)$	47
fig.III.78. Variation de la puissance active $P_r(W)$	47
Fig.IV.1. Exemple de fonctions d'appartenance	50
Fig.IV.2. structure d'une commande floue	50
Fig.IV.3. Structure du correcteur flou de type PD	52
Fig.IV.4.Système d'inférence flou utilisé pour le contrôle flou des courants	53
Fig.IV.5.Système d'inférence flou utilisé pour le contrôle flou de la tension continue.	53
Fig.IV.6.Sous-ensembles flous des entrées et de sortie du régulateur flou de courant	54
Fig.IV.7.Sous-ensembles flous des entrées et de sortie du régulateur flou de tension continue.	55
Fig.IV.8.Base de règles d'inférence.	55
Fig.IV.9.Base de règles d'inférence.	56
Fig.IV.10.L'opération de défuzzification du régulateur flou du courant	56
Fig.IV.11.L'opération de défuzzification du régulateur flou de tension continue	57
Fig.IV.12. Surface de commande de régulateur de courant	57
Fig.IV.13. Surface de commande de régulateur de tension continue	57
Fig.IV.14. Variation de puissance active $p_s$	58
Fig.IV.15. Variation de puissance active $p_r$	58
Fig.IV.16. Variation de la puissance réactive $Q_s$	59
Fig.IV.17. Variation de la puissance réactive $Q_r$	59
Fig.IV.18. Variation de $i_{ds}$	60
Fig.IV.19. Variation de $i_{qs}$	60
Fig.IV.20. Variation du courant triphasé de la partie série	61
Fig.IV.21. Variation du courant triphasé de la partie série	61
Fig.IV.22. Variation de tension $V_{dc}$	62
Fig.IV.23. Variation de $p_s$	62
Fig.IV.24. Variation de $Q_s$	63
Fig.IV.25. Variation du courant $i_{ds}$	63
Fig.IV.26. Variation du courant triphasé de la partie série	64
Fig.IV.27. Variation du courant triphasé de la partie série	64
Fig.IV.28. Variation de $p_s$	65
Fig.IV.29. Variation de $Q_s$	65

## Liste de tableau

Tableau:I-1 Principaux dispositifs des FACTS	5
Tableau: I-2 Bénéfices techniques des principaux dispositifs FACTS	18



## Liste Des abréviations

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
GTO	Gate Turn Off
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller
SSSC	Static Synchronous Série Capacitor
IGBT	Insulate Gate Bipolar Transistor
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
SVC	Static Var Compensator
TCBR	Thyristor Control Breaking Resistor
TCSC	Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TCSR	Réactances série contrôlé par thyristors
TSSR	Thyristor Switched Series Reactor
TCPST	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer
TCPAR	Régulateur d'angle de phase commandé par thyristor
TCVR	Régulateur de tension commandé par thyristor
DPFC	Distributed Power-Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller
SPS	Static Phase Shifter

## Nomenclature

$R_{se}$	Résistance du transformateur série couplé par la résistance de la ligne
$X_{se}$	Réactance du transformateur série couplé par la réactance de la ligne
$L_{se}$	Inductance du transformateur série couplé par la inductance de la ligne
$R_{sh}$	Résistance du transformateur shunt
$X_{sh}$	Réactance du transformateur shunt
$\omega$	Fréquence synchrone du système en (rd/sec)
$V_{se}$	Tension de sortie du convertisseur série
$V_{sh}$	Tension de sortie du convertisseur shunt
$d$	Axes direct et en quadrature
$q$	Axes en quadrature
$V_{dc}$	Tension du circuit continu
$c$	Capacité du condensateur du circuit continu
$P_e$	Puissance absorbée par le compensateur série et fournie au circuit commun
$P_{ep}$	Puissance active fournie par le compensateur parallèle et absorbée par le compensateur série

## **Introduction générale :**

Durant les dix dernières années, l'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les systèmes actuels, la cogénération de l'énergie, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité et le respect de l'environnement.

Plusieurs techniques de compensation traditionnelle du réseau ont été utilisées. Cela comprend la technique de compensation shunt qui consiste en un groupe de condensateurs en parallèle avec l'inductance équivalente de la ligne de transport qui intervient sur la tension à chaque barre, par contre la compensation série consiste en un groupe de condensateurs en série avec l'inductance équivalente de la ligne de transport qui intervient sur l'impédance équivalente de la ligne de transport. L'importance de la compensation série dans le but d'améliorer la capacité de transport des lignes, a été reconnue et n'a fait que croître au cours des dernières années.

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.

L'UPFC est l'un le plus des plus performants des compensateurs flexibles (FACTS). Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance ; la tension, l'impédance et l'angle de transport 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 réparation de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance. La majorité des études récentes concernent les stratégies de commande classiques et modernes de ces dispositifs comme la commande PID, la commande floue

Les techniques de compensation traditionnelle est abordée au premier chapitre.

Et une présentation générale des différentes structures de FACTS est abordée au deuxième chapitre.

Afin d'étudier le comportement du dispositif UPFC et la synthèse de la loi de commande, le troisième chapitre développe le modèle choisi de l'UPFC. La conception, les principes de fonctionnement, le modèle mathématique, l'identification de références et les blocs de commande de base de l'UPFC. Nous utiliserons une stratégie de commande PI-D classique pour contrôler les deux parties (série et parallèle) de cette dispositif.

Le quatrième chapitre présente les principes de la commande floue. Dans ce chapitre nous présentons également une brève introduction de la théorie de commande floue et les différents régulateurs flous connus. Nous utiliserons le régulateur PI flou pour contrôler les deux composantes de courant de la partie shunt.

Le logiciel Matlab/simulink est l'un des meilleurs logiciels pour la simulation dans le domaine de contrôle et de commande des systèmes FACTS. Nous interprétons les résultats des simulations pour chaque stratégie de commande que nous étudierons dans les suivantes sections.

# Chapitre I : Les Systèmes FACTS

**I-1.Introduction :**

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limité à cause des limites thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées. Face à ce problème et devant les contraintes environnementales, écologiques et économiques de reconstructions de nouvelles lignes, 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 et d'augmenter leurs capacités de transfert.

Aussi ces réseaux électriques de taille importantes seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport à ces nouveaux systèmes FACTS à base d'interrupteurs statiques et de court temps de réponse (moins d'une seconde). Aujourd'hui cette technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité. [1]

**I-2.Définition rôle des dispositifs des FACTS :**

“FACTS” est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT....), Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

Ces équipements contrôlent dynamiquement ensemble ou séparément les différents paramètres du réseau : tension, impédance, la phase du réseau Ils sont utilisés pour améliorer, d'une façon générale les performances d'un réseau (stabilité, capacité de transport...) Les FACTS (abréviation anglaise de Flexible AC Transmission Systèmes), sont définis comme suit :

Ceux sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance. Ils peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

Il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettant 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 créés par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions. [4]

Selon l'IEEE la définition du terme FACTS est comme suit : systèmes flexibles de transmission à courant alternatif sont des systèmes contrôlables basés sur l'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour améliorer la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance.

Les dispositifs FACTS sont utilisés principalement dans les contextes suivants :

- Pour améliorer la commande du réseau. De plus, ils peuvent aussi être munis des circuits de commande auxiliaire visant à améliorer l'amortissement des oscillations de puissance et d'accroître la réserve de ST.
- Ils ont été développés pour améliorer les performances de la transmission du courant alternatif sur de longues distances et le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant la puissance réactive lorsque la tension est trop basse, ou en absorbant la puissance réactive lorsque la tension est trop élevée.
- Ils agissent en contrôlant les transits de puissances et l'impédance série des lignes de transmission et en ajustant l'angle de phase.
- Ces dispositifs offrent des solutions avancées en tant que solutions de rechange utile à la construction de nouvelles lignes de transmission. des avantages potentiels d'une flexibilité accrue, d'un coût et d'un impact environnemental réduit.
- Cette technologie FACTS requis pour les systèmes énergétiques afin d'améliorer les marges de stabilité, de contrôler le flux de puissance et d'assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie pratiquement sans limite. [2]

### **I-3. Classification des dispositifs FACTS :**

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés .

1. La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
  2. La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO et les transistors de puissance. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
  3. Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau. [8]
- **Compensateurs séries:** ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission.
  - **Compensateurs shunts:** Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds.
  - **Compensateurs hybrides série-shunt:** c'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. [1]



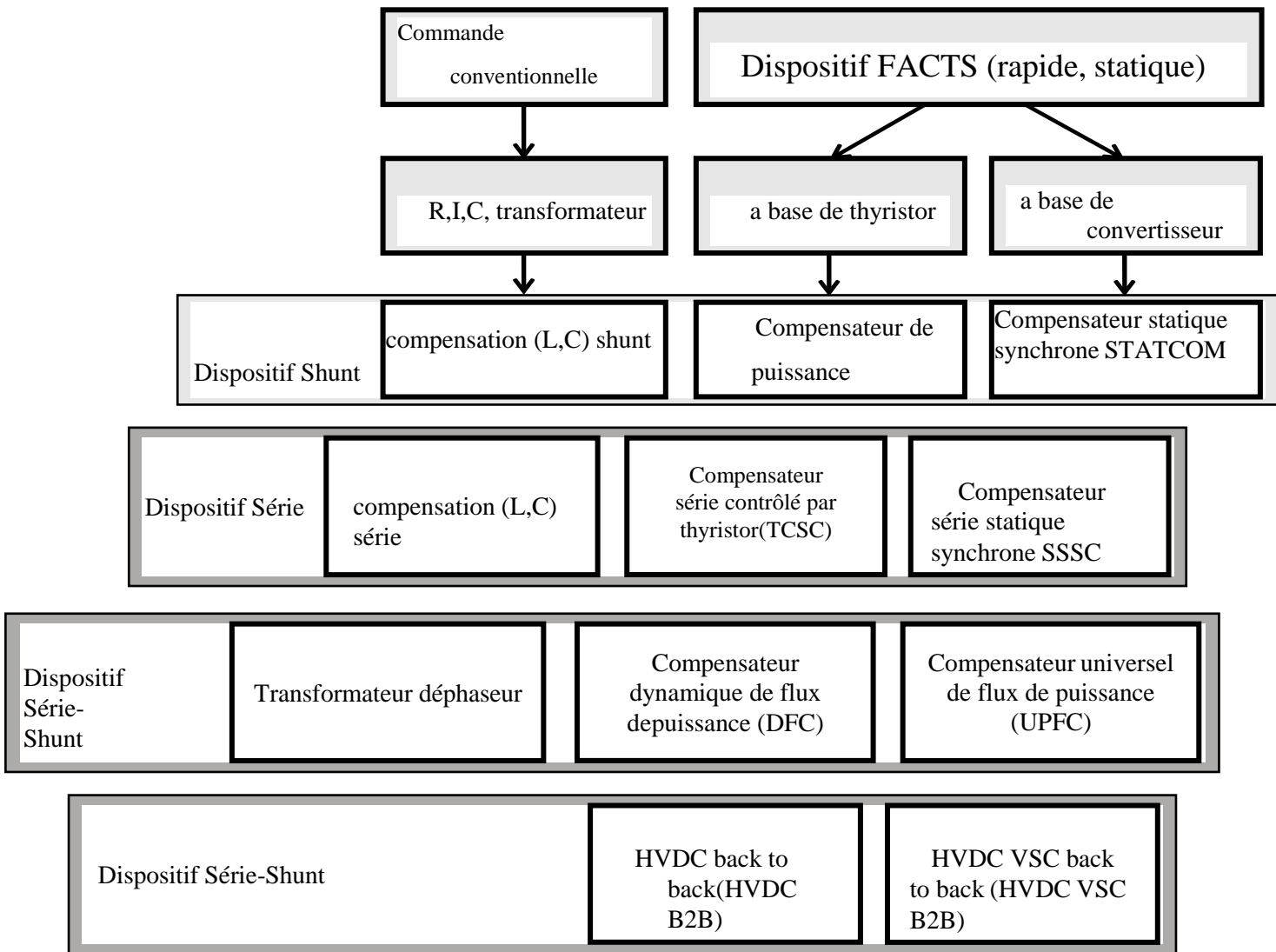


Tableau:I-1 Principaux dispositifs des FACTS [4]

**I-4.Type des dispositifs FACTS :**

**I-4-1.Compensateurs shunts (parallèles) :**

Selon la demande des consommateurs, les lignes électriques doivent transporter des puissances actives et aussi des puissances réactives.

Afin d’éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d’interconnexion. L’apparition d’équipements utilisant l’électronique de puissance revient vers la fin des années soixante 60. L’avantage de ces dispositifs permet d’éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction assez lente, et d’avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués

essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur, le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif. [2]

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau à travers les points de raccordement. La connexion d'une impédance variable en parallèle sur le réseau électrique résulte en une consommation ou une injection d'un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. [4]

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

#### I-4.1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristor :

La tâche principale d'un compensateur parallèle est généralement de fournir un support de tension dans le réseau électrique. Cependant, ils peuvent également servir à améliorer la ST dans un réseau électrique et à amortir les oscillations de puissance. [2]

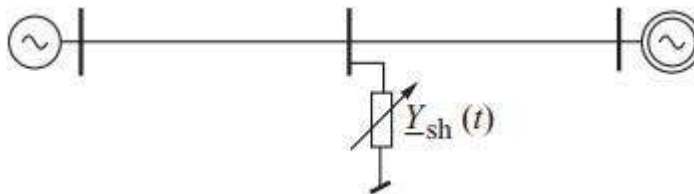


Figure : I-1 Système avec un compensateur parallèle [2]

##### I-4.1.1.1. TCR (Thyristor Controlled Reactor)

Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la figure :I-2, la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors .

Un thyristor se met à conduire quand un signal de Gâchette lui est envoyé, et la tension à ses bornes est positives, il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule.

Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance réactive dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive. Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance . [6]

#### I-4.1.1.2. TSC : (Thyristor Switched Capacitor)

Un TSC est une capacité parallèle à un thyristor, dont la réactance effective varie de manière progressive par une opération à conduction totale ou nulle de la valve à thyristor.

En appliquant le mode marche et arrêt sur le thyristor (sans contrôle de l'angle). La valeur de la réactance peut être contrôlée pas à pas. La Figure : I-3 montre le schéma d'un TSC. La structure est composée d'un condensateur placée en série avec deux thyristors montés en parallèles. Le but de l'inducteur dans le composant est de limiter l'effet transitoire des commutateurs et aussi de faire converger le courant et de créer un filtre pour éliminer les harmoniques. La génération d'harmoniques dans un TSC est très faible. Chaque fois que le commutateur à thyristor est activé, le condensateur sera dans le circuit et génère une puissance réactive jusqu'à ce que le signal atteigne la gâchette du thyristor. Un TSC a une structure et un contrôle simples et il est également moins coûteux. Le contrôle de phase peut être réalisé simplement et ce composant ne générera pas

d'harmoniques. Ce composant a moins de pertes que les autres modèles. La réponse dynamique d'un TSC est très rapide et mesure environ 0,5 à 1 cycle. [2]

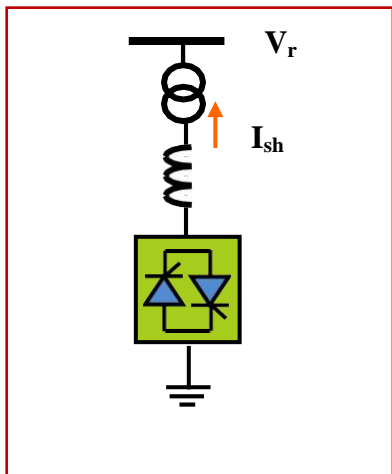


Figure I-2. Schéma du TCR [6]

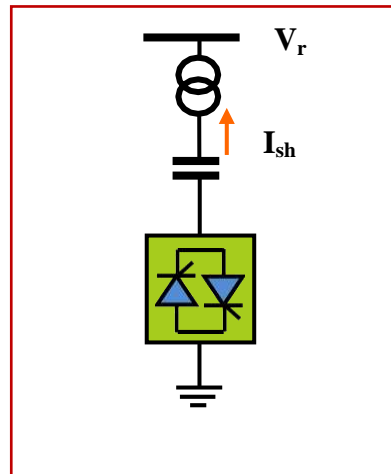


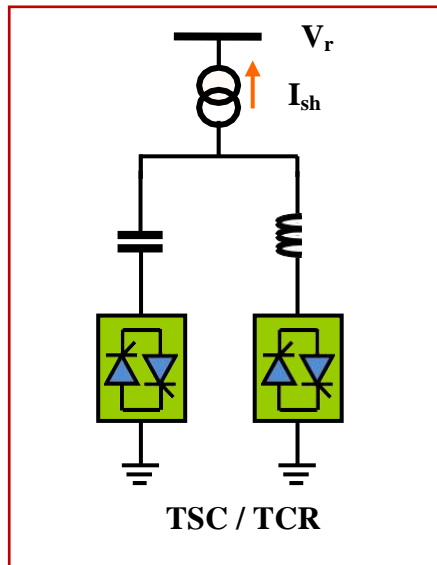
Figure I-3. Schéma du TSC [6]

#### I-4.1.1.3. SVC (Static Var Compensator)

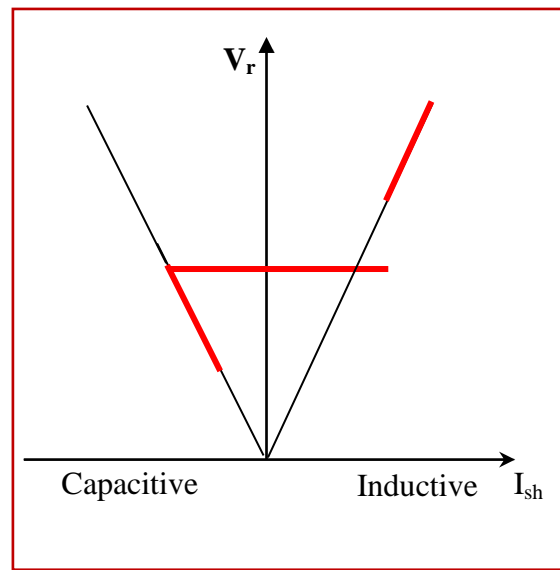
Le SVC est connecté en parallèle avec la ligne, et peut absorber ou générer la puissance réactive, sa sortie est ajustée pour échanger le courant inductif ou capacitif, ceci pour maintenir ou contrôler la tension. La structure de base de ce contrôleur est l'association des dispositifs TCR et TSC en parallèles connectés au réseau à travers un transformateur de couplage figure I.4 :

Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui

peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut .[6]



**Figure I-4.** Schéma du SVC [6]



**Figure I-5.** Caractéristique d'un SVC [6]

Le courant traversant la réactance est contrôlé par les valves à thyristors. Il peut donc varier entre zéro et sa valeur maximale grâce au réglage de l'angle d'amorçage des thyristors.

Le système de contrôle qui génère les impulsions de gâchette des thyristors mesure soit la tension au point de connexion, soit la puissance réactive dans la charge associée, et calcule l'instant auquel il faut amorcer les valves .

Le compensateur statique d'énergie réactive (SVC) a été installé pour la première fois en 1979 en Afrique du sud . La caractéristique statique est donnée sur la figure I.5 ; trois zones de fonctionnement sont distinctes :

- ✓ Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- ✓ Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison de TCR et de TSC.
- ✓ Une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés. [6]

#### **I-4.1.1.4.TCBBR :( Thyristor Control Breaking Resistor)**

Un TCBBR est commandé pour faciliter la stabilisation d'un système d'alimentation ou pour minimiser l'accélération de la puissance d'une unité de production pendant une perturbation, en absorbant l'énergie électrique d'accélération excédentaire, amortie les oscillations basse fréquence, amortie la résonance sub-synchron et résout de nombreux autres problèmes de stabilité.

Avec cet appareil, le contrôle de l'angle d'amorçage est optionnel.

Le TCBR est composé d'une résistance en série avec une valve à thyristor bidirectionnelle.

. La Figure: I-6 représente la structure du TCBR. [2]

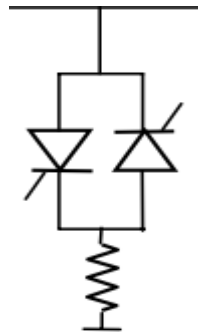


Figure : I-6 Structure du TCBR [2]

**I.4.1.2. Compensateurs parallèles à base de thyristor GTO**

**I-4.1.2.1. STATCOM :(Static Compensator)**

Le compensateur statique synchrone STATCOM est constitué d'un convertisseur à source de tension, d'un transformateur de couplage et de circuit de commande. Dans cette application, la source d'énergie DC peut être remplacée par un condensateur C, de sorte que l'échange d'énergie en régime permanent entre le compensateur statique et le réseau soit uniquement réactif, comme illustré par la figure 1.7 où  $I_q$  est le courant de sortie du

convertisseur, perpendiculaire à la tension du convertisseur  $V_i$ . L'amplitude de la tension de convertisseur et la sortie réactive du convertisseur sont réglables. Si  $V_i$  est supérieure à la tension  $V_t$  du réseau le compensateur statique fournit de la puissance réactive au système, si  $V_i$  est inférieure à  $V_t$  le compensateur statique absorbe de la puissance réactive. [3]

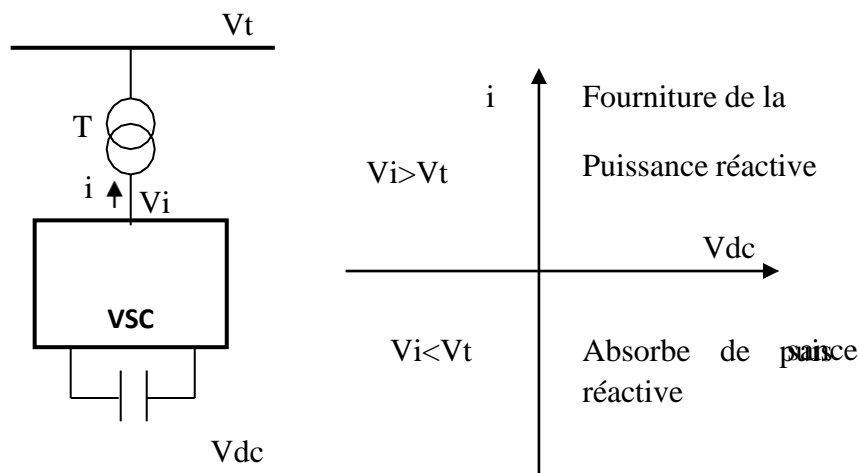


Figure 1-7 : Schéma du STATCOM [3]

**I-4.1.2.1.1. Avantages du STATCOM :**

- Bonne réponse à faible tension : Il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.

- Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément, l'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique. Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système. Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales. [4]

**I-4.2. Compensateurs séries :**

**Les compensateurs séries** : sont couramment utilisés pour le contrôle du flux de puissance, l'amortissement des oscillations de puissance et l'amélioration de la ST.

La Figure: I-8 présente un système avec un compensateur série. [2]

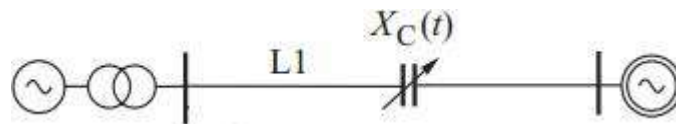


Figure : I-8 Système avec un compensateur série [2]

**I-4-2.1. Compensateurs séries à base de thyristor :****I-4-2.1.1. Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC) :**

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

Est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, tout en parallèle avec un condensateur. Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance. [5]

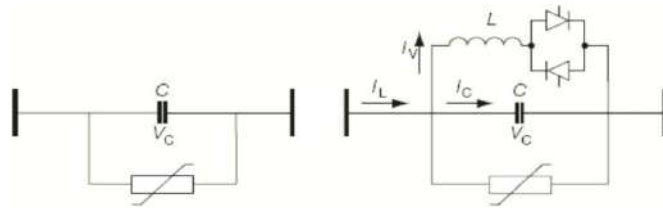


Figure.1-9. Deux schémas de compensations série typiques  
avec un condensateur série fixe et un TCSC [5]

#### I-4-2.1.2.TSSC : (Thyristor Switched Series Capacitor):

IEEE définit le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) comme un compensateur capacitif qui se compose de plusieurs condensateurs en série. Chaque condensateur commandé par un commutateur de thyristor qui assure une compensation par palier.

Le Compensateur série commuté par thyristor TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor), est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. Il est constitué de plusieurs capacités montées en série, chacun étant shunté par une valve à thyristors montée en dérivation. [2]

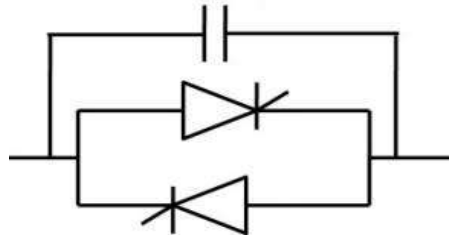


Figure : I-10 Schéma du TSSC [2]

#### I-4-2.1.3.Réactance série contrôlée par thyristors TCSR :

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristors est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable  $X_1$  agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances. [3]

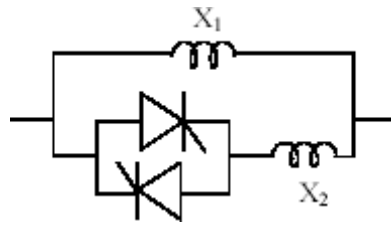


Figure1-11 : Schéma du TCSR [3]

#### I-4-2.1.4. TSSR : (Thyristor Switched Series Reactor):

Le TSSR améliore la stabilité de l'arc et limite le courant d'arc, ce qui diminue la rupture et la consommation des électrodes.

La différence entre le TSSR et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$ . [2]

#### I-4-2-2. Compensateurs séries à base de thyristor GTO :

**I-4-2-2.1. 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.12. 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 [8]

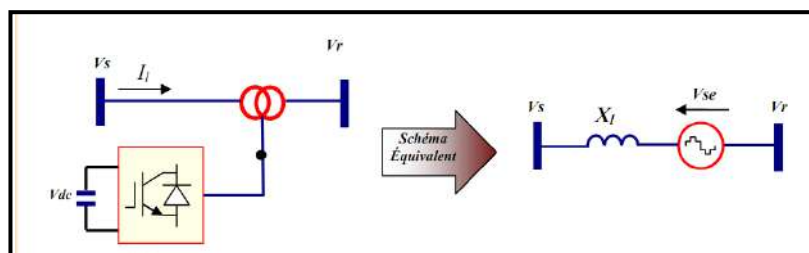


Figure I-12: Structure et schéma équivalent d'un SSSC. [8]



Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (static phase shifter) que l'on verra au prochain paragraphe ou d'une impédance série variable de compensation : il injecte une tension en quadrature avec une tension des extrémités 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. Sa caractéristique statique est donnée sur la figure I.13 suivante : [8]

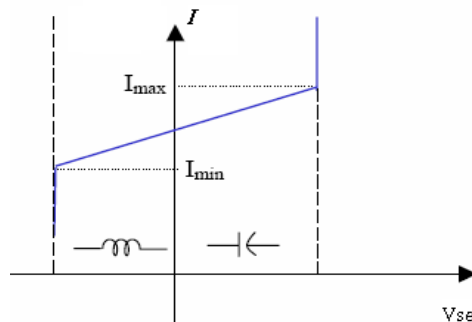


Figure I-13: Caractéristique statique du SSSC. [8]

### I.4.3. Compensateurs hybrides série-parallèle :

#### I.4.3.1. Compensateurs hybrides à base de thyristor :

##### I.4.3.1.1. TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer)

L'IEEE définit le Transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST comme étant un transformateur déphaseur ajusté par thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable.

Le transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST, est le premier équipement FACTS combiné. [12]

##### I.4.3.1.2. Régulateur d'angle déphase commandé par thyristor (TCPAR)

IEEE définit le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator), comme étant un Transformateur déphaseur qui permet le contrôle du déphasage entre ses tensions terminales tout en gardant leurs amplitudes invariables.

Le régulateur d'angle de phase commandé par thyristor TCPAR, contrairement au TCPST, est capable de fournir (ou d'absorber) l'énergie réactive au réseau. [11]

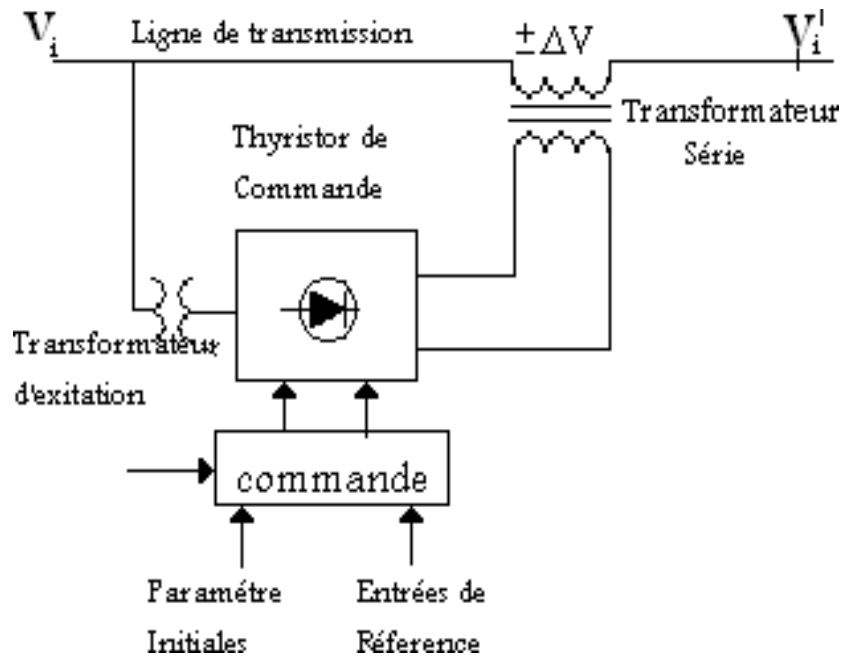


Fig 1-14 : Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR

[11]

#### I.4.3.1.3. Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR):

IEEE définit le TCVR (*Thyristor Controlled Voltage Regulator*) comme étant un transformateur contrôlé par thyristor qui permet la commande de la phase de tension d'une manière continue.

Le régulateur de tension commandé par thyristor TCVR, est un autre membre de la famille des FACTS combinés. Leur prix relativement réduit, leur confère un avantage certain dans le contrôle de l'écoulement d'énergie réactive.[10]

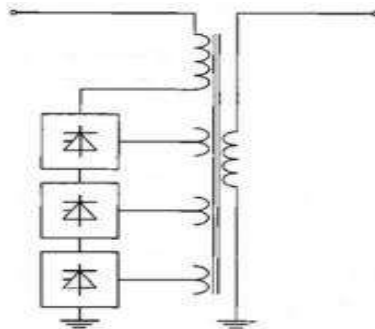


Figure : I-15 Schéma du TCVR [2]

#### I.4.3.1.4.DPFC : (Distributed Power-Flow Controller):

DPFC est dérivé de l'UPFC. La même chose que l'UPFC, le DPFC est capable de contrôler tous les paramètres du système. Le DPFC élimine la liaison DC commune entre les convertisseurs shunt et série. L'échange de puissance active entre le convertisseur shunt et

série passe par la ligne de transmission à la fréquence du troisième harmonique. En comparant avec l'UPFC, le DPFC présente deux avantages majeurs : un faible coût en raison de l'isolation basse tension et de la faible classification des composants du convertisseur série et une haute fiabilité en raison de la redondance des convertisseurs série.

Le DPFC se compose d'un shunt et plusieurs convertisseurs montés en série. Le convertisseur shunt est similaire à un STATCOM, tandis que le convertisseur série utilise le concept D-FACTS, qui consiste à utiliser plusieurs convertisseurs monophasés au lieu d'un grand convertisseur nominal. Chaque convertisseur dans le DPFC est indépendant et possède son propre condensateur continu pour fournir la tension continue requise. La configuration du DPFC est illustrée à la Figure:I-16 . [2]

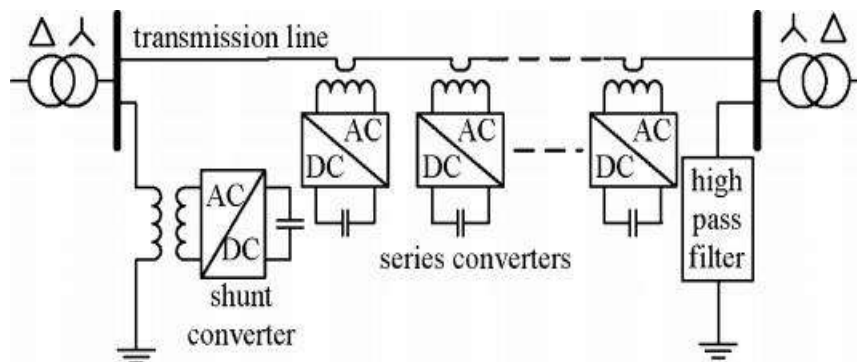


Figure : I-16 schéma du DPFC [2]

#### I-4-3-2.Compensateurs hybrides à base de thyristor GTO :

##### I-4-3.2.1Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC) :

IEEE définit l'UPFC comme étant une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplé via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM. L'UPFC permet le contrôle de la tension

, de l'impédance, et de l'angle ou d'écoulement de la puissance active et réactive de la ligne. L'UPFC est capable de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS. Il peut être utilisé particulièrement pour :

- Réglage de la tension .
- Contrôle de flux de puissance active et réactive .
- Amélioration de la stabilité .
- Limitation des courants de court-circuit .[4]

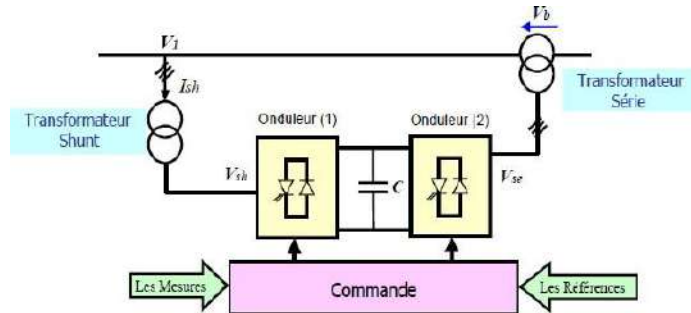


Figure : I-17: schéma de base d'un UPFC [4]

**I-4-3.2.2.IPFC (Interline Power Flow Controller)**

L'IPFC « Interline Power Flow Controller» est la combinaison de deux ou plusieurs compensateurs statiques série qui sont couplés par l'intermédiaire d'un lien commun de DC « direct current ». L'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC, reliés en série avec la ligne à compenser. La structure d'IPFC peut également inclure un STATCOM, couplé au lien commun du DC de l'IPFC, pour fournir la compensation shunt. L'IPFC est destiné à compenser un certain nombre de lignes de transmission à partir d'une sous-station donnée [6]

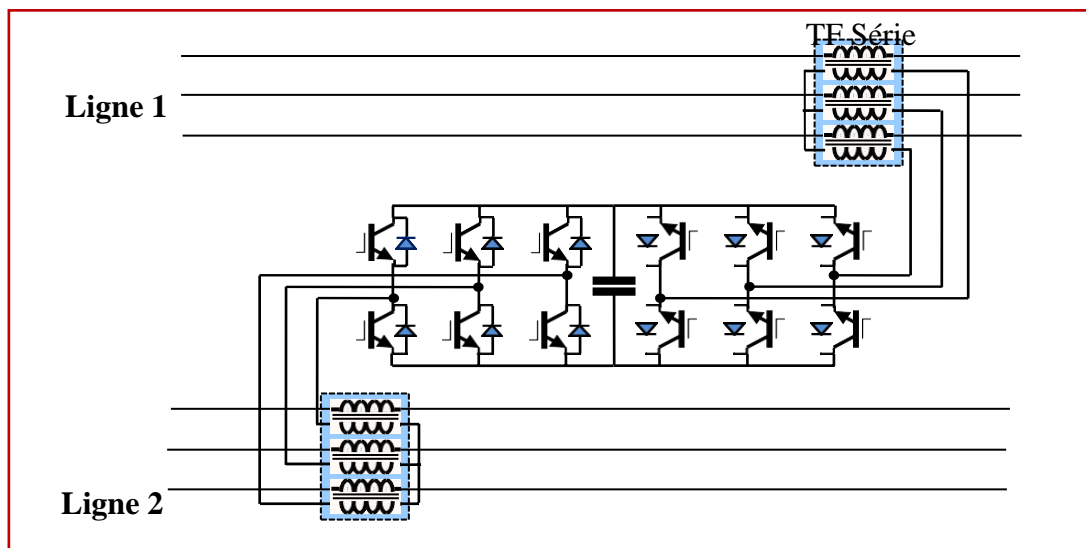


Figure I-18. Schéma de base d'un IPFC [6].

Il est utilisé également, afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau. La première proposition de L'IPFC est faite en 1998 par Gyugyi, Sen et Schuder . La figure I.18 représente le schéma de base d'un IPFC [6].

**I-4-3.2.3.SPS (Static Phase Shifter):** le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les anciens transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle, la figure (I-19) donne un schéma de principe de ce dispositif et son schéma équivalent. [9]

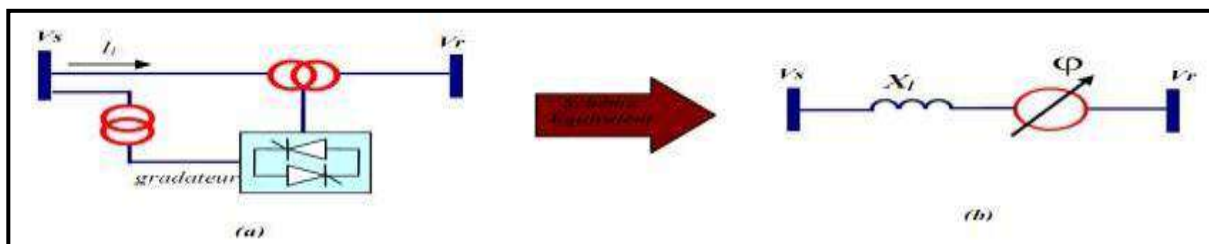


Fig.I-19. (a) structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS. [9]

Ce dispositif varie l'angle de phase de la tension aux extrémités de la ligne ; son principe est basé sur l'injection d'une tension en quadrature avec la tension de l'extrémité la ligne à déphaser. Cet équipement permet aussi un contrôle rapide du flux de la puissance active. La variable de contrôle de ce dispositif est l'angle de phase de la tension injectée " $\phi$ " qui est ajusté en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire un flux de puissance active spécifié. [9]

### I.5.Coût des dispositifs FACTS

Mis à part les avantages techniques apportés par les dispositifs FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un dispositif FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation. Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système et la technologie du semi-conducteur utilisée. [7]

**I.6.Applications et avantages techniques des différentes technologies des FACTS :**

Le Tableau résume les principaux avantages techniques des applications dynamiques de FACTS pour résoudre les problèmes de flux de puissance, de ST, d'amortissement, de contrôle de tension et de stabilité de tension. [2]

Dispositif	Contrôle de flux de puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire	Stabilité dynamique
SVC	●	●●●	●●	●●●
STATCOM	●	●●●	●●	●●
TCSC	●●	●	●●●	●●
SSSC	●●	●	●●●	●●
UPFC	●●●	●●●	●●	●●
IPFC	●●●	●	●●●	●●

Tableau: I-2 Bénéfices techniques des principaux dispositifs FACTS. [2]

**I.7.Conclusion :**

La technologie de la compensation par des FACTS s'est avéré une solution fiable et rentable aux problèmes de qualité de l'onde reliés à la puissance réactive et active. Ainsi, de nombreux travaux de recherche publiés dans ce domaine, publiés dans ce domaine.

Les gestionnaires de réseau sont en train d'exploiter le système de transport aux près de ses limites thermiques et dynamiques, alors que les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et à la continuité de service. Les équipements à base d'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème. Grâce aux avancées récentes dans la technologie GTO/IGBT, le temps de réaction des dispositifs FACTS a diminué de quelques millisecondes.

Dans ce chapitre nous avons présenté les types de compensation shunt, série et hybride appliquées au contrôle des réseaux électriques. **[10]**

## Chapitre II Modélisation de l'UPFC



## II.1.Introduction

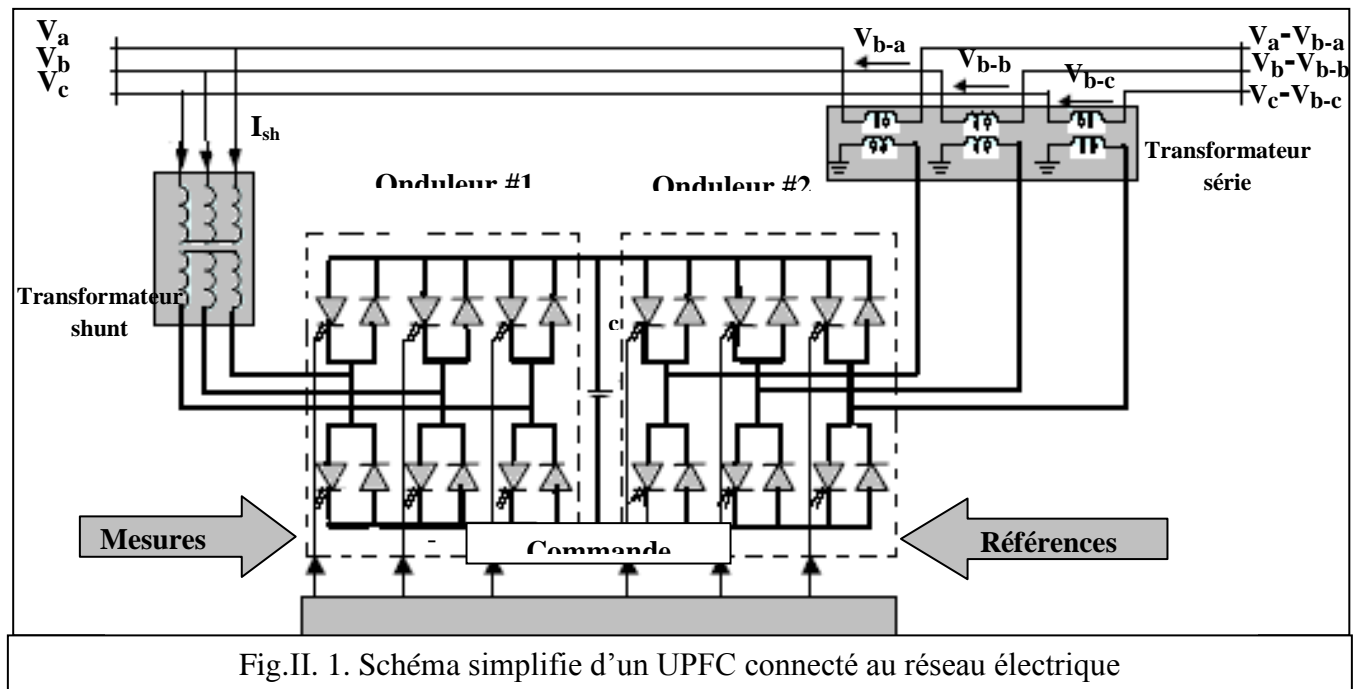
L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel, (DRU) ou variateur de phase universel, est l'un des plus performants des composants FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et réactive de la ligne. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance ; la tension, l'impédance et l'angle de transport de la ligne.

Afin d'étudier le comportement du système et la synthèse des lois de commande, il est nécessaire un modèle adéquat du dispositif. Nous avons utilisé le modèle de l'UPFC dans un réseau. Les principes de fonctionnement, le modèle mathématique de l'UPFC sont expliqués dans ce chapitre [16].

## II.2.Modélisation de l'UPFC:

### II.2.1.Principe de fonctionnement de l'UPFC:

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé et l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la figure (II.1) [4].



L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase sont ajustables. Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

- Contrôle de tension : la tension injectée est en phase avec celle du côté S.
- Contrôle de l'impédance de ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne. Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase : l'amplitude et la phase de la tension injectée sont calculés de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC.

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle de la puissance active et réactive qui transitent dans la ligne. De plus l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre [16].

La partie shunt peut être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud S et éventuellement fournir de la puissance active dans le réseau par la partie série.

L'étude du comportement des systèmes et la synthèse des lois de commande nécessitent la construction de modèles adéquats. Nous nous intéressons dans un premier temps au modèle mathématique de l'UPFC.

### II.2.2.Représentation du système en triphasé

Cette figure représente un schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un UPFC installé dans une ligne de transport.

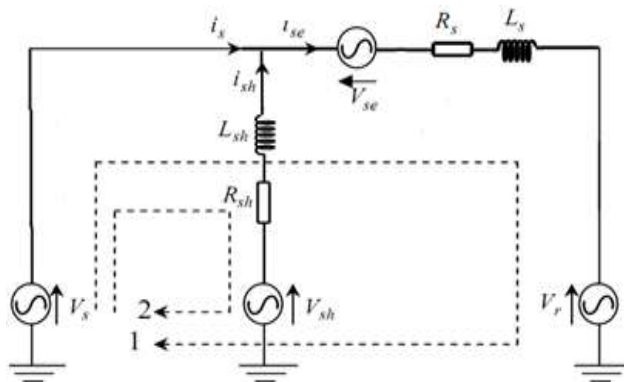


Figure II-2:modèle du système interconnexion et UPFC. [15]

En appliquant la loi de Kirchhoff, il vient:

$$\begin{cases} V_s - V_{se} - R_s I_{se} - L_s \frac{dI_{se}}{dt} - V_r = 0 \\ V_{sh} - R_{sh} I_{sh} - L_{sh} \frac{dI_{sh}}{dt} - V_s = 0 \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Ce système peut s'écrire aussi comme suit:

$$\begin{cases} \frac{dI_{se}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{se} - \frac{1}{L_s} V_{se} + \frac{1}{L_s} V_s + \frac{1}{L_s} V_r \\ \frac{dI_{sh}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{sh} + \frac{1}{L_{sh}} V_{sh} - \frac{1}{L_{sh}} V_s \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

En triphasé:

$$\begin{cases} \frac{dI_{sea}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{sea} - \frac{1}{L_s} V_{sea} + \frac{1}{L_s} V_{sa} + \frac{1}{L_s} V_{ra} \\ \frac{dI_{seb}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{seb} - \frac{1}{L_s} V_{seb} + \frac{1}{L_s} V_{sb} + \frac{1}{L_s} V_{rb} \\ \frac{dI_{sec}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{sec} - \frac{1}{L_s} V_{sec} + \frac{1}{L_s} V_{sc} + \frac{1}{L_s} V_{rc} \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

Et

$$\begin{cases} \frac{dI_{sha}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{sha} - \frac{1}{L_s} V_{sha} + \frac{1}{L_s} V_{sa} + \frac{1}{L_s} V_{ra} \\ \frac{dI_{shb}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{shb} - \frac{1}{L_s} V_{shb} + \frac{1}{L_s} V_{sb} + \frac{1}{L_s} V_{rb} \\ \frac{dI_{shc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{shc} - \frac{1}{L_s} V_{shc} + \frac{1}{L_s} V_{sc} + \frac{1}{L_s} V_{rc} \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

Par soucis de compacité, on écrit les deux systèmes précédents sous la forme:

$$\begin{cases} \frac{dI_{seabc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} I_{seabc} - \frac{1}{L_s} I_3 V_{seabc} + \frac{1}{L_s} I_3 V_{sabc} + \frac{1}{L_s} I_3 V_{rab} \\ \frac{dI_{shabc}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shabc} + \frac{1}{L_{sh}} I_3 V_{shabc} - \frac{1}{L_{sh}} I_3 V_{sabc} \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

### II.3. Transformation de Park

-La poursuite d'une référence sinusoïdale en 'étant pas toujours possible, en particulier avec les régulateurs classiques. Il est donc préférable de passer à un repère où les références à suivre sont continués. Pour cela, nous utiliserons la transformation de Park.

-La transformation de Park permet de générer des grandeurs continues à partir des grandeurs triphasées du système. Ainsi, en choisissant une grandeur triphasée comme référence, on pourra écrire toutes les tensions et courants du système dans le repère de Park. De plus, elle permet

d'assurer la conservation des puissances.

Soit  $X_{abc}$  une grandeur triphasée:

En appliquant la transformation de Park à cette grandeur, celle-ci pourra s'écrire dans le repère biphasé  $dq$  appelé aussi le repère de Park.

$$X_{abc} = [X_a \ X_b \ X_c]^T = P^{-1} X_{dq} = [X_d \ X_q]^T \quad [15]$$

- $X$  peut être une tension ou un courant.
- $X_{dq}$  est l'image de  $X_{abc}$  dans le repère de Park.

Les deux matrices  $P$  et  $P^{-1}$  sont respectivement la matrice de Park et la matrice inverse de Park, elles sont données par :

L'UPFC à deux niveaux est défini par trois systèmes d'équations qui sont détaillés dans les paragraphes suivants:

- Les équations dynamiques du compensateur série.
- Les équations dynamiques du compensateur parallèle.
- Les équations du circuit continu.

#### II.4. Equations dynamiques du compensateur série:

La partie série de l'UPFC est l'équivalent d'un SSSC, L'application des lois de Kirchhoff aux mailles du circuit de la figure (II.3) nous donne [13][14]:

$$\begin{cases} V_{sa} - V_{ca} - V_{ra} = r_{isa} + L \frac{di_{sa}}{dt} \\ V_{sb} - V_{cb} - V_{rb} = r_{isb} + L \frac{di_{sb}}{dt} \\ V_{sc} - V_{cc} - V_{rc} = r_{isc} + L \frac{di_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (II-6)$$

En utilisant la transformation de park:

La matrice de transformation de park est donnée par :

$$k = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

On note que la matrice inverse de la matrice de park est la transposée de K:  $K^{-1} = K^T$

$$X_{dq0} = k X_{abc} X_{abc} = k^T X_{abc}$$

Donc le système devient :

$$\begin{cases} V_{sd} - V_{cd} - V_{rd} = r_{isd} + L \frac{disd}{dt} - \omega L i_q \\ V_{sq} - V_{cq} - V_{rq} = V_{isq} + L \frac{disq}{dt} - \omega L i_d \end{cases}$$

En utilisant la représentation matricielle sur le système:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{-r}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} & V_{cd} & V_{rd} \\ V_{sq} & V_{cq} & V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II-7)$$

La figure(II.3) montre le schéma équivalent de l'UPFC série dans les axes d-q basé sur le système d'équation (II-7).

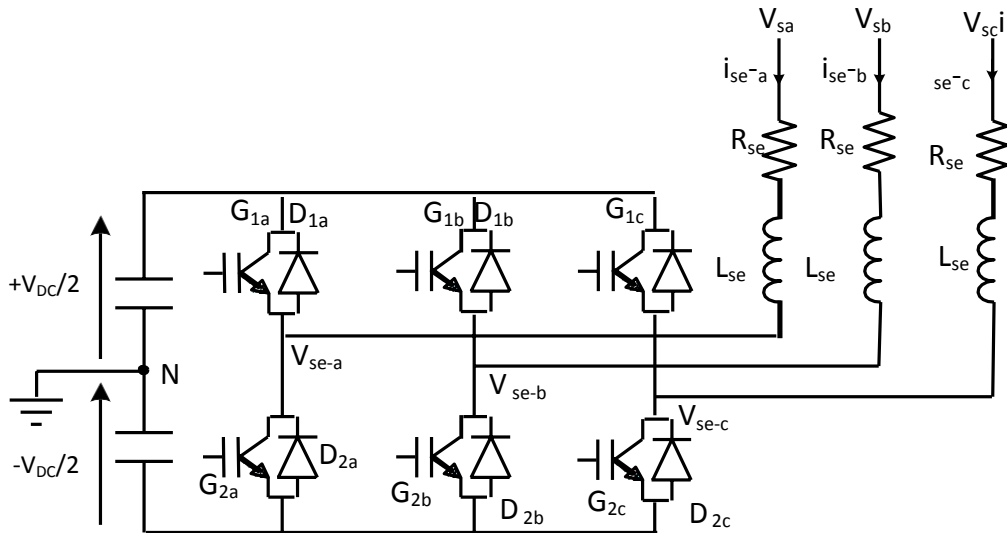


Fig. II-3 schéma simplifié de la partie série de l'UPFC. [13]

**II.5. Equations dynamiques du compensateur parallèle:**

Le compensateur shunt peut être aussi représenté par le système d'équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{pa} - V_{ca} - V_{ra} = r_{p1}i_{pa} + L_p \frac{di_{pa}}{dt} \\ V_{pb} - V_{cb} - V_{rb} = r_{p1}i_{pb} + L_p \frac{di_{pb}}{dt} \\ V_{pc} - V_{cc} - V_{rc} = r_{p1}i_{pc} + L_p \frac{di_{pc}}{dt} \end{cases} \quad (II-8)$$

Dans le plan de park.; ce système devient

$$\begin{cases} V_{pd} - V_{cd} - V_{rd} = r_{pi}i_{pd} + L_p \frac{di_{pd}}{dt} - \omega L_i i_q \\ V_{pq} - V_{cq} - V_{rq} = r_{pi}i_{pq} + L_p \frac{di_{pq}}{dt} - \omega L_i i_d \end{cases}$$

En utilisant la représentation matricielle:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{pi}}{L_p} & \omega \\ \omega & -\frac{r_{pi}}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{pd} & V_{cd} & V_{rd} \\ V_{pq} & V_{cq} & V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II-9)$$

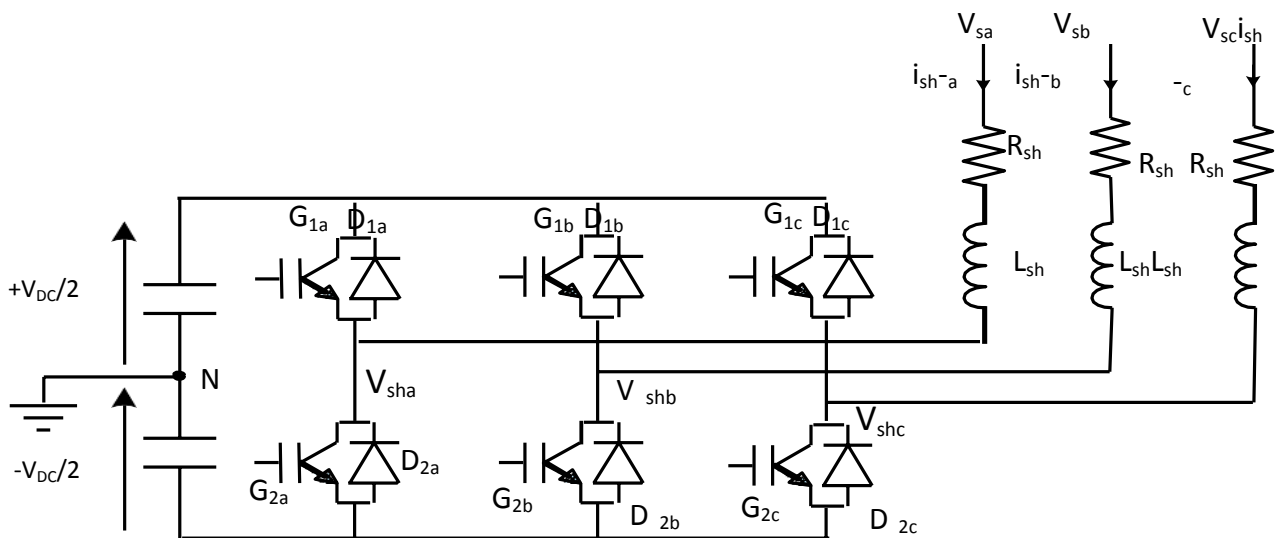


Fig. II-4 schéma simplifié de la partie parallèle de l'UPFC. [13]

**II.6. Equations dynamiques du circuit continue:**

$$\frac{1}{2} C \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_e - P_{ep}$$

$$P_e = V_{ca} i_{ra} + V_{cb} i_{rb} + V_{cc} i_{rc} \quad (II-10)$$

$$P_{ep} = V_{pa} i_{pa} + V_{pb} i_{pb} + V_{pc} i_{pc}$$

Avec:

**C** : Capacité du condensateur du circuit continu;

**V<sub>dc</sub>**: Tension continue;

**P<sub>e</sub>**: Puissance absorbée par le compensateur série et fournie au circuit commun.

**P<sub>ep</sub>**: Puissance active fournie par le compensateur parallèle et absorbée par le compensateur série.

L'équation dynamique du circuit continu s'écrit :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2 \cdot C \cdot V_{dc}} \cdot (V_{rd} i_{rd} + V_{cq} i_{cq} - V_{pd} i_{pd} + V_{pq} i_{pq}) \quad (II-11)$$

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd}$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq}$$

**II.7. Calcul des puissances instantanées de l'UPFC**

Le calcul des puissances active et réactive instantanées générées et absorbées par l'UPFC se fait par la formule classique [13].

Les puissances active et réactive générées sont données par:

$$p_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (II-12)$$

$$q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} + V_{sd} i_{sq})$$

Les puissances active et réactive absorbées sont également données par:

$$p_r = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}) \quad (II-13)$$

$$q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{sd} + V_{rd} i_{rq})$$

### II.8. Contrôle de l'UPFC

Le contrôle de l'UPFC se décompose en deux parties séparées, celle de la partie série et celle de la partie shunt. La possibilité de cette séparation est justifiée par le fait que le couplage entre les deux convertisseurs sur la ligne de transmission est assez faible; et que la variation dynamique de la tension côté continu DC est dominée par le convertisseur parallèle. Ceci est justifié par le fait que la variation de la tension du côté DC est beaucoup moins sensible au contrôle du convertisseur série [13].

### II.9. Conclusion

L'application de la loi de Kirchhoff en courant alternatif triphasé et la transformation synchrone au circuit équivalent du système global a permis l'établissement d'un modèle de connaissance tenant compte des paramètres électriques dans leurs zones de fonctionnement linéaires.

Le modèle obtenu est, du point de vue automatique, un système multivariable linéaire carré. Il possède quatre entrées de commande, concrétisées par les composantes d-q des tensions de sorties des convertisseurs STATCOM et SSSC constituant l'UPFC, et quatre sorties à savoir les courants de ligne et shunt images des puissances shunt et série.

Le modèle servira à la synthèse de lois de commande pour piloter le système dans la réalisation des objectifs du cahier des charges.



## **CHAPITRE III : COMMANDE PI DE L'UPFC**

**III.1.Introduction**

Le travail réalisé dans ce chapitre consiste à trouver une commande adéquate qui permette de gérer les flux de puissance active et réactive transitant dans la ligne et ce d'une manière découplée tout en ayant des réponses rapides et sans trop solliciter les actionneurs.

Vu l'aptitude du système à être commandé par n'importe quel type de commande et ce pour les caractéristiques citées précédemment que présente le modèle obtenu, le choix de celle-ci devrait se faire en fonction des performances désirées. La commande classique de type PI découplé (watt-découplé) semble être un bon choix.

Afin d'étudier ce système, nous les représentons dans les schémas suivant :

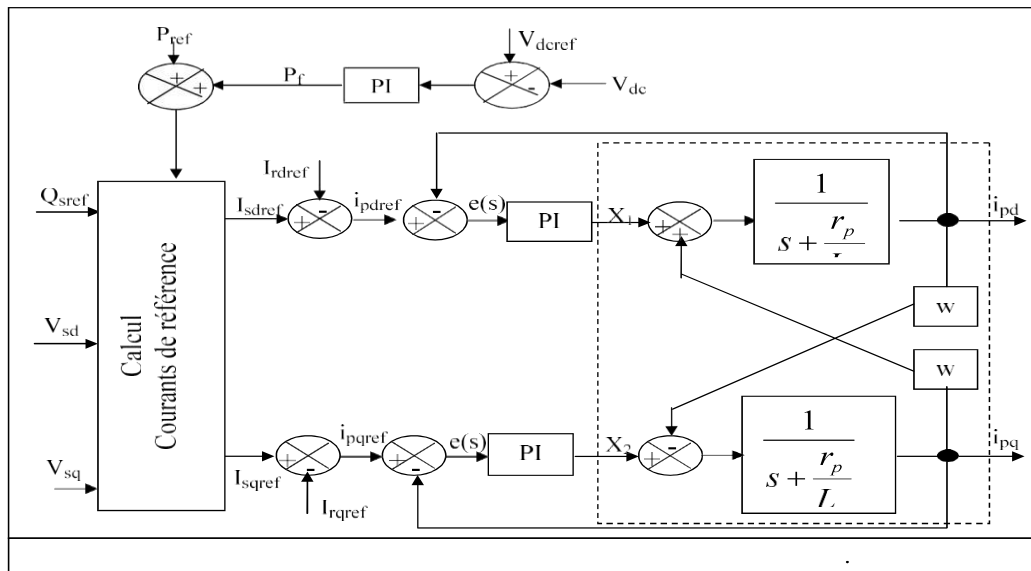


Fig 1.III- schéma block du contrôleur de la partie shunt de L'UPFC

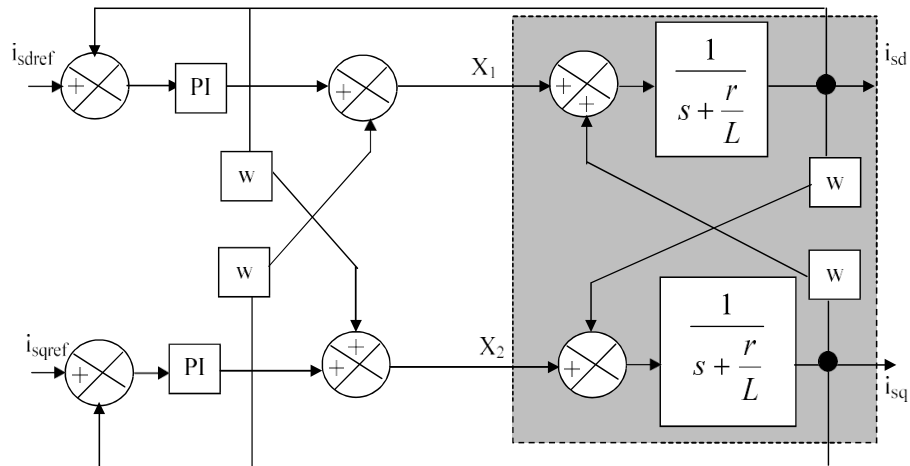


Fig 2.III- schéma block du contrôleur de la partie série de L'UPFC

**III.2.RESULTATSDESSIMULATIONS**

Afin de suivre l'efficacité de ce système, nous sommes appuyés, dans un premier temps, sur les paramètres suivants :

$V_s=220v$ ,  $V_r=220v$ ,  $V_{dc}=280v$ ,  $f=50HZ$ ,  $r= 0.8 \Omega$ ,  $L=100mH$ . $r_p= 0.4\Omega$ ,  $L_p=10mH$ ,  $C=2000uF$  et la fréquence de porteuse (5000HZ).

Nous avons fait les simulations avec le logiciel MATLAB/SIMULINK. Nous avons d'abord choisi des références des puissances dans la ligne comme suit :

- ✓ Pour la puissance active :
  - \_ à  $t=0s$  jusqu'au  $t=0.3s$  :  $P=1000 W$
  - \_ à  $t=0.3s$  jusqu'au  $t=0.5s$  :  $P=2000 W$
  - \_ à  $t=0.5s$  jusqu'au  $t=0.7s$  :  $P=1000 W$
  - \_ à  $t=0.7s$  jusqu'au  $t=1s$  :  $P=2000 W$
- ✓ Pour la puissance réactive :
  - à  $t=0 s$  jusqu'au  $t=0.3s$   $Q=2000 Var$ .
  - à  $t=0.3s$  jusqu'au  $t=0.5 s$   $Q=-2000 Var$ .

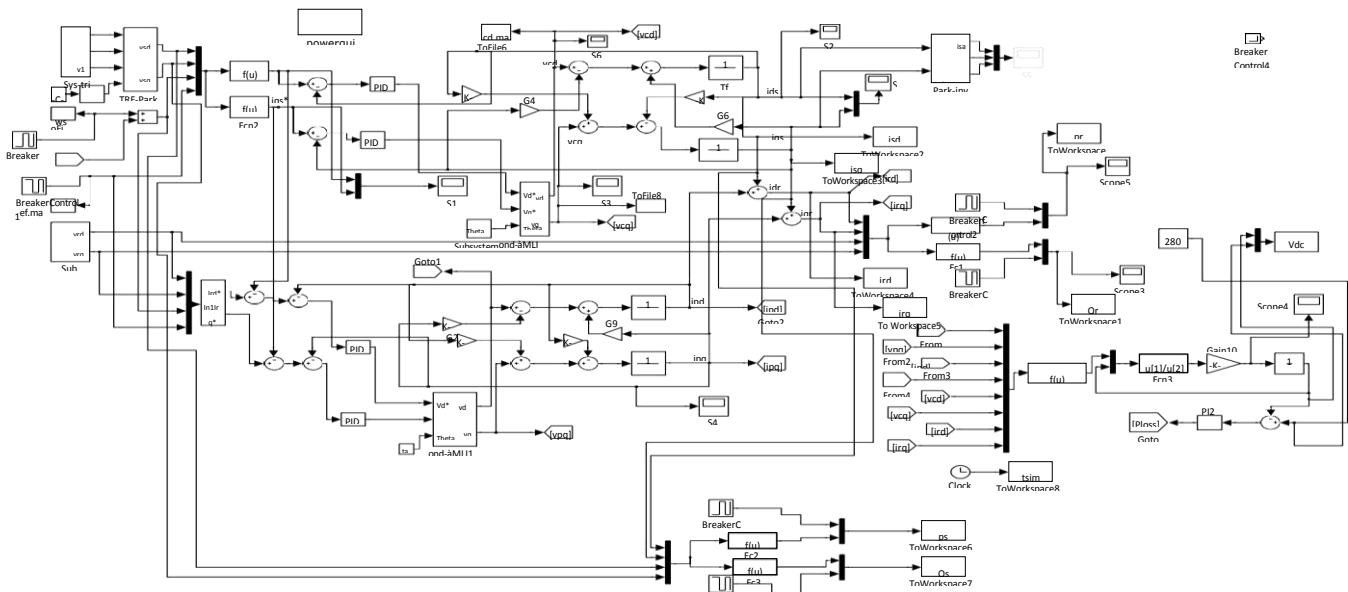


Fig. III.3.schéma block de correcteur PID

**III.3. Prise en compte de l'augmentation de l'inductance L et de la résistance r :**

Nous avons augmenté la valeur de l'inductance de 30% et la résistance de 40% de la valeur de la ligne de transmission et nous avons fait la simulation du système étudié où les résultats de simulation des puissances active et réactive sont représentés sur les figures suivantes.

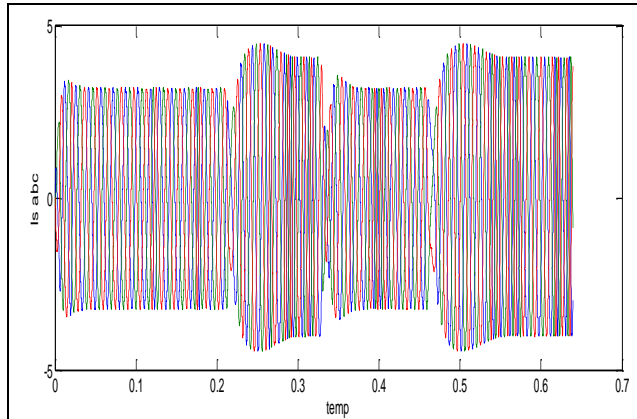


fig.III.4.Variation du courant triphasé

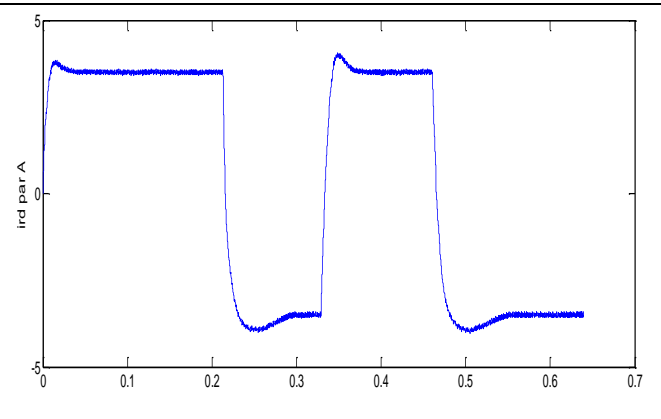


fig.III.5.Variation du courant ird(A)

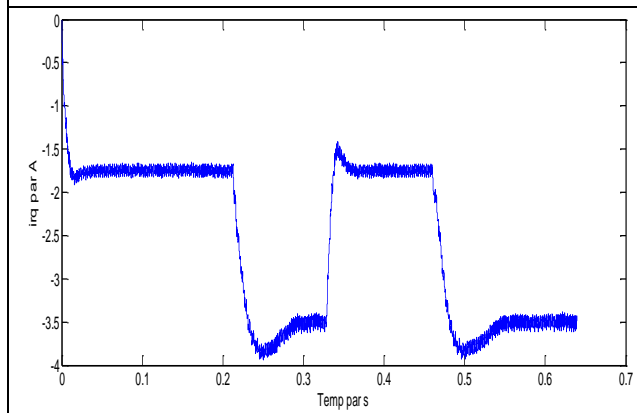


fig.III.6.Variation du courant irq(A)

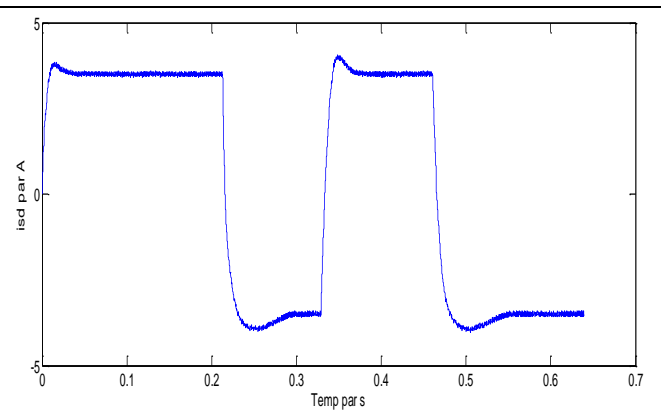


fig.III.7.Variation du courant isd(A)

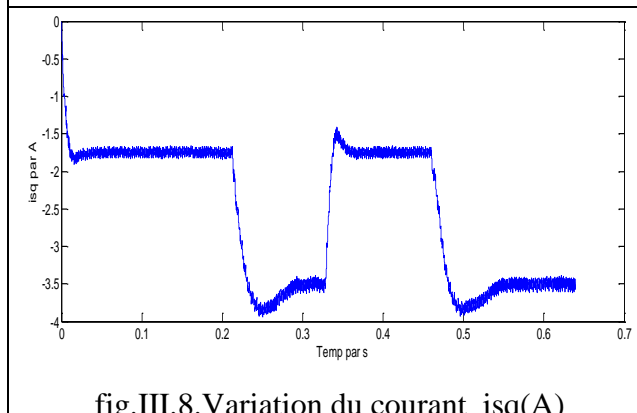


fig.III.8.Variation du courant isq(A)

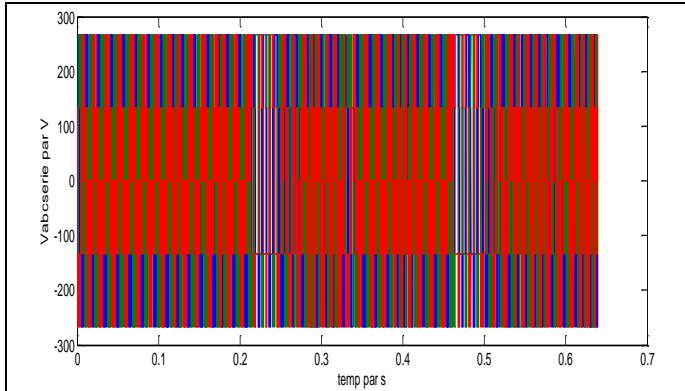


fig.III.9.Variation de tension Vabcserie(v)

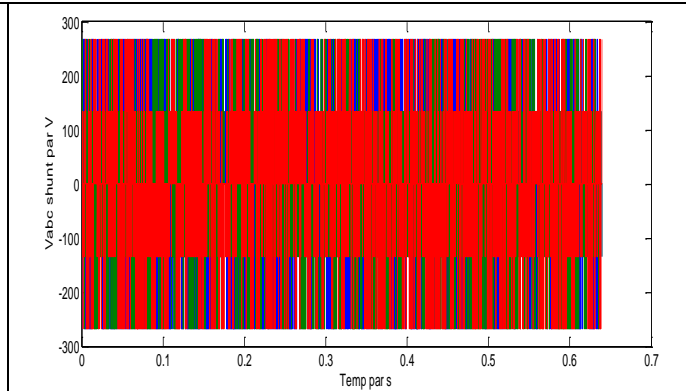


fig.III.10.Variation de tension Vabcshunt (v)

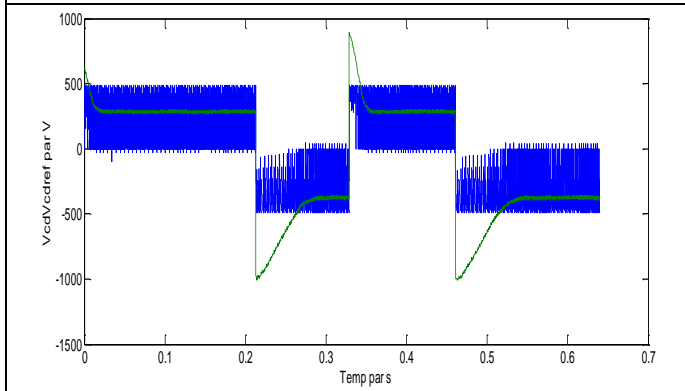


fig.III.11.Variation de tension VcdVcdref(v)

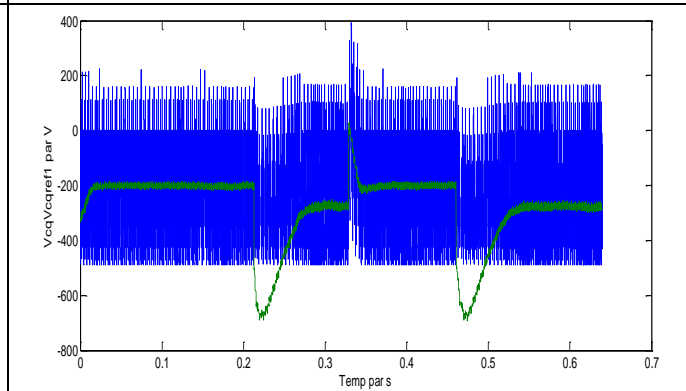


fig.III.12.Variation de tension VcqVcqref1 (v)

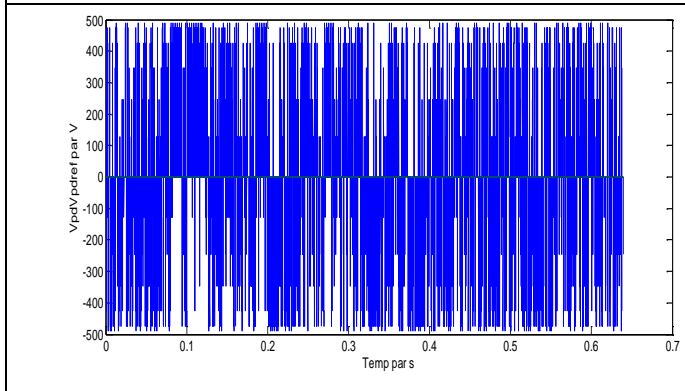


fig.III.12.Variation de tension VpdVpdref(v)

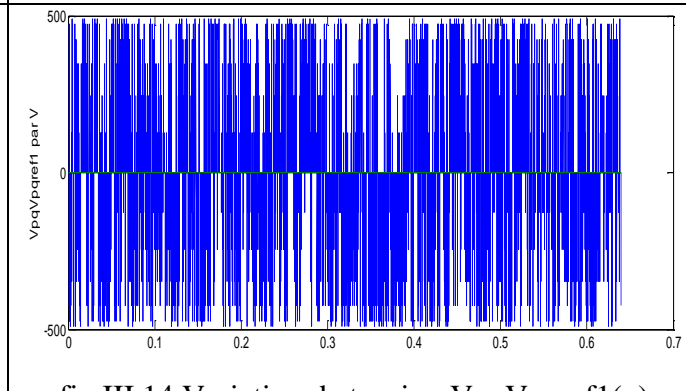


fig.III.14.Variation de tension VpqVpqref1(v)

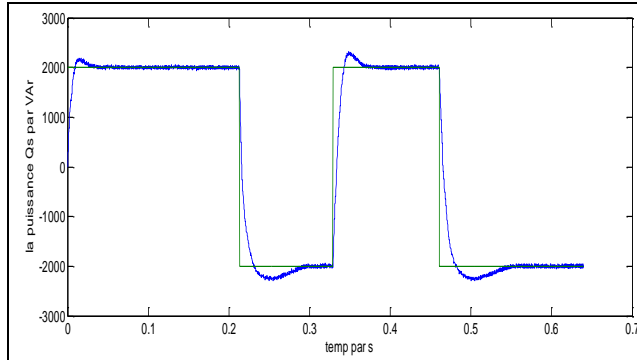


fig.III.15. Variation de la puissance réactive

$Q_s(\text{VAr})$

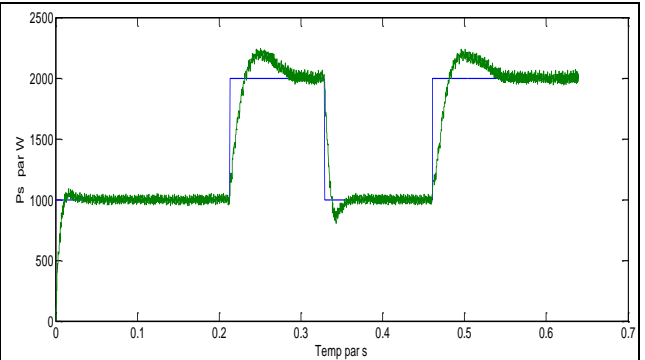


fig.III.16. Variation de la puissance active

$p_s(\text{W})$

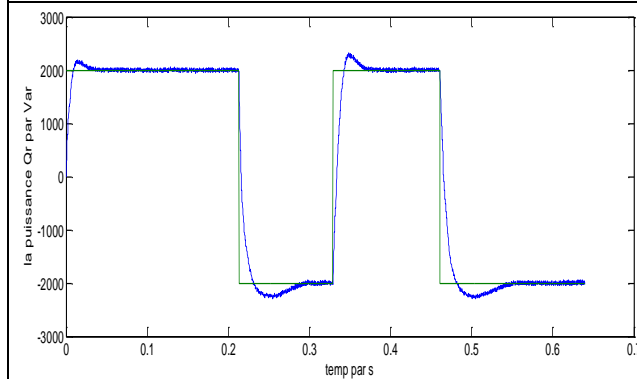


fig.III.17. Variation de la puissance réactive

$Q_r(\text{VAr})$

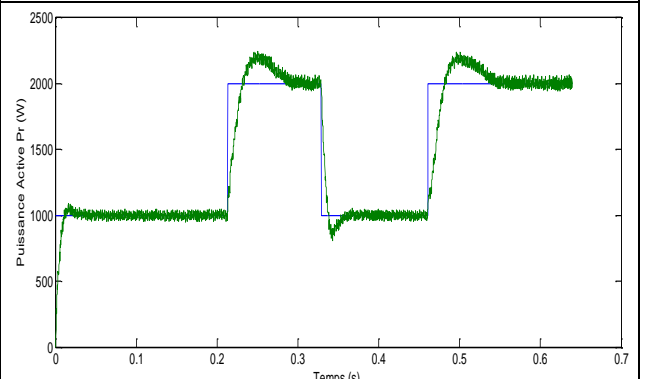


fig.III.18. Variation de la puissance réactive

$P_r(\text{W})$

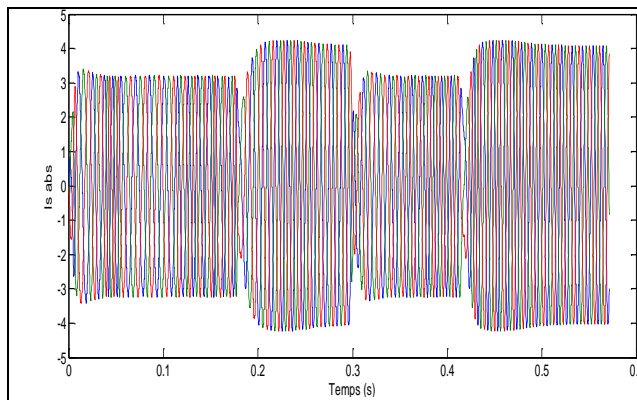


fig.III.19. Variation du courant triphasé de la

partie série Iabc

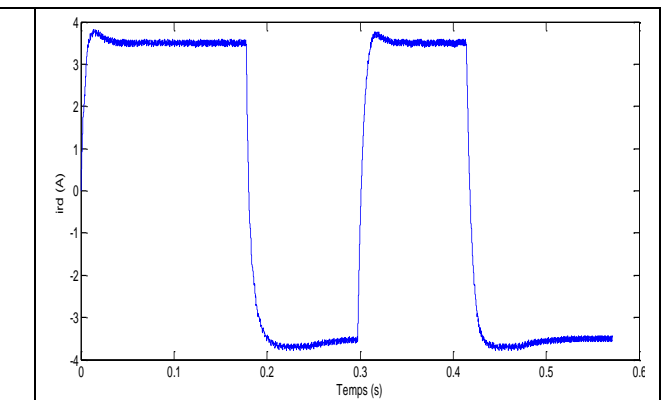


fig.III.20. Variation du courant ird(A)

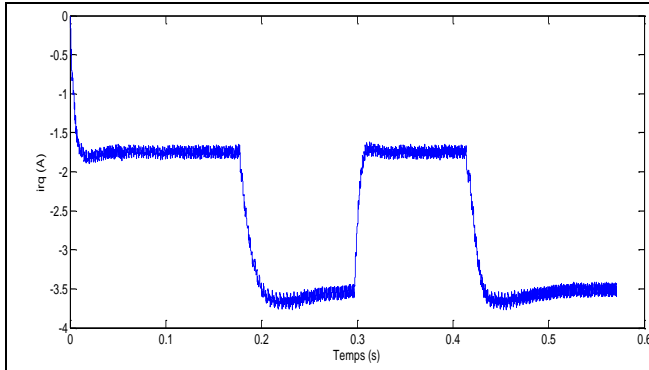


fig.III.21.Variation du courant  $i_{rq}$  (A)

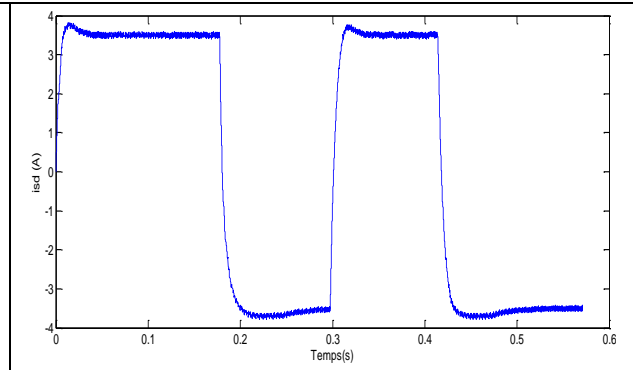


fig.III.22.Variation du courant  $i_{sd}$  (A)

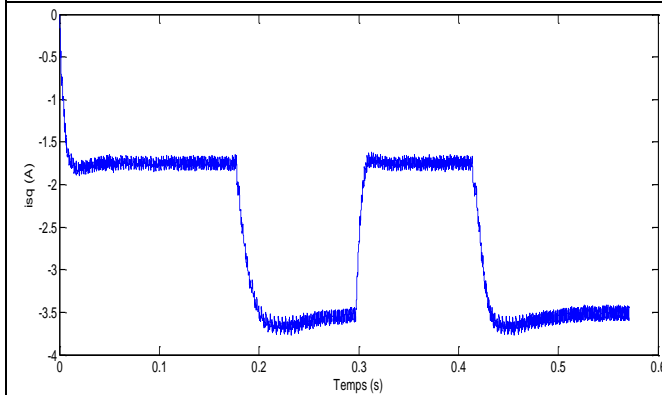


fig.III.23.Variation du courant  $i_{sq}$  (A)

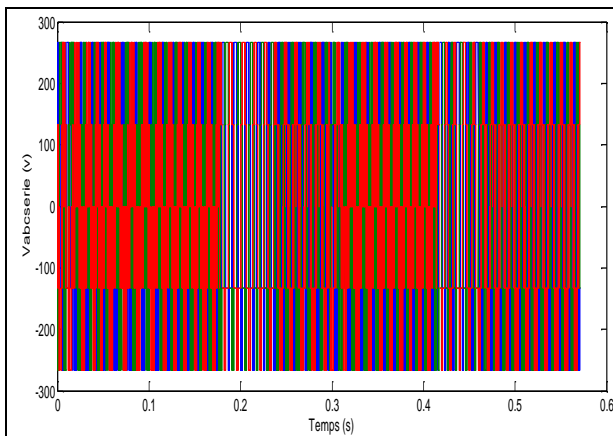


fig.III.24.Variation de tension  $V_{abcserie}$  (v)

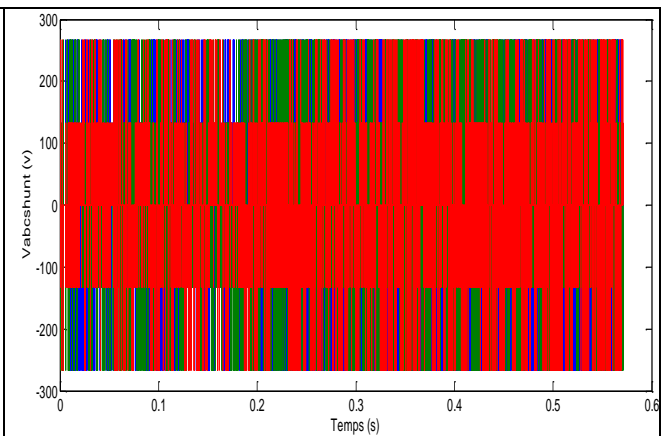


fig.III.25.Variation de tension  $V_{abcshunt}$  (v)

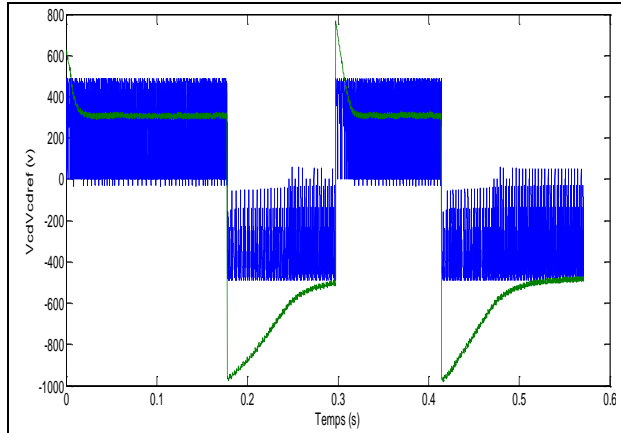


fig.III.26. Variation de tension  $V_{cd}V_{cdref}$  (v)

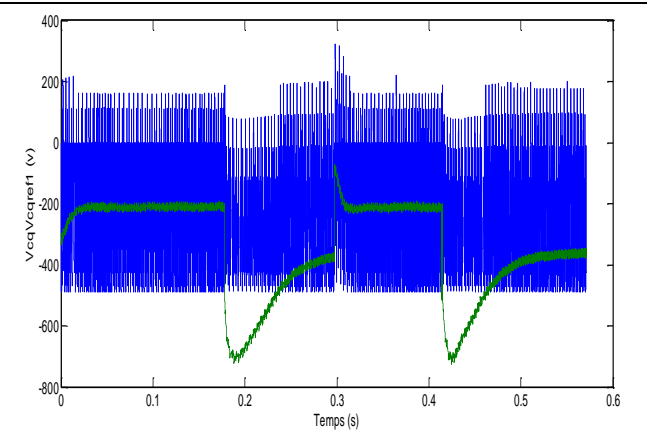


fig.III.27. Variation de tension  $V_{cq}V_{cqref1}$  (v)

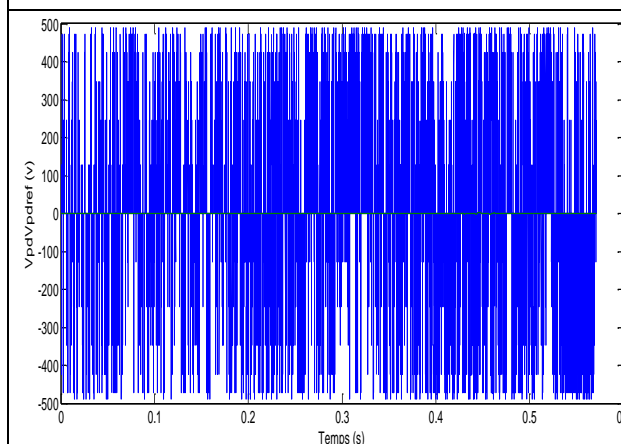


fig.III.28. Variation de tension  $V_{pd}V_{pdref}$  (v)

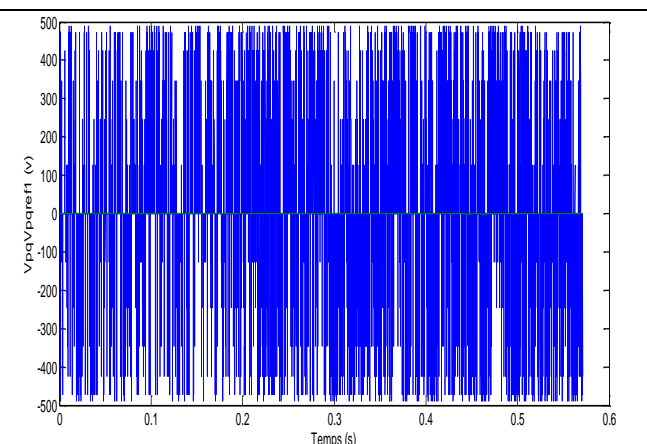


fig.III.29. Variation de tension  $V_{pq}V_{pqref1}$  (v)

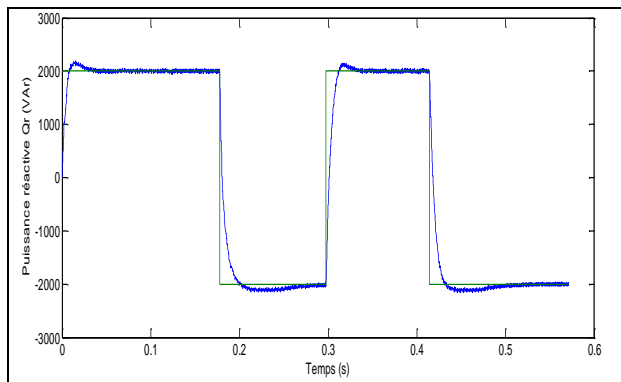


fig.III.30. Variation de la puissance réactive  $Q_r$  (VAr)

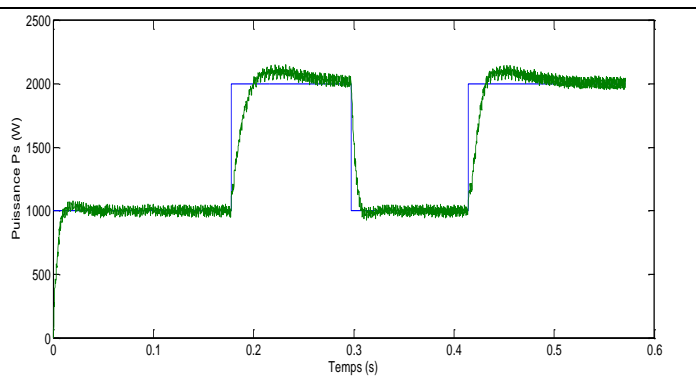


fig.III.31. Variation de la puissance active  $P_s$  (W)



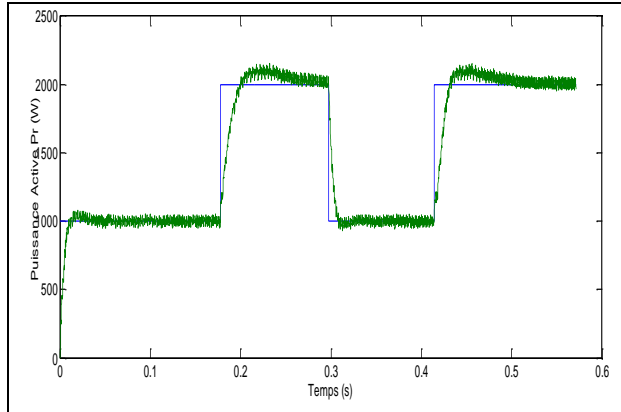


fig.III.32. Variation de la puissance active Pr (W)

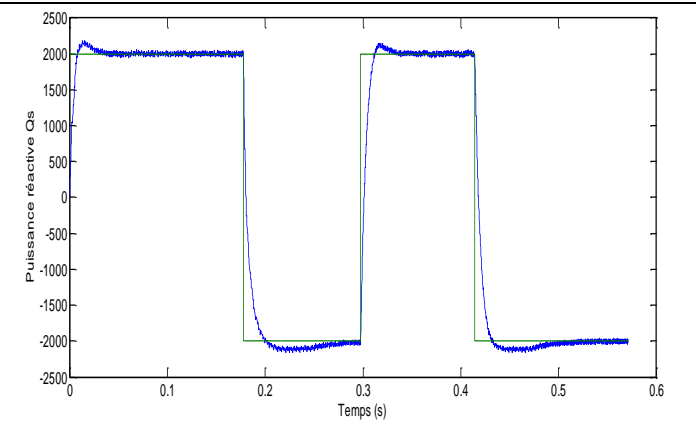


fig.III.33. Variation de la puissance réactive Qs (Var)

**III.4. Prise en compte de la diminution de l'inductance L et de la résistance r :**

Nous avons augmenté la valeur de l'inductance de -30% et la résistance de -40% de la valeur de la ligne de transmission et nous avons fait la simulation du système étudié où les résultats de simulation des puissances active et réactive sont représentés sur les figures suivantes.

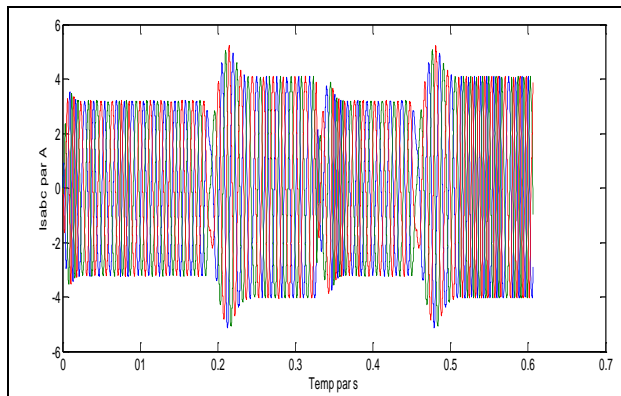


fig.III.34. Variation du courant triphasé de la partie série Iabc

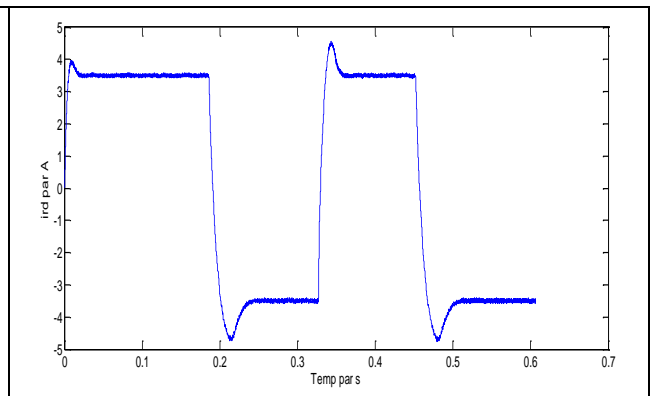


fig.III.35. Variation du courant Ird(A)

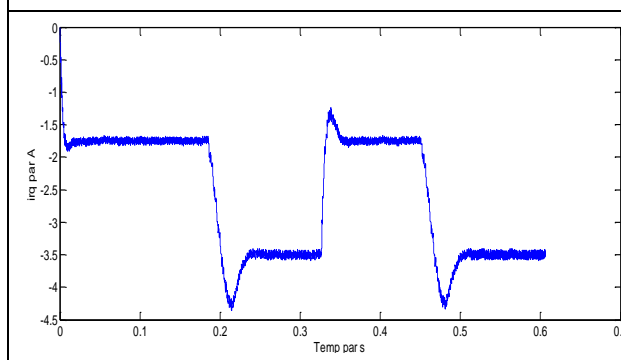


fig.III.36. Variation du courant Iiq(A)

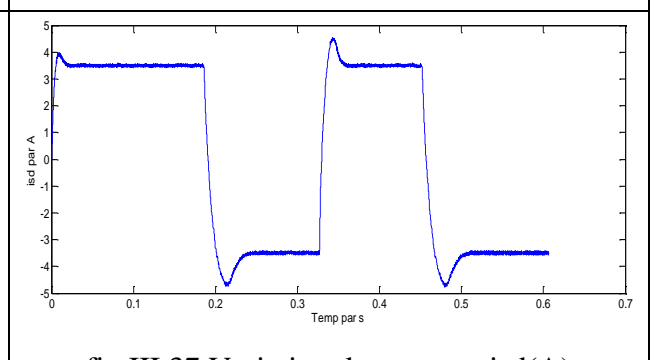


fig.III.37. Variation du courant Isd(A)

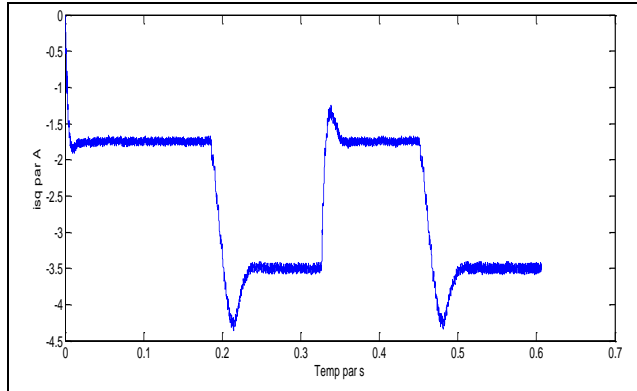


fig.III.38.Variation du courant  $I_{sq}(A)$

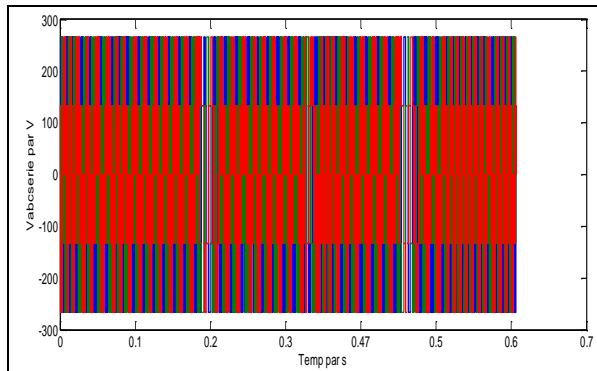


fig.III.39.Variation de tension  $V_{abcserie}$   
(v)

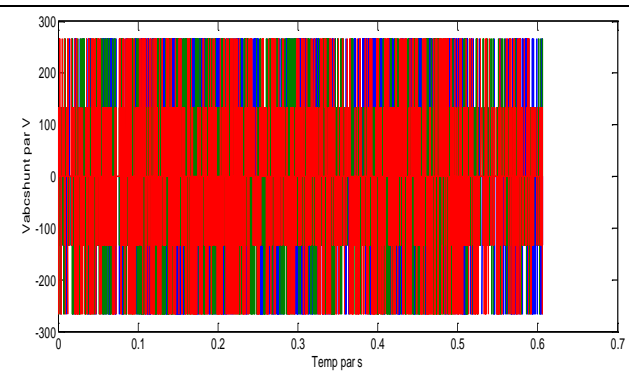


fig.III.40.Variation de tension  $V_{abcshunt}$  (v)

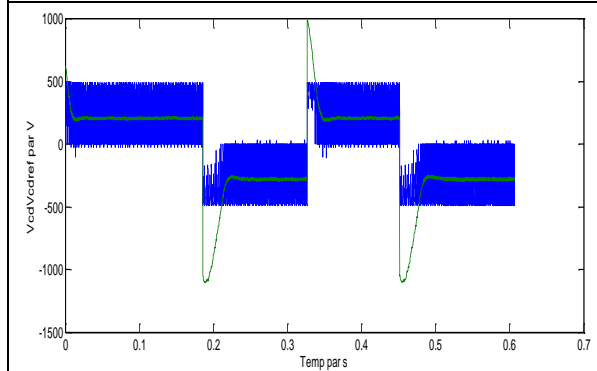


fig.III.41.Variation de tension  $V_{cd}V_{cdref}$   
(v)

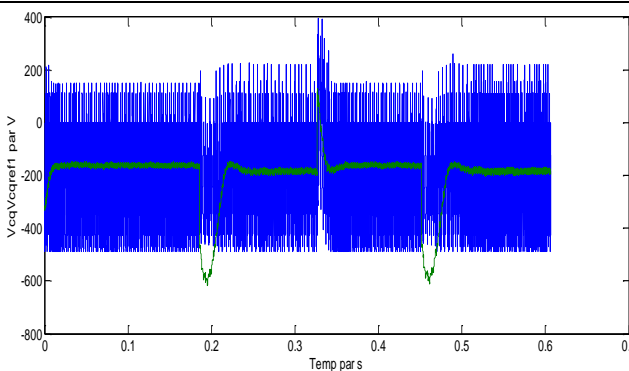


fig.III.42.Variation de tension  $V_{cq}V_{cqref1}$ (v)

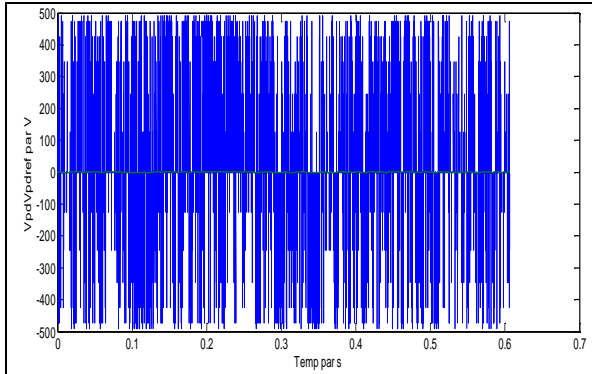


fig.III.43. Variation de tension  
 $V_{pd}V_{pdref}(v)$

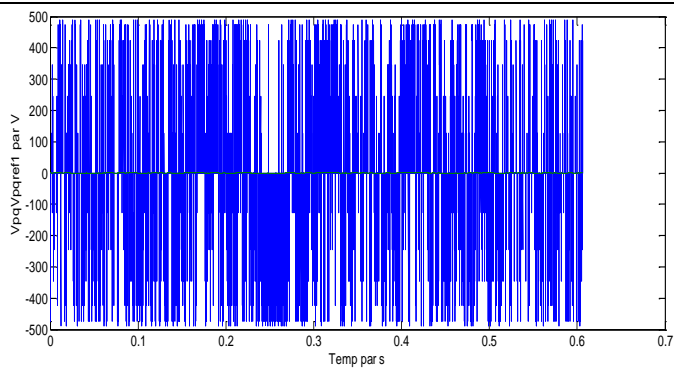


fig.III.44. Variation de tension  $V_{pq}V_{pqref1}(v)$

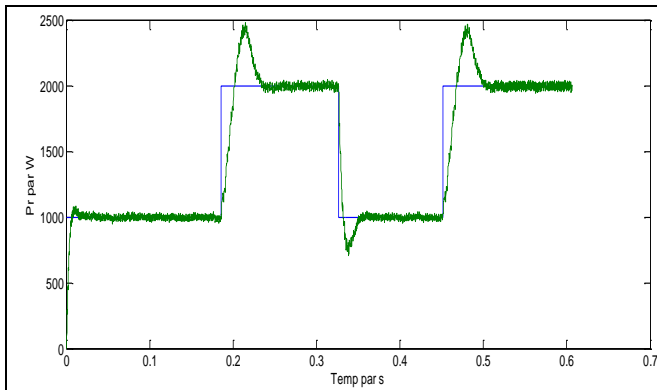


fig.III.45. Variation de la puissance active pr  
(W)

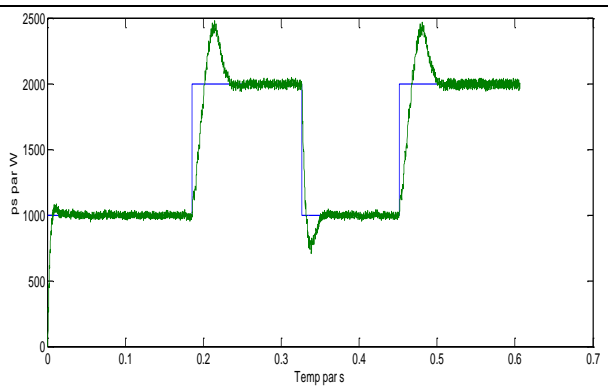


fig.III.46. Variation de la puissance active  
ps (W)

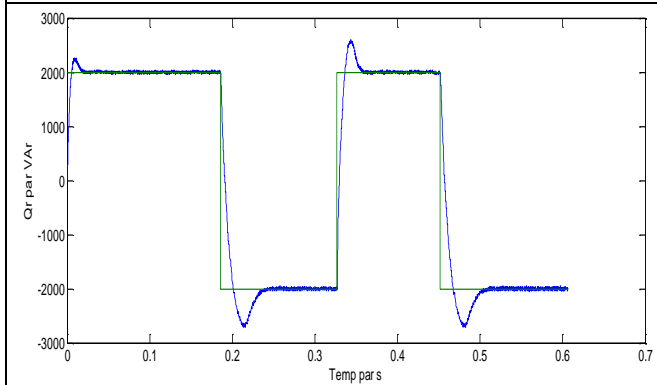


fig.III.47. Variation de la puissance réactive Qr  
(W)

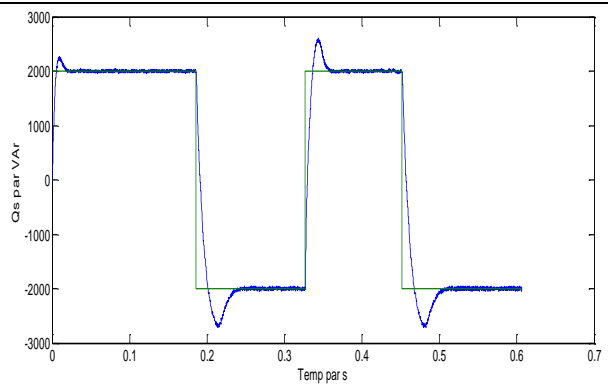


fig.III.48. Variation de la puissance réactive  
Qs (W)

***Resultat1:le modification sur r(+40%)L(30%) la partie shunt :***

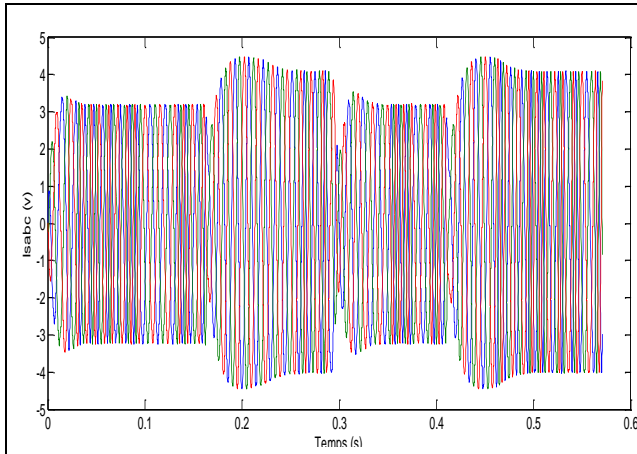


Fig.III.49. Variation du courant triphasé de la partie shunt

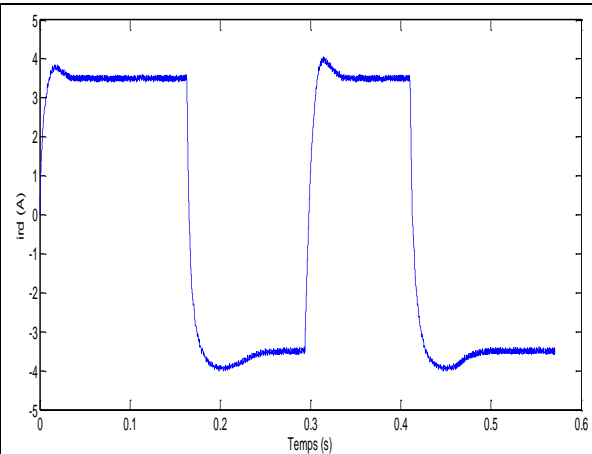


fig.III.50.Variation du courant Ird (A)

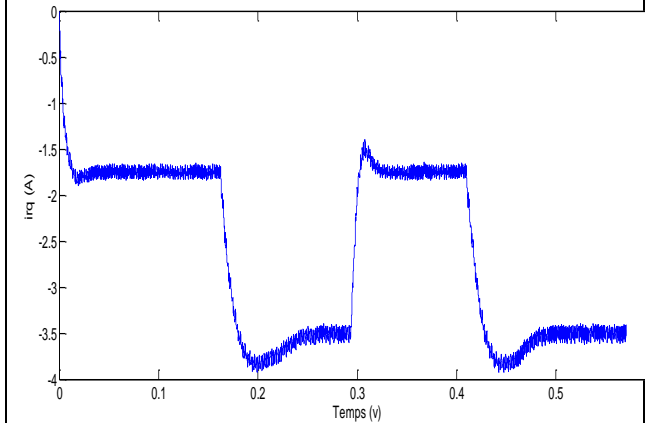


fig.III.51.Variation du courant Irq (A)

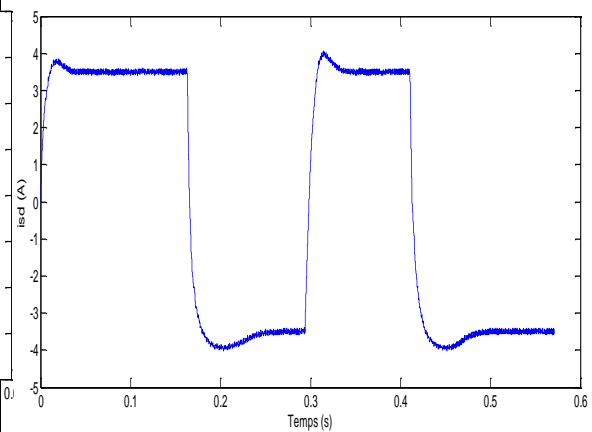


fig.III.52.Variation du courant Isd (A)

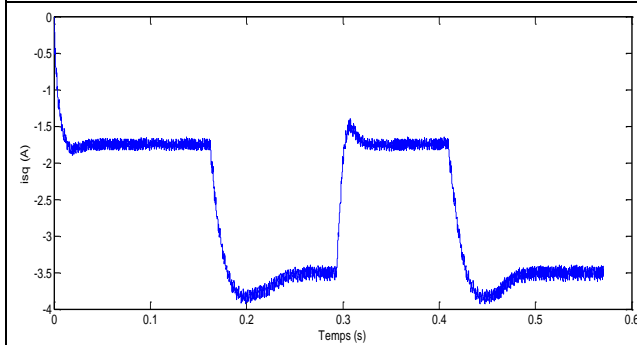


fig.III.53.Variation du courant Isq (A)

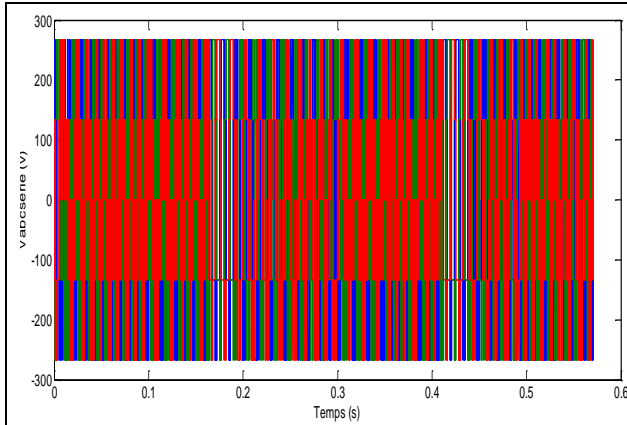


fig.III.54.Variation de tension Vabcserie (v)

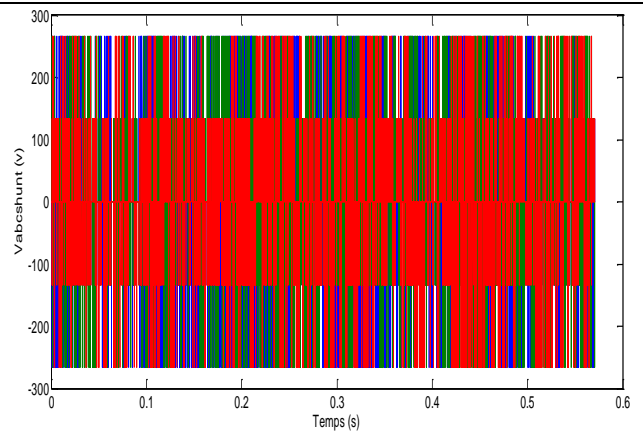


fig.III.55.Variation de tension Vabcshunt (v)

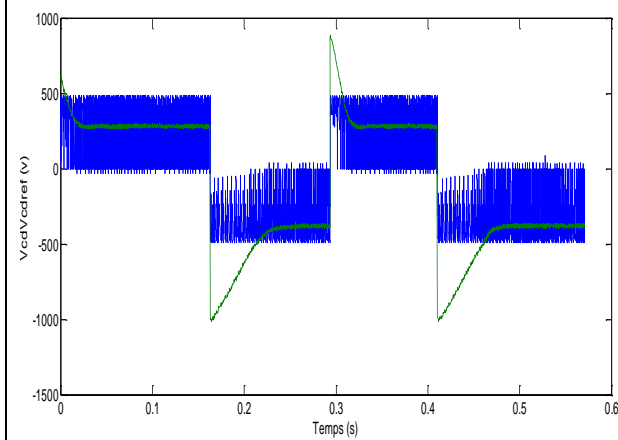


fig.III.56.Variation de tension VcdVcdref (v)

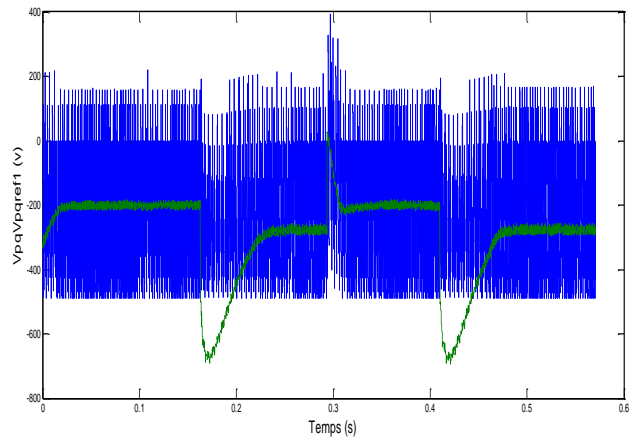


fig.III.57.Variation de tension VcqVcqref1 (v)

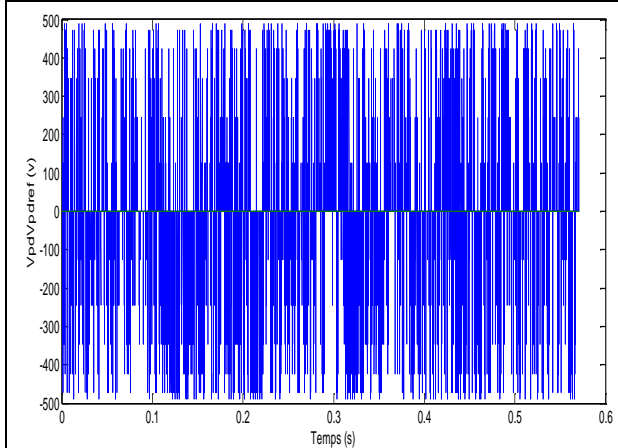


fig.III.58.Variation de tension VpdVpdref (v)

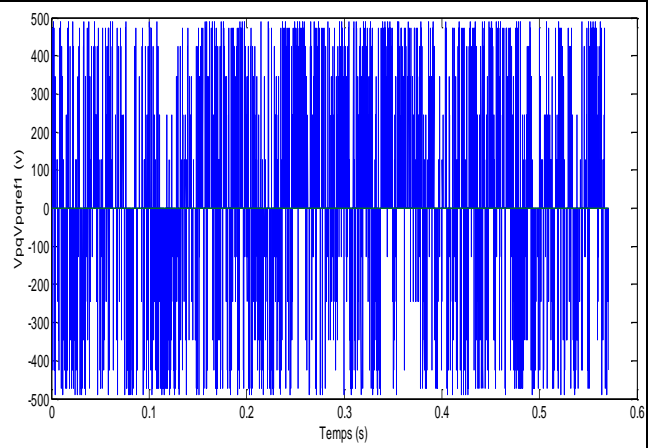


fig.III.59.Variation de tension VpqVpqref1 (v)

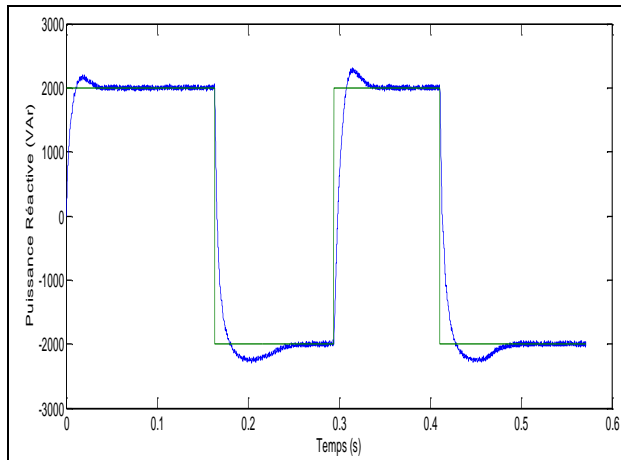


fig.III.60. Variation de la puissance réactive  $Q_s$  (Var)

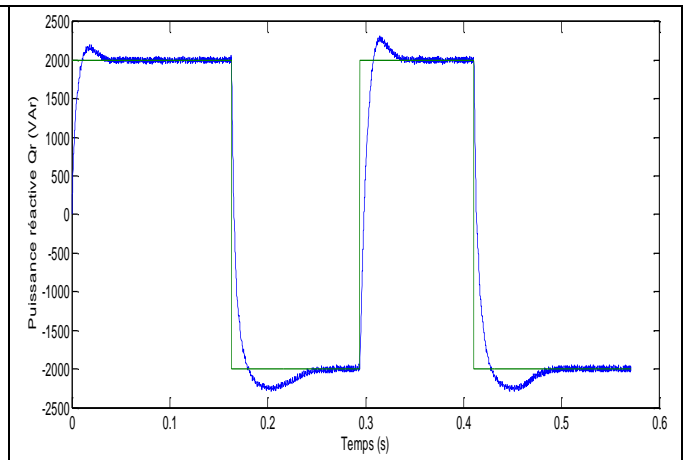


fig.III.61. Variation de la puissance réactive  $Q_r$  (VAr)

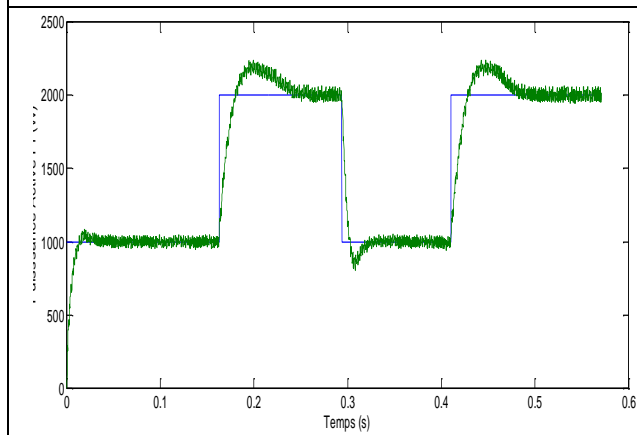


fig.III.62. Variation de la puissance active  $P_r$  (W)

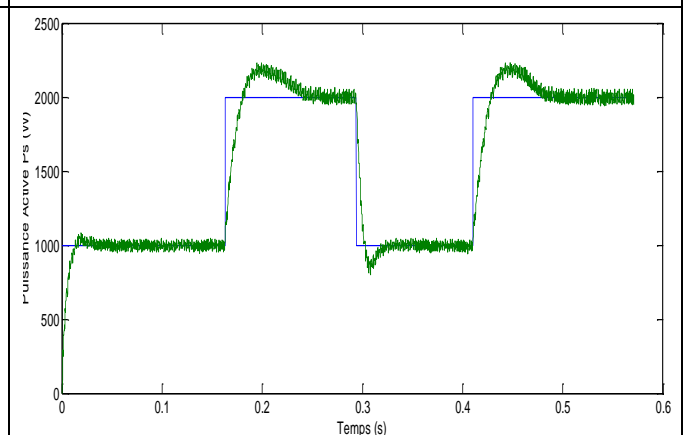


fig.III.63. Variation de la puissance active  $P_s$  (W)

***Resultat1:le modification sur r(-40%)L(-30%) la partie shunt :***

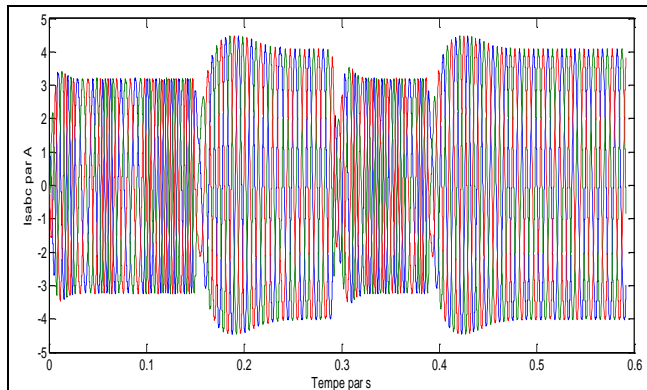


Fig.III.64. Variation du courant triphasé de la partie shunt

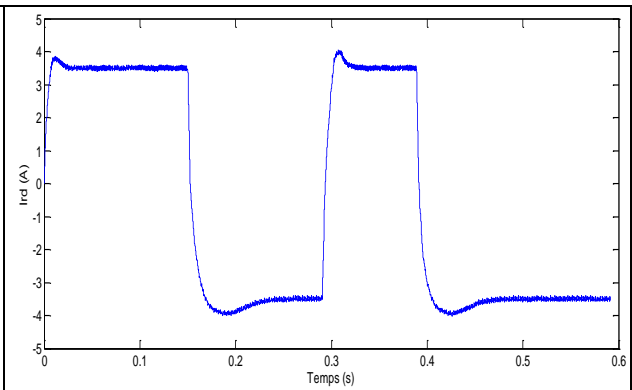


fig.III.65.Variation du courant Ird (A)

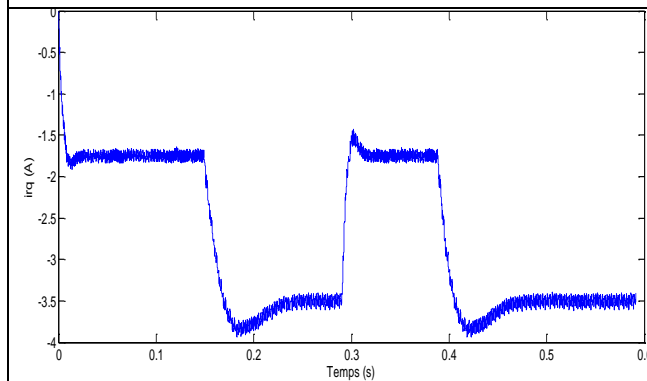


fig.III.66.Variation du courant Iriq (A)

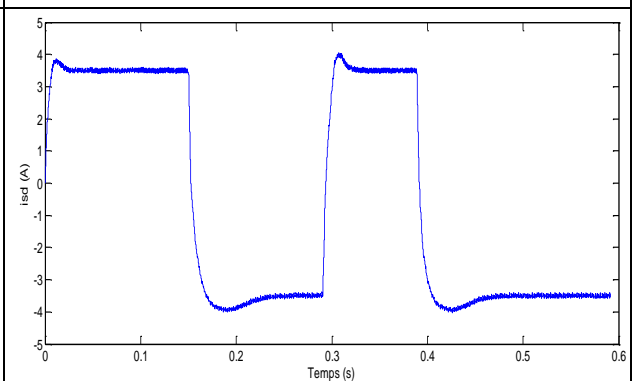


fig.III.67.Variation du courant Isd (A)

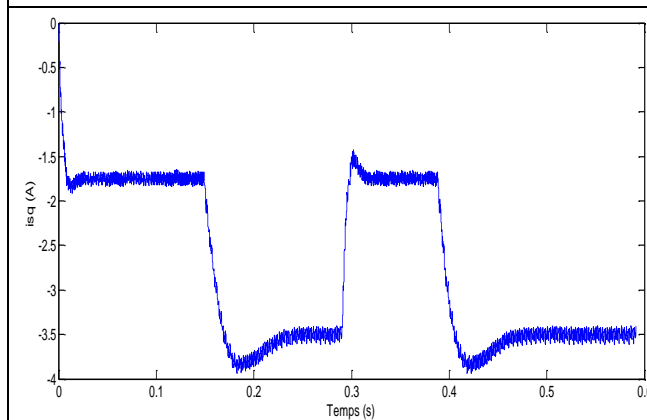


fig.III.68.Variation du courant Isq (A)

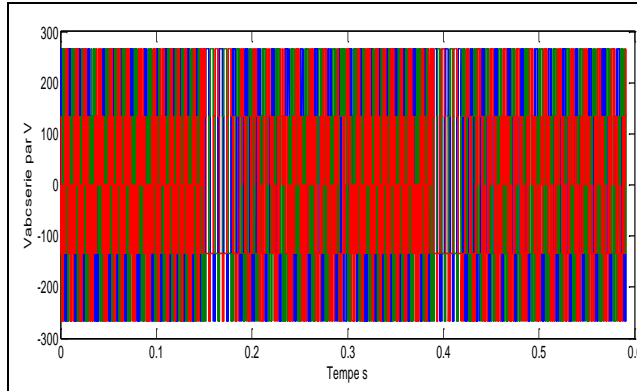


fig.III.69.Variation de tension  $V_{abcserie}$  (v)

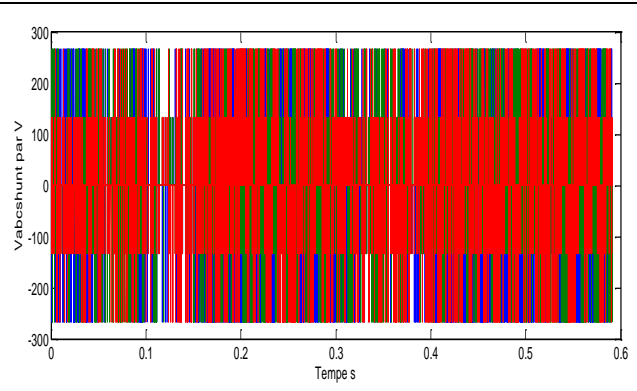


fig.III.70.Variation de tension  $V_{abcshunt}$  (v)

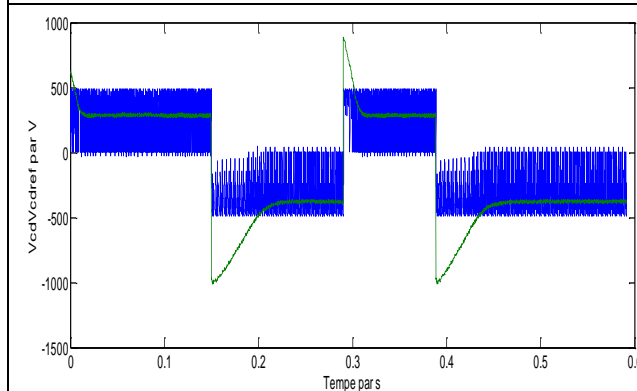


fig.III.71.Variation de tension  $V_{cd}$   $V_{cdref}$  (V)

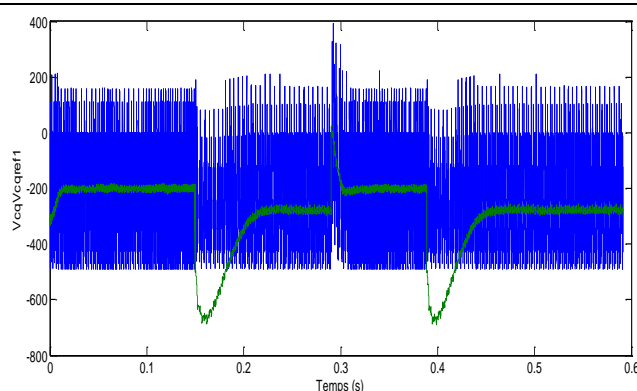


fig.III.72.Variation de tension  $V_{cq}$   $V_{cqref1}$  (V)

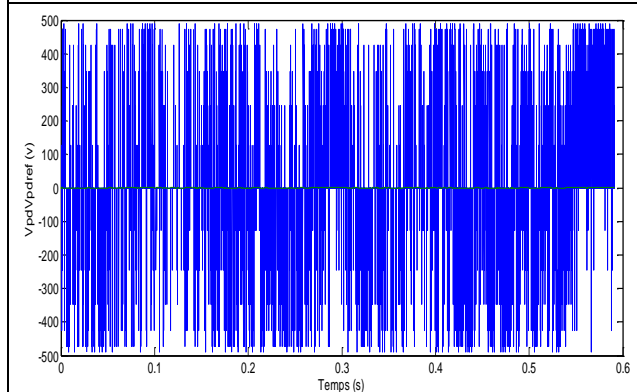


fig.III.73.Variation de tension  $V_{pd}$   $V_{pdref}$  (v)

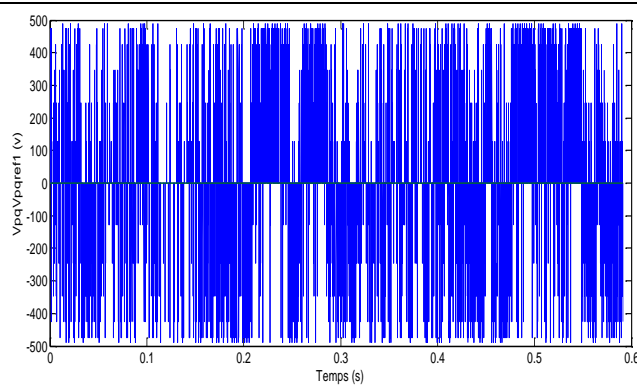


fig.III.74.Variation de tension  $V_{pq}$   $V_{pqref1}$  (v)



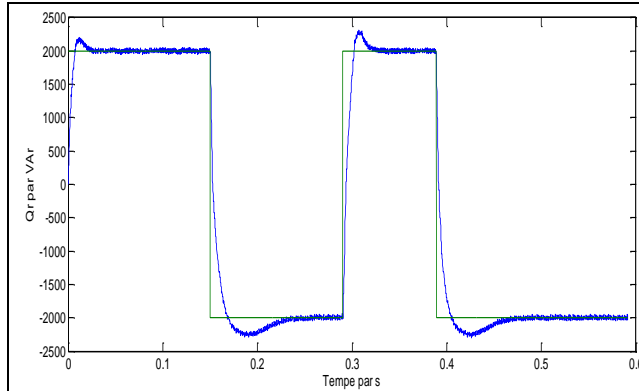


fig.III.75. Variation de la puissance réactive  $Q_r(W)$

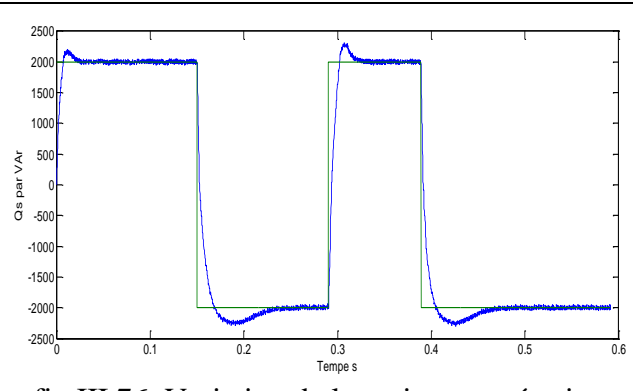


fig.III.76. Variation de la puissance réactive  $Q_s(W)$

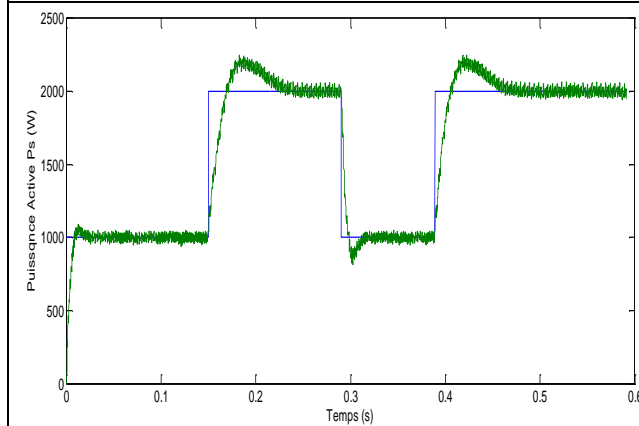


fig.III.77. Variation de la puissance active  $P_s(W)$

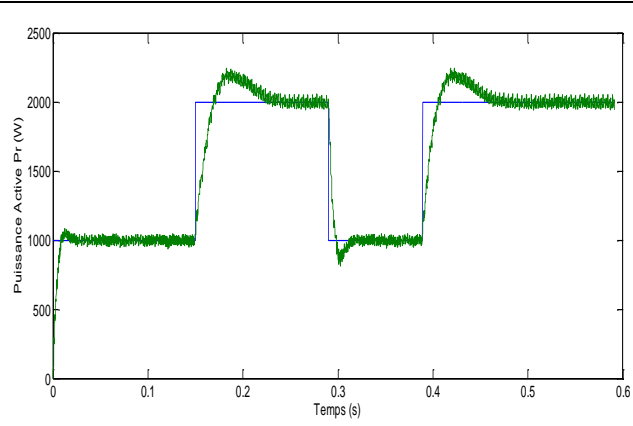


fig.III.78. Variation de la puissance active  $P_r(W)$

**III.5.Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons d'abord développé le modèle mathématique de l'UPFC et nous avons vu ses caractéristiques. Nous avons également identifié les références des deux parties de l'UPFC. Ensuite nous avons étudié les régulateurs PI-D pour contrôler ces deux parties de l'UPFC. Nous avons utilisé la méthode basée sur la MLI pour contrôler les onduleurs de tension. Enfin nous avons fait des simulations avec le logiciel Matlab/simulink 7.2. Les résultats des simulations obtenus ont validé le modèle de l'UPFC et les paramètres des régulateurs choisis et donné des meilleures performances.

## **CHAPITRE IV : COMMANDE FLOUE DE L'UPFC**

**IV.1. Introduction :**

De puis une vingtaine d'années, la commande floue connaît un intérêt croissant. L'un des principaux intérêts de ces commandes à base de logique floue consiste à pouvoir faire passer relativement simplement par l'intermédiaire de règles linguistiques, l'expertise que l'on peut avoir du processus vers le contrôleur [17]. Il est ainsi possible de transformer le savoir de l'expert en règles simples que le contrôleur peut mettre en œuvre. Une facilité d'implantation des solutions pour des problèmes complexes est alors associée à une robustesse vis-à-vis des incertitudes et la possibilité d'intégration du savoir de l'expert. Du point de vue historique, les prémisses de la logique floue, visant à traiter la notion des incertitudes, datent des années 30. Il faudra cependant attendre que Zadeh [17] introduise le concept de sous-ensembles flous, en 1965, pour assister aux premières grandes avancées dans le domaine. Par la suite en 1974, Mamdani introduisait la commande floue pour la régulation de processus industriel. Enfin, dans les années 80, la commande floue connaît un essor considérable au Japon, notamment grâce aux travaux de Sugeno pour ce répandre ensuite dans le monde entier [17].

**IV.1. Logique floue et ensembles flous:**

La notion de la logique floue permet d'étendre de la notion de logique classique, associée aux variables booléennes ne prenant que deux valeurs 0 et 1. Il est alors possible d'associer à des variables des coefficients d'appartenance à des sous-ensembles flous prenant des valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$  et quantifiant l'incertitude sur la variable. Un événement certain pour la variable se traduira par un coefficient d'appartenance au sous-ensemble flou, c'est-à-dire à la propriété, égal à 1 alors que la valeur sera inférieure à 1 en présence d'incertitudes. Il vient alors qu'une valeur nulle pour un coefficient d'appartenance indique que la possibilité d'appartenance au sous-ensemble sélectionné de la variable représentant la grandeur concernée est complètement rejetée [17][19].

L'univers de discours d'une variable donnée, c'est-à-dire son domaine de variation, peut alors être divisé en plusieurs sous-ensembles au moyen de fonctions d'appartenance avec des fonctions d'appartenances triangulaires comme indiqué sur la figure IV.1 où  $(D \mu)$  est le degré d'appartenance [19].

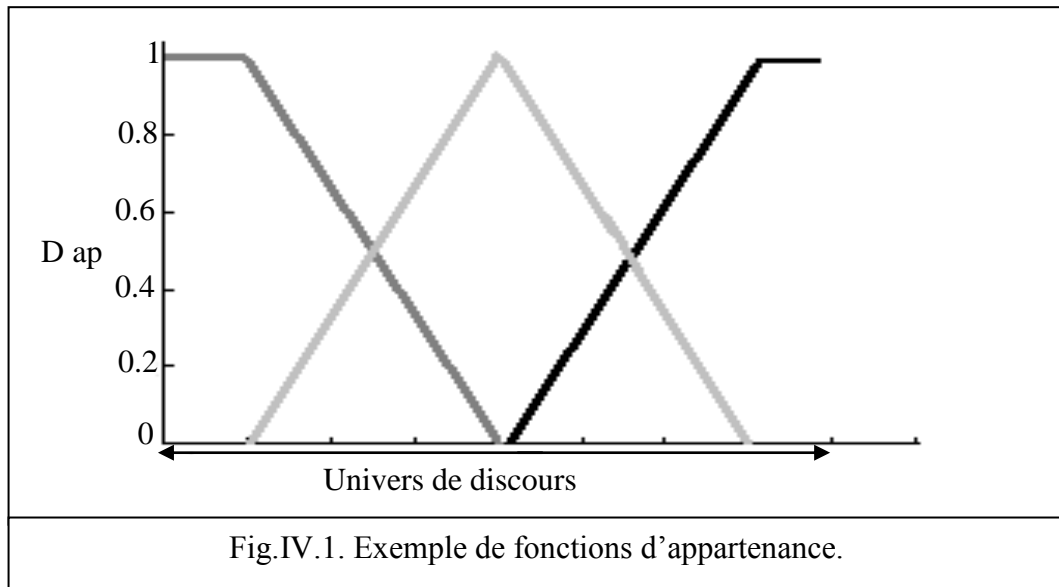


Fig.IV.1. Exemple de fonctions d'appartenance.

Pour chaque valeur de la variable considérée, des degrés d'appartenance à chacun des sous-ensembles flous vont être définis. La fonction d'appartenance  $f_i$ , se rapporte alors au sous-ensemble flou  $sf_i$ , etc.

Le problème sera donc de choisir le nombre et le type de sous-ensembles flous pour chacune des variables devant être traitée [21][17].

**IV.2. Principe d'une commande floue:**

La structure d'une commande floue peut être décomposée en trois grands modules [21][17].

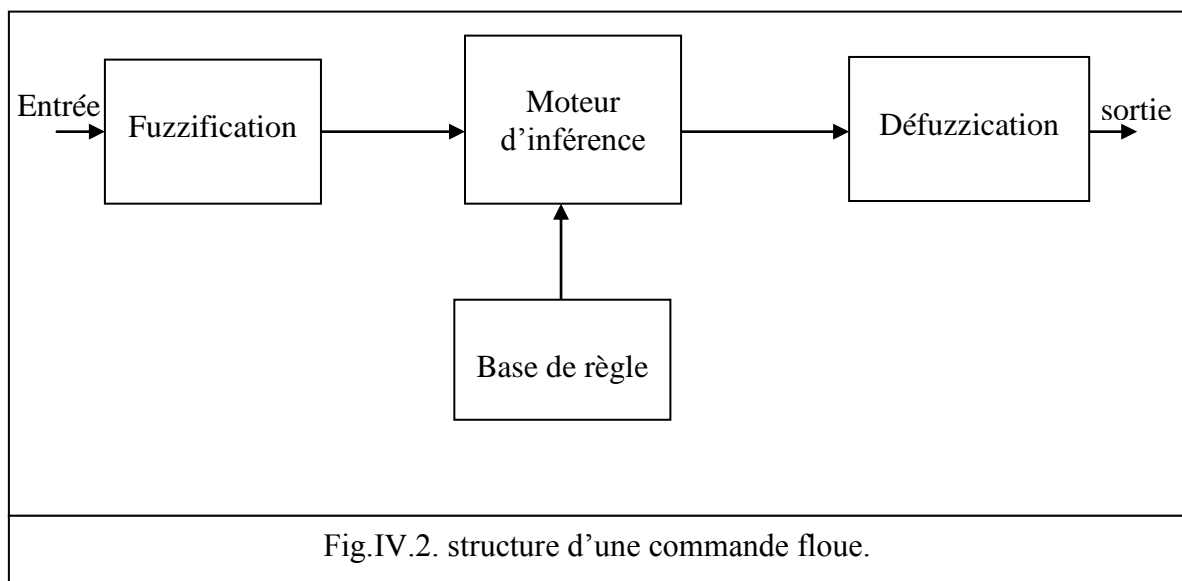


Fig.IV.2. structure d'une commande floue.

Le premier de ces modules traite les entrées du système : c'est la fuzzification.

Il permet d'associer à chacune des entrées réelles, par le biais de fonctions d'appartenances, un degré d'appartenance pour chacun des sous-ensembles flous définis sur l'ensemble du discours.

Le deuxième module est constitué du moteur d'inférences et de la base de règles. Celles-ci est constitué de règles de type « Si..., Alors .... » et va permettre de passer des degrés d'appartenance des grandeurs d'entées aux degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous de la grandeur de commande. Le moteur d'inférence, lui, va permettre de générer une conclusion à partir des entrés et des règles actives. Il calcule alors les degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous correspondant à la commande du système.

Le dernier module, l'interface de défuzzification, va permettre de transformer les degrés d'appartenance des sous-ensembles flous de commande en grandeur numérique. C'est la transformation inverse du module de fuzzification.

À partir de cette structure, différents types de correcteurs flous vont alors pouvoir être définis.

La section suivante présente les structures des correcteurs flous [21].

#### **IV.2.3. Structure du correcteur flou:**

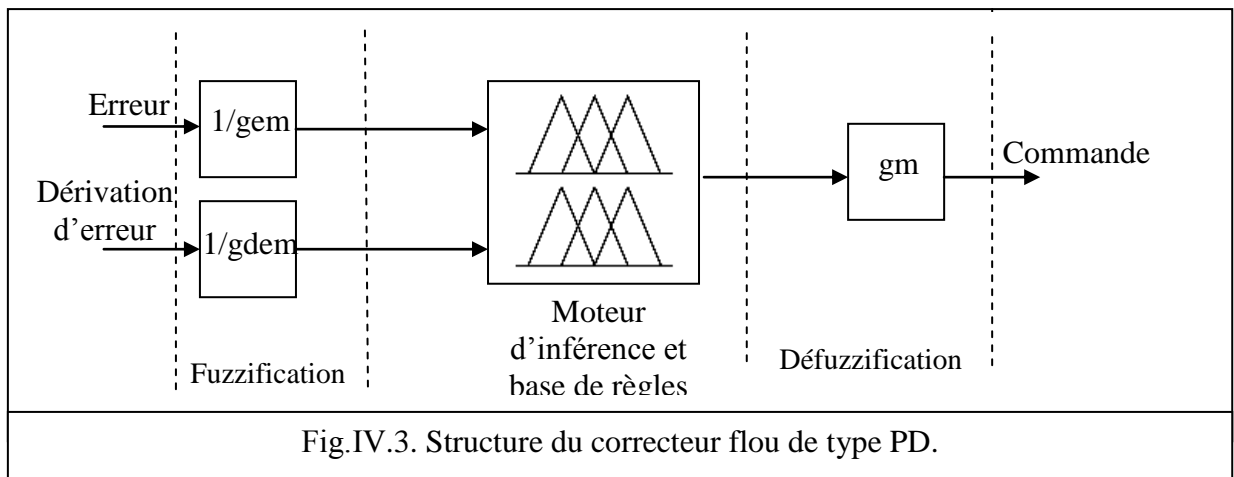
L figure III.3 montre la structure d'un moteur flou de type PD.

Deux entrées sont traitées, l'erreur (e) et dérivée de l'erreur (de) pour une commande unique  $S_{PD}$ . Les deux entrées sont normalisées au moyen de gain de normalisation, (gem) pour l'erreur et (gdem) pour la dérivée de l'erre. Un gain de dénormalisation, (gm), est affecté sur la sortie. L'univers du discours pour le moteur flou est ainsi ramené sur l'intervalle [-1 , +1]. Les facteurs de normalisation permettent ainsi de définir le domaine de variation normalisé des entrées et le gain de dénormalisation définis le gain en sortie du correcteur flou de type PD.

Ces éléments permettent d'agir de façon globale sur la surface de commande en élargissant ou réduisant l'univers du discours des grandeurs de commande. En ce qui concerne le module de fuzzification, il existe de nombreux types de fonctions d'appartenance comme par exemple des fonctions de type triangle, trapèze ou gaussienne. Celles-ci vont être définies sur l'univers du discours normalisé afin de donner les degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous en entrée. L'influence des positions des fonctions d'appartenance va également être traduite par une action globale sur la surface de commande. Souvent, dans le domaine de commande, elles seront positionnées de façon à obtenir une action réactive lorsque la valeur de la grandeur régulée est éloignée de la référence mais un gain moindre autour de celle-ci [17].

Pour le deuxième module, la base de règles floues va caractériser les relations entre les classes d'événement possible en entrée et les commandes correspondantes. Ainsi pour chaque combinaison des sous-ensembles flous activée en entrée, la base de règle associe un sous ensemble flou de sortie. La base de règles possède alors une influence locale sur la surface de commande. La modification d'une règle d'adapter précisément la commande par rapport à une contrainte particulière [17].

Enfin, plusieurs méthodes permettent de réaliser l'étape de défuzzification. La méthode de centre de gravité est l'un des moyens les plus simples et les plus utilisés. Elle consiste à rechercher le centre de gravité d'un système de sous-ensembles flous dont les poids sont leurs coefficients d'appartenance. La sélection des sous-ensembles flous de commandes activés au moyen de degrés d'appartenance conduit alors par cette méthode à la définition d'une grandeur de commande réelle [21].



### IV.3. Contrôle flou de l'UPFC:

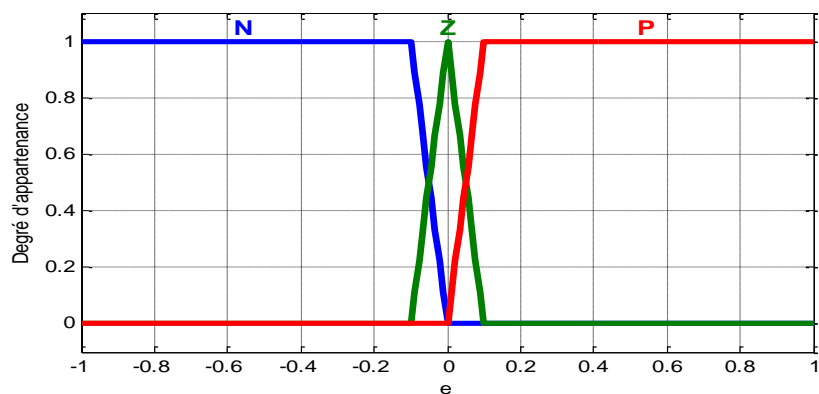
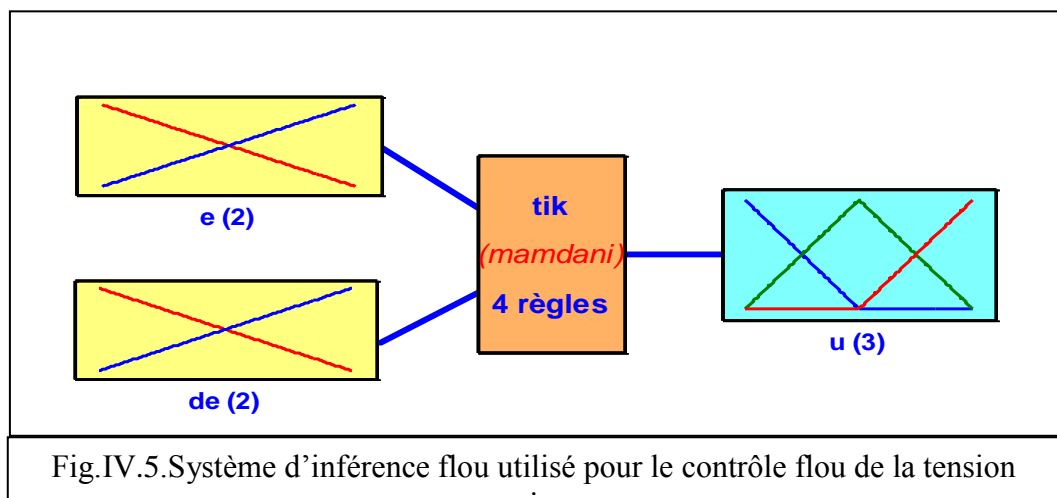
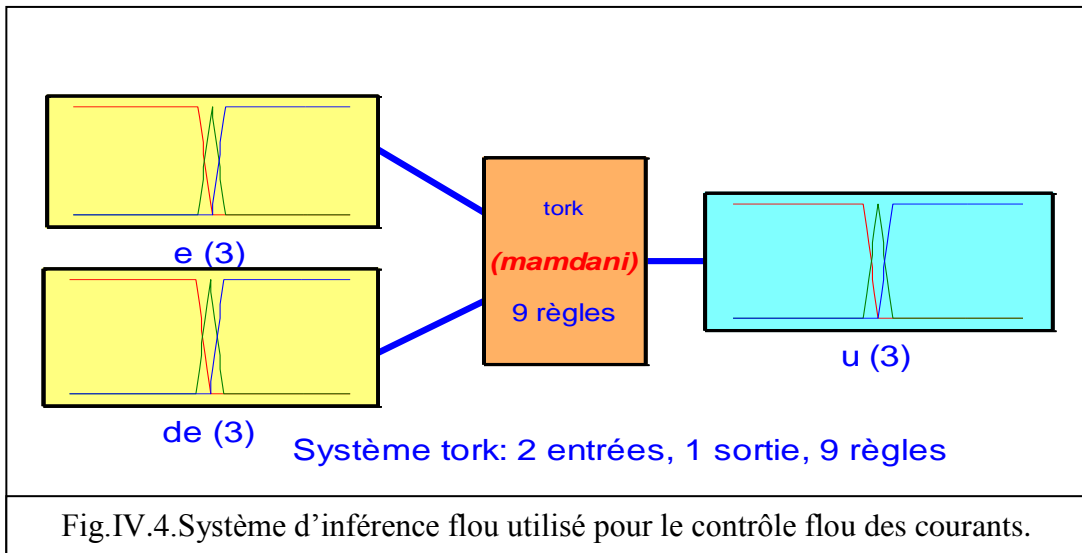
Dans cette partie nous avons utilisé la logique floue pour contrôler la partie shunt de l'UPFC, car, nous avons utilisé trois régulateurs flous, deux sont identiques pour contrôler les deux composantes (direct et en quadrature) du courant. Le troisième est utilisé pour contrôler la tension du bus continu. Ces régulateurs sont capables de changer les valeurs de puissances active et réactive transitées suivant les valeurs désirées.

#### IV.3.1. Structure des contrôleurs flous utilisés:

##### IV.3.1.1. L'opération de fuzzification:

La grandeur d'entrée doit d'abord être fuzzifiée, c'est-à-dire que l'on va fixer les valeurs linguistiques ainsi que la forme des fonctions d'appartenance. Cette opération doit être faite également sur la variable de sortie. Bien sûr cette opération pour la sortie n'est pas exploitable

pour attaquer l'interface de puissance. Il faudra donc avoir en tête de faire l'opération de défuzzification pour résoudre le problème. On va prendre l'exemple de notre choix où l'on va fuzzifier l'erreur (notée  $e$ ) et la variation de l'erreur (notée  $de$ ), entrées du régulateur et la sortie (notée  $u$ ).



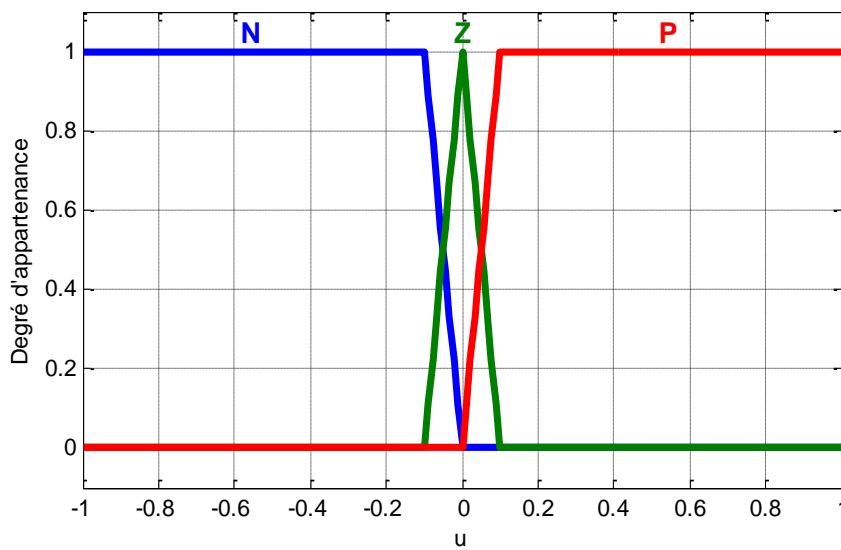
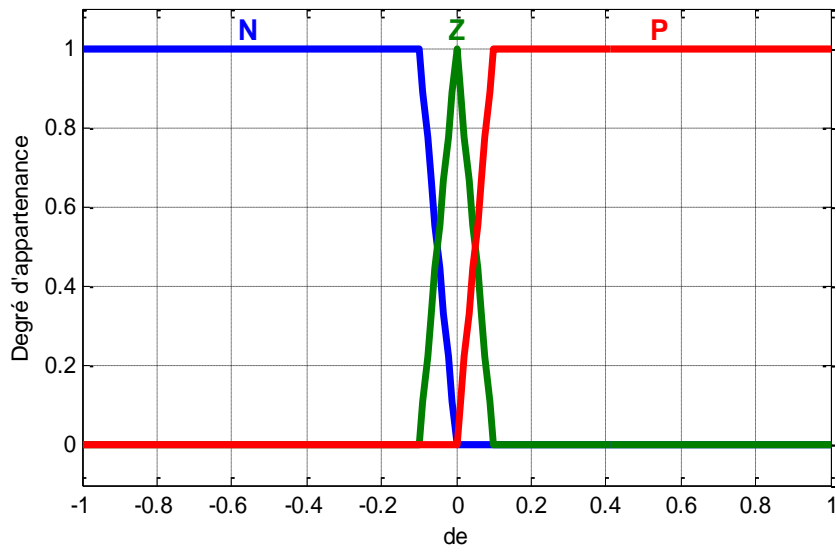
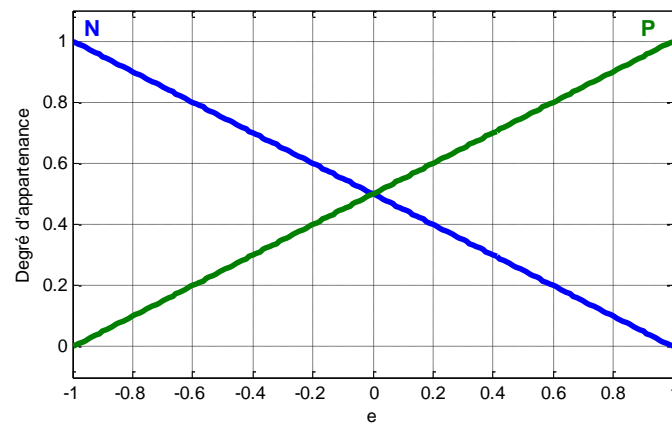


Fig.IV.6 .Sous-ensembles flous des entrées et de sortie du régulateur flu de courant.





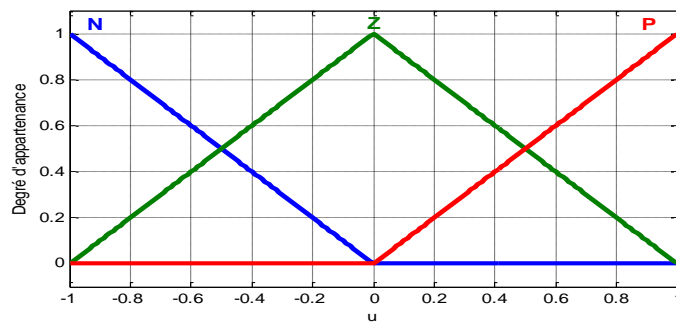
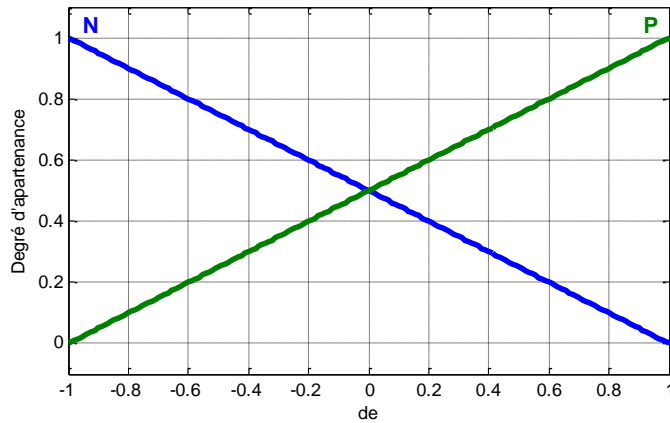


Fig.IV.7.Sous-ensembles flous des entrées et de sortie du régulateur flou de tension continue.

**IV.3.1.2. Base de règles d'inférence:**

Les règles de commande des deux régulateurs flous des courants de la partie shunt sont fixées comme indiqué sur la figure IV.8 .

e de	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Fig.IV.8 .Base de règles d'inférence.

Et les règles de commande du régulateur flou de tension continue sont fixées comme indiqué sur la figure IV.9.

$e$ $de$	N	P
N	N	Z
P	Z	P

Fig.IV.9.Base de règles d'inférence.

#### IV.3.1.3. L'opération de défuzzification:

On a choisi pour l'opération d'agrégation des règles l'opérateur (Max) et pour la défuzzification l'opérateur (barycentrique). La fonction d'appartenance du sous-ensemble flou relatif à la variation de la commande  $\Delta u$  correspond au maximum des commandes élémentaires. Ces commandes élémentaires sont construites en utilisant l'opérateur (Min) pour l'intersection, l'implication floue et l'opérateur (Max) pour l'union. Les figures IV.10 et IV.13 montre cette opération.

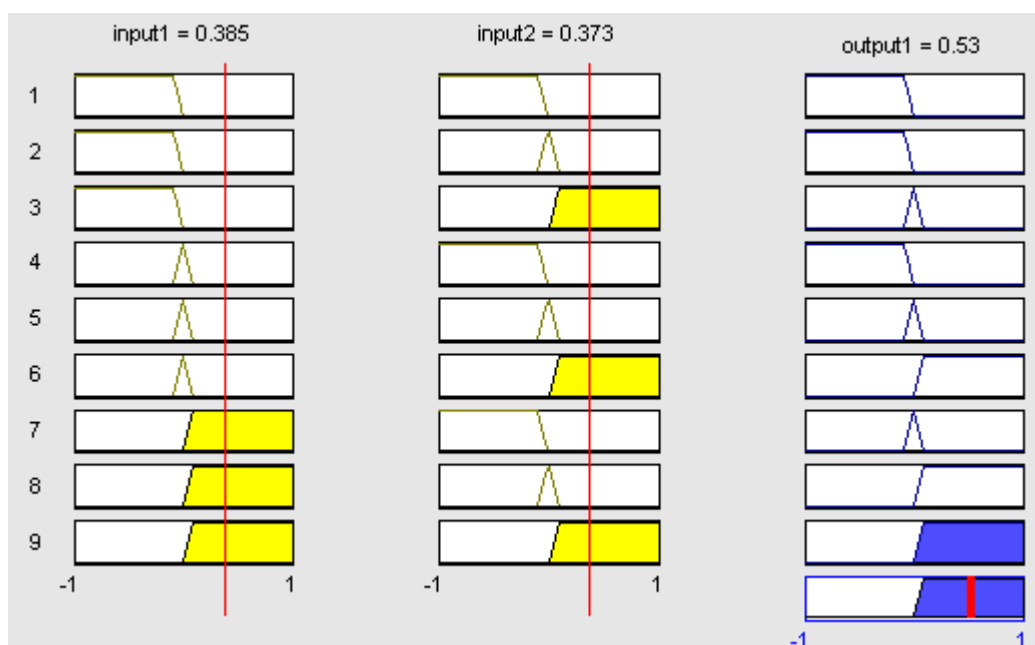


Fig.IV.10.L'opération de défuzzification du régulateur flou du courant.

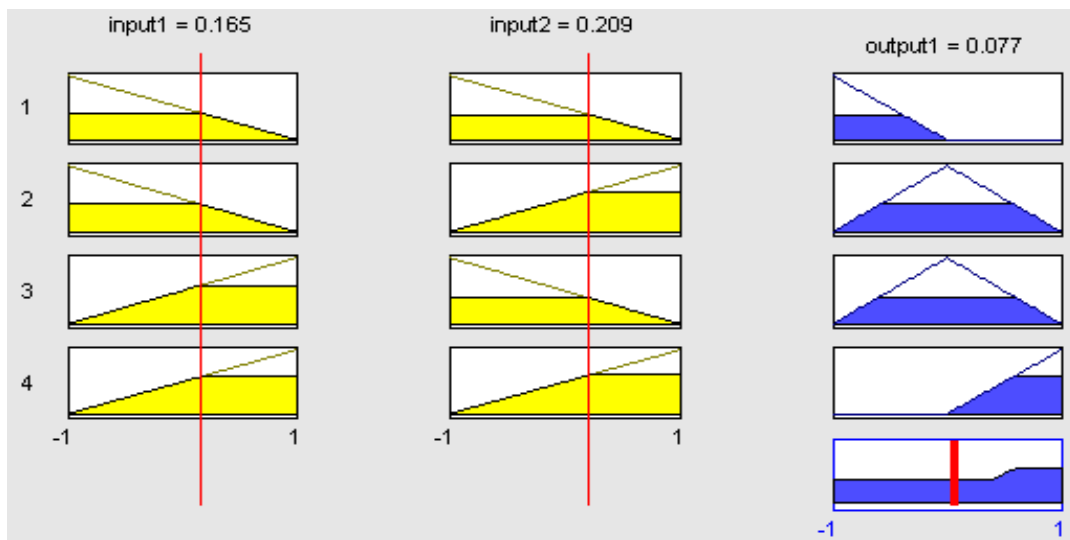


Fig.IV.11.L'opération de défuzzification du régulateur flou de tension continue.

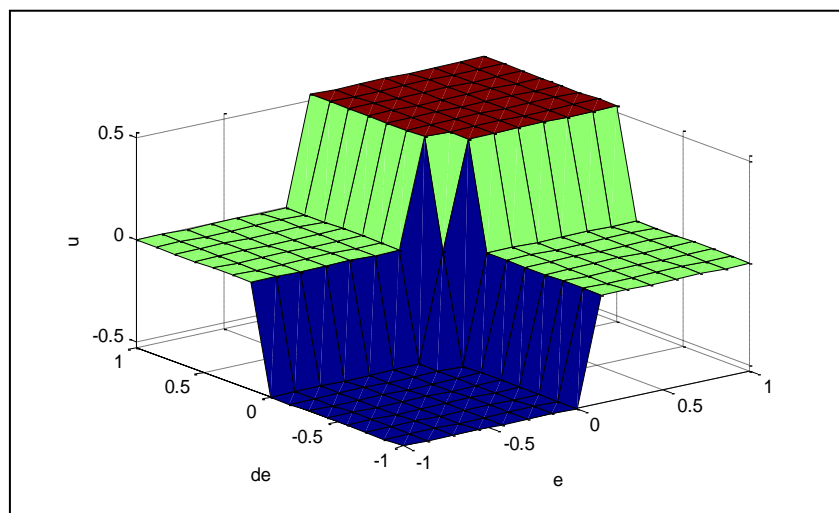


Fig.IV.12. Surface de commande de régulateur de courant.

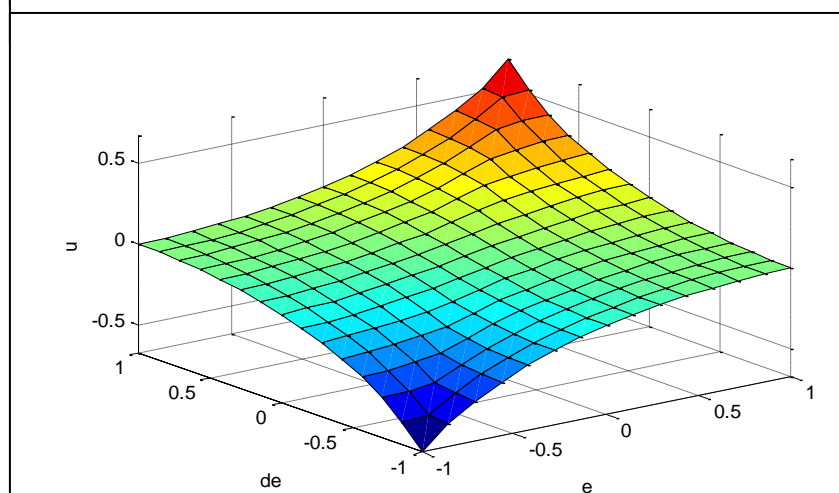


Fig.IV.13. Surface de commande de régulateur de tension continue.

#### IV.4. Les résultats des simulations:

Nous avons fait les simulations avec les outils flous du logiciel Matlab/simulink. Nous avons choisi les valeurs des références des puissances comme suit:

$P_{ref} = -1000w$  et  $Q_{ref} = -500Var$ . À l'instant  $t = 0.3s$  nous avons changé la valeur de référence de la puissance réactive pour qu'elle devienne  $Q_{ref} = 500Var$  et à l'instant  $t = 0.5s$  nous avons changé la valeur de référence de la puissance active pour qu'elle devienne  $P_{ref} = 1000w$

Les figures IV.14 à IV.22 montrent les variations de :

- les puissances actives  $P_s$  et  $P_r$ .
- la puissance réactives  $Q_s$  et  $Q_r$ .
- les courants et les tensions des deux parties série et shunt de l'UPFC.

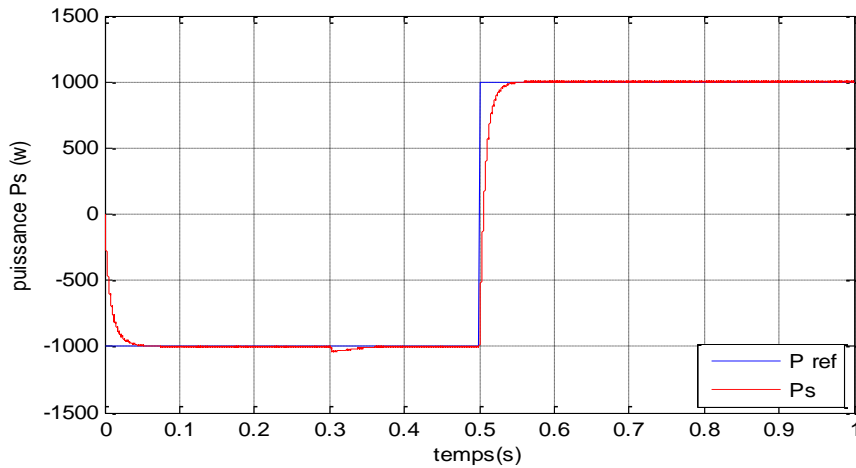


Fig.IV.14. Variation de puissance active  $p_s$ .

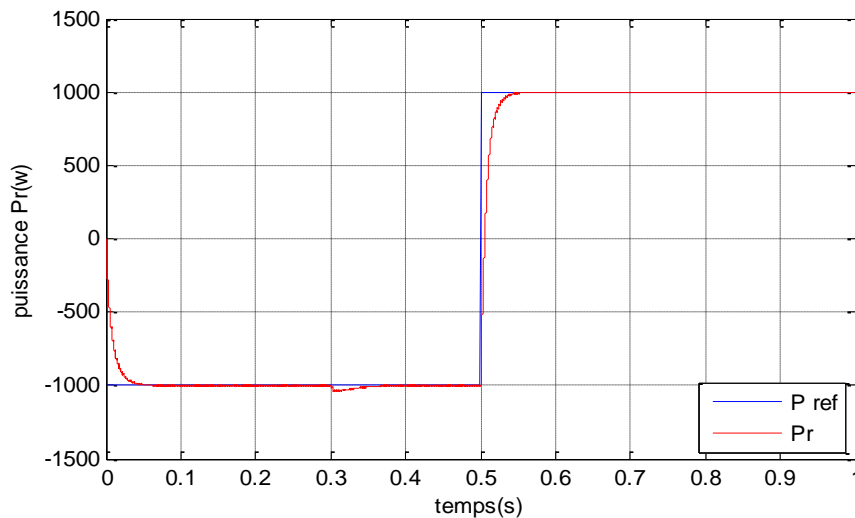


Fig.IV.15. Variation de puissance active  $p_r$ .

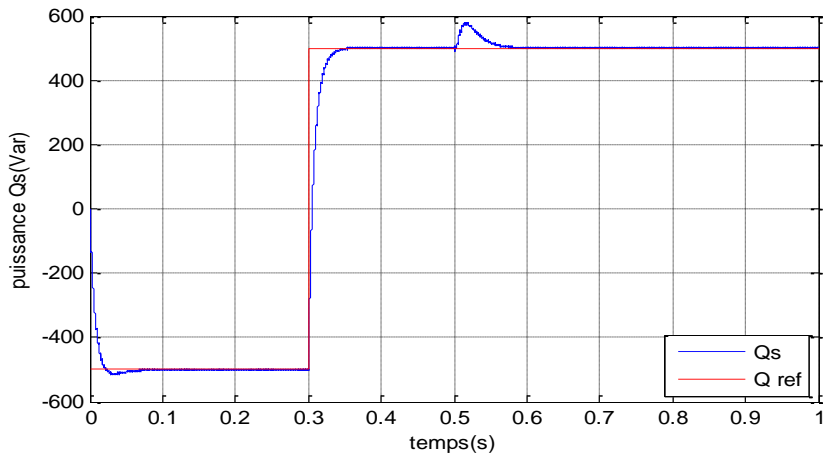


Fig.IV.16. Variation de la puissance réactive  $Q_s$ .

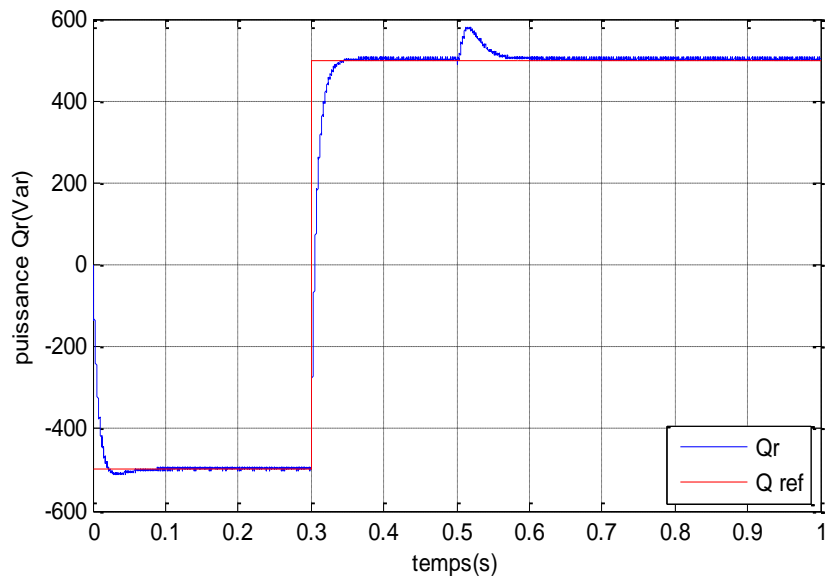
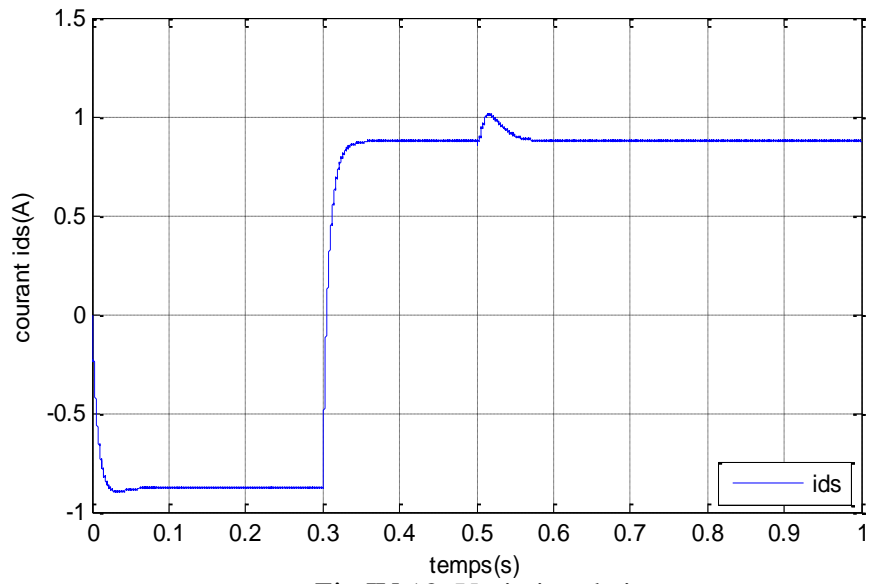
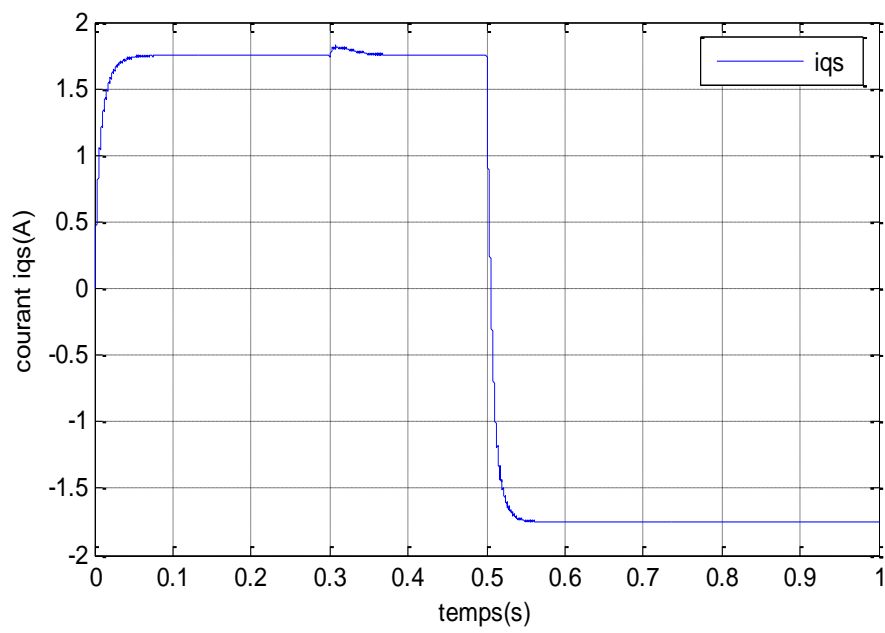


Fig.IV.17. Variation de la puissance réactive  $Q_r$ .

Fig.IV.18. Variation de  $i_{ds}$ .Fig.IV.19. Variation de  $i_{qs}$

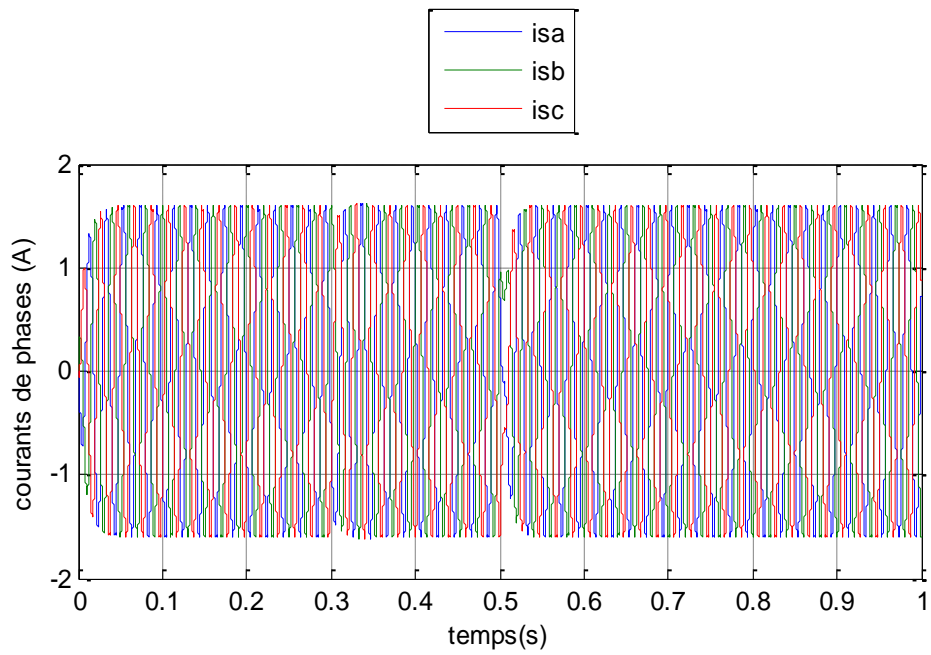


Fig.IV.20. Variation du courant triphasé de la partie série.

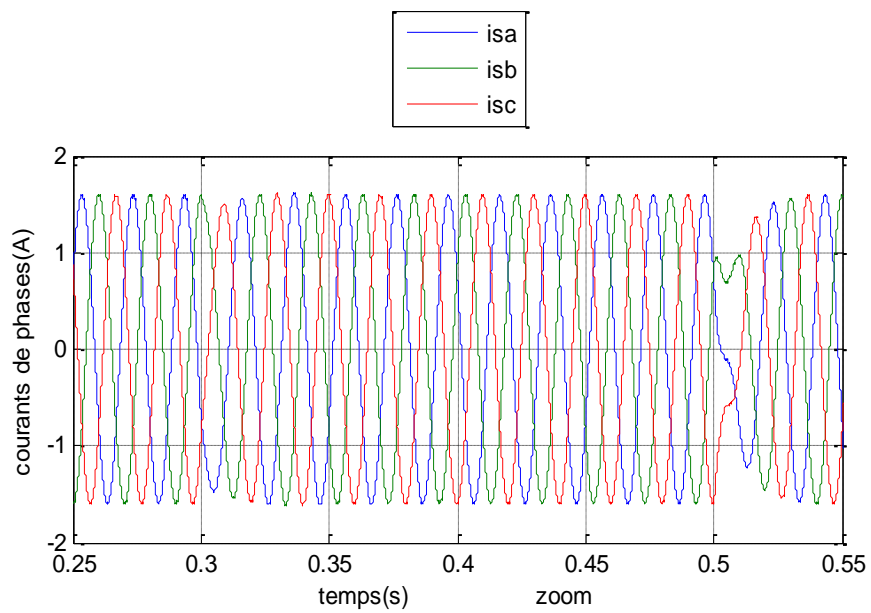
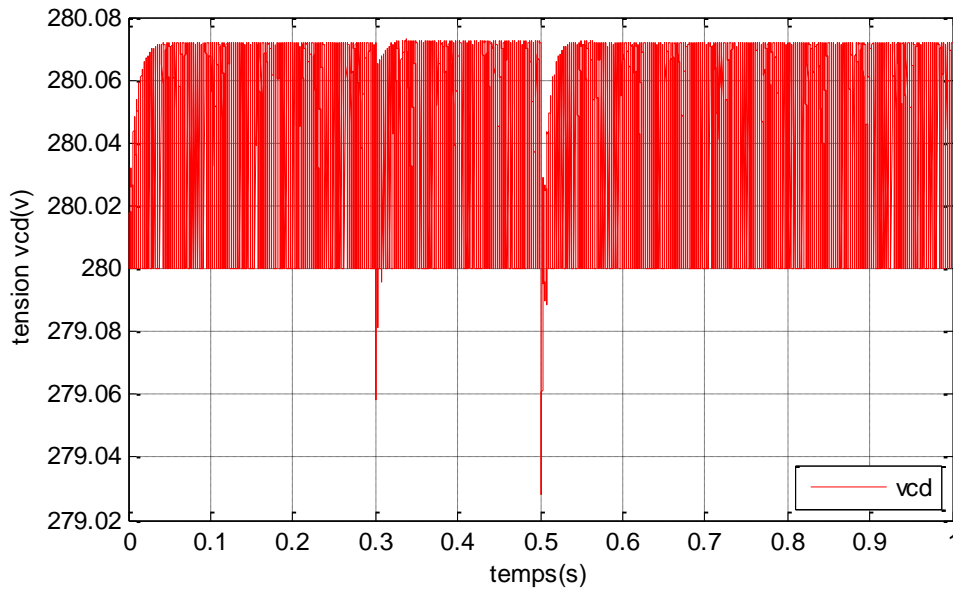


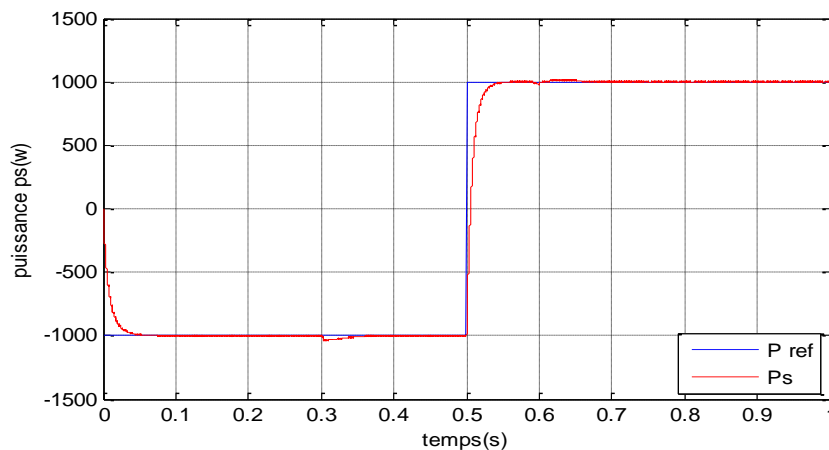
Fig.IV.21. Variation du courant triphasé de la partie série.

Fig.IV.22. Variation de tension  $V_{dc}$ .

Nous remarquons que les puissances active et réactive dans la ligne suivent leurs consignes, cela valide le bon fonctionnement des régulateurs choisis pour la partie série de l'UPFC. Et nous remarquons aussi que la tension continue et aux points de raccordement reste constante grâce aux régulateurs choisis pour la partie parallèle.

#### IV.4.1. Prise en compte d'une perturbation :

La perturbation pourra être simulée par un créneau de tension limité dans le temps (entre 0.59s et 0.60s) et décalé par rapport au début de la simulation traduisant par une surtension. Cette perturbation est appliquée au niveau de la partie série de l'UPFC. Les résultats de simulation sont montrés sur les figures IV.23 à IV.27 .

Fig.IV.23. Variation de  $p_s$ .



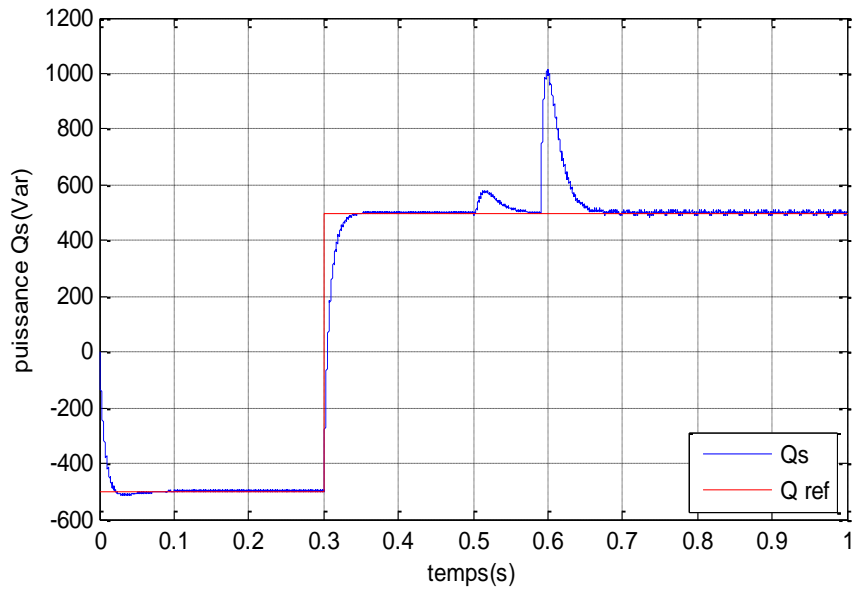


Fig.IV.24. Variation de  $Q_s$ .

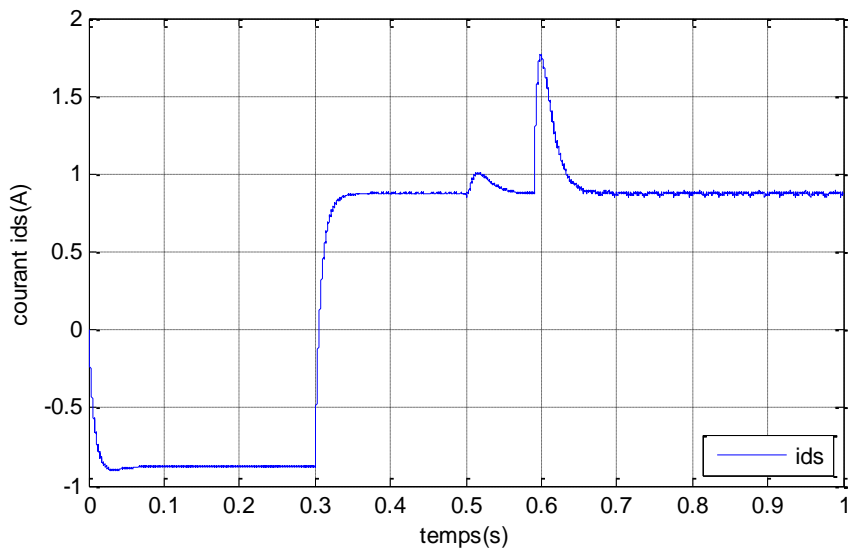


Fig.IV.25. Variation du courant  $i_{ds}$ .

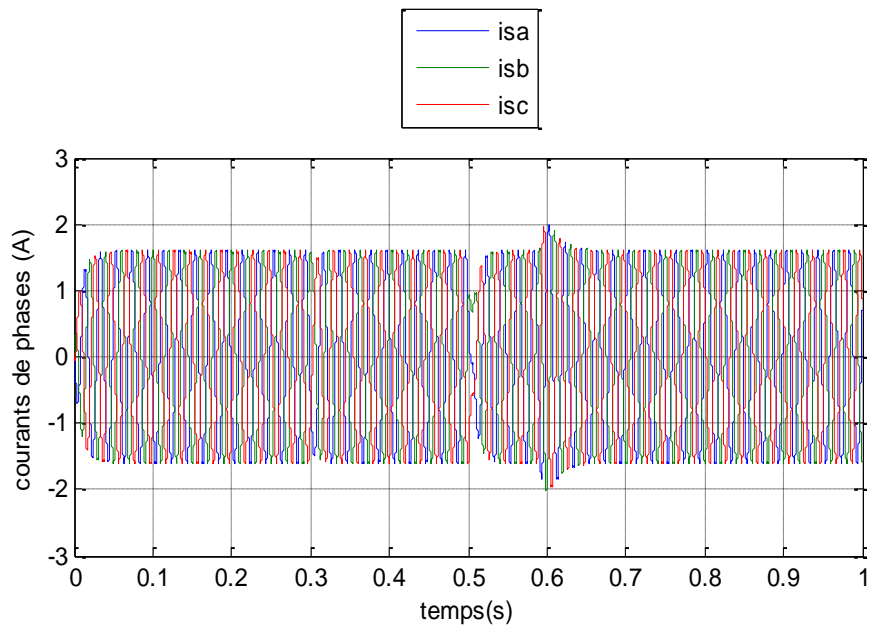


Fig.IV.26. Variation du courant triphasé de la partie série.

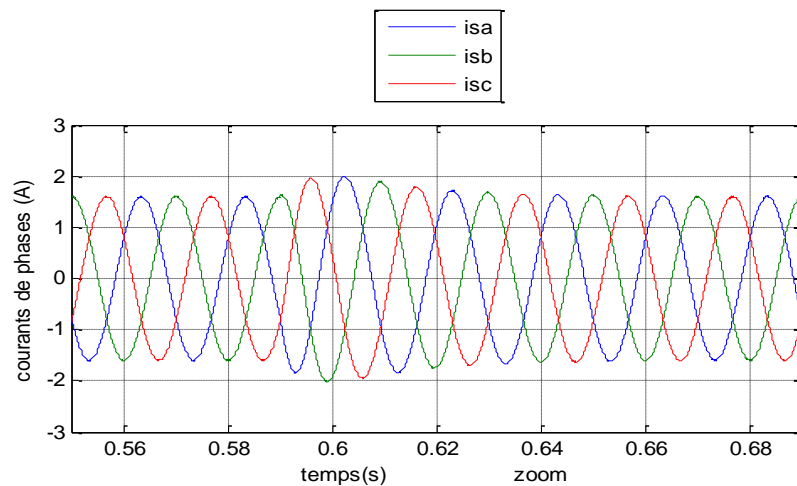


Fig.IV.27. Variation du courant triphasé de la partie série.

#### 4.2. Prise en compte de l'augmentation de l'inductance de fuite $L$ :

Nous avons diminué la valeur de l'inductance de la ligne de transmission de 35% et nous avons fait la simulation du système étudié où les résultats de simulation des puissances active et réactive sont représentés sur les figures IV.28 et IV.29.

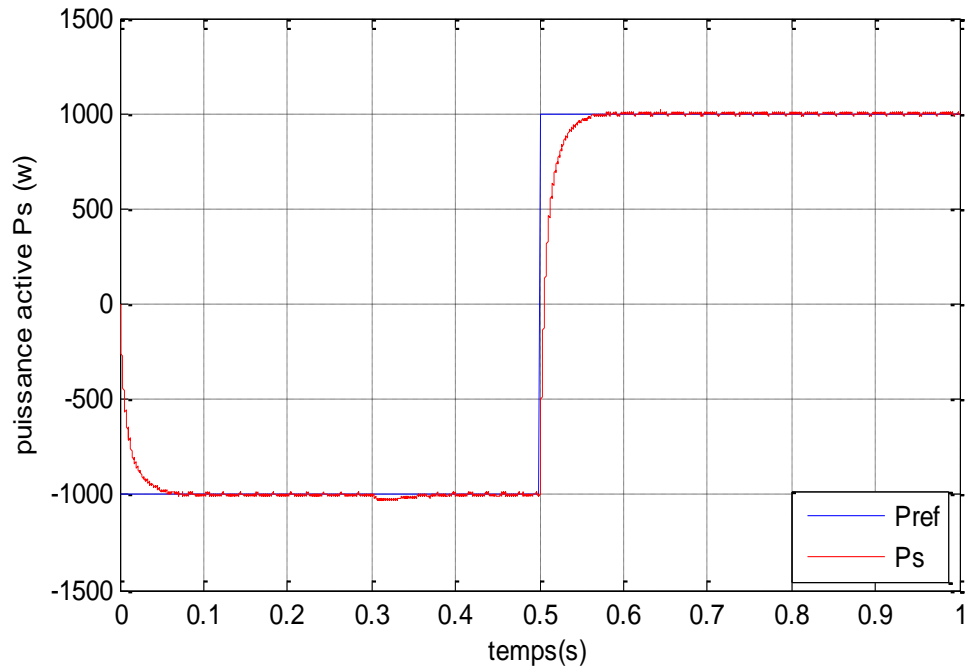


Fig.IV.28. Variation de  $p_s$ .

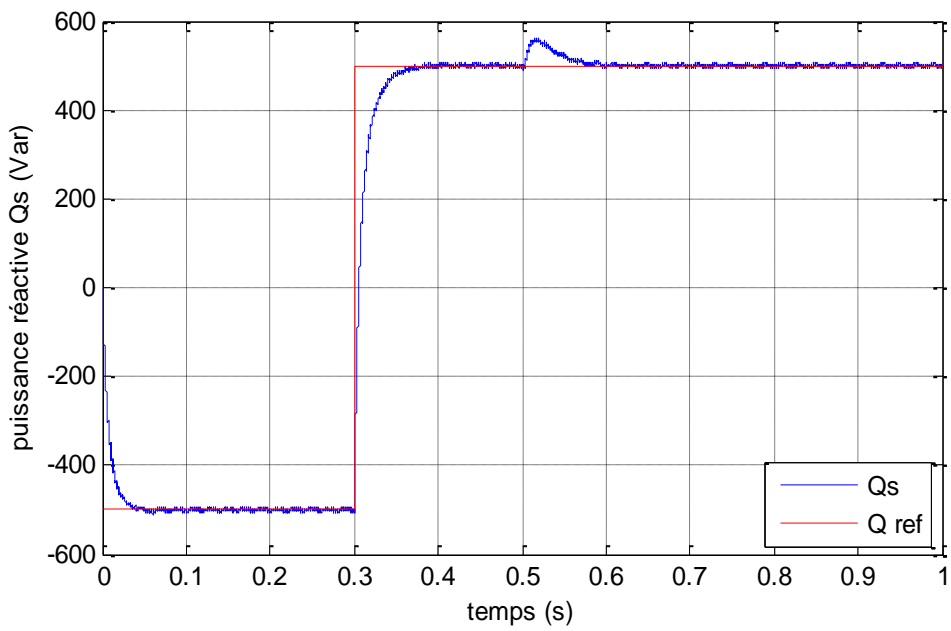


Fig.IV.29. Variation de  $Q_s$ .

**IV.5. Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons étudié les régulateurs flous d'une manière générale, puis, nous avons utilisé les régulateurs à base de logique floue pour contrôler la partie shunt de l'UPFC. Nous avons utilisé la méthode basée sur la MLI pour contrôler les onduleurs de tension. Enfin nous avons fait des simulations avec le logiciel Matlab/simulink 7.2. Les résultats des simulations obtenus ont validé notre choix des régulateurs flous qui nous avons utilisé pour contrôler les deux composantes de courant de la partie shunt et la tension du bus continue et les paramètres de normalisation et de dénormalisation des régulateurs flous choisis et donné des meilleures performances.

## **Conclusion générale :**

La conception des différents types de correcteurs (classiques, flous, neuronales, etc.) pour la commande des systèmes FACTS constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques.

Dans ce mémoire nous avons étudié une stratégie de commande d'un UPFC (unified power flow controller), l'un des plus performant des systèmes FACTS. Notre travail a été consacré à la modélisation, l'identification des références et l'élaboration de la commande de l'UPFC afin d'améliorer le transit de flux de puissances. Nous avons également étudié une stratégie de commande neuro-floue pour le contrôle de ce dispositif.

Nous avons présenté une introduction sur les systèmes FACTS et le modèle mathématique d'un UPFC connecté à un réseau électrique. Afin d'analyser cette stratégie de commande, nous avons démontré les relations entre les différentes variables du réseau en fonction des paramètres du contrôle de l'UPFC.

Pour la commande des onduleurs de tension, nous avons utilisé la commande MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion). Nous avons étudié premièrement des régulateurs de type PI-D pour les deux parties de l'UPFC. Ces régulateurs donnent de bons résultats.

Nous avons étudié dans le troisième chapitre la notion floue et la conception des régulateurs à base de logique floue. Nous avons choisi un régulateur flou de type PI-flou pour commander la partie shunt de l'UPFC et le bus continu grâce à sa simplicité de conception. La stratégie de commande floue adoptée donne aussi de bons résultats avec l'amélioration des performances de commande. Les résultats de ce type de régulateur sont satisfaisants.

Finalement, on peut dire que l'utilisation du système de compensation de flux de puissance (UPFC) dans les réseaux électriques constitue la meilleure solution pour les problèmes de stabilité de celles-ci. Le contrôle des paramètres de l'UPFC constitue une tâche adéquate de notre travail qui basé sur la stratégie de commande floue.

## Référence :

1. Abdelaàli Alibi, « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission systèmes) », Mémoire de Magister Soutenu au département d'électrotechnique Université de Batna, 2009.
2. FETISSI Selwa « Impacts de l'insertion des énergies renouvelables sur le réseau de transport HTB » Master en Réseaux Electriques 2018.
3. Kasdi Nassima « Gestion du Flux de puissance dans une ligne HT en utilisant un SSSC » MASTER ACADEMIQUE EN AUTOMATIQUE OPTION 2013.
4. Mme ABAIDIA FATMA ZOHRA « Contribution du STATCOM dans l'amélioration du comportement du réseau électrique » Master en Réseaux Electriques 2018
5. BEN HAKKOUM Med abdelilah « Compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par system FACTS » Mémoire de Master en Réseaux Electriques 2016.
6. Merini Kamel « Contribution à l'amélioration des méthodes évolutionnaires pour la répartition optimale des puissances: application dans un réseau d'énergie électrique avec et sans FACTS » Doctorat en réseaux électriques 2017.
7. M. HAMADOU Zakaria « Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique ». Mémoire de Magistère en réseaux électriques 2017.
8. Hamioud Essaid « Contrôle du transit de puissance dans le réseau de transport d'énergie à l'aide d'un compensateur statique (STATCOM) » Master en Réseaux Electriques. 2018.
9. BOUNAB Houria « Amélioration du transit de puissance d'un Réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS (STATCOM) » Master en Energie et Réseaux Electriques 2017.
10. Mr MEFTOUHI ABDELMALEK « Influence des FACTS sur L'écoulement de puissance dans Les Réseaux D'énergie Electriques » doctorat en réseaux électriques 2013.
11. Kerbaa Amel « Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique » Mémoire de Master en Réseaux Electriques 2013.
12. SEKHANE Hocine « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS » Mémoire de Master en Réseaux Electriques 2013
13. Berrahal Khoukha « Modélisation et simulation d'un système FACTS :UPFC » Magistère en électrotechnique 2009
14. Mme Rahmouni Naima « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique à l'aide d'un UPFC à base d'un onduleur à trois niveaux » Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister 2009
15. M.Ait MALEK Nassim « Commande Watt/Var découplée d'une Liaison électrique THT équipée d'un UPFC » Master académique en Automatique 2013

16. Larouci BEN YEKHLEF «Contribution à l'étude d'un contrôleur universel de puissance(UPFC) pour l'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique » Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister 2011
17. NIJAZ DIZDAREVIĆ, “ Unified power flow controller in alleviation of voltage stabilityproblem”. Doctoral thesis, Faculty of electrical engineering and computing, university of Zagreb, 2001.
18. ARNIM HERBIG, “On load flow control in electric power systems”.  
Doctoral Dissertation Royal institute of technology department of electric power engineering electric power systems, Stockholm 2000.
19. A. OLLERO, J. ARACIL, A.GARCIA, “Robust Design of rule-based fuzzy controllers”.  
Fuzzy sets and systèmes 70, 1995.
20. P. GOUREAU, D. SIRIER, “Contrôleur floue dynamique”.  
E.N.S.E.A. - E.C.S., Université du Littoral – L.I.S.I.R. B.P. 649, 6228 CALAIS Cedex, 1995.
21. LOTFI BAGHLI, “Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques”. Université de Henri Poincaré, Nancy – I, thèse de doctorat, 1999.
22. BOGUMILA MROZEK, ZBIGNIEW MROZEK, “Modelling and fuzzy control of DC drive”.14<sup>th</sup> Européan simulation multi-conférence ESM 2000, May 23 – 26, Ghent, pp 186 – 190.
23. M. A. DENAI, T. ALLOUI, “Adaptive fuzzy decoupling of UPFC – power flow composition”.Straffordshires University UK, 37<sup>th</sup> UPEC 2002, 9 – 11 September.
24. N. HOSSEINZADEH, D. SEYOUM, P. WOLFS, “Fuzzy logic control of induction generatoras an electrical brake”. Central Queensland University, Rockhampton, Australia, 2005.

## Résumé

Les FACTS apportent des solutions dynamiques, efficaces et prouvées à la conduite des réseaux. Certaines lignes situées sur des chemins privilégiés peuvent être surchargées. Dès lors, il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de contrôler ces transits de puissance afin d'exploiter le réseau de manière plus efficace et plus sûre. La technologie FACTS est un moyen permettant de remplir cette fonction. Avec leur aptitude à modifier l'impédance apparente des lignes, les dispositifs FACTS peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active que pour celui de la puissance réactive ou de la tension. Plusieurs types de FACTS existent et le choix du dispositif approprié dépend des objectifs à atteindre.

L'UPFC est le système FACTS le plus puissant. Il est constitué de deux onduleurs de puissance qui sont connectés à travers un circuit continu commun. L'un des onduleurs, connecté en parallèle, assure la compensation de la puissance réactive. L'autre, branché en série avec la ligne de transmission, permet de contrôler le transit de puissances actives et réactive. Le but de ce travail est d'étudier en détails le contrôle de la puissance active et réactive de l'UPFC par des différents régulateurs afin d'améliorer la stabilité et le transit de puissances dans un réseau électrique. La commande considérée inclue le découplage par un régulateur PI, et enfin un contrôleur PI flou. Les résultats des simulations montrent que les contrôleurs PI flou donnent une meilleure réponse transitoire par rapport au PI. ce qui montre que ces contrôleurs minimisent l'interaction qui existe entre les deux puissances active et réactive.

Le modèle de l'UPFC connecté avec réseaux électrique permettre de voir le comportement| de ce dernier pour l'amélioration de la stabilité transitoire tel que la stabilité de la vitesse de rotation, l'angle interne et la puissance électrique débité. Les simulations faites par le logiciel SIMULINK/MATLAB. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

## Abstract

The focus of this memory is a FACTS device known as the Unified Power Flow Controller (UPFC). With its unique capability to control simultaneously real and reactive power flows on a transmission line as well as to regulate voltage at the bus where it is connected, this device creates a tremendous quality impact on power system stability. These features become even more significant knowing that the UPFC can allow loading of the transmission lines close to their thermal limits, forcing the power to flow through the desired paths.

This will give the power system operators much needed flexibility in order to satisfy the demands that the deregulated power system will impose. The most cost-effective way to estimate the effect the UPFC has on a specific power system operation is to simulate that system together with the UPFC by using one of the existing simulations packages. Therefore it is advisable for the transmission system operator to have another way of controlling power flows in order to permit a more efficient and secure use of transmission lines.

The FACTS devices (Flexible AC Transmission Systems) could be a mean to carry out this function without the drawbacks of the electromechanical devices (slowness and wear). With their ability to change the apparent impedance of a transmission line, FACTS devices may be used for active and power control, as well as reactive power or voltage control.



## ملخص

ندرس في هذه الرسالة مشكلة الاستقرار العابر في الانظمة الكهربائية . حيث يعتبر المنظم الموحد لتدفق طاقة

UPFC من اهم انظمة نقل التيار المتناوب المتغيرة FACTS المستعملة . يتكون من موجبين يشتركان في الدارة المستمرة . يربط احدهما على التفرع لتعويض الطاقة الرديئة بينهما يربط الموج الثاني على التسلسل ليسهل مراقبة الطاقة الفعالة و الردية . في هذا الاطار يأتي هذا البحث لدراسة شبكة الطاقة الكهربائية عبر استغلال المنظم الموحد لتدفق الطاقة باستخدام خليط بين المنظمات الكلاسيكية و المنظمات التي تعتمد على الذكاء الصناعي لتسهيل عملية مراقبة تدفق الطاقة من جهة و لتحسين عملية استقرار الشبكة الكهربائية من جهة اخرى. من بين المنظمات المستعملة المنظم الكلاسيكي و منظم المنطق الغامض .

ان النتائج المتحصل عليها تبين مدى تحسين هذه المنظمات لاستجابة العابرة مما يثبت نجاعتها في فك الربط الموجود بين الطاقة الفعالة و الردية و تزيد في تحسين استقرار الشبكة الكهربائية و تحافظ على نفس نوعية النتائج في حالة تغير ذاتية او مقاومة خط التوصيل الكهربائي نظرا لمتانتها.