

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Contrôle de la tension et la puissance réactive d'un
réseau électrique par convertisseur statique**

Présenté par :

**DJEBLI Maamar
MAHARI mustafa**

Devant le jury composé de :

**Mr. BENYAHIA Mokhtar
Mr. BOUANANE Abdelkrim
Mr. TERRAS Taher**

Président
Encadreur
Examineur

Soutenu le : 10/07/2021
Promotion : 2020-2021

Remerciements

*Avant toutes choses, Nous tenons à remercier les enseignants **Mr. TERRAS T.** et **Mr. BENYAHIA M.** D'avoir accepté de faire partie de notre Jury de projet de fin d'étude.*

*Nos remerciements les plus respectueux vont à notre encadreur **Mr. BOUANANE A.** d'avoir efficacement dirigé nos travaux de projet de fin d'étude. Nous le remercions aussi pour les bonnes conditions de travail qu'il nous a assurées et les conseils qu'il nous a prodigués tout au long de ce travail.*

Nous voulons aussi dire un mot à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont soutenus pour réaliser ce travail, et nous ont permis de le finaliser : Merci !

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

En mémoire de ma mère.

Pour toute ma famille.

*Pour mon père qui m'a tant encouragé. Et mon professeur **Dr.BOUANANE.A***

*Pour tous mes professeurs et toute la promotion de l'électrotechnique
2020/2021.*

Et à tous mes amis de près et de loin.

sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Qualité d'énergie électrique	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralités sur les réseaux électrique.....	3
I.2.1 Définition d'un réseau électrique.....	4
I.2.2 Rôle du réseau électrique.....	4
I.2.3 Types des réseaux électriques.....	5
I. 2.3.1 Réseau de transport.....	5
I.2.3.2 Réseau de répartition.....	5
I.2.3.3 Réseau de distribution.....	6
I.2.4 Différentes structures de réseaux électrique.....	6
I.2.4.1 Réseaux radiaux.....	6
I.2.4.2 Réseaux bouclés.....	7
I.2.4.3 Réseaux maillés.....	7
I.3 Phénomènes perturbateurs de la qualité de l'énergie électrique (QEE).....	7
I.4 Indice de qualité de l'énergie électrique.....	7
I.4.1 Variation des fréquences.....	8
I.4.2 Variation Lente de Tension.....	9
I.4.3 Variations rapides de Tension (flicker).....	9
I.4.4. Creux de tension.....	9
I.4.5 Surtensions.....	10
I.4.6 Les harmoniques.....	10
I.4.7 Déséquilibre du courant et de la tension.....	11
I.5 Solutions d'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques.....	11
I.5.1 Solutions traditionnelles.....	11
I.5.1.1 Déséquilibre (élimination des courants perturbateurs).....	12

I.5.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	12
I.5.1.2 Harmonique (Compensation des courants harmoniques).....	12
I.5.1.3 Creux de tension (élimination des tensions perturbatrices).....	13
I.5.1.4 FLICKER (solution traditionnelle).....	14
I.5.2 Solutions modernes.....	14
I.5.2.1 Harmoniques (Dépollution des courants perturbateurs).....	14
I.5.2.2 Creux de Tension (Dépollution des tensions perturbatrices).....	14
I.5.2.3 FLICKER (solution moderne pour la compensation d'énergie réactive).....	15
I.6 Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec quelque solution	15
I.7 Transport de l'énergie réactive.....	16
I.8 Conclusion.....	16

Chapitre II : Analyse des Méthodes de l'Amélioration du Facteur de Puissance.

II.1 Introduction.....	17
II.2 Notions de Puissance électrique en alternatif sinusoïdal.....	18
II.3 Inconvénient d'un faible facteur de puissance.....	20
II.4 Causes du faible facteur de puissance.....	21
II.5 Moyens d'amélioration du facteur de puissance.....	21
II.5.1 Théorie de compensation d'énergie réactive.....	21
II.5.2 Moyens de compensation de puissance réactive.....	22
II.5.2.1 Compensateurs synchrones.....	22
II.5.2.1.1 Description du convertisseur synchrone.....	23
II.5.2.1.2 Modélisation du convertisseur synchrone.....	23
II.5.2.1.2.1 Le modèle de l'alternateur.....	23
II.5.2.1.2.2 Le modèle du moteur synchrone.....	24
II.5.2.1.3. Mode de fonctionnement en Alternateur dans un réseau.....	24
II.5.2.2 Batteries de condensateurs.....	24
II.5.2.2.1 Batteries de condensateurs HT.....	25
II.5.2.2.2 Batteries de condensateurs MT.....	25
II.5.2.2.1. Le condensateur série.....	26
II.5.2.2.2 Le condensateur shunt.....	27

II.6 les systèmes FACTS.....	29
II.6.1 Définition des FACTS.....	29
II.6.2 Catégories des FACTS et leurs fonctions.....	29
II.6.2.1 Catégories des FACTS.....	29
II.6.2.2 Les FACTS et leurs fonctions.....	30
II.6.3 Bénéfices offerts par la technologie FACTS.....	31
II.6.4 Applications pratiques des FACTS.....	31
II.6.4.1 Capacité série Avancée (ASC) (à Kayenta par l'entreprise WAPA).....	31
II.6.4.2 TCSC (à Slatt par l'entreprise BPA).....	32
II.6.4.3 STATCOM (à Sullivan par l'entreprise TVA).....	32
II.6.4.4 UPFC (à Inez par l'entreprise AEP).....	32
II.7 Les concepts du contrôle du flux de puissance.....	34
II.7.1 Compensation série.....	36
II.7.2 Compensation shunt.....	37
II.7.3 Régulation de l'angle de phase.....	38
II.8 Les différents systèmes FACTS.....	38
II.8.1 Les compensateurs parallèles (shunt).....	39
II.8.1.1 Principe de fonctionnement.....	39
II.8.2 Les compensateurs séries.....	40
II.8.2.1 Principe de fonctionnement.....	41
II.8.3 Les compensateurs séries et parallèles (UPFC).....	41
II.9 Conclusion.....	42

Chapitre III :Modèle mathématique de l'UPFC et système de réglage

III.1 Introduction.....	43
III.2 Structure du (UPFC).....	43
III.3 Principe de fonctionnement du système UPFC.....	43
III.4 Modélisation du système UPFC.....	44
III.4.1 Modélisation de la branche série (UPFC série).....	45
III.4.2 Modélisation de la partie shunt (UPFC shunt).....	47
III.4.3 Modalisation de la branche continue de l'UPFC.....	48
III.5 Généralité sur les convertisseurs.....	49

III.5.1 Convertisseur Continu-Alternatif (DC- AC).....	49
III.5.2 Classification des onduleurs.....	50
III.5.3 Commande d'un onduleur.....	51
III.5.4 La commande d'un onduleur triphasé.....	52
III.5.4.1 Commande 180°.....	52
III.5.4.2 Modulation de largeur d'impulsions ou (MLI).....	52
III.6 Domaine d'application des onduleurs.....	52
III.7 Modélisation du convertisseur statique.....	53
III.7.1 Modèle de l'onduleur.....	53
III.7.2 La commande MLI sinus triangle.....	56
III.7.3 Caractéristiques de la MLI sinus triangle.....	57
III.7.4 Modélisation de la commande MLI sinus triangle.....	57
III.7.5 Simulation de la commande MLI sinus triangle.....	58
III.8 Réglage du système UPFC.....	60
III.8.1 Configuration du circuit de réglage.....	60
III.8.2 Description du système de commande de l'UPFC série.....	61
III.9 Les schémas de contrôle du système UPFC.....	62
III.9.1 Schéma de contrôle de la branche série.....	62
III.9.2 Le schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC....	62
III.9.3 Les schémas de contrôle avec régulateur PI-Découplé.....	63
III.10 Commande par régulateur proportionnel intégral découplé (PI-D).....	66
III.10.1 Calcul des régulateurs PI.....	67
III.11 Commande par régulateur PI à gains variables (VGPI).....	71
III.11.1 Structure du régulateur VGPI.....	71
III.11.2 Présentation du régulateur PI à gain variable.....	73
III.12 Conclusion.....	75

Chapitre IV : Résultats de Simulation et synthèse de deux régulateur PI-D et VGPI

IV.1 Paramètres du modèle UPFC.....	76
IV.2 Résultats de simulation de système UPFC avec un régulateur (PI-Découplé).....	76
IV.2.1 Les graphes des puissances active et réactive.....	76
IV.2.2 Les allures des courants et la tension de la branche continue.....	79

IV.2.3 Les allures des tensions de récepteur.....	82
IV.2.4 Test de stabilité.....	83
IV.2.5 Test de robustesse.....	84
IV.3 Résultats de simulation de système UPFC avec un régulateur (VGPI).....	85
IV.4 Synthèse et résultats des puissances obtenus avec les deux tests par les deux régulateurs (PI-D) et (VGPI) utilisé dans notre système UPFC.....	86
Conclusion Générale.....	88

Liste des symboles

AC	Alternatif Current.
DC	Direct Current.
BT	Basse tension.
MT	Moyenne tension.
HT	Haute tension.
THT	Très haute tension.
QEE	La qualité d'énergie électrique.
TCR	Réactance commandée par thyristors.
TSC	Condenseur commutes Thyristor.
STATCOM	Static Compensator.
TCSC	Thyristor –controlled Series Capacitor.
TCSR	Thyristor Switched Series Reactor.
SSSC	Static Synchronous Series Compensator.
IPFC	Interline Power Flow Controller.
DPFC	Distributed Power-Flow Controller.
FACTS	Flexible alternating current transmission systems.
GTO	Gate-Turn –Off.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
SVC	Static Var Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller.
PI	Proportionnel Intégral.
PI-D	Proportionnel Intégral-Découplé.
VGPI	Régulateur PI à Gains Variables.

Variables

V_{dc}	Tension continue (coté DC).
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tension des phases A,B et C coté source.
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tension des phases A,B et C coté récepteur.
V_{cd}, V_{cq}	Composantes d-q de la tension v_c générée par le compensateur série (coté AC).
V_{pd}, V_{pq}	Composantes d-q de la tension v_p générée par le compensateur shunt (coté AC).
i_{sd}, i_{sq}	Composantes d-q du courant de la ligne de transmission.

i_{pd}, i_{pq}	Composantes d-q du courant du compensateur parallèle.
ω_N	Pulsation Naturelle.
ξ	Coefficient d'amortissement.
K_p	Gain proportionnel.
K_i	Gain intégrateur.
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants de phase.
V_{ca}, V_{cb}, V_{cc}	Tensions de phase.
T_s	Temps de saturation.
K_{pi}	Gain proportionnel initial.
K_{pf}	Gain proportionnel final.
K_{if}	Gain intégrateur final.
P	Puissance active.
Q	Puissance réactive.
P^*	La puissance de référence active.
Q^*	La puissance de référence réactive.
f	Fréquence du réseau (50Hz).

Paramètres

L, r	l'inductance et la résistance de la ligne de transmission.
L_p, r_p	l'inductance et la résistance du compensateur parallèle.
C	La capacité du condensateur du circuit commun (DC).

Liste des figures

Chapitre I : Qualité d'énergie électrique.

Figure I.1 Schéma présentant un réseau électrique.....	6
Figure I.2 Schéma des types de structure d'un réseau électrique.....	7
Figure I.3 variation de fréquence.....	8
Figure I.4 de variations rapide de la tension.....	9
Figure I.5 Creux de tension et coupure brèves.....	9
Figure I.6 Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.....	11
Figure I.7 Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.....	12
Figure I.8 Filtre passif résonant.....	13
Figure I.9 Filtre passif amorti.....	13

Chapitre II : Analyse des Méthodes de l'Amélioration du Facteur de Puissance.

Figure II.1 Tension & Courant en alternatif sinusoïdal.....	18
Figure II.2 illustre les inconvénients inhérents à un mauvais facteur de puissance.....	20
Figure II.3 Principe de compensation.....	21
Figure II.4 Modèle de l'alternateur.....	23
Figure II.5 Modèle du moteur.....	24
Figure II.6 Gradins de condensateurs placés sur le réseau HTA (63 kV) permettant de compenser la puissance réactive de la charge.....	25
Figure II.7 schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne.....	26
Figure II.8 profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation.....	26
Figure II.9 schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne.....	27
Figure II.10 Diagramme des courants et Tensions d'un compensateur shunt.....	27
Figure II.11 Schéma de branchement d'un condensateur série.....	28
Figure II.12 Schéma de couplage de condensateurs shunt.....	28

Figure II.13 Diagrammes fonctionnels des FACTS.....	30
Figure II.14 Transport de l'énergie dans un dipôle reliant deux sources synchrones A et B.....	34
Figure II.15 Diagramme de phase des tensions.....	34
Figure II.16 Le circuit équivalent du principe du contrôle de flux de puissance.....	35
Figure II.17 variation de la puissance débitée en fonction de la position angulaire.....	35
Figure II.18 Contrôleur série.....	37
Figure II.19 contrôleur shunt.....	37
Figure II.20 le régulateur d'angle de phase shunt.....	38
Figure II.21 une cellule STATCOM.....	39
Figure II.22 Compensateur parallèle.....	40
Figure II.23 Compensateur série.....	41
Figure II.24 Configuration du système UPFC.....	42

Chapitre III : Modèle mathématique de l'UPFC et système de réglage.

Figure III.1 Circuit équivalent de l'UPFC.....	43
Figure III.2 Circuit équivalent de l'UPFC.....	44
Figure III.3 Modèle mathématique du système de l'UPFC série.....	46
Figure III.4 Modèle mathématique du système de l'UPFC parallèle.....	48
Figure III.5 Schéma symbolique d'un onduleur.....	49
Figure III.6 Onduleur de tension.....	50
Figure III.7 Onduleur de courant.....	50
Figure III.8 le principe de commande du bras d'onduleur.....	51
Figure III.9 Schéma de principe de l'onduleur à MLI.....	54
Figure III.10 Modèle sous SIMULINK de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	55
Figure III.11 Principe de la commande MLI sinus-triangle.....	56
Figure III.12 Modèle sous SIMULINK.....	58
Figure III.13 Principe de la commande MLI sinus-triangle et enveloppes de tension...	59
Figure III.14 Schéma de PI rôle de l'UPFC.....	61
Figure III.15 Schéma de contrôle de la branche série de l'UPFC.....	62
Figure III.16 Schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC.....	63

Figure III.17 Commande PI-Découplé de l'UPFC série.....	64
Figure III.18 Commande PI-Découplé de l'UPFC shunt.....	64
Figure III.19 Structure de réglage de type PI.....	66
Figure III.20 Régulateur PI implanté dans SIMULINK.....	67
Figure III.21 Schéma complet de réglage de l'UPFC implanté dans Simulink.....	67
Figure III.22 Circuit de commande du système UPFC.....	68
Figure III.23 Structure d'un régulateur PI à gains variables (VGPI).....	69
Figure III 24 Courbe des gains d'un régulateur VGPI.....	72
Figure III.25 Réglage d'un régulateur VGPI du 3ème degré avec variation de k_{pi}	72

Chapitre IV : Résultats de Simulation et synthèse de deux régulateurs PI-D et VGPI

Figure IV.1 La puissance active et La puissance réactive référence (P^* et Q^*).....	75
Figure IV.2 La puissance active et leur référence (P et P^*).....	75
Figure IV.3 La puissance réactive et leur référence (Q et Q^*).....	76
Figure IV.4 La puissance active P et réactive Q	76
Figure IV.5 les allures des courants I_{ds} et I_{ds}^*	77
Figure IV.6 les allures des courants I_{qs} et I_{qs}^*	77
Figure IV.7 le Courant I_{sa}	78
Figure IV.8 Courants des phases i_{sa} , i_{sb} et i_{sc}	78
Figure IV.9 Signale de la tension V_{cd}	79
Figure IV.10 Signale de la tension V_{cq}	79
Figure IV.11 la Tensions V_{sa}	80
Figure IV.12 Les tensions V_{sa} , V_{sb} et V_{sc}	80
Figure IV.13 Les puissances actives (P et P^*) avec une perturbation.....	81
Figure IV.14 Les puissances réactives (Q et Q^*) avec une perturbation.....	81
Figure IV.15 Les puissances active P^* et P avec test de robustesse.....	82
Figure IV.16 Les puissances réactive Q^* et Q avec test de robustesse.....	82
Figure IV.17 La puissance active et leur référence P et P^*).....	83
Figure IV.18 La puissance réactive et leur référence (Q et Q^*).....	83
Figure IV.19 Les puissances actives et réactives des deux régulateurs (PI-D et VGPI)	

Test de stabilité.....	84
Figure IV.20 Les puissances actives et réactives des deux régulateurs (PI-D et VGPI)	
Test de robustesse.....	85

Liste des Tableaux

Chapitre I : Qualité d'énergie électrique.

Tableau I.1. Les réseaux électriques selon le niveau de tension.....	5
Tableau I.2 . QEE et phénomènes perturbateurs.....	8
Tableau I.3 . Principaux phénomènes perturbateurs. Chapitre I. Qualité d'énergie électrique.....	15

Introduction Générale

Introduction générale

Au cours des dernières années, la consommation, la production et le transport de l'énergie électrique n'ont cessé d'augmenter en raison de l'industrialisation, la croissance démographique et l'urbanisation. Par ailleurs, les limites économiques et écologiques rendent difficile la construction de nouvelles lignes électriques. C'est pourquoi les réseaux doivent aujourd'hui travailler proches de leurs limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences. Il s'agit donc d'améliorer la stabilité du réseau et ainsi sa capacité de transfert.

L'exigence remarquable sur la qualité d'énergie afin de réduire les effets néfastes des variations de tensions et de toutes perturbations comme (harmonique ; court-circuit ; creux de tension...etc) a fait l'appel des moyens de contrôle.

Par le passé, ces problèmes ont été résolus (anticipé) en ayant des marges de stabilité, le problème d'augmentation de la charge ne se posé plus, avec l'utilisation des moyens classiques (transformateurs déphaseur, compensation série ou parallèle d'énergie réactive, modification des consignes de production, action sur l'excitation des générateurs). Mais ces techniques s'avèrent actuellement trop lentes et insuffisantes pour répondre efficacement aux perturbations du réseau sous l'effet des nouvelles contraintes.

Pour répondre à ces nouvelles contraintes et résoudre les problèmes de la qualité d'énergie, notamment l'amélioration du facteur de puissance il y a tendance d'utilisé des nouvelles techniques utilisons les FACTS. Ces éléments permettent d'améliorer la stabilité du système, de contrôler les transits de puissance, gérer les échanges de puissance réactive en temps réel et par conséquent une exploitation efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Les perturbations causées par la croissance de la demande d'énergie réactive ont un impact sur la stabilité d'un réseau électrique. Les conséquences peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement du réseau.

L'objectif principal de ce travail est l'analyse profonde des indices de qualité d'énergie et des moyens de leur amélioration et évaluer les performances robustes de l'UPFC commandé en tant que dispositif multivariable, en utilisant la synthèse de contrôleur PI multivariable basée sur les relations caractéristiques qui décrivent le découplage dans un processus multivariable avec une commande par régulateur PI classique à gain variable du

système. L'étude de technique de compensation par convertisseur nous a permis de prouver son efficacité du point de vue amélioration de qualité d'énergie aussi que la stabilité du réseau lui-même.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les réseaux d'énergie électrique en passant par la définition ; la structure ; la stabilité...etc, la définition de la qualité d'énergie électrique avec les phénomènes perturbateurs de la qualité de l'énergie électrique (QEE) et avoir des solutions d'amélioration.
- Dans le deuxième chapitre on va donner l'analyse des méthodes de l'amélioration du facteur de puissance par les techniques de compensation dynamiques FACTS, des définitions de bases et les différentes classes de la technologie FACTS ...etc.
- Et le troisième chapitre contient une étude de compensateur hybride, modèle mathématique d'un dispositif FACTS puissant ; l'UPFC (Unified Power Flow Controller) et le système de réglage.
- Et dans le quatrième on va commander le système UPFC par un régulateur PI-découplé et un régulateur classique PI à gain variable (VGPI) puis une synthèse par l'utilisation du logiciel MATLAB/SIMULINK.

Et enfin nous terminons ce travail avec une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

Qualité d'énergie électrique

I.1 Introduction :

Ces vingt dernières années, on parle beaucoup de la qualité de l'énergie électrique (QEE). Cette dernière est supposée excellente à la sortie des centrales, le système de transmission de cette énergie contribue à consolider cette qualité (stabilité d'amplitude et de fréquence, puissance de court-circuit...), alors qu'en pratique elle subit nombreuses altérations au cours de son transport, principalement sous l'influence des installations perturbatrice, de la clientèle ou des incidents fortuits [1]. La tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

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

Ces perturbations ont des conséquences néfastes sur le réseau, allons parfois à l'effondrement de ce dernier et mettre en nocturne toute une population. Ce qui oblige tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs ou intervenants. Parmi tous ces acteurs le gestionnaire à une responsabilité de mettre en œuvre les moyens pour maîtriser ces contraintes qui s'imposent. Pour ce faire plusieurs solutions d'amélioration à distinguées.

I.2 Généralités sur les réseaux électrique :

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu :

- Pour convertir d'une façon continue l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.
- Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.
- Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.

Pour un consommateur, le réseau devrait idéalement vu, de l'endroit où il prend son énergie électrique, comme une source de tension alternative parfaite : c'est-à-dire une source dont la fréquence et l'amplitude sont constantes quelle que soit la charge connectée.

Pour satisfaire leur clientèle, les compagnies d'électricité doivent donc s'efforcer de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension constantes (valeurs nominales). Donc, il est important de maintenir le niveau de tension près de sa valeur nominale aux différents nœuds du réseau.

Une grande majorité des lignes de transport d'énergie électrique sont à courant alternatif, fonctionnant à plusieurs valeurs de tension (10 kV à 800 kV), Les réseaux de distribution fonctionnent généralement au-dessous de 10 KV, tandis que la puissance est transmise à des tensions très élevées. Les lignes fonctionnant à différentes tensions sont reliées par les transformateurs qui fonctionnent au rendement élevé. Traditionnellement, les lignes à courant alternatif ne prévoient aucune commande du flux de puissance. Les disjoncteurs actionnés mécaniquement sont utilisés pour la protection contre les défauts. Un disjoncteur actionné mécaniquement est utilisé pour un nombre d'opérations d'ouverture et de fermeture limité à un moment défini et ne peut pas être employé pour la commande de flux de puissances (à la différence des commutateurs de l'électronique de puissance à fréquence de commutation très élevée tel que le thyristor, le GTO, l'IGBT, l'IGCT, etc.).

I.2.1 Définition d'un réseau électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques [02]. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

I.2.2 Rôle du réseau électrique :

Le rôle du réseau dans le système électrique pour garantir un approvisionnement sûr et économique de l'énergie est essentiel. Il n'est techniquement pas possible que ce rôle soit assuré par un type unique de réseau qui relierait moyens de production et utilisateurs. Une bonne solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseaux dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par le niveau de tension de leurs lignes ou le niveau de puissance qui transite. Ses fonctions sont les suivantes :

- L'acheminement de l'énergie des centrales de production aux abords des grands centres de consommation, c'est le rôle du réseau de transport ;
- La répartition de cette énergie en différents points de chacun des centres de consommation de manière à mieux assurer la sécurité de l'alimentation de l'ensemble des consommateurs, c'est le rôle des réseaux de répartition ;
- L'alimentation directe de chacun des consommateurs à partir du réseau de répartition, c'est le rôle des réseaux de distribution.

I.2.3 Types des réseaux électriques :

La structure du système électrique est décomposée en plusieurs niveaux de tension correspondants à différents types de réseaux, dans le Tableau I.1, l'échelle de ces niveaux utilisée est très vaste, elle s'étend de quelques dizaines à près de million de volts :

Classe de tension	Tension nominale	Exemple d'application
Très Basse Tension (T.B.T)	<50 volts	Réseau B.T et de sécurité
Basse Tension (B.T)	120, 220, 380,660 V	Réseau de distribution B. T
Moyenne Tension (M.T)	3, 6, 10, 20, 35, 60 KV	Réseau de distribution M. T
Haute Tension (H.T)	110, 150, 220 KV	Réseau de transport
Très Haute Tension (T.H.T)	330, 500, 750 KV	Réseau de transport
		Réseau d'interconnexion
Ultra Haute Tension (U.H.T)	> 750 KV	Réseau d'interconnexion

Tableau I.1 : Les réseaux électriques selon le niveau de tension.

I. 2.3.1 Réseau de transport :

A la sortie des centrales de production, l'énergie électrique est portée à haute ou très haute tension (>110 KV) afin de limiter les pertes par effet Joule et satisfaire les demandes de plus en plus importantes en quantités d'énergie. Le réseau de transport se présente sous la forme d'un maillage de lignes. Chacun de ses nœuds constitue un poste de transformation. Il transporte des puissances importantes sur des distances atteignant plusieurs centaines de kilomètres. La structure de ce réseau est essentiellement de type aérien et devant assurer une grande sécurité d'alimentation. Il a le rôle de :

- Acheminement de l'électricité des centrales aux grandes zones de consommation.
- Interconnexion nationale (répartition).
- Interconnexion internationale (échanges d'énergie entre les pays).

Le choix d'une tension de transport est avant tout un compromis technico-économique fonction des puissances à transporter et des distances à parcourir. Les protections de ce réseau doivent être très performantes.

I.2.3.2 Réseau de répartition :

Permet d'acheminer l'énergie électrique du réseau de transport vers les grands centres de consommation et aux réseaux de distribution sous des hautes tensions compromises de 40 et 110 KV. Il transporte des puissances de plusieurs dizaines de MW sur des distances atteignant plusieurs dizaines de kilomètres. La structure de ce réseau est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Ce réseau, généralement en boucle alimente les postes HT/MT des réseaux de distribution MT situé en aval.

I.2.3.3 Réseau de distribution :

Le réseau de distribution comprend l'ensemble des canalisations et des branchements extérieurs qui permettent délivrer l'énergie électrique soit :

- Depuis les sources jusqu'aux postes de distribution.
- Depuis les postes de distributions jusqu'aux consommateurs.

Ce réseau est composé de deux parties : le réseau de distribution à moyenne tension et le réseau de distribution à basse tension.

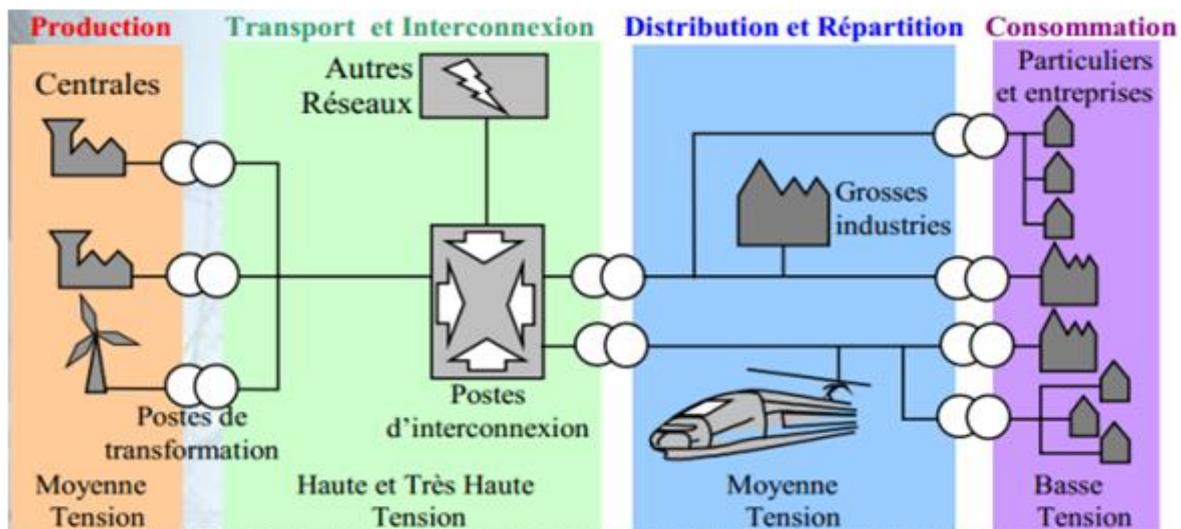


Figure I.1 : Schéma présentant un réseau électrique.

I.2.4 Différentes structures de réseaux électriques :

Le choix des schémas de réseaux est très important en particulier pour les réseaux MT, car ils sont très longs. Ceci conduit à une grande diversité de schémas figure I.2. Il existe (03) types de schémas de base de plus en plus combinés entre eux :

I.2.4.1 Réseaux radiaux :

Le principe de fonctionnement de réseau radial est à une seule voie d'alimentation. Ceci signifie que tout point de consommation sur une telle structure ne peut être alimenté que par un seul chemin électrique possible. Il est de type arborescent. Cette arborescence se déroule à partir des points d'alimentation, qui sont constitués par les postes de distribution publique HTB/HTA ou HTA/HTA (répartition). Ce schéma est particulièrement utilisé pour la distribution de la MT en milieu rural. En effet il permet facilement, et à un moindre coût, d'accéder à des points de consommation de faible densité de charge ($\gg 10$ kVA) et largement répartis géographiquement ($\gg 100$ km²).

I.2.4.2 Réseaux bouclés :

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

I.2.4.3 Réseaux maillés :

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale. On obtient ainsi une meilleure sécurité, mais à un prix plus cher.

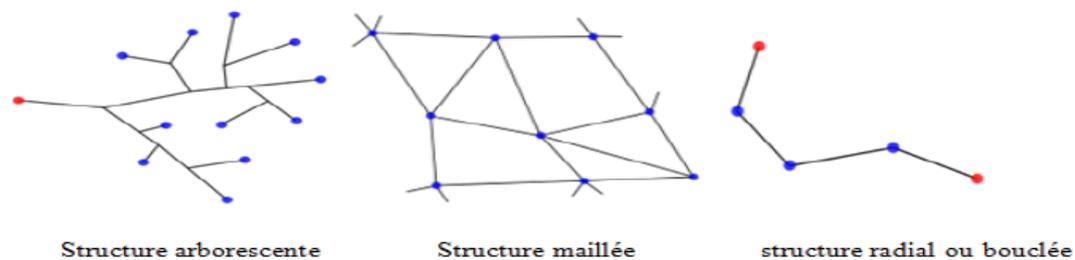


Figure I.2 : schéma des types de structure d'un réseau électrique.

I.3 Phénomènes perturbateurs de la qualité de l'énergie électrique (QEE) :

La qualité d'énergie ou de la tension se réfère au niveau de tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence dans le réseau électrique de différentes formes de phénomènes électriques perturbatrices, ainsi la qualité de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement.

I.4 Indice de qualité de l'énergie électrique :

La tension possède quatre caractéristiques principales :

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde, qui doit être la plus sinusoïdale possible.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leur déphasage relatif.

Une alimentation parfaite n'existe pas, on dit que les quatre caractéristiques sont affectées de « perturbations », de nature physique, incidents liés à l'installation ou bien des incidents liés à l'exploitation voir Tableau I.2.

QUALITE DE PUISSANCE=Continuité de Tension + Qualité de Tension.	
QEE	Phénomènes perturbateurs
Continuité de Tension	-Longues interruptions
Qualité de tension	-Fréquence : Déviations -Amplitude : Déviations Flicker Descente -Forme d'onde : Harmoniques (inter.) -Symétrie : Déséquilibre.

Tableau I.2 : QEE et phénomènes perturbateurs.

I.4.1 Variation des fréquences :

Une variation sensible de la fréquence de réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique, comme le montre la figure I.3 .au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles comme dans le cas de certains défauts graves sur les réseaux. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$. [03]

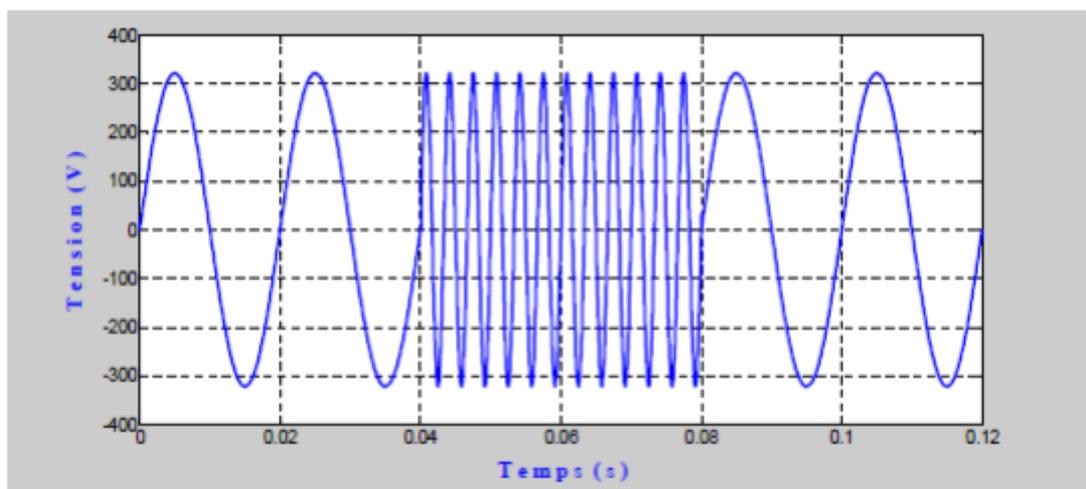


Figure I.3 : variation de fréquence.

I.4.2 Variation Lente de Tension :

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénients des variations lentes de tension dans une plage d'au moins de $\pm 10\%$ de la tension nominale.

I.4.3 Variations rapides de Tension (flicker) :

Dans les installations où il y a des variations rapides de puissance absorbée ou produite ou des démarrages fréquents (soudeuses, éoliennes, fours à arc pendant la période de fusion, compresseurs, générateurs d'air conditionné, ...), on observe des variations rapides de tenus aléatoires voir figure.I.4.

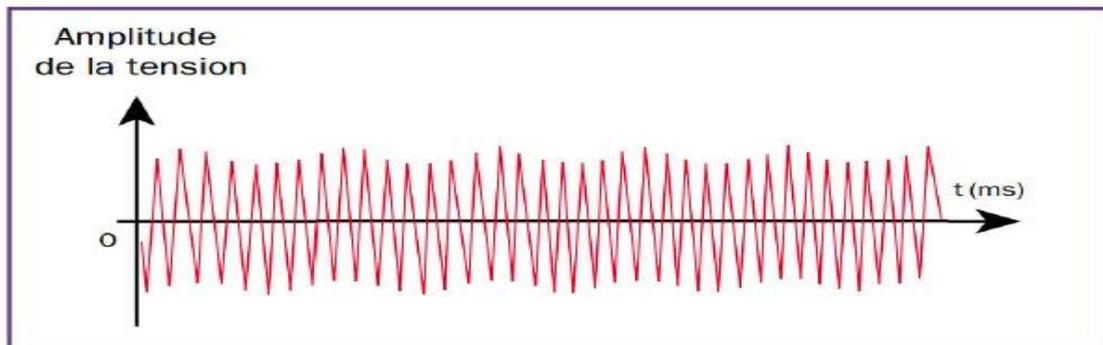


Figure I.4 : de variations rapides de la tension [4].

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 % [4].

I.4.4. Creux de tension :

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min voir figure I.5.

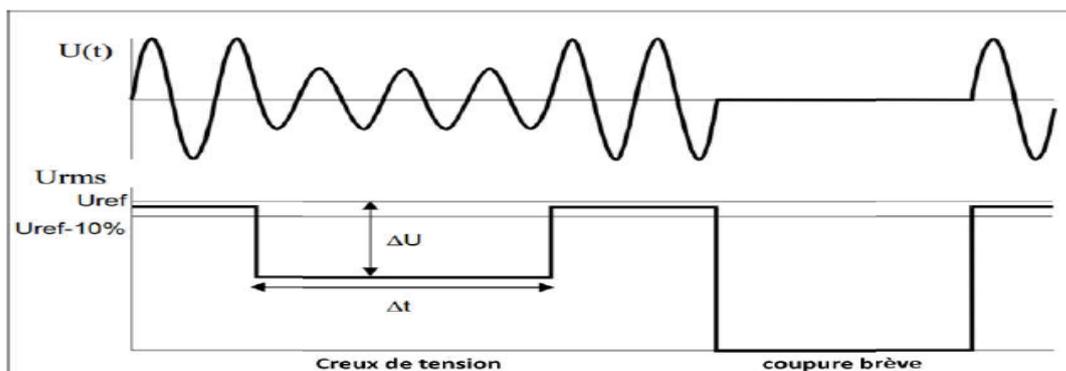


Figure I.5 : Creux de tension et coupure brèves

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

Ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).

Ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur profondeur et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

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

I.4.5 Surtensions :

Il existe deux classes des surtensions. Surtensions par décharges électriques atmosphériques : Les orages sont des événements très habituels, et aussi très dangereux. On estime que sur notre planète se produisent simultanément quelques 2000 orages et qu'environ 100 coups de foudre se déchargent sur la terre chaque seconde. Au total, cela représente environ 4000 orages quotidiens et 9 millions de décharges atmosphériques chaque jour. Au moment de l'impact, la foudre provoque une impulsion de courant qui arrive à atteindre des dizaines de milliers d'ampères. Cette décharge génère une surtension dans le système électrique qui peut provoquer des incendies et la destruction des équipements électriques

Surtensions de commutation : Ces surtensions sont générées dans les lignes électriques, principalement en raison des commutations de machines de grande puissance. Les moteurs électriques sont des charges très inductives dont la connexion et le débranchement provoque des surtensions. Il existe de même d'autres processus capables de les produire, comme par exemple l'allumage et l'extinction de la soudure à l'arc.

I.4.6 Les harmoniques :

Selon la problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques.

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau.

I.4.7 Déséquilibre du courant et de la tension :

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure I.6. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

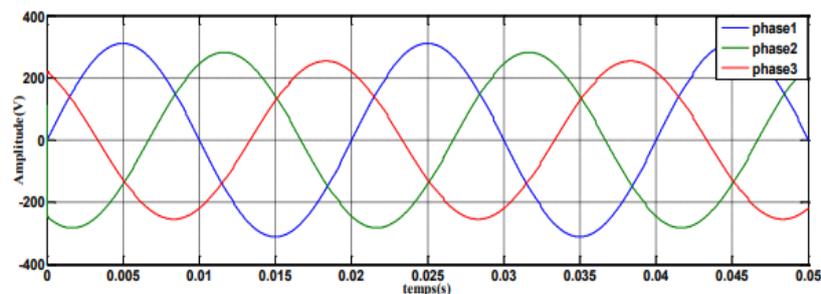


Figure I.6 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension

I.5 Solutions d'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques :

Afin de compenser les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux solutions d'amélioration, traditionnelle et moderne, vont être étudiées.

I.5.1 Solutions traditionnelles :

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

I.5.1.1 Déséquilibre (élimination des courants perturbateurs) :

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions existent.

I.5.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases. Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La figure I.7. montre ce compensateur appelé montage de Steinmetz. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée [5]. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, Avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques.

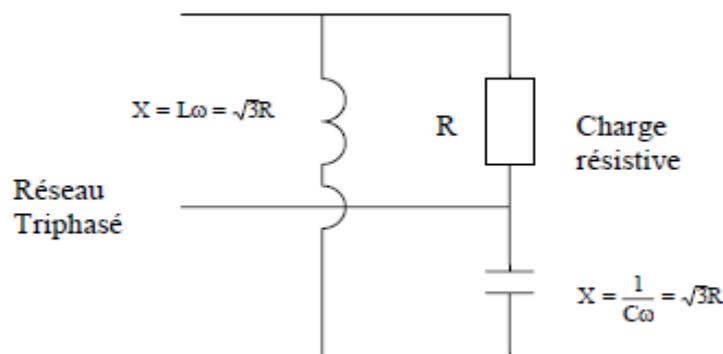


Figure I.7 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.

I.5.1.2 Harmonique (Compensation des courants harmoniques) :

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par la charge non linéaire.

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

- a) Le filtre résonnant est un filtre très sélectif figure I.8. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

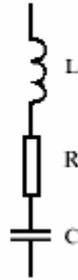


Figure I.8 : Filtre passif résonant

- b) *Le filtre passe-haut* compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre figure I.9. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

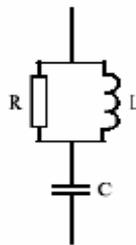


Figure I.9 : Filtre passif amorti

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Equipements volumineux.
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

I.5.1.3 Creux de tension (élimination des tensions perturbatrices) :

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les Creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par les circulations des courants harmoniques et/ou déséquilibrés. Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

Quant au creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industrielles.....etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

I.5.1.4 FLICKER (comme solution traditionnelles) :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateur en parallèle avec le réseau et des compensateurs synchrones produisant de l'énergie, réactive.

I.5.2 Solutions modernes :

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

I.5.2.1 Harmoniques (Dépollution des courants perturbateurs) :

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmonique. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché. Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres actifs parallèles a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courants.

I.5.2.2 Creux de Tension (Dépollution des tensions perturbatrices) :

D'autres solutions modernes pour la compensation des creux de tension se base sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASI (Alimentation sans Interruption). Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

I.5.2.3 FLICKER (solution moderne pour la compensation d'énergie réactive) :

Afin d'augmenter la performance dynamique et réaliser une compensation variable en fonction de la consommation d'énergie réactive de la charge, il est nécessaire d'utiliser de convertisseurs statiques de puissance réactive avancée, utilisés plus particulièrement pour injecter de la puissance réactive en un point du réseau, de façon à augmenter la puissance maximale transmissible et la stabilité du réseau. Les convertisseurs statiques de puissance réactive, tel que les éléments FACTS (SVC, STATCOM, UPFC...) utilisent aujourd'hui des onduleurs triphasés pour régler la puissance réactive absorbée ou transmise au réseau, d'autres applications plus récentes en développement, sont la compensation Série, le variateur de charge UPFC utilisé surtout dans les réseaux de transmission afin d'augmenter la stabilité du réseau de transmission. Ce dernier fera l'étude de notre mémoire.

I.6 Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec quelques solutions [6] :

Type de perturbation	Origine	Conséquences	Solutions Possibles
Coupure longue	Court-circuit, surcharge, Déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)
Creux de tension et coupure brève	Court-circuit, (Enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
Fluctuation rapide (Flicker)	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à Démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
Harmonique	Installations non linéaires (Électronique de puissance, Arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre), Diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi-instantanés(automatismes)	Filtrage actif ou passif, self anti-harmonique, déclassement d'appareil
Inter harmonique	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, Dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, Amortissement de filtres anti harmoniques, conception de l'équipement sensible
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, conditionneur de réseau
Surtension	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, enclenchement synchronisé, résistance de pré insertion

Tableau I.3 : Principaux phénomènes perturbateurs.

I.7 Transport de l'énergie réactive :

Le transport de l'énergie réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, la compensation de la puissance réactive est utilisée pour limiter ce transport de puissance réactive. Différents appareils électriques peuvent servir à réaliser cette compensation : machines synchrones, batteries de condensateurs, inductance ou les FACTS. On distingue les compensations passives, qui fonctionnent en tout ou rien et celles actives qui sont graduelles.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur les réseaux électriques et le concept de qualité de l'énergie électrique (QEE) : définitions, principales perturbations affectant les réseaux électriques, leurs caractéristiques et ces origines, leurs influences sur les réseaux de distribution d'énergie et solutions d'amélioration la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques (solutions traditionnelles, solutions modernes). Dans le prochain chapitre nous montrerons des méthodes de l'amélioration du facteur de puissance.

Chapitre II

*Analyse des Méthodes de l'Amélioration
du Facteur de Puissance.*

II.1 Introduction :

Actuellement, le réseau électrique réel est constitué de diverses centrales de productions. Les tensions produites par les alternateurs sont élevées en *HT* (*haute tension*) puis en *THT* (*très haute tension*) pour être transportées sur de longues distances. Après cela, on rabaisse la tension dans la gamme des *MT* (*moyennes tensions*) de façon à alimenter directement des agglomérations ou des industries. Dans chaque quartier, on trouve des postes de transformation abaisseurs qui délivrent la tension domestique *BT* (*basse tension* : 230V) à un certain nombre de pôles de consommation.

En analysons le réseau électrique réel plusieurs particularités sont à noter :

- Le réseau électrique doit accéder au plus près des lieux de consommation et doit former un ensemble maillé de telle manière qu'il y ait toujours plusieurs chemins possibles pour relier deux points.
- L'énergie électrique ne se stocke pas, il est donc impératif de fournir en permanence l'énergie consommée par l'ensemble des utilisateurs.

Donc pour s'adapter à l'augmentation de l'appel en puissance, des chutes de tension dues à l'impédance des lignes vont apparaître et par conséquent la tension du réseau varie en amplitude. Ce problème majeur oblige l'exploitant de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre et la demande potentielle, étant entendu que l'équilibre instantané entre la production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production – transport – consommation (que nous appellerons aussi système électrique, plutôt que réseau).

Les réseaux de transport et d'interconnexion (THT) contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre, ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation.

Dans la pratique, on cherche à exploiter un réseau triphasé de transport :

- En maintenant les chute de tension en tout point de ce réseau entre certaines limites techniques. La tension en un sommet quelconque d'un réseau se déduit de la tension en un point où elle est fixée par un alternateur au moyen de l'expression (approximative) de la chute relative de tension ;

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP+XQ}{U^2} \quad (\text{II.1})$$

- En minimisant les pertes actives dues au transit des puissances active et réactive ; ces pertes peuvent s'exprimer sous la forme :

$$RI^2 = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (\text{II.2})$$

Où P est fixée à un instant donné.

Les expressions (II.1) et (II.2) montrent qu'il est souhaitable d'avoir un plan de tension U (c'est-à-dire une tension en chaque point du réseau) aussi élevé que possible et de réduire les transits de puissance réactive Q . Pour ce faire il faut :

- Augmenter l'excitation des alternateurs.
- Compenser localement la consommation réactive des charges et les pertes réactives des réseaux Pour réduire les transits de puissance réactive. Ce dernier point fera l'objet de notre chapitre.

II.2 Notions de Puissance électrique en alternatif sinusoïdal :

Le courant alternatif est un sujet vaste, mais il est très important de se rappeler que tout commence par la définition fondamentale de l'énergie électrique : le courant multiplié par la tension. Dans un circuit CA, cependant, nous ne pouvons pas représenter le courant ou la tension avec un seul nombre. Au contraire, le courant et la tension changent d'un moment à l'autre, et par conséquent nous utilisons une expression mathématique (avec la variable t , pour le temps) au lieu d'un nombre.

Comme nous le savons, les expressions que nous utilisons pour représenter les signaux CA sont des fonctions sinus ou cosinus caractérisées par une amplitude, une fréquence et une phase. Dans cette page, nous utiliserons le sinus :

$$v(t) = V_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II.3})$$

$$i(t) = I_{max} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{II.4})$$

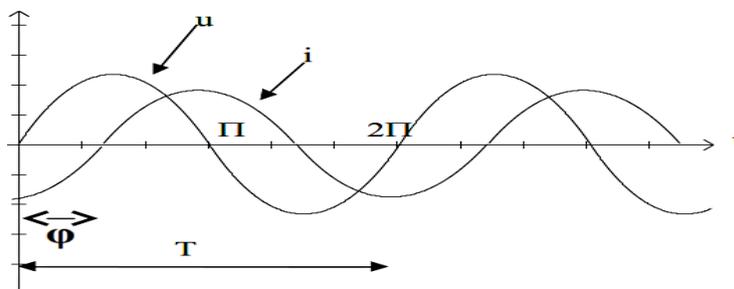
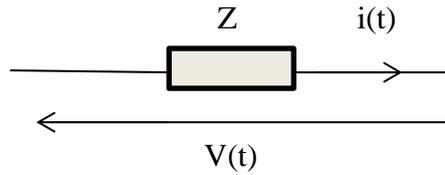


Figure II.1 : Tension et Courant en alternatif sinusoïdal



Puissances pour une charge linéaire (régime monophasé sinusoïdal pur) :

Puissance instantanée : $P(t)$

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (\text{II.5})$$

Puissances active : $p = \langle p(t) \rangle (w)$

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = VI \cos(\varphi) \quad (\text{II.6})$$

Puissances réactive : Q (VAR)

$$Q = VI \sin(\varphi) \quad (\text{II.7})$$

Puissances apparente : S (VA)

$$S = V \cdot I = \sqrt{p^2 + Q^2} \quad (\text{II.8})$$

Qu'est-ce que le facteur de puissance ?

Dans tous les cas, le facteur de puissance se calcule de la façon suivante :

$$F_P = \frac{P}{S} \quad (\text{II.9})$$

Il s'agit du rapport de la puissance active sur la puissance apparente. On rappelle que la puissance active correspond à la puissance réellement convertie en travail dans la charge tandis que la puissance apparente correspond à la puissance dimensionnante de l'installation. Un facteur de puissance unitaire traduit donc le fait qu'un système est dimensionné au plus juste. La totalité de l'énergie produite puis transportée est alors convertie dans la charge. Dans le cas contraire, un facteur de puissance non unitaire impose alors les contraintes suivantes :

- **Surdimensionnement** : L'ensemble de l'énergie transitant par le système n'étant pas convertie dans la charge, l'ensemble des éléments du systèmes doivent alors être surdimensionnés.
- **Pertes** : Les puissances réactives et déformantes inhérentes à un facteur de puissance non unitaire traduisent des échanges d'énergie non utiles entre le réseau et la charge. Celles-ci occasionnent des pertes additionnelles.

La Figure **II.2** illustre les inconvénients inhérents à un mauvais facteur de puissance.

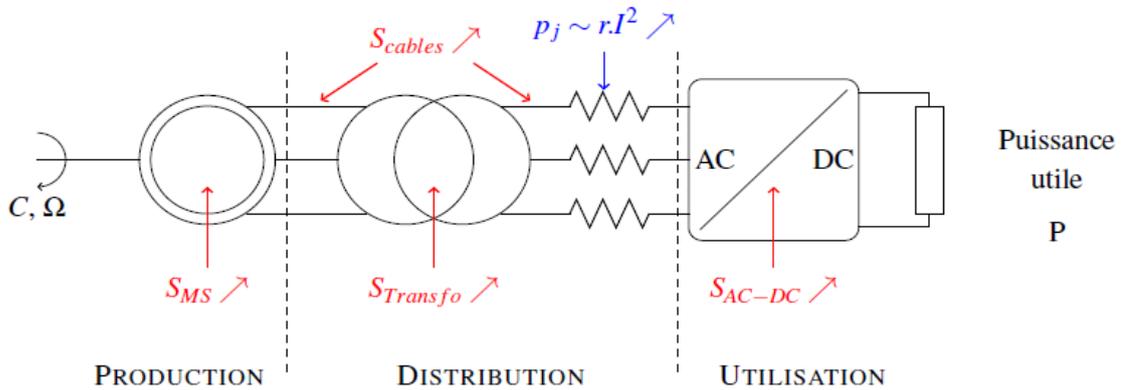


Figure II.2 : schéma des inconvénients inhérents à un mauvais facteur de puissance

Pourquoi l'améliorer ?

Le surdimensionnement de l'ensemble du système ainsi que les pertes additionnelles causées par un mauvais facteur de puissance sont synonymes de surcoût financier. Il est donc intéressant de chercher à maximiser ce facteur de puissance. Différents moyens sont utilisés de façon à améliorer ce facteur de puissance suivant la nature de la charge.

II.3 Inconvénient d'un faible facteur de puissance :

Quand une installation, ou un réseau électrique présente un $\cos \phi < 0.8$, il est nécessaire de modifier l'installation de manière à élever ce facteur. Etant donné que la grande majorité des installations sont plutôt inductives, c'est-à-dire que le $\cos \phi < 1$ est dû à la présence d'inductances dans les circuits. Donc on constate que le facteur de puissance peut influencer sur le producteur, distributeur et l'utilisateur et cela comme suit [7] :

Pour le producteur :

- Nécessité d'avoir des alternateurs et des transformateurs plus importants.
- Posséder une tension plus élevée au départ de la ligne.
- Besoin d'avoir des lignes de plus forte section,
- Pertes Joules plus élevées.
- Appareils de contrôle, de protection et de coupure plus importants.

Pour le consommateur :

- Nécessité d'avoir des transformateurs, des moteurs, des appareillages de manœuvre plus importants.
- Tension d'utilisation plus faible.
- Intensité plus grande.
- Pertes Joules plus élevées.
- Rendement des appareils mauvais.

II.4 Causes du faible facteur de puissance :

La raison habituelle du faible facteur de puissance est la charge inductive. Le courant de la charge inductive est en retard par rapport à la tension. Le facteur de puissance est donc à la traîne. Les charges inductives importantes responsables du faible facteur de puissance sont les moteurs à induction triphasés (qui fonctionnent à un facteur de puissance de retard de 0,8), le transformateur, les lampes et l'équipement de soudage fonctionnent à des facteurs de puissance de retard faibles. Les méthodes d'amélioration du facteur de puissance sont utilisées pour améliorer la valeur du facteur de puissance dans un système électrique.

II.5 Moyens d'amélioration du facteur de puissance :

II.5.1 Théorie de compensation d'énergie réactive :

Considérons l'impédance représentant $Z = |Z|e^{j\phi} = R + jX$ une charge inductive ($X > 0$), ci-contre. La puissance réactive correspondante est $Q = X \cdot I^2$. L'ajout d'un condensateur C en tête du circuit ne modifie pas la charge et ne rajoute aucune puissance active.

En revanche, C consomme de la puissance réactive et va donc donner un nouveau facteur de puissance : $\cos \phi'$. On sait que $Q_C = -C\omega V^2$. Le théorème de Boucherot apporte : $Q_{tot} = Q + Q_C$



Figure II.3 : Principe de compensation

La compensation de puissance réactive consiste à assurer $Q_{tot} = 0$ c'est-à-dire à $Q_C = Q$ et $\cos \phi' = 1$. Le condensateur à choisir a alors la valeur : $C = X \cdot I^2 / \omega V^2 = Q / \omega V$. Du coup il est intéressant de connaître la formule générale qui donne la valeur de la capacité en fonction du $\cos \phi$ et du $\cos \phi'$.

Si cette compensation était parfaite ($Q = 0$), on aurait une chute de tension relative de l'ordre de RP/U^2 et des pertes de l'ordre de RP^2/U^2 .

Les pertes croissant peu lorsque $Q < P$ (soit $Q^2 \ll P^2$), il peut être souhaitable, pour améliorer la sûreté de l'exploitation, de surcompenser le réseau, c'est-à-dire de fournir une puissance réactive plus élevée que celle qui est consommée [8], de façon, par exemple, à annuler la chute de tension ($Q = -RP/X$). Dans ce cas, on peut montrer que les pertes

augmentent, c'est-à-dire que le gain sur les pertes dû à l'augmentation de la tension est inférieur à leur accroissement dû à l'augmentation de Q .

Le minimum théorique pour les pertes est donc la compensation totale. Par ailleurs, d'un point de vue économique, la compensation cesse d'être intéressante lorsque le coût des moyens de compensation, compte tenu de leur taux d'utilisation, devient supérieur au gain réalisé sur les pertes [9].

Il appartient donc au planificateur de réseau de rechercher le meilleur compromis et de doser et localiser la compensation à installer en prenant en compte son coût et ses avantages. Dans les réseaux chargés, Ce sont alors les alternateurs qui assurent l'équilibre d'ensemble, avec des performances dynamiques qui rendent leur utilisation indispensable pour compléter l'action des condensateurs utilisés en base [10].

II.5.2 Moyens de compensation de puissance réactive :

La meilleure solution est la compensation d'énergie réactive. Elle présente beaucoup d'avantage puisqu'elle permet d'éliminer tous les effets néfastes, c'est-à-dire elle diminue la circulation de courant dans les lignes, elle diminue donc l'échauffement des conducteurs, elle élimine les pertes supplémentaires, elle réduit les chutes de tension dans le réseau et évite la surcharge des transformateurs.

L'avantage de la compensation de l'énergie réactive n'est pas seulement technique mais aussi économique vu qu'elle élimine les pertes supplémentaires, évite le surdimensionnement de l'installation et permet aussi de disposer d'une puissance supplémentaire par rapport à la puissance souscrite. Si l'énergie réactive est facturée pour les grosses entreprises, l'avantage économique de compensation est leur solution d'utiliser des moyens de compensation fiable.

La compensation d'énergie réactive contribue fortement à l'amélioration de la qualité du réseau et de la fourniture de l'énergie électrique. Donc Pour couvrir les besoins en puissance réactive indispensable pour le fonctionnement des récepteurs on a souvent recours à ce qu'on appelle les sources supplémentaires de puissance réactive. Parmi ces ressources on distingue :

- Les Compensateurs Statiques
- Les Compensateurs synchrones peuvent également fournir de l'énergie réactive
- Les convertisseurs Statiques

II.5.2.1 Compensateurs synchrones :

Le compensateur synchrone est un moteur synchrone utilisé dans les réseaux de distribution électrique. Ce moteur tournant à vide sur un réseau, non entraîné par une machine tournante fournit de la puissance réactive au réseau, c'est-à-dire une charge capacitive. Son avantage est que l'on peut faire varier la puissance réactive produite en jouant sur l'excitation

du moteur. Pour un fort courant d'excitation, la machine fournit de la puissance réactive ($Q > 0$) et pour un faible courant d'excitation, elle absorbe de la puissance réactive ($Q < 0$). La régulation peut se faire sur une consigne de tension de l'installation ou de facteur de puissance. Cette méthode était auparavant la plus utilisée mais à cause de sa lenteur de vitesse de réaction et de la nécessité d'entretien important, cette technologie est de nos jours de moins en moins employée et remplacée par celle du compensateur statique d'énergie réactive.

Ou bien un Alternateur utilisé dans les centrales de production de l'énergie électrique donc Les compensateurs synchrones sont très utilisés dans les systèmes électriques pour résoudre des problèmes de compensation de la puissance réactive et de réglage de la tension.

II.5.2.1.1 Description du compensateur synchrone :

Le moteur synchrone et l'alternateur sont identiques, fonctionnant à partir des mêmes principes, et seulement le sens de l'écoulement d'énergie détermine si le convertisseur est un alternateur ou un moteur. Il faut noter l'énergie circule de la tension qui est en avance de phase vers la tension qui est en retard de phase. Les électrotechniciens avaient surtout besoin des moteurs synchrones pour corriger le facteur de puissance.

Il faudra démarrer les moteurs synchrones au moyen d'un autre moteur ou encore de combiner une cage d'écurieil (moteur asynchrone) avec une bobine alimentée avec du courant continu (moteur synchrone).

II.5.2.1.2 Modélisation du convertisseur synchrone [11] :

II.5.2.1.2.1 Le modèle de l'alternateur :

Le groupe turbo-alternateur est considéré comme le cœur du réseau électrique, il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur. Dans notre cas, l'alternateur est modélisé par une source de tension constante qui injecte, au niveau du nœud auquel il est connecté, une puissance active P et réactive Q .

Le modèle que l'on utilisera contiendra :

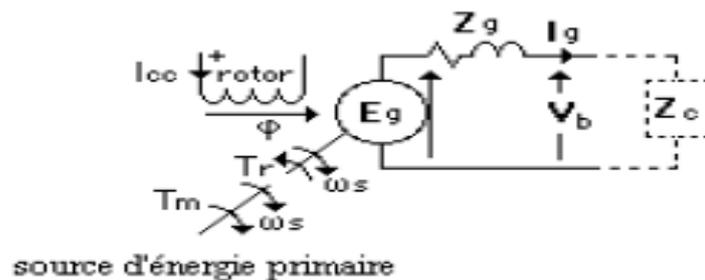


Figure II.4 : Modèle de l'alternateur.

II.5.2.1.2.2 Le modèle du moteur synchrone :

Le modèle du moteur synchrone est identique au modèle de l'alternateur, mais pour bien comprendre les relations d'écoulement d'énergie, on doit le présenter comme suit :

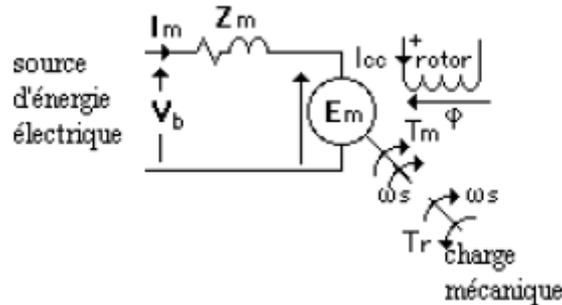


Figure II.5 : Modèle du moteur.

II.5.2.1.3. Mode de fonctionnement en Alternateur dans un réseau :

Le compensateur synchrone est un appareil utilisé dans le domaine industriel et des réseaux de distribution électrique. Il s'agit d'un moteur synchrone tournant à vide sur un réseau, non entraîné par une machine tournante. Il fournit alors de la puissance réactive au réseau, c'est-à-dire une charge capacitive, sans que les effets secondaires des bancs de condensateurs pour courant alternatif entrent en jeu.

En effet, il faut savoir que la plupart des moteurs dans une installation industrielle classique sont des moteurs asynchrones, eux-mêmes consommateurs de puissance réactive. Pour ne pas dégrader le facteur de puissance ($\cos \phi$) de l'installation électrique, on place alors ce compensateur synchrone, qui comme dit précédemment, n'est rien d'autre qu'un moteur synchrone qu'on surexcite.

Le gros avantage de ces compensateurs synchrones sur les bancs de condensateurs est que l'on peut faire varier la puissance réactive produite en jouant sur l'excitation du moteur. La régulation peut se faire sur une consigne de tension de l'installation ou de facteur de puissance. De nos jours cette technologie est de moins en moins employée, remplacée par celle du compensateur statique d'énergie réactive.

II.5.2.2 Batteries de condensateurs :

La batterie de condensateurs est actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans les réseaux publics.

Les batteries de condensateurs fournissent une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels :

II.5.2.2.1 Batteries de condensateurs HT :

Raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT (figure II.6) ; leur rôle essentiel est compensé les pertes réactives sur les réseaux HT et THT, mais une partie d'entre elles participent également à la compensation des charges ; leur puissance est de l'ordre de 20 à 30 MVAR et représente environ 20% du parc de condensateurs installés.



Figure II.6 : Gradins de condensateurs placés sur le réseau HTA (63 kV) permettant de compenser la puissance réactive de la charge.

II.5.2.2.2 Batteries de condensateurs MT :

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

II.5.2.2.1. Le condensateur série :

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

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

La figure II.7 représente le schéma équivalent d'un condensateur monté en série sur une ligne.

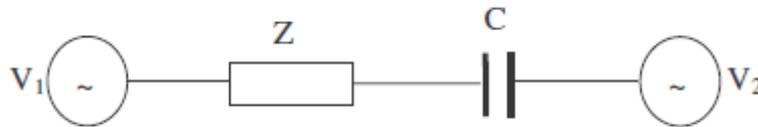


Figure II.7 : schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne.

Les condensateurs série peuvent être placés à différents endroits de la ligne (milieu, tiers, postes d'extrémité, . . .). La figure II.8 montre par exemple le profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation en son centre. On voit que la compensation réduit la chute de tension.

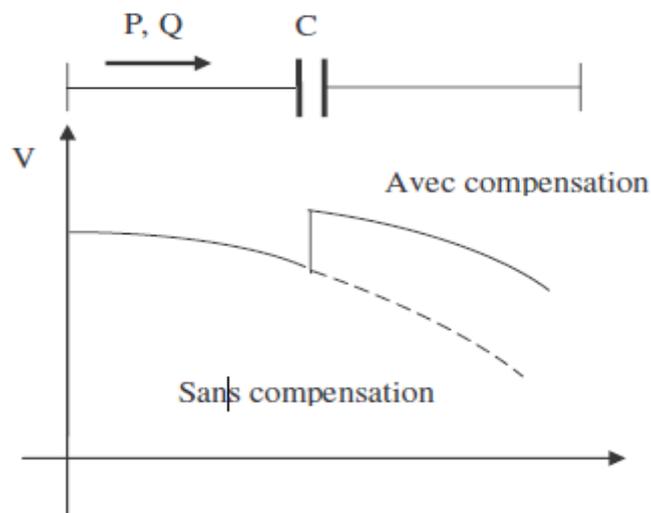


Figure II.8 : profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation

Les inconvénients possibles de la compensation série sont les protections de réseau plus complexes ; Le risque de résonance synchrones. La mise en série du condensateur avec l'inductance de la ligne forme un circuit résonant série. Pour les taux usuels de compensation, ce circuit a une fréquence naturelle inférieure à 50 Hz, dite synchrones. Usuellement les courants correspondants s'amortissent rapidement. Par contre une situation dangereuse est

celle ou un arbre d'alternateur situé à proximité a une fréquence d'oscillation torsionnaire proche. Ce phénomène est appelé résonance subsynchrone. Son analyse requiert une représentation des transitoires électromagnétiques dans le réseau et dans les machines synchrones.

II.5.2.2.2 Le condensateur shunt :

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

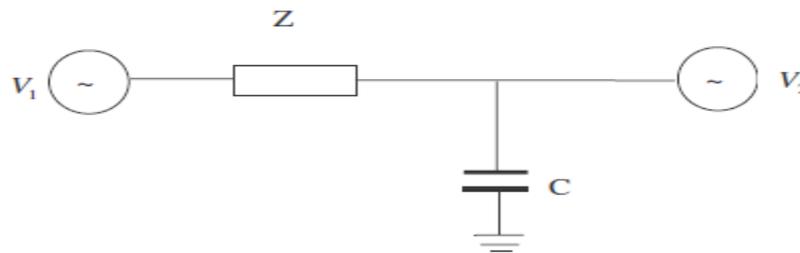
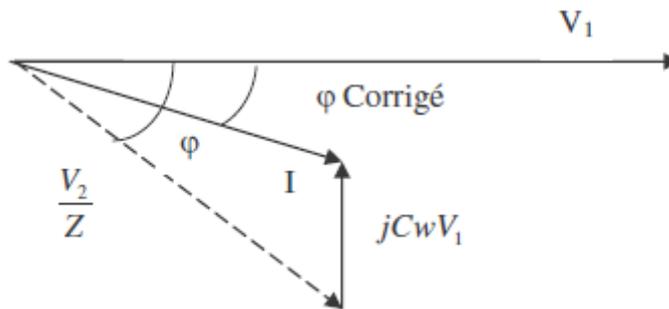


Figure II.9 : schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne.

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

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



$\frac{V_2}{Z}$ = courant de ligne avant compensation

Figure II.10 : Diagramme des courants et Tensions d'un compensateur shunt.

Le courant circulant dans la ligne est plus faible, les pertes Joule sont donc réduites.
Raccordement des condensateurs au réseau :

La figure II.10 représente le schéma de branchement d'un condensateur série à travers des disjoncteurs. P étant un parafoudre pour assurer la protection et le transformateur TT permet la mise à la terre des charges partielles après le débranchement du condensateur.

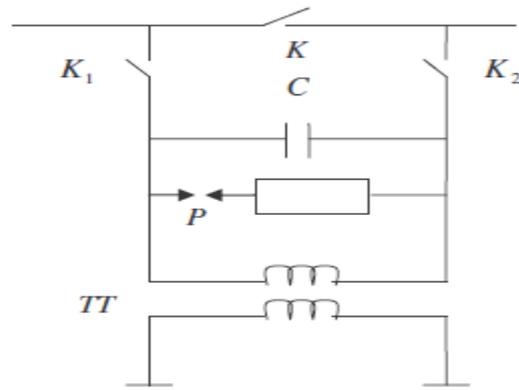


Figure II.11 : Schéma de branchement d'un condensateur série.

Les condensateurs shunt sont habituellement couplés en triangle avant d'être raccordés au réseau. Le choix du système triangle est fait pour des raisons économiques ; la puissance produite par des condensateurs en triangle est trois fois plus importante que la puissance produite par les mêmes condensateurs couplés en étoile

La figure II.12 représente un gradin de condensateurs couplés en triangle sur une ligne triphasée :

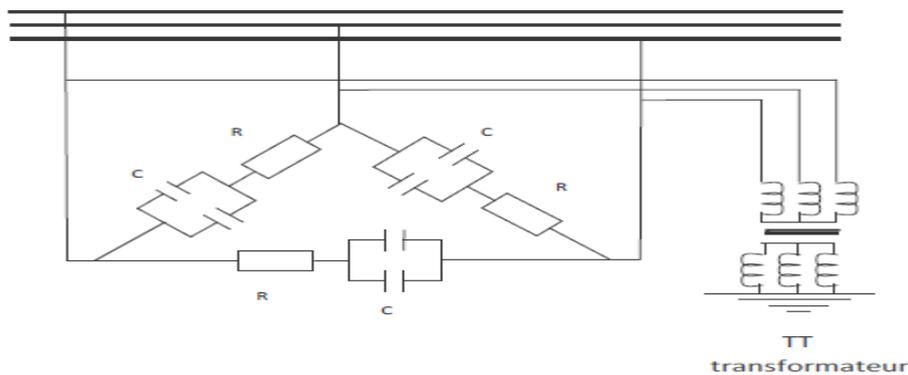


Figure II.12 : Schéma de couplage de condensateurs shunt

En cas de claquage d'un condensateur sur la figure II.12, la résistance R connectée en série, permet d'éviter le court-circuit des autres condensateurs.

Avantage des batteries de condensateurs :

Les batteries de condensateurs présentent les avantages de tous les éléments statiques :

- Absence d'usures mécaniques.
- Entretien réduit.
- Pertes faibles.
- Elles occupent un faible volume.
- Installation facile.

Désavantage des batteries de condensateurs : Les inconvénients que présentent les batteries de condensateurs peuvent être résumés comme suit :

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

II.6 les systèmes FACTS :

Avec le développement rapide d'électronique de puissance, les Systèmes Flexibles de Transport de courant alternatif (AC) sous le concept FACTS : (Flexible AC Transmission System) [12], [13], ont été créés et implémentés dans les réseaux électriques. Les FACTS peuvent être utilisés pour contrôler l'écoulement de puissance et améliorer la stabilité du système. Particulièrement, avec le nouveau système de dérégulation du marché de l'énergie, il y a une augmentation de l'intérêt accordé aux FACTS dans l'exploitation et le contrôle des réseaux électriques et ceci est dû aux nouvelles contraintes de charge et aux nouvelles contingences. L'installation des FACTS est devenue indispensable pour la compensation des puissances et la stabilité d'un réseau électrique.

Il y a deux aspects principaux qui doivent être considérer lors de l'utilisation des FACTS, le premier, c'est rendre flexible le fonctionnement du réseau vu sa capacité d'écoulement de puissance, le deuxième, c'est l'amélioration de la stabilité statique et transitoire du réseau.

II.6.1 Définition des FACTS :

Selon IEEE, les FACTS (abréviation anglaise de Flexible AC Transmission System), sont définis comme suit :

Ce 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.

II.6.2 Catégories des FACTS et leurs fonctions :

II.6.2.1 Catégories des FACTS :

Généralement, les FACTS peuvent être regroupés en quatre catégories :

a) les FACTS série :

Un FACTS série peut être une impédance variable, une capacité, une réactance, une source de tension variable à fréquence nominale (ou fréquences harmoniques), ou une combinaison entre ces dernières connectées au réseau pour servir un besoin voulu.

Généralement, tous les FACTS série injectent une tension en série avec la ligne de transport.

b) FACTS Shunt :

Un FACTS shunt peut être une impédance, une source de tension, ou alors une combinaison de ces dernières. Il injecte un courant dans le réseau au nœud où il est installé.

c) FACTS Combiné série-série :

C'est une combinaison de plusieurs FACTS série qui sont contrôlés d'une manière coordonnée

d) FACTS Combiné série-shunt :

C'est une combinaison de FACTS série et shunt qui sont contrôlés d'une manière coordonnée.

II.6.2.2 Les FACTS et leurs fonctions :

Il y a plusieurs types de FACTS, les quatre types les plus répandus sont : le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), le TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer), l'UPFC (Unified Power Flow Controller) et le SVC (Static Var Compensator).

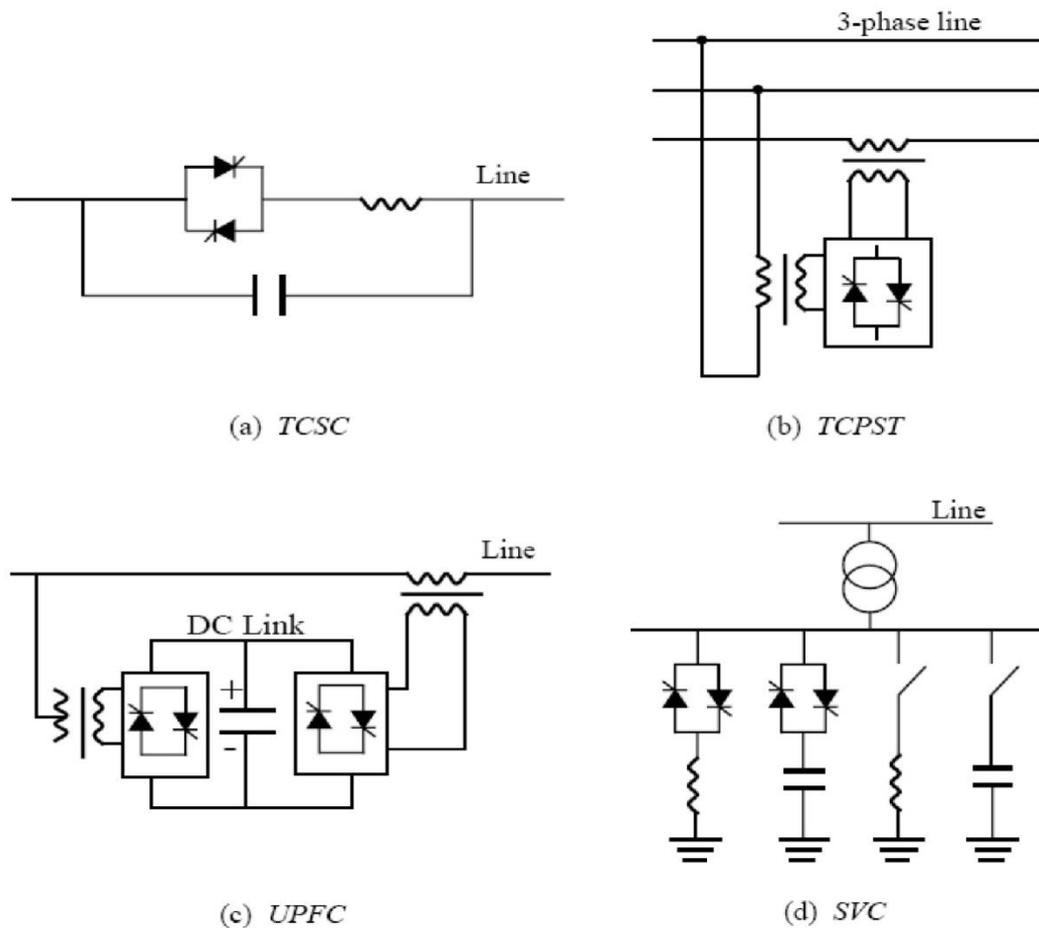


Figure II.13 : Diagrammes fonctionnels des FACTS.

Le TCSC est un FACTS de typique série, qui est utilisé pour changer la réactance série de la ligne de transport. Puisque le TCSC travail directement sur la ligne, il est plus efficace que les FACTS shunt dans le contrôle de l'écoulement de puissance et l'amortissement des oscillations.

L'UPFC est parmi tous les FACTS, le plus puissant et le plus polyvalent, du fait qu'il peut contrôler à la fois, l'impédance de la ligne, la tension terminale et l'angle de la tension. Similairement à l'UPFC, le TCPST est un FACTS combiné série-parallèle qui peut être utilisé pour le réglage de la phase entre deux tensions terminales.

Le SVC est un FACTS parallèle qui est utilisé principalement pour la compensation de l'énergie réactive.

II.6.3 Bénéfices offerts par la technologie FACTS :

Les bénéfices que peut fournir la technologie des FACTS et leurs implémentations :

- Contrôle de l'écoulement de puissance : c'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence.
- Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière.
- Fournir des connections sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones.
- Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettrait ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.
- Contrôle de la boucle de l'écoulement de puissance.

II.6.4 Applications pratiques des FACTS :

Dans les dernières années, plusieurs travaux ont montré l'efficacité de l'utilisation des FACTS. Bien qu'il existe de nombreux exemples réussis d'installation, seules quatre nouvelles applications principales sont brièvement examinées dans la présente section :

II.6.4.1 Capacité série Avancée (ASC) (à Kayenta par l'entreprise WAPA) :

Le système ASC engagé en 1992 qui inclut un TCSC avec une capacité série conventionnelle a été installé au poste 230 kV de Kayenta du Western Area Power Administration (WAPA) au nord de l'Arizona. Cet ASC est employé pour augmenter

l'efficacité de la capacité de transport de la ligne 230 kV entre Glen Canyon et Shiprock. Ce dispositif consiste en deux bancs de capacités série de 55 Ω (165 MVar et 1000 A).

Les résultats de ce projet ont montré que l'ASC est un moyen fiable de l'utilisation des capacités de transport existantes, tout en maintenant la sécurité du système.

II.6.4.2 TCSC (à Slatt par l'entreprise BPA) :

Ce système a été conçu en Septembre 1993, installé au poste 500 kV de Slatt par Bonneville Power Administration (BPA) à Oregon. En 1995, il a été mis sous conditions d'exploitation économiques. Ce TCSC est en série avec la ligne 500 kV de Slatt-Buckley. L'emplacement du TCSC a été choisi pour l'exposer à des sévères conditions d'opération et d'acquérir suffisamment de bénéfices d'exploitation.

La réactance maximale est de 24 Ω et la valeur nominale triphasée de compensation est de 202 MVar. Les résultats de ce projet montrent que TCSC est non seulement un moyen efficace de contrôle de l'impédance et de courant, mais aussi un puissant moyen d'accroître la stabilité du réseau.

II.6.4.3 STATCOM (à Sullivan par l'entreprise TVA) :

C'est le premier STATCOM (Static Synchronous Compensator) à haute puissance aux USA installé à la fin de 1995 au poste de transformation Sullivan de l'entreprise Tennessee Valley Authority (TVA) pour compenser la ligne de transport. Ce STATCOM est utilisé pour réguler la tension au nœud qui est de 161 kV durant la journée de telle sorte que le régulateur en charge sera moins utilisé. Sa capacité nominale est de ± 100 MVar. Cette application montre que le STATCOM est un équipement polyvalent avec une remarquable aptitude dynamique, qui trouvera de plus en plus des applications dans les réseaux électriques.

II.6.4.4 UPFC (à Inez par l'entreprise AEP) : [14]

C'est le premier UPFC au monde mis en service en 1998 au poste Inez de l'American Electric Power (AEP) à Kentucky pour le maintien de la tension et le contrôle de l'écoulement de puissance. Il a été dimensionné de telle sorte à fournir une rapide compensation réactive shunt avec un rang de 320 MVar, et pour le contrôle de l'écoulement de puissance dans la ligne 138 kV. En outre, il peut être utilisé pour forcer la puissance au-dessus de 950 MVA pour toutes les contingences.

L'application prouve que l'UPFC possède une remarquable capacité en matière de contrôle du flux d'énergie active et réactive dans la ligne, ainsi que la régulation de la tension au nœud. De plus, il a une structure souple pour être reconfiguré afin d'offrir une compensation shunt et série indépendante, ou alors pour une compensation uniquement shunt, ou uniquement série.

Il existe aussi de nombreuses autres applications fructueuses des FACTSs. En particulier, ces dernières années, avec l'amélioration de l'électronique de puissance, les coûts de ces dispositifs pourraient être considérablement réduits, et donc l'application pratique des FACTS devient plus favorable.

Il existe aussi de nombreuses autres applications fructueuses des FACTSs. En particulier, ces dernières années, avec l'amélioration de l'électronique de puissance, les coûts de ces dispositifs pourraient être considérablement réduits, et donc l'application pratique des FACTS devient plus favorable.

Ces dernières années les réseaux électriques ont déjà connu un accroissement considérable des interconnexions et ont été exploités de plus en plus près de leurs limites de stabilité et de sécurité en raison des contraintes économiques et d'une opposition croissante à la construction de nouveaux ouvrages (lignes, centrales) dans des zones à forte densité de population. Les perturbations inévitables telles que les courts-circuits, les indisponibilités momentanées de lignes, de générateurs ou de transformateurs ainsi que les pertes dans les lignes peuvent affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa zone de stabilité.

Une ligne de transmission de flux de puissance est déterminée par trois paramètres électriques essentiels à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport (entre la source 'tension' et le récepteur). Le changement d'un de ces trois paramètres électriques, produit une variation de la puissance à travers la ligne de transmission.

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

Des systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la micro-électronique de commande ont été récemment étudiés et réalisés, et sont actuellement pour certains en application normale, pour d'autres, à l'état de prototypes. Ces systèmes sont désignés par l'acronyme général FACTS. Ils pouvaient améliorer le comportement des réseaux en matière de stabilité, et constituaient ainsi un moyen d'augmenter la flexibilité des réseaux à courant alternatif et pouvaient donc intervenir dans leur contrôle.

L'utilisation de liaisons à courant continu pourrait augmenter dans l'avenir, surtout dans la mesure où il serait fait usage de convertisseurs à éléments entièrement commutables (GTO, IGBT, IGCT) à modulation de largeur d'impulsion (MLI) permettant de réaliser des caractéristiques de réglage quelconques. Ces convertisseurs MLI permettent de réaliser de véritables génératrices statiques à courant alternatif, qui sont capable de fournir ou d'absorber de la puissance réactive dont la tension est contrôlable.

II.7 Les concepts du contrôle du flux de puissance : [15]

On peut observer que le flux de puissance à travers une ligne de transport alternative est déterminé par trois paramètres électriques de base que sont l'impédance de la ligne, la tension et l'angle de phase entre la tension de source et la tension de la charge.

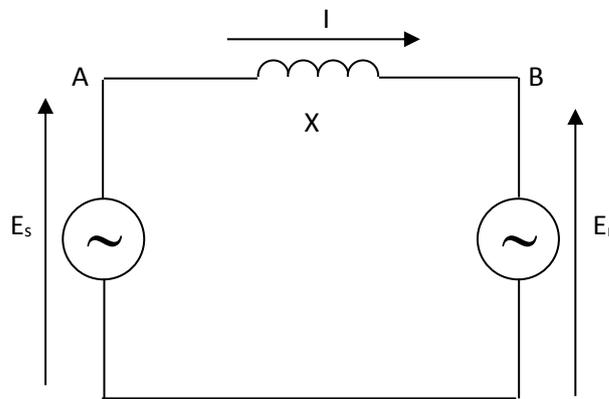


Figure II.14 : Transport de l'énergie dans un dipôle reliant deux sources synchrones A et B

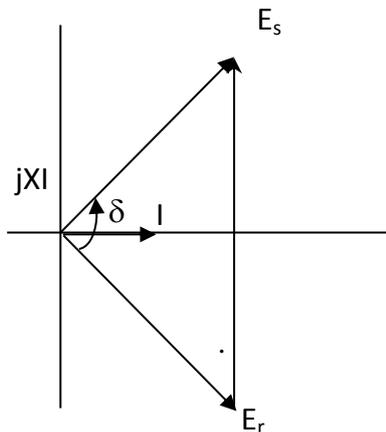


Figure II.15 : Diagramme de phase des tensions

Pour illustrer les différentes possibilités pour le contrôle du flux de puissance dans le réseau, on utilise le modèle monophasé équivalent donné dans la figure II.16. Cette fois-ci, un contrôleur dit contrôleur de flux de puissance généralisé est exploité au milieu de la ligne.

Le contrôleur de flux de puissance est un dispositif idéal capable de varier les trois paramètres de transmission (tension, impédance, angle de phase) par des compensations appropriées (compensation réactive série, compensation réactive shunt et un déphaseur). Ce dispositif de contrôle peut être modélisé comme deux éléments de contrôle, une source de tension alternative (V_{pq}) insérée en série avec la ligne, et une source de courant alternative (I_q) connectée en parallèle avec la ligne au point du milieu. D'après cette description, on peut distinguer quatre cas de puissance transmise dans la ligne par ajustement des grandeurs, I_q et V_{pq} ($V_{pq}=V_c$) :

- Sans compensation de ligne
- Avec compensation de capacité série
- Avec compensation shunt
- Avec contrôle de l'angle de phase

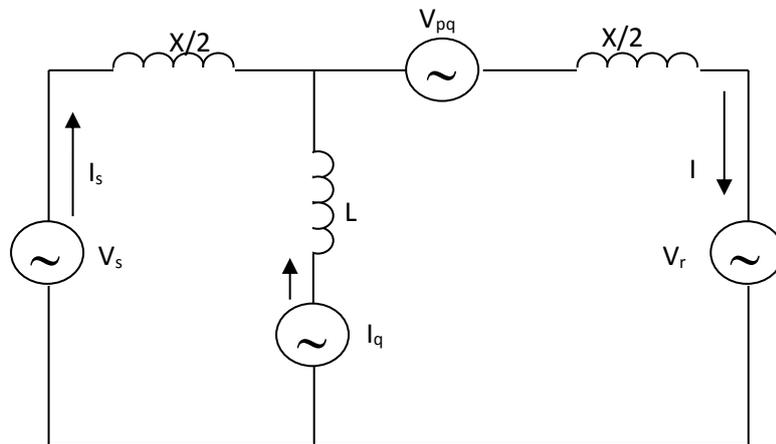


Figure II.16 : Le circuit équivalent du principe du contrôle de flux de puissance

La puissance transmise dans les quatre cas est montrée sur figure II.17

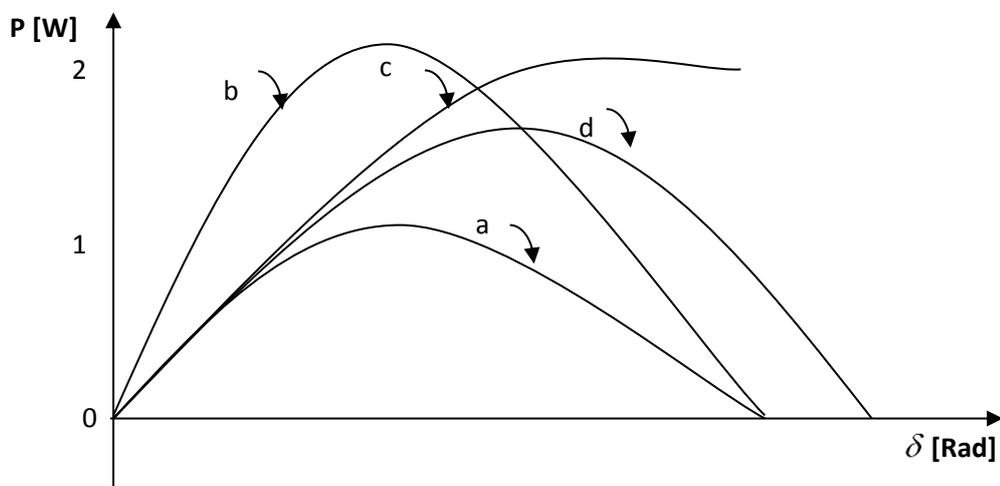


Figure II.17 : variation de la puissance débitée en fonction de la position angulaire

Ce cas correspond à la figure II.17 qui répond aux conditions suivantes : V_{pq} et I_q sont nulles (le contrôleur de flux de puissance est Off).

La puissance électrique du système donnée par la figure II.17 est définie par l'équation suivante :

$$P = \frac{|V_s| \cdot |V_r|}{X} \cdot \sin \delta \quad (\text{II.10})$$

Où

V_s : est l'amplitude de tension de source du réseau.

V_r : est l'amplitude de tension de la charge

δ : est l'angle de phase entre V_s et V_r (ou l'angle de charge).

En supposant

$$|V_s| = |V_r| = V$$

On obtient :

$$P_a = \frac{|V|^2}{X} \cdot \sin(\delta) \quad (\text{II.11})$$

La puissance P_a montré sur la figure II.17 est tracée en fonction de l'angle δ .

II.7.1 Compensation série :

Pour ce deuxième cas illustre par la figure II.18 on suppose que $I_q = 0$ et $V_{pq} = -jKXI$; cela veut dire que la tension insérée avec la ligne est déphasée de 90° en retard par rapport au courant de ligne par conséquent la source de tension agit à la fréquence fondamentale comme une capacité de compensation série. Le degré de compensation est défini par le coefficient K ($0 \leq K \leq 1$). On peut voir dans ce cas que l'impédance de la ligne décroît d'un facteur $(1-k) \cdot X$ par rapport au cas précédent.

La relation de la puissance P est représentée sur la figure II.18

$$P_b = \frac{|V|^2}{X \cdot (1-k)} \cdot \sin(\delta) \quad (\text{II.12})$$

La puissance P_b est représentée sur la figure II.17.

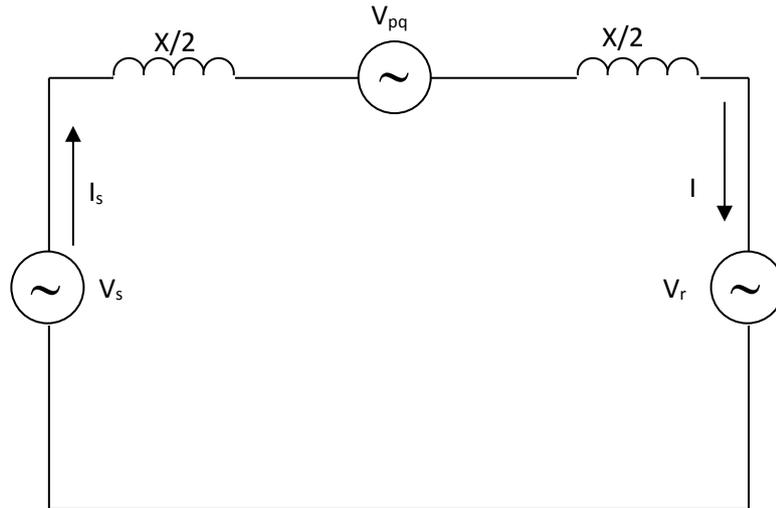


Figure II.18 : Contrôleur série

II.7.2 Compensation shunt :

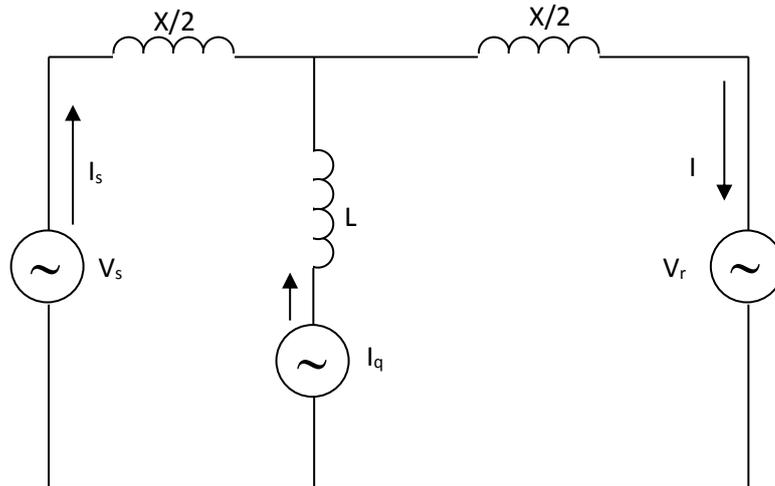


Figure II.19 : contrôleur shunt

Une source de courant I_q déphasé de 90° par rapport à la tension du milieu V_m est introduite comme illustré par la figure II.19 pour ce troisième cas, on suppose que $V_{pq} = 0$

$$\text{et } I_q = -j(4|V|/X) \left[1 - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right] \tag{II.13}$$

La puissance délivrée à la charge alors :

$$P_C = \frac{2|V|^2}{X} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \tag{II.14}$$

II.7.3 Régulation de l'angle de phase :

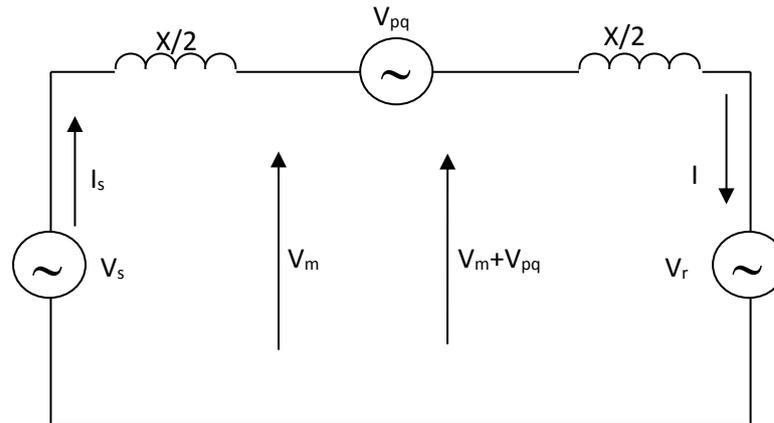


Figure II.20 : le régulateur d'angle de phase shunt.

La notion de ce régulateur est de rendre la puissance transmise (du départ du réseau) moins dépendante de la réactance par changement de l'angle de phase effectif de δ à $(\delta - \alpha)$ avec le contrôle de α .

Maintenant $V_{pq} = \pm V_m \cdot \tan \alpha$. L'angle entre V_m et V_{pq} est 90° , cela implique que l'amplitude de $V_m + V_{pq}$ reste presque la même. Mais le déphasage est maintenant réglable.

La puissance délivrée à la charge est donnée par :

$$P_d = \frac{|V|^2}{X} \cdot \sin(\delta - \alpha) \quad (\text{II.15})$$

Elle peut être contrôlée par la valeur de α . Par conséquent, on peut voir d'après la figure II.17 que la puissance transmise est gardée à un niveau constant, indépendant de l'angle δ dans une certaine plage du fonctionnement.

II.8 Les différents systèmes FACTS : [16]

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteurs statiques) leur assure une vitesse et une fiabilité supérieures à celle des systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces dispositifs est non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant, voire en améliorant la stabilité des réseaux.

Les différents systèmes FACTS existants, peuvent être classés en trois catégories :

- Les compensateurs parallèles
- Les compensateurs séries ou compensateurs d'impédance
- Les compensateurs série et parallèles

II.8.1 Les compensateurs parallèles (shunt) :

Par le contrôle du flux de puissance réactive dans la ligne, ces compensateurs parallèles appelés aussi compensateurs de puissance réactive, permettent de maintenir la tension du réseau au point de connexion dans une plage bien déterminée pour le bon fonctionnement du réseau.

On peut citer comme exemple :

- Compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator)
- Compensateur synchrone statique STATCOM (Static Compensator) voir figure II.21.
- Compensateur statique STATCON (Static Condenser)
- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- Compensation parallèle SVG (Static Var Generator)



Figure II.21 : une cellule STATCOM

II.8.1.1 Principe de fonctionnement :

La figure II.22 présente le principe d'un compensateur statique de puissance réactive. Un onduleur parallèle à pulsation est branché par l'intermédiaire du transformateur T_1 à la tension V_s du départ de la ligne de transmission. Il produit trois tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale, avec des amplitudes et des angles de phase réglables. La puissance réactive est variée par l'ajustement de l'amplitude de la tension de sortie de convertisseur. Afin de garantir un bon fonctionnement de l'onduleur shunt, on doit prévoir plusieurs circuits de réglage. Avec un réglage interne, on contrôle le courant triphasé. Les consignes sont fournies par deux circuits de réglage superposés qui fonctionnent en parallèle. D'une part, il y a un réglage de la tension continue V_{dc} qui est maintenue avec le condensateur C .

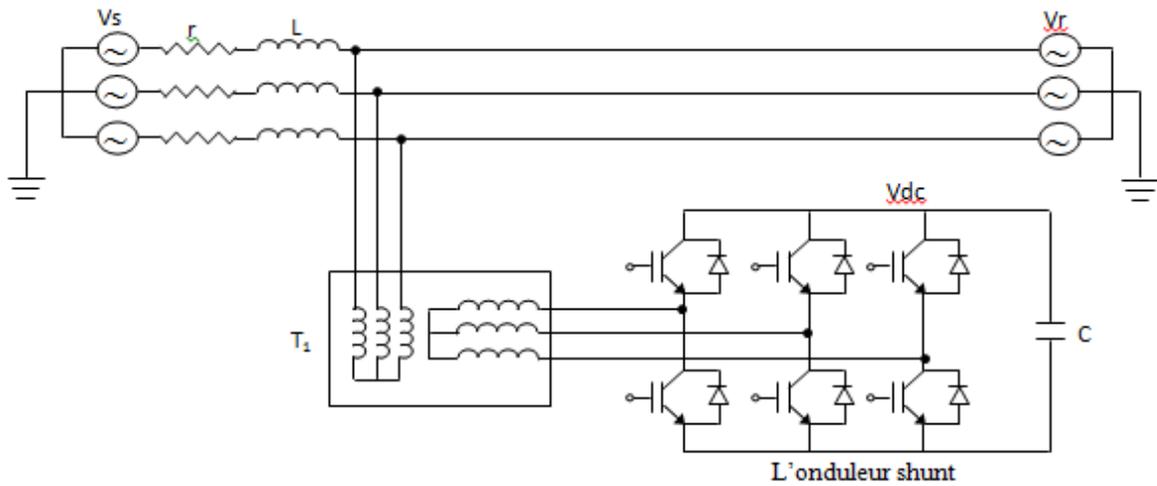


Figure II.22 : Compensateur parallèle

Cette tension doit être réglée à une valeur constante, afin de permettre une modulation sinusoïdale de l'onduleur dans toute la plage de fonctionnement. D'autre part, il y a un réglage de la puissance réactive. Puisque l'onduleur à pulsation permet de travailler dans les quatre quadrants, on peut absorber ou fournir de la puissance réactive au réseau de transmission.

II.8.2 Les compensateurs séries :

L'utilisation de condensateurs en série pour compenser la réactance d'induction à travers une distance très longue de la ligne est la méthode la plus efficace et économique pour améliorer le transfert de puissance.

Les deux raisons principales pour incorporer des condensateurs en série dans les systèmes de la transmission sont :

- Augmenter la capacité du transfert de la puissance en augmentant la limite de la stabilité transitoire.
- Réduire les pertes dans la ligne de transmission en optimisant le partage de puissance active entre lignes parallèles.

Les compensateurs série sont aussi appelés compensateurs d'impédance figure II.23, car par l'ajustement de l'impédance de la ligne, ce type de compensateur, est capable de contrôler le transit de puissance active dans la ligne. On a comme exemple :

- Compensateur série TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)
- Compensateur série synchrone statique SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

II.8.2.1 Principe de fonctionnement :

L'onduleur série injecte par l'intermédiaire d'un transformateur série T_2 une tension additionnelle V_c entre la tension V_s du départ de la ligne de transmission et la tension V_r de l'arrivée. En variant la tension additionnelle V_c en module, il est possible de varier dans une certaine mesure la tension V_s en module. Ainsi, on peut modifier statiquement les puissances active et réactive transmises par la ligne de transmission.

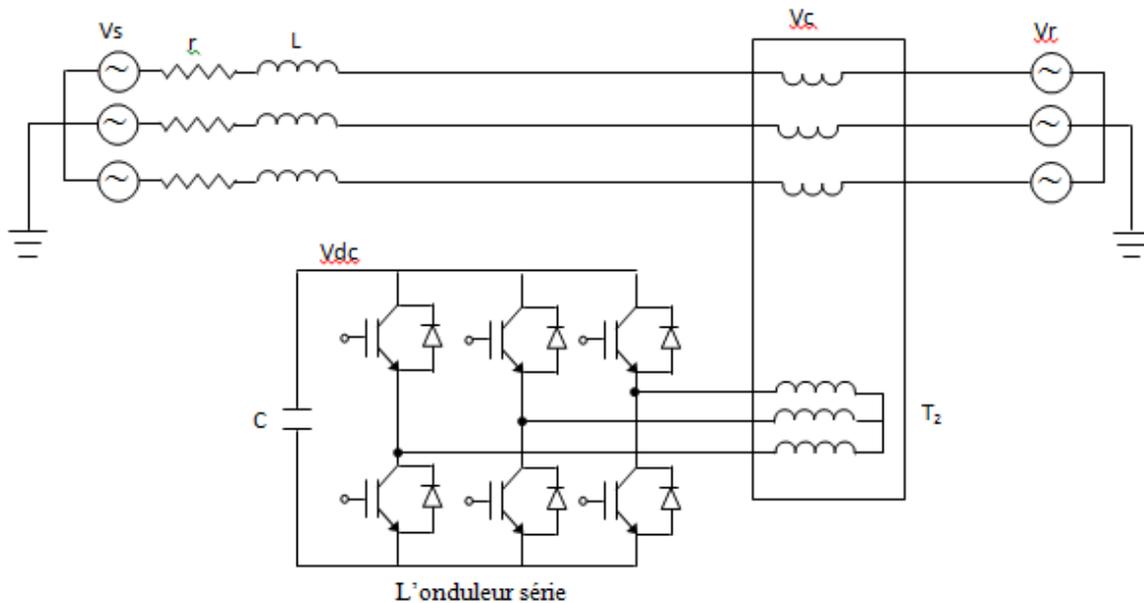


Figure II.23 : Compensateur série

II.8.3 Les compensateurs séries et parallèles (UPFC) :

Ces compensateurs modifient le flux de puissance, active et réactive sur une ligne en changeant seulement son angle électrique de transport. Les dispositifs les plus courants sont les suivant :

- Transformateur déphaseur à thyristor PST (phase –shifting transformer).
- Déphaseur statique.

Il existe un nouveau dispositif des systèmes FACTS, appelé **UPFC** (Unified Power Flow Controller) ou variateur de charge universel. Ce système combine à la fois la fonctionnalité de compensateur parallèle et le compensateur série. Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive. Il peut donc contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport.

La configuration de l'UPFC est illustrée par la Figure II.24.

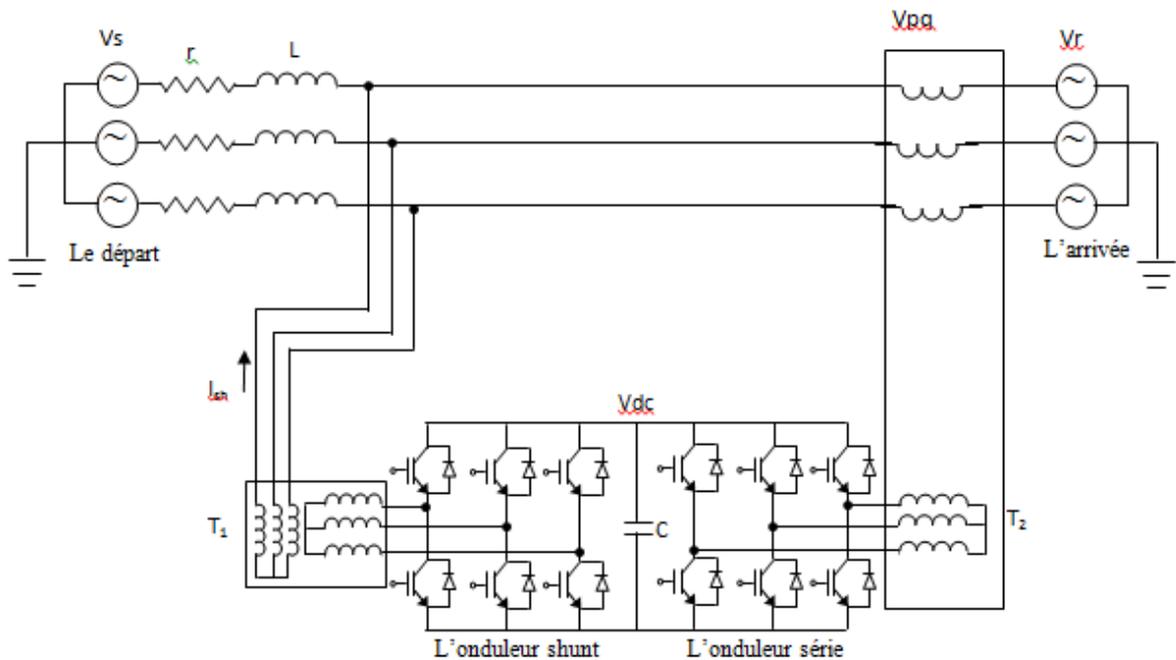


Figure II.24 : Configuration du système UPFC

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons vu l'objectif de l'analyse des méthodes de l'amélioration du facteur de puissance puis on a vu l'importance de contrôle de la tension et la compensation de la puissance réactive ainsi que leurs dispositifs.

Nous avons aussi présenté un aperçu global sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS comme le SVC et UPFC. Ces systèmes améliorent le transit de puissance dans les lignes et la stabilité du réseau. Grace à la grande rapidité de réaction des contrôler d'électronique constituant les FACTS, ces derniers sont caractérisés par une grande fiabilité.

L'UPFC est un compensateur qui est plus complet que les autres, en pratique elle utilisé pour la gestion de l'énergie dans les réseaux électriques.

Chapitre III

*Modèle mathématique de l'UPFC et
système de réglage*

III.1 Introduction : [17] [18]

Après avoir étudié dans le deuxième chapitre les différents systèmes FACTS existants, nous abordons dans ce chapitre, le fonctionnement, la mise en modèle mathématique du système UPFC (Unified Power Flow Controller) et les différents réglages. La modélisation nous permet de la présentation et la simplification des équations afin d'aborder le contrôle de notre système dans le repère de PARK (dq).

III.2 Structure du l'UPFC : [19]

L'UPFC est constitué de deux transformateurs T1 et T2 utilisés pour assurer une isolation galvanique et ajuster les niveaux de tension dans le système d'alimentation. Il est composé de deux onduleurs à commande MLI (Modulation de Largeur d'impulsion), [cas de notre étude] qui sont connectés à travers un circuit continu commun. L'un est connecté en parallèle et l'autre en série avec la ligne de transmission, comme illustré par la figure III.1.

On suppose que chaque onduleur est constitué de six thyristors (GTO : Gate-Turn- Off) avec des diodes antiparallèles correspondantes.

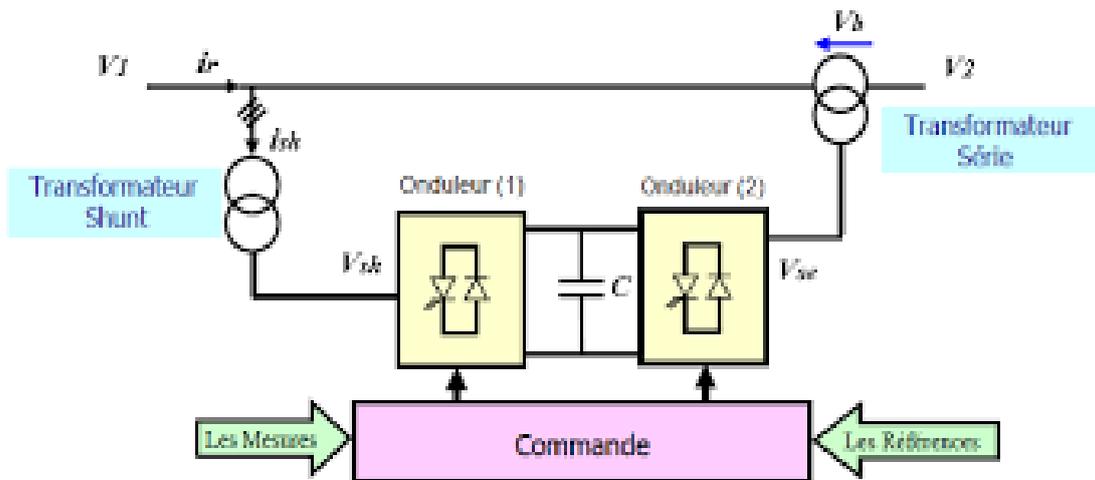


Figure III.1 : Circuit équivalent de l'UPFC

III.3 Principe de fonctionnement du système UPFC : [19] [20]

L'UPFC est connecté dans un système de transmission simplifié comme le montre la figure passée. Il est installé à l'arrivée de la ligne de transmission à laquelle il est connecté par l'intermédiaire des deux transformateurs T1 et T2., les tensions Vs et Vr représentent respectivement les sources de tension sinusoïdales triphasées du départ et d'arrivée de la ligne de transmission. L'UPFC est composé de deux onduleurs à commande MLI (PWM) placés

dos-à-dos et connectés à un condensateur C. L'onduleur série fournit la tension de compensation V_c à travers le transformateur série T2, tandis que l'onduleur shunt ou parallèle fournit ou absorbe de la puissance réactive ainsi que la puissance active demandée par l'onduleur série et règle la tension continue V_{dc} au niveau du condensateur. Les puissances active et réactive sont générées / absorbées indépendamment par chaque onduleur.

III.4 Modélisation du système UPFC :

Nous commençons la modélisation par la présentation et la simplification des équations mathématiques de notre système dans le repère triphasé ABC et dans le repère de PARK (d-q)

Le circuit simplifié de l'UPFC est représenté sur la figure III.2. La modélisation de ce circuit est basée sur les hypothèses suivantes [21] :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéaux.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Toutes les chutes de tension à travers la ligne sont représentées par la résistance r .
- L'inductance de la ligne est représentée par l'inductance L .
- Le transformateur parallèle est représenté par la résistance r_p et l'inductance L_p .
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de la fermeture des interrupteurs sont négligées.

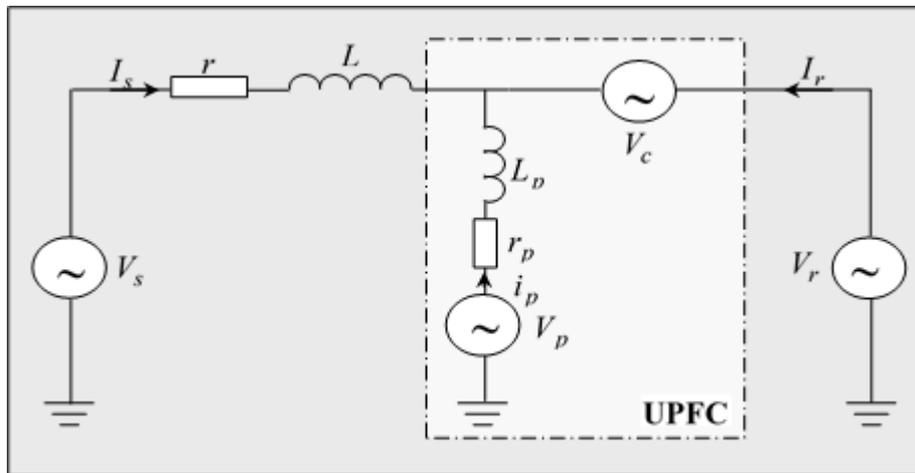


Figure III.2 : Circuit équivalent de l'UPFC

Les équations dynamiques de l'UPFC sont divisées en trois systèmes d'équations : les équations de la branche série, les équations de la branche parallèle et celles du circuit de courant continu.

En appliquant les lois de KIRCHOFF on aura les équations suivantes de chaque branche :

III.4.1 Modélisation de la branche série (UPFC série) :

On suppose que les onduleurs séries et shunt sont des sources de tension contrôlables idéales. Donc, à partir de la figure III.1.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le système UPFC série de la figure III.2, on aura les équations suivantes :

On peut écrire pour les trois phases :

$$\begin{aligned}\frac{di_{sa}}{dt} &= -\frac{r}{L}i_{sa} + \frac{1}{L}(v_{sa} - v_{ca} - v_{ra}) \\ \frac{di_{sb}}{dt} &= -\frac{r}{L}i_{sb} + \frac{1}{L}(v_{sb} - v_{cb} - v_{rb}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} &= -\frac{r}{L}i_{sc} + \frac{1}{L}(v_{sc} - v_{cc} - v_{rc})\end{aligned}\quad (\text{III.1})$$

Où i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} sont les courants de phase de la ligne de transmission, et r et L sont respectivement sa résistance et son inductance.

Pour simplifier les calculs, l'impédance du transformateur T2 a été négligée. L'onduleur série génère la tension de compensation V_c à l'arrivée de la ligne de transmission.

Le système d'équation III.1 peut être réécrit par l'expression III.2 :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + sL & 0 & 0 \\ 0 & r + sL & 0 \\ 0 & 0 & r + sL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ca} & + v_{ra} \\ v_{cb} & + v_{rb} \\ v_{cc} & + v_{rc} \end{bmatrix}\quad (\text{III.2})$$

Ou sous la forme matricielle :

$$[V_{Sabc}] = [r][i_s] + [L]s[i_s] + [V_{Cabc}] + [V_{rabc}]\quad (\text{III.3})$$

Dont V_{ca} , V_{cb} et V_{cc} sont les tensions de compensation série. En utilisant la représentation matricielle sur le système d'axes a, b et c. Le modèle mathématique de l'UPFC peut être décrit par le système d'équations suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L & 0 & 0 \\ 0 & -r/L & 0 \\ 0 & 0 & -r/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sa} & - v_{ca} & - v_{ra} \\ v_{sb} & - v_{cb} & - v_{rb} \\ v_{sc} & - v_{cc} & - v_{rc} \end{bmatrix}\quad (\text{III.4})$$

Les sources de tension V_p et V_s représentant respectivement les onduleurs shunt et série du système UPFC. La transformation de Park des courant triphasés i_{ra} , i_{rb} , et i_{rc} et des tensions

V_{ra} , V_{rb} , et V_{rc} est donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (III.5)$$

En appliquant la transformation de PARK sur les tensions de source V_s et V_r on aboutit au système d'équations suivant :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \omega i_{sq} - \frac{r}{L} i_{sd} + \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{cd} - V_{rd}) \quad (III.6)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega i_{sd} - \frac{r}{L} i_{sq} + \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{cq} - V_{rq}) \quad (III.7)$$

La forme matricielle de l'axe $d-q$ peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L & +\omega \\ -\omega & -r/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{sq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

Le schéma en blocs qui peut être adopté pour la simulation de la ligne de transmission avec la partie série du système UPFC selon le repère dq est donné par la figure III.3

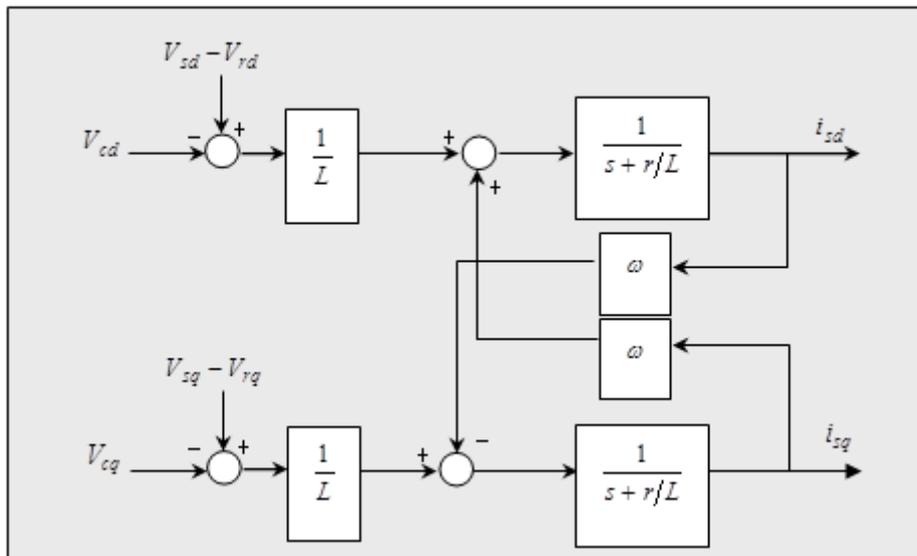


Figure III.3 : Modèle mathématique du système de l'UPFC série.

III.4.2 Modélisation de la partie shunt (UPFC shunt) :

Le modèle mathématique de l'UPFC shunt peut être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\frac{di_{pa}}{dt} &= -\frac{r_p}{L_p} i_{pa} + \frac{1}{L_p} (v_{pa} - v_{ca} - v_{ra}) \\ \frac{di_{pb}}{dt} &= -\frac{r_p}{L_p} i_{pb} + \frac{1}{L_p} (v_{pb} - v_{cb} - v_{rb}) \\ \frac{di_{pc}}{dt} &= -\frac{r_p}{L_p} i_{pc} + \frac{1}{L_p} (v_{pc} - v_{cc} - v_{rc})\end{aligned}\quad (III.9)$$

Où $i_{p,abc}$ sont les courants de l'UPFC shunt, V_p , $v_{p,abc}$ sont les tensions générées par l'onduleur 1, r_p et L_p sont respectivement la résistance et l'inductance de l'UPFC shunt.

$$\begin{bmatrix} V_{pa} \\ V_{pb} \\ V_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p + sL_p & 0 & 0 \\ 0 & r_p + sL_p & 0 \\ 0 & 0 & r_p + sL_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ca} + v_{ra} \\ v_{cb} + v_{rb} \\ v_{cc} + v_{rc} \end{bmatrix}\quad (III.10)$$

$$[V_{pabc}] = [r_p][i_p] + [L_p]s[i_p] + [V_{cabc}] + [V_{rabc}]\quad (III.11)$$

Dont i_{pa} , i_{pb} et i_{pc} représentant les courants shunt. V_{pa} , V_{pb} et V_{pc} : les tensions générées par l'onduleur shunt.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_p/L_p & 0 & 0 \\ 0 & -r_p/L_p & 0 \\ 0 & 0 & -r_p/L_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{pa} - v_{ca} - v_{ra} \\ v_{pb} - v_{cb} - v_{rb} \\ v_{pc} - v_{cc} - v_{rc} \end{bmatrix}\quad (III.12)$$

La représentation de l'UPFC shunt sur les axes d-q peut être dérivée en utilisant la même procédure que dans le cas de la branche série. Dans le repère dq, on obtient la transformation suivante :

$$\frac{di_{pd}}{dt} = \omega i_{pq} + \frac{r_p}{L_p} i_{pd} + \frac{1}{L_p} (V_{pd} - V_{cd} - V_{rd})\quad (III.13)$$

$$\frac{di_{pq}}{dt} = -\omega i_{pd} + \frac{r_p}{L_p} i_{pq} + \frac{1}{L_p} (V_{pq} - V_{cq} - V_{rq})\quad (III.14)$$

La forme matricielle est donnée comme suite :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_p/L_p & -\omega \\ -\omega & -r_p/L_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{pd} - v_{cd} - v_{rd} \\ v_{pq} - v_{cq} - v_{rq} \end{bmatrix}\quad (III.15)$$

Le schéma en bloc de l'UPFC shunt est donné par la figure III.4, ci -dessous :

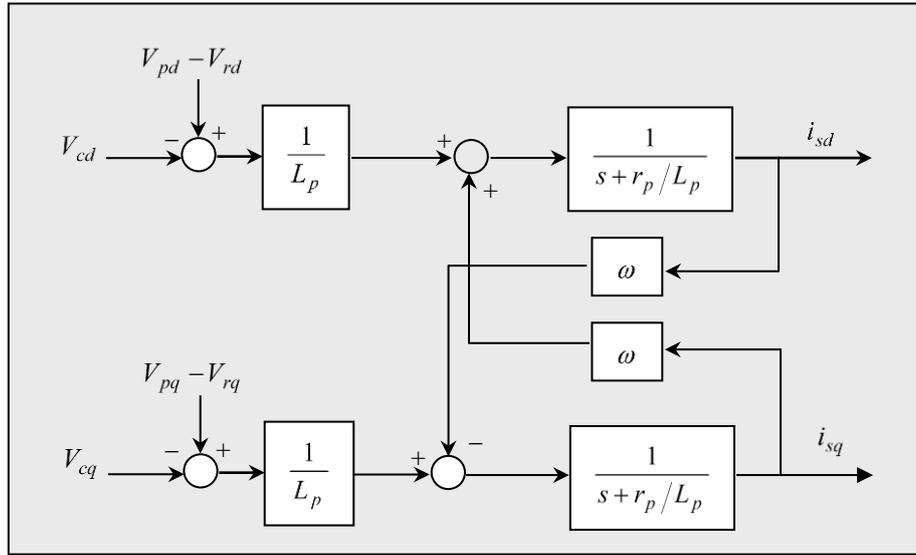


Figure III.4 : Modèle mathématique du système de l'UPFC parallèle.

III.4.3 Modalisation de la branche continue de l'UPFC :

En se basant sur le principe d'équilibre des puissances et en négligeant les pertes des convertisseurs, la tension continue V_{cd} est déduite de la figure III.4 et est décrite par l'équation III.16

$$\frac{1}{2} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{cv_{dc}} (p_e - p_{ep})$$

(III.16)

D'où

$$p_e = v_{ca}i_{sa} + v_{cb}i_{sb} + v_{cc}i_{sc} \tag{III.17}$$

$$p_{ep} = v_{pa}i_{pa} + v_{bp}i_{pb} + v_{pc}i_{pc} \tag{III.18}$$

Avec :

p_e : la puissance active absorbée du système AC

p_{ep} : la puissance active injectée par l'onduleur shunt en système AC

En appliquant la transformation de PARK équation III.5 sur l'équation III.16, on obtient :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2cv_{dc}} (v_{pd}i_{pd} + v_{pq}i_{pq} - v_{cd}i_{rd} - v_{cq}i_{rq}) \tag{III.19}$$

L'UPFC série et L'UPFC shunt sont identiques à tout point de vue. Les commandes utilisées pour l'onduleur série sont aussi les mêmes pour l'onduleur shunt.

III.5 Généralité sur les convertisseurs :

Nous nous intéressons à l'intégration des structures d'électronique de puissance, mariant ainsi la conversion d'énergie avec l'électronique. En outre, l'utilisation de structures essentiellement d'électronique de puissance dans des systèmes embarqués du fait de leur faible encombrement et de leur légèreté, se doit d'être réalisée de façon à satisfaire un critère primordial, à savoir le rendement de conversion. Les sources d'énergie actuelles devenant de plus en plus coûteuses, les structures de conversion d'énergie se doivent de ne pas les gaspiller inutilement.

L'ensemble des éléments constituant la structure d'électronique de puissance, peut être séparé en trois types distincts : les composants actifs, à savoir les semi-conducteurs, et les composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs), mais également sur leur environnement.

Dans cette partie on s'intéresse au convertisseur DC-AC, ou on va parler beaucoup plus sur le fonctionnement de l'onduleur monophasé ainsi que les différentes techniques de contrôles existants.

III.5.1 Convertisseur Continu-Alternatif (DC- AC) :

Un convertisseur continu-alternatif Figure III.5 est nommé un onduleur c'est un dispositif d'électronique de puissance qui permet la conversion d'énergie électrique continu (DC) à la forme alternative (AC) afin d'alimenter des charges en courant alternatif. Cet échange d'énergie est basé sur des composants semi-conducteurs commandés rapidement et robustes.

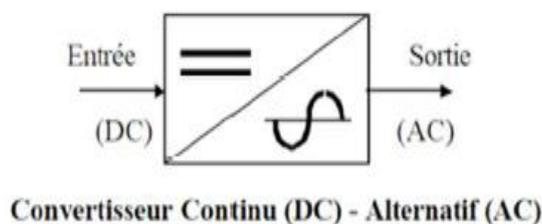


Figure III.5 : Schéma symbolique d'un onduleur

Les onduleurs sont utilisés afin de :

- Fournir de la tension ou du courant alternatif de fréquence et d'amplitude variable. C'est le cas de la variation de vitesse des moteurs asynchrones.
- Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. C'est le cas des alimentations de sécurité, ils sont alimentés souvent par des batteries.

III.5.2 Classification des onduleurs :

Il existe plusieurs classifications des onduleurs.

a. Selon la réversibilité :

- Onduleur autonome (non raccordé au réseau électrique).
- Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux) .

b. Selon la nature de l'alimentation :

- Onduleur de tension : On dit onduleur de tension, un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue voir Figure III.6.

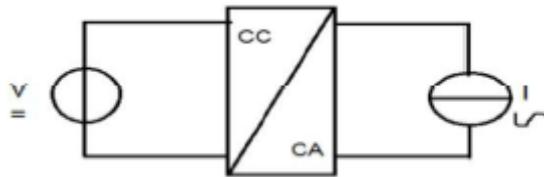


Figure III.6 : Onduleur de tension

La nature de la source continue impose la nature du récepteur alternatif. Puisque la plupart de nos applications électriques actuelles fonctionnent en courant alternatif, l'utilisation d'un onduleur de tension est alors nécessaire.

- Onduleur de courant : C'est un onduleur qui est alimenté par une source de courant continue. Par contre dans cet onduleur le courant est imposé et la tension va dépendre de la charge voire Figure III.7.

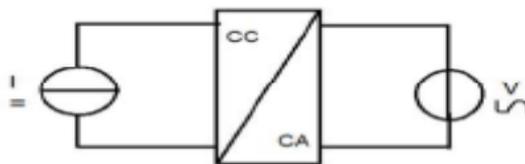


Figure III.7 : Onduleur de courant

c. Selon la nature de la charge :

- Onduleur monophasé : C'est un onduleur qui délivre en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement utilisée aux alimentations de secours.
- Onduleur triphasé : Comme pour les onduleurs monophasés, les onduleurs triphasés peuvent posséder plus d'interrupteurs afin d'être plus précis sur la tension réalisée, mais aussi diminuer les harmoniques. Le désavantage majeur des MMC est leur coût, surtout dans le cas d'une production à grande échelle. En effet, si l'objectif est de produire de véhicules électriques (par exemple), il y a un onduleur par véhicule.

Alors on comprend aisément que rajouter des IGBT (même si leur coût individuel est faible) peut coûter très cher tant pour l'industriel que pour l'utilisateur. Les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension de la source continue ne soit jamais en court-circuit et pour que les circuits des courants, et ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent donner trois tensions de sorties.

III.5.3 Commande d'un onduleur :

Les onduleurs se pilotent via une commande fortement non linéaire. Cette non linéarité est due à la structure des onduleurs composés d'IGBT qui ne se pilotent qu'en tout ou rien. Par conséquent il est nécessaire que la commande soit elle aussi en tout ou rien. La commande la plus classique des interrupteurs des onduleurs se fait par comparaison entre deux signaux. En effet cela force la commande à être binaire (soit 0 soit 1). Les signaux en question se nomment modulante et porteuse. La modulante étant classiquement, la tension de référence divisée par la tension de bus et la porteuse est un signal triangulaire compris entre 0 et 1.

La commande est alors générée ainsi : Si la modulante est plus grande que la porteuse alors la commande de l'interrupteur prend 1 et 0 sinon. Il est important de savoir que la modulante définie précédemment n'est pas le seul possible, et qu'il en existe un nombre très important.

La comparaison entre une modulante et une porteuse n'est pas la seule possibilité. Il existe, entre autres la SVM (ou vecteur de modulation spatial en français), qui constitue le Gold standard en industrie, par sa facilité d'implémentation, ses avantages harmoniques ainsi que de l'extension de sa zone de linéarité de 15% 12, par rapport à la MLI classique décrite ci-dessus.

Le principe de commande d'un onduleur est présenté sur la figure III.8, qui est valable pour un bras de commutation.

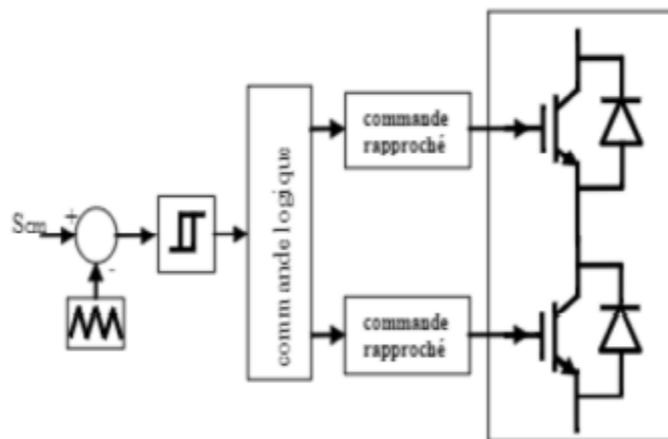


Figure III.8 : le principe de commande du bras d'onduleur.

De nombreuses techniques de commande ont été développées au fil du temps, leurs différences, avantages et inconvénient résident dans ces quelques points :

- Facilité d'implémentation ;
- Augmentation de la zone de linéarité
- Réduction des harmoniques indésirables
- Augmentation du rendement.
- Diminution du bruit acoustique.

L'objectif de la commande est de gérer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

III.5.4 La commande d'un onduleur triphasé :

III.5.4.1 Commande 180°:

Dans la commande 180° chaque interrupteur est commandé pour une durée de demi-période. La fermeture d'un interrupteur coïncide avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras [22]. La commande des interrupteurs de deux bras différents est décalée de $2\pi/3$.

III.5.4.2 Modulation de largeur d'impulsions ou (MLI) :

Cette technique est applicable pour l'onduleur monophasé et triphasé. Elle est déduite de la comparaison entre le signal variable $SVAR$ (sinusoïdal d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie) et de porteuse S_p (triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée). L'utilisation de cette commande permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Il faut noter que cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant. Le résultat est un chronogramme de commande.

Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence).

III.6 Domaine d'application des onduleurs :

L'onduleur est l'un des montages les plus répandus de l'électronique de puissance ; il a de multiples applications :

- les alimentations de secours.
- les alimentations sans interruption.
- le raccord des panneaux solaires au réseau électrique.

Les nombreux dispositifs nécessitant de fonctionner à une fréquence spécifique :

- Les générateurs d'ultrasons ou d'électricité utilisés dans le domaine médical,
- L'alimentation des lampes dites à cathode froide pour le rétro-éclairage des afficheurs à cristaux liquides,
- Les variateurs de vitesse des machines alternatives : la tension du réseau est redressée puis un onduleur fabrique une tension dont la fréquence et la forme sont réglables ;
- Les convertisseurs de tension continue/continue à découpage : la tension continue est d'abord ondulée en haute fréquence (quelques dizaines ou centaines de kHz) puis appliquée à un transformateur en ferrite et enfin redressée ;
- Dans le domaine de la soudure à l'arc les onduleurs sont parfois appelés inverters, suivant la terminologie anglo-saxonne. Les onduleurs dans les postes à l'arc vont générer un courant alternatif monophasé à moyenne fréquence (entre 5 et 20 kHz), ce qui permet d'utiliser des transformateurs élévateurs de courant nettement plus petits et légers que ceux employés traditionnellement à la fréquence du réseau, soit 50 ou 60 Hz. Ces machines se caractérisent par un rapport poids / puissance faible, un déphasage (cosinus phi) très faible et une bonne adéquation en milieu hostile (conditions de chantier, alimentation fluctuante par groupe électrogène, basses ou hautes températures, etc.) ;
- Dans le domaine de la réception hertzienne nomade TV grand public, les onduleurs (12 V > 230 V) permettent, par exemple, de brancher un téléviseur sur la prise allume-cigare d'une automobile ou d'un camion ;
- Dans le domaine des véhicules électriques et hybrides, l'onduleur permet de transformer la tension de batterie continue en tension sinusoïdale, admissible par les machines synchrones et asynchrones.

III.7 Modélisation du convertisseur statique :

Pour compléter notre étude il a été nécessaire de faire la simulation d'un onduleur triphasé dans ce cas précis un convertisseur MLI triphasés à deux niveaux.

III.7.1 Modèle de l'onduleur :

La Figure III.9 donne le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé qui est placé entre une source de tension triphasée parfaite, donc de tension constante et une charge triphasée équilibrée parcourue par des courants i_a , i_b et i_c formant un système triphasé sinusoïdale équilibré.

L'onduleur est un assemblage de trois ponts monophasés formés chacun de deux interrupteurs en série (K_1 et K_1' , K_2 et K_2' , K_3 et K_3'). Les interrupteurs d'un même demi-pont doivent être complémentaires pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit, et pour que les circuits des courants i_a , i_b et i_c ne sont jamais ouverts. Pour que les six interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quels que soient les courants i_a , i_b et i_c . Il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et fermeture commandées.

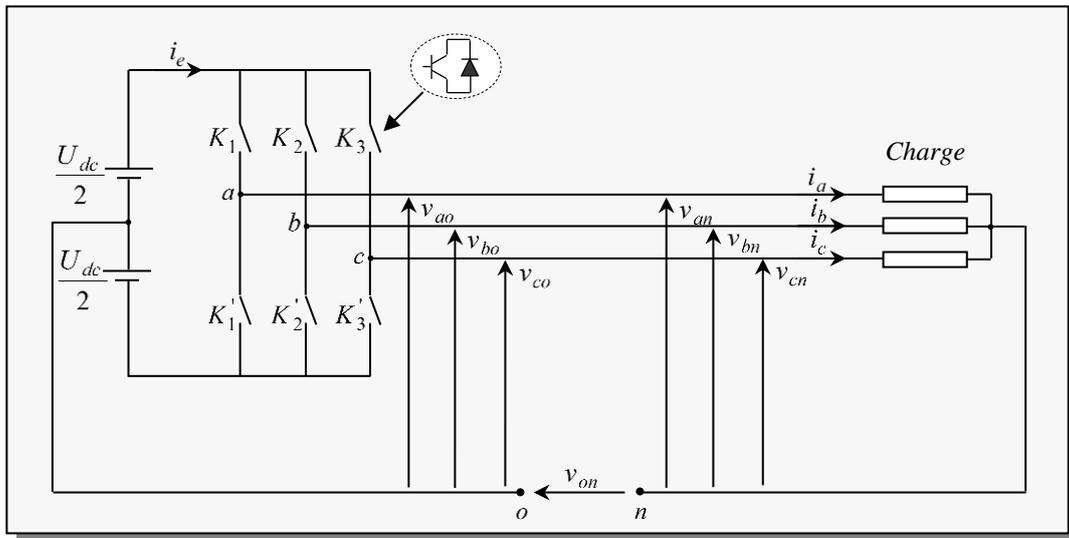


Figure III.9 : Schéma de principe de l'onduleur à MLI

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire, (selon la figure III.9 :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (III.20)$$

En faisant la somme des équations du système (III.20), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (III.21)$$

$$\text{D'où :} \quad v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (III.22)$$

$$\text{Donc :} \quad v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (III.23)$$

En substituant l'équation III.23 dans le système III.20, il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

Les deux interrupteurs de chaque branche de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire, en appliquant une modulation de largeur d'impulsion.

À partir du schéma de l'onduleur, les tensions fournies par les demis-ponts sont :

$$v_i - v_o = \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K_i : \text{fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K'_i : \text{fermé} \end{cases} \quad \text{avec : } i = a, b, c \quad (III.25)$$

Les tensions délivrées sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.26)$$

Avec S_i est l'état de l'interrupteur K_i , supposé parfait, tel que pour le $i^{ème}$ bras de l'onduleur ($i = a, b, c$) :

- $S_i = 1$ si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert ;
- $S_i = 0$ si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé ;

Le courant d'entrée de l'onduleur est donné par :

$$i_e = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (III.27)$$

La Figure III.10 représente le modèle Simulink de l'onduleur de tension à deux niveaux

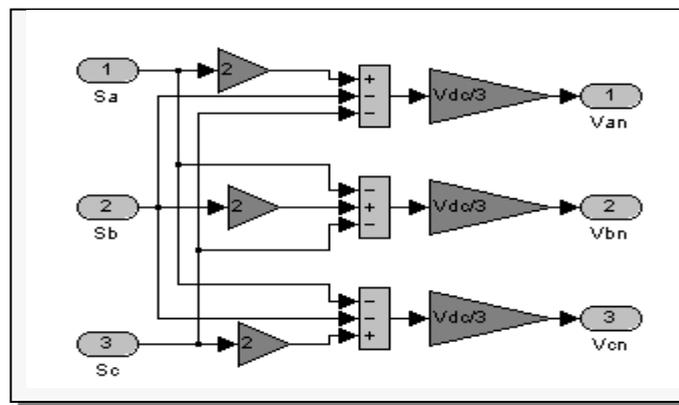


Figure III.10 : Modèle sous SIMULINK de l'onduleur de tension à deux niveaux.

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur.

III.7.2 La commande MLI sinus triangle :

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal triangulaire, et en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de l'onduleur ; le mode de fonctionnement est très simple :

- Si $v_{ref} > v_p$: l'interrupteur supérieur du bras de pont conduit ;
- Si $v_{ref} < v_p$: l'interrupteur inférieur du bras de pont conduit ;

Où v_{ref} représente une des trois tensions de référence, et v_p représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse.

Ce type de commande est appelé *commande par modulation de largeur d'impulsion* où *commande MLI (PWM en anglais)*. Cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur. La détermination des instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel, par une électronique de commande analogique ou numérique ou parfois hybride. La figure III.11 illustre le principe de base de cette technique.

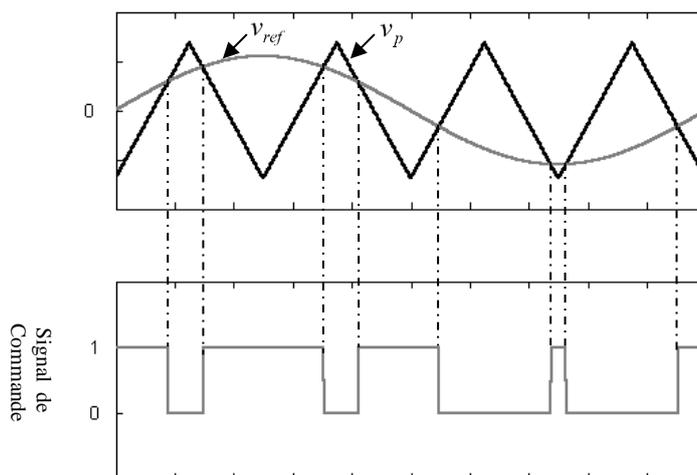


Figure III.11 : Principe de la commande MLI sinus-triangle.

III.7.3 Caractéristiques de la MLI sinus triangle :

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande : l'indice de modulation m et le taux de modulation r .

➤ *Indice de modulation*

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{III.28})$$

Où f_r est la fréquence de la tension de référence et f_p est celle de la porteuse.

➤ *Taux de modulation*

$$r_m = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{III.29})$$

Où V_r est l'amplitude de la tension de référence et V_p est celle de la porteuse.

III.7.4 Modélisation de la commande MLI sinus triangle :

➤ *Équation de la porteuse*

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p . On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par :

$$\begin{cases} v_p = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

➤ *Équations des tensions de référence*

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} v_{ref_a} = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{ref_b} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{ref_c} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

➤ *Équations des états des interrupteurs*

La commande à MLI sinus triangle utilise la comparaison avec les trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation (III.31) suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{ref_i} - v_p) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{ref_i} - v_p) < 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c \quad (\text{III.32})$$

III.7.5 Simulation de la commande MLI sinus triangle :

La figure III.12 représente le modèle en Simulink de la commande MLI sinus triangle et la figure III.13 montre la simulation des états S_a , S_b , S_c des interrupteurs de l'onduleur ainsi que des tensions de sortie v_{an} , v_{bn} , v_{cn} et leurs spectres quand les tensions d'entrées sont triphasées sinusoïdales de fréquence 50 Hz et d'amplitude 220V.

Dans la simulation on a pris $r=0.8$, $m=6$ et $m=18$ et $V_{dc}=280$ V.

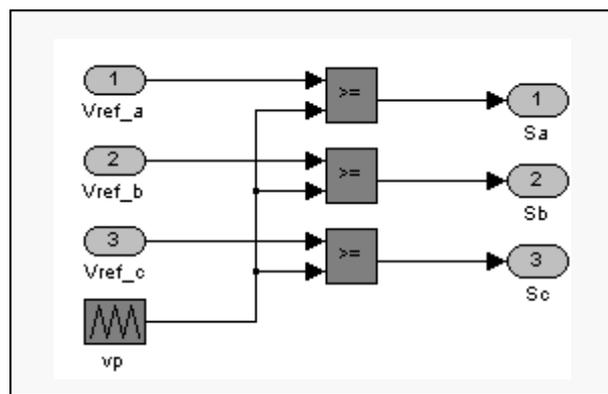


Figure III.12 : Modèle sous SIMULINK

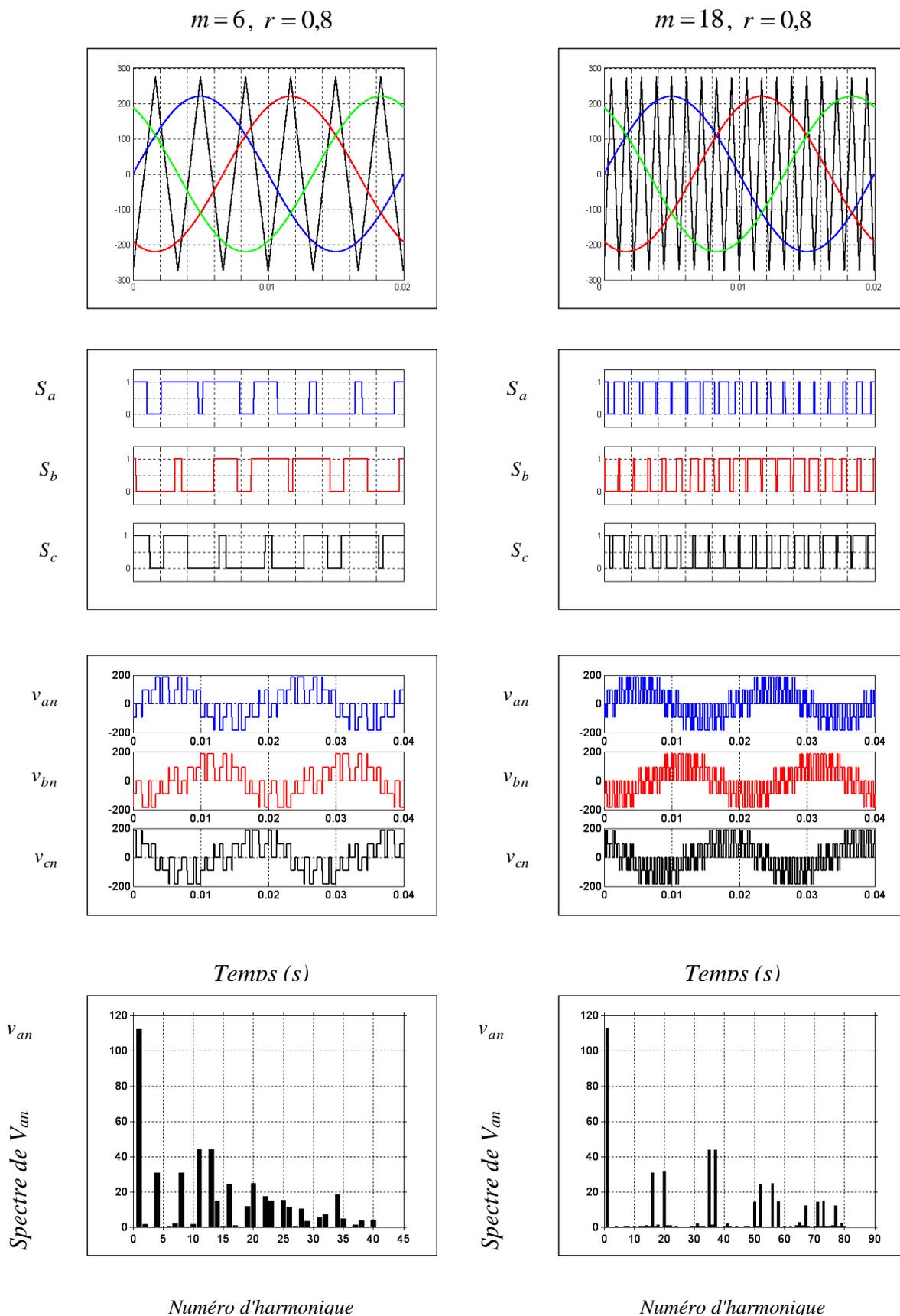


Figure III.13 : Principe de la commande MLI sinus-triangle et enveloppes de tension.

III.8 Réglage du système UPFC : [23] [24]

Le système de commande de l'UPFC se compose de l'onduleur parallèle avec le circuit de réglage, ainsi que de l'onduleur série. D'abord, on justifiera la possibilité de séparation les deux circuits de réglage et de même nous nous sommes intéressés au réglage de l'onduleur pour la tension additionnelle et plus particulièrement au réglage de la puissance active et réactive transmise.

Ensuite on développera les différents réglages. Considérés dans cette étude et on montrera le comportement transitoire des circuits de réglage à l'aide d'une simulation des régulateurs considérés dans le réglage du système UPFC en boucle fermée afin d'améliorer les performances dans le cas de changement de puissance active ou réactive, (changement de l'un des trois paramètres de la ligne).

Les types de commande présentés sont évalués à savoir :

- Commande Proportionnel-Intégral (PI – Découplé) ;
- Commande PI à gain variable (VGPI)

III.8.1 Configuration du circuit de réglage :

Théoriquement, l'UPFC devrait être traité comme un système multi variables car les deux convertisseurs série et parallèle sont connectés d'un côté à la ligne de transmission et l'autre côté au circuit continu DC et donc comportent chacun deux sorties. Cependant, pour faciliter la synthèse des réglages, le traitement des deux convertisseurs se fera séparément. La possibilité de cette séparation est justifiée par deux facteurs principaux. Premièrement, le couplage entre les deux convertisseurs sur la ligne de transmission est assez faible [25]. Deuxièmement, la variation dynamique de la tension du côté du continu DC est dominé 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 [26]. Donc pour contrôler le flux de puissance active dans la ligne de transmission, le régulateur de l'UPFC série doit ajuster l'angle de la phase de la tension de compensation (V_s) tandis que pour régler le flux de puissance réactive, l'amplitude de la tension injectée série doit être contrôlé. Pour assurer la stabilité du système, une chaîne de contrôle est implémentée avec le contrôleur PI (le cas général) pour :

Illustre le mode choisi pour la branche série ainsi que pour la branche shunt. L'idée du schéma de contrôle Figure III.14 se déduit du système d'équations III.8 et III.15.

Les entrées sont les composantes d-q des tensions à la sortie des branches série ou shunt et les sorties sont les composantes d-q des courants de ligne de transport I_d et I_q .

Les références des courants de ligne sont dérivées des références de puissance active et

réactive et les tensions de bus infini AC mesurés.

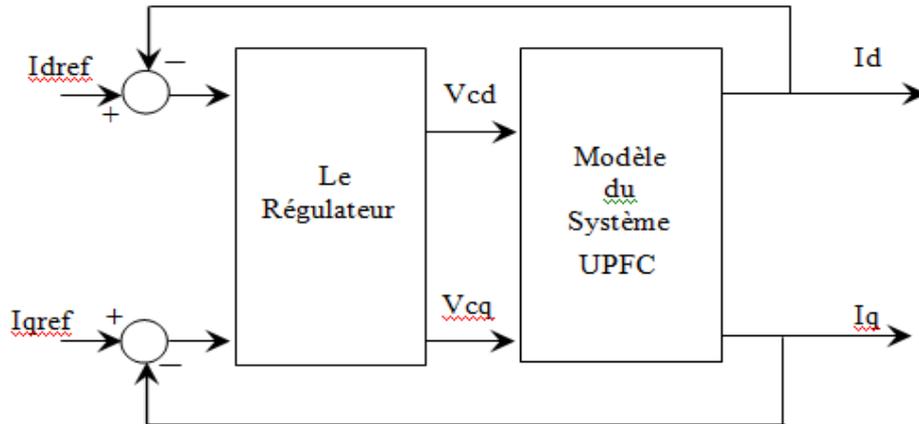


Figure III.14 : Schéma de PI rôle de l'UPFC

Pour assurer la stabilité du système, une chaîne de contrôle est implémentée avec le contrôle PI.

- Contrôle de la branche série.
- Contrôle de la branche parallèle et la partie continue.

III.8.2 Description du système de commande de l'UPFC série :

Les puissances actives et réactives P et Q (générées(s) et absorbées(r)) sont donnés par les équations III.33 et III.34.

$$P_{s,r} = \frac{3}{2} (v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (\text{III.33})$$

$$Q_{s,r} = \frac{3}{2} (v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq}) \quad (\text{III.34})$$

Où

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd} \quad (\text{III.35})$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq} \quad (\text{III.36})$$

Les puissances de référence active et réactive P^* et Q^* des puissances réelles désirées P et Q sont utilisées comme entrée au système de commande de l'UPFC. A partir des équations (III.33) et (III.34), les courants de référence i_{sd}^* et i_{sq}^* peuvent être calculés comme suit :

$$i_{d}^* = \frac{2}{3} \left(\frac{p^* v_{sd} - Q^* v_{sq}}{\Delta} \right) \quad (\text{III.37})$$

$$i_{q}^* = \frac{2}{3} \left(\frac{p^* v_{sq} - Q^* v_{sd}}{\Delta} \right) \quad (\text{III.38})$$

Où

$$\Delta = v_{sd}^2 + v_{sq}^2 \quad (\text{III.39})$$

III.9 Les schémas de contrôle du système UPFC :

III.9.1 Schéma de contrôle de la branche série :

Les courants de référence I_{rdref} et I_{rqref} sont calculés suivant les équations III.37 et III.38. Ces valeurs de référence I_{rdref} et I_{rqref} sont ensuite comparées aux courants de ligne réels du récepteur. Les sorties des correcteurs PI en courants fournissent les valeurs des tensions de commandes V_{cd} et V_{cq} figure III.15.

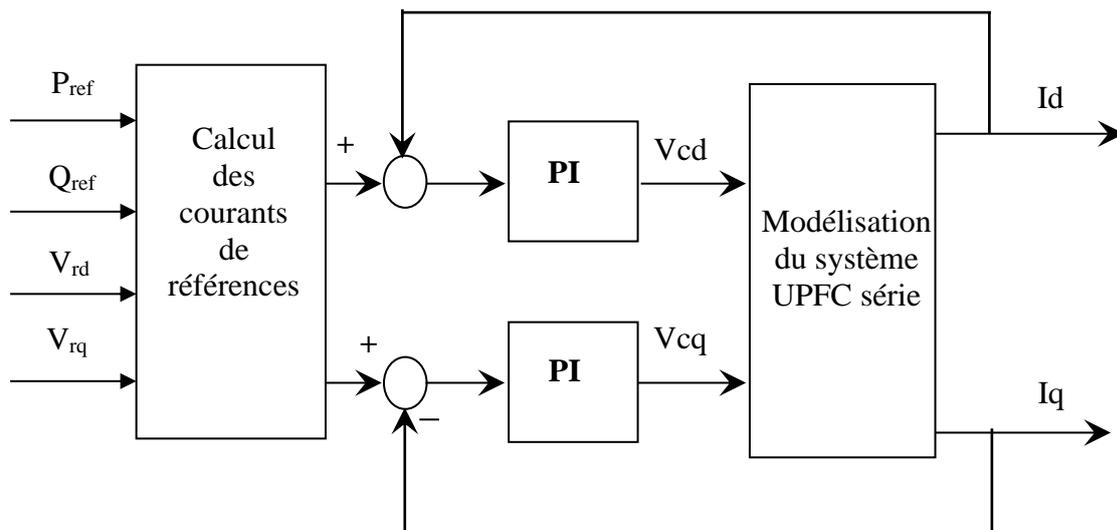


Figure III.15 : Schéma de contrôle de la branche série de l'UPFC

III.9.2 Le schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC

Le schéma de contrôle de l'UPFC shunt détermine les courants shunts I_{pd} et I_{pq} . Les courants de référence de la branche shunt sont déterminés à partir des puissances de référence et les tensions mesurées du côté du réseau. Le schéma de contrôle de l'UPFC shunt est présenté sur la figure III.16. Dans le contrôleur shunt la tension continue DC est utilisée pour déterminer la composante des pertes de puissance P_{loss} .

Les pertes de puissance P_{loss} et la référence de puissance de côté du récepteur P_{ref} ensemble avec la référence de puissance réactive du côté du réseau Q_{ref} sont utilisées pour calculer les courants du côté du réseau I_{sdref} et I_{sqref} . Les courants de référence de l'UPFC shunt I_{pdref} et I_{pqref} sont alors déterminés par les courants de référence du côté du récepteur en arrangeant les équations III.37 et III.38. L'erreur entre le courant de référence I_{ref} et le courant I_p et ensuite utilisé par deux contrôleurs PI pour produire les signaux V_{pd} et V_{pq} .

En utilisant ces signaux de référence pour l'onduleur shunt, il est possible de contrôler le courant I_p .

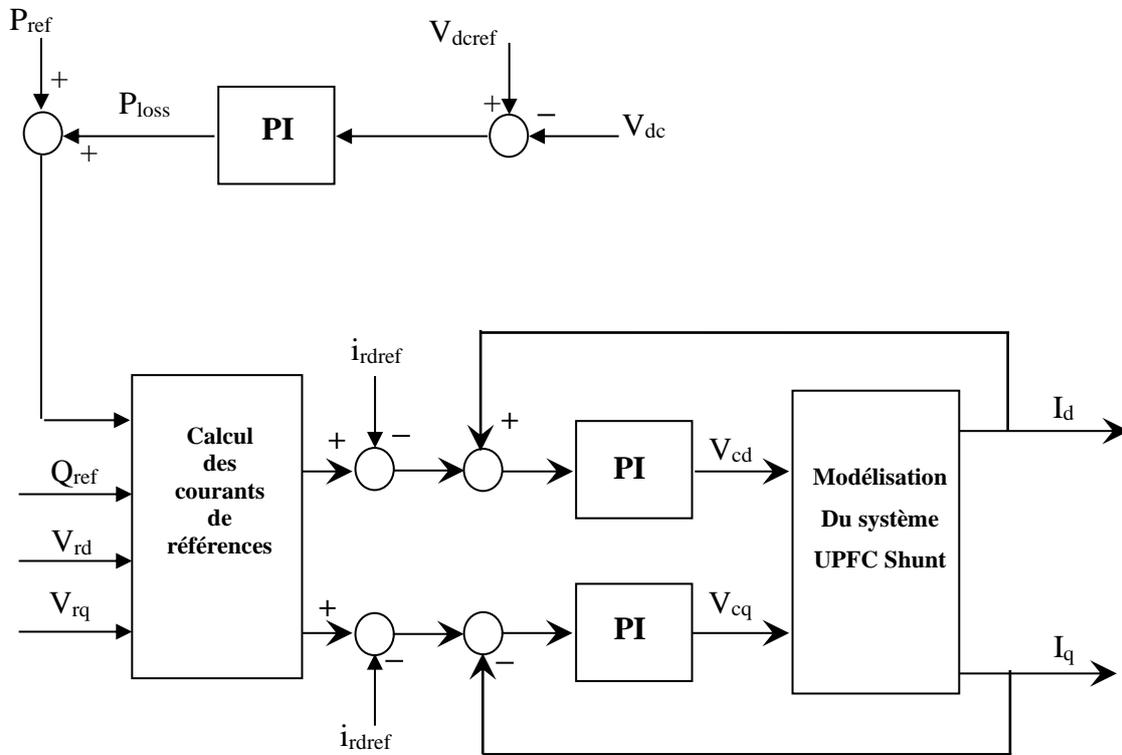


Figure III.16 : Schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC.

III.9.3 Les schémas de contrôle avec régulateur PI-Découplé :

D'après le système d'équation III.8 ou III.15, on peut voir que le système contient un couplage entre les courants actifs I_d et réactif I_q . L'interaction entre les boucles de courant est causée par le terme $(\omega \cdot i)$. Cela explique la déviation de la puissance réactive par rapport à la référence. Pour réduire l'interaction entre la puissance active et réactive, un découplage des deux boucles de courants est nécessaire. La fonction de découplage est de soustraire le produit de ωL et I_q du contrôleur selon l'axe d et d'ajouter le produit de terme ωL et I_d au contrôleur selon l'axe q.

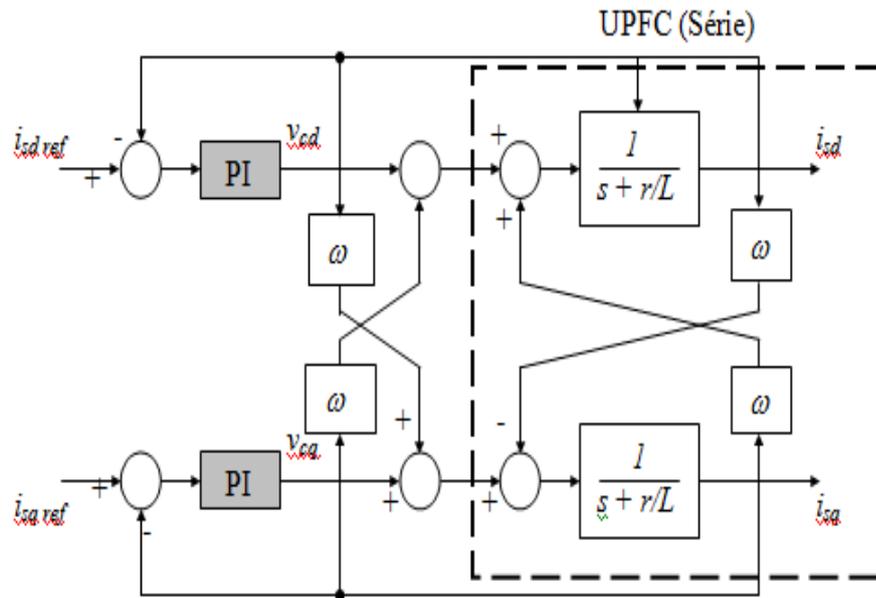


Figure III.17 : Commande PI-Découplé de l'UPFC série

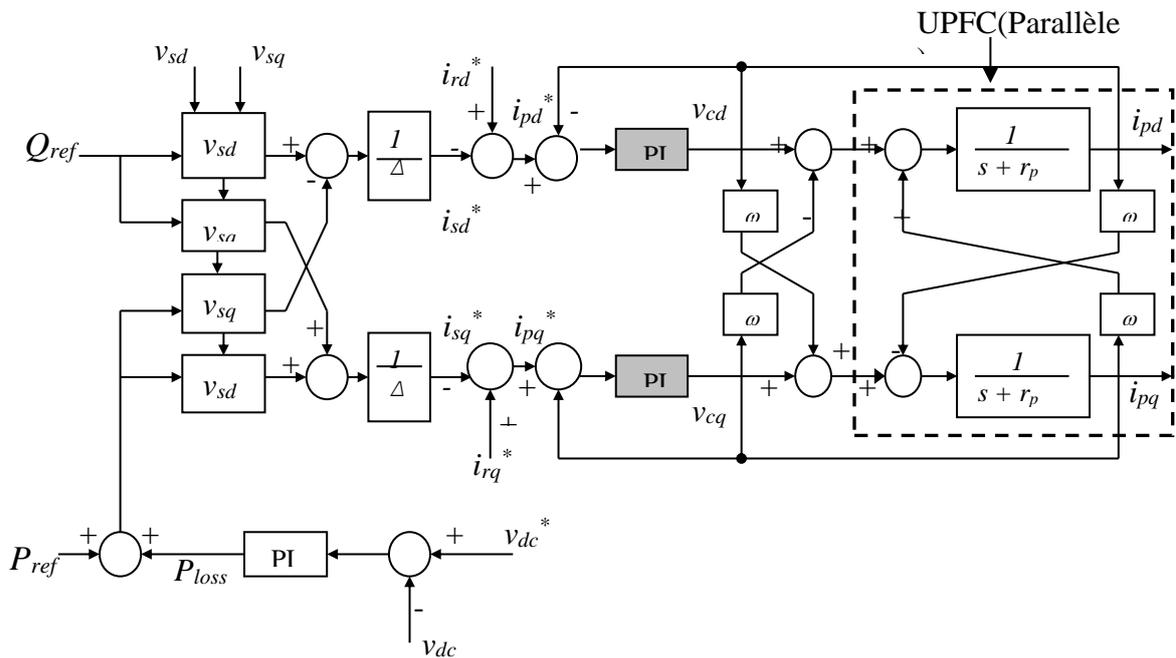


Figure III.18 : Commande PI-Découplé de l'UPFC shunt

III.10 Commande par régulateur proportionnel intégral découplé (PI-D) :

Les figures III.17 et III.18 représentent la commande de l'UPFC série et shunt respectivement, G_s est la fonction de transfert de la ligne de transmission déterminée par :

$$G(s) = 1/(s + r/l) \quad (III.40)$$

Remarque :

On traitera seulement le cas du système UPFC série, car la partie de l'UPFC shunt est identique vue que la tension du point de départ (sending end) V_s est égale à la tension du point d'arrivée (receiving end) V_r , les réponses des puissances actives et réactives dans chacun des deux points sont identiques, cette remarque sera valable pour toutes les commandes traitées dans ce travail.

Les courants i_{sd} et i_{sq} sont comparés à la sortie du système à leurs valeurs de référence et l'erreur ainsi obtenu passe à travers les deux régulateurs PI. Les tensions de commande V_{cd} et V_{cq} sont relevées à la sortie des régulateurs PI, par la transformation inverse de Park donnée par l'équation III.35, on détermine les tensions triphasées V_{ca} , V_{cb} et V_{cc} des tensions de commande V_{cd} et V_{cq} , ces tensions de commande triphasées (V_{ca} , V_{cb} et V_{cc}) sont ensuite utilisées comme entrées de référence de l'onduleur MLL série.

$$\begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \cos(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (III.41)$$

L'interaction entre les boucles de courants (i_d et i_q) est causée par le terme découplage $\omega \cdot l$; des équations III.40 et III.41 pour découpler ces deux boucles, le terme ω est retranché à travers une contre- réaction comme l'indiquent les figures III.17 et III.18, donc le modèle de l'UPFC série (ces résultats sont identiques pour l'UPFC shunt) peut être réécrit sous la forme

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \omega \cdot (1 - \varepsilon) \cdot i_{sq} - \frac{r}{L} i_{sd} + \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{cd} - V_{rd}) \quad (III.42)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega \cdot (1 - \varepsilon) \cdot i_{sd} - \frac{r}{L} i_{sq} - \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{cq} - V_{rq}) \quad (III.43)$$

Le terme ε représente le paramètre de découplage. Par exemple quand $\varepsilon=1$ on obtient un découplage parfait, et quand $\varepsilon=0$, alors les équations III.42 et III.43 seront identiques aux équations III.13 et III.14 et III.15.

En pratique, ε est supérieur à 1, ce qui revient à dire que le paramètre de découplage est supérieur au paramètre de couplage et le système est sur-compensé.

Dans ce cas, les performances du système diminuent car le couplage réapparaît ce qui engendre un temps de réponse assez lent du système. Les auteurs pensent que ce cas est dû aux facteurs non linéaires du système.

III.10.1 Calcul des régulateurs PI :[27]

La structure du correcteur PI est représenté par le schéma bloc de la figure III.19 :

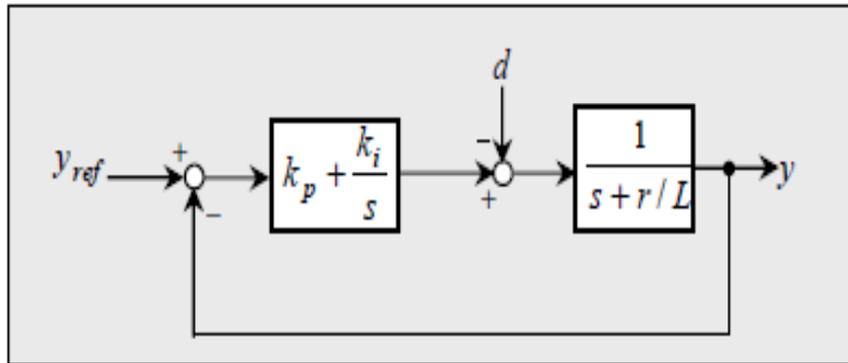


Figure III.19 : Structure de réglage de type PI

Il existe différentes techniques d'ajustements bien adaptés au régulateur PI. Il existe deux approches empiriques bien connues proposées par *Ziegler* et *Nichols*, pour la détermination des paramètres optimaux du régulateur PI.

La méthode de Ziegler-Nichols, utilisée dans ce mémoire, est basée sur un essai conduit en boucle fermée avec un simple régulateur proportionnel analogique. Le gain K_p de ce régulateur est graduellement augmenté jusqu'à la limite de stabilité, ce qui se manifeste par un régime permanent oscillatoire.

Sur la base des résultats ainsi obtenus, les paramètres du régulateur PI analogique sont donnés par la fonction de transfert suivante :

$$k(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (\text{III.44})$$

Par conséquent, l'introduction d'une condition simple $k_i = \left(\frac{r}{L} \right) \cdot k_p$

On obtient la fonction de transfert sous la forme $F(s) = \frac{k_p}{k_p} + s$

Qui est de premier ordre avec une constante de temps $T = \frac{1}{k_p}$

$$F(s) = \frac{1}{1+sT} \quad (\text{III.45})$$

$$\begin{cases} k_p = 2\xi \omega_N - a \\ k_i = \omega_N^2 \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

Dans cette section, nous allons effectuer des simulations de la régulation de l'UPFC, dont les paramètres de réglage sont donnés par le tableau suivant

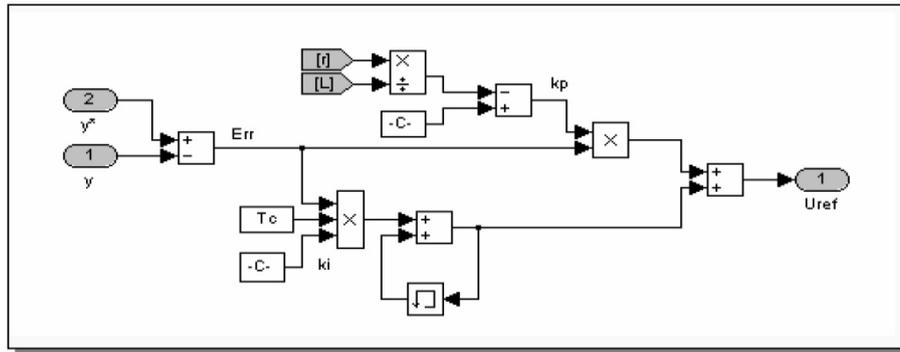


Figure III.20 : Régulateur PI implanté dans SIMULINK

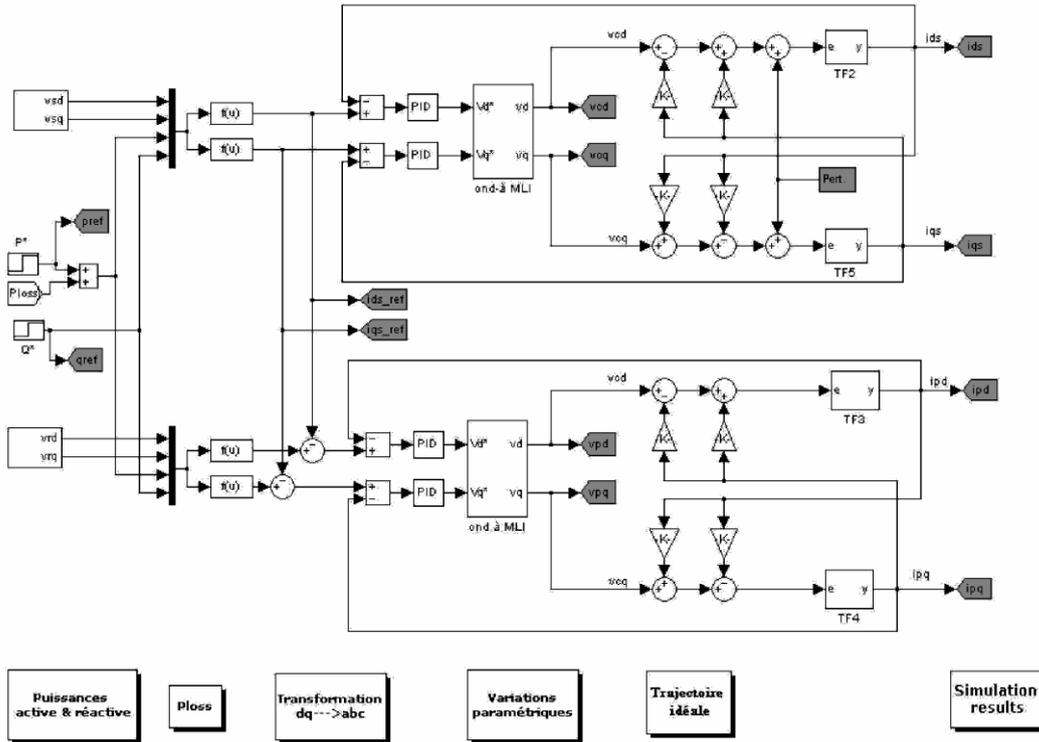


Figure III.21 : Schéma complet de réglage de l'UPFC implanté dans Simulink.

Ainsi, la détermination de la constante de temps dépend des changements admissibles maximaux des grandeurs de contrôle V_{cd} et V_{cq} pour le contrôleur série et de même pour le convertisseur shunt. Donc d'après la méthode de Ziegler- Nichols, le gain critique K_{pc} et la période T_c des oscillations sont mesurés d'après le choix du tableau comme suit :

$$k_p = 0,45k_{pc} \quad \text{et} \quad k_i = 0,83T_c$$

Comme on l'a montré à la figure III.22, l'onduleur shunt et l'onduleur série sont liés au circuit intermédiaire à tension continue. Ils travaillent donc avec la même tension continue V_{dc} . On rappelle que cette dernière est réglée par l'intermédiaire de l'onduleur shunt. Donc il est capable de fournir aussi bien de la puissance active à l'onduleur série que de la puissance réactive au système d'alimentation.

Le principe de ce dernier, est que la puissance active de la fin de la ligne de transmission (départ) doit être fournie par le début de celle-ci. Comme le montre la figure III.22, le contrôle de la tension continue V_{dc} est réalisé en utilisant un régulateur PI où la tension continue V_{dc} est comparée à sa tension de référence V_{dc}^* .

A la sortie du PI, les pertes de puissance P_{loss} sont ensuite ajoutées à la puissance de référence de départ P_s^* et avec la puissance réactive shunt de référence Q_p^* , les courants de référence shunt i_p^* d'arrivé et de départ sont déterminés.

Les tensions de commande des régulateurs série et parallèle génèrent les tensions de référence des onduleurs MLI série et shunt

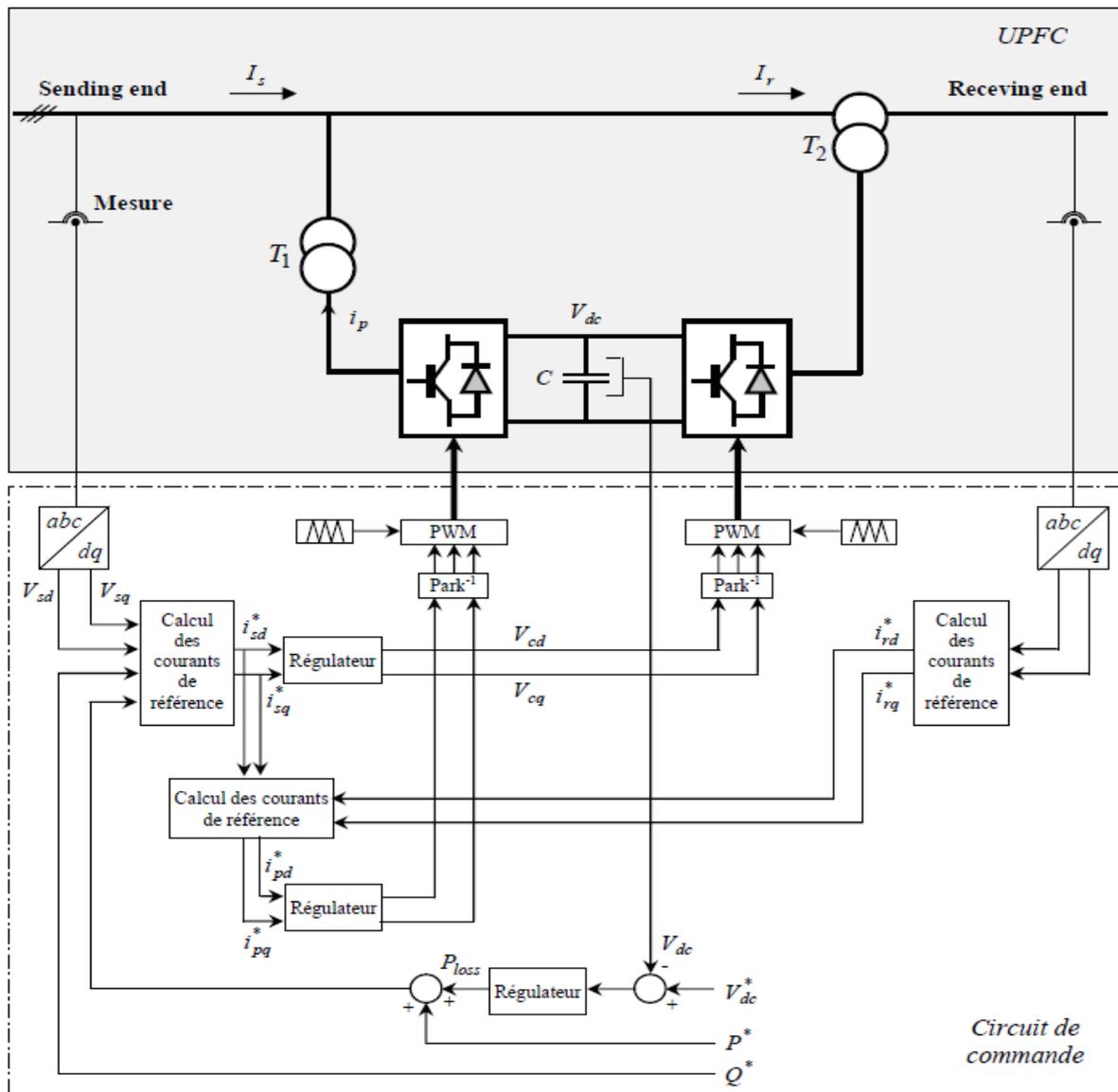


Figure III.22 : Circuit de commande du système UPFC.

III.11 Commande par régulateur PI à gains variables (VGPI) :

Il a été montré auparavant que le PI classique ne peut être réglé pour une diminution du dépassement en régime transitoire et en même temps pour un rejet rapide des perturbations en régime permanent. Un réglage pour une diminution du dépassement engendre un lent rejet des perturbations externes en régime permanent et un réglage pour un rejet rapide des perturbations externes engendre un important dépassement. Pour parer à cela on a eu l'idée de concevoir un régulateur PI modifié qui peut être réglé pour éliminer totalement le dépassement et en même temps rejeter aussi rapidement que nécessaire la perturbation en régime permanent. Ce régulateur est appelé régulateur PI à gains variables (VGPI).

III.11.1 Structure du régulateur VGPI :

La figure III.23 montre la structure du régulateur VGPI. C'est un régulateur PI dont les gains ne sont pas constants mais varient dans l'intervalle de temps $[0, t_s]$ le long d'une courbe polynomiale de degré n allant d'une valeur initiale vers une valeur finale, Après le temps de saturation t_s , les gains du régulateur deviennent constants et égales à leurs valeurs finales.

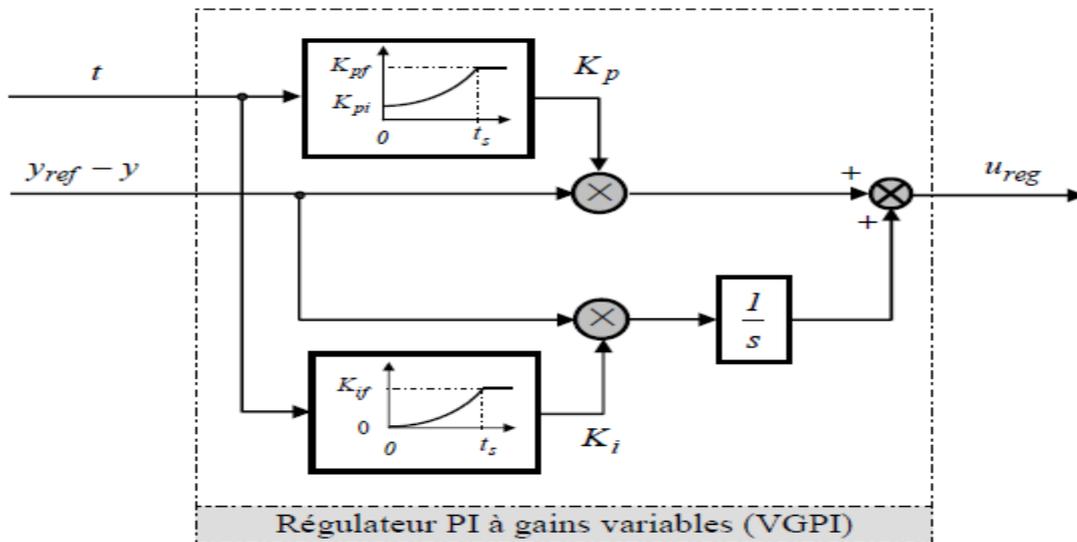


Figure III.23 : Structure d'un régulateur PI à gains variables (VGPI).

Chaque gain du régulateur proposé possède quatre paramètres :

- Valeur initiale du gain : C'est le réglage dynamique qui contribue à l'élimination du dépassement.
- Valeur finale du gain : C'est le réglage du régime permanent qui permet le rejet rapide des perturbations externes.

- Fonction du régime transitoire du gain : C'est une courbe polynomiale de degré n qui relie la valeur initiale du gain à sa valeur finale.
- Temps de saturation t_s : C'est le temps que prend le gain pour atteindre sa valeur finale.

Le degré n de la fonction du régime transitoire du gain est défini comme étant le degré du régulateur à gain variable.

Si $e(t)$ est le signal d'entrée du régulateur VGPI alors sa sortie est donnée par :

$$y(t) = K_p e(t) + \int_0^t K_i e(\tau) d\tau \quad (\text{III.47})$$

Avec

$$K_p = \begin{cases} (K_{pf} - K_{pi}) \left(\frac{t}{t_s}\right)^n + K_{pi} & \text{si } t < t_s \\ K_{pf} & \text{si } t \geq t_s \end{cases} \quad (\text{III.48})$$

$$k_f = \begin{cases} K_{if} \left(\frac{t}{t_s}\right)^n & \text{si } t < t_s \\ K_{if} & \text{si } t \geq t_s \end{cases} \quad (\text{III.49})$$

Où K_{pi} et K_{pf} sont les valeurs initiale et finale du gain proportionnel K_{pi} , et K_{if} est la valeur finale du gain intégrateur K_i . Etant donné que la valeur de l'intégrateur a une grande influence sur le dépassement en régime transitoire, la valeur initiale du gain intégrateur est considérée comme étant égale à zéro afin de contribuer à l'élimination de ce dépassement. On peut noter que le régulateur PI classique est un cas particulier du régulateur PI à gains variables où le degré est égal à zéro.

La réponse indicielle d'un régulateur VGPI est donnée par :

$$y(t) = \begin{cases} K_{pi} + \left(K_{pf} - K_{pi} + \frac{K_{if}}{n+1} t\right) \left(\frac{t}{t_s}\right)^n & \text{si } t < t_s \\ K_{pf} + K_{if} \left(t - \frac{n}{n+1} t_s\right) & \text{si } t \geq t_s \end{cases} \quad (\text{III.50})$$

III.11.2 Présentation du régulateur PI à gain variable :

Le correcteur à action Proportionnelle et Intégrale noté PI, couvre une large gamme d'applications industrielles. Il commande au processus selon l'erreur entre la consigne et la sortie régulée. L'utilisation de contrôleurs PI pour la commande de la vitesse d'un moteur à induction est souvent caractérisée par un dépassement en mode poursuite et un lent rejet des perturbations de charge.

Ceci est principalement causé par le fait que les gains du contrôleur PI ne peuvent être réglés pour résoudre en même temps le problème du dépassement et celui du lent rejet des perturbations décharge. Un réglage pour l'élimination du dépassement entraînera un très lent rejet des perturbations, et un réglage pour un rejet rapide des perturbations entraînera un dépassement important. Afin de parer à ce problème, on propose l'utilisation de contrôleurs PI à gains variables noté VGPI. La valeur des gains du contrôleur proposé augmente suivant une forme polynomiale d'ordre n entre deux réglages : le réglage de démarrage qui permet une élimination du dépassement, et le réglage du régime permanent qui permet un rejet rapide des perturbations [28].

Le régulateur PI à gains variable est basé sur celui du PI classique. Les gains K_p et K_i du régulateur PI classique sont fixes, alors que ceux du régulateur à gains variables varient avec le temps suivant les fonctions suivantes figure. III.24 :

Gain proportionnel K_p :

$$\begin{cases} (V_{fp} - V_{dp}) \left(\frac{t}{T_s}\right)^n + V_{dp} & \text{si } t < T_s \\ V_{fp} & \text{si } t \geq T_s \end{cases} \quad (\text{III.51})$$

Gain intégrateur K_i :

$$\begin{cases} (V_{fi} - V_{di}) \left(\frac{t}{T_s}\right)^n + V_{di} & \text{si } t < T_s \\ V_{fi} & \text{si } t \geq T_s \end{cases} \quad (\text{III.52})$$

Où les six paramètres du correcteur sont définis par :

V_{dp} : valeur initiale de K_p .

V_{fp} : valeur finale de K_p .

V_{di} : valeur initiale de K_i .

V_{fi} : valeur finale de K_i .

T_s : temps de saturation.

n : degré du régulateur

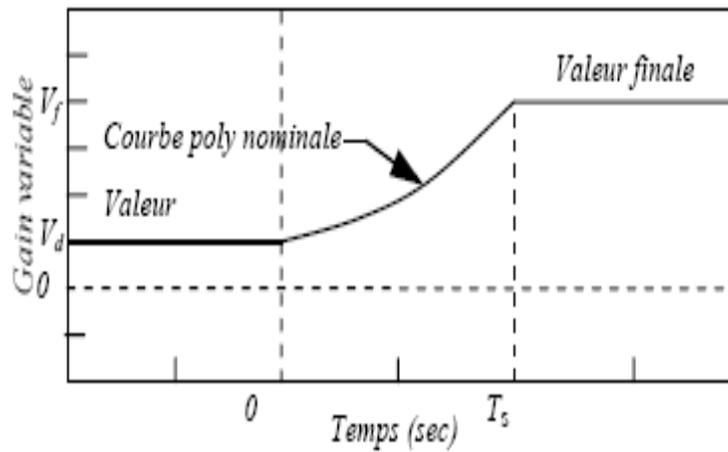


Figure III 24 : Courbe des gains d'un régulateur VGPI.

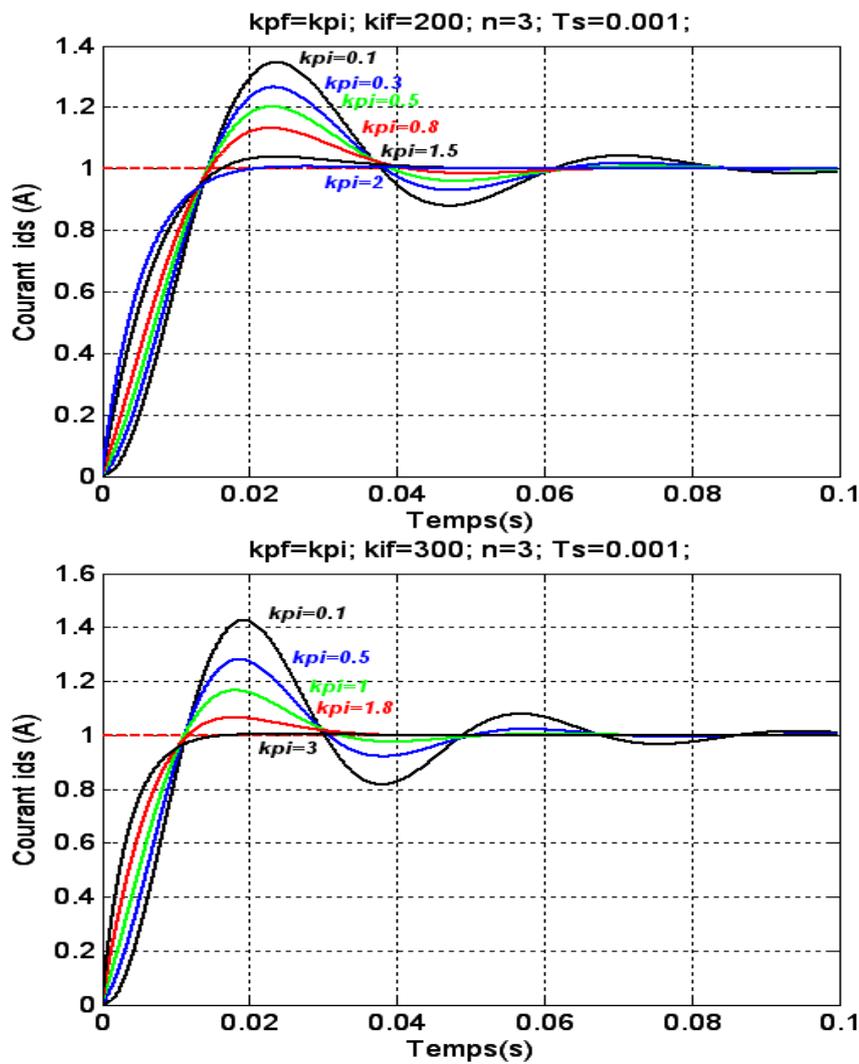


Figure III.25 : Réglage d'un régulateur VGPI du 3ème degré avec variation de k_{pi} .

Valeur initiale (V_d) : c'est la valeur du gain lors du début de simulation. Elle a donc une certaine influence sur le dépassement de l'échelon soit de puissance où bien du courant.

Temps de saturation (T_s) : c'est le temps suffisant pour que le système arrive au régime permanent.

D'après nos essais nous remarquons qu'il y a une diminution de dépassement, si ce temps est d'autant plus grand.

Valeur finale (V_f): c'est la valeur du gain en régime permanent. Pour l'intégrateur, plus cette valeur est grande, plus le rejet des perturbations est rapide.

III.12 Conclusion :

Finalement, nous avons pu présenter et définir, dans la première partie de ce chapitre, la plupart des éléments constituant la structure générale de l'UPFC. Cette structure a d'abord été partagée en deux branches (série et shunt). Ainsi nous avons pu fixer le choix des paramètres des régulateurs (PI-D et VGPI) de contrôle, tels que la méthode d'identification des courants de phase, la commande et la régulation de la tension continue.

Chapitre IV

*Résultats de Simulation et synthèse de
deux régulateur ‘PI-D et VGPI ‘*

IV.1 Paramètres du modèle UPFC :

Les paramètres du modèle UPFC de la simulation sont donnés comme suite :

- Tension du réseau : $V_s = 220V$
- Tension du récepteur : $V_r = 220V$
- Tension continu : $V_{dc} = 280V$
- Fréquence du réseau : 50 HZ
- La résistance de la ligne : $r = 0.8\Omega$
- L'inductance de la ligne : $L = 10\text{ mH}$
- Les chutes de tension du compensateur parallèle : $r_p = 0.4\Omega$
- L'inductance de fuite du transformateur parallèle : $L_p = 10\text{ mH}$
- La capacité du circuit commun DC : $C = 2000\ \mu\text{F}$

On peut maintenant simuler le comportement de notre système muni de son régulateur de puissances active et réactive. Cela a été réalisé avec l'outil MATLAB /SIMULINK.



A dark blue rectangular box with the text 'SIMULATION OF UPFC USING MATLAB' in white, bold, sans-serif capital letters.

IV.2 Résultats de simulation de système UPFC avec un régulateur (PI-Découplé) :

La simulation de notre système UPFC pour le contrôle de flux de puissance est établie selon le choix de la commande MLI de régulateur (PI-D).

IV.2.1 Les graphes des puissances active et réactive :

Cette simulation comporte un changement de la puissance active au moment où la puissance réactive passe de -620 VAR à $+620\text{ VAR}$ (à l'instant $t = 0.25s$), et un changement de la puissance réactive au moment où la puissance active passe de -900 W à $+900\text{ W}$ (à l'instant $t = 0.45s$) figure VI.1. Sous forme d'un échelon initialement le système est dans l'état constant avec une puissance active à l'arrivée de la ligne de transmission égale à -900 W , et une puissance réactive égale à -620 VAR .

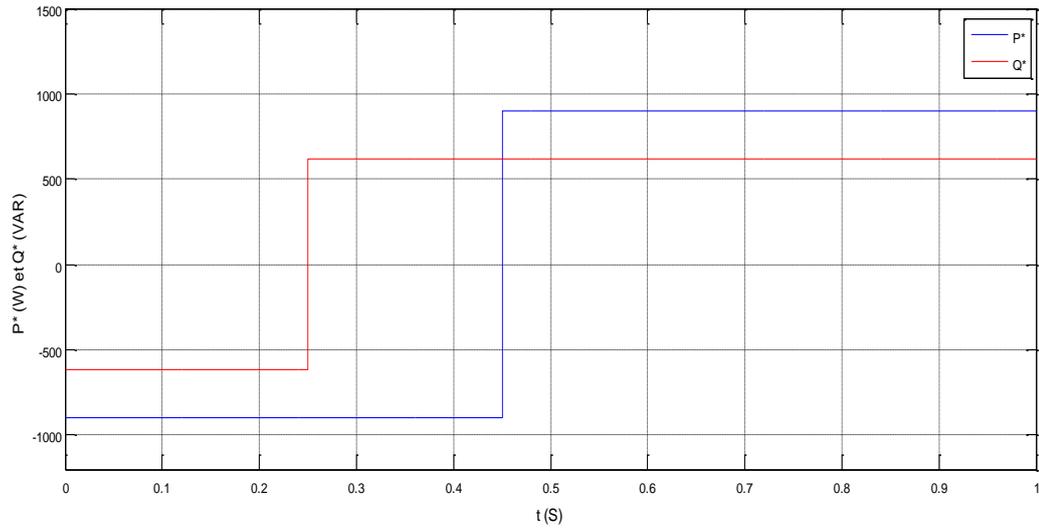


Figure IV.1 : La puissance active et La puissance réactive référence (P^* et Q^*)

D'après le choix des échelons des puissances on a simulé notre système et on a obtenu les résultats de simulation des puissances active figure IV.2 et réactive figure IV.3 suivant :

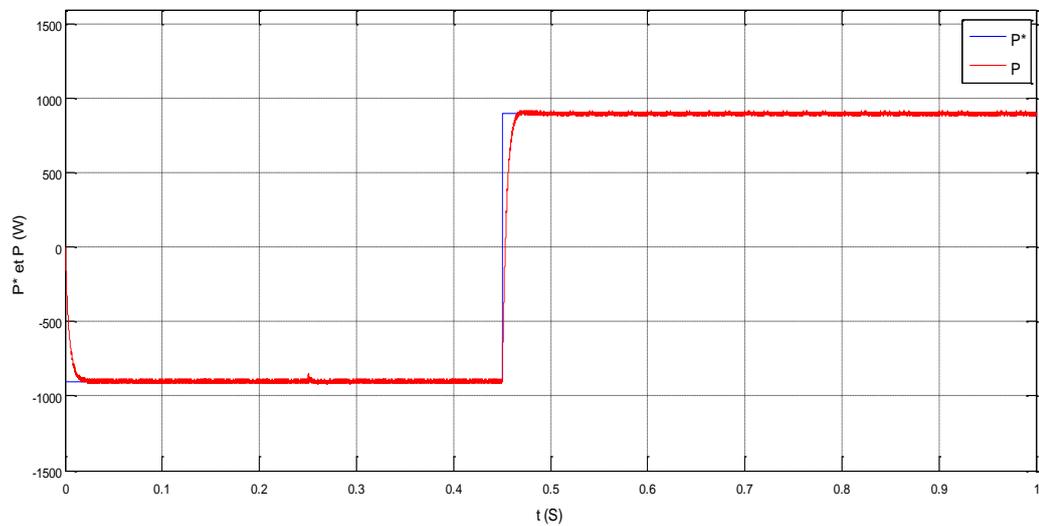


Figure IV.2 : La puissance active et leur référence (P et P^*)

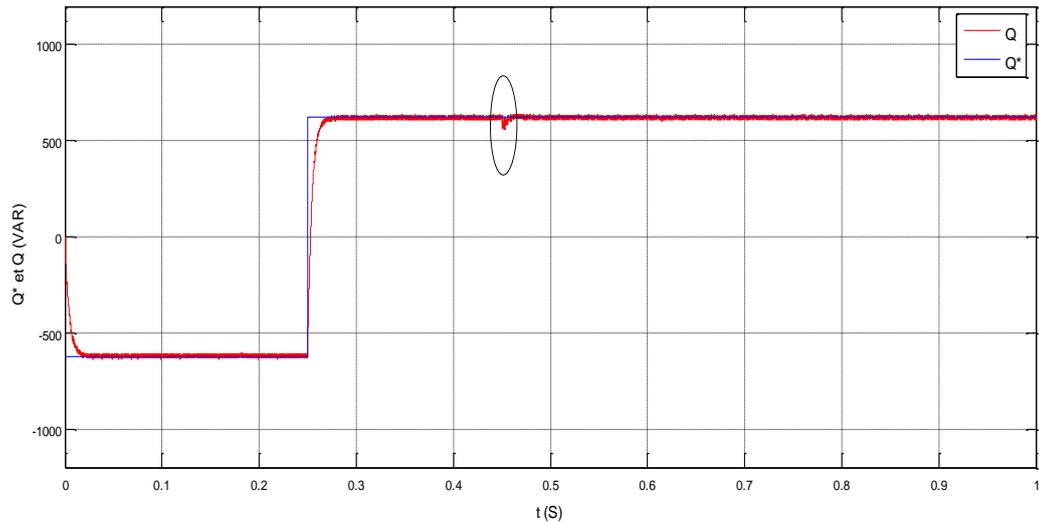


Figure IV.3 : La puissance réactive et leur référence (Q et Q^*)

Pour illustrer les allures deux puissances active et réactive dans les instants 0.25s et 0.45s et voir la variation qui est considérée comme une petite perturbation et l'interaction entre eux à cause de l'effet de découplage d'après la figure IV.4.

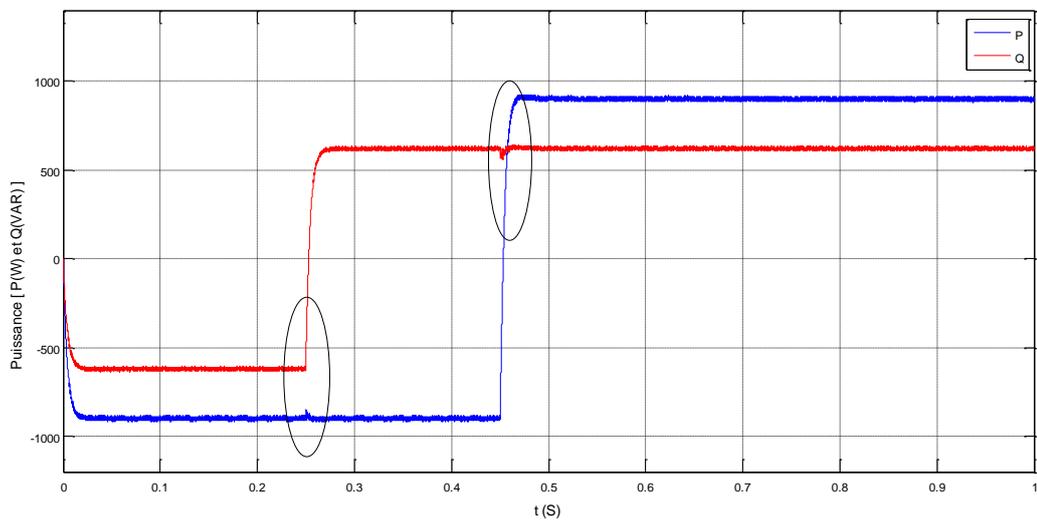


Figure IV.4 : La puissance active P et réactive Q

IV.2.2 Les allures des courants et la tension de la branche continue :

On constate que les allures des courants sans perturbés avec une légère variation dans les deux instants (0.25s et 0.45s) qui montré dans les figures IV.5 et IV.6 mais après ces instants les courbe suit leurs références à cause de notre régulateur (PI - D)

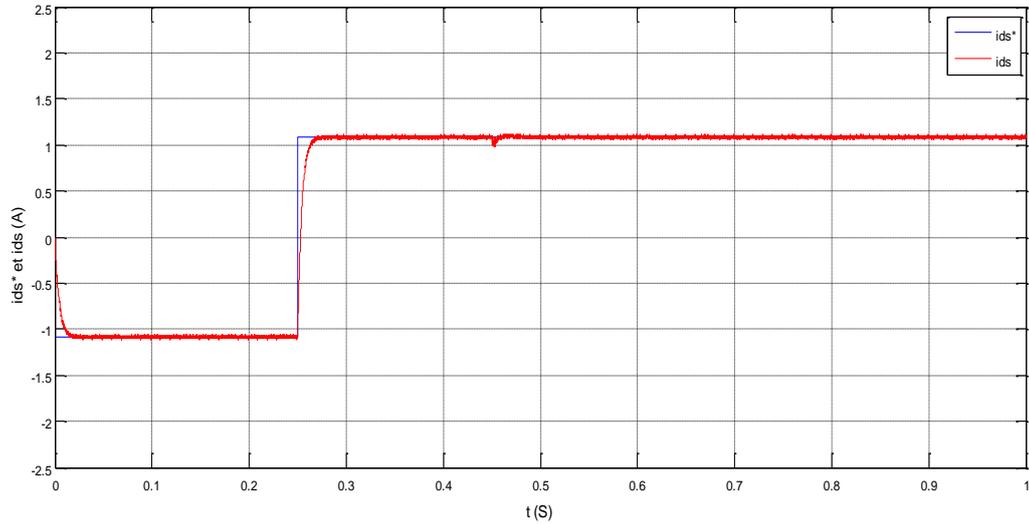


Figure IV.5 : les allures des courants I_{ds} et I_{ds}^*

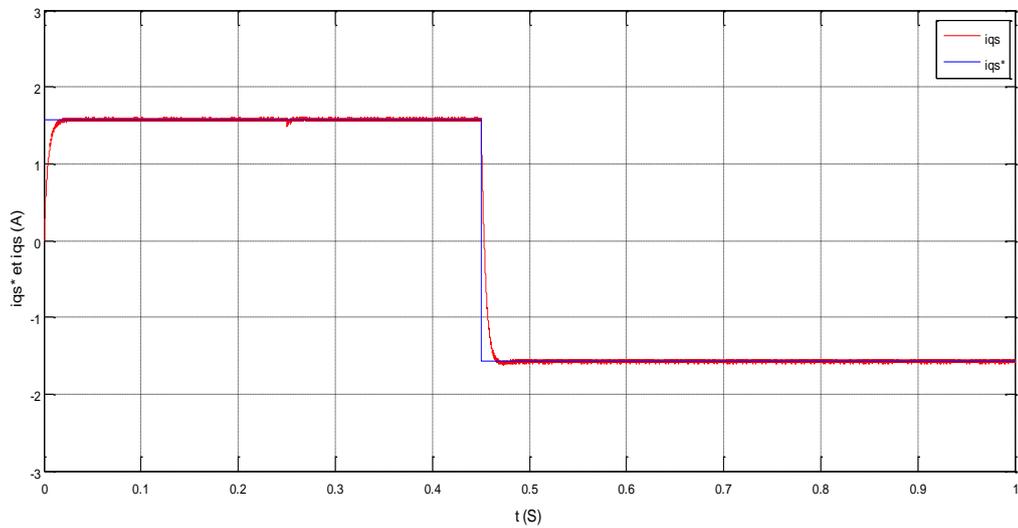


Figure IV.6 : les allures des courants I_{qs} et I_{qs}^*

Les figures IV.7, suivantes illustrent respectivement le courant de phase (a).

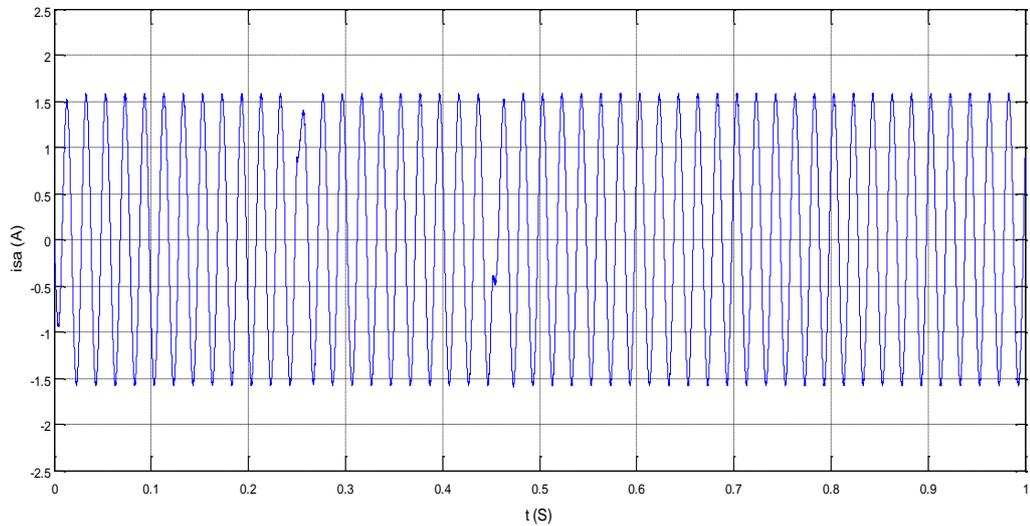


Figure IV.7 : le Courant Isa

Les courants figure IV.8 sont plus où moins perturbés aux instants 0.25s et 0.45s

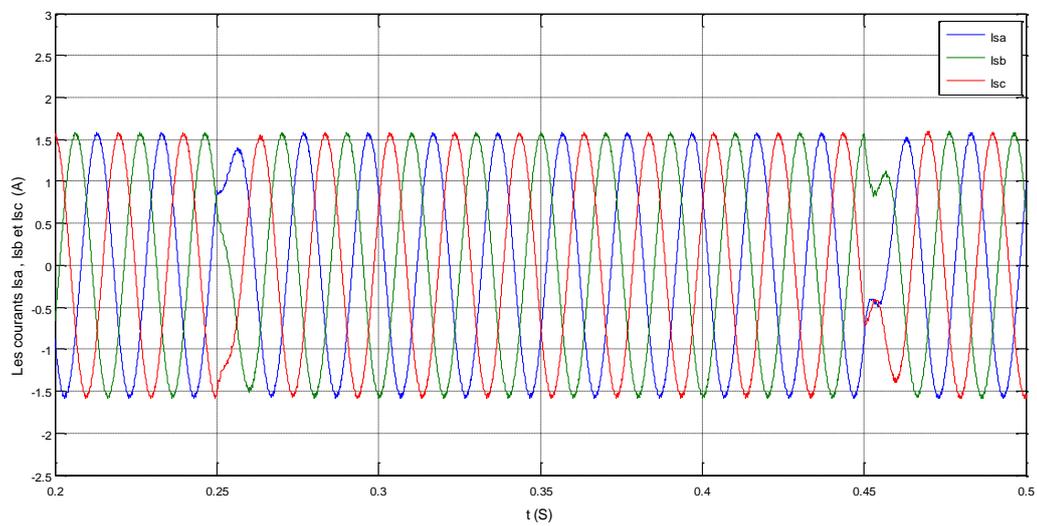


Figure IV.8 : Courants des phases i_{sa} , i_{sb} et i_{sc}

Voilà les deux composants de la tension de commande V_{cd} et V_{cq} qui assure l'alimentation l'un des deux onduleurs (série et shunt) figure IV.9 et IV .10 avec la présence de notre régulateur.

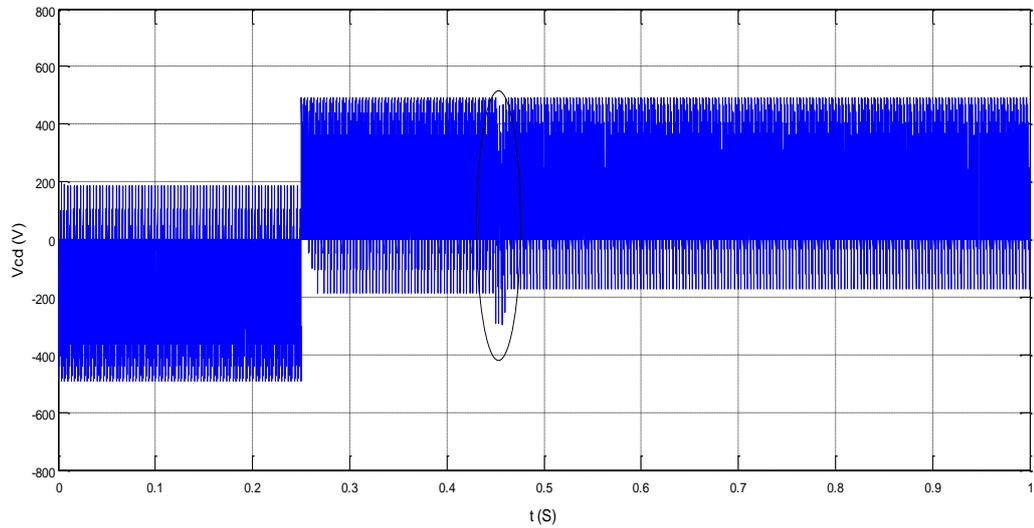


Figure IV.9 : Allure de la tension V_{cd}

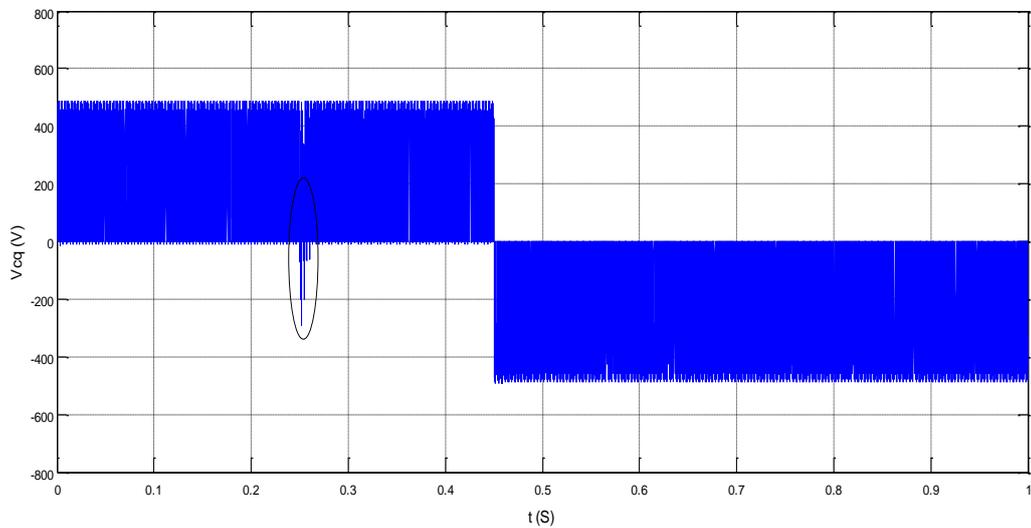


Figure IV.10 : Allure de la tension V_{cq}

IV.2.3 Les allures des tensions de récepteur :

La figure IV.11 représente la Tensions Vsa

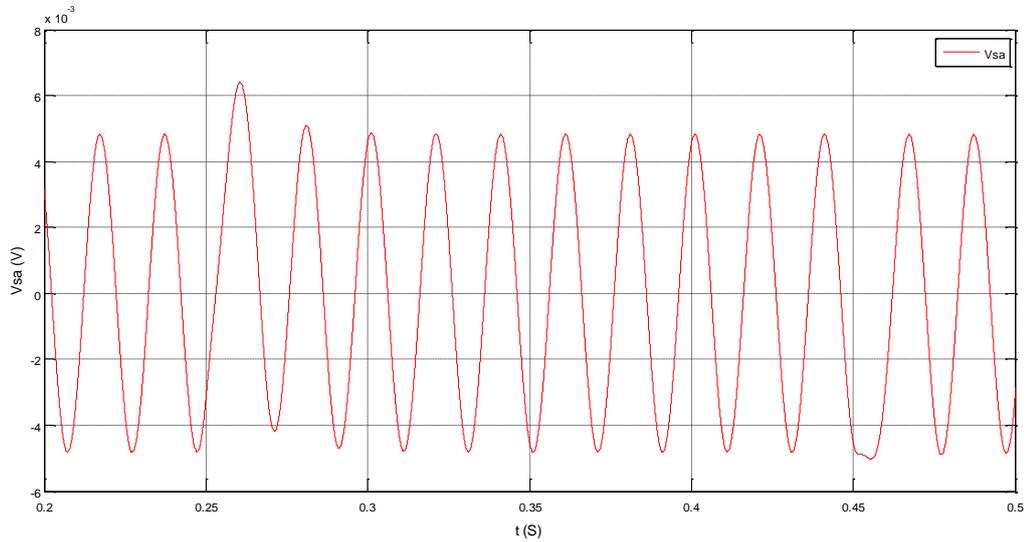


Figure IV.11 : la Tensions Vsa

La figure IV.12 représente Les trois tensions Vsa ,Vsb et Vsc :

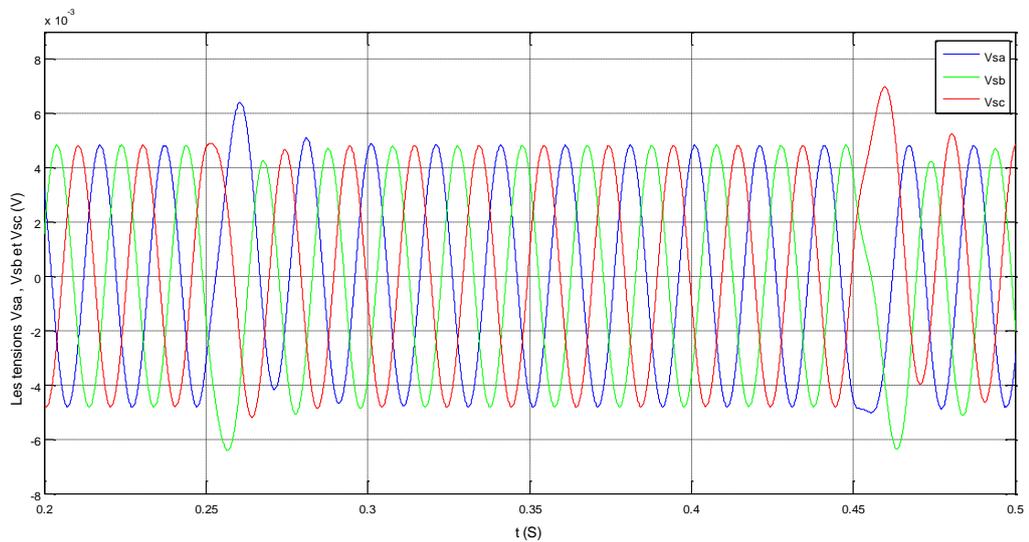


Figure IV.12 : Les tensions Vsa ,Vsb et Vsc

IV.2.4 Test de stabilité :

Pour tester la stabilité du l'UPFC, cette fois-ci on a simulé le système en introduisant une perturbation de durée 25ms et d'amplitude 1,5 à l'instant 0.7s.

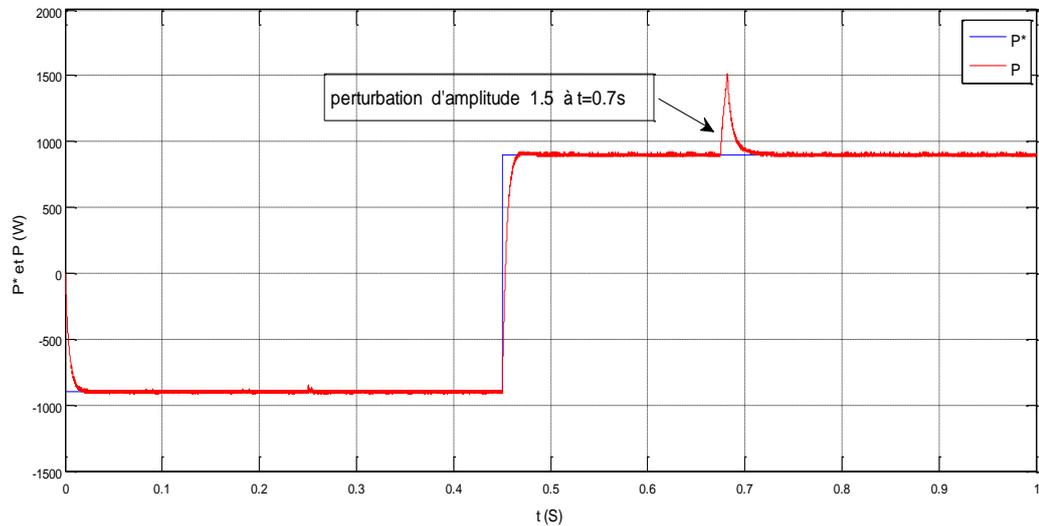


Figure IV.13 : Les puissances actives (P et P*) avec une perturbation.

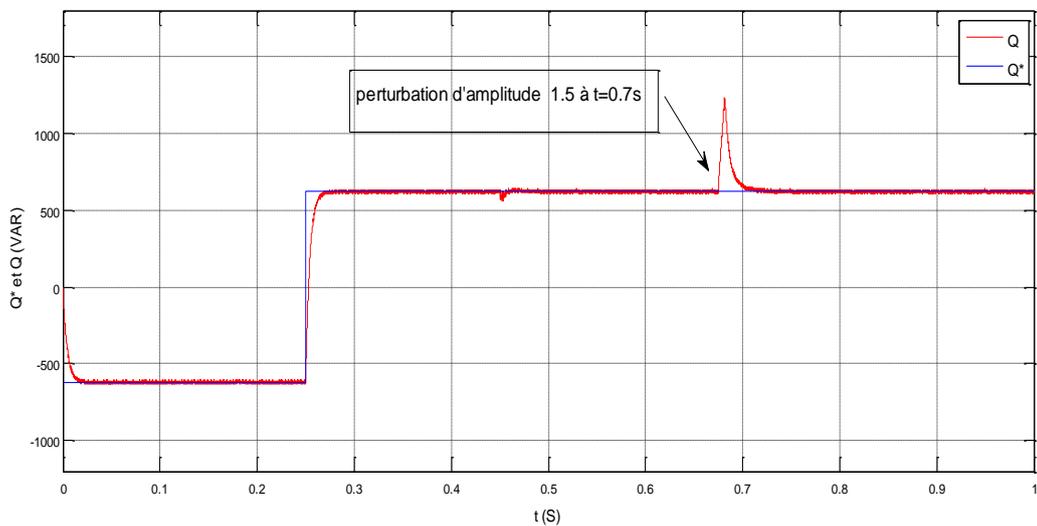


Figure IV.14 : Les puissances réactives (Q et Q*) avec une perturbation

On constate que les réponses des puissances active et réactive plus perturber se fait graduellement ainsi s'accompagne d'un léger dépassement aux temps 0.7s cela conduit à des perturbations de système.

IV.2.5 Test de robustesse :

Pour tester la robustesse de notre système on vari la réactance de la ligne X_l à $\pm 35\%$ de sa valeur nominale. Les variations sur la puissance active P X_l à $\pm 35\%$ de (PI-D) on donne d'allure suivant le figure IV.15 :

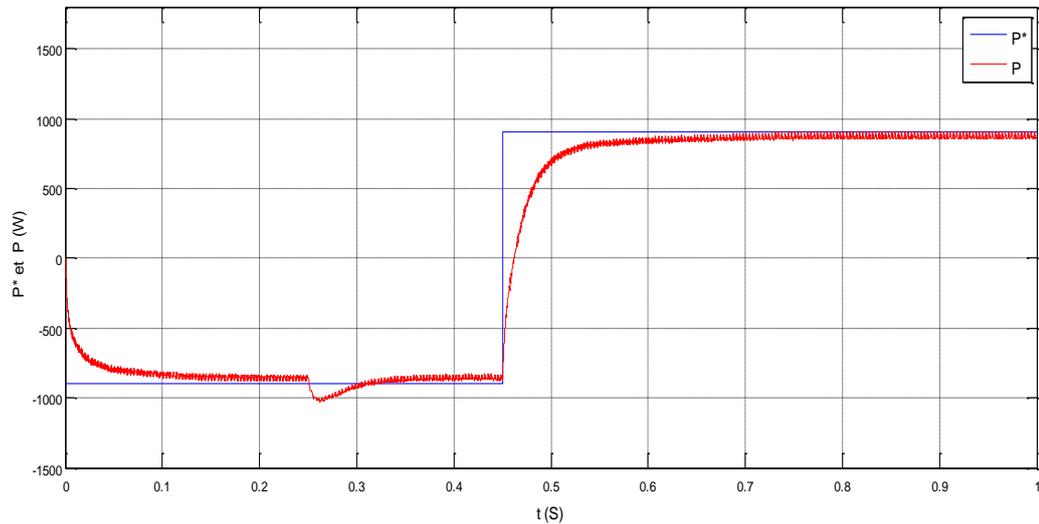


Figure IV.15 : Les puissances active P^* et P avec test de robustesse.

Les réponses de puissance réactive figure IV.16 $X_l \pm$ à 35% de (PI-D) :

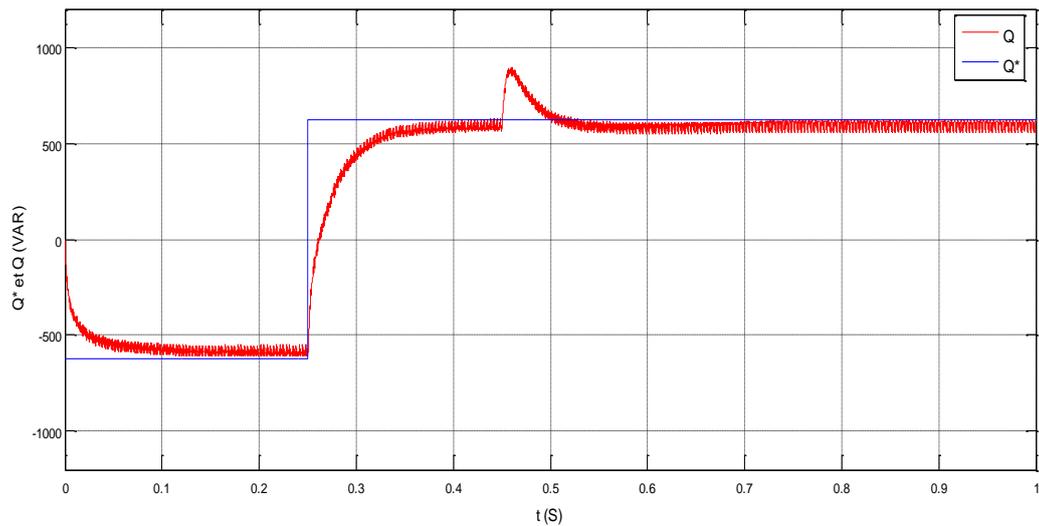


Figure IV.16 : Les puissances réactive Q^* et Q avec test de robustesse

IV.3 Résultats de simulation de système UPFC avec un régulateur (VGPI) :

Donc suivant la simulation du notre système avec un régulateur PI classique à gain variable (VGPI), les puissances résultent sont à une très courte variation par rapport avec les références et dans les instants 0.25s et 0.45s et on a une variation qui est considérée comme une petite perturbation et l'interaction entre eux à cause de l'effet de découplage qui représentées dans les figures IV.17 et IV.18.

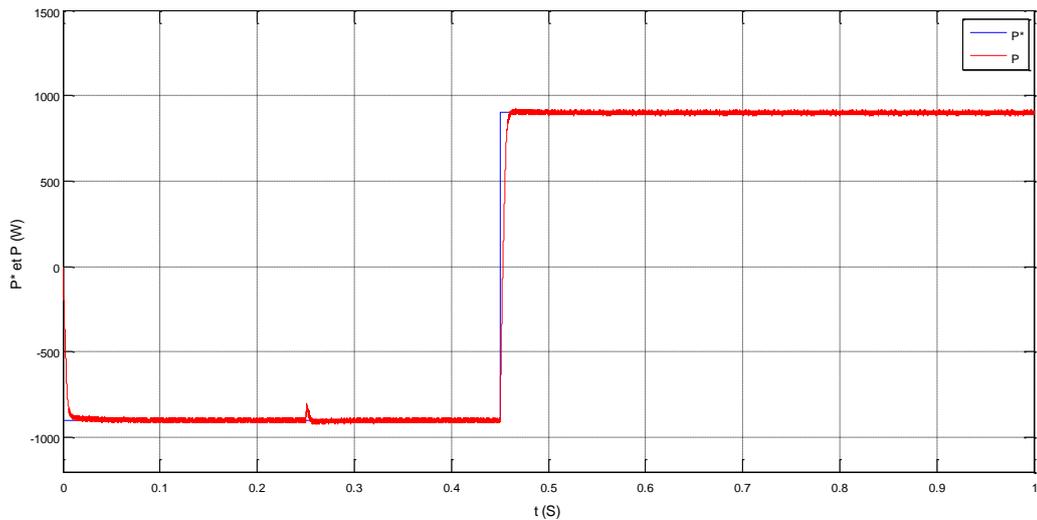


Figure IV.17 : La puissance active et leur référence P et P*)

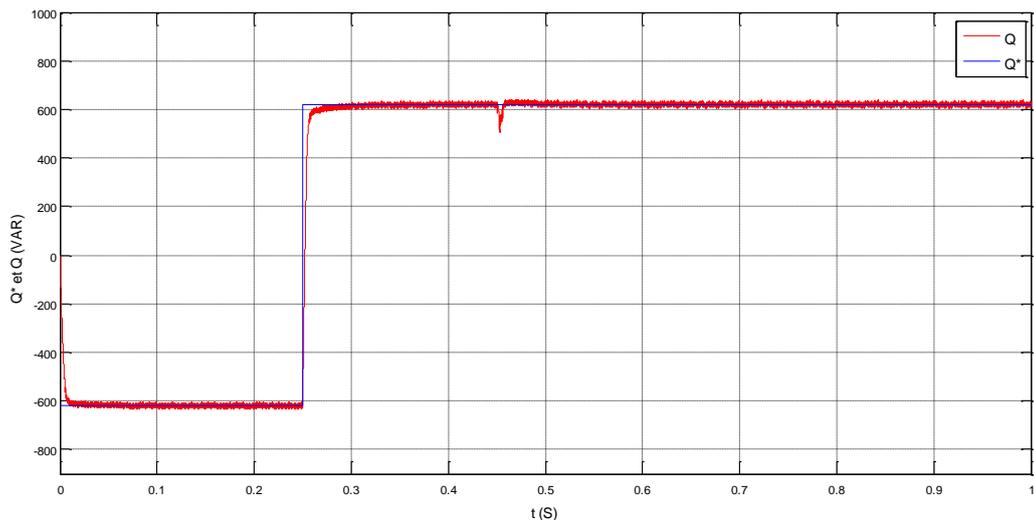


Figure IV.18 : La puissance réactive et leur référence (Q et Q*).

IV.4 Synthèse et résultats des puissances obtenus avec les deux tests par les deux régulateurs (PI-D) et (VGPI) utilisé dans notre système UPFC :

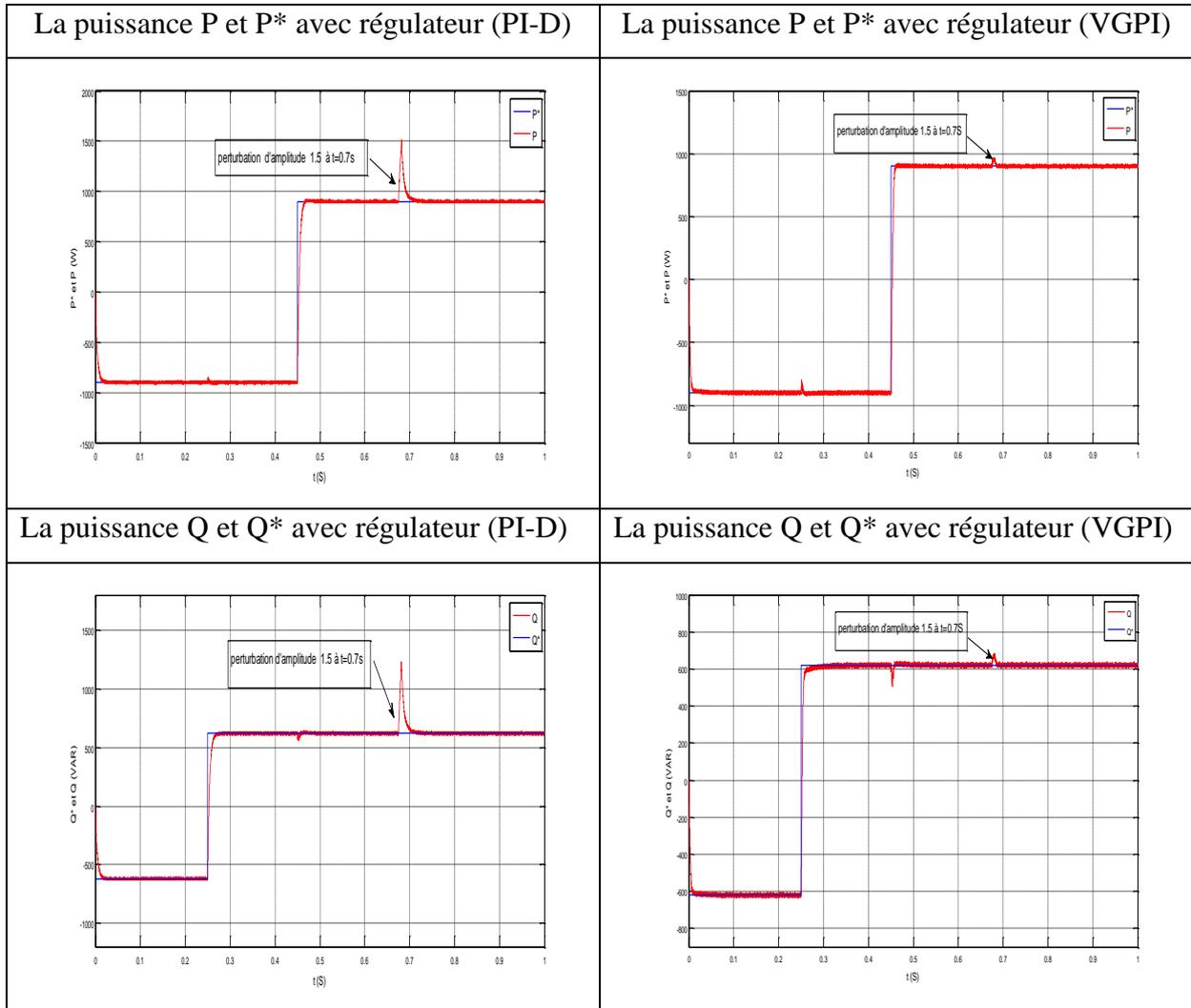


Figure IV.19 : Les puissances actives et réactives des deux régulateurs (PI-D et VGPI)

Test de stabilité

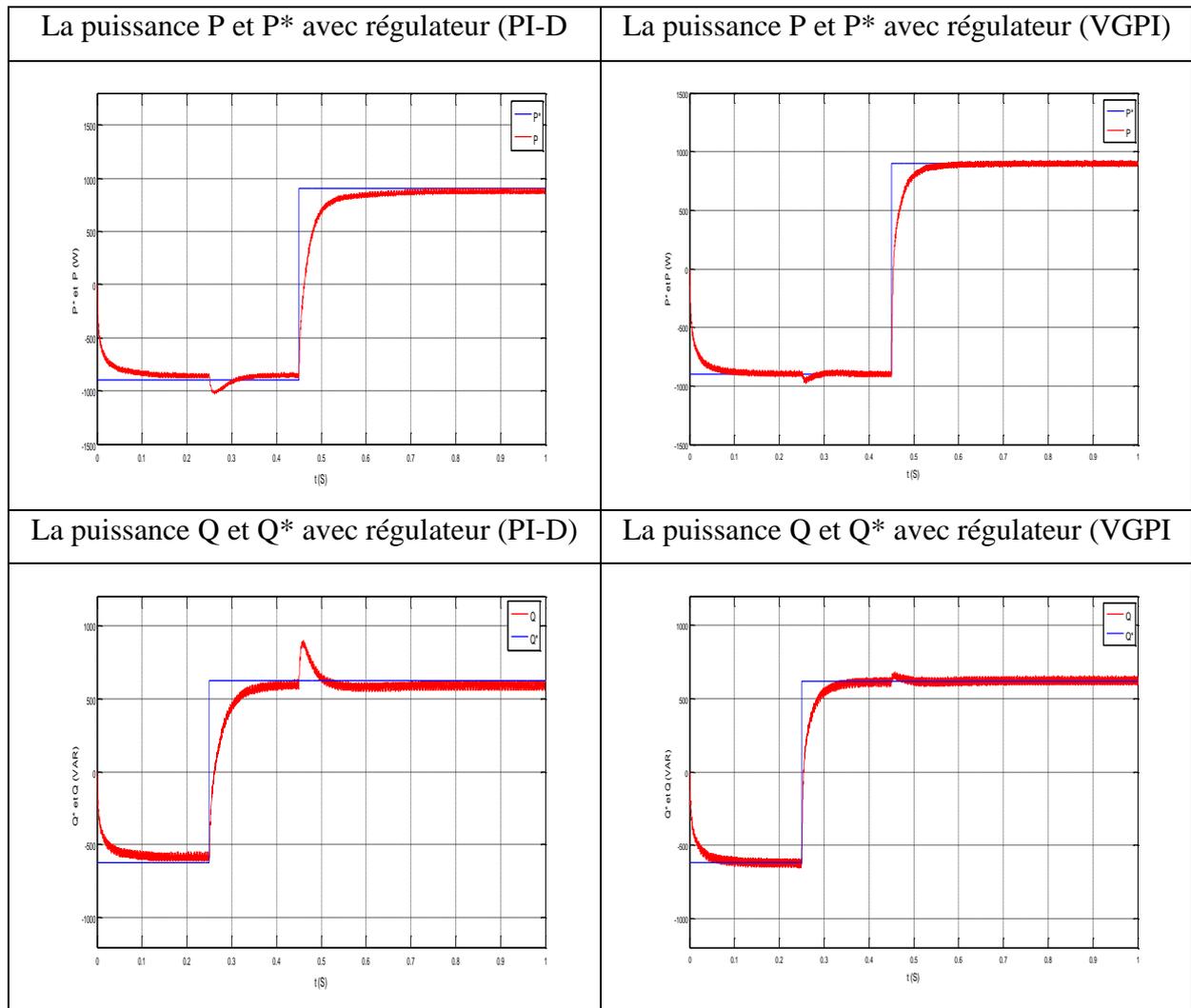


Figure IV.20 : Les puissances actives et réactives des deux régulateurs (PI-D et VGPI)

Test de robustesse.

D'après les résultats de simulation, on résume que les régulateur PI-Découplé et le régulateur VGPI à un temps de réponse rapide pour un choix des paramètres bien étudié, le VGPI étant légèrement meilleur mais en cas où les paramètres de deux régulateurs et les données de la ligne de transmission changent le système perde leur stabilité.

En conclusion on a montré par simulation que dans la régulation de notre système, le régulateur PI à gain variable est de loin beaucoup plus performant que le régulateur PI classique même on voit que notre système a besoin d'amélioration c'est-à-dire on ajoute une commande pour les deux régulateurs.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électrique constitue un sujet important pour les exploitants, comme nous avons pu le constater tout le long de ce travail. Notre travail a été consacré à la compensation de l'énergie réactive par convertisseur afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et d'assurer une stabilité d'un réseau électrique. Nous avons présenté les perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique (Q.E.E) dans un réseau électrique, cette dernière est caractérisée par les indices suivants :

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde.
- La symétrie.

Parmi les facteurs qui provoquent des perturbations majeures et déprécient la Q.E.E sont :

- Variations de la fréquence.
- Variations lentes et rapides de la tension.
- Harmoniques (inter harmonique).
- Dissymétrie du système triphasé (déséquilibre).

Nous avons présenté plusieurs solutions d'amélioration traditionnelles et modernes. L'amélioration du facteur de puissance constitue sans doute un paramètre très important dans l'amélioration de la qualité de l'énergie du point de vue technique et économique.

Le facteur de puissance est l'un des plus importants indices de la qualité d'énergie électriques dans les réseaux électriques. Un mauvais facteur de puissance a des influences pour tous les acteurs : producteur, fournisseur et exploitant de l'énergie. L'amélioration de ce facteur demeure le souci majeur surtout pour le fournisseur (réseau de transport), la compensation d'énergie réactive est l'unique solution pour l'améliorer.

L'UPFC est un compensateur qui est plus complet que les autres, grâce à ces multiples fonctions. En pratique ce dernier peut être utilisé pour la gestion des flux de l'énergie dans les réseaux électriques. Il est important de remarquer que ce dispositif peut avoir d'autres tâches et fonctions en plus de sa mission de compensation d'énergie réactive.

La définition des limites de contrôle pour la partie parallèle et la partie série. Nous avons permis de choisir la méthode de décomposition en (d-q) comme méthode d'identification des références. Nous avons également utilisé la méthode basée sur la commande M L I pour contrôler les onduleurs de tension. Enfin, nous avons fait des simulations avec le logiciel MATLAB-Simulink.

Nous avons reporté dans ce mémoire les principaux résultats d'une étude en simulation d'un système UPFC. Un rappel sur les difficultés rencontrées dans la gestion des flux dans le réseau et les moyens de compensation de l'énergie réactive est abordée dans le premier chapitre. Par suite, on a défini le projet ambitieux qui faisant appel à l'électronique de puissance dénommés FACTS. Parmi ces derniers on cite le contrôleur électronique de flux de puissance unifié (UPFC) qui combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle.

C'est le système FACTS le plus puissant, dans la mesure où il permet de régler les trois grandeurs du réseau dans la ligne de transmission. Différents réglages sont à prévoir pour ce compensateur, après le développement d'un modèle mathématique de l'UPFC et le principe de fonctionnement : des réglages pour le courant triphasé (onduleurs parallèle et série). Et un réglage pour la tension continue ; notre intérêt porte sur le réglage des courants de chacun des deux onduleurs pour pouvoir gérer le flux de puissance entre deux nœuds distincts de la ligne de transmission d'un réseau d'énergie. La commande proposée et évaluée y compris le régulateur PI découplé donne une meilleure réponse et le régulateur PI à gain variable, ce régulateur minimise l'interaction entre les deux puissances active et réactive ainsi qu'on a testé sa robustesse vis à vis des variations paramétriques, telle que la réactance de la ligne.

On peut dire que le régulateur PI découplé pouvait être la commande idéale pour le système UPFC si la variation de $\pm 35\%$ de la réactance n'a pas dégradé ses performances dynamiques. La simulation de système en utilisant un régulateur PI classique et un régulateur PI à gains variables a montré une supériorité des performances du régulateur PI à gain variable sur ceux du régulateur PI classique. Le PI à gain variable a montré les performances suivantes :

- 1- Elimination totale du dépassement.
- 2- Réduction importante du temps de rejet des perturbations
- 3- Une bonne prise des variations des paramètres de notre système.

Donc comme proposition il faut combine notre réglage soit par le régulateur (PI-découplé) où bien le régulateur VGPI) avec une commande pour estimer à chaque instant les paramètres tout en offrant au système une meilleure robustesse et stabilité.

Comme perspectives, nous espérons fonder notre travail sur l'application de cette étude sur un système réel (données pratiques), et évaluer les performances du dispositif (UPFC) dans le contrôle des puissances, des tensions et des courants pour un système multi machines.

Bibliographie

- [01] Laib Hichem, « Contribution A L'étude du Contrôle du Flux de Puissance Par l'UPFC » Magister en Electrotechnique, Université BATNA, 13/06/2009.
- [02] A.Makhlouf , I. Boutaleb, « Compensation Serie D'une ligne de transport », Mémoire de fin d'étude.RESE, Université de saida. 2013.
- [03] Omeiri.Amar."Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant "Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [04] MAMMERI Oussama, « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans une noeud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie», Mémoire de magister,Option : Réseaux électriques, Université de Batna, 2011/2012.
- [05] M.A.E ALALI, 'Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension', Thèse de doctorat de l'université de LOUIS PASTEUR (STRASBOURG), 12 Septembre 2002.
- [06] ALAIN ROBERT (ELIA), 'Qualité de l'électricité dans le marche libéralisé', Séminaire organisé par le professeur Jean-Louis LILIEN, université de LIEGE, 8 décembre2004.
- [07] <https://studylibfr.com/doc/1972496/étude-du-cos-phi-ou-facteur-de-puissance-inconvénient>
- [08] Cours compensateur synchrone de l'université de SHERBROOKE CANADA,' www.usherbrooke.ca , 2005.
- [09] LAC LASNE, 'Notions de base et réseau électrique', cours du département Electrotechnique-Electronique-Automatique de l'université de BORDEAUX 12/2005
- [10] HENRI FOCH, FRANCOIS FOREST et THIERRY MEYNARD, 'onduleurs de tension technique de l'ingénieur D3176. 2005.
- [11] MOSTEFAOUI Abdelkader, « Étude de la répartition optimale des puissances dans un réseau électrique par la Programmation non linéaire», Mémoire de MagisterOption : Réseaux électriques, Université Hassiba Benbouali Chlef, Algérie, 14/10/2008.
- [12] R. Grünbaum , M. noroozian , B . Thorvaldsson.'FACTS- les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique.' Revue ABB power systems: 4-17, may 1999

- [13] M. Pellerin. ‘ Systèmes de transmission à courant alternatif flexible.’ Revue scientifique de l’EI VD : 1-6, 2002.
- [14] C.M. Yam, M.H. Haque. ‘A SVD based controller of UPFC for power flow control.’ Electric Power Systems Research 70 (2004) 76–84 ELSEVIER 2004.
- [15] Gyugyi, C .D.schauder , S .L Wiliams , T . R . Rieteman , D.R . Torgerson and A.Idris.‘The unified power flow controller: A new approach to power transmission control.’ IEEE transactions on power delivery ,1995 , vol 10 ,N° 2 ,PP 1085 –1093.
- [16] Sheng huei lee, chia chin chu .’ Power flow models of unified power flow controllers in various operation modes 7803 –8110 -6 (2003) IEEE.
- [17] Zebirate Soraya « Réglage multi variables d’un UPFC pour la compensation des puissances active et réactive », thèse magister, ENSET, Oran, mai 2002.
- [18] L.Gygyi, and al «the unified power flow controller: a new approach to power transmission control», IEEE turns on power delivery, vol 10N02, pp 1085-1097, April 1995.
- [19] S. D. Roud, Q, Yu, L. E Nowm, T. M Undeland «performance of a unified power flow controller using a D-Q control system », IEEE conference publication N0 423: 357-362, April-may 1996.
- [20] R.Grunbaum « FACTS- les système performants pour le transport flexible de l’énergie électrique», Revue ABB 3/1998, pp. 04-17, 1998.
- [21] S.M. Sadeghzadeh, M.Ehsen, N.Hajd Said et al, « Improvement of Transient Stability limit in power system transmission lines using fuzy control of FACTS devices », IEEE Trans. On power systems, vol. 13, No.3, pp.917-922, August 1998.
- [22] BOUKAROURA Abdelkader. Modélisation et Diagnostic d’un Onduleur Triphasé par l’Approche BondGraph. Mémoire de magister. Université de Sétif.Décembre 2009.
- [23] A.Bouanane " Techniques de Commande Dynamiques par Réseaux Neurones d’un UPFC Appliqué au Contrôle des Puissances dans les Réseaux Electriques ",Thèse de doctorat de l’ENP- Oran , 18décembre 2013.
- [24] A. HAMACHE et H. CHEKIREB, «*Adaptive Sliding Mode Control of HV Power System using UPFC*», Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol .9, No .3, pp. 92-100,2013, ISSN: 1743-9310.
- [25] A. HAMACHE et H. CHEKIREB, «*Centralized Sliding Mode Control of Power System with UPFC*», WSEAS Transactions on Systems and Control, Vol. 9, pp. 464-472, 2014, ISSN: 1991- 8763.

- [26] SEBAA Morsli, «*Commande Robuste d'un UPFC dans un Réseau d'Énergie Électrique Multi Machines*», thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2012.
- [27] H. Rasmussen. 'Automatic tuning of PID – regulators.' Dk 9290 Aalborg , Denmark September 6, 2000.
- [28] A. Miloudi, A. Draou “Variable Gain PI Controller Design For Speed Control and Rotor Resistance Estimation of an Indirect Vector Controlled Induction Machine Drive ” in Proc. IECON'02, Sevilla, Spain, Nov. 5–8, 2002, pp. 323-328.