

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 : RÉSEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Commande adaptative direct d'un contrôleur unifie du
flux de puissance pour la compensation**

Présenté par :

CHAREF Khadidja

Devant le jury composé de :

Dr. YAHIAOUI Merzoug

Président

Dr. BOUANANE Abdelkrim

Encadreur

Pr. MEZIANE Rachid

Examineur

Soutenu le 30/09/2020
Promotion 2019-2020

Remerciements

Je voudrais tout d'abord à remercie dieu le tout puissants qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je veux remercier :

Encadreur Dr : BOUANANE Abdelkrim pour ses conseils et ses consultations qui m'ont guidé et aidé dans ce travail avec beaucoup de gentillesse.

*Tout le corps enseignant et personnel de département
ELECTROTICHIQUE.*

Aux membres de jury, dont j'espère qu'ils trouveront en ce travail une réussite.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes parents qui mes qui mes sont très chers st dont le

Soutien m'ont

Toujours aidé à réussir dans la vie j'espère qu'ils sont

Fiers de moi et de

Mon travail, car je suis fierté d'avoir des tels

Parents.

A ma grande mère, A ma tante fatima, A mon oncle yaagoub.

A mes sœurs :Sara, Ouassila, Aziza, soulef et hayat et tout ma

Famille.

A mes amies {Hajira, Ferial, Hanen, bakhta, Ismahane, Chaima,

fedwa} Qui resteront à jamais

présents.

A tous ceux et celles qui sont chère à mon cœur.

Khadîdja

Sommaire

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I : influence du facteur de puissance sur le réseau électrique et technique d'amélioration de la stabilité.

I.1 Introduction..... 3

I.2 déphasage, Energie, et puissance 3

 I.2.1 déphasage..... 3

 I.2.2 Energie 4

 I.2.3 puissance..... 4

I.3 les puissances en régime alternatif..... 5

 I.3.1 puissance active 5

 I.3.2 puissance apparente..... 5

 I.3.3 puissance réactive..... 6

I.4 le facteur de puissance..... 6

 I.4.1 les avantages d'un facteur de puissance..... 7

 I.4.2 inconvénient d'avoir un mauvais facteur de puissance 8

I.5 définition d'un réseau électrique..... 9

 I.5.1 différents types de réseau électrique..... 9

 I.5.1.1 réseaux de transport et d'inter connexion..... 9

 I.5.1.2 réseaux de répartition..... 9

 I.5.1.3 le réseau de distribution..... 9

I.6 perturbation électrique..... 11

I.7 stabilité de réseaux..... 12

 I.7.1 stabilité de l'angle de rotor..... 12

 I.7.2 La stabilité statique..... 12

 I.7.3 La stabilité dynamique..... 13

 I.7.4 La stabilité transitoire 13

 I.7.5 Stabilité de fréquence 13

I.8 Instabilité de la tension..... 14

I.9 Conclusion..... 15

Chapitre II : le concept FACTS.

II.1 Introduction.....	16
II.2 Concept générale, définition et rôle des dispositifs FACTS.....	16
II.3 Classification des dispositifs FACTS.....	18
II.4 Type des dispositifs FACTS.....	19
II.4.1 Compensateurs parallèles.....	19
II.4.1.1 Compensateurs parallèles à base de thyristor.....	20
II.4.1.2 Compensateur parallèles à base de thyristor GTO.....	24
II.4.2 Compensateurs séries.....	26
II.4.2.1 Compensateurs séries à base de thyristor.....	26
II.4.2.2. Compensateurs séries à base de thyristor GTO.....	28
II.4.3 Compensateurs hybrides série-parallèle.....	29
II.4.3.1 Compensateurs hybrides à base de thyristor.....	29
II.4.3.2 Compensateurs hybrides à base de thyristor GTO.....	32
II.5 Propriétés des dispositifs FACTS.....	34
II.5.1 Applications et avantages techniques des différentes technologies des FACTS.....	35
II.6 Conclusion.....	36

Chapitre III : modélisation, réglage et simulation d'un système UPFC simple.

III.1 Introduction.....	37
III.2. Structure du variateur de charge universel (UPFC).....	37
III.3 Principe de fonctionnement.....	38
III.4 Modélisation du système UPFC.....	39
III.4.1 Modélisation de la branche série (UPFC série).....	40
III.4.2 Modélisation de la partie shunt (UPFCshunt).....	42
III.4.3 Modélisation de la branche continue de l'UPFC.....	43
III.5 Modélisation du convertisseur statique.....	44
III.5.1 Modèle de l'onduleur.....	44
III.5.2 La commande MLI sinus triangle.....	47
III.5.3 Caractéristiques de la MLI sinus triangle.....	48
III.5.4 Modélisation de la commande MLI sinus triangle.....	48
III.5.5 Simulation de la commande MLI sinus triangle.....	49
III.6 Structure de réglage et simulation du système UPFC.....	51

III.6.1 Introduction.....	51
III.6.2 Configuration du circuit de réglage.....	51
III.6.3 Description du système de commande de l'UPFC.....	52
III.7 Les schémas de contrôle du système UPFC.....	54
III.7.1 Schéma de contrôle de la branche série.....	54
III.7.2 Le schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC.....	55
III.7.3 Les schémas de contrôle avec régulateur PI-Découplé.....	57
III.7.4 Calcul des régulateurs PI.....	58
III.8 Résultats de simulation du système simple	63
III.8.1 Paramètres du modèle UPFC.....	63
III.8.2 Contrôle de l'UPFC avec PI-D.....	64
III.8.3 Test de robustesse du système UPFC.....	66
III.8.4 Test de stabilité du système UPFC.....	66
III.9 Conclusion.....	67

Chapitre IV : commande adaptative direct avec synthèse.

IV.1 Introduction.....	68
IV.2 Le processus à commander.....	68
IV.3 Commande adaptative des systèmes.....	69
IV.3.1 Généralité sur la commande adaptative.....	69
IV.3.2 Principe de commande adaptative.....	69
IV.4 Classification des approches de la commande adaptative.....	70
IV.4.1 Commande adaptative directe (Direct adaptive control)	70
IV.4.2 Commande adaptative indirecte (Indirect adaptive control)	71
IV.5 Commande Adaptative à modèle de référence (MRAC).....	71
IV.5.1 Synthèse de MRAC par l'approche de gradient (MIT).....	72
IV.5.2 Synthèse de MRAC par l'approche de la théorie de la stabilité de Lyapunov.....	77
IV.6 Résultats de simulations du système par l'application la command adaptative (MRAC).....	78
IV.7 Synthèse entre le régulateur classique PI-Découplé et CAMR.....	80
IV.8 Conclusion.....	81
Conclusion générale.....	82

Liste des figures

Chapitre I : influence du facteur de puissance sur le réseau électrique et technique d'amélioration de la stabilité.

Figure (I.1) : Angle de déphasage	3
Figure (I.2) : Diagramme d'Energie	4
Figure (I.3) : diagramme de puissance	6
Figure (I.4) : Schéma simplifier qui représente un réseau électrique	10
Figure (I.5) : Schéma des trois types de structure d'un réseau électrique	10
Figure (I.6) : classifications des différents types de stabilité	14

Chapitre II : le concept FACTS.

Figure (II.1) : Système avec un compensateur parallèle	20
Figure (II.2) : Schéma de TCR	20
Figure (II.3) : Schéma du TSR	21
Figure (II.4) : Schéma d'un TSC	22
Figure (II.5) : Schéma d'un SVC avec leur photo	23
Figure (II.6) : Structure du TCBR	23
Figure (II.7) : Schéma de base d'un STATCOM avec leur photo	25
Figure (II.8) : Système avec un compensateur série	26
Figure (II.9) : Schéma du TCSC avec leur photo	27
Figure (II.10) : Schéma du TSSC	27
Figure (II.11) : Schéma du TCSR	28
Figure (II.12) : Schéma du SSSC	29
Figure (II.13) : Schéma du DPFC	30
Figure (II.14) : Schéma du TCPST	30
Figure (II.15) : Schéma du TCPAR	31
Figure (II.16) : Schéma du TCVR	32
Figure (II.17) : Schéma de l'IPFC	33

Chapitre III : modélisation, réglage et simulation d'un système UPFC simple.

Figure (II.18) : Schéma de l'UPFC	33
Figure (III.01) : variation statique de charge universelle à l'aide de deux onduleurs	38
Figure (III.02) : Mode de fonctionnement d'un UPFC	38
Figure (III.03) : Circuit équivalent simplifié du système UPFC	40
Figure (III.4) : Modèle mathématique du système de l'UPFC série	42
Figure (III.5) : Modèle mathématique du système de l'UPFC parallèle	43
Figure (III.6) : Schéma de principe de l'onduleur à MLI	45
Figure (III.7) : Model sous SIMULINK de l'onduleur de tension à deux niveaux	46
Figure (III.8) : Principe de la commande MLI sinus-triangle	47
Figure (III.9) : Modèle sous SIMULINK de la commande MLI sinus triangle	49
Figure (III.10) : Principe de la commande MLI sinus-triangle et enveloppes de tension	50
Figure (III.11) : Schéma de contrôle de l'UPFC	52
Figure (III.12) : Passage dans le référentiel tournant de la composante équilibrée directe	52
Figure (III.13) : Schéma de contrôle de la branche série de l'UPFC	52
Figure (III.14) : Schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC	55
Figure (III.15) : Commande PI-Découplé de l'UPFC série	57
Figure (III.16) : Commande PI-Découplé de l'UPFC shunt	57
Figure (III.17) : Structure de réglage de type PI	58
Figure (III.18) : Régulateur PI implanté dans SIMULINK	59
Figure (III.19) : Schéma complet de réglage de l'UPFC implanté dans Simulink.	60
Figure (III.20) : Circuit de commande du système UPFC	62
Figure (III.21) : Puissance active et réactive de référence	63
Figure (III. 22) : Courant Ids et Iqs de référenc	64
Figure (III.23) : Courants de phase (Ids et Iqs)	64
Figure (III.24) : Réponse des puissances avec un découplage parfait (avec la commande MLI)	65
Figure (III.25) : La tensions Vc	65
Figure (III.26) : Réponse des puissances aux variations de la réactance	66
Figure (III.27) : Système UPFC perturbé.	67

Chapitre IV : commande adaptative direct avec synthèse.

Figure(IV.1) : Le processus à commander	68
Figure (IV.2) : Schéma de principe de la commande adaptative directe	70
Figure (IV.3) : Schéma de principe de la commande adaptative indirecte	71
Figure (IV.4) : Structure de la commande adaptative directe a model de référence (MRAC)	72
Figure (IV.5) : Schéma fonctionnel de la représentation d'état de l'UPFC	73
Figure (IV.6) : Erreur de poursuite	74
Figure (IV.7) : Schéma bloc des lois d'adaptation t_0 et s_0 du système	76
Figure (IV.8) : Courants de phase (I_{ds} et I_{qs})	78
Figure (IV.9) : Réponse des puissances avec un découplage parfait (avec la commande adaptative directe)	78
Figure (IV.10) : Réponse des puissances aux variations de la réactance	79
Figure (IV.11) : Réponse des puissances pour un système perturbé	79
Figure (IV.12) : les puissances actives commandés par (PI-D et CAMR)	80
Figure (IV.13) : les puissances réactives commandés par (PI-D et CAMR)	80

Liste des tableaux

Chapitre I : influence du facteur de puissance sur le réseau électrique et technique d'amélioration de la stabilité.

Tableau (I.1) : Tableau qui contient les plus importantes perturbations 11

Chapitre II : le concept FACTS.

Tableau (II.1) : Classification des dispositifs FACTS 18

Tableau (II.2) : Bénéfices techniques des dispositifs FACTS 36

Liste des symboles

V_s : tension du réseau (départ)

V_r : tension du réseau (arrivé).

V_{dc} : tension continue.

F : fréquence de réseau.

r : la résistance de le ligne.

L : l'inductance de la ligne.

r_p : les chutes de tension du compensateur parallèle.

L_p : l'inductance de fuit du transformateur parallèle.

C : la capacité du circuit commun.

f_p : le fréquence de la porteuse.

v_p : l'amplitude de la porteuse.

f_f : la fréquence de fondamentale.

V_r : l'amplitude de l'onde de référence.

V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} : tension à la sortie de l'onduleur.

V_p : la tension de compensation parallèle.

i_{pa}, i_{pb}, i_{pc} : les courants de l'UPFC parallèle.

V_{pa}, V_{pb}, V_{pc} : les tensions de l'UPFC parallèle.

P : la puissance active.

Q : la puissance réactive.

P^* : puissance da référence active.

Q^* : puissance da référence réactive.

i_d^*, i_q^* : les courants de référence de la ligne.

V_s : Tension de la source Tension de la charge

K_p : Constante proportionnel.

K_i : Constante intégrale.

d (indice) : La composante sur l'axe d du repère $(d-q)$.

q (indice) : La composante sur l'axe q du repère $(d-q)$.

I_s : Courant inverse de saturation de la diode.

V : Tension de sortie.

Liste des symboles

$p.u$ (indice) : La grandeur en unité relative (grandeur réduite).

y_c : Représente la référence

y_m : Sortie du modèle de référence (désirée)

e : Erreur entre sortie du système et celle désirée.

t_0, s_0 : les lois d'adaptation.

Liste des acronymes

FACTS : Flexible Alternating Current Transmission Systems.

GTO : Gate Turn Off.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistors.

IPFC : Interline Power Flow Controller.

PI : Proportionnel Intégral.

STATCOM : Static Synchronous Compensator.

SSSC : Static Synchronous Series Compensator.

SVC : Static Var Compensator.

TCPAR : Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.

TCR : Thyristor Controlled Reactor.

TSC : Thyristor Switched Capacitor.

TCSR : Thyristor Controlled Series Reactor.

TCSC : Thyristor Controlled Series Capacitor.

UPFC : Unified Power Flow Controller

MLI : Modulation par Largeur d'Impulsion.

IEEE : Institut des Ingénieurs en Electricité et en Electronique

DC : Direct Current .

AC : Alternatif Current.

TCBR : Thyristor Control Breaking Resistor.

TCSC : Thyristor Controlled Series Compensator.

TSSC : Thyristor Switched Series Capacitor.

TSSR : Thyristor Switched Series Reactor.

DPFC : Distributed Power-Flow Controller.

TCPST : Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer.

TCVR : Thyristor Controlled Voltage Regulator .

THT : Très Haute Tension.

HT : Haute Tension.

MT : Moyenne Tension.

BT : Basse Tension.

Liste des acronymes

IGCT : Insulated Gate Commutated Thyristors.

CVR : (Thyristor Controlled Voltage Regulator)

SVC : (Static Var Compensator).

MRAC : Model Reference Adaptive Control.

MIT : Massachusetts Institute of Technology.

Introduction générale

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc..., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui nécessaire d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

D'autre part, la profonde restructuration du secteur de l'énergie électrique, sur laquelle viennent se greffer de nouvelles contraintes en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'utilisation de source d'énergie renouvelables, conduit véritablement à un nouveau paradigme pour la gestion et la conduite des réseaux électriques. Cette profonde mutation intervient alors que les réseaux mondiaux ont déjà connu ces dernières années un accroissement considérable des interconnexions à travers les continents.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateurs à prise réglables en charge, transformateur déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteur, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lent et insuffisant pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu des nouvelles contraintes. Il faudra vraisemblablement dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) pour le contrôle des réseaux. Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) est l'un des plus performants dispositifs FACTS. Il est capable de contrôler,

simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. L'efficacité de l'UPFC pour améliorer les performances et la stabilité du réseau en présence de perturbations inévitables telles que les courts-circuits, les indisponibilités momentanées de lignes, de générateurs ou de transformateurs.

L'UPFC, est un processus industriel très complexe, a été conçu pour être un dispositif à plusieurs entrées et plusieurs sorties car les deux convertisseurs série et parallèle sont connectés d'un côté à la ligne de transmission et de l'autre côté au circuit continu. Cette complexité peut être due aux fortes interactions entre les boucles de contrôle et aux dynamiques des chaînes individuelles. Ces interactions peuvent créer des dynamiques compliquées quand les chaînes sont bouclées. Alors le contrôle multi-boucles s'avèrent inadéquat et mène à de faibles performances du système.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier 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 adaptative directe du système.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres principaux :

- Un rappel sur les notions de base de l'électricité avec perturbation et la stabilité des réseaux électriques est abordé au premier chapitre, ainsi que l'impact de différents types de défaut sur la stabilité de réseau.
- Dans le deuxième chapitre on va donner des généralités sur les nouvelles techniques de compensation dynamiques FACTS, des définitions de bases, les différentes classes de la technologie FACTS ...etc.
- Et le troisième chapitre contient une étude et modélisation d'un dispositif FACTS puissant ; l'UPFC (Unified Power Flow Controller) le compensateur hybride avec réglage de ce système avec simulation de groupe par un régulateur classique PI-Découplé.
- Et dans le quatrième et dernier chapitre on va commander le système UPFC par une commande adaptative directe puis une comparaison commande par un régulateur PI-découplé on utilise le logiciel MATLAB/SIMULINK.
- Et enfin je termine ce travail avec une conclusion générale et perspective

Chapitre I

Influence du facteur de puissance sur le réseau électrique et technique d'amélioration de la stabilité

Chapitre I

Influence du facteur de puissance sur le réseau électrique et technique d'amélioration de la stabilité

I.1 Introduction :

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents consommateurs d'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie doit être fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus perturbateur.

Pour faire face à ce problème, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations des réseaux électriques et de chercher les solutions appropriées permettant l'atténuation des effets les plus nuisibles. Donc l'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique tel que le facteur de puissance.

Dans ce chapitre on va discuter sur l'influence du facteur de puissance et classer les différentes perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique et exposer leurs causes et leurs conséquences. Ainsi les solutions de dépollution existantes et la stabilité de réseau électrique.

I.2 Déphasage, Energie et puissance : [1]

I.2.1 Déphasage

Une installation électrique, en courant alternatif, comprenant des récepteurs tels que transformateur, moteur, soudeuse, électronique de puissance..., et en particulier, tout récepteur dont l'intensité est déphasée par rapport à la tension, absorbe une énergie totale que l'on appelle énergie apparente.

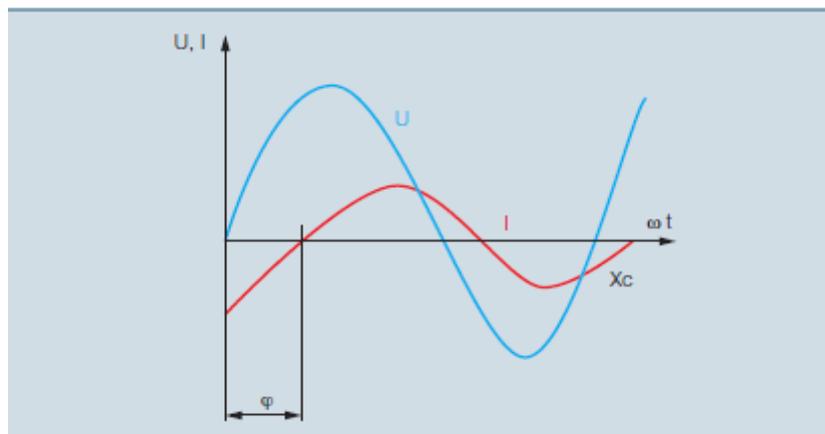


Figure (I.1) : Angle de déphasage

L'angle φ est le déphasage entre la tension U et le courant I

I.2.2 Energie :

Cette énergie, qui s'exprime généralement en kilovolt ampère-heure (kVAh), correspond à la puissance apparente S (kVA) et se répartit comme suit :

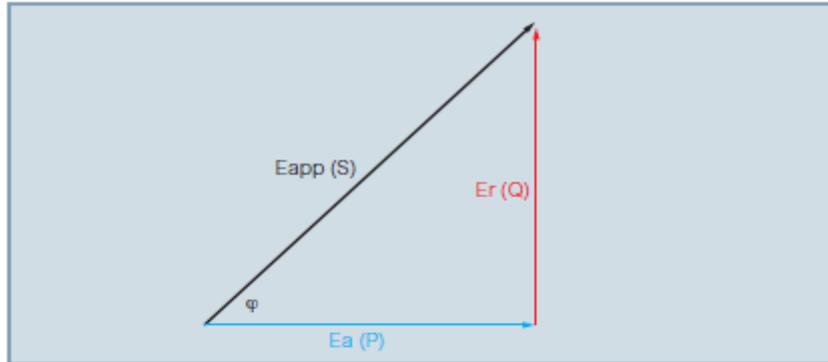


Figure (I.2) : Diagramme d'Energie

- ❖ **Energie active** : exprimée en kilowatt heure (kWh). Elle est utilisable, après transformation par le récepteur, sous forme de travail ou de chaleur. À cette énergie correspond la puissance active P (kW).
- ❖ **Energie réactive** : exprimée en kilo var heure (var h). Elle sert en particulier à créer dans les bobinages des moteurs, transformateurs, le champ magnétique sans lequel le fonctionnement serait impossible.

À cette énergie correspond la puissance réactive Q (kVAr). Contrairement à la précédente, cette énergie est dite « improductive » pour l'utilisateur.

$$E_{app} = E_a + E_r \quad (I.1)$$

$$E_{app} = \sqrt{(E_a)^2 + (E_r)^2} \quad (I.2)$$

I.2.3 Puissance

$$S = P + Q \quad (I.3)$$

$$S = \sqrt{(P)^2 + (Q)^2} \quad (I.4)$$

En réseau triphasé :

$$S = \sqrt{3} UI \quad (I.5)$$

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (I.6)$$

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad (I.7)$$

En réseau monophasé, le terme $\sqrt{3}$ disparaît.

I.3 Les puissances en régime alternatif : [2] [3]

I.3.1 Puissance active :

La puissance active (ou puissance réelle) correspond à la puissance moyenne fournie au cours d'une période donnée. Notée P, elle est exprimée en watts(W).

Pour un courant $i(t)$ et une tension $v(t)$ de période T, son expression est :

$$P = \frac{1}{T} \int_T v(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (I.8)$$

Pour une tension sinusoïdale de valeur efficace U_{eff} et un courant sinusoïdal de valeur efficace I_{eff} déphasé d'un angle φ par rapport à la tension, cette expression devient :

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi = \frac{U_{max} \cdot I_{max}}{2} \cos \varphi \quad (I.9)$$

En régime sinusoïdal, le rapport entre valeur maximale et efficace vaut $\sqrt{2}$ (voir valeur efficace), $\cos \varphi$ correspond alors au facteur de puissance.

C'est la seule puissance à avoir un sens physique direct :

Par exemple dans le cas d'une résistance la puissance active est également la puissance thermique dissipée. Il n'y a pas de déphasage dans une résistance, donc $\varphi=0$ et $\cos \varphi = 1$.

I.3.2 puissance apparente :

La puissance apparente en régime alternatif est le produit de la valeur efficace de la tension électrique aux bornes du dipôle par la valeur efficace du courant électrique traversant ce dipôle

La puissance apparente se note S et est exprimée en voltampères (VA)

La puissance apparente complexe est :

$$\underline{S} = \underline{U}_{eff} \cdot \underline{I}^*_{eff} = \frac{U \cdot I^*}{2} \quad (I.10)$$

Avec I^* : nombre complexe conjugué de l'intensité complexe I . La puissance apparente réelle est le module de la puissance apparente complexe. Autrement dit, on a :

$$\underline{S} = S \times e^{j\varphi} \quad (I.11)$$

φ étant la différence de phase entre la tension et le courant.

La puissance apparente est définie aussi bien en régime sinusoïdal que dans les autres cas de régimes alternatifs, mais les autres notions développées dans l'article n'ont de sens que dans le cas sinusoïdal.

I.3.3 Puissance réactive :

En régime sinusoïdal, la puissance réactive est la partie imaginaire de la puissance apparente complexe. Elle se note Q , est exprimée en voltampères réactifs et on a :

$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin \varphi \quad (I.12)$$

Les dipôles ayant une impédance dont la valeur est un nombre imaginaire pur (capacité ou inductance) ont une puissance active nulle et une puissance réactive égale en valeur absolue à leur puissance apparente.

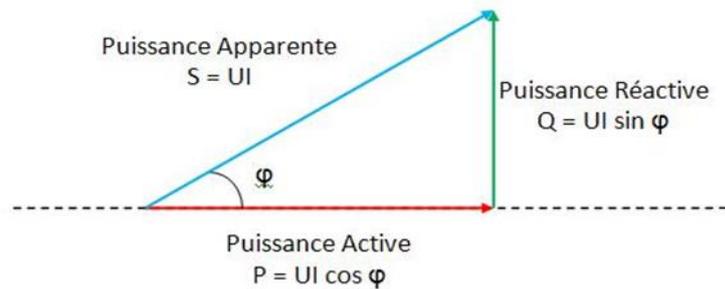


Figure (I.3) : diagramme de puissance

I.4 Le facteur de puissance :

Par définition le facteur de puissance autrement dit le $\cos \varphi$ d'un appareil électrique est égal au rapport de la puissance active P (kw) sur la puissance apparente S (kVA) et peut varier de 0 à 1.

$$\cos \varphi = \frac{P(KW)}{S(KVA)} \quad (I.13)$$

Il permet ainsi d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive.

- Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive (résistance).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductance).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre selon les appareils installés et la manière dont ils sont utilisés (fonctionnement à vide, pleine charge...).

$$\tan \varphi = \frac{E_r(KVArh)}{E_a(KWh)} \quad (I.14)$$

La $\tan \varnothing$ est le quotient entre l'énergie réactive E_r (kVAh) et l'énergie active E_a (kWh) consommées pendant la même période.

À l'inverse du $\cos \varnothing$, on s'aperçoit facilement que la valeur de la $\tan \varnothing$ doit être le plus petit possible, afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive.

$\cos \varnothing$ et $\tan \varnothing$ sont liés par la relation suivante :

$$\cos \varnothing = \frac{1}{\sqrt{1+(\tan \varnothing)^2}} \quad (I.15)$$

Les récepteurs consommant le plus d'énergie réactive sont :

- ❖ Les moteurs à faible charge,
- ❖ Les machines à souder,
- ❖ Les fours à arc et induction,
- ❖ Les redresseurs de puissance.

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation d'énergie réactive. } La diminution de la puissance souscrite en kVA.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte-tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire.

Un bon facteur de puissance c'est :

- $\cos \varnothing$ élevé (proche de 1)
- Ou $\tan \varnothing$ faible (proche de 0)

I.4.1 Les avantages d'un facteur de puissance :

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- ❖ La suppression de la facturation d'énergie réactive
- ❖ La diminution de la puissance souscrite en kVA
- ❖ La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte-tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation
- ❖ L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne

- ❖ L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire

I.4.2 Inconvénient d'avoir un mauvais facteur de puissance :

Le producteur de l'énergie électrique ou le distributeur doit satisfaire la demande de sa clientèle aussi bien en énergie active, qui sert à magnétiser les circuits magnétiques de toutes les machines dont le principe est basé sur l'interaction des champs magnétiques,

Hormis son rôle important dans le fonctionnement de certaines machines électriques, l'énergie réactive est un élément très gênant dans les réseaux

En effet sa circulation dans les lignes de distribution entraîne :

- ✓ Des surcharges au niveau des transformateurs
- ✓ Une augmentation des pertes par effet joule dans les câbles
- ✓ Une chute de tension

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 coupures 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.

I.5 Définition d'un réseau électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétique plus ou moins disponible 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. 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.5.1 Différents types des réseaux électriques :

Le réseau électrique est réparti en trois parties :

I.5.1.1 Réseaux de transport et d'interconnexion :

Les réseaux de transport et d'interconnexion sont de type maillé leur principe est de :

- ✓ Collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les consommateurs (fonction transport).
- ✓ Permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion).

I.5.1.2 Réseaux de répartition :

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour mission :

- ✓ De répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions.
- ✓ Alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension. Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres.

I.5.1.3 Le réseau de distribution :

La troisième et dernière subdivision est le réseau de distribution. Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution. Ce réseau est composé de

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

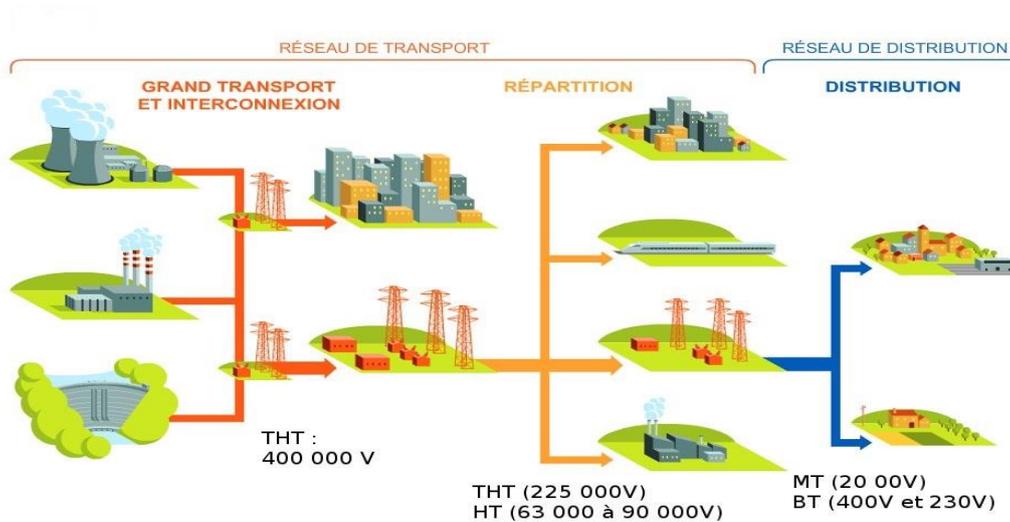


Figure (I.4) : Schéma simplifié qui représente un réseau électrique.

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées dans la figure (I.2) :

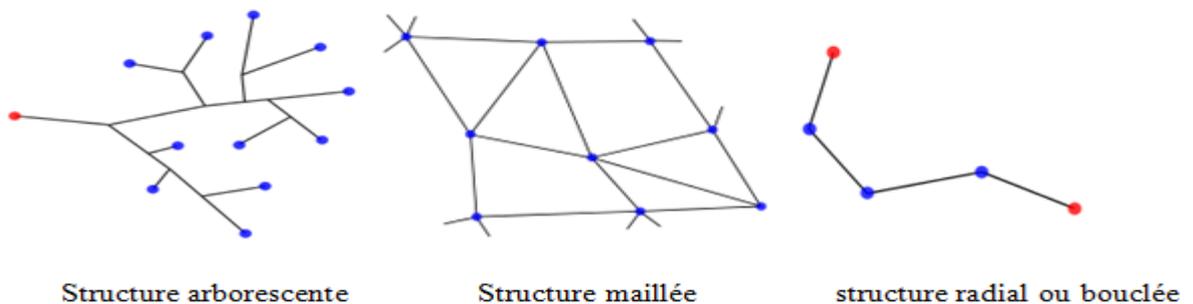


Figure (I.5) : schéma des trois types de structure d'un réseau électrique.

Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure. Dans les niveaux de tension les plus élevés, on utilise la structure maillée : c'est le réseau de transport.

Dans les niveaux de tension inférieurs, la structure bouclée est utilisée en parallèle de la structure maillée : c'est le réseau de répartition.

Enfin, pour les plus bas niveaux de tension, la structure arborescente est quasiment exclusivement utilisée : c'est le réseau de distribution.

La qualité de l'énergie est un concept large qui recouvre à la fois la continuité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde tension et la qualité des courants. Les facteurs qui

peuvent affecter la qualité de l'énergie sont la variation de fréquence, les fluctuations de tension, les creux de tension, les courants ou tensions harmoniques et le déséquilibre.

I.6 Perturbation électrique : [4]

Tout phénomène perturbateur qui fait sortir l'onde de tension (ou de courant) du secteur de ses caractéristiques nominales, il existe plusieurs phénomènes perturbateurs voici un tableau qui contient les plus important, voir tableau (I.1).

Nom de perturbation	Définition	Origine
Harmonique :	Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de fréquence fondamentale.	Proviennent principalement des charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente
Creux de tension :	Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique.	A cause des défauts sur le réseau (réenclenchement, permutations des transformateurs ou de ligne, lors de défaut à arc intermittents, de cycle de déclenchement-réenclenchement automatiques
Surtension :	Une Surtension est toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou spécification il existe 3 natures (temporaires ; de manœuvre ; atmosphérique).	Les décharges atmosphériques produisent des pics de tension dans le signal : Les relais : interrupteurs, commutateurs sont aussi des générateurs de surtensions.
Variation de tension :	Les variations de tensions sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10% de la tension nominale.	Causées par la variation lente des charges connectées au réseau.
Fluctuations de tension :	Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoire de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation de tension et l'amplitude.	Principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder ; les fours à arc...

Tableau (I.1) : Tableau qui contient les plus importantes perturbations.

I.7 Stabilité des réseaux : [4] [5]

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.

Qu'est-ce qu'une stabilité d'un réseau électrique ?

✓ La stabilité d'un système de puissance peut être globalement définie comme étant la propriété d'un système d'énergie électrique qui lui permet de rester dans un état d'équilibre d'exploitation dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un nouvel état d'équilibre acceptable après avoir été soumis à une perturbation. Suivant la nature et l'amplitude de la perturbation, on distingue trois types de stabilité figure (I.4) : La stabilité de tension, La stabilité de fréquence, et la stabilité de l'angle de rotor.

I.7.1 Stabilité de l'angle de rotor :

La stabilité de l'angle de rotor est la capacité des alternateurs d'un réseau électrique interconnecté de rester en synchronisme suite à une perturbation. Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque alternateur dans le système. L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs.

I.7.2 La stabilité statique :

À la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint son régime permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : état instable ou état d'urgence.

Dans un réseau qui est dans un état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires.

Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, l'une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement normal.

Une autre définition peut être donnée à la stabilité statique qui consiste à dire qu'un réseau d'énergie électrique est dit stable en régime statique si suite à une perturbation quelconque infiniment petite, il retrouve un état de marche synchrone, identique ou infiniment voisin de l'état d'origine.

I.7.3 La stabilité dynamique :

À cause d'un changement dans la structure du réseau de petites oscillations apparaissent sur les signaux dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. Dans ce cas nous pouvons utiliser des modèles linéaires afin de simuler le réseau. Les principaux éléments tels que les machines synchrones, les excitatrices, les systèmes de régulation de vitesse, la turbine et le PSS (Power System Stabilizer) dont les dynamiques ne sont pas négligeables seront pris en compte dans ces modèles.

I.7.4 La stabilité transitoire :

Cette stabilité est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude.

Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer :

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines.
- La Perte d'ouvrages
- La Perte de groupes de production, etc.

Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau.

I.7.5 Stabilité de fréquence :

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée. Le maintien de la fréquence à une valeur nominale dans un système de puissance est lié à l'équilibre global entre les puissances actives produites et consommées (y compris les pertes). Autrement dit, suite à certaines perturbations, l'équilibre global des puissances produite-consommée peut être déséquilibré : ce déséquilibre entraîne alors une variation de fréquence.

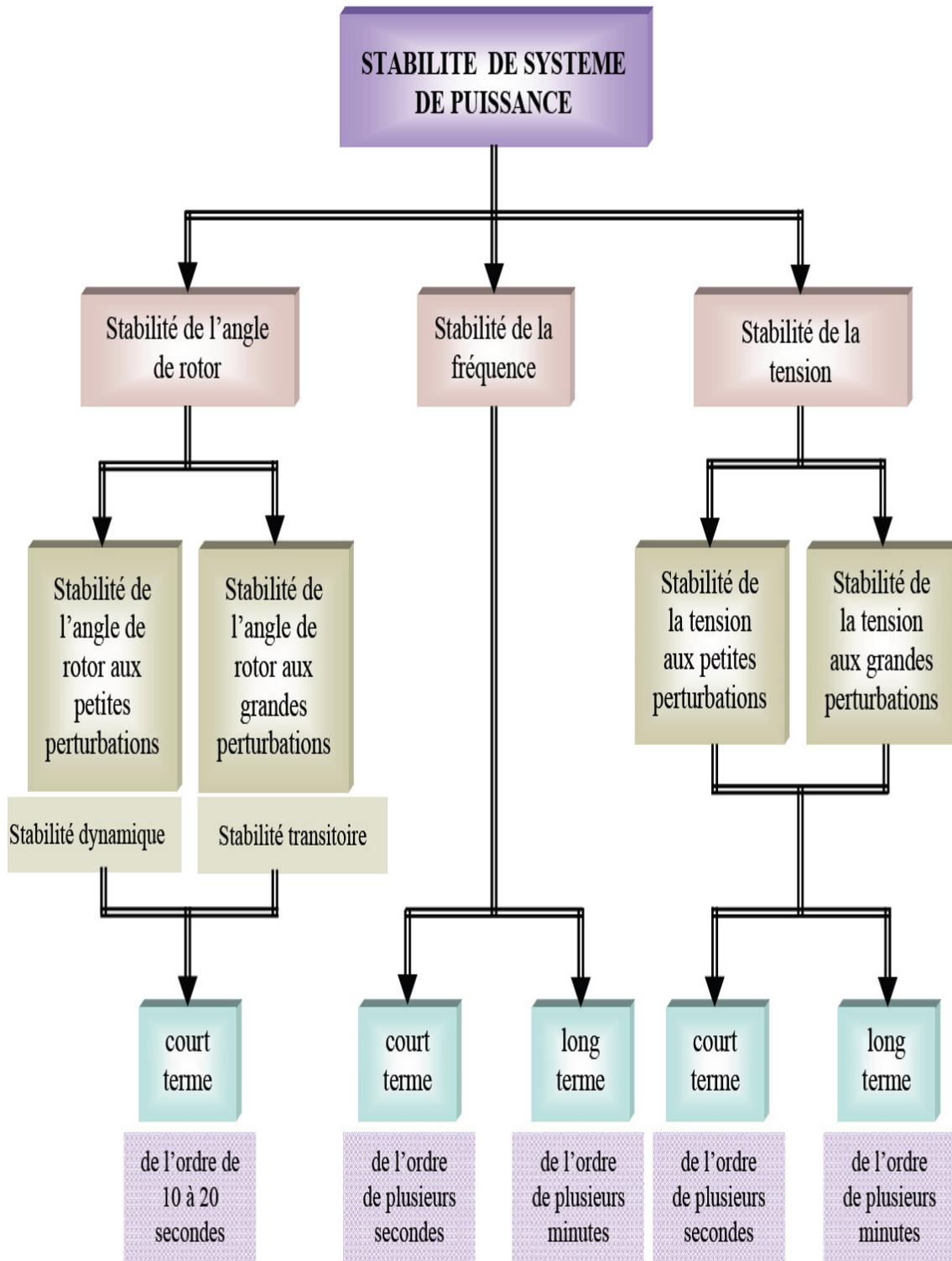


Figure (I.6) : classifications des différents types de stabilité.

I.8 Instabilité de la tension :

L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable de la tension, aboutissant en un effondrement généralisé de la tension. Le phénomène de l'instabilité de la tension est attribuable à l'exploitation du réseau à sa limite de puissance transmissible maximale, à l'insuffisance de dispositifs de compensation de la puissance réactive.

Les principaux facteurs qui contribuent à un effondrement de la tension sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive.

Cette stabilité en régime permanent est aussi influencée par la longueur des lignes de transport : plus la ligne est longue plus la limite de stabilité en régime permanent est faible. Ces deux effets néfastes des longues lignes de transport, sur le taux de régulation de la tension et sur la stabilité du réseau, peuvent être diminués ou même théoriquement éliminés en utilisant des techniques de réglage de la tension.

I.9 Conclusion :

Les effets tels que les creux de tension, la pollution harmonique, les fluctuations de tension (effet Flicker) et les déséquilibres entre les phases sont autant de facteurs perturbants qui dégradent la qualité de l'électricité. Si aucune précaution n'est prise, ces perturbations se propagent sur le réseau et peuvent être sources de gêne pour les utilisateurs ou causer des dommages matériels. Des solutions existent pour améliorer le transfert et la qualité de l'énergie électrique : elles consistent à installer des équipements là où se fait ressentir le besoin comme les systèmes FACTS étudiés dans le deuxième chapitre.

Chapitre II

Le concept FACTS

II.1 Introduction :

Le progrès récent des dispositifs de l'électronique de puissance a engendré des changements majeurs des systèmes électriques et a ouvert une nouvelle perspective d'exploitation des réseaux électriques. Jusqu'à la fin de 1980, les seuls moyens de compensation et de contrôle des réseaux électriques étaient les dispositifs électromécaniques, à savoir les transformateurs avec régulateur de support, les inductances et les condensateurs commutés par des disjoncteurs. Cependant, au cours des dernières années, une autre technique de réglage et de contrôle de la puissance réactive, des tensions et des flux de puissance basés sur l'électronique de puissance connue sous le nom de (Flexible Alternative Currents Transmission Systems (FACTS)). C'est un projet à long terme qui a lancé par la compagnie américaine EPRI en 1988 et qui vise à rendre l'exploitation des réseaux plus flexibles.

Les systèmes FACTS sont des appareils contrôlables de réponse rapide à base d'interrupteurs statiques et de court temps de réponse qui ont été développés pour améliorer les performances de la transmission à courant alternatif sur de longues distances. Ces dispositifs offrent une alternative polyvalente aux méthodes de renforcement conventionnelles avec des avantages potentiels d'une flexibilité accrue, d'un coût réduit et d'un impact environnemental réduit. Afin de stabiliser un système d'alimentation complexe en termes de ST, de contrôler le flux de puissance et d'améliorer l'amortissement des oscillations dans les grands systèmes complexes. [6] [7] [8] [9]

Ce chapitre est consacré sur une présentation générale du concept FACTS, tel que la définition, le rôle, la classification et les différents types des dispositifs FACTS.

II.2 Concept générale, définition et rôle des dispositifs FACTS :

Les dispositifs FACTS sont des compensateurs basés sur l'électronique de puissance pour obtenir une capacité de transfert plus élevée et améliorer la contrôlabilité d'un système existant. En général, ils contrôlent le système d'alimentation en fournissant ou en absorbant dynamiquement la puissance réactive. Comme il n'y a pas de composant mécanique majeur dans les contrôleurs FACTS, ils sont capables de prendre des mesures très rapidement (par exemple 25 ms), ce qui est beaucoup plus rapide que d'autres méthodes de contrôle et d'amélioration de la stabilité des petits signaux du système d'alimentation. Les dispositifs FACTS peuvent être utilisés dans les niveaux de transmission, de sous-transmission et de

Distribution. Dans les niveaux de sous-transmission et de distribution, les dispositifs FACTS sont utilisés pour équilibrer l'alimentation triphasée et améliorer le facteur de puissance. Ces applications ont un effet limité sur le système de transmission. [10]

Le développement des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure exploitation des réseaux par leur action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux soutenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité, la flexibilité et aussi la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques.

La technologie FACTS utilise l'électronique de puissance et plus particulièrement des systèmes à thyristors ou GTO qui permettent d'obtenir des vitesses de commande nettement supérieures à celles des systèmes mécaniques qui sont encore largement utilisés, et un niveau de maintenance bien inférieur car les systèmes mécaniques s'usent beaucoup plus rapidement que les systèmes statiques. [11]

Les dispositifs FACTS peuvent être connectés à des lignes de transmission de diverses formes : certains en série et les autres en parallèle ou une combinaison de séries et parallèles.

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

Les dispositifs FACTS sont utilisés principalement dans les contextes suivants :

- Pour améliorer la commande du réseau. De plus, ils peuvent aussi être munis des circuits de commande auxiliaire visant à améliorer l'amortissement des oscillations de puissance et d'accroître la réserve de ST. [12]
- Ils ont été développés pour améliorer les performances de la transmission du courant alternatif sur de longues distances et le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant la puissance réactive lorsque la tension est trop basse, ou en absorbant la puissance réactive lorsque la tension est trop élevée.
- Ils agissent en contrôlant les transits de puissances et l'impédance série des lignes de transmission et en ajustant l'angle de phase. [13]
- Ces dispositifs offrent des solutions avancées en tant que solutions de rechange utile à la construction de nouvelles lignes de transmission et des avantages potentiels d'une flexibilité accrue, d'un coût et d'un impact environnemental réduit.

- Cette technologie FACTS requis pour les systèmes énergétiques afin d'améliorer les marges de stabilité, de contrôler le flux de puissance et d'assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie pratiquement sans limite.

II.3 Classification des dispositifs FACTS :

Le Tableau II.1 montre la classification des dispositifs FACTS existants. Tandis que, selon leurs structures internes, les dispositifs FACTS peuvent être classés en deux groupes :

- Le premier groupe utilise des impédances réactives ou des transformateurs de prises de courant avec des interrupteurs à thyristors comme éléments contrôlés afin d'obtenir le contrôle désiré sur le flux de puissance. [14]
- Dans le deuxième groupe, une technologie plus avancée de l'électronique de puissance avec des convertisseurs de sources de tension VSC à base des interrupteurs statiques sophistiqués comme le thyristor GTO, IGBT ou bien les IGCT afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau. [15]

Dispositifs FACTS		
	A base de thyristor	A base de convertisseur de tension
Dispositif shunt	Compensateur de puissance réactive statique (SVC)	Compensateur statique synchrone (STATCOM)
Dispositif série	Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)	Compensateur série statique synchrone (SSSC)
Dispositif série-shunt	Contrôleur dynamique de flux de puissance (DPFC)	Contrôleur universel de flux de puissance (UPFC)

Tableau (II.1) : Classification des dispositifs FACTS

Selon leurs styles de connexion au système d'alimentation, les systèmes FACTS peuvent être divisés en trois catégories :

❖ **Dispositifs séries** : ces dispositifs sont connectés en série avec le réseau. Ils pourraient réduire efficacement l'impédance de la ligne de transmission et par conséquent le flux de puissance transféré par la ligne peut être augmenté. Le dispositif FACTS connectés en série comprennent TCSC et SSSC. [16]

❖ **Dispositifs shunts** : sont principalement pour la régulation de la tension des nœuds, la compensation de la puissance réactive et l'amélioration de la stabilité statique et transitoire. Ces équipements étaient constitués

Essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne. Les dispositifs shunts couramment utilisés sont SVC et STATCOM.

❖ **Dispositifs série-shunt (hybrides)** : c'est une combinaison des dispositifs séries et shunts. Ils sont développés dans le but de contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie comprennent DPFC et UPFC. Ces dispositifs sont capables d'équilibrer les flux de puissance dans les systèmes d'alimentation.

II.4 Type des dispositifs FACTS :

II.4.1 Compensateurs parallèles :

Les compensateurs parallèles sont utilisés depuis longtemps dans les réseaux électriques, leurs objectifs principaux sont le contrôle des tensions aux niveaux désirés lorsqu'il y a un changement sur les conditions du système et l'accroissement de la puissance transmissible dans les lignes. Le principe de compensation consiste à fournir ou à absorber de la puissance réactive de façon à modifier les caractéristiques naturelles des lignes pour les rendre plus compatibles avec la charge, de façon que le temps de réponse soit très court, En régime permanent, la compensation réactive est utilisée pour la sectionnalisation des lignes ainsi que le maintien de la tension aux nœuds [17].

En régime transitoire, les dispositifs shunt permettent un contrôle dynamique de la tension pour l'amélioration de la stabilité transitoire et l'amortissement des oscillations de puissance et réduction des oscillations de tension (flicker)

II.4.1.1 Compensateurs parallèles à base de thyristor :

Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif

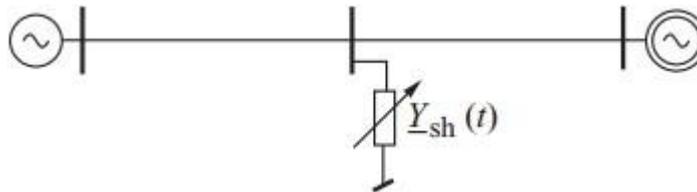


Figure (II.1) : Système avec un compensateur parallèle

- **TCR : (Thyristor Controlled Reactor) :**

Un TCR est un réacteur contrôlé avec un thyristor qui est alloué en parallèle avec le réseau, dont la réactance effective varie de manière continue par une commande de conduction partielle de la valve à thyristors.

Dans ce composant il ya deux thyristor placés en série avec une réactance. Le thyristor est allumé lorsqu'un signal de gachette lui est envoyé, le courant circulera à travers l'inductance et la tension devient plus importante. Un réacteur contrôlé par un thyristor ne peut absorber que la puissance réactive du système. La quantité de réactance peut être contrôlée en continu et la quantité de flux de courant de l'inducteur peut changer entre zéro et une valeur maximale par l'amorçage des thyristors. La Figure II.2 présente le schéma d'un

TCR. Pour générer une puissance réactive continue, trois condensateurs sont connectés en parallèle de façon permanente avec le TCR. Dans ce cas, en ajoutant une inductance en série avec un condensateur. Les harmoniques générées par le TCR peuvent être supprimées.

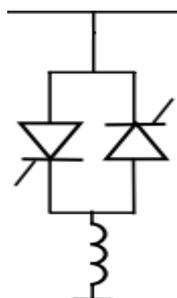


Figure (II.2) : Schéma de TCR

▪ **TSR : (Thyristor switched Reactor) :**

Un TSR est similaire à (TCR). La différence est que dans ce composant, il n'y a pas de contrôle continu de l'angle et il ne fonctionne qu'à 90 et 180 degrés. Cela signifie que les thyristors sont complètement connectés ou déconnectés au réseau. Donc le courant réactif injecté sera une fonction de tension du réseau. Pour obtenir un contrôle par étapes de la consommation de puissance réactive, plusieurs unités de TSR peuvent être connectées au même nœud. La Figure II.3 présente le schéma du TSR.

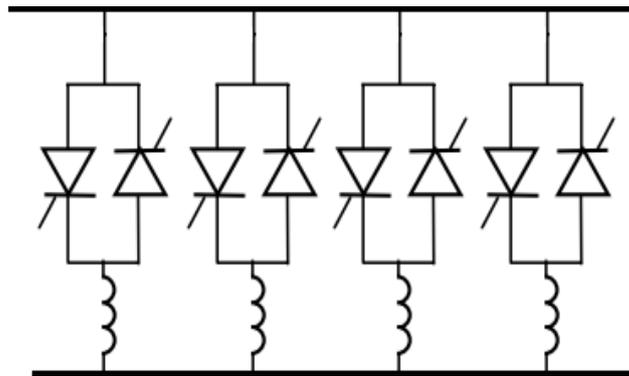


Figure (II.3) Schéma du TSR

▪ **TSC : (Thyristor Switched Capacitor) :**

Un TSC est une capacité parallèle à un thyristor, dont la réactance effective varie de manière progressive par une opération à conduction totale ou nulle de la valve à thyristor. En appliquant le mode marche et arrêt sur le thyristor (sans contrôle de l'angle). La valeur de la réactance peut être contrôlée pas à pas. La Figure II.4 montre le schéma d'un TSC. La structure est composée d'un condensateur placé en série avec deux thyristors montés en parallèles. Le but de l'inducteur dans le composant est de limiter l'effet transitoire des commutateurs et aussi de faire converger le courant et de créer un filtre pour éliminer les harmoniques. La génération d'harmoniques dans un TSC est très faible. Chaque fois que le commutateur à thyristor est activé, le condensateur sera dans le circuit et génère une puissance réactive jusqu'à ce que le signal atteigne la gâchette du thyristor. Un TSC a une structure et un contrôle simples et il est également moins coûteux. Le contrôle de phase peut être réalisé simplement et ce composant ne générera pas d'harmoniques. Ce composant a moins de pertes que les autres modèles. La réponse dynamique d'un TSC est très rapide et mesure environ 0,5 à 1 cycle.

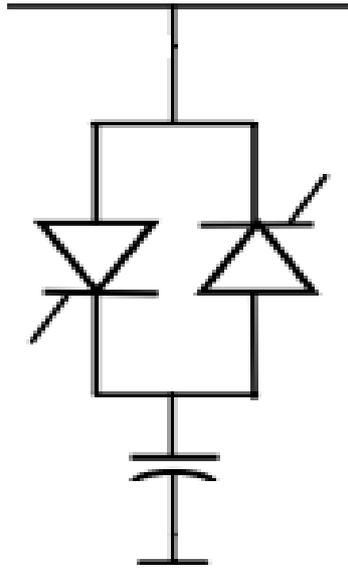


Figure (II.4) : Schéma d'un TSC

- **SVC : (Static Var Compensator) :**

Le SVC est un compensateur parallèle utilisé dans les réseaux de transmission haute tension. C'est un composant électrique qui peut être utilisé comme un condensateur et une inductance variable en fonction de sa capacité dans les réseaux électriques. Il peut avoir deux modes : inductif ou capacitif. Dans sa forme la plus simple, le SVC est un équipement de compensation parallèle constitué d'un ou plusieurs bancs de condensateurs TSC, de réactances TCR et d'un filtre comme le montre la Figure II.6. Fondamentalement, un SVC est un composant qui peut contrôler la tension. Ainsi, un SVC est une sorte de générateur avec une puissance active nulle qui compense la tension à la barre de bus connectée.

D'un point de vue opérationnel, le SVC se comporte comme une réactance variable connectée en parallèle, qui soit génère ou absorbe de la puissance réactive afin de réguler l'amplitude de la tension au point de raccordement au réseau alternatif. Il est largement utilisé pour fournir une puissance réactive rapide et un support de régulation de Tension.

Le contrôle de l'angle d'amorçage du thyristor permet au SVC d'avoir une vitesse de réponse presque instantanée.

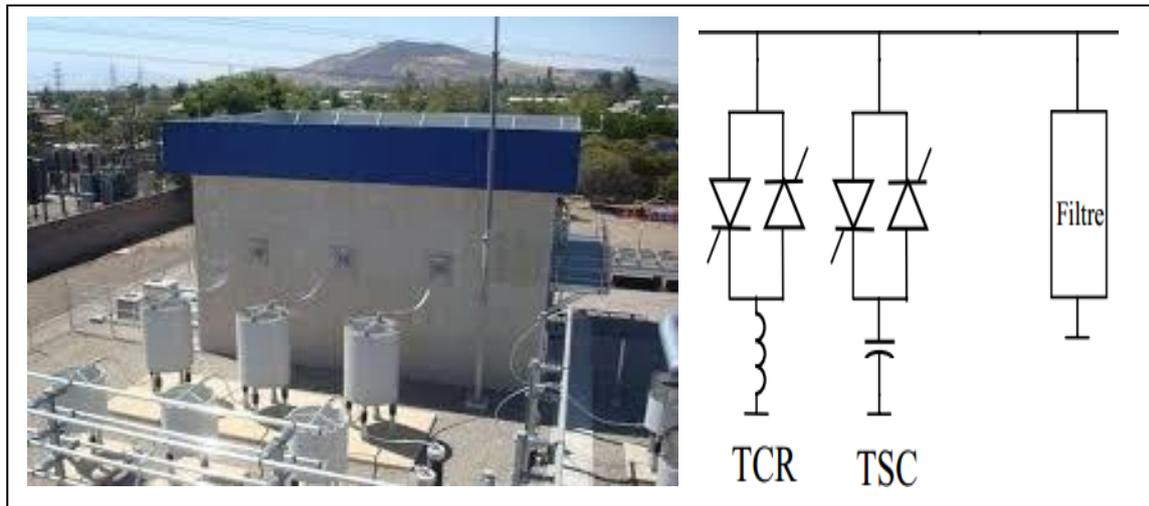


Figure (III.5) : Schéma d'un SVC avec leur photo

Il existe des avantages à utiliser un SVC dans le réseau, y compris : une réponse rapide, une plus grande flexibilité, une bonne sécurité, des phases d'équilibrage, l'élimination de la tension supplémentaire, un fonctionnement rapide, un faible coût de maintenance, un contrôle simple, une augmentation de la ST, la prévention de l'effondrement de la tension, l'amélioration de facteur de puissance, l'amélioration de la qualité de puissance et l'élimination des harmoniques.

▪ **TCBR :(Thyristor Control Breaking Resistor) :**

Un TCBR est commandé pour faciliter la stabilisation d'un système d'alimentation ou pour minimiser l'accélération de la puissance d'une unité de production pendant une perturbation, en absorbant l'énergie électrique d'accélération excédentaire, amortie les oscillations basse fréquence, amortie la résonance sub-synchron et résout de nombreux autres problèmes de stabilité. Avec cet appareil, le contrôle de l'angle d'amorçage est optionnel. [17] Le TCBR est composé d'une résistance en série avec une valve à thyristor bidirectionnelle. La Figure II.6 représente la structure du TCBR.

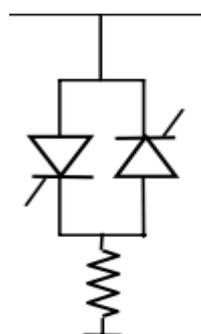


Figure (II.6) : Structure du TCBR

II.4.1.2 Compensateurs parallèles à base de thyristor GTO :

- **STATCOM : (Static Synchronous Compensator) :**

Un STATCOM est l'un des dispositifs FACTS les plus utilisés qui est connecté en parallèle avec le système d'alimentation basé sur un convertisseur de tension et qui régule la tension au point de couplage commun et capable de générer ou d'absorber une puissance réactive. Lors des basses tensions du système, le STATCOM génère de la puissance réactive où il force son contrôleur à fonctionner en zone capacitive. Alors que dans les conditions de haute tension du système, il absorbe la puissance réactive du système où il force le contrôleur à travailler dans la région inductive. [17]

Le STATCOM dispose de deux modes de fonctionnement en régime permanent : inductif et capacitif. Le STATCOM a été largement accepté pour améliorer le fonctionnement du système d'alimentation. Il est constitué d'un seul VSC et de son transformateur connecté en parallèle. La capacité du STATCOM est similaire à celle du condensateur synchrone rotatif ou du compensateur VAR statique (SVC) et est généralement utilisée pour fournir une compensation de puissance réactive pour le support de tension. [18]

Ce composant est capable de contrôler le profil de tension triphasé avec une réponse élevée. Il peut compenser la puissance réactive sans nécessiter de tension du système alternative. La partie principale de ce composant comprend un transformateur avec un convertisseur de source de tension et de réactance basé sur IGBT et un condensateur à courant continu. Le STATCOM utilise un condensateur pour maintenir une tension continue constante pour le fonctionnement de l'onduleur. Fondamentalement, la différence de tension dans la réactance provoque une transaction de puissance réactive entre le STATCOM et les systèmes d'alimentation. En conséquence, il peut ajuster et améliorer le niveau de tension dans le jeu de barre. Le rôle du STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau. Pour cela, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance de fuite du transformateur de couplage. La Figure II.8 montre le schéma de STATCOM.

Ce composant est capable de contrôler le profil de tension triphasé avec une réponse élevée. Il peut compenser la puissance réactive sans nécessiter de tension du système alternative. La partie principale de ce composant comprend un transformateur avec un convertisseur de source de tension et de réactance basé sur IGBT et un condensateur à courant

continu. Le STATCOM utilise un condensateur pour maintenir une tension continue constante pour le fonctionnement de l'onduleur. Fondamentalement, la différence de tension dans la réactance provoque une transaction de puissance réactive entre le STATCOM et les systèmes d'alimentation. En conséquence, il peut ajuster et améliorer le niveau de tension dans le jeu de barre. Le rôle du STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau. Pour cela, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance de fuite du transformateur de couplage. La Figure II.8 montre le schéma de STATCOM.

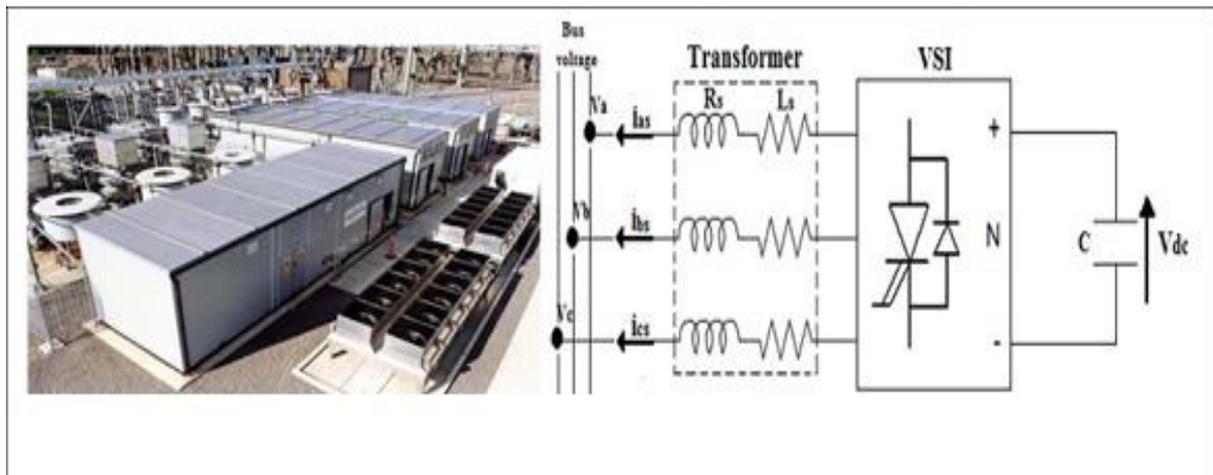


Figure (II.7) : Schéma de base d'un STATCOM avec leur photo

Il existe des avantages à utiliser STATCOM :

- ✓ Contrôle dynamique de la tension.
- ✓ Amélioration de la ST.
- ✓ Élimination des fluctuations de puissance dans les réseaux électriques
- ✓ Contrôle de puissance actif et réactif

Le STATCOM est utilisé comme source de tension synchrone et cette fonctionnalité crée un meilleur fonctionnement et une plus grande flexibilité que SVC. Le STATCOM fonctionnera mieux qu'un SVC pour fournir une tension sous la grande quantité de perturbations dans les systèmes d'alimentation. La capacité de STATCOM à protéger le courant de sortie du condensateur lors d'une situation de faible tension rend ce composant fonctionnant mieux qu'un SVC par rapport à la ST du système. L'une des fonctionnalités les plus importantes de cet appareil est d'améliorer la qualité de la puissance. Le fonctionnement du STATCOM dans la plupart des cas est similaire à celui d'un onduleur, qui change le courant continu en courant alternatif. Chaque fois que la tension du système diminue en raison de la demande

supplémentaire, le STATCOM agira comme un générateur de puissance actif et injectera une partie de l'énergie active requise dans le réseau. La puissance réactive générée du STATCOM dépend du niveau de tension de jeu de barre connectée, ce qui rend plus compliqué. Mais la puissance réactive maximale générée par le STATCOM est indépendante du niveau de tension, donc, dans une situation critique, il peut sauver le système de l'effondrement de la tension.

Un STATCOM peut également être utilisé comme un filtre actif pour réduire les harmoniques dans le réseau. Il peut fournir un support de la puissance active en plus d'améliorer l'équilibre de la puissance réactive dans le système.

II.4.2 Compensateurs séries :

Les dispositifs FACTS de compensation série sont des impédances variables (inductives, capacitives) ou des sources de tensions variables employées afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne, Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser la chute de tension inductive.

Leurs applications principales sont :

- ✓ La commande statique et dynamique des flux de puissances ;
- ✓ Amélioration de la stabilité angulaire ;
- ✓ L'amortissement des oscillations de puissance ;
- ✓ L'équilibrage des flux de charge dans les réseaux de transport ;
- ✓ Réduction des problèmes dus aux phénomènes de résonance sub synchrone ;
- ✓ Prévention des risques de rupture des arbres mécaniques,

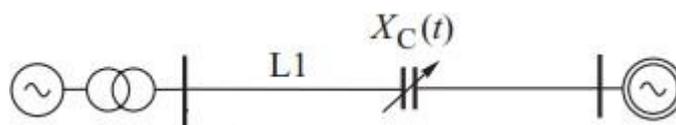


Figure (II.8) : Système avec un compensateur série

II.4.2.1 Compensateurs séries à base de thyristor :

▪ TCSC : (Thyristor Control Series Compensation) :

La capacité série commandée par thyristor (TCSC : Thyristors Controlled Series Compensator) est un dispositif de compensation série utilise l'électronique de puissance comme élément de base. Elle connecte en série avec le réseau pour contrôler le transit de puissance, l'amortissement de résonance sub-synchrone et des oscillations de puissance. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.

Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont :

- ✓ Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- ✓ Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.
- ✓ Réduction des risques de résonance hypo-synchrone.

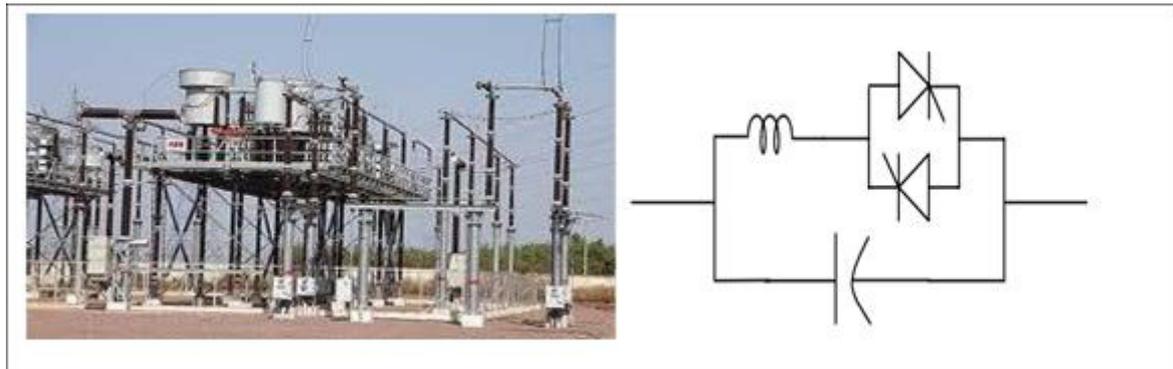


Figure (II.9) : Schéma du TCSC avec leur photo

▪ **TSSC : (Thyristor Switched Series Capacitor) :**

IEEE définit le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) comme un compensateur capacitif qui se compose de plusieurs condensateurs en série. Chaque condensateur commandé par un commutateur de thyristor qui assure une compensation par palier. Le Compensateur série commuté par thyristor TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor), est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. Il est constitué de plusieurs capacités montées en série, chacun étant shunté par une valve à thyristors montée en dérivation. La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° .

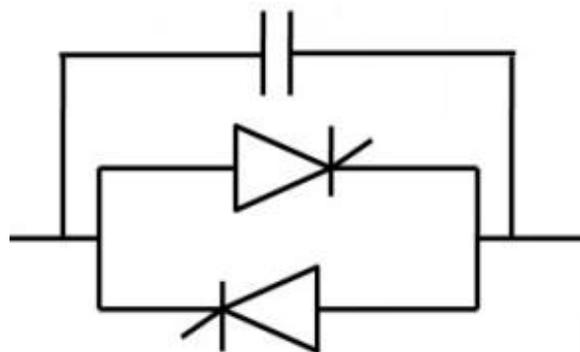


Figure (II.10) : Schéma du TSSC

▪ **TCSR : (Thyristor Controlled Series Reactor) :**

TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor (Figure II.11) afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

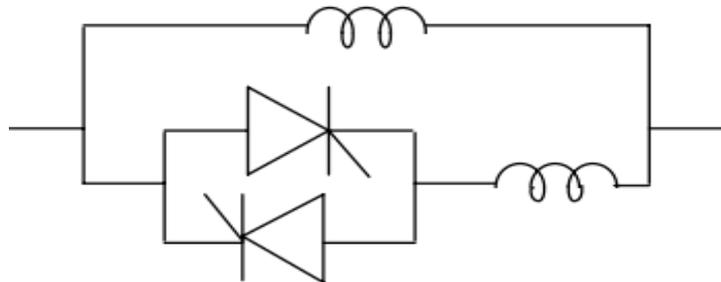


Figure (II.11) : Schéma du TCSR

▪ **TSSR : (Thyristor Switched Series Reactor) :**

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

La différence entre le TSSR et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de 90 ° soit de 180°.

II.4.2.2. Compensateurs séries à base de thyristor GTO :

▪ **SSSC : (Static Synchronous Series Compensator) :**

Le SSSC est un dispositif FACTS série basé sur VSC qui peut fournir une compensation capacitive ou inductive indépendante du courant de ligne. Le SSSC a généralement la même topologie électronique de puissance que le STATCOM. Cependant, il est incorporé dans le système de courant alternatif à travers un transformateur de couplage en série, par opposition au transformateur de shunt trouvé dans le STATCOM. Le transformateur série est utilisé pour injecter une tension commandée indépendamment en quadrature avec le courant de ligne dans le but d'augmenter ou de diminuer la chute de tension réactive globale à travers la ligne et ainsi contrôler le flux de puissance à travers la ligne de transmission. En raison de la capacité de la SSSC à générer ou à absorber de l'énergie réactive, il rend le système électrique environnant imperméable aux résonances sub-synchrones classiques. La Figure II.12 représente le schéma du SSSC.

Cette approche est en fait l'une des approches les plus fondamentales de la mise en œuvre des dispositifs FACTS. Essentiellement, le SSSC est un générateur qui fonctionne sans source d'énergie extérieure en tant que compensateur série et la technique peut impliquer l'équipement d'absorption d'énergie, le stockage nominal de l'énergie, ou une autre compensation de la puissance réelle pour améliorer le comportement dynamique du système d'alimentation et augmenter.

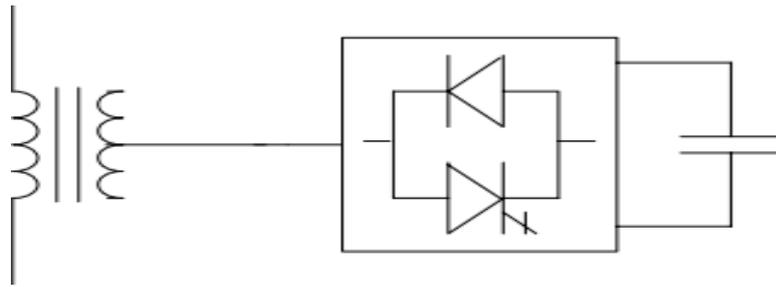


Figure (II.12) : Schéma du SSSC

II.4.3 Compensateurs hybrides série-parallèle :

II.4.3.1 Compensateurs hybrides à base de thyristor :

- **DPFC : (Distributed Power-Flow Controller) :**

DPFC est dérivé de l'UPFC. La même chose que l'UPFC, le DPFC est capable de contrôler tous les paramètres du système. Le DPFC élimine la liaison DC commune entre les convertisseurs shunt et série. L'échange de puissance active entre le convertisseur shunt et série passe par la ligne de transmission à la fréquence du troisième harmonique. En comparant avec l'UPFC, le DPFC présente deux avantages majeurs : un faible coût en raison de l'isolation basse tension et de la faible classification des composants du convertisseur série et une haute fiabilité en raison de la redondance des convertisseurs série. L'isolation basse tension et de la faible classification des composants du convertisseur série et une haute fiabilité en raison de la redondance des convertisseurs série.

Le DPFC se compose d'un shunt et plusieurs convertisseurs montés en série. Le convertisseur shunt est similaire à un STATCOM, tandis que le convertisseur série utilise le concept D-FACTS, qui consiste à utiliser plusieurs convertisseurs monophasés au lieu d'un grand convertisseur nominal. Chaque convertisseur dans le DPFC est indépendant et possède son propre condensateur continu pour fournir la tension continue requise. La configuration du DPFC est illustrée à la Figure II.13. [6] [19]

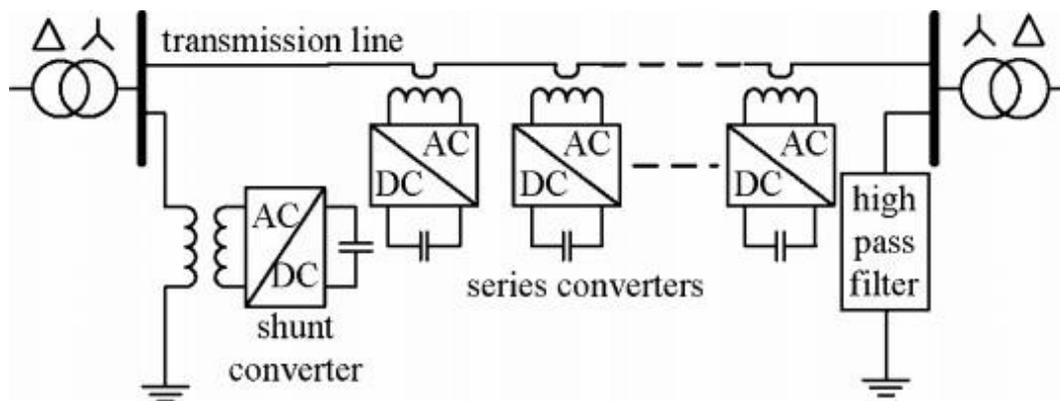


Figure (II.13) : schéma du DPFC

▪ **TCPST : (Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer) :**

TCPST ajusté par des commutateurs à thyristors pour fournir un angle de phase de la tension rapidement variable à travers la ligne de transmission pour réguler la puissance (Figure II.14). Un TCPST comprend généralement deux transformateurs, un transformateur d'excitation parallèle et un transformateur de surtension pour effectuer un déphasage de tension.

TCPST est utilisé pour contrôler le flux de puissance active en mettant l'accent sur la régulation de tension à travers l'injection d'angle de phase de la tension qui est en série avec la ligne de transmission. TCPST assurent un fonctionnement flexible et économique du réseau électrique en optimisant la capacité de flux de puissance sans construire de nouvelles lignes de transmission ou de production d'électricité, car celles-ci dépendent beaucoup d'argent et de temps et en améliorant la stabilité du système.

Par conséquent, en utilisant ce dispositif, nous pouvons facilement augmenter ou diminuer les angles des tensions de jeu de barre. Le TCPST est modélisé par un déphaseur idéal avec une impédance série égale à zéro.

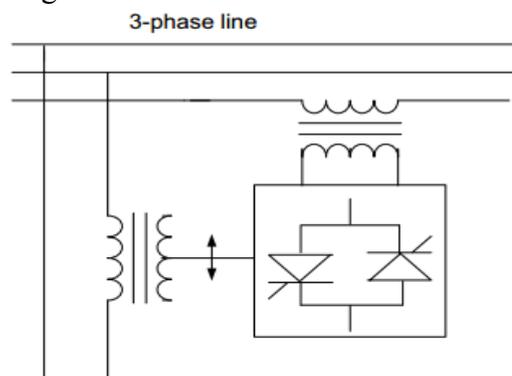


Figure (II.14) : Schéma du TCPST

▪ **TCPAR : (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) :**

TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régleur en charge (LTC ; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier possède différents rapports de transformation (n_1, n_2, n_3). Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire des thyristors. Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension en quadrature avec la tension à déphaser. Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, seule une étude est actuellement menée afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nordouest du Minnesota et du nord de l'Ontario.

Il a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction. Par contre comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'y adjoindre un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation. L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation

Sont n_1, n_2, n_3 . Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre 27 valeurs différentes

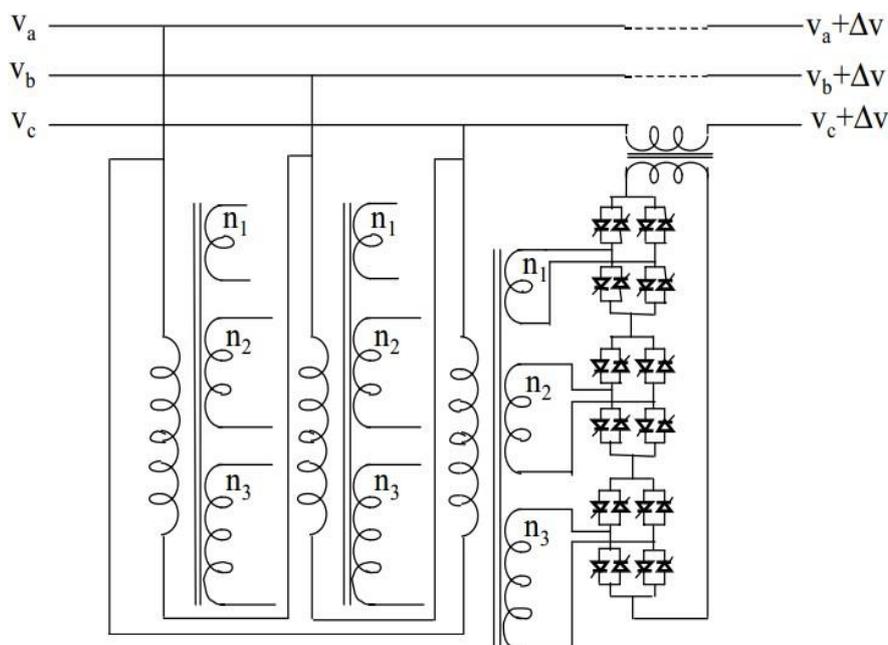


Figure (II.15) : Schéma du TCPAR

▪ **CVR : (Thyristor Controlled Voltage Regulator) :**

TCVR est utilisé pour modifier l'amplitude de la tension de bus en insérant une tension en phase dans la branche adjacente ainsi que pour la Libération des capacités d'absorption réactive des machines synchrones. Pour la modélisation, nous pouvons représenter cet appareil par un transformateur de chargeur de prises idéal sans impédance série.

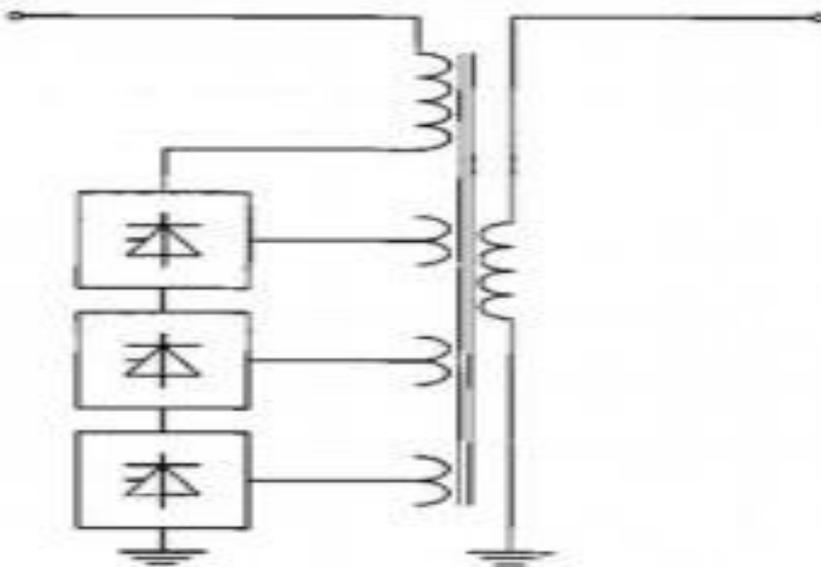


Figure (II.16) : Schéma du TCVR

II.4.3.2 Compensateurs hybrides à base de thyristor GTO :

▪ **IPFC : (Interline Power Flow Controller) :**

L'IPFC est parmi de nombreuses configurations possibles du dispositif FACTS multiconvertisseur. L'IPFC est un équipement série qui sert à contrôler à la fois la puissance réactive et active à travers leurs phases et qui se compose de deux VSC série dont les condensateurs DC sont couplés dans une liaison à courant continu commune. Cela permet à la puissance active de circuler entre les VSC et ainsi entre les injections de tension en série dans les lignes. L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC (Figure II.17).

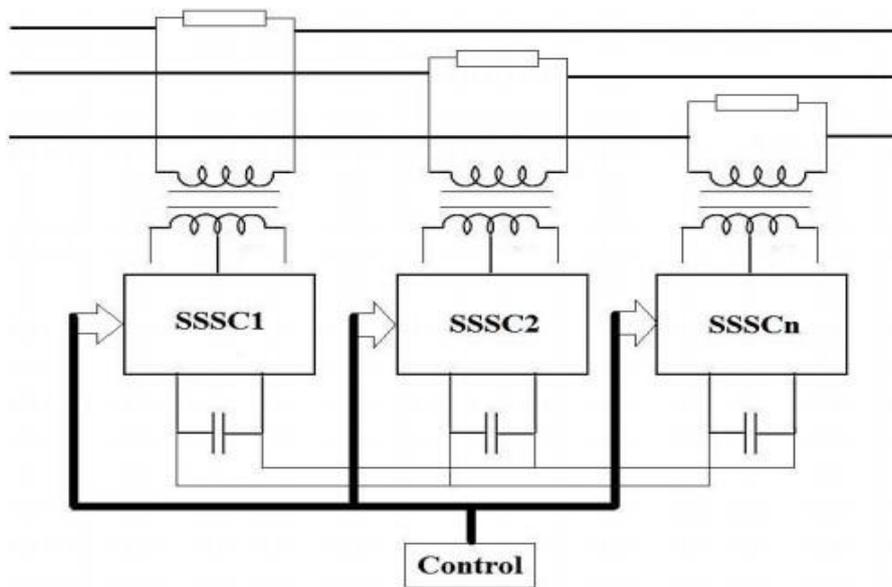


Figure (II.17) : Schéma de l'IPFC

▪ UPFC : (unified power flow controller) :

Il consiste en une combinaison des branches séries et parallèles (STATCOM et SSSC) connectées à travers le condensateur DC. La Figure (II.18) présente la structure de L'UPFC. L'onduleur connecté en série injecte une tension avec une amplitude et un angle de phase contrôlables en série avec la ligne de transmission, fournissant ainsi une puissance réelle et réactive à la ligne de transmission. L'onduleur connecté en shunt fournit la puissance réelle tirée par la branche série et les pertes, et peut indépendamment fournir la compensation réactive au système. Puisque l'UPFC est une combinaison à la fois du STATCOM et du SSSC, il peut être utilisé pour l'une ou l'autre des fonctions de contrôle de ces dispositifs.

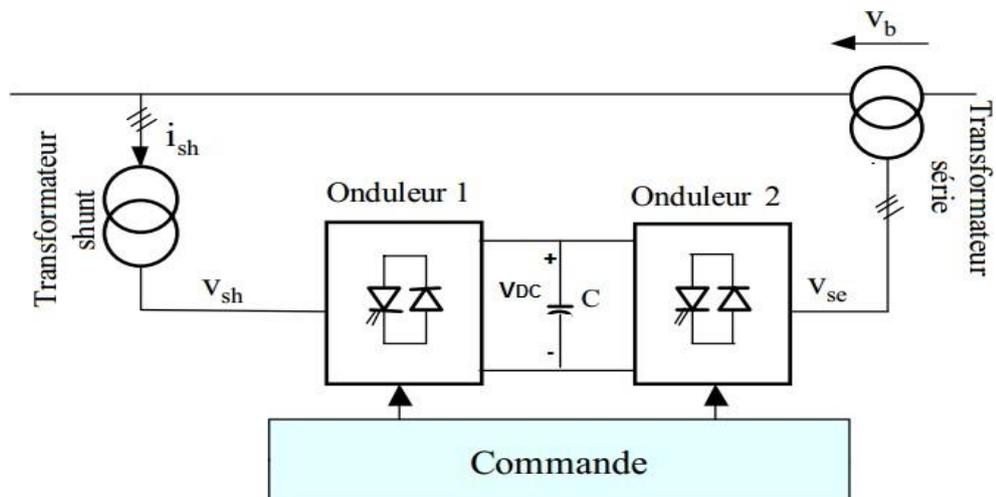


Figure (II.18) : Schéma de l'UPFC

Mr. Gyugyi a présenté le concept de l'UPFC en 1990. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique afin d'obtenir une performance optimale du système d'alimentation. [19] :

- ✚ Augmenter ou diminuer la quantité de puissance active transmise sur la ligne.
- ✚ Augmenter l'amplitude des tensions à chaque extrémité (c'est-à-dire le support de tension).
- ✚ Réduire ou augmenter l'impédance de la ligne (c'est-à-dire la compensation de ligne).

L'UPFC est une application réussie de la technologie évolutive de convertisseur de source de tension (VSC) pour les compensations shunts et séries. UPFC est le dispositif FACTS le plus complet capable de fournir un contrôle actif et réactif, ainsi qu'un contrôle adaptatif de la magnitude de la tension et de la régulation de l'angle de phase. L'UPFC se compose des transformateurs parallèles et séries, qui sont connectés via deux convertisseurs de source de tension avec un condensateur à courant continu commun.

Le VSC shunt est similaire au STATCOM pour la compensation shunte et le VSC série est similaire au SSSC pour la compensation série. Le circuit DC permet la circulation de l'énergie active entre les transformateurs shunts et séries pour contrôler le déphasage de la tension série. L'UPFC peut agir comme un condensateur et mettre de l'énergie dans le système ou en tant qu'inductance et retirer le courant du système.

En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

II.5 Propriétés des dispositifs FACTS

L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS est un moyen susceptible d'apporter des solutions qui semble meilleurs. Les systèmes FACTS permettent aux circuits de transmission d'être utilisés à leur capacité thermique maximale et aussi offre au système de puissance une plus grande flexibilité.

❖ Avantages des dispositifs FACTS

Les avantages apportés aux réseaux électriques sont :

- ✓ Grande fiabilité grâce à l'utilisation de contrôleur d'électronique de puissance caractérisée par une grande rapidité de réaction ;
- ✓ Une grande flexibilité dans le contrôle de la puissance de telle sorte qu'elle s'écoule le long de l'itinéraire de transmission prescrit ;
- ✓ Amélioration de la stabilité transitoire

❖ Inconvénients des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent aussi des inconvénients. En plus, qu'ils ne représentent pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables :

- ✓ Le choix du FACTS ;
- ✓ Le choix du modèle du FACTS ;
- ✓ Le choix de la localisation du FACTS ;
- ✓ Protection pour les FACTS et pour le réseau ;
- ✓ Interaction entre les dispositifs FACTS et l'autre élément

II.5.1 Applications et avantages techniques des différentes technologies des FACTS :

Chaque type de dispositif FACTS sera donc utilisé pour répondre des objectifs bien définis. Des considérations économiques entreront également dans le choix du type d'installation à utiliser. Le tableau (II.2) synthétise les principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS. Le "+" est proportionnel à l'efficacité du dispositif.

Dispositif	Contrôle du transit de puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire	Stabilité statique
SVC	+	+ + +	+	+ +
STATCOM	+	+ + +	+ +	+ +
TCSC/GCSC	+ +	+	+ + +	+ +
SSSC	+ +	+	+ + +	+ +
TCPST	+ + +	+	+ +	+ +
UPFC	+ + +	+ + +	+ + +	+ + +
IPFC	+ + +	+	+ + +	+ +

Tableau (II.2) Bénéfices techniques des dispositifs FACTS.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, les types, le rôle et le fonctionnement des dispositifs FACTS dans les systèmes d'alimentation ont été discutés. Un bref historique des dispositifs FACTS a été fourni et l'utilisation de ces composants a été discutée avec l'effet qu'ils ont sur la stabilité, la tension et la capacité de transfert de puissance. Aujourd'hui cette technologie "FACTS" occupe une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques vis-à-vis ces atouts qu'elle offre tout en augmentant la capacité de transport, renforcement de stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie.

Parmi les structures qui en découlent de ce système, le contrôleur de flux de puissance (UPFC), qui est un dispositif d'électronique de puissance à base des convertisseurs classiques dans sa structure mais original dans son cahier de charge (compensateur d'énergie réactive shunt STATCOM, condensateurs série réglable SSSC).

La fiabilité d'un UPFC est consacrée sur l'analyse mathématique et son réglage, ce qui va être démontré dans le troisième chapitre.

Chapitre III

Modélisation, Réglage et Simulation d'un système
UPFC simple

III.1 Introduction :

L'UPFC est un dispositif plus flexible et complexe qui a émergé pour le control et l'optimisation des réseaux électriques. L'objectif de l'installation d'un UPFC sur une ligne de transmission pour notre étude, c'est le traitement de la qualité d'énergie électrique dans le cas de la stabilité de la tension. Un système de contrôle qui permet à l'UPFC de suivre les changements dans les valeurs de la référence comme la tension AC, la tension DC et l'ordre de l'angle du convertisseur de la source de la tension série. Dans ce système du contrôle, une généralisation de la technique de modulation de largeur d'impulsion est utilisée pour produire les pulsations aux deux convertisseurs. L'installation de l'UPFC donne la possibilité de contrôler la puissance active qui transite dans la ligne

Dans ce présent chapitre on va expliquer la structure de base d'un UPFC, le principe de fonctionnement du système (réseau électrique associé à un UPFC), la conception, le modèle mathématique, l'identification des références et les schémas qui relient les blocs de commande de l'UPFC.

III.2. Structure du variateur de charge universel (UPFC) :[20] [21] [22] [23]

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de source de tension qui sont connectés à travers un circuit continue commun. L'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé et l'autre en série avec la ligne de transmission via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile. L'UPFC est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive.

Le convertisseur 2 accomplit la fonction principale d'UPFC, en injectant en série une tension AC avec une amplitude et un angle de phase réglable dans la ligne de transport à l'aide d'un transformateur série T2. La fonction fondamentale du convertisseur 1 est de fournir ou d'absorber de la puissance effective demandée par le convertisseur 2 et règle la tension DC commune, il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive selon la demande et assuré une compensation shunt indépendante à la ligne de transport. Le convertisseur 2 fourni ou absorbe la puissance réactive nécessaire localement et produit de la puissance active comme résultat de l'injection en série d'une tension.

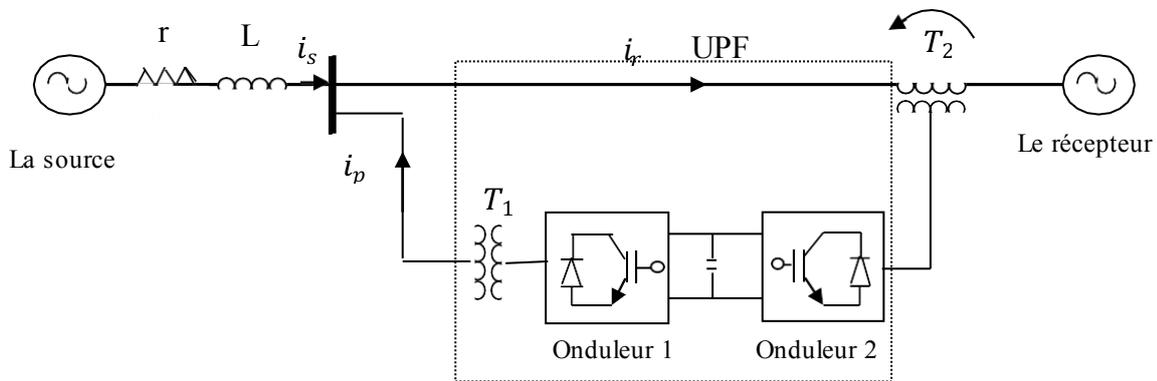


Figure (III.01) : variation statique de charge universelle à l'aide de deux onduleurs

III.3 Principe de fonctionnement

La source de tension au point de départ est connectée en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, dite source de tension shunt. La deuxième source de tension série est connectée via trois transformateurs monophasés dont les secondaires sont insérés dans la ligne et les primaires reliés entre eux en étoile. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu, dont le principe de fonctionnement consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne et de le réinjecter avec une phase appropriée.

Le compensateur shunt est bien reconnu dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le dispositif shunt génère une tension alternative triphasée synchronisée avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension de l'onduleur peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.

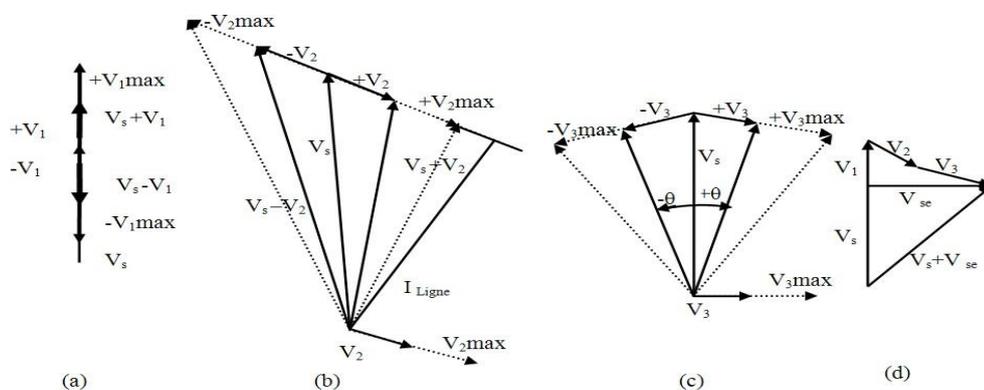


Figure (III.02) : Mode de fonctionnement d'un UPFC

- Régulation de tension (figure III.02.a), la tension de départ V_s est augmentée (ou diminuée) en injectant une tension V_1 , en phase avec V_s . La tension V_1 est réglable en module et possède une amplitude maximale V_{1max} .
- Régulation d'impédance (figure III.02.b), la tension injectée V_2 est en quadrature avec le courant de ligne. La tension V_2 possède une amplitude maximale V_{2max} . Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase (figure III.02.c), l'angle de la tension injectée V_3 est variable alors que l'amplitude de la tension V_s reste constante.
- Contrôle simultané (figure III.02.d), il est possible à l'UPFC d'accomplir trois fonctions à savoir le réglage de la tension, la compensation série et le réglage de l'angle de phase simultanément c'est le mode de fonctionnement automatique. L'angle de phase et l'amplitude de la tension injectée $V_{se} = V_1 + V_2 + V_3$ ont été choisis d'une manière à produire un courant de ligne qui permet d'obtenir les puissances active et réactive désirées.

III.4 Modélisation du système UPFC : [20] [21] [22] [23][24]

Le circuit simplifié du système de contrôle et de compensation de l'UPFC est représenté sur la figure (III.3) la modélisation de ce circuit est basée sur les hypothèses suivantes :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Toutes les chutes de tension dans le compensateur série sont représentées par la résistance r .
- Toutes les chutes de tension dans le compensateur parallèle sont représentées par la résistance r_p .
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées.
- L'inductance de la ligne L_s plus l'inductance de fuite du transformateur série l_s sont représentés par l'inductance L .
- L'inductance de fuite du transformateur shunt est représenté par l'inductance L_p .

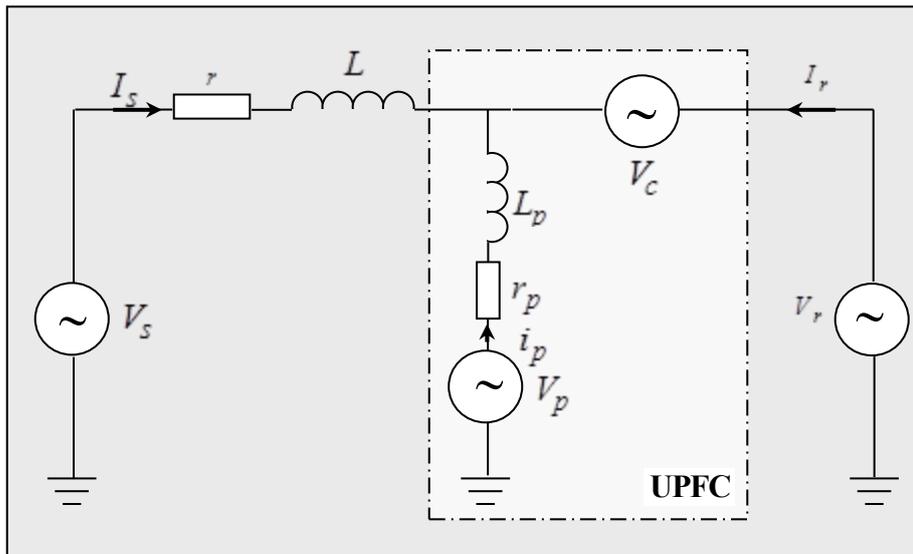


Figure (III.03) : Circuit équivalent simplifié du système UPFC

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 continu.

L'application des lois de " KIRCHHOFF " nous permet d'écrire les équations au niveau de chaque branche constituant l'UPFC sous les modèles suivants :

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) on pourra déduire l'équation (III.1) :

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

Ou i_{sa} i_{sb} et i_{sc} sont les courants de la ligne de transmission, et r et L sont respectivement sa résistance et son inductance. Pour simplifier les calculs, l'impédance du transformateur T_2 a

été négligée. L'onduleur série génère la tension de compensation V_c à l'arrivée de la ligne de transmission.

En utilisant la représentation matricielle sur le système d'axes a,b et c. Le modèle mathématique de l'UPFC est donné par le système d'équation suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L & 0 & 0 \\ 0 & -r/L & 0 \\ 0 & 0 & -r/L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{ca} - v_{ra} \\ v_{sb} - v_{cb} - v_{rb} \\ v_{sc} - v_{cc} - v_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

La source de tension V_c représente respectivement l'onduleur du système UPFC série. La transformation de Park des courants triphasés i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} et des tensions v_{ra} , v_{rb} et v_{rc} , est calculée comme suit:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1/2 \\ \cos(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t - 120^\circ) & 1/2 \\ \cos(\omega t + 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) & 1/2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Où x peut être une tension ou un courant.

Dans notre cas, la composante x_o n'existe pas vu que le système d'alimentation est supposé symétrique. Après **la transformation de Park**, l'équation (III.1) se traduit dans le repère d-q selon les équations (III.4) et (III.5) par :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \omega \cdot i_{sq} - \frac{r}{L} \cdot i_{sd} + \frac{1}{L} (v_{sd} - v_{cd} - v_{rd}) \quad (III.4)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \omega \cdot i_{sd} + \frac{r}{L} \cdot i_{sq} + \frac{1}{L} (v_{sq} - v_{cq} - v_{rq}) \quad (III.5)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L & +\omega \\ -\omega & -r/L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{cd} - v_{rd} \\ v_{sq} - v_{cq} - v_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Le schéma de simulation de la ligne de transmission avec la partie série du système UPFC selon le repère d-q est donné par la figure (III.4).

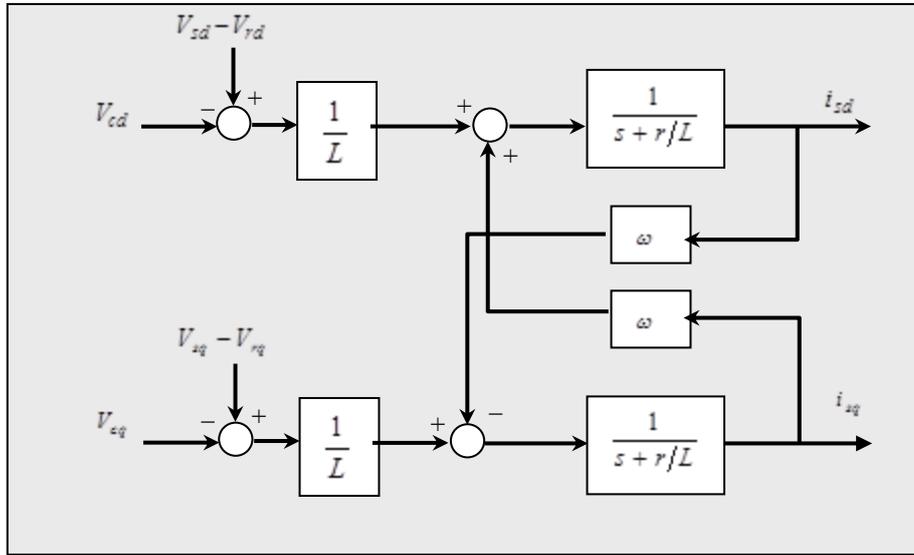


Figure (III.4) : Modèle mathématique du système de l'UPFC série

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

Le modèle mathématique de l'UPFC shunt est donné dans l'équation (III.7).

$$\begin{cases} \frac{di_{pa}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pa} + \frac{1}{L_p} (V_{pa} - V_{ca} - V_{ra}) \\ \frac{di_{pb}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pb} + \frac{1}{L_p} (V_{pb} - V_{cb} - V_{rb}) \\ \frac{di_{pc}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pc} + \frac{1}{L_p} (V_{pc} - V_{cc} - V_{rc}) \end{cases} \quad (III.7)$$

Où $i_{pa, b, c}$ sont les courants de l'UPFC shunt, $v_{pa, b, c}$ sont les tensions générées par l'onduleur I , r_p et L_p sont respectivement la résistance et l'inductance de l'UPFC shunt .

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_p/L_p & 0 & 0 \\ 0 & -r_p/L_p & 0 \\ 0 & 0 & -r_p/L_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{pa} - V_{ca} - V_{ra} \\ V_{pb} - V_{cb} - V_{rb} \\ V_{pc} - V_{cc} - V_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

Le modèle d-q de l'équation. (III.7) est donné par les équations (III.9) et (III.10).

$$\frac{di_{pd}}{dt} = \omega \cdot i_{pq} - \frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pd} + \frac{1}{L_p} (v_{pd} - v_{cd} - v_{rd}) \quad (III.9)$$

$$\frac{di_{pq}}{dt} = -\omega \cdot i_{pd} - \frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pq} + \frac{1}{L_p} (v_{pq} - v_{cq} - v_{rq}) \quad (III.10)$$

La forme matricielle est donnée comme suite :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_p/L_p & -\omega \\ \omega & -r_p/L_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{cd} - v_{rd} \\ v_{sq} - v_{cq} - v_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

Le diagramme de bloc de l'UPFC shunt est donné par la figure (III.5) ci-dessous

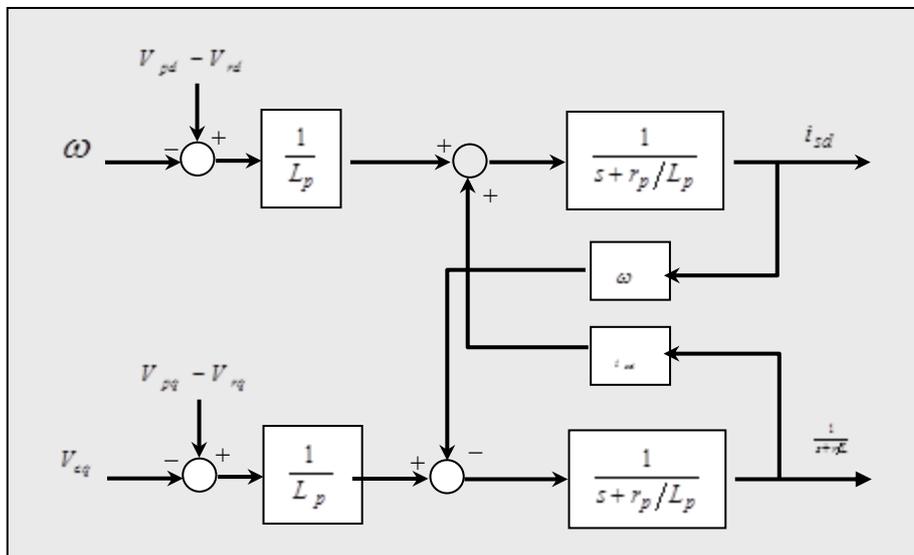


Figure (III.5) : Modèle mathématique du système de l'UPFC parallèle

III.4.3 Modélisation de la branche continue de l'UPFC

En se passant sur le principe d'équilibre des puissances et en négligeant les pertes des convertisseurs. La tension continue V_{dc} est déduite de la figure (III.5) et est décrite par l'équation (III.12).

$$\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C \cdot V_{dc}} \cdot (P_e - P_{ep}) \quad (III.12)$$

D'ou

$$P_e = V_{ca} \cdot i_{ra} + V_{cb} \cdot i_{rb} + V_{cc} \cdot i_{rc} \quad (III.13)$$

$$P_{ep} = V_{pa}i_{pa} + V_{pb}i_{pb} + V_{pc}i_{pc} \quad (III.14)$$

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.3) sur l'équation (III.12), on obtient :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2 C v_{dc}} (v_{pd} i_{pd} + v_{pq} i_{pq} - v_{cd} i_d - v_{cq} i_q) \quad (III.15)$$

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 Modélisation du convertisseur statique :[25]

III.5.1 Modèle de l'onduleur :

La Figure (III.6) donne le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé, il 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.

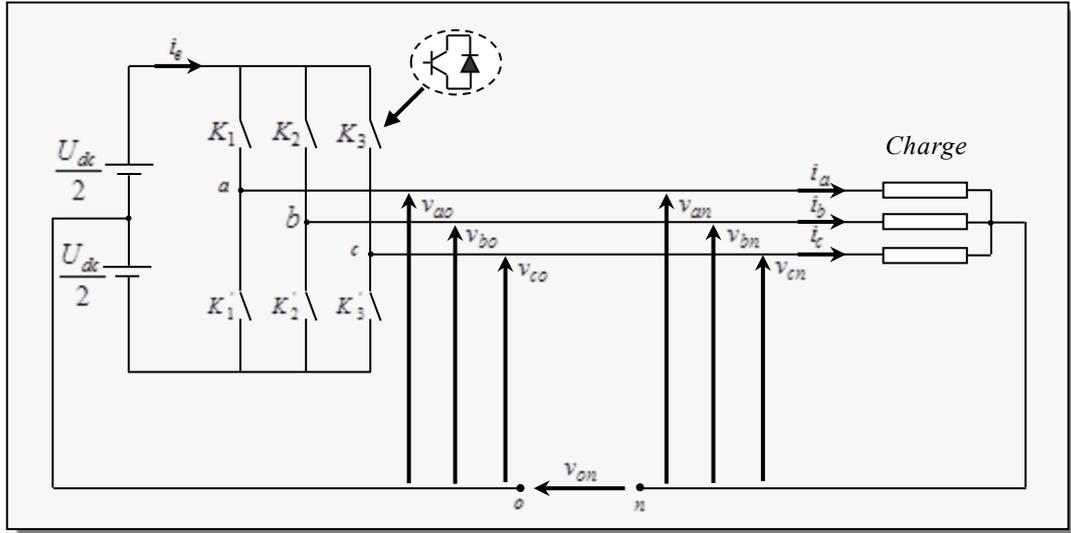


Figure (III.6) : Schéma de principe de l'onduleur à MLI

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire, (selon la figure III.6) :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (III.16)$$

En faisant la somme des équations du système (III.16), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (III.17)$$

D'où :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (III.18)$$

Donc :

$$v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (III.19)$$

En substituant l'équation (III.19) dans le système (III.16), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

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 :

$$v_i - v_o = \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K_i: \text{fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K'_i: \text{fermé} \end{cases} \text{ avec: } i = a, b, c \quad (\text{III.21})$$

Les tensions délivrées sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Avec S_i est l'état de l'interrupteur K_i , supposé parfait, tel que pour le $i^{\text{ème}}$ 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 :

$$i_e = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{III.23})$$

La figure (III.7) représente le modèle simulink de l'onduleur de tension à deux niveaux.

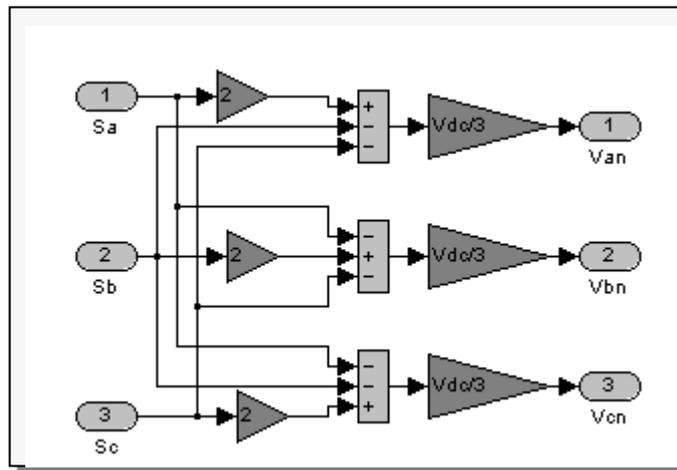


Figure (III.7) : model sous SIMULINK de l'onduleur de tension à deux niveaux

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.5.2 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.8) illustre le principe de base de cette technique.

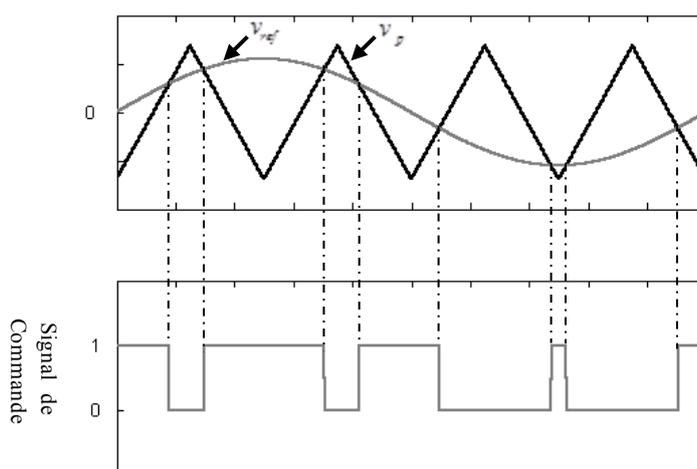


Figure III.8: Principe de la commande MLI sinus-triangle

III.5.3 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

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{III.24})$$

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

Taux de modulation

$$rm = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{III.25})$$

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

III.5.4 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 :

$$\begin{cases} v_p = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (\text{III. 26})$$

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 :

$$\begin{cases} v_{\text{ref}_a} = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{\text{ref}_b} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{\text{ref}_c} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

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.27) suivantes :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{\text{ref}_i} - v_p) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{\text{ref}_i} - v_p) < 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c \quad (\text{III.28})$$

III.5.5 Simulation de la commande MLI sinus triangle :

La figure (III.9) représente le modèle en Simulink de la commande MLI sinus triangle et la figure (III.10) 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 $V_{dc}=280 V$.

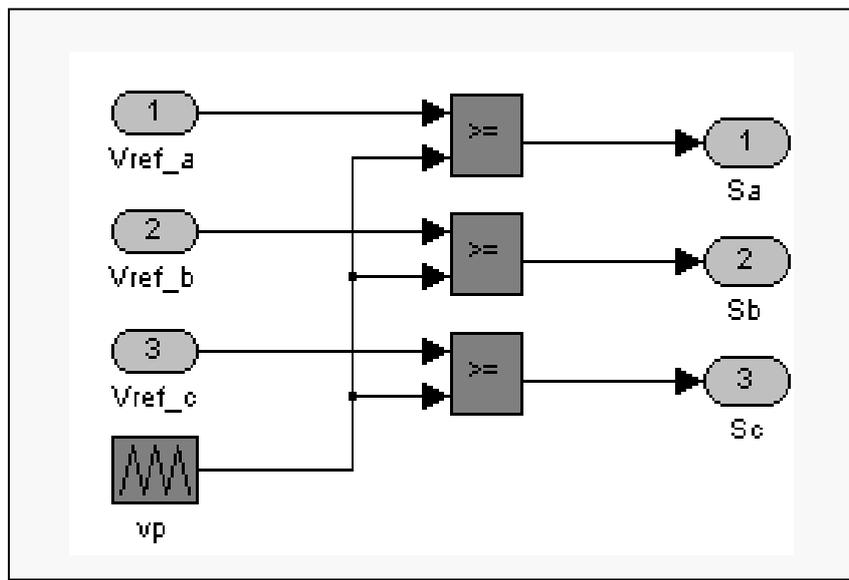


Figure (III.9) : Modèle sous SIMULINK de la commande MLI sinus triangle

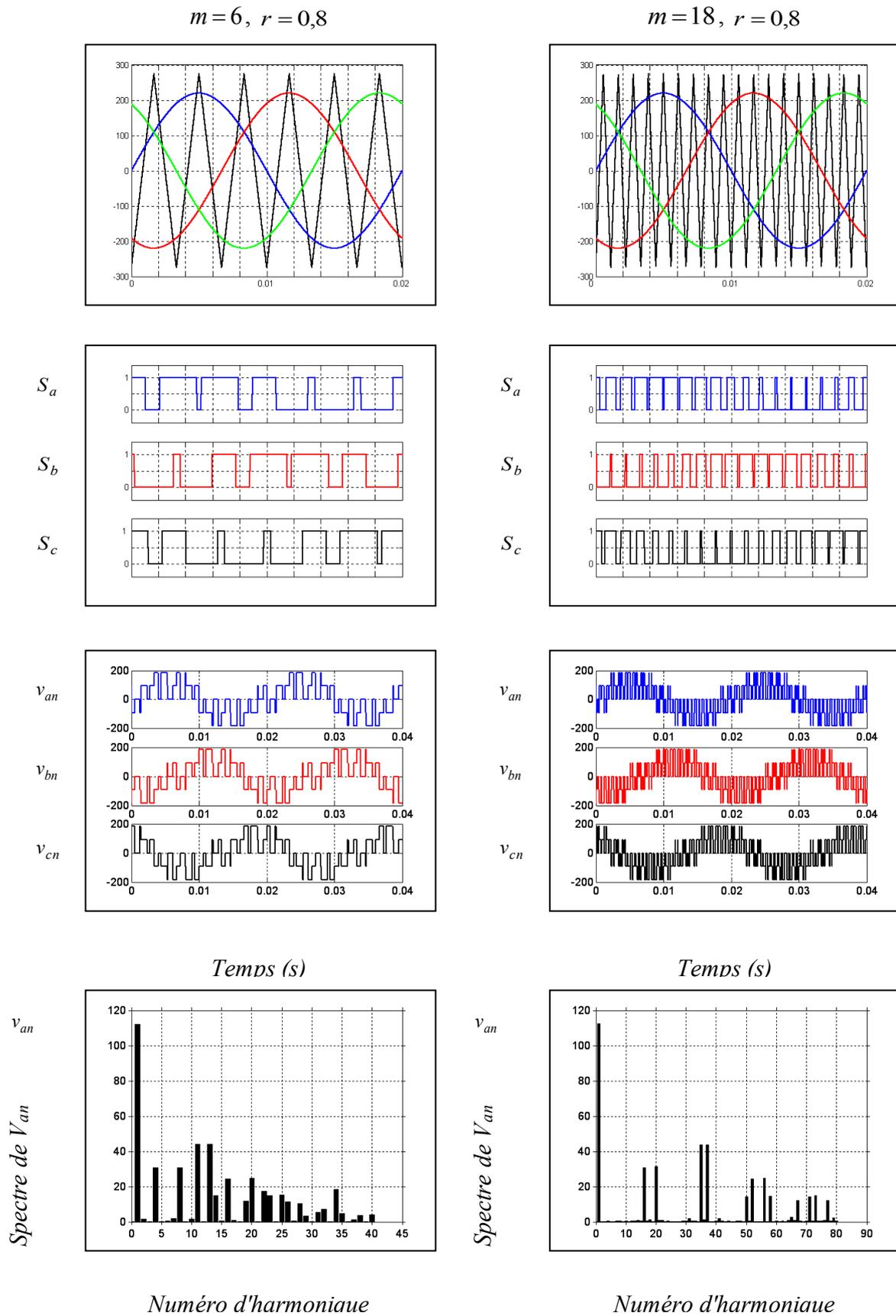


Figure (III.10) : Principe de la commande MLI sinus-triangle et enveloppes de tension

III.6 Structure de réglage et simulation du système UPFC :[26]

III.6.1 Introduction

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 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 adaptative directe du système UPFC ;

A la fin de ce chapitre, on rappellera la configuration des circuits de réglage complets.

III.6.2 Configuration du circuit de réglage :

Théoriquement, L'UPFC devrait être traité comme un système multivariable car les deux convertisseurs série et shunt sont connectés d'un côté à la ligne de transmission et l'autre côté au circuit continu DC et donc comportent chacun deux entrées et deux sorties. Ce pendant 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. 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, Pour cela, du point de vue dynamique, le convertisseur série peut être vu comme une source de la tension pure dans le système de transmission. Le contrôle du convertisseur parallèle dans l'UPFC est très similaire à celui du compensateur SVC.

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_c tandis que pour régler le flux de puissance réactive, l'amplitude de la tension injectée série doit

être contrôlée. La figure (III.11) illustre le mode choisi pour la branche série ainsi que pour la branche shunt. L'idée du schéma de contrôle se déduit du système d'équations (II.6) et (II.11).

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.

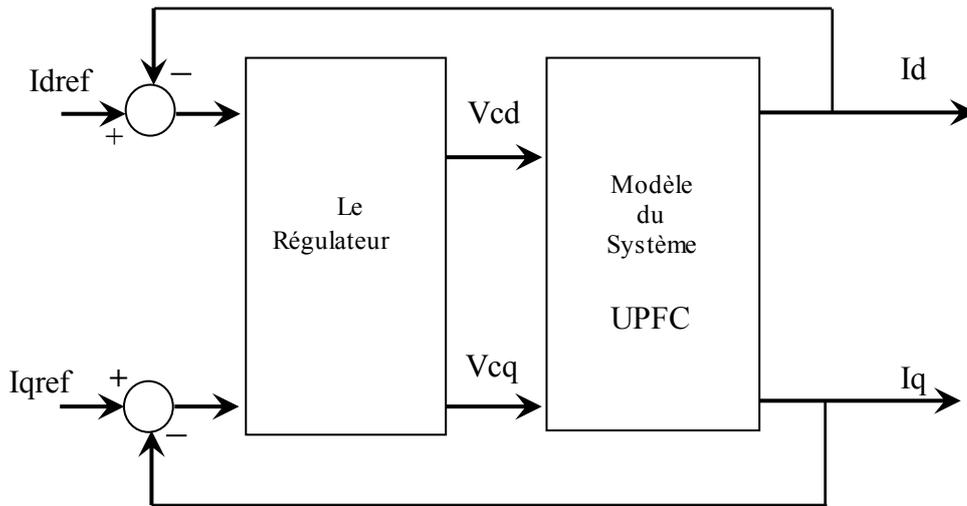


Figure (III.11) : Schéma de contrôle de l'UPFC

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.6.3 Description du système de commande de l'UPFC :

La transformation de Park peut être décomposée de deux phases équilibrées comme il est montré sur la figure ci-dessous. La première consiste à passer d'un système triphasé à un système diphasé ; on utilise alors la transformation de Clarke (C)

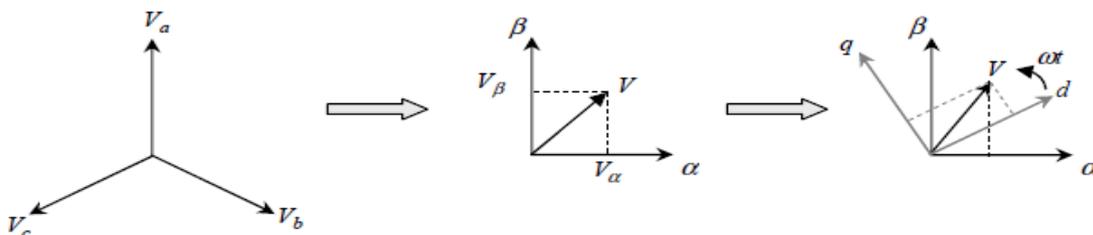


Figure (III.12) : Passage dans le référentiel tournant de la composante équilibrée directe

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

La seconde phase permet de passer par rotation de $-\theta = \omega t$ du système t diphasé dans le repère de Clark au système diphasé tournant de Park au moyen de la matrice de rotation R .

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

Le calcul de la puissance active s'obtient au moyen de la formule classique :

$$\begin{aligned} p &= V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c = [V][I]^t \quad (\text{III.31}) \\ &= \begin{bmatrix} C_{32} & R(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{32} & R(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} R(-\theta) C_{32} \begin{bmatrix} C_{32} R(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$P = \frac{3}{2} [V_d i_d + V_q i_q] \quad (\text{III.32})$$

Et pour la puissance réactive :

$$Q = i_1 \left(\frac{V_3 - V_2}{\sqrt{3}} \right) + i_2 \left(\frac{V_1 - V_3}{\sqrt{3}} \right) + i_3 \left(\frac{V_2 - V_1}{\sqrt{3}} \right) = \begin{bmatrix} i^1 \\ i^2 \\ i^3 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^1 \\ V^2 \\ V^3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

$$= \begin{bmatrix} C_{32} R(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{32} R(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} R(-\theta) \cdot C_{32} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} C_{32} R(\theta) \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

$$Q = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} R(\theta) R\left(\frac{\pi}{2}\right) R(\theta) \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

$$Q = \frac{3}{2} [V_d i_d - V_q i_q] \quad (\text{III.35})$$

Alors Les puissances actives et réactives P et Q , sont donnés par les équations (III.32) et (III.35),

$$P = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (\text{III.36})$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot i_{sq} - V_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{III.37})$$

Où

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd} \quad (III.38)$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq} \quad (III.39)$$

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.36) et (III.37), les courants de référence i_{sd}^* et i_{sq}^* peuvent être calculés comme suit :

$$i_d^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^*.V_{sd} - Q^*.V_{sq}}{\Delta} \right) \quad (III.40)$$

$$i_q^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^*.V_{sq} + Q^*.V_{sd}}{\Delta} \right) \quad (III.41)$$

Où
$$\Delta = V_{sd}^2 + V_{sq}^2 \quad (III.42)$$

III.7 Les schémas de contrôle du système UPFC :

III.7.1 Schéma de contrôle de la branche série :

Les courants de référence I_{rdref} et I_{rqref} sont calculés suivant les équations (III.40) et (III.41) 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.13)

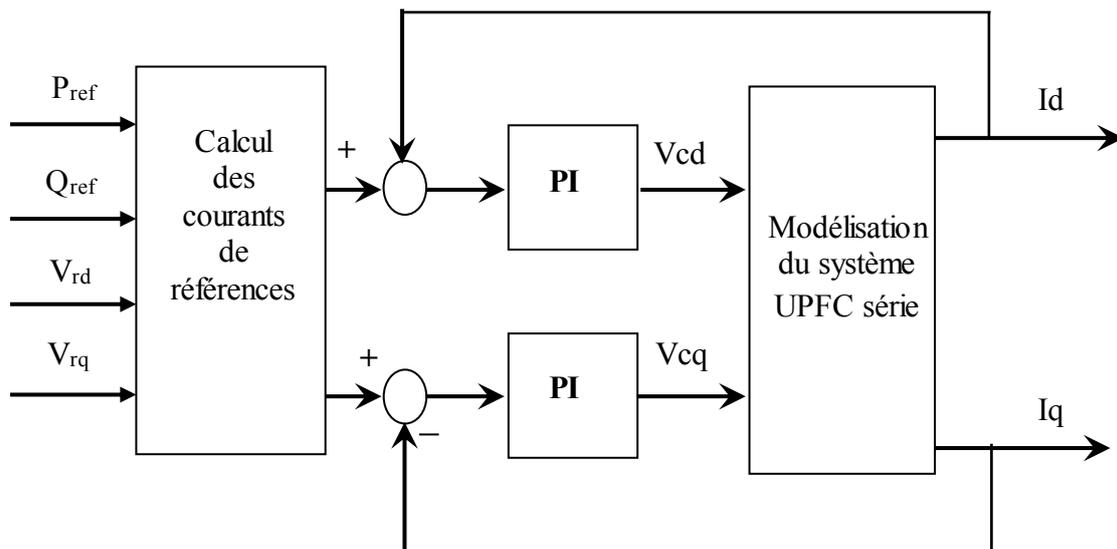


Figure (III.13) : Schéma de contrôle de la branche série de l'UPFC

III.7.2 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.14)

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.38) et (III.39). 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 .

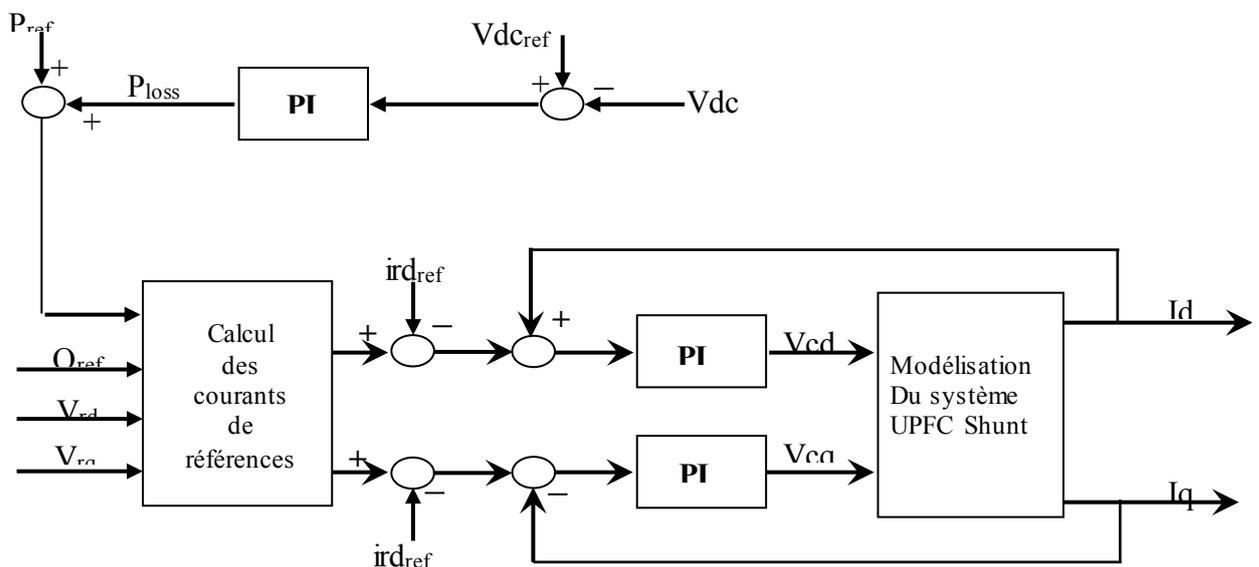


Figure (III.14) : Schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC

Les figures (III.13) et (III.14) représentent la commande de l'UPFC série et shunt respectivement, $G(s)$: est la fonction de transfert de la ligne de transmission déterminée par :

$$G(s) = \frac{1}{s+r/l} \quad (III.43)$$

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 2 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.38), 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.

$$\begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(ax) & -\sin(ax) \\ \cos(ax - 120^\circ) & -\sin(ax - 120^\circ) \\ \cos(ax + 120^\circ) & -\sin(ax + 120^\circ) \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (III.44)$$

L'interaction entre les boucles de courants (i_d et i_q) est causée par le terme découplage $\omega \cdot i$; 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.14) et (III.15), donc le modèle de l'UPFC série (ces résultats sont identiques pour l' UPFC shunt) peut être réécrit sous la forme :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \omega \cdot (1 - \varepsilon) \cdot i_{sq} - \frac{r}{L} i_{sd} + \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{cd} - V_{rd}) \quad (III.45)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega \cdot (1 - \varepsilon) \cdot i_{sd} - \frac{r}{L} i_{sq} + \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{cq} - V_{rq}) \quad (III.46)$$

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.45) et (III.46) seront identiques aux équations (III.4) et (III.5).

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.7.3 Les schémas de contrôle du système UPFC avec régulateur PI-Découplé :

D'après le système d'équation (III.6) ou (III.11), 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 $(\omega.i)$. 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

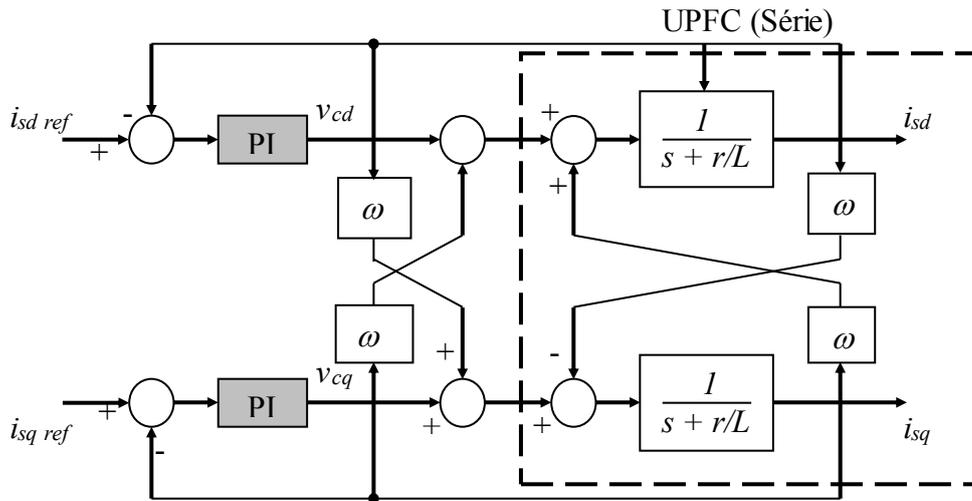


Figure (III.15) : Commande PI-Découplé de l'UPFC série

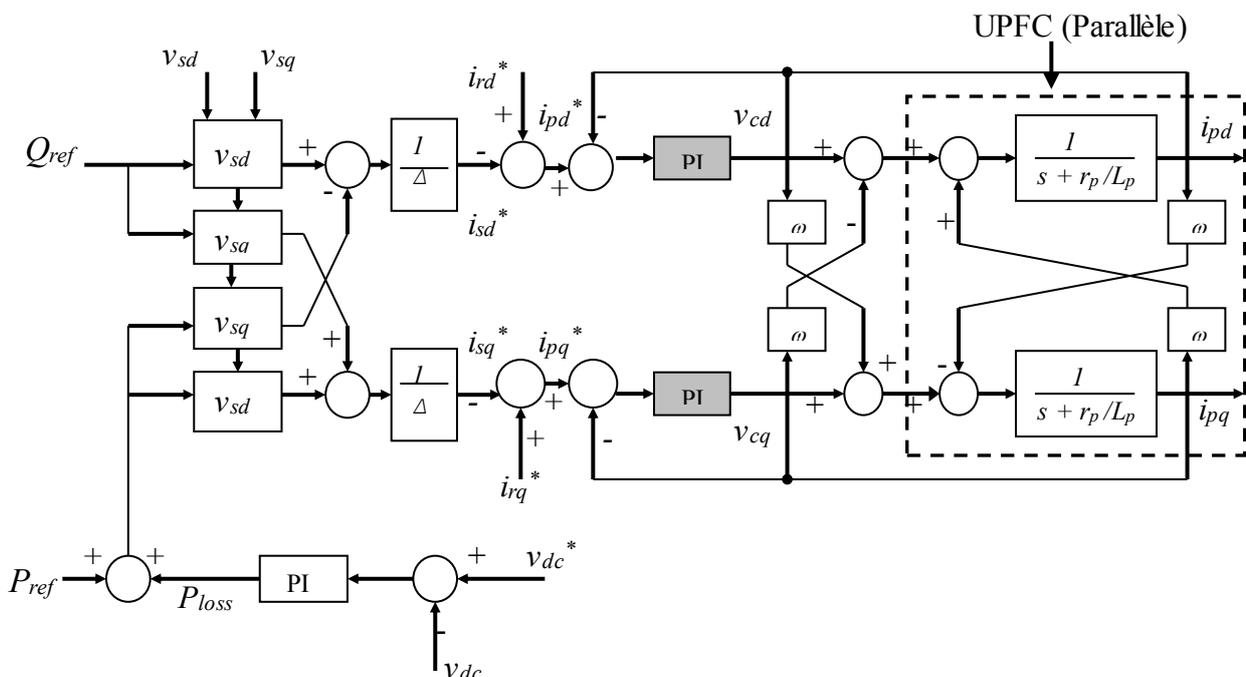


Figure (III.16) : Commande PI-Découplé de l'UPFC shunt

Le développement extraordinaire des calculateurs numériques et des microprocesseurs a provoqué des changements importants dans la conception des systèmes de commande et de régulation. Leurs performances et leur faible coût, le rendent intégralement en charges les Aspects analogiques. En effet, le bon fonctionnement d'un procédé industriel implique généralement la régulation d'un certain nombre de variables caractéristiques.

La conception du système de régulation doit commencer par la sélection des variables à régler et ensuite celle des variables de commande et leur association aux variables réglées.

III.7.4 Calcul des régulateurs PI :

La structure du correcteur PI est représenté par le schéma bloc de la figure suivante :

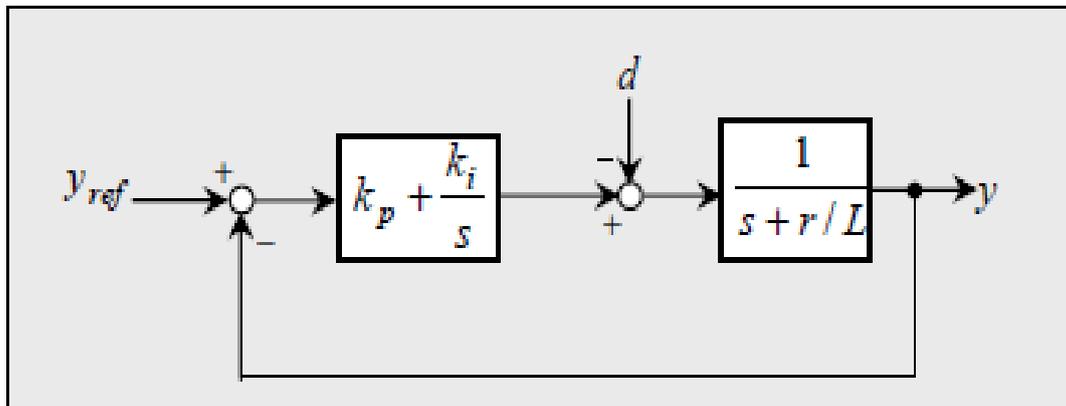


Figure (III.17) : Structure de réglage de type PI

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 [27] [28] 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 :

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (\text{III.47})$$

Par conséquent, l'introduction d'une condition simple $k_i = (r/L).k_p$

On obtient la fonction de transfert sous la forme $F(s) = K_p/K_p + s$

qui est de premier ordre avec une constante de temps $T = 1/K_p$

D'où

$$F(s) = \frac{1}{1+s.T} \quad (\text{III.48})$$

$$\begin{cases} k_p = 2\zeta\omega_N - a \\ k_i = \omega_N^2 \end{cases} \quad (\text{III.49})$$

Dans cette section, nous allons effectuer des simulations de la régulation de l'UPFC, dont les paramètres sont définis suivant un banc d'essai. Les paramètres de réglage sont donnés par le tableau suivant.

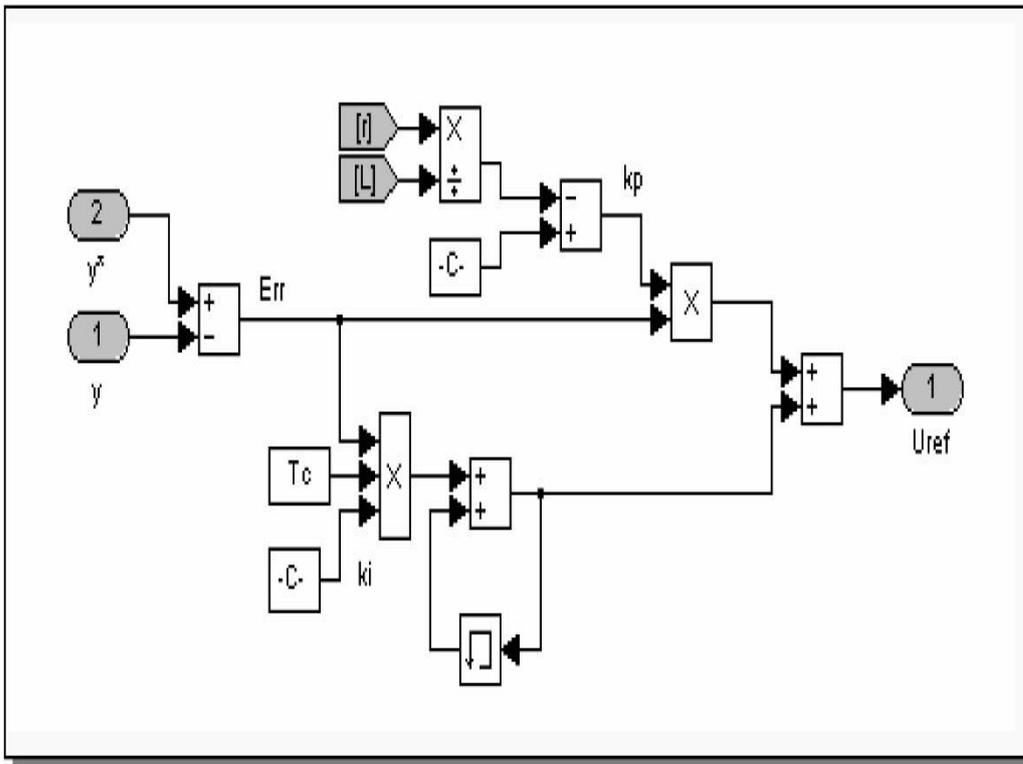


Figure (III.18) : Régulateur PI implanté dans SIMULINK

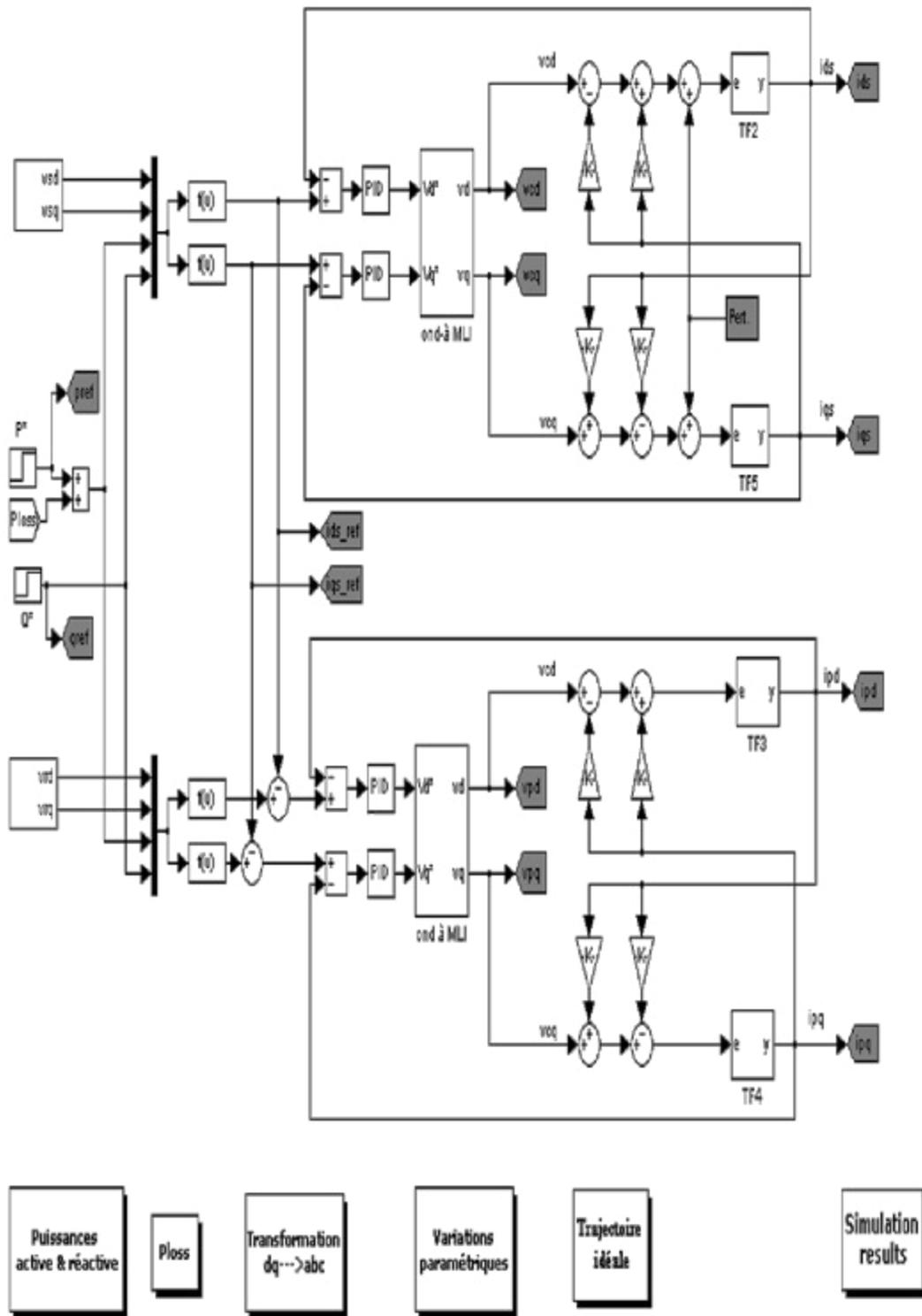


Figure (III.19) : Schéma complet de réglage de l'UPFC implanté dans Simulink.

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 :

$$K_p = 0,45 K_{pc} \quad \text{et} \quad T_i = 0,83 T_c$$

Comme on l'a montré à la figure (III.20) 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.

La figure. (III.20), illustre le schéma de ce dernier et le principe 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.20), 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.

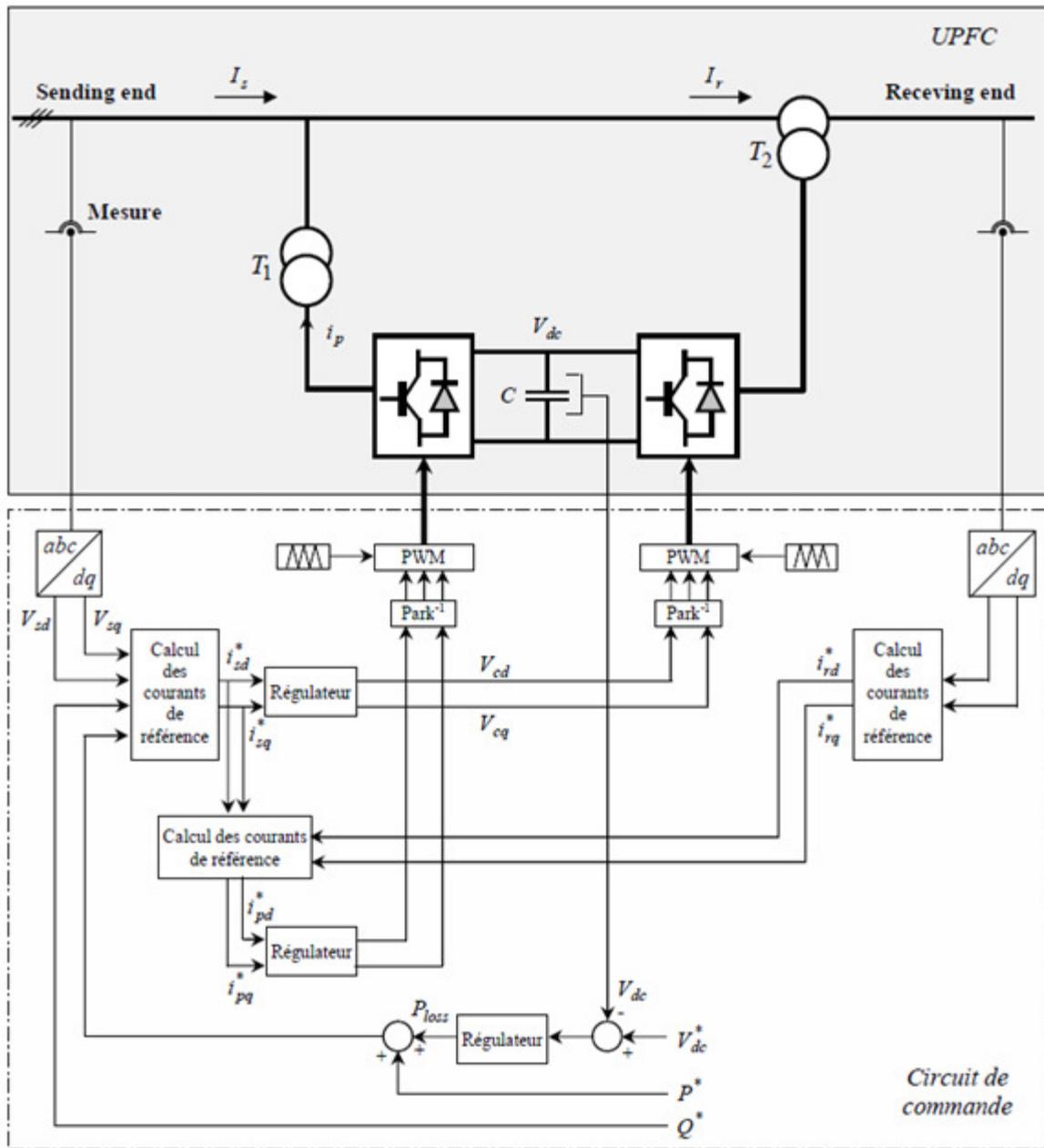


Figure (III.20) : Circuit de commande du système UPFC

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

III.8 Résultats de simulation du système simple : [26]

III.8.1 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 continue : $V_{dc} = 280V$
- 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 : $C = 2000 \mu F$

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. [29] [30]

La simulation est établie selon la commande à MLI.

Cette simulation comporte un changement de la puissance active au moment où la puissance réactive passe de -600 var à +600 Var (à l'instant $t = 0.25s$), et un changement de la puissance réactive au moment où la puissance active passe de -1100 w à +1100 w (à l'instant $t = 0.55s$). (Figure III. 21). 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 -1100 w, et une puissance réactive égale à -600 var.

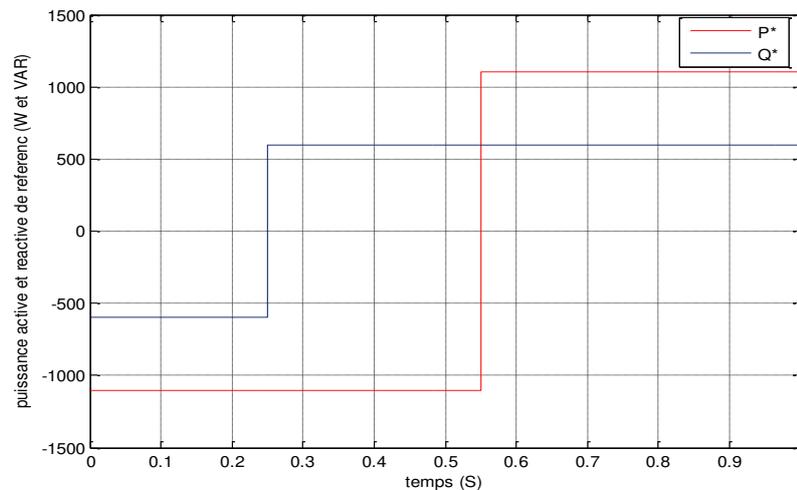


Figure (III.21) : Puissance active et réactive de référence

Et on obtient les courants calculés de références comme indiqué sur la figure (III.22).

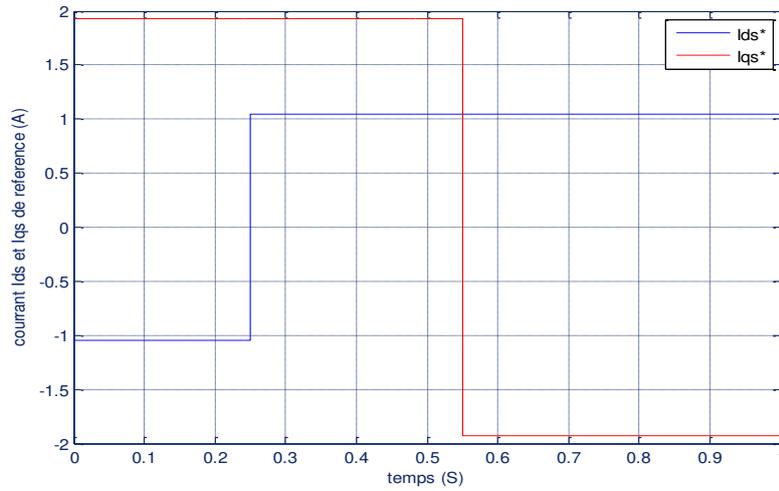


Figure (III. 22) : Courant I_{ds}^* et I_{qs}^* de référenc

III.8.2 Contrôle de l'UPFC avec PI-D :

On garde toujours les puissances de référence (consignes) et on simule avec la modulation MLI.

Les allures des deux composantes de courants I_{ds} et I_{qs} figure (III.23).

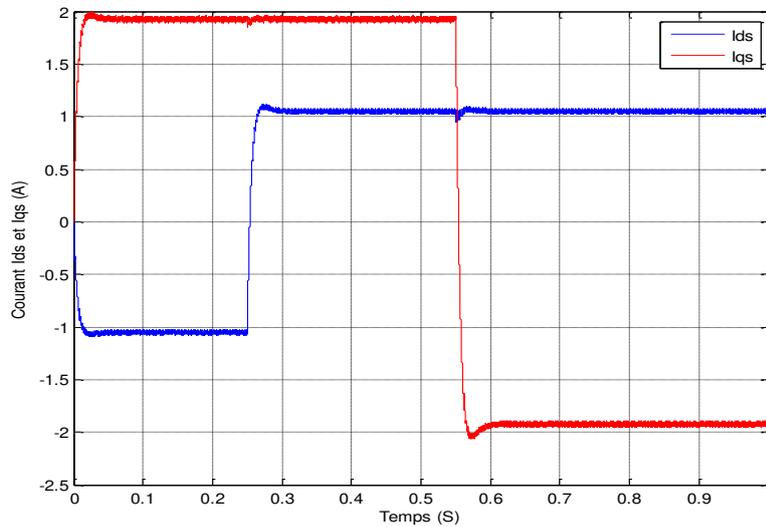


Figure (III.23) : Courants de phase (I_{ds} et I_{qs})

On constate d'après les allures des courants que le couplage entre les deux composantes d - q existe donc toujours.

Les allures des puissances résultantes figure (III.24) sont :

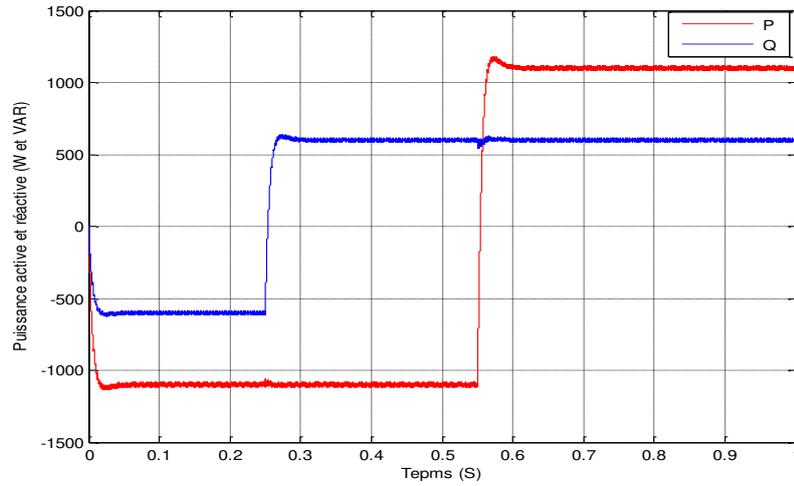


Figure (III.24) : Réponse des puissances avec un découplage parfait (avec la commande MLI)

On constate que la puissance active présente une variation au moment où la puissance réactive passe de -600 VAR à 600 VAR (0.25s) et un changement de la puissance réactive au moment où la puissance active passe de -1100 W à 1100 W (0.55s).

Zoom sur les variations des consignes de la tension V_c .

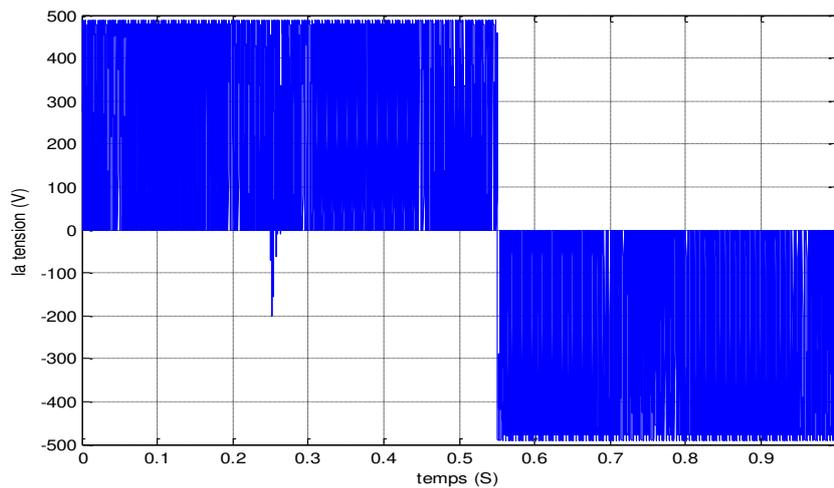


Figure (III.25) : La tensions V_c

III.8.3 Test de robustesse du système UPFC :

Pour le test de Robustesse de notre système UPFC, on a varié la réactance X_L de la ligne de transmission à 35% de la valeur réelle d'où la réponse des puissances active et réactive indiqué sur la figure suivante :

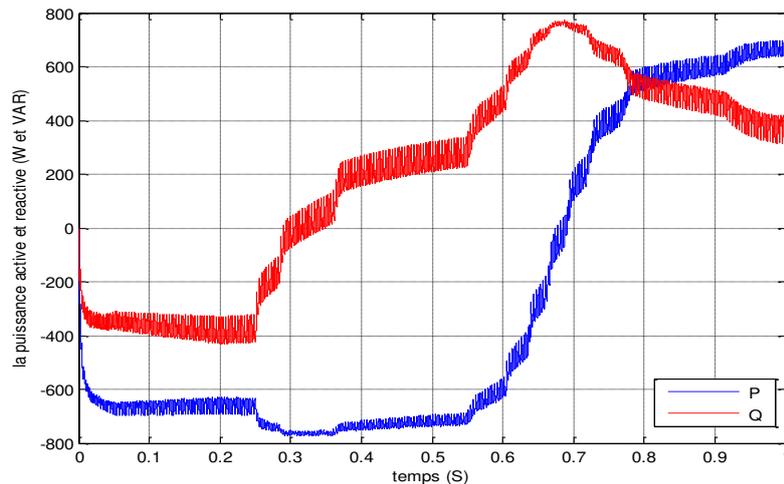


Figure (III.26) : Réponse des puissances aux variations de la réactance

On trouve une dégradation des deux puissance active et réactive dans les courbes qui sont apparues dans la figure (III.26) à cause de changement de la réactance de la ligne de transmission donc notre régulateur classique PI-Découplé est besoin d'une aide.

III.8.4 Test de stabilité du système UPFC :

On peut vérifier la réponse de l'asservissement pas uniquement en poursuite mais également en régulation en ajoutant une perturbation à l'instant (0.7 S).

On a simulé cette fois-ci en introduisant une perturbation de durée 0.8 ms et d'amplitude 1.5 pour tester encore une fois la stabilité de notre système UPFC figure (III.27).

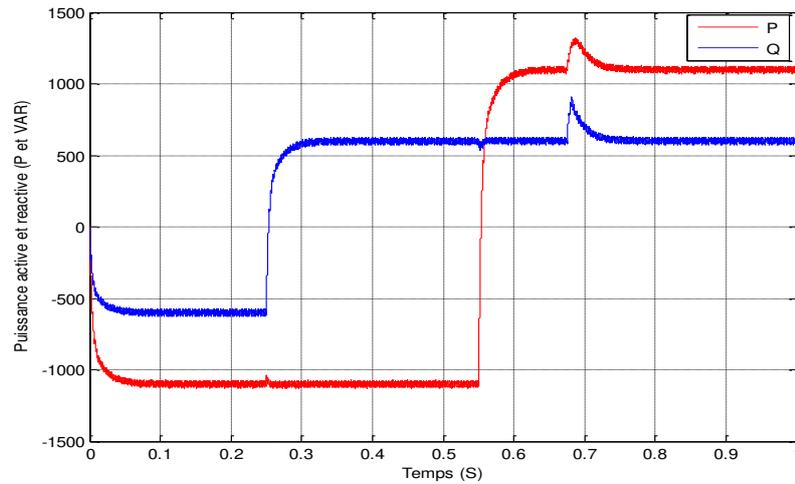


Figure (III.27) : Système UPFC perturbé.

On constate que les puissances active et réactive sont perturbées à cause de la dégradation des paramètres du régulateur PI-Découplé cela conduit à une perte de la stabilité du système.

III.9 Conclusion

D'après les résultats de simulation, on conclut que le contrôleur PI-Découplé à un temps de réponse rapide.

L'analyse de ces résultats, nous permet aussi de conclure sur l'utilisation de la modélisation dans le repère des axes d-q qui améliore la réponse transitoire de l'UPFC et réduit l'interaction entre la puissance active et réactive. On peut dire que le contrôleur PI peut causer une large interaction entre les boucles de courant et un dépassement important au niveau des puissances. Pour réaliser un découplage parfait, il faut que les paramètres de la ligne soient connus.

Le régulateur PI-Découplé pourrait être la commande idéale pour le système UPFC si les variations de l'inductance X_L n'ont pas affectés ses performances donc on applique une commande sur le régulateur classique pour mieux adapter une poursuite idéale des puissances sera étudié dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Commande adaptative direct du système UPFC
avec synthèse

1V.1 Introduction

La plupart des techniques de synthèse des systèmes de commande sont basées sur la connaissance du processus à commander et de son environnement, or les processus industriels sont par nature non linéaires et variant dans le temps. Les paramètres peuvent varier pour diverses raisons (changement de point de fonctionnement, usure, etc...). Les performances d'une commande linéaire se dégradent au fur et à mesure que l'écart entre les paramètres réels et ceux utilisés dans le calcul de la commande augmente. C'est la raison pour la quelle beaucoup de méthodes modernes de commande nécessitant une connaissance précise du modèle du processus ne peuvent pas être appliquées de façon satisfaisante.

IV.2 Le processus à commander

Les processus que nous considérons sont des systèmes qui évoluent au cours du temps, sous l'effet d'influences internes et externes, et sur lesquels on peut faire des observations, c'est-à-dire des mesures. Les signaux qui nous intéressent sont appelés variables de sortie. Les grandeurs agissant sur le processus, et donc sur ses sorties, sont appelées variables d'entrée. Le processus est affecté par deux types de variables d'entrée : les commandes, sur lesquelles on peut agir, et les perturbations, sur lesquelles on n'a pas d'action. Parmi ces dernières, on distingue les perturbations mesurées et les perturbations non mesurées figurent (IV.1).

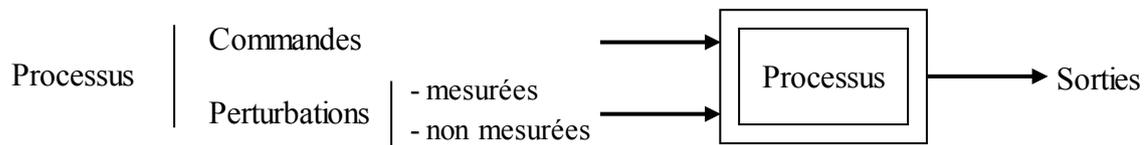


Figure (IV.1) : Le processus à commander

Nous nous intéressons à des processus dynamiques, c'est-à-dire des processus dont la valeur des sorties à un instant donné ne dépend pas uniquement des valeurs de ses entrées à ce même instant, mais aussi de leurs valeurs passées. Le concept de processus, ou de système physique, est en fait inséparable du concept de modèle, conçu comme système représentatif d'un système physique. Nous supposons que les processus qui nous intéressent peuvent être convenablement décrits par des modèles mathématiques. De tels modèles sont caractérisés par des variables d'état, qui constituent l'information minimale nécessaire au calcul de l'évolution des sorties, si toutes les entrées sont connues.

Commander un processus, c'est déterminer les commandes à lui appliquer, de manière à assurer aux variables d'état ou aux sorties qui nous intéressent un comportement précisé par un cahier des charges. Ces commandes sont délivrées par un organe de commande ; le processus et son organe de commande constituent le système de commande. L'élaboration de l'organe de commande s'articule en plusieurs étapes. Dans notre cas commander un processus, c'est imposer à celui-ci un comportement défini à l'avance en fonction des signaux de commande ; l'ensemble commande adaptative plus processus peut donc être considéré comme un système qui réalise une fonction (non linéaire).

IV.3 Commande adaptative des systèmes : [31], [32]

IV.3.1 Généralité sur la commande adaptative :

La notion de la commande adaptative regroupe un ensemble de concepts et de techniques permettant un ajustement automatique en temps réel des paramètres du régulateur mis en œuvre dans une boucle de commande pour maintenir un niveau de performance désiré lorsque les paramètres du processus sont inconnus ou varient dans le temps. La réalisation d'une commande adaptative ne présente de sens que pour un processus pour lequel on sait réaliser une commande conventionnelle à partir d'un régulateur de type donné. L'adaptation intervient au niveau de

L'ajustement des paramètres de régulateur ou parfois directement au niveau du signal de commande de façon à satisfaire ou optimiser un indice de performances préalablement défini par l'intermédiaire d'un mécanisme d'adaptation. Les progrès réalisés et les résultats obtenus dans le cas des schémas de commande adaptative pour les systèmes monovariables ont incité un certain nombre de chercheurs à s'intéresser à l'étude des schémas de commande pour les systèmes multi variables.

IV.3.2 Principe de commande adaptative

L'origine de la commande adaptative remonte aux années 1950 : les automaticiens se sont vite aperçus en effet qu'un contrôleur avec des paramètres fixes n'était pas toujours capable d'assurer les performances voulues. Par exemple dans le cas où les paramètres du système variaient avec le temps.

L'idée d'adapter en contenu des paramètres dans le but d'améliorer les performances du procédé était née avec l'algorithme du gradient. Durant cette période où la commande adaptative suscita un réel intérêt, deux approches allèrent se dégager pour élaborer un contrôleur adaptatif. L'une s'appelle la commande adaptative par le modèle de référence ou MRAC, la seconde concerne l'auto-régulateur (Self-Tuning Regulator STR ou STC).

IV.4 Classification des approches de la commande adaptative

Les approches de la commande adaptative peuvent être répertoriées en deux classes qui sont :

IV.4.1 Commande adaptative directe (Direct adaptive control) :

Une commande adaptative est dite directe si les paramètres du contrôleur sont ajustés en une seule étape, parmi ces commandes, on trouve le MRAC proposé par Whitaker en 1958 et sa première application remonte au début des années 70. La figure 5.1 présente un schéma descriptif du MRAC.

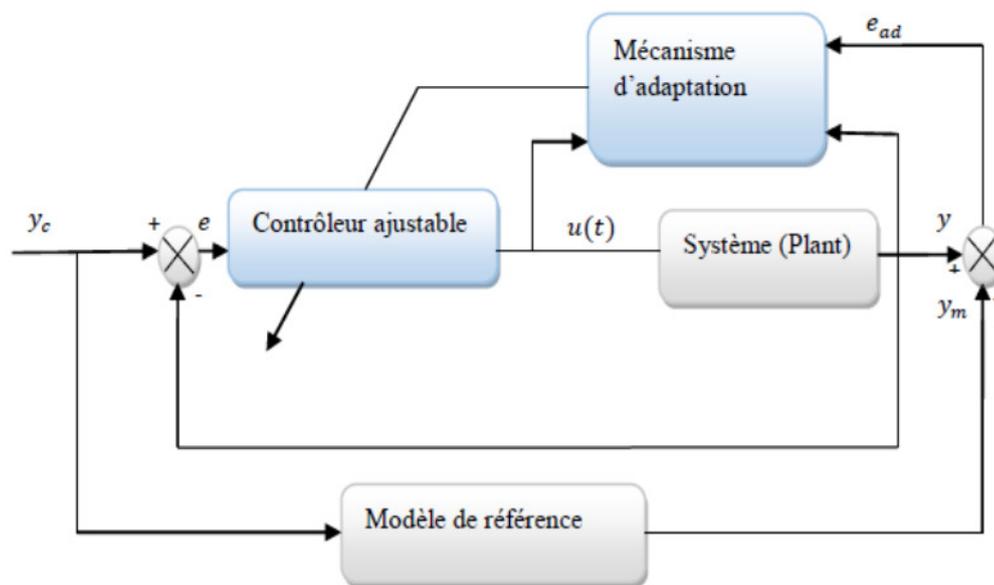


Figure (IV.2) : Schéma de principe de la commande adaptative directe

Avec - y_c : Représente la référence

- y_m : Sortie du modèle de référence (désirée)

- e : Erreur entre sortie du système et celle désirée.

IV.4.2 Commande adaptative indirecte (Indirect adaptive control) :

Une commande adaptative est dite indirecte si les paramètres du contrôleur sont adaptés en deux étapes [31] :

- ✚ Etape 1 : Estimation des paramètres du modèle du procédé.
- ✚ Etape 2 : Calcul des paramètres du contrôleur à partir des paramètres estimés. La technique élaborant un régulateur auto-ajustable (Self Tuning Regulator STR) est une commande adaptative indirecte. Elle est initialement proposée par Kalman en 1958 et la première application industrielle est concrétisée au début des années 70, le principe cette technique peut être schématisé par :

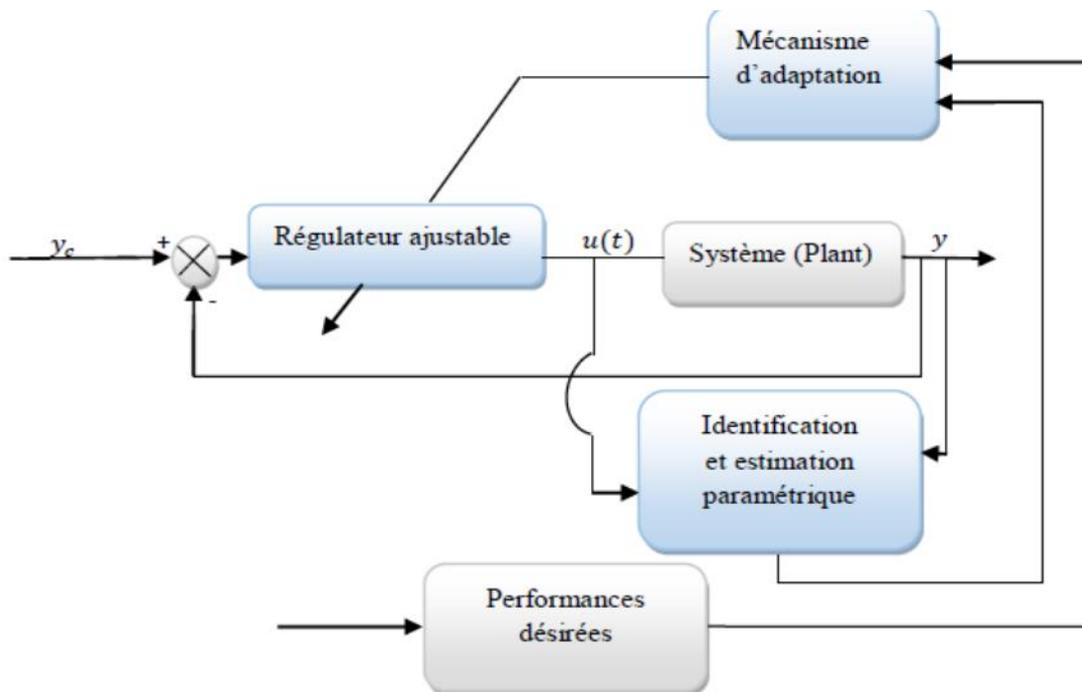


Figure (IV.3) : Schéma de principe de la commande adaptative indirecte

IV.5 Commande Adaptative à modèle de référence (MRAC) :

La commande adaptative à modèle de référence (notre choix) a été développée aux USA représente l'une des commandes adaptatives les plus connues [8, 10, 11]. Elle a été originalement adoptée pour résoudre un problème dans lequel les spécifications de performances sont données en termes d'un modèle de référence, ce dernier donne une indication sur comment la sortie du système doit idéalement répondre à un signal de commande. Son principe de base consiste à adapter les paramètres du contrôleur de telle sorte l'erreur entre le système et le modèle de référence soit minimale.

La figure (IV.3) Représente le principe de fonctionnement de cette stratégie de commande

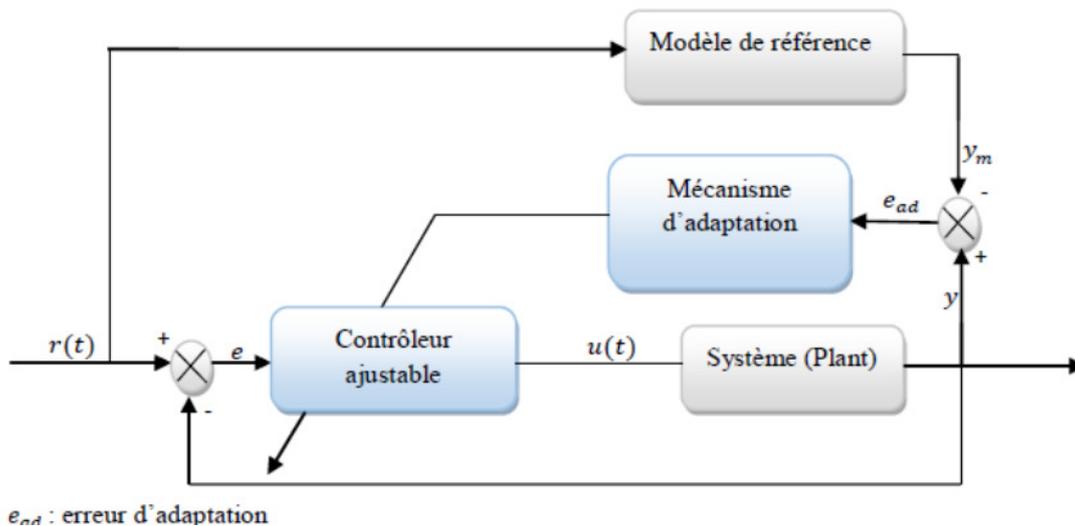


Figure (IV.4) : Structure de la commande adaptative directe a model de référence (MRAC)

Plusieurs approches ont été développées pour la solution du MRAC. Parmi lesquelles et les plus populaires, on peut citer :

- ❖ Approche basée sur le gradient c'est le cas de mon étude.
- ❖ Approche basée sur la théorie de la stabilité de Lyapunov.

IV.5.1 Synthèse de CAMR par l'approche de gradient (MIT) :

L'idée fondamentale du CAMR est d'ajuster les paramètres du contrôleur de façon à minimiser l'erreur d'adaptation $e_{ad} = y - y_m$. Mathématiquement il s'agit alors de trouver les paramètres du contrôleur assurant la minimisation du critère donné par l'expression suivante :

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e_{ad}^2 \quad (IV.1)$$

Où θ représente le vecteur qui contient les paramètres du contrôleur à synthétiser.

L'évolution de chaque paramètre du vecteur θ est supposé constante ou lentement variable. Dans ce cas l'algorithme du gradient assurant la minimisation souhaitée de J peut être exprimé par la formule (IV.2) ci-dessous :

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \alpha \frac{\partial J}{\partial \theta} \quad (IV.2)$$

Dans le domaine temporel, l'expression (IV.2) peut être reformulée par :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\alpha \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\alpha \cdot e_{ad} \cdot \frac{\partial e_{ad}}{\partial \theta} \quad (IV.3)$$

La fonction de transfert $G(s) = y(s)/u(s)$ de mon processus UPFC s'écrit sous la forme :

$$G(s) = \frac{1}{s+r/L} \quad (IV.4)$$

Ce qui conduit à l'équation différentielle suivante, si les conditions initiales sont nulles.

$$\frac{dy(t)}{dt} + \frac{r}{L}y(t) = u(t) \quad (IV.5)$$

Le système est d'ordre 1, il nécessite donc une seule variable d'état x . Cette variable d'état représente la sortie d'un intégrateur comme montre la figure (IV.5).

$$x(t) = y(t) \quad ; x^*(t) = y^*(t) \quad (IV.6)$$

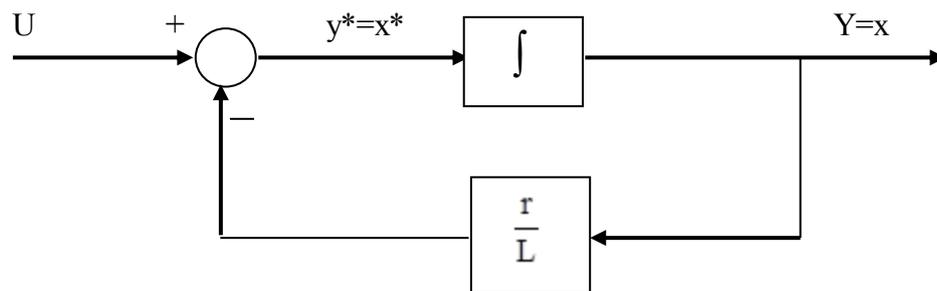


Figure (IV.5) : Schéma fonctionnel de la représentation d'état de l'UPFC

Des équations (IV.5) et (IV.6), on déduit les équations de la représentation d'état de l'UPFC :

$$\begin{cases} x^* = -\left(\frac{r}{L}\right) \cdot x + u \\ y = x \end{cases} \quad (IV.7)$$

Soit le système (à commander) présenté par l'équation d'état ci-dessous :

$$y' = -ay + bu \quad (IV.8)$$

Avec a et b sont des variables inconnues, et soit le modèle de référence décrit par :

$$y'_m = -a_m y_m + b_m u_c(t) \quad (IV.9)$$

Avec a_m et b_m sont des paramètres supposés connus et u_c représente l'entrée de consigne à suivre.

On suppose que la structure de la loi de commande est imposée par :

$$u(t) = t_0 u_c(t) - s_0 y(t) \quad (IV.10)$$

L'objectif est de trouver les lois d'adaptation de t_0 et s_0 assurant la bonne minimisation de l'erreur de poursuite Figure (IV.6).

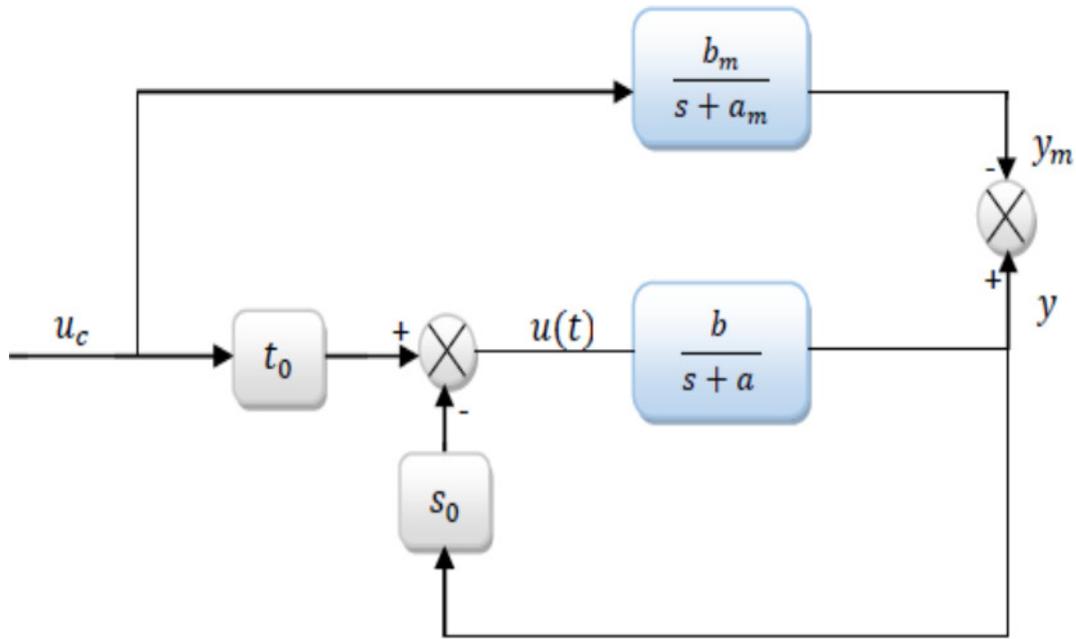


Figure (IV.6) : Erreur de poursuite.

$$y' = -ay + bu \quad (IV.11)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} sy = -ay + bu \\ u(t) = t_0 u_c(t) - s_0 y(t) \end{cases}$$

$$sy = -ay + bt_0 u_c - bs_0 y$$

$$(s + a + bs_0)y = bt_0 u_c$$

$$\Rightarrow y = \frac{bt_0}{s+a+bs_0} u_c \quad (IV.12)$$

Et comme $e = y - y_m$, alors :

$$e = \frac{bt_0}{s+a+bs_0} u_c - \frac{b_m}{s+a_m} u_c \quad (IV.13)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial e}{\partial t_0} = \frac{b}{s+a+bs_0} u_c, \quad \frac{\partial e}{\partial s_0} = \frac{-b^2 t_0}{(s+a+bs_0)^2} u_c$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial e}{\partial s_0} = \frac{-b}{s+a+bs_0} \cdot \frac{bt_0}{s+a+bs_0} u_c = \frac{-b}{s+a+bs_0} y \quad (\text{IV.14})$$

Le système en boucle fermée se comporte comme un modèle de référence ayant la dynamique suivante :

$$s + a + bs_0 = s + a_m \quad (\text{IV.15})$$

$$\theta(t) = \begin{pmatrix} t_0(t) \\ s_0(t) \end{pmatrix} \quad (\text{IV.16})$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \Leftrightarrow \frac{d\theta}{dt} = \begin{cases} \frac{dt_0}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial t_0} = -\gamma e \frac{b}{s+a+s_0 b} u_c \\ \frac{ds_0}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial s_0} = +\gamma e \frac{b}{s+a+s_0 b} y \end{cases} \quad (\text{IV.17})$$

Et comme l'équation (IV.15) s'écrit sous la forme suivante : $s + a + bs_0 = s + a_m$

Alors on obtient les lois d'adaptation suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dt_0}{dt} = -\gamma' e \frac{u_c}{s+a_m} = st_0 \\ \frac{ds_0}{dt} = +\gamma' e \frac{y}{s+a_m} = ss_0 \end{cases} \text{ Avec } \gamma' = \gamma \cdot b \quad (\text{IV.18})$$

$$t_0 = \frac{1}{s} \cdot \frac{-\gamma' e}{s+a_m} u_c \quad (\text{IV.19})$$

$$s_0 = \frac{1}{s} \cdot \frac{\gamma' e}{s+a_m} y \quad (\text{IV.20})$$

Notent que $a = \frac{r}{L}$ et $b = 1$ donc en peut calculée les lois d'adaptation (t_0 et s_0)

L'implémentation de ces derniers régulateurs peut être donnée par la figure ci-dessous :

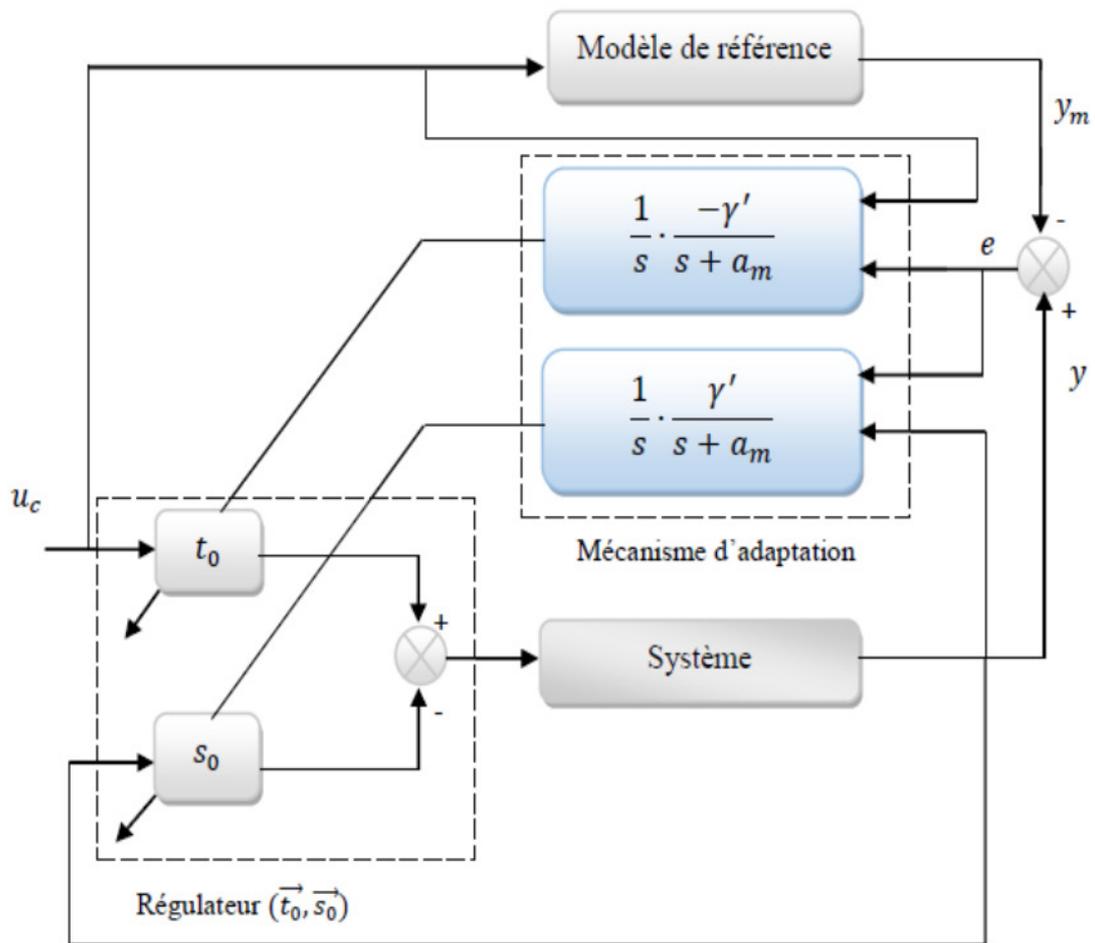


Figure (IV.7) : Schéma bloc des lois d'adaptation t_0 et s_0 du système.

Remarques :

- L'erreur peut être nulle, alors que les paramètres ne sont pas ceux du suivi parfait, c'est-à-dire, les paramètres ne convergent pas nécessairement vers ceux du suivi parfait (paramètres optimaux).
- Le paramètre γ doit être petit ou bien faible.
- Pour assurer la convergence, le signal de référence $uc(t)$ doit être suffisamment variable (excitation persistante).
- Des règles d'ajustement modifiées ont été proposées :

MRAC gradient

- Choix du critère J (J dépendra de e_{ad}).
- Choisir une structure de commande, exemple : $u(t) = t_0 u_c(t) - s_0 y(t)$
- Calculer les gradients nécessaires pour obtenir la loi d'adaptation :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta} \quad (\text{IV.21})$$

Ensuite calculer les lois d'adaptation.

Notons que les méthodes du gradient ne garantissent pas la stabilité en boucle fermée.

IV.5.2 Synthèse de MRAC par l'approche de la théorie de la stabilité de Lyapunov :

Contrairement à la méthode du gradient, la méthode que nous allons voir, construit un MRAC garantissant la stabilité. Ceci est réalisé en imposant une loi d'adaptation des paramètres du contrôleur telle que le système en boucle fermée reste stable. Pour cela, on utilise la théorie de la stabilité de Lyapunov (plus exactement la 2ème méthode de Lyapunov) [33]. Rappelons le théorème de stabilité de Lyapunov

Théorème de Lyapunov

On considère un système décrit par :

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad x \in \mathcal{R}^n, \quad f(0, t) = 0 \quad (\text{IV.22})$$

On définit la fonction de Lyapunov $V(x, t)$ telle que :

- ✓ $V(0, t) = 0$ pour tout $t \in \mathcal{R}$. $\mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$
- ✓ $V(x, t)$ est définie positive, c'est-à-dire, $\forall t, V(x, t) > 0$

Alors le système $\dot{x} = f(x, u, t)$ est asymptotiquement stable si et seulement si $\dot{V} = (x, t)$ est définie négative, c'est-à-dire, $\dot{V} = (x, t) < 0, x \neq 0$ (condition suffisante).

Le calcul du MRAC basé sur la théorie ci-dessus, consiste à définir une fonction de Lyapunov stabilisant le système à commander. Celle-ci est assurée par la recherche à des lois d'adaptation vérifiant que V soit définie négative. La structure du contrôleur étant fixée.

Remarque :

Dans mon système j'ai basé sur la proche de gradient avec les paramètres de la ligne connus et on simule le groupe (commande adaptative directe (MRAC) par la proche de gradient (MIT)

IV.6 Résultats de simulations du système par l'application la command adaptative (MRAC) :

1- Les allures des deux composantes de courants I_{ds} et I_{qs} figure (IV.8).

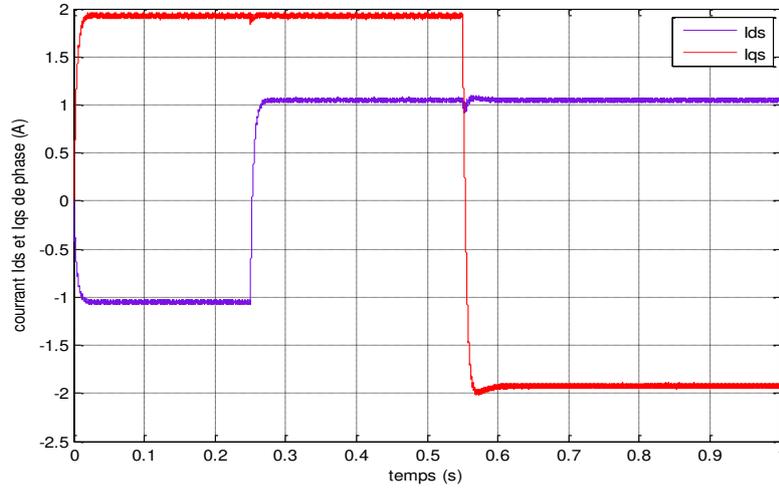


Figure (IV.8) : Courants de phase (I_{ds} et I_{qs})

2- Les allures des puissances résultantes figure (IV.9) sont :

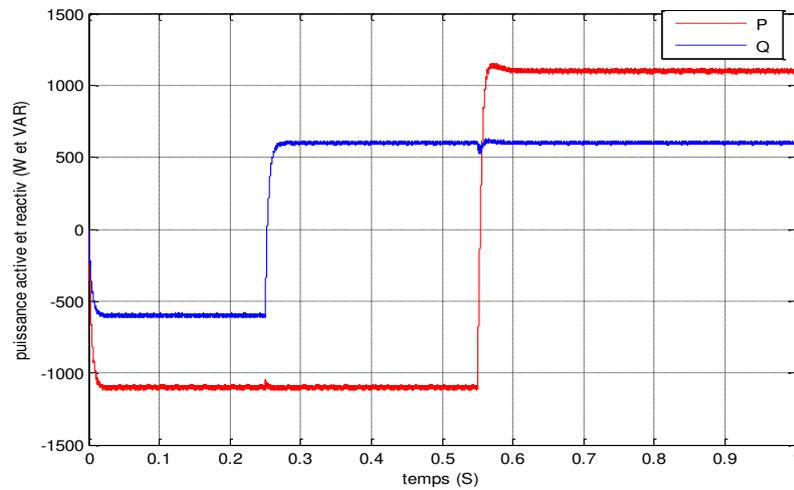


Figure (IV.9) : Réponse des puissances avec un découplage parfait (avec la commande adaptative directe)

3- Test de robustesse

De même pour la commande adaptative (CAMR), on a varié la réactance X_L de la ligne de transmission à 35% de la valeur réelle d'où la réponse des puissances active et réactive indiqué sur la figure suivante :

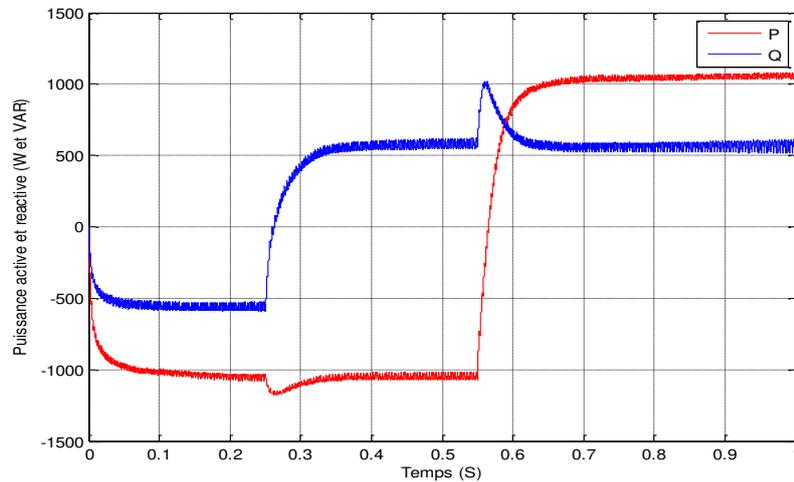


Figure (IV.10) : Réponse des puissances aux variations de la réactance

4- Test de stabilité

On a simulé cette fois-ci en introduisant une perturbation de durée 0.8 ms et d'amplitude 1.5 pour tester encore une fois la stabilité de notre système UPFC figure (IV.11).

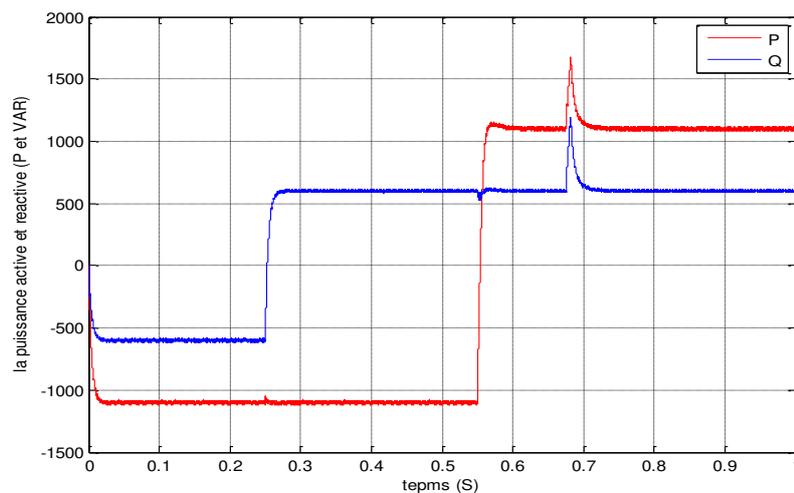


Figure (IV.11) : Réponse des puissances pour un système perturbé

IV.7 Synthèse entre le régulateur classique PI-Découplé et CAMR :

J'ai comparé les résultats des puissances actives et réactive de mon système par un test de robustesse avec variation de la réactance de la ligne de transmission (+35%) et on obtient les allures suivantes :

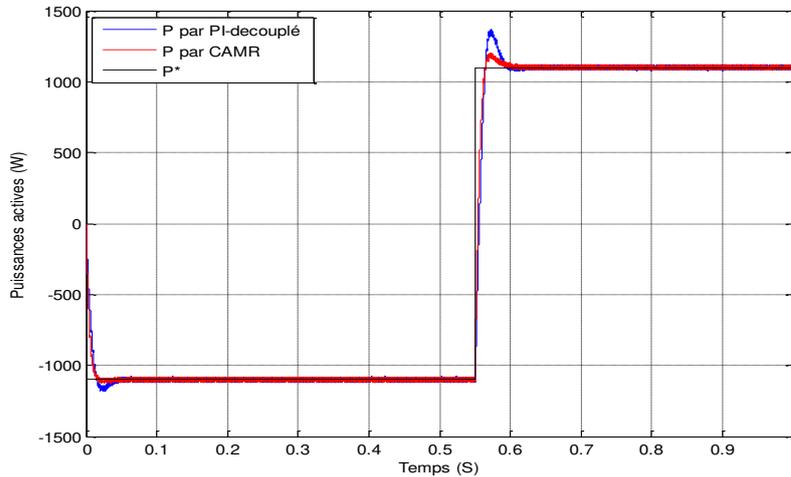


Figure (IV.12) : les puissances actives commandés par (PI-D et CAMR)

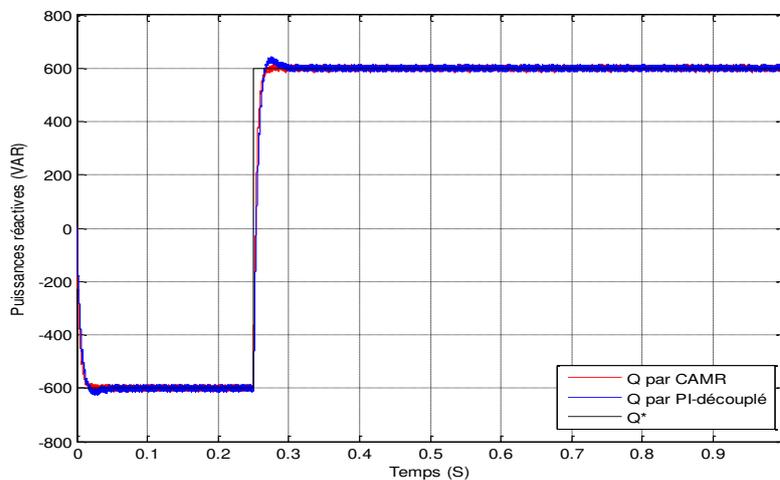


Figure (IV.13) : les puissances réactives commandés par (PI-D et CAMR)

Je peux constater suivant les allures des puissances active et réactive par la commande adaptative par modelé de référence du système UPFC a donné de bonnes performances dynamiques : le comportement du système, la stabilité et la poursuite des valeurs réels à leurs références par rapport de régulateur classique PI-Découplé.

IV.8 Conclusion :

L'analyse de ces résultats, nous permet aussi de conclure sur l'utilisation de la modélisation dans le repère des axes d-q qui améliore la réponse transitoire de l'UPFC et réduit l'interaction entre la puissance active et réactive. On peut dire que le contrôleur PI peut causer une large interaction entre les boucles de courant et un dépassement important au niveau des puissances. Pour réaliser un découplage parfait, il faut que les paramètres de la ligne soient connus donc d'après les résultats de simulation, on conclut que le contrôleur PI-D à une large interaction et un temps de réponse courte et rapide. Mais d'après les tests (stabilité et robustesse) notre contrôleur pourrait être la commande idéale pour le système UPFC si les variations de l'inductance X_L n'ont pas affectés ses performances donc le choix d'une commande adaptative par modèle de référence nous donne avec le teste de robustesse une poursuite de cosigne des puissances mieux que le régulateur classique

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude j'ai rédigé les principaux résultats d'une étude en simulation d'un système FACTS du type contrôleur électronique unifié du flux de puissance pour la compensation (UPFC), traduction littérale 'unified power flow controller'.

Un rappel sur les difficultés rencontrées dans la gestion des flux et les perturbations dans le réseau et les moyens de compensation de l'énergie réactive est abordé dans le premier chapitre. Par suite, j'ai défini le projet ambitieux qui faisant appel à l'électronique de puissance dénommés FACTS. Parmi ces derniers, je 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 type de compensateur. Après le développement d'un modèle mathématique de l'UPFC et son principe de fonctionnement, des réglages ont été mis en évidence à savoir un pour le courant triphasé (onduleurs parallèle et série) et l'autre pour la tension continue. Notre intérêt s'est porté 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 par rapport au PI classique. Ce régulateur minimise l'interaction entre les deux puissances active et réactive. Sa robustesse a été testée vis à vis des variations paramétriques, telle que la réactance de la ligne.

Je peux dire que le régulateur PI-Découplé pouvait être la commande idéale pour le système UPFC si la variation de (+35 %) de la réactance n'a pas dégradé ses performances dynamiques, comme a été souligné dans ce projet. Le modèle du procédé n'est jamais parfait. De cette analyse émerge un résultat intéressant qui se résume au fait qu'il est possible d'appliquer une modification très simple à un régulateur PI classique afin qu'il devienne un régulateur de très hautes performances dynamiques quel que soit la stratégie de commande utilisée.

La commande adaptative peut alors être une alternative. Ce type d'approche s'applique à des systèmes dont les dynamiques sont connues mais dont certains paramètres sont mal identifiés voire inconnus ou même variant lentement dans le temps. Des théories existent sur la commande adaptative dans le cas linéaire et même dans le cas non linéaire avec un vecteur d'état mesurable et des dynamiques linéairement para-métrisables. J'ai choisi la commande adaptative par modèle de référence avec l'approche de gradient. La combinaison de la commande adaptative avec le régulateur classique PI-Découplé a porté ses fruits et a été la source de nombreux travaux. Les lois adaptatives implantées dans le cas idéal pouvaient mener à l'instabilité en cas de perturbations externes bornées.

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

Pour des futurs travaux, l'action suivante à mener c'est de chercher un champ d'application de ces méthodes pour des grands réseaux pratiques tel que le réseau National Sonelgaz. Aussi, je propose l'application d'autres méthodes de réglage pour le choix des emplacements des contrôleurs qui peuvent aborder la stabilité des réseaux électriques de grande dimension, ce qui est le cas de la majorité des problèmes de recherche.

Bibliographie

- [01] https://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_en_r%C3%A9gime_alternatif
- [02] Legrand Catalogue, "Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques " P0910ALPESFR- EX210027 - Mars 2010
- [03] E. Chauvin Arnoux Group "Compensation d'énergie réactive " Guide technique, 906 210 239-Ed.1- 02/2011.
- [04] Schneider Electric " La compensation de l'énergie réactive " Guide technique, Intersections -Novembre 2006.
- [06] E. Gholipour. Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.
- [07] Sabir Messalti, Ahmed Gherbi et Saad Belkhiat, " Assessment of Power System Transient Stability Using Shunt FACTS Devices: SVC and TCB", International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM) IEEE, Tunis, Avril 2015
- [08] Ali Zafari and Mostafa Jazaeri. " STATCOM systems in distribution and transmission system applications: are view of power-stage topologies and control methods ". Int. Trans. Electr. Energ. Syst, Vol. 26. No. 2, pp. 323-346, February 2016.
- [09] Sankalp Asawa and Sam Al-Attiyah, "Impact of FACTS device in Electrical Power System ", International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) – IEEE Novembre 2016, pp. 2488-2495.
- [10] Qiu Qin and N. Eva Wu, " Control Effectiveness of FACTS Devices in Power Systems", 2016 American Control Conference (ACC) Boston Marriott Copley Place July 6-8, 2016. Boston, MA, USA.
- [11] Sami Ammari, " Interaction des dispositifs FACTS avec les charges dynamiques dans les réseaux de transport et d'interconnexion" , Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, Novembre 2000.
- [12] Huy NGUYEN DUC, "Amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance du réseau électrique avec les dispositifs FACTS et les mesures à distance" , Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure .Université du QUÉBEC, Janvier 2011.

- [13] Ismaeil Ghahremani and Innocent Kamwa, "Optimal Placement of Multiple-Type FACTS Devices to Maximize Power System Loadability Using a Generic Graphical User Interface ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No.2, 2013, PP.764-778.
- [14] Amir Adel Eldamaty, " Damping interarea and torsional oscillations using FACTS devices", Thèse de doctorat, University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, May 2005.
- [15] Jingchao Deng, " robust damping control of power systems with FACTS ", Thèse de doctorat, University of Birmingham, March 2014.
- [16] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez and César AngelesCamacho", FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", 2004 John Wiley & Sons Ltd.
- [17] Mahiraj Singh Rawat and Shelly Vadhera, " Comparison of FACTS Devices for Transient Stability Enhancement of Multi Machine Power System " ,2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications, pp.1-5.
- [18] K. WANG and M. L. CROW, " Modern flexible AC transmission system (FACTS) devices ", Missouri University of Science and Technology, USA, Woodhead Publishing.
- [19] Yang Xiaonan, Chen Hongkun, Zhao Xiaochun, Wang zhengfeng and Wu Xu, "Modeling and Control of Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer " ,2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), pp.1-6.
- [20] K. Bouleriel " Etude et simulation d'une commande du contrôleur électronique d'écoulement de puissance unifié (UPFC) " Mémoire de magister. USTO Oran ,2003.
- [21] T. Allaoui " Réglage robuste de l'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissances dans un réseau électrique" Mémoire de magister. USTO Oran, 2002.
- [22] S. Zebirete " Réglage multivariable d'une UPFC pour la compensation des puissances active et réactive " Mémoire de magister. ENSET d'Oran ,2002.
- [23] N. Rahmouni " Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique à l'aide d'un UPFC à base d'un onduleur à trois niveaux" Mémoire de Magister, université de Batna, 2011-2012.

- [24] H. Azara " Modelling and control of unified power controller (UPFC) " Mémoire de Master, MORGAN Town, west VIRGINIA, 2000.
- [25] K. Merabet " Commande d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée " Mémoire de Master en génie électrique, UTMS Saida 2011.
- [26] 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'ENPOran 2013.
- [27] H. Rasmussen. " Automatic tuning of PID – regulators " Dk 9290 Aalborg, Denmark September 6, 2000.
- [28] R. Longchamp " Commande numérique de systèmes dynamiques " presses polytechniques et universitaire romandes, CH-1015 LAUSANNE, 1995.
- [29] M. Mokhrati et M. Marie " Application de Matlab5 et simulink 2 " Edition SPGIGER, 1998.
- [30] M. Mokhrati " Matlab 5,2 & 5,3 et simulink 2&3 pour étudiants et ingénieurs " Edition SPRIGER ,2000.
- [31] K. J. Astrom and B. Wittenmark, " Adaptive control "., Dover, 2008.
- [32] L. merabet et A. Bouanane, " Commande adaptative direct du système UPFC ", E270 ; 2èmes Journées d'Electrotechnique, de Maintenance et de Compatibilité Electromagnétique à l'ENSETOran Organisées (JIEMCEM2010) du 25 au 27 Mai 2010 à Oran
- [33] I. D. Landau, R. Lozano, M. M'Saad, and A. Karimi, " Adaptive control ". Springer, 2011.