



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de  
la Recherche Scientifique  
Université Ibn Khaldoun – Tiaret –



**Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière**

**Département des Sciences et de la Technologie**

**MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER**

SPECIALITE: Génie Electrique

OPTION: Analyse et Commande des Systèmes Electriques

**Présenté par**

**BOUDALI Abdelkader**

**Ingénieur en Electrotechnique de l'Université Ibn Khaldoun Tiaret**

**SUJET DU MEMOIRE :**

***Commande intelligente de l'UPFC***

**SOUTENU LE 30/ 09 / 2012 Devant Le Jury Composé de :**

Mr MIMOUNI Abdenbi	M.C.A	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Président
Mr ALLAOUI Tayeb	M.C.A	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Rapporteur
Mr MOUDJAHED Mohamed	M.C.A	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Examineur
Mr MESLEM Youcef	M.C.A	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Examineur

Année Universitaire : 2011/2012

## *Remerciements*

*Je remercie vivement Monsieur ALLAOUI Tayeb, Maître de Conférence à l'Université d'Ibn Khaldoun Tiaret, pour son encadrement et ses qualités humaines, tout au long de la préparation de ce travail, comme aussi je lui témoigne toute ma reconnaissance pour les conseils et les orientations qu'il m'a prodigués et de m'avoir fait profiter de son expérience dans le domaine du Génie Electrique.*

*Je remercie sincèrement Monsieur A.MIMOUNI, pour le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*Mes vifs remerciements vont également à Messieurs M.MOUDJAHED, Y.MESLEM, d'avoir accepté d'examiner mon travail et d'être membres du jury de soutenance.*

*Je tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du Département de Génie Electrique pour leur disponibilité et encouragement ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Enfin, je remercie les nombreux collègues et amis. Je ne les citerai pas mais qu'ils sachent que j'ai une pensée reconnaissante à leur égard.*

*Dédicace*

*À ma mère ;*

*Ma femme ;*

*Mes enfants ;*

*Mes frères ;*

*Mes sœurs ;*

*Ma famille ;*

*Mes amis ;*

*Mes collègues de travail.*



*Une pensée particulière à la mémoire de mon père*

## ملخص

يعتبر مغير الاستطاعة الكهربائية النظام الأحسن حيث بإمكانه مراقبة المقاييس الثلاثة المرتبطة بنقل الاستطاعة عبر الكوابل الكهربائية حيث يخفف الاهتزازات و ذلك عن طريق الإمتصاص أو التموين للاستطاعة حسب الحاجة. يعتبر عمل شبكة الأعصاب الاصطناعية كالتعيين و التحكم في فرض حالة مرغوب فيها بالرغم من احتمال وجود اضطرابات في الشبكة. إن هذا العمل المنجز يعتمد على اعطاء نموذج لمغير الاستطاعة الكهربائية وذلك باستعمال طريقة التحكم الذكية و التقليدية. لقد تم ادخال طريقة التحكم و مبادئ استعمالها من اجل مقارنة النظام التقليدي و نظام التحكم العصبي العكسي على حالة الشبكة الكهربائية.

**كلمات المفاتيح:** الشبكة الكهربائية، انظمة نقل التيار المتناوب FACTS، مغير الشحنة الشامل UPFC، شبكة الأعصاب الاصطناعية، التحكم العصبي العكسي.

## Résumé

L'UPFC est le dispositif le plus puissant grâce à son pouvoir de contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique. Il amortit les oscillations du réseau en échangeant avec lui, par absorption ou fourniture, selon ces besoins, de la puissance active et/ou de la puissance réactive. Les tâches d'un réseau neuronal artificiel telles que l'identification, qui vise à reproduire un comportement, et la commande qui cherche à imposer le suivi d'une consigne ou d'un état désiré de sortie malgré l'influence d'éventuelles perturbations. L'identification et la commande permettent de modéliser et de contrôler des systèmes dynamiques plus complexes, de les rendre plus autonomes, de prendre des décisions et d'intégrer une forme d'intelligence. Ce travail consiste principalement à la modélisation, la commande et la simulation du système électrique muni d'un UPFC par l'utilisation d'une commande intelligente en vue d'améliorer les caractéristiques du système électrique. La configuration de la commande et son principe de fonctionnement sont décrites en détail pour examiner l'influence de la commande classique et celle de la commande neuronale inverse sur le comportement du réseau électrique.

**Mots clés:** Réseau Electrique, FACTS, UPFC, R.N.A, Commande Neuronale Inverse.

## Abstract

The UPFC is the most powerful device with its power to control the three parameters associated with power flow in a power line. It dampens the oscillations of the network by exchanging with him, by absorption or supply, according to these needs, active power and / or reactive power. The tasks of an artificial neural network such as identification, which aims to reproduce a behavior, and the command that seeks to impose a track record or a desired state output despite the influence of possible disturbances. Identification and control are used to model and control complex dynamic systems, making them more autonomous, make decisions and integrate a form of intelligence. This work is focused on the modeling, control and simulation of the electrical system with a UPFC by the use of intelligent control to improve the characteristics of the electrical system. The control configuration and its operating principle are described in detail to examine the influence of classical control and the neural inverse control of the behavior of the grid.

**Keywords:** Electrical Network, FACTS, UPFC, RNA, Neural Inverse Control.

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

La demande croissante d'énergie électrique notamment dans les pays en voie d'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de cette énergie n'a cessé d'augmenter. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

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 (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

En effet, de nouveaux dispositifs basés sur les progrès de l'électronique de puissance pallient aux défaillances des régulations conventionnelles. Ces dispositifs sont appelés FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [1,2]. Implantés dans les réseaux, ils ont l'aptitude de contrôler l'écoulement de puissance par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance) et permettent l'augmentation des marges de stabilité des réseaux électriques entraînant ainsi leur exploitation optimale.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les performances de l'UPFC comme étant un variateur de charge universel permettant de contrôler l'écoulement de puissance active à travers une ligne de transport d'énergie électrique et de compenser la puissance réactive.

Afin de répondre aux objectifs cités ci-dessus, ce mémoire est réparti comme suit :

Un premier chapitre consacré à l'étude théorique des différents systèmes FACTS en générale, à savoir leurs classifications et leur principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre nous présentons l'état de l'art des systèmes FACTS.

Afin d'étudier le comportement de l'UPFC associé à un réseau de transport et la synthèse de sa loi de commande, le troisième chapitre développe un modèle de l'UPFC. La structure de base, le principe de fonctionnement, le modèle mathématique, l'identification de références et les blocs des commandes de l'UPFC y sont également expliqués. Ainsi l'insertion de l'UPFC dans le réseau et les résultats de simulation sont exposés.

Le dernier chapitre est consacré à l'introduction d'une commande intelligente (réseau neuronal inverse) dans l'UPFC, en suite nous exposons les résultats de simulation obtenus ainsi que leurs interprétations.

Enfin, on terminera ce travail par une conclusion générale et on envisagera quelques perspectives futures permettant d'améliorer ce travail.

### **I.1 Introduction**

#### **I.1.1 Historique**

Si, dès 1882, EDISON a réalisé la première distribution d'électricité en courant continu sous une tension de 110 V pour l'éclairage et si la première transmission à distance a été réalisée en 1882 entre Miesbach et Munich (57 Km, 2000 V), il est vite apparu que la solution pour un transport à distance devrait passer par une tension plus élevée pour diminuer le volume de cuivre (Deprez en 1981) et donc utiliser le courant alternatif et le transformateur dont le principe était breveté par Gaulard et Gibbs en 1881. Les générateurs triphasés sont de conception plus simple que les machines à courant continu et la coupure de courant plus facile. En 1891, une liaison en courant alternatif sous 15 KV reliait une centrale sur le Neckar à Lauffan à Francfort (sur une distance de 176 Km). Vers 1920, la fréquence de 50 Hz est normalisée en Europe et la tension passe à 132 KV grâce notamment à l'invention des solateurs suspendus. Les raisons de ce transport à distance proviennent, au début, de la distance entre les centrales hydrauliques et les villes. Lorsque des centrales thermiques sont développées, il est vite apparu qu'une complémentarité existait entre ces divers modes de production, d'où une meilleure utilisation des ressources par une interconnexion tant au sein d'un pays qu'entre pays voisins. Les liaisons internationales vont alors rapidement se développer : en 1922 une liaison à 150 KV entre la France et la Suisse, en 1929 une liaison entre l'Autriche et l'Allemagne en 225 KV, en 1935 tout l'est de la France est interconnecté avec la Belgique, la Suisse et l'Allemagne, interconnexion sous 380 KV de l'Europe occidentale en 1985, extension vers l'Europe de l'est (Pologne, Hongrie, ...etc.) et le grand Maghreb dans les années 1990 [2]

#### **I.1.2 Architecture des réseaux électriques**

Le réseau à très haute tension THT (225KV,400 KV) d'interconnexion internationale forme un ensemble maillé sur lequel sont raccordées les grandes centrales (centrales nucléaires de 1000 MW, par exemple). Il est complété par le réseau de répartition (60 à 150 KV) souvent exploité en poches reliées au niveau supérieur de tension et sur lequel se raccordent des centrales électriques de moindre puissance, ainsi que les grands utilisateurs industriels. On trouve en suite un réseau de distribution (de 20 KV à 400 V) desservant la clientèle (petites et moyennes entreprises, commerces, secteur résidentiel). Ce réseau de distribution est généralement de structure radiale, éventuellement bouclé dans des zones urbaines pour assurer la continuité de service, voire bouclé même en basse tension dans certaines grandes villes. Le coût d'un réseau bouclé est plus élevé par la complexité du

contrôle et de la protection, mais ce type de réseau se caractérise par une meilleure continuité de service.

L'alimentation d'une grande agglomération se fait en général par une boucle à 380 ou 225 KV, alimentée par le réseau d'interconnexion et sur laquelle sont raccordés des postes abaisseurs vers le réseau de répartition, souvent en câble pour la pénétration urbaine. Sur ce réseau de répartition sont branchés des postes abaisseurs vers le réseau de distribution (15 à 20 KV), bouclé et enfin le réseau basse tension de structure radiale alimentant les consommateurs (en triphasé ou en monophasé) [3].

### **I.2 Problématique du fonctionnement des réseaux**

Pour des raisons économiques (effet de taille...) ou techniques (localisation des réserves hydrauliques et des sources froides...), les unités de production sont souvent géographiquement très concentrées. Par contre, la consommation est beaucoup plus dispersée. Les réseaux de transport et d'interconnexion à très haute tension (THT) assurent la liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation. Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée, l'énergie la moins chère possible à un instant donné. Par ailleurs, le maillage du réseau contribue à la sécurité d'alimentation et permet de faire face, dans des conditions économiques satisfaisantes, aux aléas locaux ou conjoncturels qui peuvent affecter l'exploitation (indisponibilité d'ouvrage, aléas de consommation, incidents...). Les réseaux THT contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre, ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation [4].

Par ailleurs, la qualité du service est également un souci majeur de l'exploitant. Sur le plan pratique, cette qualité nécessite :

- \*De maintenir les caractéristiques du produit (tension, fréquence) dans les limites très précises du cahier des charges.

- \*De limiter, autant que faire se peut, les interruptions de service.

Les réseaux THT jouent aussi un rôle très important pour respecter ces contraintes car:

- \*Les références de tension qui vont conditionner l'ensemble du plan de tension dans le réseau sont fixées, pour l'essentiel, par les groupes de production raccordés aux réseaux THT.

- \*La fréquence est, de même, fixée par les groupes de production qui doivent rester synchrones en régime permanent.

- \*La sécurité d'alimentation des grands centres de consommation dépend très fortement de la structure des réseaux de transport.

Sachant que, compte tenu de l'inertie mécanique relativement faible de certains composants des systèmes électriques (groupes de production et moteurs) et de la grande vitesse de propagation des phénomènes, les réseaux THT créent un couplage dynamique très fort entre les moyens de production, d'une part, et les charges (consommation), d'autre part. Au-delà de l'examen du problème de la répartition économique et en sécurité de la puissance, l'étude du fonctionnement de ces vastes systèmes interconnectés et fortement couplés est donc absolument nécessaire. Elle portera sur leur réglage et leur stabilité.

Enfin, il va de soi qu'il est nécessaire de protéger les systèmes électriques qui peuvent être affectés par de nombreux types d'incidents. Il convient de distinguer la protection des ouvrages du réseau proprement dit (lignes...) et celle du système production-transport. La protection du système production-transport est essentielle, car certains incidents (pertes de ligne en cascade, pertes brutales de moyens de production importants...) peuvent induire de conséquences catastrophiques (effondrement du système électrique) [4].

### **I.3 Acheminement de la puissance**

Pour résoudre le problème de l'acheminement de la puissance disponible sur les lieux de consommation, dans le cas d'un réseau maillé, il convient de déterminer le niveau de production de chaque groupe et les transits de puissance dans le réseau.

En général, il existe une multitude de plans de production qui permettent de faire face à la demande. Toutefois, certains de ces plans ne sont pas adaptés pour acheminer la puissance sur les lieux de consommation en respectant les contraintes technico-économiques d'exploitation (minimiser les coûts de production et le coût des pertes, respecter les limites thermiques des ouvrages, maintenir la tension dans certaines plages en chaque nœud du réseau, être capable de faire face le plus rapidement possible à certains types de défaillance...). Le problème général de la production et de la répartition optimale et en sécurité de la puissance dans un système production-transport-consommation alternatif maillé est donc fort complexe. Le fonctionnement d'un système électrique est gouverné, à chaque instant, par l'équilibre nécessaire entre les puissances actives et réactives produites et consommées.

Lorsque cette condition nécessaire de fonctionnement est respectée, l'état du système est caractérisé, en régime stationnaire, par la fréquence  $f$  (grandeur globale) et les tensions (grandeurs locales). La fréquence  $f$  est fixée par la vitesse de rotation de toutes les machines qui doivent rester synchrones (en régime permanent).

Contrairement à ce qu'un abus de langage pourrait laisser croire, l'objectif du réglage des réseaux n'est pas de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation (les lois

de Kirchhoff s'en chargent dans la mesure où  $f$  et  $V$  restent dans certaines plages qui correspondent aux conditions nécessaires de fonctionnement, en particulier de stabilité dite statique). Par contre, l'objectif des réglages est de maintenir la fréquence et la tension dans des limites contractuelles qui sont plus contraignantes que les limites imposées par les conditions nécessaires de fonctionnement [4].

#### I.4 Puissance transmissible dans une ligne

Contrairement à une idée très répandue, ce n'est pas l'échauffement maximal des conducteurs qui, en général, limite la puissance transmissible à travers une ligne [4].

En effet, considérons la figure (I.1) qui représente de manière très simplifiée, un dipôle d'impédance  $Z = R + jX$ , une ligne destinée à alimenter la charge  $Z_l$ . Nous supposons, d'abord, que la résistance  $R$  de la ligne est nulle (elle est généralement très faible vis-à-vis de la réactance  $X$ ) et que la puissance réactive  $Q_2$  de la charge est nulle (ce qui est vrai en cas d'une bonne compensation de puissance réactive).

Nous nous attacherons d'abord à montrer qu'il est important de réguler la tension aux bornes de la charge.

Si nous désignons par  $\theta$  l'angle entre les tensions  $V_1$  et  $V_2$ , en considérant la figure (I.2) simplifiée (avec  $R = 0$ ), le courant  $I$  en phase avec la tension  $V_2$ , d'où :

$$XI = V_1 \sin\theta \tag{I.1}$$

Et la puissance active est :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin\theta \tag{I.2}$$

Si aucune précaution n'est prise pour maintenir  $V_2$  constante lorsque la charge varie, il apparaît donc que, dans ce cas, on ne peut transporter qu'une puissance active maximale par phase. Cette valeur maximale est atteinte pour  $\theta = 90^\circ$ .

Si l'on maintient  $V_2$  constante, ce qui implique que  $Q_2$  n'est plus nulle, mais ne remet pas en cause l'expression (I.1), soit le double de la valeur précédente.

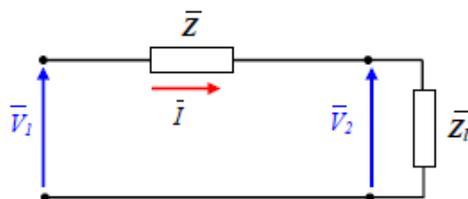


Figure I.1 : Schéma monophasé équivalent

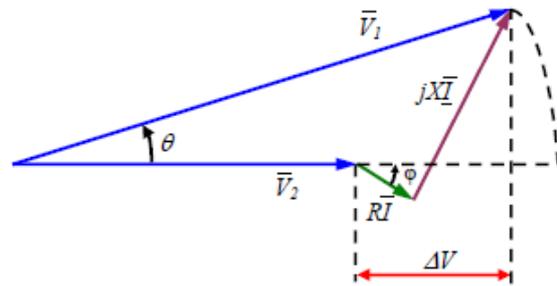


Figure I.2 : Diagramme vectoriel des tensions

Pour améliorer la capacité de transfert des réseaux, on voit donc qu'il est essentiel de disposer du plus grand nombre possible de points à tension fixée.

### I.5 Chute de tension dans une ligne

Considérons la figure (I.1) qui représente une ligne de transport d'impédance complexe  $\bar{Z} = R + jX$ , et que la tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1 (coté générateur), l'extrémité 2 (coté charge) absorbant une puissance

$$S_2 = P_2 + jQ_2$$

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme de tension donné par la figure (I.2) conduit à assimiler la chute de tension  $\Delta V$

L'angle de transport  $\theta$  étant petit (réseau peu chargé), si  $\phi$  désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité réceptrice 2, on peut écrire, pour un réseau monophasé :

$$\Delta V \approx RI \cos \phi + XI \sin \phi$$

(I.3)

Dans ces conditions, la chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par l'extrémité réceptrice ; l'angle de transport  $\theta$  dépend principalement de la puissance active transmise.

### I.6 Ecoulement des puissances

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé d'un nombre de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production et de charge et les niveaux des tensions du réseau. Les calculs

permettant d'obtenir ces informations sont connues sous le nom (écoulement des puissances ou load flow ou encore power flow) [2].

### I.6.1 But de l'étude de la répartition de charge

Elle a pour but de déterminer, en régime triphasé permanent (en général équilibré), les tensions en module et en phase en tout point du réseau et les puissances actives et réactives transitant sur toutes les lignes du réseau électrique [2].

### I.6.2 Modélisation des composants du réseau

La modélisation des composants du réseau en fonctionnement triphasé équilibré repose sur les hypothèses suivantes :

- Symétrie des éléments, permettant une représentation d'ordre direct monophasé.
- Influence magnétique entre composants négligeable.
- Lignes électriques représentées par un schéma de quadripôles équivalents à constantes concentrées.
- Impédance de magnétisation des transformateurs négligée.

L'utilisation des grandeurs réduites (p.u) permet encore une simplification dans la représentation des transformateurs, en les réduisant à une simple impédance (de dispersion) série.

Rappelons que l'utilisation des grandeurs réduites repose sur une puissance triphasée de base ( $S_{base}$ ) et une tension entre phases de base ( $U_{base}$ ), permettant de définir une impédance de base ( $Z_{base} = U_{base}^2 / S_{base}$ ) à partir de laquelle les impédances réduites des composants seront calculées. Rappelons aussi que l'un des avantages de l'utilisation des impédances réduites est d'avoir des ordres de grandeur quasi invariant quelle que soit la puissance nominale des machines ou des transformateurs, le rapport entre les tensions de base coté primaire et coté secondaire est basé sur le rapport de transformation nominal.

Une ligne électrique entre les nœuds  $i$  et  $j$  sera donc représentée par le schéma en  $\pi$  comme indiqué sur la figure (I.3) comprenant une impédance série ou longitudinale

$Z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$  (avec  $r_{ij}$  et  $x_{ij}$  respectivement résistance totale et inductance totale de la ligne) et une admittance en parallèle.

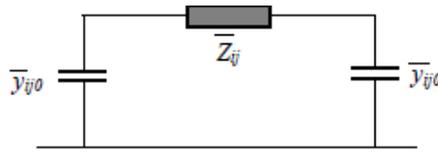


Figure I.3 : Schéma équivalent d'une ligne électrique

La modélisation du transformateur se fera par un schéma équivalent avec transformateur idéal (figure : (I.4-a)) ou par schéma en  $\pi$  (figure : (I.4-b)) si le rapport de transformation est complexe (cas de transformateurs déphaseurs).

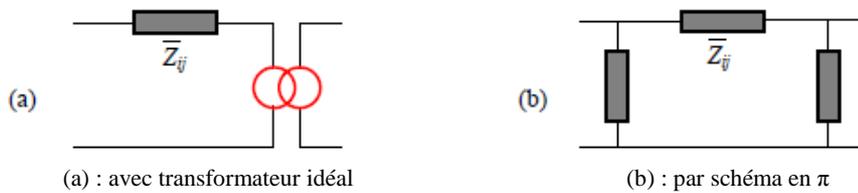


Figure I.4 : Schéma équivalent d'un transformateur

### I.6.3 Calcul de flux de puissance

Le calcul de flux de puissance est basé sur les équations nodales  $\bar{I} = [\bar{Y}][\bar{V}]$ , où  $\bar{I}$  est le vecteur des courants nodaux injectés dans le réseau.  $[\bar{V}]$  le vecteur des tensions nodales repérées par rapport au neutre du schéma monophasé et  $[\bar{Y}]$  la matrice des admittances nodales, dont les termes diagonaux  $Y_{ii}$  sont la somme des admittances des branches incidentes au nœud  $i$  et les termes non diagonaux  $y_{ij}$  la somme changée de signe des admittances des branches entre le nœud  $i$  et le nœud  $j$ .

Les lois de conservation d'énergie imposent que les puissances injectées en un nœud soient égales à la somme des puissances transitant dans les branches incidentes en ce nœud.

Dans ces conditions, en chaque nœud, quatre grandeurs nodales ( $P_i, Q_i, V_i, \theta_i$ ) seront liées par deux relations, impliquant que deux des grandeurs devront être imposées pour pouvoir résoudre le système.

En fonction des hypothèses faites aux différents nœuds, on classera ceux-ci en :

- **Nœuds chargés** : caractérisés par des puissances active et réactive imposées, les inconnus seront le module et la phase de la tension nodale .
- **Nœuds générateurs** : caractérisés par un module de tension et une puissance active imposée, les inconnus seront la phase de la tension et la puissance réactive injectée.

➤ **Nœuds à tension contrôlée** : caractérisés par un module de tension et des puissances active et réactive (nulle) imposées, les inconnues seront la phase de la tension et le rapport de transformation.

➤ **Nœuds bilans (Slack node)** : servant de repère des phases et dont le module de la tension est également imposé, les inconnues seront les puissances active et réactive injectées. Rappelons qu'à partir d'une valeur initiale des inconnues, on calcule le vecteur des variations annulant l'écart entre les valeurs imposées par le premier membre et la valeur calculée à partir des valeurs initiales par inversion de la matrice des dérivées partielles (Jacobéen). L'avantage de la forme polaire de ces relations est de n'avoir qu'une équation pour les nœuds générateurs [5]. Où  $[\Delta P]$  et  $[\Delta Q]$  représentent respectivement les écarts entre les puissances actives imposées et calculées à l'itération courante aux nœuds générateurs et consommateurs et les écarts entre les puissances réactives imposées et calculées aux nœuds consommateurs.

La dimension de la matrice jacobéenne est de deux fois le nombre de nœuds consommateurs plus le nombre de nœuds générateurs, le nœud bilan étant exclu de ce calcul puisque sa tension est connue en module et en phase.

La structure de la matrice jacobéenne est liée à celle de la matrice des admittances nodales du réseau considéré et donc très creuse. Des techniques exploitant ces creux sont bien évidemment utilisés et c'est d'ailleurs le développement de ces techniques particulières d'inversion de matrices creuses de grandes dimensions qui a permis d'utiliser efficacement cette méthode.

Vu la dépendance entre déphasage et puissance active d'une part et entre puissance réactive et module de tension d'autre part, il apparaît qu'en général, les éléments des sous matrices  $J_2$  et  $J_3$  sont négligeables et par conséquent un découplage en deux systèmes indépendant est possible. Enfin, les éléments du jacobéen ne sont généralement recalculés que lors des premières itérations et sont ensuite gardés constants, ce qui permet de ne plus recalculer la décomposition de cette matrice [5].

Dans certains cas (étude de sécurité notamment), on peut encore simplifier le problème en négligeant les parties réelles des admittances, en assimilant le sinus des déphasages à leur différence et considérant que le cosinus des déphasages vaut l'unité [5].

## 1.7 Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension

En général, les moyens de compensation et de réglage à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations périodiques liées à l'évolution journalière des transits de puissance mais aussi aux variations brusques liées aux incidents sur le réseau.

Les dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de réglage de la tension sont:

- ✓ des condensateurs et inductances fixes ;
- ✓ des compensateurs synchrones ;
- ✓ des compensateurs statiques (SVC) ;
- ✓ des transformateurs à prises variables (en charge ou à vide) ;
- ✓ les groupes générateurs.

L'ajustement rapide et fin de l'énergie réactive en HT et le réglage de tension sont assurés par les groupes générateurs (boucles de réglage de tension) et les condensateurs des postes de transformation vers le réseau de répartition [2] [3].

En distribution, la compensation du réactif se fait au niveau des consommateurs par la tarification qui pénalise un mauvais  $\cos\phi$ , l'ajustement de la tension se réalisant par les prises en charge des transformateurs au niveau des postes [2].

### 1.7.1 Condensateurs et inductances fixes

Les bancs de condensateurs installés en dérivation peuvent atteindre quelques Mvar fractionnables par gradins de 2 à 4 Mvar, voire 10 Mvar. Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance au niveau de charges inductives. Parmi leurs inconvénients :

- ✓ la puissance réactive produite diminue lorsque la tension diminue ( $Q = \omega CV^2$ ) alors qu'elle devrait augmenter ;
- ✓ surtensions et surintensités à l'enclenchement.

Les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins mis en ou hors tension par disjoncteurs ou actuellement par thyristors (ce qui supprime toute usure du matériel et accroît la vitesse de réponse), commandés par relais varométrique qui mesure l'erreur entre valeur de consigne et puissance fournie.

Des bancs de condensateurs peuvent être insérés en série avec les conducteurs d'une ligne afin de diminuer sa réactance. On diminue aussi la chute de tension entre la source et la charge comme indiquée sur la figure (1.5). On voit que ce type de compensation diminue l'angle de transport  $\theta$  et agit donc aussi sur le transit de puissance active et augmente la limite de puissance transmissible et la stabilité du réseau [2] [3].

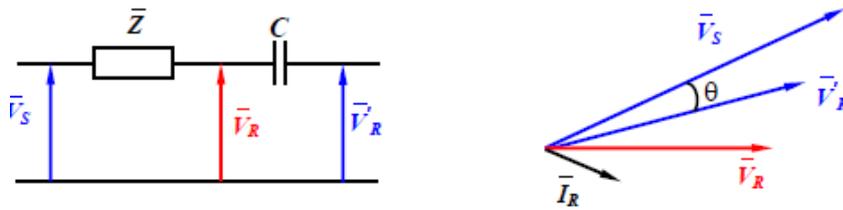


Figure I.5 : Principe de la compensation série

Les inductances sont utilisées pour absorber la puissance réactive produite par des lignes longues à très haute tension à faible charge ou des réseaux de câbles. Elles sont généralement raccordées au tertiaire de transformateurs et leur puissance peut aller de 50 Mvar (via un transformateur à trois enroulements) à 400 Mvar en raccordement direct sur des lignes de très haute tension [2].

### I.7.2 Groupes de production et compensateurs synchrones

Les groupes de production sont les sources de tension du réseau et peuvent produire ou consommer de l'énergie réactive : une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur.

En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance. Vu l'éloignement électrique entre centres de production et de consommation, les groupes ne compensent pas les charges mais peuvent faire face aux besoins en réactif du réseau.

La fourniture de puissance réactive en surexcitation est limitée par le courant rotorique maximum et en absorption par la stabilité de la machine synchrone. Cette limite peut varier avec des régulateurs de tension.

Un compensateur synchrone était une machine synchrone sans charge, spécifiquement conçue pour la production ou l'absorption de puissance réactive en ajustant l'excitation.

Les limites sont les mêmes que pour les groupes de centrales. Des valeurs typiques vont de 20 à 60 Mvar en fourniture et de 10 à 30 Mvar en absorption. Ils sont branchés le plus souvent au tertiaire d'un transformateur. Le grand avantage par rapport aux condensateurs ou inductances passives est leur grande flexibilité sous toutes conditions de charge (réglage continu), par contre leur coût est élevé tant en investissement qu'en maintenance [2].

### I.7.3 Compensateurs statiques

L'électronique de puissance a permis, outre des liaisons à courant continu, l'introduction de compensateurs purement statiques, constitués de capacités et d'inductances commandés par des thyristors montés en tête-bêche. On aura ainsi par la mise en parallèle d'une inductance

réglable par thyristors (TCR : *Thyristor Controlled Reactor*) et de batteries de condensateurs commutables également par thyristors, un réglage continu de l'inductance par modification de l'angle d'allumage des thyristors. C'est le principe du compensateur statique (SVC : *Static Var Condenser*) [2].

### **I.7.4 Transformateurs avec prises réglables en charge**

Un régleur en charge modifie le rapport de transformation à l'intérieur d'une plage déterminée en augmentant ou diminuant le nombre de spires de l'enroulement haute tension.

Il faut prendre garde de ne pas interrompre le courant ni mettre des spires en court-circuit lors de la commutation. Cela est réalisé par l'insertion temporaire d'une inductance ou d'une résistance. La plage de réglage est typiquement de  $\pm 15\%$  avec une vingtaine de prises (échelon entre 1 et 2 %). Par rapport au réglage nominal, un changement de prises correspond à une injection d'une tension additionnelle au point d'insertion du transformateur, ce qui implique une modification de la répartition de la puissance réactive dans la zone concernée [2].

## **I.8 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique on commençant par l'historique des réseaux, leurs architectures et l'acheminement de puissance à travers ces réseaux. On a vu brièvement les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport et la chute de tension provoquée par le transit de puissance réactive.

L'analyse de l'écoulement de puissance pour les études et l'exploitation des réseaux électriques a été également discutée. Enfin on a présenté les différents moyens classiques de compensation d'énergie réactive.

## II.1 Introduction

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques [6].

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux. Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories [7] :

- Les compensateurs parallèles ;
- Les compensateurs séries ;
- Les compensateurs hybrides (série – parallèle).

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

## II.2 Compensateurs parallèles

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif [6-7-8].

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 réactives qui transitent dans la ligne [6-7-8]. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

### II.2.1 Compensateurs parallèles à base de thyristors

Il s'agit de :

#### II.2.1.1 TCR (Thyristor Controlled Reactor)

Dans le TCR (ou RCT : Réactances Commandées par Thyristors), la valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [7].

### II.2.1.2 TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Dans le TSC (ou CCT : Condensateurs Commandés par Thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction [7].

### II.2.1.3 SVC (Static Var Compensator)

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du Sud. La caractéristique statique est donnée sur la figure (II.1). Trois zones sont distinctes [9] :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau,
- Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC,
- Une zone où le TCR donne son énergie maximale (butée de réglage), les condensateurs sont déconnectés.

Tous sont utilisés pour contrôler la tension (la puissance réactive).

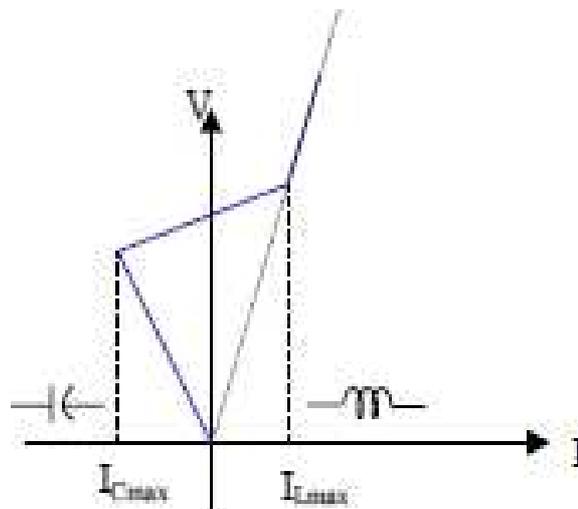


Figure II.1 : Caractéristique d'un SVC

### II.2.1.4 TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations.

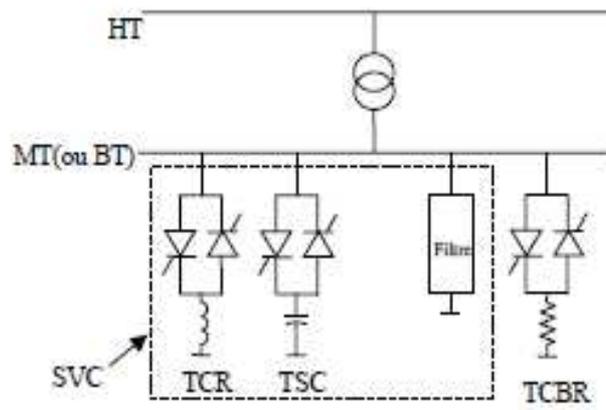


Figure II.2 : Schéma du SVC et TCBR

### II.2.2 Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

Il s'agit du STATCOM (STATIC COMPensator) qui a connu jusqu'à présent différentes appellations:

- ASVC (Advanced Static Var Compensator) ;
- STATCON (STATIC CONDenser) ;
- SVG (Static Var Generator) ;
- SVClight ;
- SVCplus.

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70 mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance [6].

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément. Cependant, le STATCOM de base engendre de nombreux harmoniques. Il faut donc utiliser, pour résoudre ce problème, des compensateurs multi-niveaux à commande MLI ou encore installer des filtres. La figure (I.3) représente le schéma de base d'un STATCOM. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [10].

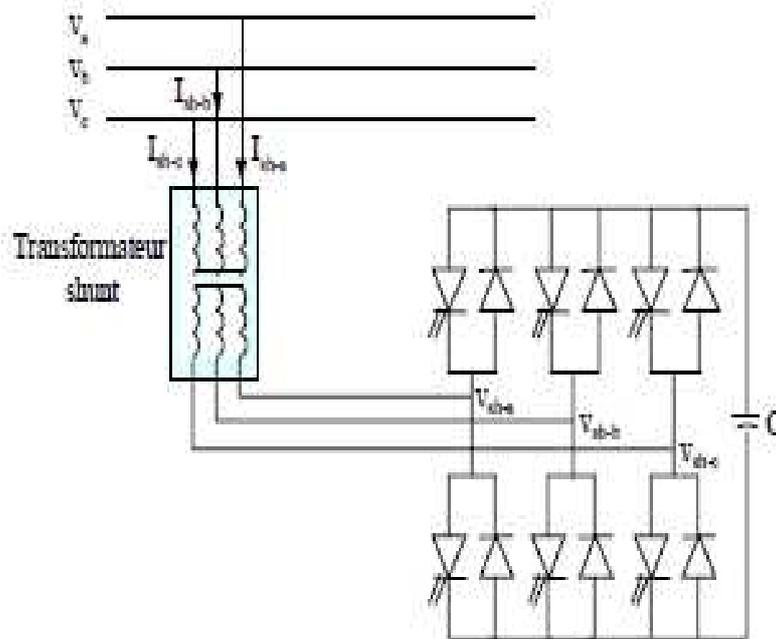


Figure II.3 : Schéma de base du STATCOM

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_{sh}$ , laquelle est en phase avec la tension du réseau  $V$  (figure (II.3)). Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

Si la tension  $V_{sh}$  est inférieure à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $(-\pi/2)$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant inductif (figure (II.4-a)).

Si la tension  $V_{sh}$  est supérieur à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $(+\pi/2)$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant capacitif (figure (II.4-b)).

Si la tension  $V_{sh}$  est égale à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.



Figure II.4 : Diagramme vectoriel de STATCOM

Nous considérons dans ce cas de fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie  $V_s$  est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

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

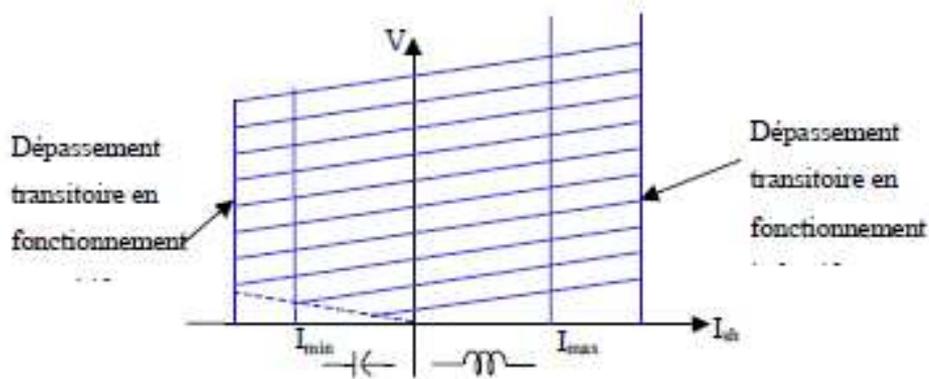


Figure II.5 : Caractéristique du STATCOM

### II.3 Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.

#### II.3.1 Compensateurs séries à base de thyristor

Les plus connus sont :

##### II.3.1.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur (figure ( II.6.a)).

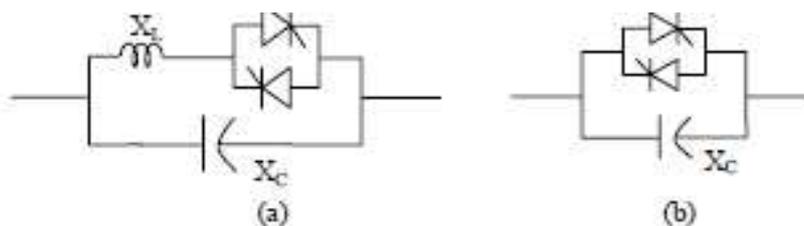


Figure II.6 : Structure du TCSC (a) et TSSC (b)

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur.

Si les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance [9] :

Les courbes théoriques obtenues avec l'équation (II.1) sont représentées par la figure (II.7).

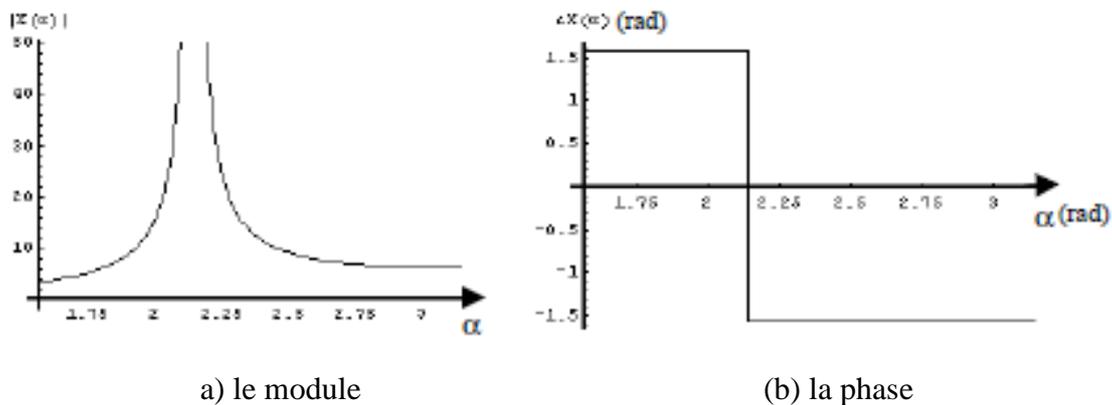


Figure II.7 : Réactance équivalente  $X(\alpha)$

### II.3.1.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$ .

### II.3.1.3. 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 afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de  $180^\circ$ , 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  $180^\circ$ , la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de  $90^\circ$ , où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

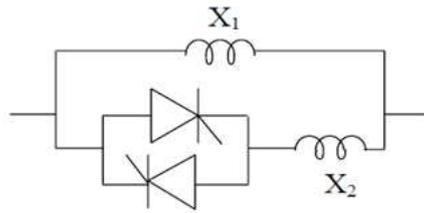


Figure II.8 : Structure du TCSR.

#### II.3.1.4. TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$ .

### II-3-2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors

#### II.3.2.1. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (figure (II.9)).

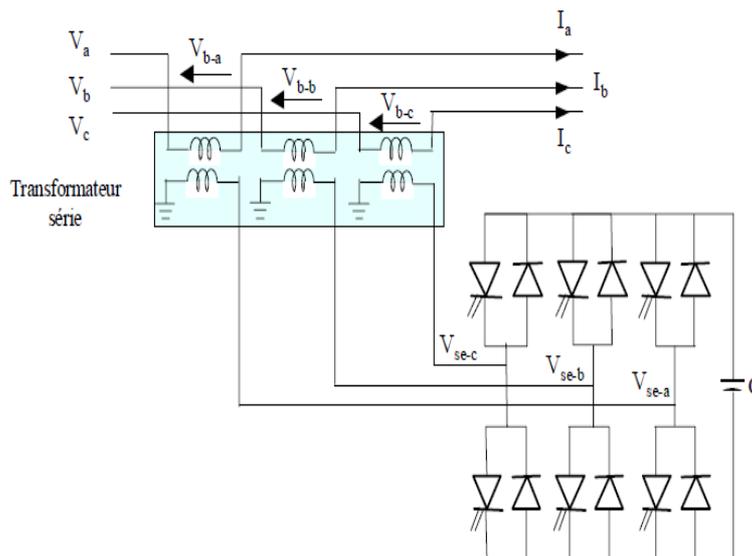


Figure II.9 : Schéma de base du SSSC

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne.

Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions.

Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau.

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée par la figure suivante :

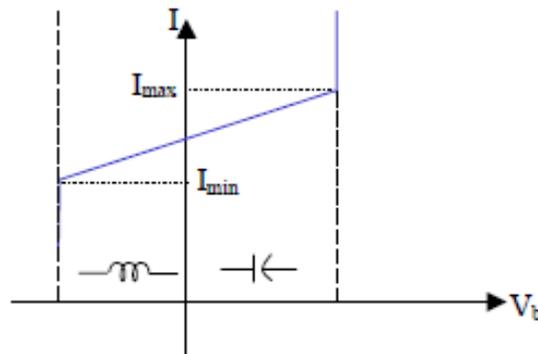


Figure II.10 : Caractéristique statique du SSSC

Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension  $V_b$  n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de ligne.

## II.4 Compensateurs hybrides série – parallèle

### II.4.1 Compensateurs hybrides à base de thyristors

#### II.4.1.1 TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

Est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régulateur 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 nord ouest 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 [10].

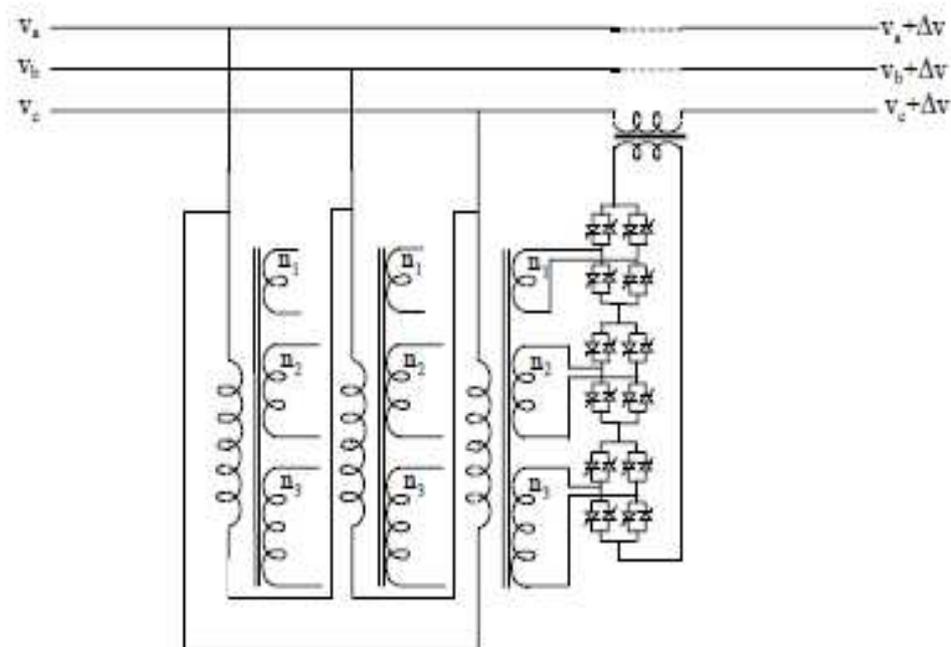


Figure II.11 : Schéma du TCPAR

Un déphasage  $\alpha$  est alors introduit et l'angle de transport total de la ligne devient  $(\delta + \alpha)$ . Par contre avec ce compensateur, le module de la tension en aval n'est pas égal à celui de la tension en amont. La caractéristique statique d'un tel compensateur est présentée sur la figure (II.12).

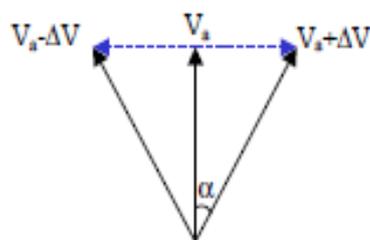


Figure II.12 : Diagramme vectoriel du TCPAR

## II.4.2 Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors

### II.4.2.1. IPFC (Interline Power Flow Controller)

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.13)) [7].

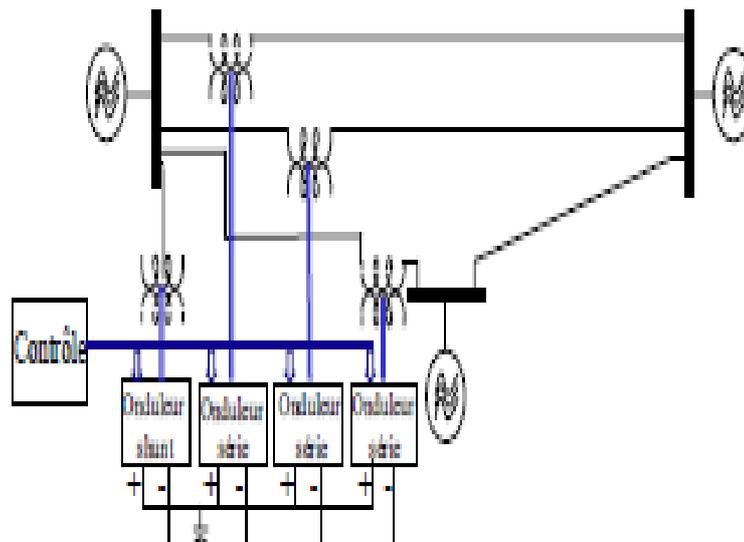


Figure II.13 : Schéma de base de l'IPFC

Nous pouvons l'utiliser afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau.

#### II.4.2.UPFC

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 :

- La tension ;
- L'impédance de la ligne ;
- Le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

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

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

Dans la figure (II.14), l'onduleur no.1 est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur no. 2. Il réalise aussi la fonction de compensation d'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active au réseau. L'onduleur no.2 injecte la tension  $V_b$  et fournit les puissances active et réactive nécessaires à la compensation série. :

L'énorme avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne en un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions.

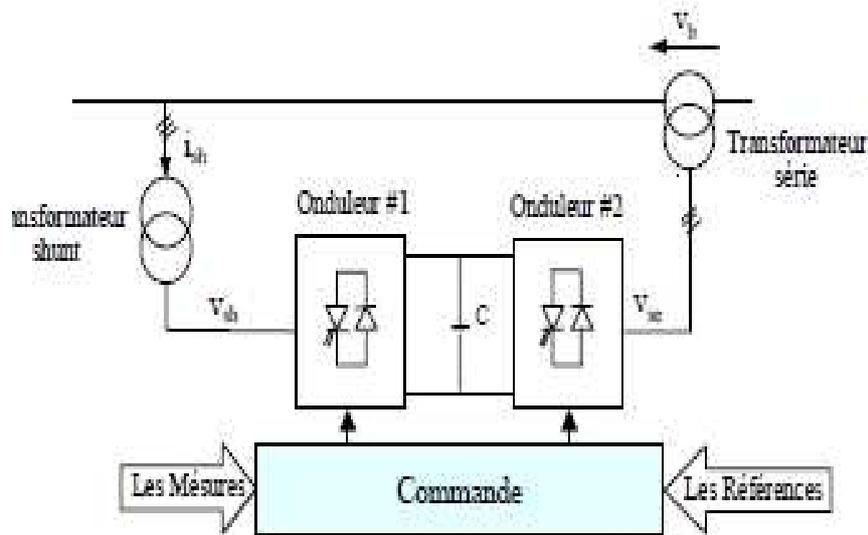


Figure II.14 : Schéma de base de l'UPFC

Il pourra alterner différentes fonctions : par exemple, la fonction shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que la partie série pourra être utilisée afin d'amortir les oscillations de puissances [9].

La figure (II.15) montre l'influence des différents systèmes FACTS (à base de GTO) sur la courbe de puissance active transitée dans la ligne de transmission. Cette dernière est un facteur important pour l'amélioration de la stabilité transitoire.

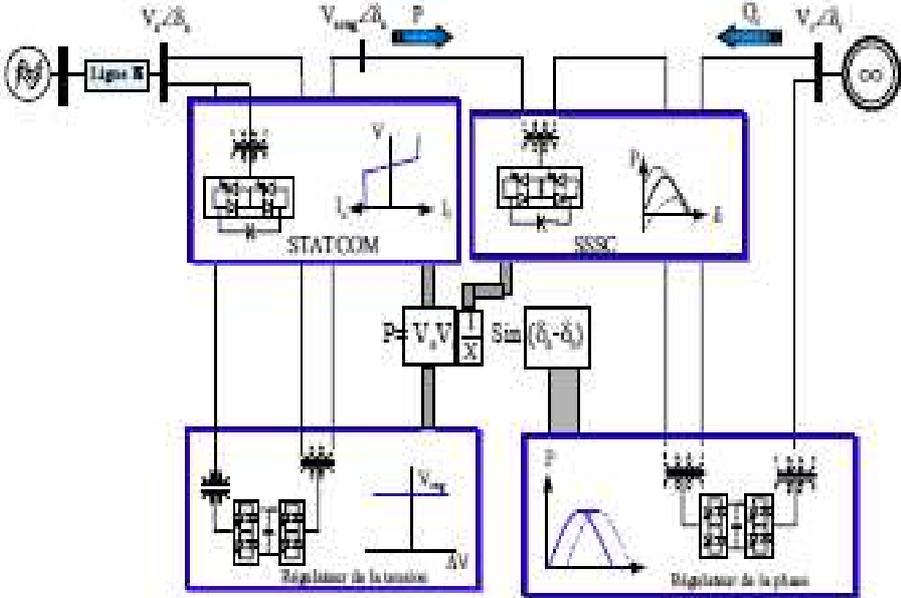


Figure II.15: L'influence de différents systèmes FACTS sur la puissance active

## **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes FACTS en général. Nous avons choisi d'étudier l'UPFC qui est le compensateur le plus complet que les autres, grâce à sa caractéristique spéciale (pouvoir contrôler La tension, l'impédance de la ligne ,le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne). En pratique, l'UPFC pourra être utilisé pour la gestion de l'énergie dans les réseaux électriques. Il est évident que l'utilisation de celui-ci en tant que régulateur de stabilité transitoire est une application secondaire indépendante du rôle principal de l'UPFC.

### III.1 Introduction

L'UPFC est parmi tous les FACTS, le plus puissant et le plus polyvalent, du fait qu'il peut contrôler à la fois, l'impédance de la ligne, le module et l'angle de la tension. C'est ce dispositif qui fera l'objet de notre étude. C'est un dispositif qui combine une compensation shunt, le STATCOM et une compensation série, le SSSC.

Le STATCOM (Static Synchronous Compensator) est un convertisseur statique à source de tension connecté en parallèle avec un réseau alternatif par le biais d'un transformateur abaisseur. Son rôle est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau qui se fait indirectement par le contrôle des tensions de sortie du convertisseur de façon à ce que ces tensions soient en phase avec celles du réseau. Donc il peut fournir de la puissance réactive, c'est le comportement capacitif comme il peut consommer de la puissance réactive, c'est le comportement inductif. Le grand avantage du compensateur statique synchrone est son temps de réponse puisqu'il utilise des semi-conducteurs de puissances très performants. Cependant, le STATCOM de base engendre de nombreuses harmoniques. Il faut donc utiliser, pour résoudre ce problème, des compensateurs multi-niveaux à commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion) ou encore installer des filtres [11].

Le SSSC (Static Synchronous Serie Compensator) est le plus important dispositif dans la famille de la compensation série. Il est constitué d'un convertisseur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne [11].

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

### III.2 Structure de base d'un UPFC connecté à un réseau électrique triphasé

Le dispositif UPFC est constitué de deux convertisseurs de tension triphasée GTO interconnectés par un nœud à tension continue, l'un est monté en parallèle avec la ligne de transmission par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, et l'autre monté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés comme illustré sur la figure III.10-a. Le deuxième convertisseur accomplit la fonction principale de l'UPFC en injectant en série une

tension alternative de même fréquence que celle du réseau avec une amplitude et un angle de phase réglable dans la ligne de transport à travers le transformateur série. La fonction fondamentale du convertisseur (1) est de fournir ou absorber de la puissance active demandée par le convertisseur (2) à la liaison continue (DC) commune. Il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive selon la demande et assurer une compensation shunt indépendante de la ligne de transport. Ce dispositif est muni d'un système de filtrage [13, 14, 15, 16, 17,18].

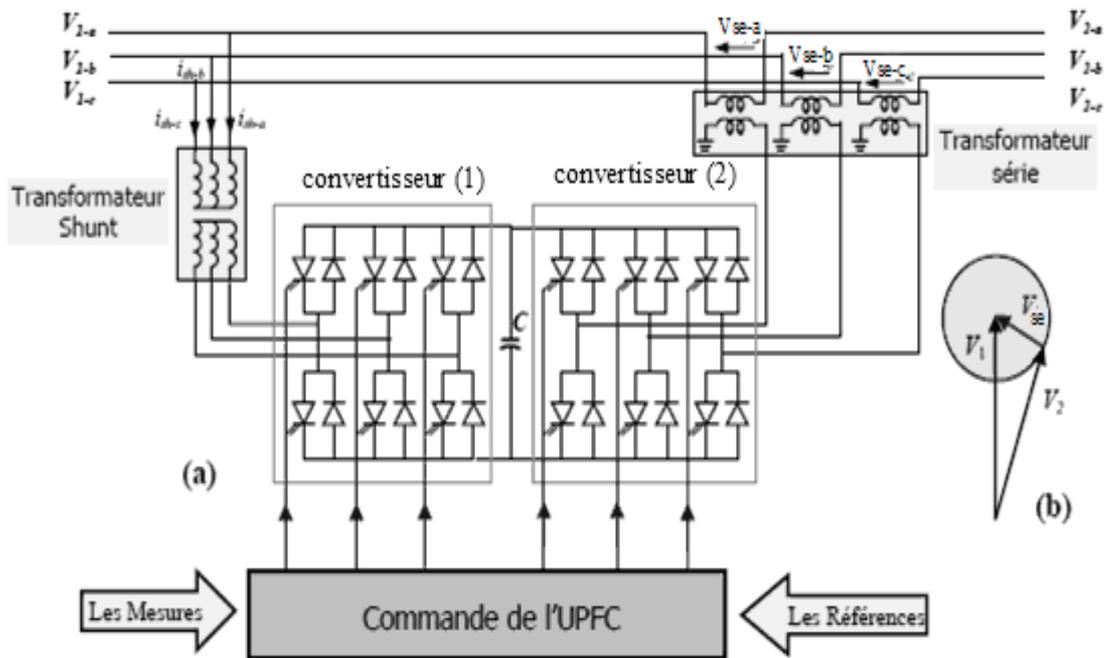


Figure III.10: Structure de base d'un UPFC connecté au réseau électrique.

### III.2.1 Principe de fonctionnement de l'UPFC

Comme le montre le diagramme vectoriel représenté sur la figure (III.10-b), en variant la tension additionnelle délivrée par le convertisseur série  $V_{se}$  en module, et en phase, il est possible de varier dans une certaine mesure la tension  $V_2$  en module, et en phase. Ainsi on peut modifier statiquement les puissances active et réactive transmises par la ligne.

Le réglage de la tension additionnelle en amplitude et en phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série illustrées par la figure III.11 [12, 13, 16, 17].

Il fonctionnera comme un régulateur de tension pur si la tension  $V_b$  insérée est en phase avec la tension  $V_2$  figure III.11.a. Il fonctionnera comme un régulateur d'impédance

(compensateur série) si la tension additionnelle  $V_{se}$  est perpendiculaire au courant de la ligne  $i_r$ , figure III.11.b. Il fonctionnera comme un régulateur de l'angle de phase si l'amplitude et la phase de la tension injectée  $V_{se}$  sont calculées de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC figure III.11.c.

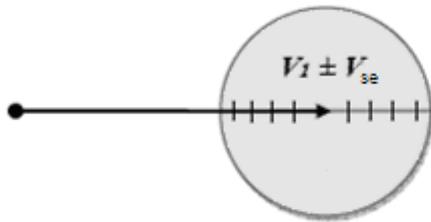


Figure III.11.a

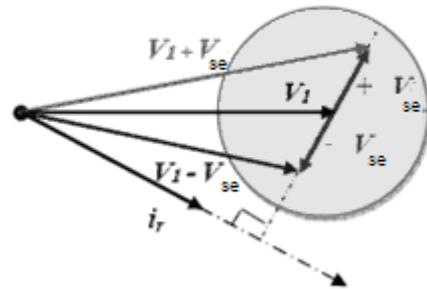


Figure III.11.b

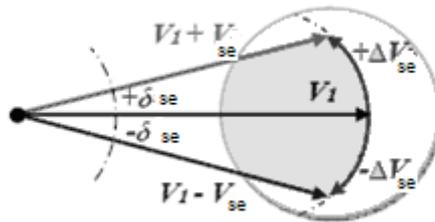


Figure III.11.c

Figure III.11 : Diagrammes vectoriels illustrant les capacités de contrôles de l'UPFC

La partie shunt est utilisée afin de compenser la puissance réactive pour maintenir le plan de tension au point de raccordement constant, et éventuellement fournir la puissance active injectée dans le réseau par la partie série.

### III.3 Modélisation de l'UPFC

#### III.3.1 Caractéristiques de l'UPFC

Le modèle mathématique de l'UPFC est établi afin d'étudier les relations qui régissent le fonctionnement entre le réseau électrique et l'UPFC en régime stationnaire. Le schéma unifilaire de base de la figure III.12 représente un UPFC installé sur une ligne électrique de transport d'un système monomachine. La tension du nœud à puissance infinie est prise comme origine des phases [12, 13, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23,24].

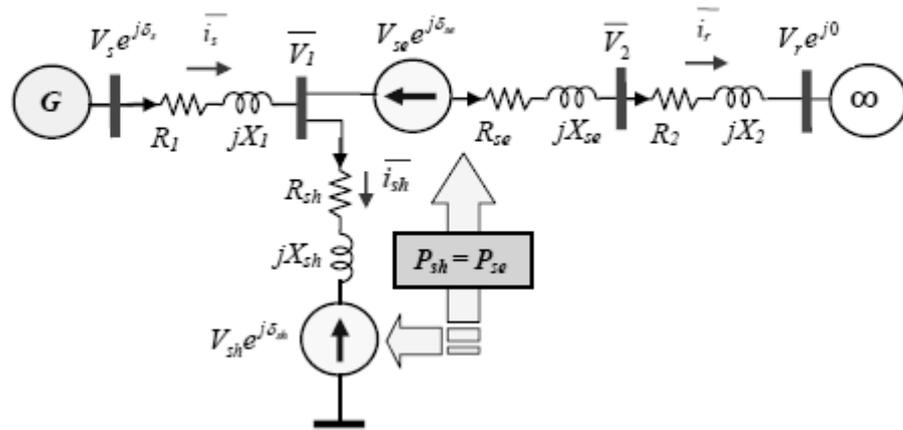


Figure III.12 : Modèle mathématique du système

Les éléments du modèle mathématique de l'UPFC et la ligne de transport sont définis comme suit :

$\bar{Z}_1 = \bar{R}_1 + jX_1$  : L'impédance d'une phase du 1<sup>er</sup> tronçon de la ligne.

$\bar{Z}_2 = \bar{R}_2 + jX_2$  : L'impédance d'une phase du 2<sup>ème</sup> tronçon de la ligne

$\bar{X}_{sh} = jX_{sh}$  : La réactance totale d'une phase du transformateur de couplage shunt.

$R_{sh}$  : La résistance interne des enroulements d'une phase du transformateur de couplage shunt.

$\bar{X}_{se} = jX_{se}$  : La réactance totale d'une phase du transformateur de couplage série.

$R_{se}$  : La résistance interne de l'enroulement d'une phase du transformateur de couplage série.

$\bar{V}_s = V_s e^{j\delta}$  ; La tension d'une phase du jeu de barres de départ (sending-bus).

$\bar{V}_r = V_r e^{j0}$  ; La tension d'une phase du jeu de barres d'arrivée (receiving-bus).

$\bar{V}_{sh} = V_{sh} e^{j\delta_{sh}}$  ; La tension alternative d'une phase à la sortie du convertisseur shunt.

$\bar{V}_{se} = V_{se} e^{j\delta_{se}}$  ; La tension alternative d'une phase du secondaire du transformateur de couplage série.

### III.3.2 Modélisation de la partie shunt de l'UPFC

La figure (III.13) représente la structure triphasée de la partie shunt de l'UPFC nommée (STATCOM). Le convertisseur est modélisé par des interrupteurs idéaux en série avec la résistance R qui représente les pertes par conduction. Les tensions simples ( $V_a, V_b, V_c$ )

représentent les tensions des points auxquels le STATCOM est raccordé avec la ligne de transport.

Le nœud de tension continue est représenté par les capacités  $C_1$  et  $C_2$  en parallèle avec les résistances  $R_1$  et  $R_2$  représentant les pertes [13, 14, 15,19].

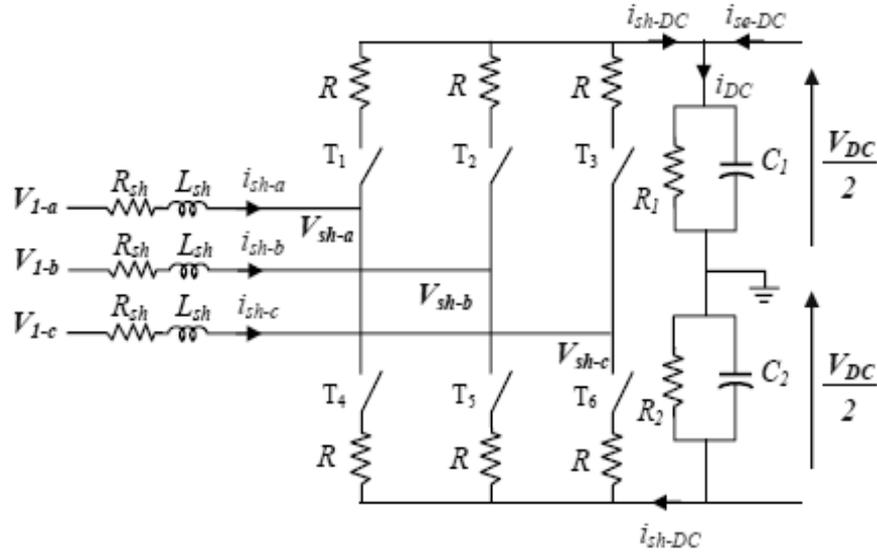


Figure III.13 : Schéma simplifié d'un STATCOM

L'équation (III.13) illustre la relation entre les courants et les tensions d'une phase, côté alternatif.

$$L_{sh} \frac{di_{sh-a}}{dt} + R_{sh} i_{sh-a} = V_{1-a} - V_{sh-a} \quad (III.13)$$

Considérons  $u_1$ ,  $u_2$  et  $u_3$  les fonctions de commutation des trois bras de l'onduleur, définies comme suit :

Pour  $k \in \{1,2,3\}$

$$u_k = 1 \text{ si } T_k \text{ est fermé et } T_{k+3} \text{ est ouvert}$$

$$u_k = -1 \text{ si } T_k \text{ est ouvert et } T_{k+3} \text{ est fermé}$$

De ce fait, la tension  $V_{sh-a}$  s'écrit sous la forme suivante :

$$V_{sh-a} = R i_{sh-a} + u_k \frac{V_{DC}}{2} \quad (III.14)$$

En utilisant les équations (III.13) et (III.14), nous obtenons la relation (III.15) ci-dessous.

$$L_{sh} \frac{di_{sh-a}}{dt} + R_{sh} i_{sh-a} = V_{1-a} - R i_{sh-a} - u_k \frac{V_{DC}}{2} \quad (III.15)$$

L'extension de la relation (II.15) aux autres phases permet d'avoir la relation (III.16) ci-dessous.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} = \frac{-(R_{sh} + R)}{L_{sh}} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{1-a} \\ V_{1-b} \\ V_{1-c} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (III.16)$$

Côté continu, le courant est donné par la relation (III.17) ci-dessous.

$$i_{DC} = \frac{1}{2} C_1 \frac{dV_{DC}}{dt} + \frac{V_{DC}}{2R_1} \quad (III.17)$$

En prenant  $C_1 = C_2 = 2C$  et  $R_1 = R_2 = 0.5r_c$ , l'expression (III.17) s'écrit sous la forme (III.18) ci-dessous.

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{i_{DC}}{C} - \frac{V_{DC}}{r_c C} \quad (III.18)$$

Pour calculer le courant généré  $i_{sh-DC}$  par le convertisseur shunt côté continu, considérons  $a_i$  la fonction de commande des interrupteurs  $T_i$  avec  $i \in \{1,2,3,4,5,6\}$ . Cette fonction prend la valeur 1 lorsque l'interrupteur  $T_i$  est fermé et 0 quant il est ouvert.

De ce fait le courant  $i_{sh-DC}$ , en alternance positive, est donné par l'expression (III.19) ci-dessous.

$$i_{sh-DC} = a_1 i_{sh-a} + a_2 i_{sh-b} + a_3 i_{sh-c} \quad (III.19)$$

Pour l'alternance négative, le courant  $i_{sh-DC}$  est donné par l'expression (III.20) ci-dessous.

$$i_{sh-DC} = -(a_4 i_{sh-a} + a_5 i_{sh-b} + a_6 i_{sh-c}) \quad (III.20)$$

Ainsi la somme des deux expressions (III.19) et (III.20) donne :

$$2i_{sh-DC} = (a_1 - a_4) i_{sh-a} + (a_2 - a_5) i_{sh-b} + (a_3 - a_6) i_{sh-c} \quad (III.21)$$

Or les fonctions  $a_i$  et  $a_{i+3}$  sont complémentaires, d'où  $u_i = a_i - a_{i+3}$ , ainsi la relation finale reliant le courant continu aux courants alternatifs est la suivante :

$$i_{sh-DC} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} \quad (III.22)$$

La puissance active côté alternatif s'écrit de la manière suivante :

$$P_{sh-AC} = \begin{bmatrix} i_{sh-a} & i_{sh-b} & i_{sh-c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sh-a} \\ V_{sh-b} \\ V_{sh-c} \end{bmatrix} \quad (III.23)$$

Les expressions (III.14) et (III.23), permettent d'avoir la relation (III.24) ci-dessous.

$$P_{sh-AC} = Ri_{sh-a}^2 + Ri_{sh-b}^2 + Ri_{sh-c}^2 + \begin{bmatrix} i_{sh-a} & i_{sh-b} & i_{sh-c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (III.24)$$

Tenant compte de l'équation (III.22), on obtient la puissance fournie aux condensateurs par la partie shunt donnée par l'expression (III.25) ci-dessous.

$$P_{sh-DC} = i_{sh-DC} V_{DC} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (III.25)$$

Les relations (III.24) et (III.25) montrent que la puissance active fournie côté alternatif est égale à la puissance active absorbée côté continu plus les pertes dues au convertisseur.

### III.3.3 Modélisation de la partie série de l'UPFC

La figure III.22 montre que la structure série est identique à la structure parallèle. Pour le côté alternatif de cette partie, le transformateur de couplage est composé de trois transformateurs monophasés élévateurs représentés par des inductances de fuite  $L_{se}$  et par des résistances internes des enroulements  $R_{se}$ .

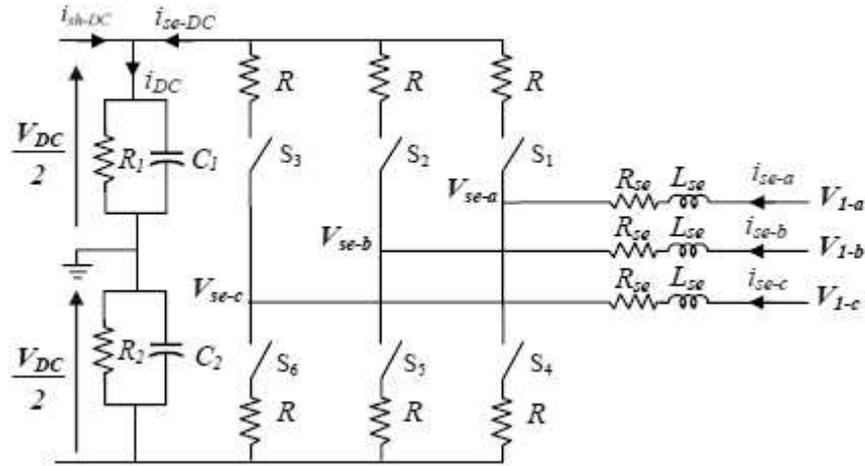


Figure III.14 : Schéma simplifié d'un SSSC

La relation entre le courant et les tensions côté alternatif de cette partie est similaire à ceux de la partie parallèle :

$$L_{se} \frac{di_{se-a}}{dt} + R_{se} i_{se-a} = V_{1-a} - V_{se-a} \quad (\text{III.26})$$

Considérons  $w_1, w_2$  et  $w_3$ , les fonctions de commutation des trois bras du convertisseur série définies de la manière suivante :

Pour  $k \in \{1, 2, 3\}$   $w_k = 1$  si  $S_k$  est fermé et  $S_{k+3}$  est ouvert

$w_k = -1$  si  $S_k$  est ouvert et  $S_{k+3}$  est fermé

De ce fait, la tension  $V_{se-a}$  s'écrit sous la forme suivante :

$$V_{se-a} = R i_{se-a} + w_k \frac{V_{DC}}{2} \quad (\text{III.27})$$

En utilisant les expressions (III.26) et (III.27), nous obtenons l'expression (III.28) ci-dessous :

$$L_{se} \frac{di_{se-a}}{dt} + R_{se} i_{se-a} = V_{1-a} - R i_{se-a} - w_k \frac{V_{DC}}{2} \quad (\text{III.28})$$

L'extension du résultat aux 3 phases permet d'avoir la relation (III.29) ci-dessous :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} = \frac{-(R_{se} + R)}{L_{se}} \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{se}} \begin{bmatrix} V_{1-a} \\ V_{1-b} \\ V_{1-c} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{se}} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (\text{III.29})$$

De la même façon que pour la partie parallèle, la relation entre les courants alternatifs  $i_{se-a}, i_{se-b}, i_{se-c}$  et le courant continu  $i_{se-DC}$  s'exprime comme suit :

$$i_{se-DC} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

La puissance active côté alternatif,  $P_{se-AC}$  s'écrit de la manière suivante :

$$P_{se-AC} = \begin{bmatrix} i_{se-a} & i_{se-b} & i_{se-c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{se-a} \\ V_{se-b} \\ V_{se-c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

Les expressions (III.27) et (III.31) permettent d'avoir la relation (III.32) ci-dessous :

$$P_{se-AC} = Ri_{se-a}^2 + Ri_{se-b}^2 + Ri_{se-c}^2 + \begin{bmatrix} i_{se-a} & i_{se-b} & i_{se-c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (\text{III.32})$$

La puissance fournie aux condensateurs par la partie série donnée par l'expression (III.33) ci-dessous :

$$P_{se-DC} = V_{DC} i_{se-DC} \quad (\text{III.33})$$

Tenant compte des expressions (III.30) et (III.33), on aura :

$$P_{se-DC} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (\text{III.34})$$

Dans l'hypothèse où les deux condensateurs du nœud à tension continue et les deux convertisseurs de l'UPFC ne consomment pas de la puissance active ( $R_1, R_2$  très grandes et  $R$  très petite), alors la puissance active fournie par la partie parallèle est absorbée par la partie série [12, 17,22].

### III.4 Contrôle de l'UPFC

Théoriquement, le dispositif UPFC devrait être traité comme un système multi variable car les deux convertisseurs série et shunt sont connectés d'un coté à la ligne de transmission et de l'autre coté au circuit continu, chacun des deux convertisseurs possède donc deux entrées et deux sorties. Cependant pour faciliter le traitement du dispositif, le contrôle des deux convertisseurs se fera séparément [13, 17,22].

Pour chaque convertisseur, nous allons développer la méthode d'identification des références ainsi que la méthode de commande.

#### III.4.1 Partie shunt

##### III.4.1.1 Identification des références

En général, la partie shunt de l'UPFC régule la tension au point de raccordement en compensant la puissance réactive de ce point et régule la tension aux bornes du condensateur. La régulation de tension continue compense la puissance active demandée par la partie série et compense également les pertes des convertisseurs et des transformateurs. Parmi les méthodes utilisées pour la détermination des références, on a opté pour la méthode Watt-Var découplée afin de commander cette partie du dispositif UPFC. La figure III.15 représente un convertisseur connecté au réseau via le transformateur parallèle de couplage de résistance interne  $R_{sh}$  et d'inductance totale de fuite  $L_{sh}$ .

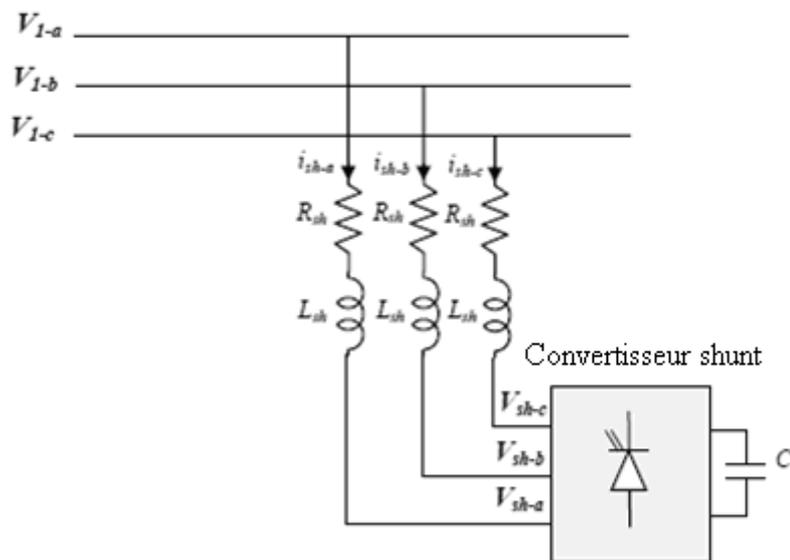


Figure III.15 : Circuit équivalent du convertisseur shunt connecté au réseau

Nous avons le système d'équation suivant :

$$\begin{aligned}
 V_{1-a} - V_{sh-a} &= R_{sh-a} i_{sh-a} + L_{sh-a} \frac{di_{sh-a}}{dt} \\
 V_{1-b} - V_{sh-b} &= R_{sh-b} i_{sh-b} + L_{sh-b} \frac{di_{sh-b}}{dt} \\
 V_{1-c} - V_{sh-c} &= R_{sh-c} i_{sh-c} + L_{sh-c} \frac{di_{sh-c}}{dt}
 \end{aligned} \tag{III.35}$$

La transformation des équations (III.35) permet de les écrire sous forme matricielle (III.36) est :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{1-a} - V_{sh-a} \\ V_{1-b} - V_{sh-b} \\ V_{1-c} - V_{sh-c} \end{bmatrix} \tag{III.36}$$

En passant par la transformation de PARK, l'expression (III.36) s'écrit sous la forme (III.37) :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh-d} \\ i_{sh-q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh-d} \\ i_{sh-q} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{1-d} - V_{sh-d} \\ V_{1-q} - V_{sh-q} \end{bmatrix} \tag{III.37}$$

La relation (III.37) montre qu'il y a un couplage entre les deux composantes du courant  $i_{sh}$  par  $\omega$ . Pour pouvoir aboutir à une commande aisée du système, il est indispensable de procéder à un découplage des deux composantes.

En posant :

$$X_1 = \frac{V_{1-d} - V_{sh-d}}{L_{sh}} \tag{III.38}$$

$$X_2 = \frac{V_{1-q} - V_{sh-q}}{L_{sh}} \tag{III.39}$$

L'expression (III.37) s'écrit sous la forme (III.40)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh-d} \\ i_{sh-q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh-d} \\ i_{sh-q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 + \omega i_{sh-q} \\ X_2 - \omega i_{sh-d} \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

En prenant  $U_1$  et  $U_2$  comme variables de commande telles que

$$U_1 = X_1 + \omega i_{sh-q} \quad (III.41)$$

$$U_2 = X_2 - \omega i_{sh-d} \quad (III.41)$$

Nous obtenons le système découplé de la figure III.16 où le bloc régulateur PI contrôle ces deux variables.

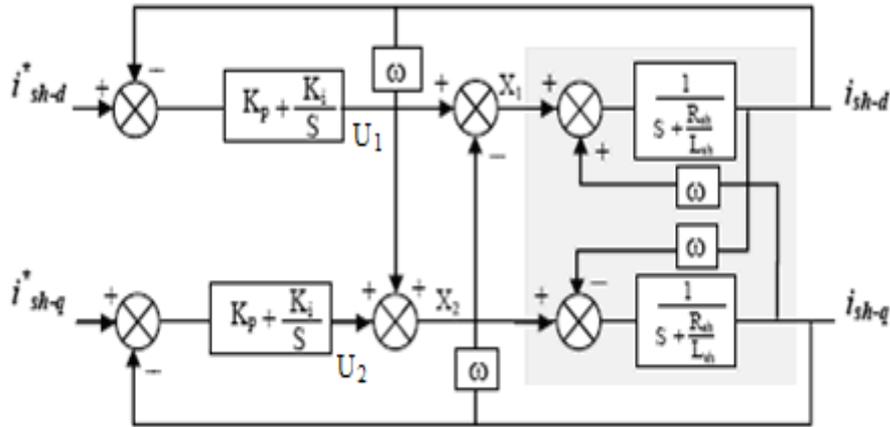


Figure III.16 : Schéma bloc de la méthode Watt-Var découplée

Les tensions  $V_{sh-d}$  et  $V_{sh-q}$  s'obtiennent par le procédé de calcul suivant.

Les expressions (III.38) et (III.41) permettent d'avoir la relation (III.43) ci-dessous :

$$U_1 - \omega i_{sh-q} = X_1 = \frac{V_{1-d} - V_{sh-d}}{L_{sh}} \quad (III.43)$$

Les expressions (III.39) et (III.42) permettent d'avoir la relation (III.44) ci-dessous :

$$U_2 + \omega i_{sh-d} = X_2 = \frac{V_{1-q} - V_{sh-q}}{L_{sh}} \quad (III.44)$$

Tenant compte des expressions (III.43) et (III.44), on obtient les tensions de la partie shunt données par les relations (III.45) et (III.46) ci-dessous :

$$V_{sh-d} = -L_{sh}(U_1 - \omega i_{sh-q}) + V_{1-d} \quad (III.45)$$

$$V_{sh-q} = -L_{sh}(\omega i_{sh-d}) + V_{l-q} \quad (III.46)$$

La figure III.17 représente le schéma global du contrôle par la méthode Watt-Var découplé.

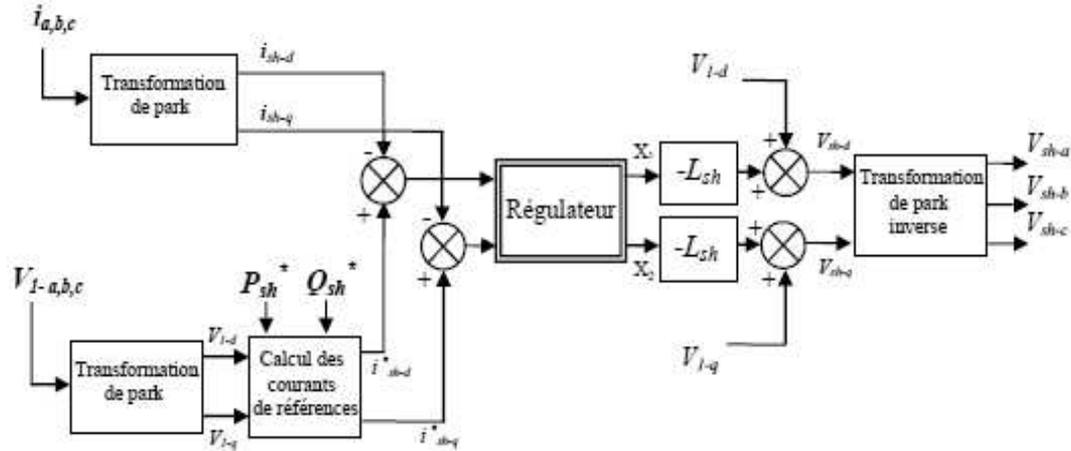


Figure III.17: Schéma global du contrôle

La comparaison des courants de la partie parallèle ( $i_{sh-d}, i_{sh-q}$ ) avec les courants de références ( $i_{sh-d}^*, i_{sh-q}^*$ ) donne les écarts détectés par les régulateurs, comme indiqué sur la figure III.17. Les sorties des régulateurs  $X_1$  et  $X_2$  donnent les composantes de la tension de référence dans le repère d-q. La transformation inverse de PARK, nous permet d'obtenir les références de la MLI (modulation de largeur d'impulsion) pour la partie shunt de l'UPFC.

La figure III.18 montre la méthode d'identification des différents courants de références pour la partie parallèle de l'UPFC.

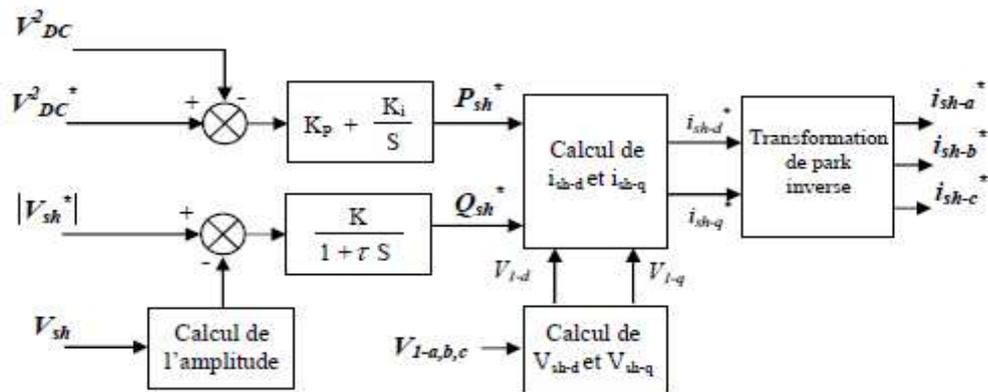


Figure III.18 : Identification des courants de référence

Les puissances de référence active  $P_{sh}^*$  et réactive  $Q_{sh}^*$  sont déterminées par le bloc d'identification de la figure III.18. Sachant que ces puissances sont de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{1-d} & V_{1-q} \\ V_{1-q} & -V_{1-d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh-d}^* \\ i_{sh-q}^* \end{bmatrix} \quad (III.47)$$

On déduit les courants qui sont donnés par la relation matricielle (III.48)

$$\begin{bmatrix} i_{sh-d}^* \\ i_{sh-q}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3(V_{1-d}^2 + V_{1-q}^2)} \begin{bmatrix} V_{1-d} & V_{1-q} \\ V_{1-q} & -V_{1-d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \quad (III.48)$$

### III.4.1.2 Régulation de la tension continue

Pour un fonctionnement normal des deux convertisseurs de l'UPFC, la tension moyenne aux bornes des condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  doit être maintenue à une valeur constante. La régulation de cette tension s'effectue en absorbant ou en fournissant de la puissance active au réseau de transport. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence de la partie shunt [13,22].

Suite à un écart entre  $V_{DC}^{2*}$  et  $V_{DC}^2$ , la puissance  $P_{ref}$  à la sortie du régulateur s'ajoute à la puissance active fluctuante et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant la tension  $V_{DC}$ , comme représenté sur la figure III.19.

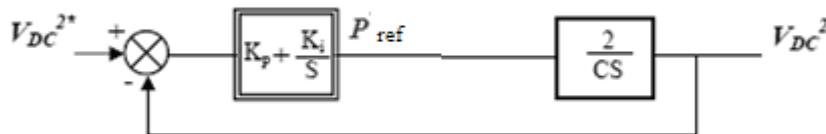


Figure III.19 : Régulation de la tension continue

La fonction de transfert du système de régulation de la tension continue en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{V_{DC}^2}{V_{DC}^{2*}} = \frac{\frac{2K_p}{C}S + \frac{2K_i}{C}}{S^2 + \frac{2K_p}{C}S + \frac{2K_i}{C}} \quad (III.49)$$

Avec :

$$\omega_i^2 = \frac{2K_i}{C}$$

$$\xi = K_p \sqrt{\frac{1}{2CK_i}}$$

Nous avons pris  $\xi = 0.7$ , pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée et pour avoir un bon filtrage nous avons choisi la pulsation de coupure  $\omega = 30 \text{ rad/sec}$ .

### III.4.1.3 Commande du convertisseur

L'objectif de la commande appliquée au convertisseur est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension fournie à la sortie du convertisseur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées, la commande par hystérésis et la commande par MLI. Nous avons choisi la commande par MLI pour contrôler cette partie de l'UPFC. En effet, la commande de MLI permet le contrôle de fortes puissances et a besoin d'une fréquence fixe pour les commutations [13]. Cette méthode met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence du convertisseur (modulante). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dents de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

Le but principal de la régulation de la partie shunt est de contrôler le courant à la sortie du convertisseur parallèle de l'UPFC [13,17]. Pour cela, nous utilisons un régulateur PI avec compensation de pôles représenté sur la figure III.20.

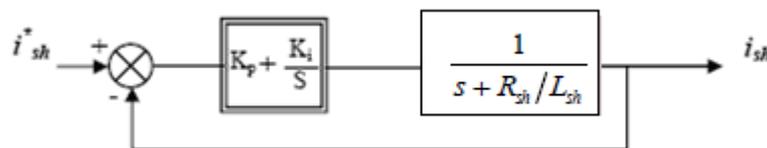


Figure III.20 : Schéma de la régulation parallèle par un PI

En boucle ouverte, nous avons :

$$\frac{i_{sh}}{i_{sh}^*} = \frac{K_p}{S} \left( S + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{\left( S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right)} \quad (\text{III.50})$$

Par la compensation du zéro du régulateur et le pôle, nous obtenons :

$$K_i = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} K_p \quad (\text{III.51})$$

La figure III.20 devient :

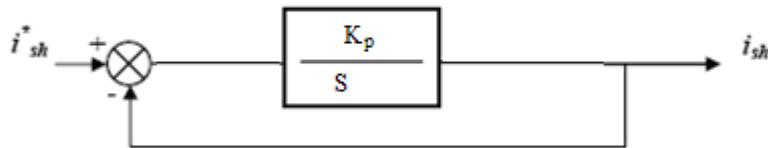


Figure III.21 : Schéma simplifié

La fonction de transfert de la boucle fermée du premier ordre avec une constante de temps  $\tau = 1/K_p$ .

$$\frac{i_{sh}}{i_{sh}^*} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_p} S} = \frac{1}{1 + \tau S} \quad (\text{III.52})$$

La détermination de la constante de temps dépend des changements admissibles maximaux des grandeurs de contrôle  $V_{sh-d}$  et  $V_{sh-q}$  pour le compensateur parallèle ( $\tau \leq 5$  milliseconde).

Les gains  $K_p$  et  $K_i$  peuvent être obtenus comme suit :

$$K_p = 1/\tau ; K_i = R_{sh}/\tau L_{sh}$$

### III.4.2 Partie série

#### III.4.2.1 Identification des références

La partie série de l'UPFC est utilisée pour le contrôle des puissances active et réactive transitées dans la ligne de transmission, en contrôlant l'amplitude et l'angle de phase de la tension injectée par le convertisseur série [12, 13, 16,17]. La détermination des références est

nécessaire pour la commande de cette partie. Il existe plusieurs méthodes d'identification des références. Comme pour la partie shunt on va utiliser la méthode Watt-Var découplée.

Le modèle du système de la figure III.20 permet d'écrire les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 V_{1-a} - V_{r-a} - V_{se-a} &= R'_{se-a} i_{r-a} + L'_{se-a} \frac{di_{r-a}}{dt} \\
 V_{1-b} - V_{r-b} - V_{se-b} &= R'_{se-b} i_{r-b} + L'_{se-b} \frac{di_{r-b}}{dt} \\
 V_{1-c} - V_{r-c} - V_{se-c} &= R'_{se-c} i_{r-c} + L'_{se-c} \frac{di_{r-c}}{dt}
 \end{aligned} \tag{III.53}$$

Avec :

$$R'_{se} = R_{se} + R_2; L'_{se} = L_{se} + L_2$$

A partir de l'équation (III.53), on a la relation matricielle (III.54) ci-dessous :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{r-a} \\ i_{r-b} \\ i_{r-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R'_{se}}{L'_{se}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R'_{se}}{L'_{se}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R'_{se}}{L'_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r-a} \\ i_{r-b} \\ i_{r-c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{1-a} - V_{r-a} - V_{se-a} \\ V_{1-b} - V_{r-b} - V_{se-b} \\ V_{1-c} - V_{r-c} - V_{se-c} \end{bmatrix} \tag{III.54}$$

En passant par la transformation de PARK, l'équation (III.54) s'écrit comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{r-d} \\ i_{r-q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R'_{se}}{L'_{se}} & \omega \\ \omega & \frac{-R'_{se}}{L'_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r-d} \\ i_{r-q} \end{bmatrix} + \frac{1}{L'_{se}} \begin{bmatrix} V_{1-d} - V_{r-d} - V_{se-d} \\ V_{1-q} - V_{r-q} - V_{se-q} \end{bmatrix} \tag{III.55}$$

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

En posant :

$$X_1 = \frac{1}{L'_{se}} (V_{1-d} - V_{r-d} - V_{se-d}) \tag{III.56}$$

$$X_2 = \frac{1}{L'_{se}} (V_{1-q} - V_{r-q} - V_{se-q}) \tag{III.57}$$

L'expression (III.55) s'écrit sous la forme (III.58)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{r-d} \\ i_{r-q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R'_{se}}{L'_{se}} & 0 \\ 0 & -\frac{R'_{se}}{L'_{se}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sh-d} \\ i_{sh-q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 + \omega i_{r-q} \\ X_2 - \omega i_{r-d} \end{bmatrix} \quad (III.58)$$

En prenant  $U_1$  et  $U_2$  comme variables de commande telles que :

$$U_1 = X_1 + \omega i_{r-q} \quad (III.59)$$

$$U_2 = X_2 + \omega i_{r-d} \quad (III.60)$$

Nous obtenons le système découplé de la figure III.22 où le bloc régulateur PI contrôle ces deux variables.

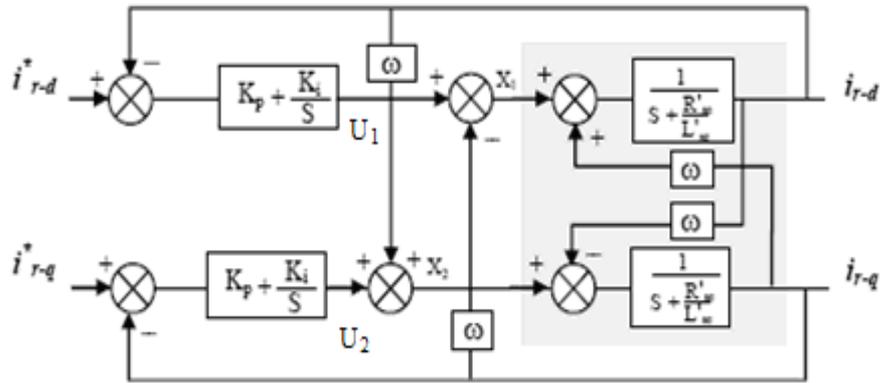


Figure III.22 : Schéma bloc de la méthode Watt-Var découplée

Les tensions  $V_{se-d}$  et  $V_{se-q}$  s'obtiennent par le procédé de calcul suivant.

Les expressions (III.56) et (III.59) permettent d'avoir la relation (III.61) ci-dessous :

$$U_1 - \omega i_{r-q} = X_1 = \frac{V_{1-d} - V_{r-d} - V_{se-d}}{L_{se}} \quad (III.61)$$

Les expressions (III.57) et (III.60) permettent d'avoir la relation (III.62) ci-dessous :

$$U_2 + \omega i_{r-d} = X_2 = \frac{V_{1-q} - V_{r-q} - V_{se-q}}{L_{se}} \quad (III.62)$$

Tenant compte des expressions (III.61) et (III.62), on obtient les tensions de la partie série données par les relations (III.63) et (III.64) ci-dessous :

$$V_{se-d} = -L_{se}(U_1 - \omega i_{se-q}) + V_{1-d} - V_{r-d} \quad (\text{III.63})$$

$$V_{se-q} = -L_{se}(U_2 + \omega i_{se-d}) + V_{1-q} - V_{r-q} \quad (\text{III.64})$$

La figure III.22 représente le schéma global du contrôle par la méthode Watt-Var découplé.

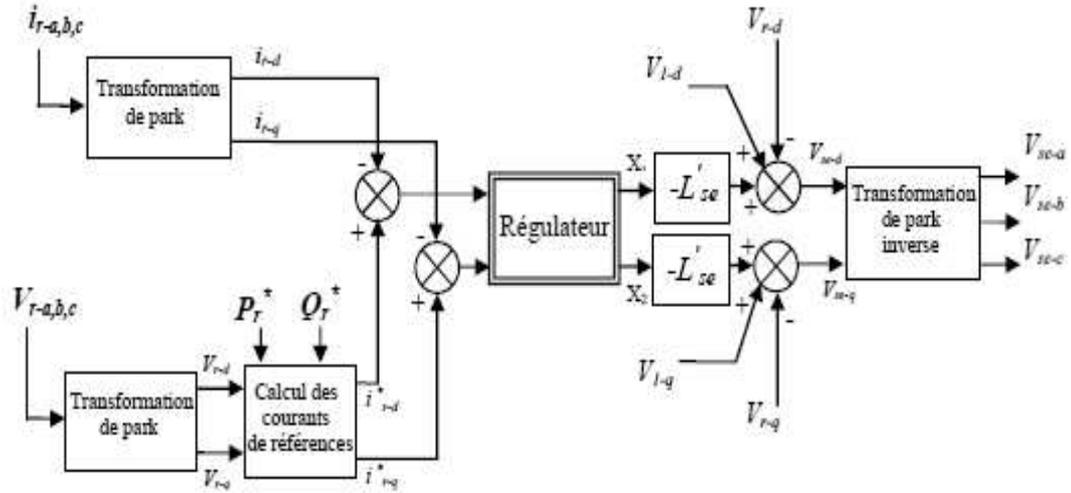


Figure III.23 : Schéma global du contrôle

La comparaison des courants de la partie série  $(i_{r-d}, i_{r-q})$  avec les courants de références  $(i_{r-d}^*, i_{r-q}^*)$  donne les écarts détectés par les régulateurs, comme indiqué sur la figure III.24.

Les sorties des régulateurs  $X_1$  et  $X_2$  donnent les composantes de la tension de référence dans le repère d-q. La transformation inverse de PARK, nous permet d'obtenir les références de la MLI pour la partie série de l'UPFC.

Les puissances de référence active  $P_r^*$  et réactive  $Q_r^*$  sont de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} P_r^* \\ Q_r^* \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{r-d} & V_{r-q} \\ V_{r-q} & -V_{r-d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r-d}^* \\ i_{r-q}^* \end{bmatrix} \quad (\text{III.65})$$

On déduit les courants qui sont donnés par la relation matricielle (III.66)

$$\begin{bmatrix} i_{r-d}^* \\ i_{r-q}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3(V_{r-d}^2 + V_{r-q}^2)} \begin{bmatrix} -V_{r-d} & V_{r-q} \\ V_{r-q} & V_{r-d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_r^* \\ Q_r^* \end{bmatrix} \quad (\text{III.66})$$

### III.4.2.2 Commande du convertisseur

L'objectif de la régulation de la partie série est de contrôler le courant à la sortie du convertisseur série de l'UPFC, afin de contrôler la tension injectée par ce dernier dans le réseau.

Pour cela nous utilisons un régulateur PI avec compensation de pôles représenté par la boucle de commande de la figure III.24.



Figure III.24 : Schéma de régulation du courant de la partie série

En boucle ouverte, nous avons :

$$\frac{i_r}{i_r^*} = \frac{K_p}{S} \left( S + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{\left( S + \frac{R'_{se}}{L'_{se}} \right)} \quad (\text{III.67})$$

Par la compensation du zéro du régulateur et le pôle, nous obtenons :

$$K_i = \frac{R'_{se}}{L'_{se}} K_p \quad (\text{III.68})$$

La figure III.24 devient :

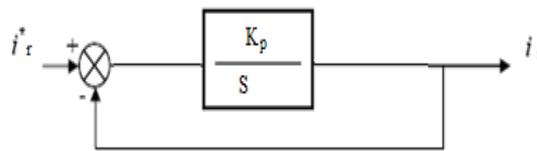


Figure III.25 : Schéma simplifié de la régulation du courant de la partie série

$$\frac{i_r}{i_r^*} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_p} S} = \frac{1}{1 + \tau S} \quad (\text{III.69})$$

Avec la condition :

$$K_i = \frac{R'_{se}}{L'_{se}} K_p \quad (\text{III.70})$$

Pour un choix convenable de la valeur de la constante de temps  $\tau$ , les gains  $K_p$  et  $K_i$  peuvent être obtenus comme suit :

$$K_p = L'_{se} / \tau ;$$

$$K_i = R'_{se} / \tau L'_{se}$$

### III.5 Examen de la commande de l'UPFC dans un réseau électrique

Dans le but d'évaluer les performances du modèle de l'UPFC retenu, on l'insère dans le réseau test de la figure III.26 ci-dessous :

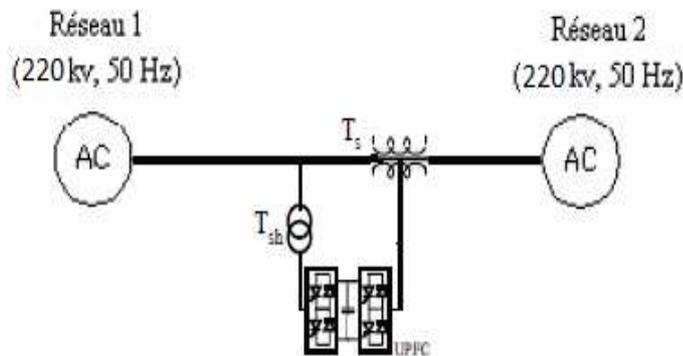


Figure III.26 : Emplacement de l'UPFC.

La commande de l'UPFC est évaluée en agissant sur les puissances active et réactive qu'on variera. Les puissances transmises initiales active et réactive sont égales respectivement à  $P=1.9\text{pu}$  et à  $Q=0.8\text{pu}$ . La commande est évaluée dans trois cas :

- variation de la puissance active et maintien de la puissance réactive.
- variation de la puissance réactive et maintien de la puissance active.
- variation des deux puissances.

Les paramètres de l'UPFC sont [11]:

$$R_{sh}=0.1 \Omega, R_{se}=0.1 \Omega, L_{sh}=0.01mH, L_{se}=0.01mH, V_{dc}=300V, F_{porteuse}=1050Hz$$

### III.5.1 Variation de la puissance active

A l'instant  $t=1.5s$  on diminue la puissance active qui passe de la valeur  $P=1.9pu$  à la valeur  $P=1.6pu$  pour reprendre sa valeur à  $t=3s$ . La puissance réactive est maintenue à la valeur  $Q=0.8pu$ .

Les figures III.27 et III.28 montrent que les consignes sont respectées.

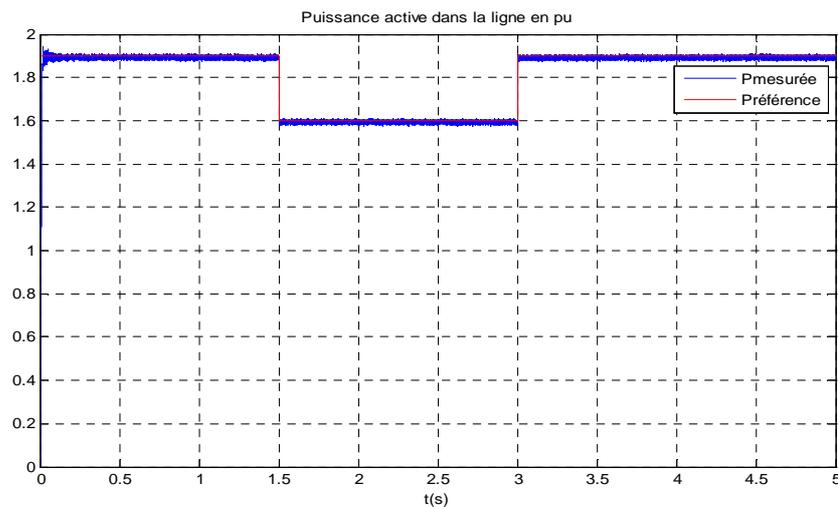


Figure III.27 : Comportement de la puissance active

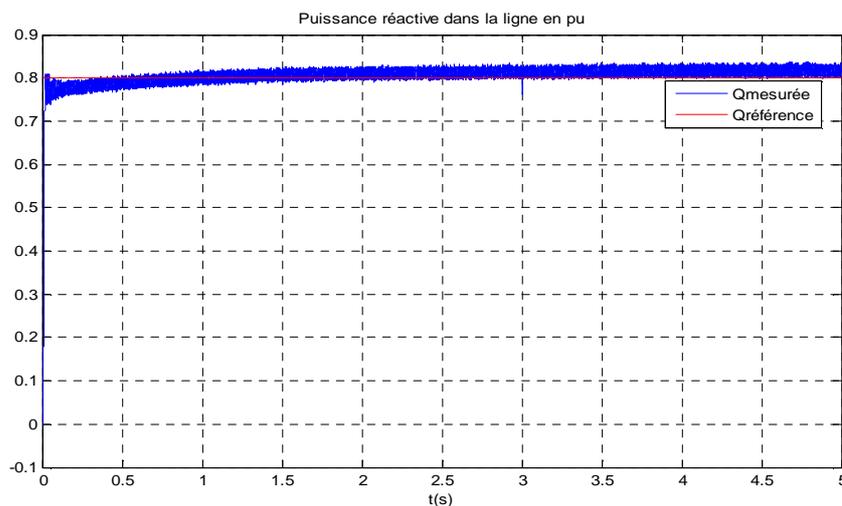


Figure III.28 : Comportement de la puissance réactive

La diminution de la puissance active entraîne une diminution de la tension série  $V_{se}$  du SSSC comme le montre la figure (III.29) et une diminution de courant injecté  $i_{sh}$  par le

STATCOM comme le montre la figure III.30. Ces deux diminutions sont conformes à leurs contributions respectives dans la puissance active  $P_{se-AC}$  transmise donnée par la figure III.31.

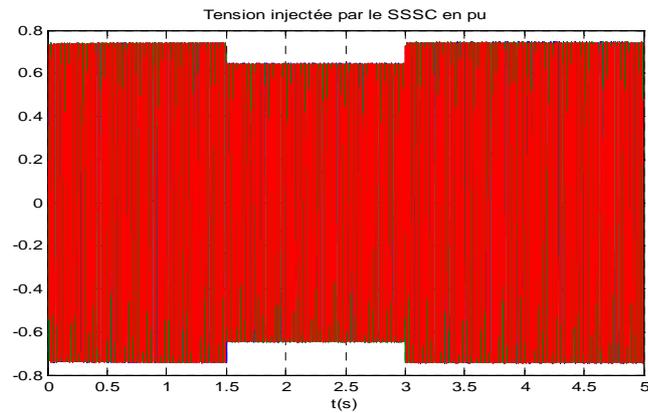


Figure III.29 : Comportement de la tension injectée par la partie série

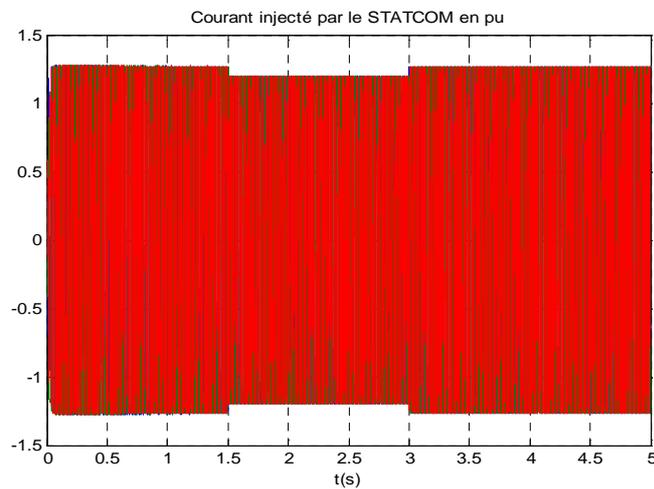


Figure III.30 : Comportement du courant injecté par la partie shunt

La tension aux bornes du condensateur est maintenue constante comme le montre la figure III.31

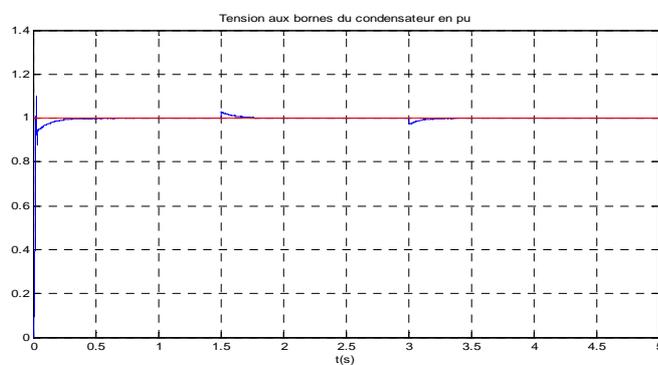


Figure III.31 : Comportement de la tension aux bornes du condensateur

### III.5.2 Variation de la puissance réactive

A l'instant  $t=1.5s$  on diminue la puissance réactive qui passe de la valeur  $Q=0.8pu$  à la valeur  $0.6pu$  pour reprendre sa valeur initiale à  $t=3s$ . La puissance active est maintenue à la valeur  $P=1.9pu$ .

Les figures III.32 et III.33 montrent que les consignes sont respectées.

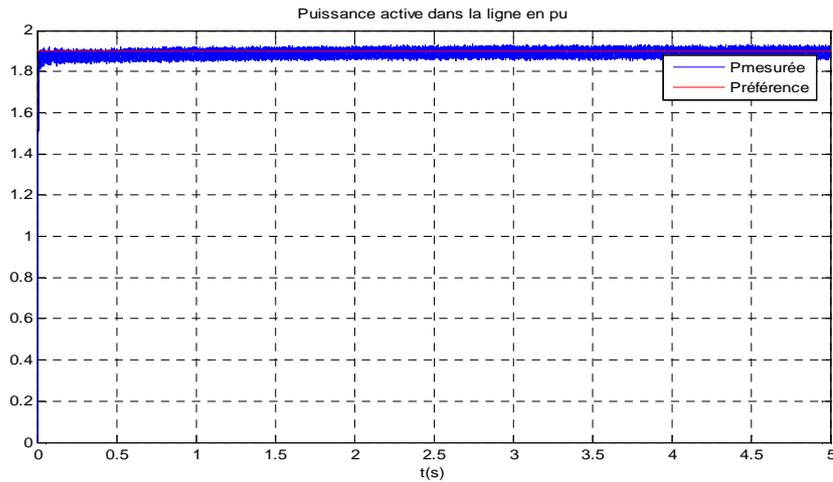


Figure III.32 : Comportement de la puissance active

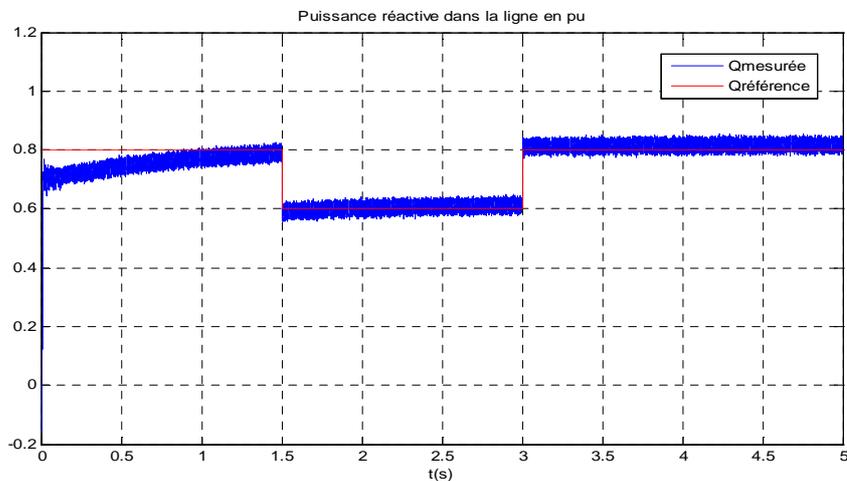
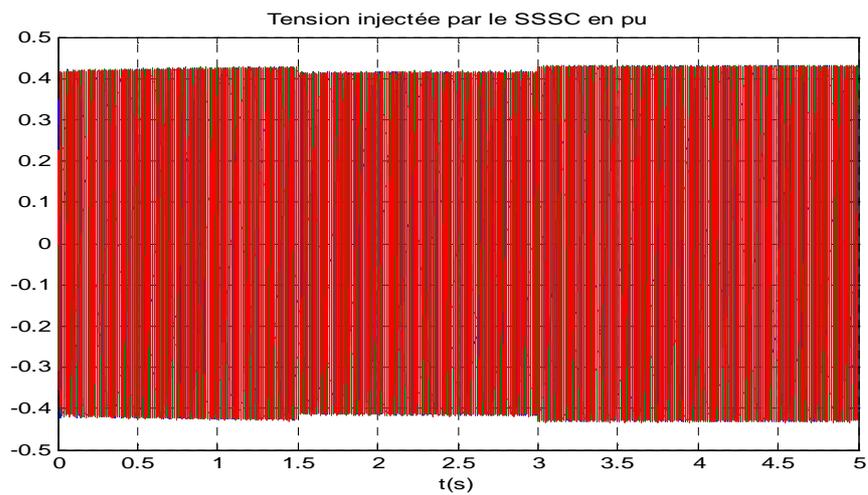
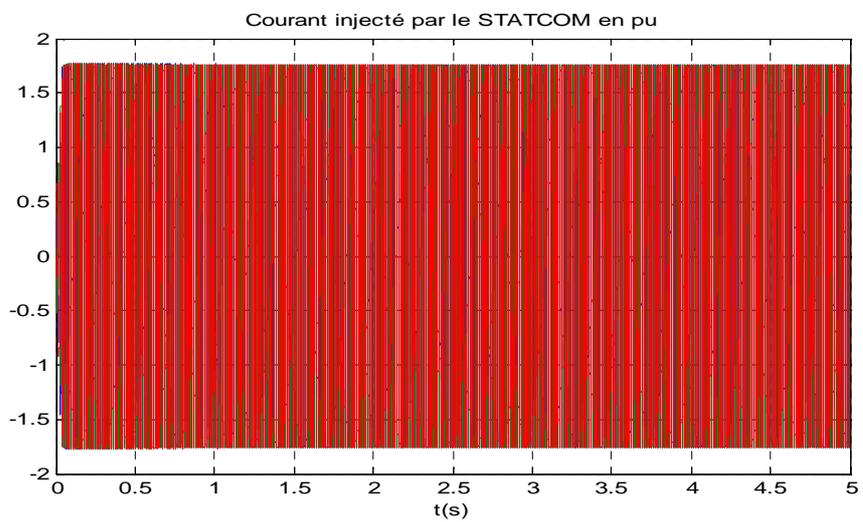


Figure III.33 : Comportement de la puissance réactive

La diminution de la puissance réactive entraîne une diminution de la tension série  $V_{se}$  du SSSC comme le montre la figure III.34 tandis que le courant injecté  $i_{sh}$  par le STATCOM reste constant comme le montre la figure III.35.



**Figure III.34 :** Comportement de la tension injecté par la partie série



**Figure III.35 :** Comportement du courant injecté par la partie shunt

La tension aux bornes du condensateur est maintenue constante comme le montre la figure III.36.

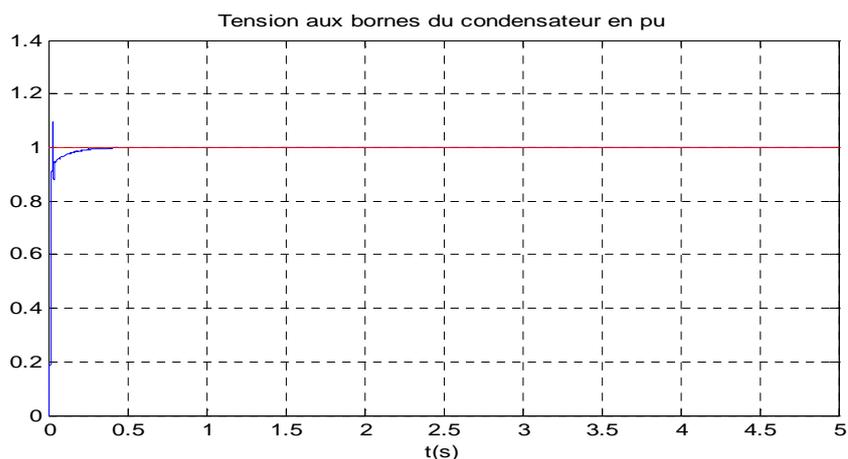


Figure III.36 : Comportement de la tension aux bornes du condensateur

### III.5.3 Variation simultanée des puissances active et réactive

A l'instant  $t = 1.5\text{s}$  on diminue la puissance active qui passe de la valeur  $P=1.9\text{pu}$  à la valeur  $P=1.5\text{pu}$  pour reprendre sa valeur initiale à  $t=3\text{s}$  et on augmente la puissance réactive qui passe de la valeur  $Q=0.8\text{pu}$  à la valeur  $Q=0.9\text{pu}$  pour reprendre sa valeur initiale à  $t=3\text{s}$ . Les figures III.37 et III.38 montrent que les consignes sont respectées.

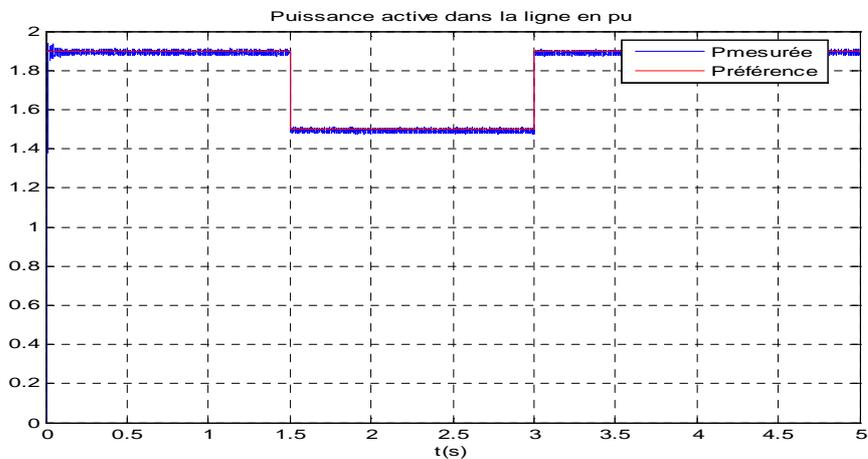


Figure III.37 : Comportement de la puissance active

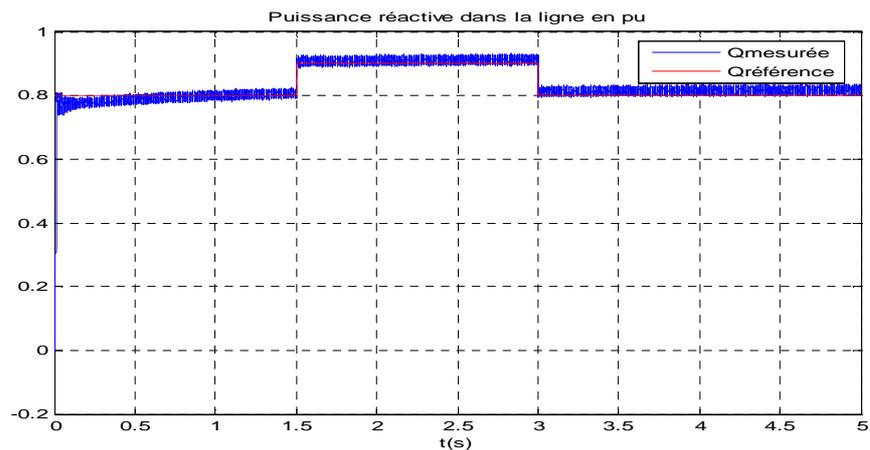


Figure III.38 : Comportement de la puissance réactive

La diminution de la puissance active et l'augmentation de la puissance réactive entraîne une diminution de la tension série  $V_{se}$  du SSSC comme le montre la figure III.39 et une diminution du courant injecté  $i_{sh}$  par le STATCOM comme le montre la figure III.40.

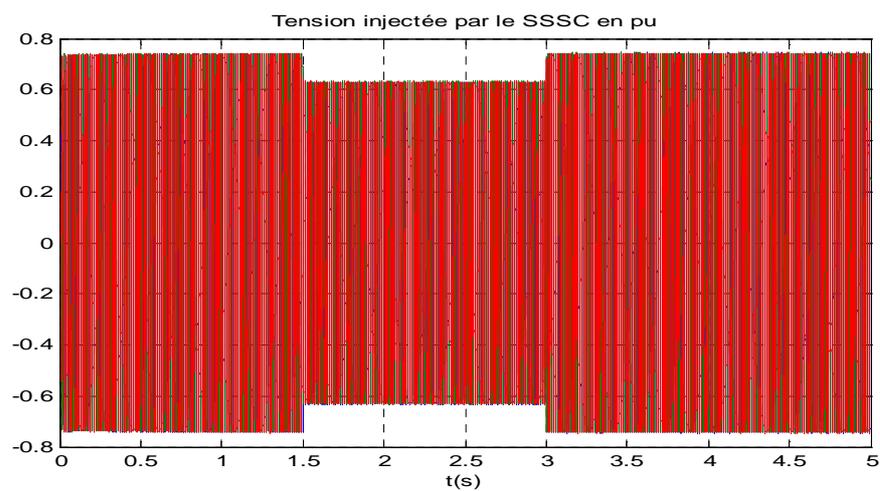


Figure III.39 : Comportement de la tension injecté par la partie série

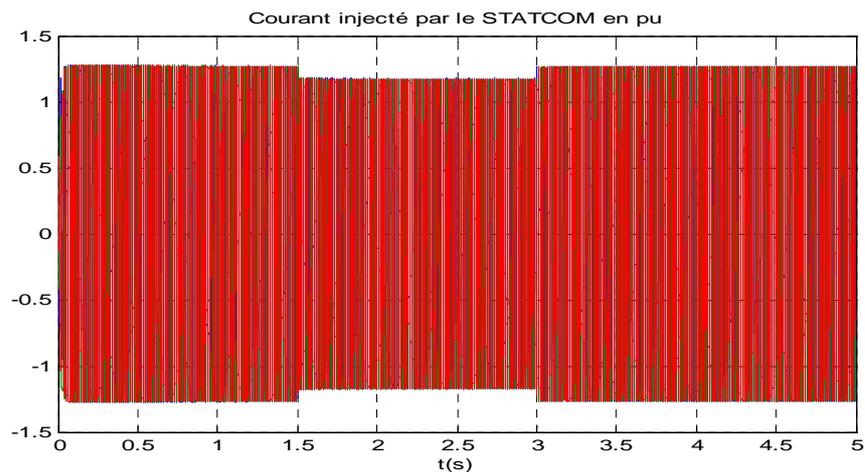


Figure III.40 : Comportement du courant injecté par la partie shunt

La tension aux bornes du condensateur est maintenue constante comme le montre la figure III.41.

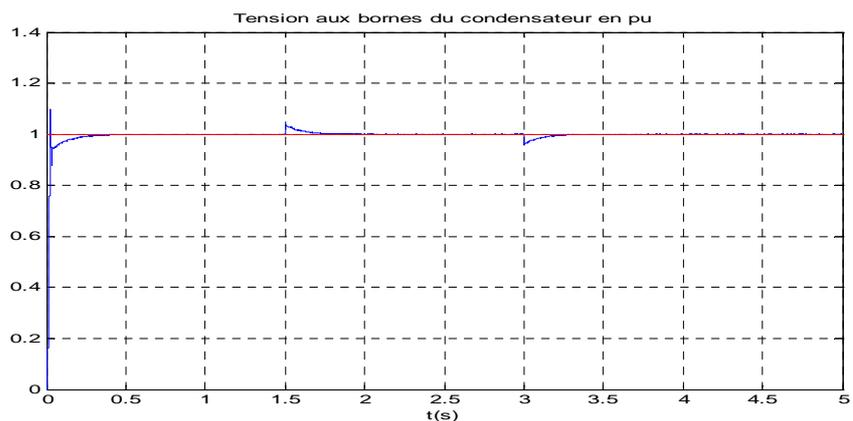


Figure III.41 : Comportement de la tension aux bornes du condensateur

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit d'une manière détaillée le dispositif UPFC qui est un dispositif hybride : parallèle et série. Nous avons donné son principe de fonctionnement ainsi que son modèle mathématique. Nous avons choisi la méthode watt-var découplé pour identifier les références du système de commande qui est basée sur la méthode MLI. Par la suite nous avons fait introduire un UPFC dans un réseau de transport d'énergie électrique et nous avons fait des simulations. Les résultats obtenus par les simulations effectuées ont validé d'une manière générale le modèle mathématique ainsi que le type de régulateur choisi et les calculs théoriques des coefficients de ce régulateur, ce qui montre que l'introduction de l'UPFC permet de renforcer le transit de puissance dans la ligne électrique et donc l'exploitation du réseau électrique. En revanche, le régulateur PI donne des régimes transitoires avec une dynamique un peu lente et les allures présentent des oscillations qui sont dus sans doute au phénomène de commutation.

---

## IV.1 Introduction

Une nouvelle commande complètement différente à celle discutée dans le chapitre qui précède à été introduite pour obtenir des simulations rapides pour le contrôle de l'UPFC, il s'agit de la commande neuronale inverse. Elle est basée sur la technologie des réseaux neuronaux artificiels RNA qui trouve ses origines dans certaines propriétés des neurones biologiques. Ils comprennent une variété d'architectures d'éléments de processus fortement interconnectés qui offrent une alternative aux approches conventionnelles de calcul. En effet ils offrent la possibilité de produire des calculs très complexes là où les systèmes classiques trouvent des difficultés à les exécutés [38].

A cause de leurs capacités à représenter n'importe qu'elle fonction, linéaire ou non-linéaire, simple ou complexe, les RNA connaissent un succès croissant dans divers domaines d'analyse des réseaux électriques et des systèmes d'asservissement. Ceci inclut les prévisions de charge, l'évaluation de la sécurité statique, dynamique, la modélisation des charges dynamiques, les diagnostics des défauts et les processus d'alarme, en plus des démonstrations significatives des capacités des RNA dans la modélisation et l'identification des systèmes [38].

Ce chapitre est consacré à un aperçu de cette technique à travers une présentation générale du réseau de neurones artificiels, ainsi il traite la construction d'un réseau de neurones, qui aura pour but de contrôler la puissance active et réactive indépendamment.

## IV.2 Historique

- 1890 : W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative, et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb.

- 1943 : J. Mc Culloch et W. Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ceux sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).

- 1949 : D. Hebb, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que, nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés

---

des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.

- 1957 : F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuroordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes. Notons qu'à cette époque les moyens disposés étaient limités et c'est une prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine pour quelques minutes.

- 1960 : B. Widrow, un automaticien, développe le modèle Adaline (Adaptative Linear NEron). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de rétro-propagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons multicouches. Les réseaux de type Adaline restent utilisés de nos jours pour certaines applications particulières. B. Widrow a créé dès cette époque une des premières firmes proposant neuro-ordinateurs et neuro-composants, la "Memistor Corporation". Il est aujourd'hui le président de l'International Neural Network Society (INNS).

- 1969 : M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron. Limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à tous modèles de réseaux de neurones artificiels. Leur objectif est atteint, il y a abandon financier des recherches dans le domaine (surtout aux U.S.A.), les chercheurs se tournent principalement vers l'IA et les systèmes à bases de règles.

- 1967-1982 : Toutes les recherches ne sont, bien sûr, pas interrompues. Elles se poursuivent, mais déguisées, sous le couvert de divers domaines comme : le traitement adaptatif du signal, la reconnaissance de formes, la modélisation en neurobiologie, etc. De grands noms travaillent durant cette période tels que : S. Grossberg, T. Kohonen.

- 1982 : J. J. Hopfield est un physicien reconnu à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels; Il a fixé préalablement le comportement à atteindre pour son modèle et construit à partir de là, la structure et la loi d'apprentissage correspondant au résultat escompté. Ce modèle est aujourd'hui encore très utilisé pour des problèmes d'optimisation.

- 1983 : La Machine de Boltzmann est le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du perceptron. Mais l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue (les temps de calcul sont considérables).

---

- 1985 : La rétro-propagation de gradient apparaît. C'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches (aussi appelés Perceptrons multicouches). Sa découverte réalisée par trois groupes de chercheurs indépendants indique que "la chose était dans l'air". Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables [39]. De nos jours, les réseaux multicouches et la rétropropagation de gradient reste le modèle le plus étudié et le plus productif au niveau des applications.

En France, elle est à l'image du congrès Neuro-Nîmes qui a pour thème les réseaux neuromimétiques et leurs applications. Créé en 1988, le chiffre de ses participants croit chaque année et reflète bien l'intérêt que le monde scientifique et industriel (50% des participants) porte au connexionnisme [39].

Notant que l'efficacité d'apprentissage de l'adaline (ADaptive LInear NEuron) a été prouvée par Widrow et Kamenetsky en 2003.

### IV.3 Structure du neurone

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former les dendrites. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma (corps du neurone).

L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angströms ( $10^{-9}$  m) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse figure IV.1.

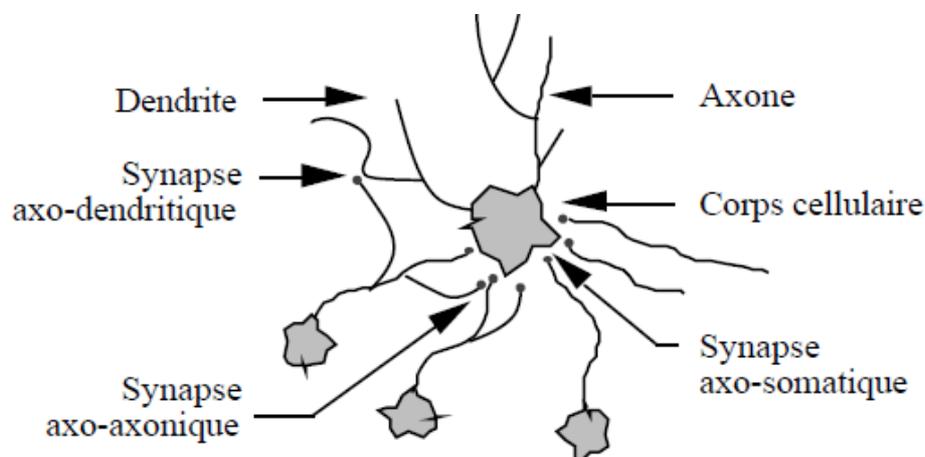


Figure IV.1. Un neurone avec son arborisation dendritique

---

La structure d'un neurone biologique, comme montré par la Figure IV.1, se compose de trois parties :

### 1. **La soma**

Ou cellule d'activité nerveuse, au centre du neurone.

### 2. **L'axone**

Long prolongement fibreux du neurone, qui conduit l'influx nerveux. qui émerge du corps cellulaire du neurone.

Sa longueur est variable et peut atteindre plus d'un mètre. Son extrémité se divise en "branches" qui se connectent à d'autres neurones par l'intermédiaire d'une structure particulière : la synapse [32].

L'axone transmet les messages sous forme de signaux de nature électrique.

### 3. **Dendrites**

Elles se divisent par dichotomie, créant une arborescence du neurone sous forme de filaments courts et ramifiés. Elles s'opposent à l'axone pour plusieurs raisons :

-les dendrites reçoivent l'influx nerveux, alors que l'axone le transmet ;

-les dendrites sont nombreuses alors que l'axone est unique.

-Les dendrites ont pour fonction de recevoir et de conduire l'influx nerveux (signal) provenant d'autres cellules nerveuses, vers le corps cellulaire du neurone. S'il est excité, il enverra alors un influx nerveux par le biais de l'axone, vers un autre neurone, vers un muscle ou un autre type tissulaire [32].

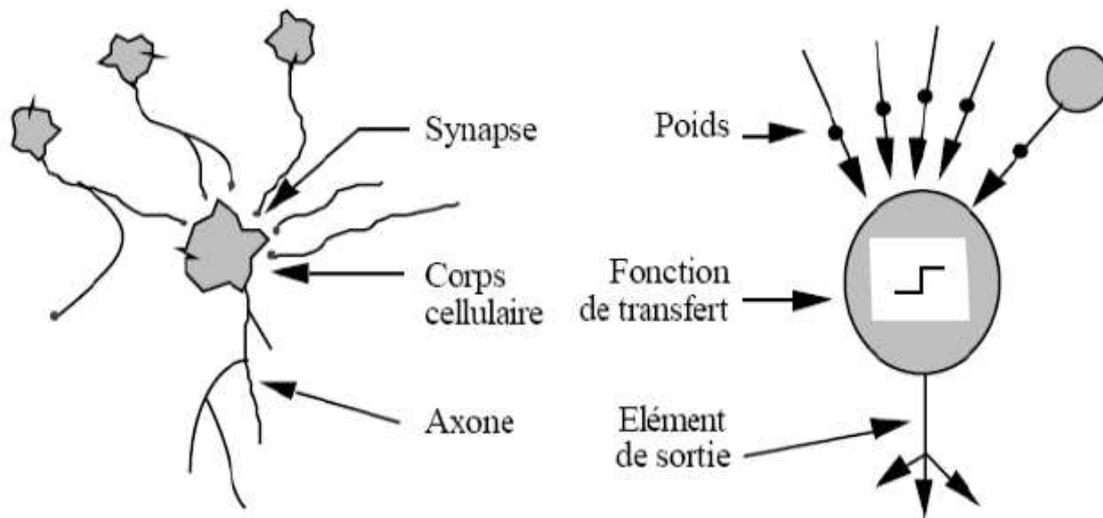
## **IV.4 Le Neurone Formel (Artificiel)**

Le neurone formel représente la brique de base des RNA, c'est un automate dont le modèle s'inspire de celui d'un neurone biologique. Les premiers travaux datent de 1943 par MM. Mac Culloch et Pitts. Ils présentent un modèle assez simple pour le neurone et explorent les possibilités de ce modèle pour concevoir tous les réseaux de neurones [38].

Cette modélisation consiste à mettre en œuvre le système sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que pour chaque élément composant le neurone biologique correspondant un élément composant le neurone artificiel, donc une modélisation pour chacun d'entre eux [38, 39, 40].

Tout l'intérêt d'un neurone formel réside dans ses poids synaptiques. Ces poids doivent être correctement ajustés pour mimer un comportement ; pour reproduire le lien entre l'espace des entrées et l'espace des sorties.

Le schéma ci-dessous, permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel.

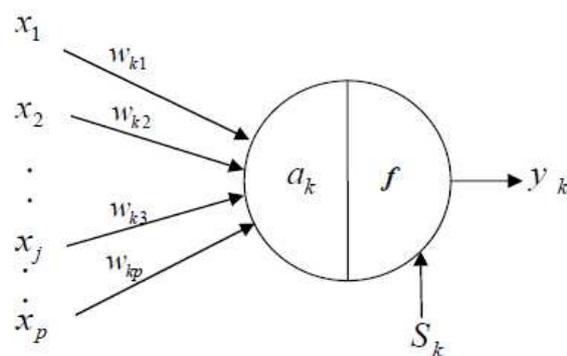


**Schéma IV.2 :** Mise en correspondance neurone biologique /neurones artificiel

Le neurone artificiel, montré par la figure IV.3, est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont.

A chacune de ses entrées est associé un poids  $w$  représentatif de la force de la connexion.

Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. Chaque connexion est associée par un poids.



**Figure IV.3 :** Modèle d'un neurone formel

---

## IV.5 Types des réseaux de neurones artificiels

Il existe quatre principaux types de connexion (réseaux): directe, récurrente, latérale et à délais.

La connexion directe est utilisée pour acheminer l'information de l'entrée vers la sortie. La connexion récurrente permet d'acheminer l'information de la sortie des neurones des couches supérieures vers les entrées des neurones précédents. Les réseaux de neurones qui doivent choisir un neurone gagnant utilisent la connexion latérale pour établir une relation entre les neurones de sortie et la maintenir. Finalement, les problèmes temporels sont résolus par les modèles de réseaux dynamiques avec des connexions à délais [40]. Les connexions entre les neurones peuvent être complètes ou partielles. Une connexion est complète lorsque les neurones d'une couche inférieure sont reliés à ceux de la couche supérieure et elle est locale lorsque les deux couches de neurones ne sont pas complètement reliées.

Une couche est définie comme un ensemble de neurones situé au niveau d'un réseau de neurones. Les réseaux de neurones possèdent une ou plusieurs couches de neurones et leur dimension dépend du nombre de couches et du nombre de neurones par couche.

### IV.5.1 Perceptron

Le perceptron est la forme la plus simple d'un réseau de neurones. Il comprend trois principaux éléments: la rétine, les cellules d'association et les cellules de décision. La fonction d'activation utilisée dans ce réseau est de type tout ou rien (0 ou 1). L'apprentissage du perceptron peut se faire avec plusieurs méthodes, il n'y a qu'une seule couche de poids modifiables entre les cellules d'association et les cellules de décision. Le perceptron est limité dans ses applications, car il ne peut être applicable que si les variables sont linéairement séparables et que la sortie ne peut être que 0 ou 1.

### IV.5.2 Perceptron multicouches

Cette classe est la plus importante des réseaux de neurones car elle représente la généralisation du perceptron monocouche avec une fonction d'activation de type sigmoïde et une ou plusieurs couches cachées. Le vecteur d'entrée se propage dans le réseau de couche en couche jusqu'à la sortie, l'entraînement de celui-ci se fait avec l'algorithme par la rétro-propagation de l'erreur [39,40]. Ce réseau est caractérisé par son modèle de neurone traitant les non-linéarités. Il peut comporter une ou plusieurs couches cachées et un plus grand nombre de connexions permettant de résoudre la majorité des problèmes.

---

Même avec les avantages des couches cachées et la performance de l'algorithme d'apprentissage, il reste plusieurs problèmes non réglés comme le choix du nombre de couches, le nombre de neurones par couche et le problème des minimums locaux où le réseau peut converger.

### IV.5.3 Réseau de neurones linéaire

La fonction d'activation du neurone dans ce cas est linéaire. L'une des règles d'apprentissage permet d'effectuer une descente de gradient de l'erreur sur une mesure d'erreur quadratique [39,40]. Les domaines d'application comprennent la commande, le contrôle, et le traitement du signal.

## IV.6 Fonctions d'activation des réseaux de neurones artificiels

Il existe trois principaux types de fonctions les plus connues: binaire à seuil, rampe avec saturation, et la sigmoïde [40].

### IV.6.1 Fonction binaire à seuil

Le seuil introduit une non-linéarité dans le comportement du neurone, c'est le modèle tout ou rien.

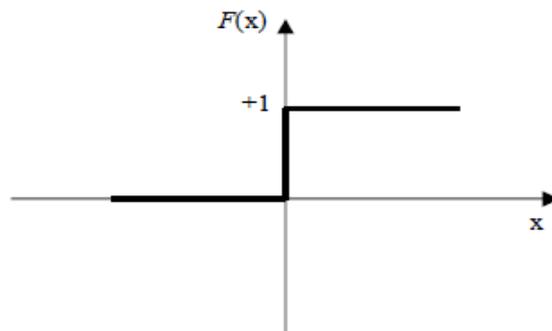
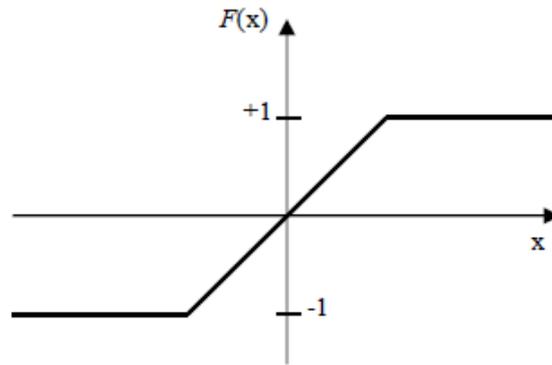


Figure IV.4 : Fonction d'activation binaire à seuil.

### IV.6.2 Fonction à rampe avec saturation

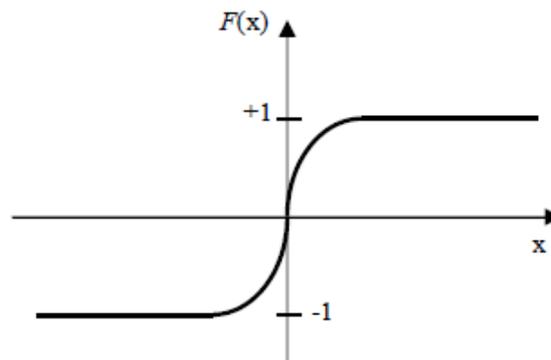
Cette fonction représente un compromis entre la fonction linéaire et la fonction seuil: entre ses deux bornes, elle confère au neurone une combinaison linéaire de l'entrée. A la limite, la fonction linéaire est équivalente à la fonction seuil Figure IV.5.



**Figure IV.5 :** Fonction d'activation à rampe avec saturation

### IV.6.3 Fonction sigmoïde

La fonction sigmoïde est une fonction continue qui maintient la sortie dans l'intervalle  $[0,1]$  figure IV.6. Son avantage principal est l'existence de sa dérivée en tout point. Elle est employée en général dans le perceptron multicouche [40].



**Figure IV.6 :** Fonction d'activation sigmoïde.

### IV.7 Apprentissage des réseaux de neurones

La plus fondamentale des propriétés propres au réseau de neurones est sa capacité d'apprendre de son environnement et d'améliorer sa performance à travers un processus d'apprentissage. On définit l'apprentissage comme étant un changement opéré dans la mémoire du réseau afin de trouver un ensemble de poids synoptiques qui minimise l'erreur entre la sortie du réseau et le résultat désiré.

L'affectation des valeurs des poids synaptiques qui relient les neurones entre eux, permis d'adapter un traitement effectué par le réseau à une tâche particulière.

---

De ce fait l'apprentissage a pour objectif l'amélioration des performances futures du réseau, sur la base d'une connaissance acquise au fur et à mesure des expériences passées. On distingue trois familles d'apprentissage différentes en fonction de la nature des informations disponibles et du but recherché [38].

- **Apprentissage supervisé**

Pour lequel il est nécessaire de disposer d'un ensemble de couples de données (entrées du réseau ; sorties désirées correspondantes).

- **Apprentissage semi-supervisé ou par renforcement**

Pour lequel seule une mesure d'erreur qualitative est disponible.

- **Apprentissage non supervisé**

Pour lequel il n'y a pas de réponse désirée.

#### IV.7.1 Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage se traduit, dans la plupart des architectures, par une modification de l'efficacité synaptique qui s'effectue en changeant les valeurs des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre.

Soit  $w_{ij}$  le poids reliant le  $j^{\text{eme}}$  neurone d'une couche au  $i^{\text{eme}}$  neurone de la couche suivante. A l'instant  $t$  un changement  $\Delta w_{ij}(t)$  s'exprime en fonction de  $w_{ij}(t+1)$  et  $w_{ij}(t)$  qui sont respectivement les nouvelles et anciennes valeurs du poids  $w_{ij}$  par l'équation :

$$\Delta w_{ij}(t) = w_{ij}(t+1) - w_{ij}(t) \quad (\text{IV.1})$$

L'ensemble de règles permettant la réalisation d'un tel processus d'adaptation des poids constitue ce qu'on appelle l'algorithme d'apprentissage du réseau.

Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones. L'algorithme de rétro-propagation du gradient est le plus couramment utilisé dans les études d'évaluation de la stabilité transitoire.

#### IV.8 Rétro-propagation du gradient

La rétro-propagation du gradient est la transmission de l'erreur calculée en sortie vers l'entrée.

L'algorithme de rétro-propagation (back-propagation) a été développé en particulier par Rumelhart, Parken et le Cun en 1985, ce qui a rendu possible la décomposition d'une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en une suite d'étapes linéairement séparables.

## IV.9 les méthodes de Commande

### IV.9.1 La méthode inverse par apprentissage local

Le principe est tout simplement d'ajuster l'entrée du réseau de neurones pour que sa sortie corresponde à une valeur donnée.

Pour cette méthode d'inversion, Linden propose que le gradient  $g$  doit être recalculé en fonction de son entrée  $x(n)$  et non pas en fonction des poids du réseau de neurones [38].

### IV.9.2 La méthode inverse par apprentissage global

Pour Narendra et Parthasarathy, l'inversion d'un réseau de neurones se fait par l'entremise d'un autre réseau. Pour obtenir ce réseau de neurones inverse, il faut premièrement générer un ensemble d'entrées/sorties  $\{x, y\}$  obtenu par la réponse du réseau  $N$  à inverser. Puis, il suffit d'exécuter l'apprentissage du réseau de neurones inverse en considérant comme entrée l'ensemble  $y$  et comme sortie désirée l'ensemble  $x$ .

### IV.9.3 La méthode d'apprentissage des réseaux de neurones récurrents

L'apprentissage d'un réseau de neurones récurrent n'est autre que de faire ajuster les poids pour avoir une sortie désirée par rapport à une entrée donnée. Pour cela, il suffit de minimiser la fonction d'erreur par rapport à tous les poids du réseau de neurones récurrent. Cette fonction d'erreur peut être donnée par la relation quadratique suivante:

$$J(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^k \sum_{p=1}^s e_p^2(k) \quad (\text{IV.2})$$

$$e_p(k) = Y_d(k) - Y(k, W) \quad (\text{IV.3})$$

### IV.9.4 Méthode parallèle

La méthode parallèle est basée sur l'application directe du calcul de l'erreur et de son gradient par rapport à  $W$ . On constate dans la figure IV.7.a que la sortie  $Y(k)$  dépend de la sortie précédente  $Y(k-1)$ . A cause de cela, le gradient de l'erreur est lui-même dépendant du

gradient calculé précédemment. Pour illustrer le principe du calcul du gradient, considérons la fonction scalaire suivante:

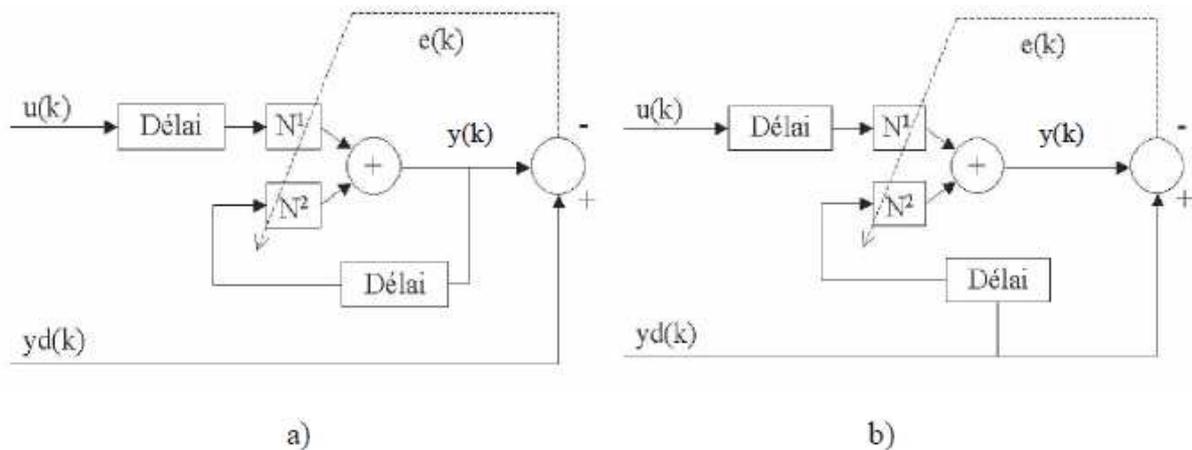
$$X(k) = \phi(X(k-1), \theta) \quad (IV.4)$$

Où  $X(k)$  et  $\theta$  sont des scalaires.

L'équation (IV.4) est une expression récurrente, on peut appliquer le même principe à l'erreur (IV.3) impliquant le réseau de neurones récurrent. On peut directement calculer le gradient de  $J$  en utilisant (IV.2) appliquée au réseau ou utiliser la dérivation en chaîne [40].

#### IV.9.5 Méthode série-parallèle

La méthode série-parallèle est une approximation de la méthode parallèle. Elle consiste à remplacer, pour la procédure d'apprentissage du réseau de neurones récurrent, les sorties récurrentes par les sorties désirées récurrentes. Pour bien différencier les deux méthodes, la figure IV.7 illustre le principe d'apprentissage, parallèle et série-parallèle, appliqué au réseau de neurones récurrent.



**Figure IV.7 :** Apprentissage selon la méthode parallèle a) et selon la méthode série-parallèle b)

Ainsi, en considérant un apprentissage série-parallèle valable, c'est-à-dire une erreur très faible entre les sorties désirées et les sorties du réseau de neurones récurrent, on peut supposer que les méthodes parallèle et série-parallèle donneront des résultats presque équivalents. En effet si les sorties du réseau de neurones récurrent sont presque identiques aux sorties désirées, l'erreur introduite en remplaçant les sorties précédentes par les sorties désirées précédentes devraient être négligeables [39].

### IV.9.6 Momentum

La méthode de minimisation converge très lentement. Pour cette raison, il est possible d'ajouter un terme supplémentaire qui aura pour effet d'accélérer la convergence dans les régions linéaires de la fonction d'erreur. Ce terme supplémentaire appelé momentum [26] donne lieu à la fonction de mise à jour suivante:

$$W(k+1) = W(k) + \Delta W(k) \quad (\text{IV.5})$$

$$\Delta W(k) = \alpha(k) + \eta \Delta W(k-1) \quad (\text{IV.6})$$

Où  $\alpha$  est une constante fixée en fonction de la rapidité de convergence souhaitée et  $\eta$  est le coefficient du momentum qui doit être compris entre 0 et 1.

Nous avons choisi la méthode inverse parce qu'elle est la plus simple pour construire un système de commande neuronal à partir d'un modèle du système identifier sous forme d'un réseau de neurone en boucle ouverte est l'inversion directe du modèle. Le système de commande est l'inverse du modèle du processus.



Figure IV.8 Réseau de neurone en boucle ouverte

$$G_c(s) = [G_{\text{mod } ele}(s)]^{-1} \quad (\text{IV.7})$$

La sortie du système est employée comme une entrée au réseau. La sortie du réseau de neurone est comparée au signal de la formation (le système d'entrée) et l'erreur est utilisée comme moyen pour former le réseau figure IV.9. Cette méthode de formation oblige le réseau de neurone à inverser le système [40].

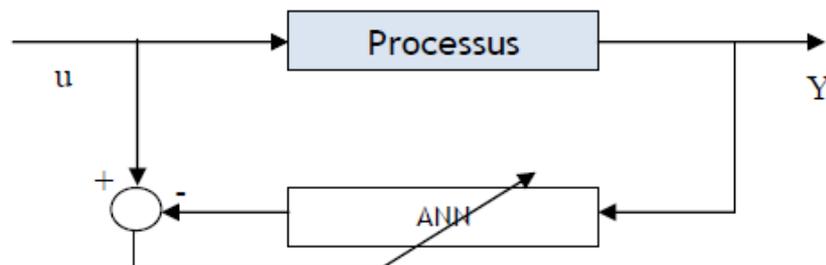


Figure IV.9 La commande par modèle inverse

---

## IV.10 Commande et identification par réseaux de neurones

Les réseaux de neurones ont été souvent appliqués pour l'identification et le contrôle du système. Ils possèdent la propriété d'approximation universelle qui stipule que toute fonction continue et bornée peut être approchée uniformément sur un domaine borné de ses entrées par un réseau de neurones de taille finie.

En vertu de cette propriété, le comportement de tout système statique peut être approché par un réseau de neurone non bouclé approprié, et celui de tout système dynamique par un réseau bouclé. C'est cette propriété conjuguée à l'existence d'algorithmes d'apprentissage performants, qui fait l'intérêt des réseaux de neurones formels pour l'automatique.

L'identification par réseau de neurones requiert à priori la sélection des entrées du réseau, ainsi que sa topologie interne. Une des formes les plus simples d'une telle topologie, est le Perceptron Multicouche, c'est un réseau à une seule couche cachée, sa capacité d'approximation universelle a fait de lui un bon choix pour faire la modélisation des systèmes.

Il existe deux méthodes essentielles de conception d'un contrôleur neuronal :

### ➤ **Méthode directe**

Où le réseau de neurone est lui-même le contrôleur. La méthode la plus fondamentale est nommée commande directe inverse. Elle utilise le modèle inverse identifié du processus comme contrôleur [38].

### ➤ **Méthode indirecte**

Le contrôleur utilise le réseau de neurones pour prédire la sortie du système.

Il existe deux approches d'apprentissage possibles, celle du modèle direct d'un système, et celle de l'apprentissage du modèle inverse.

### IV.10.1 Identification par modèle direct

Il s'agit de réaliser l'apprentissage direct d'un processus. Les séquences d'entrées et de sorties désirées définissant le modèle du système, sont la séquence des entrées de commande  $u(k)$  appliquées et les sorties du processus  $y(k)$  mesurées pendant le fonctionnement.

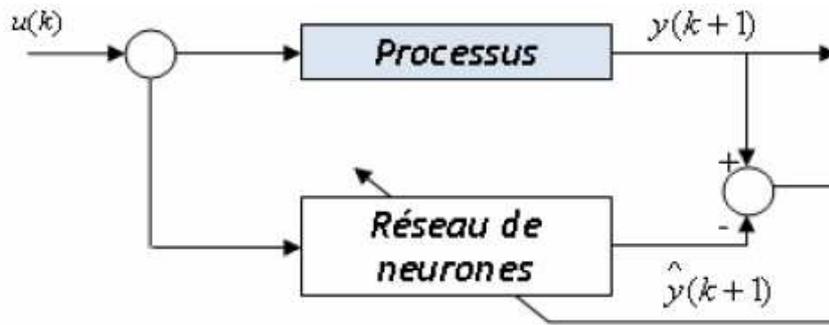


Figure IV.10 Identification du modèle direct par RNA

#### IV.10.2 Identification du modèle inverse

Dans l'apprentissage général, l'objectif est de minimiser le critère de performance suivant

$$J(\theta) = \sum_{t=1}^N \left( y(t) - \hat{y}(t) \right)^2 \quad (IV.8)$$

Comme illustre la figure IV.11 suivante:

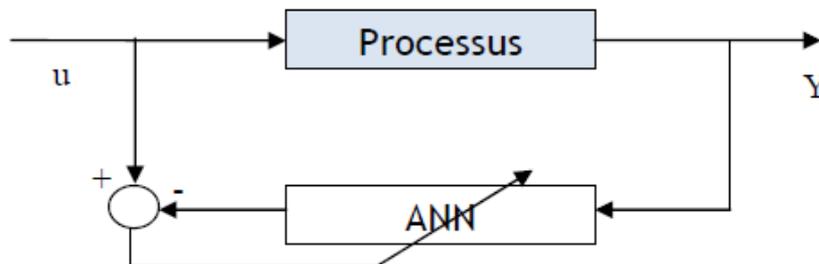


Figure IV.11 Identification du modèle inverse par RNA

Il existe deux méthodes pour l'établissement du modèle inverse : Apprentissage séparé: appelé aussi apprentissage généralisé (apprentissage en temps réel, ou apprentissage spécialisé) [39].

#### IV.11 Synthèse d'une commande neuronale par inversion du modèle du processus

La méthode la plus simple pour construire un système de commande neuronal à partir d'un modèle de système identifié sous forme d'un réseau de neurone en boucle ouverte est l'inversion directe du modèle, où le système de commande est l'inverse du modèle de processus.

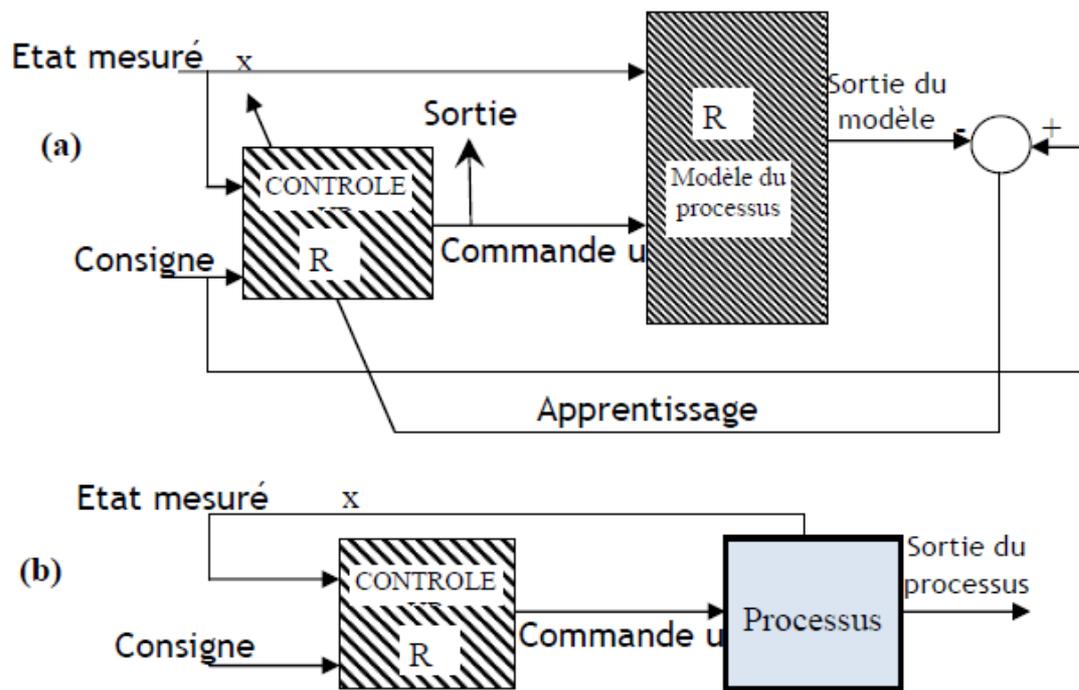


Figure IV.12 Commande neuronale en boucle fermée par inversion du modèle

(a) Principe de l'apprentissage

(b) commande de l'utilisation

Dans cette figure IV.12 on a joint au réseau de neurone qui constitue le modèle du processus un réseau de neurone qui calcule la loi de commande. Ce réseau est aussi un réseau non bouclé qui pour entrée l'état est d'une façon optionnelle, la consigne désiré (état au temps suivant) dans le cas où l'on souhaite que cette consigne soit variable. Sino, le contrôleur admet pour entrée unique l'état du système au temps  $k$ , la sortie du contrôleur neuronal est la commande au temps qui lors de l'apprentissage, est appliquée à l'entrée de la commande du modèle, et qui lors de l'utilisation est appliquée à l'entrée du processus.

L'ensemble (contrôleur+modèle) constitue un réseau de neurones non bouclé qui admet pour sortie l'état au temps suivant :

L'apprentissage s'effectue en minimisant la différence entre l'état désiré ou consigne et la sortie du réseau. Seul les paramètres du contrôleur (poids et biais) sont variables et modifiés par le processus d'apprentissage. Les paramètres du modèle restent inchangés par le processus d'apprentissage qui se traduit dans la figure par des hachures de style différent.

La fonction de coût est généralement un écart quadratique entre la sortie désirée et la sortie mesurée. Si des contraintes sont imposées à la commande, elles peuvent l'être directement dans le réseau contrôleur. Par exemple, si la commande admissible est bornée, on peut exprimer ces contraintes dans les fonctions d'activation de la couche de sortie du

contrôleur (sigmoïde).on peut aussi exprimer ces contraintes en introduisant une sortie auxiliaire au niveau du contrôleur [39].

#### IV.12 Principe de la commande par le modèle inverse neuronal

La mise en équation des différents phénomènes physiques intervenant dans le procédé conduit à des équations non linéaires qui ne traduisent pas parfaitement le comportement du système. On a choisi par conséquent, de rechercher un modèle de comportement du procédé qui repose sur l'exploitation des mesures expérimentales caractéristiques de son fonctionnement dynamique: c'est l'objet de l'identification. Ce modèle est exprimé sous forme d'une fonction de transfert discrète. Cette dernière utilise l'inverse du système comme contrôleur figure IV.12, d'où elle est appelée "commande par modèle inverse neuronal". Ce modèle inverse neuronal d'un processus donné est un réseau de neurones qui permet de calculer l'entrée (ou le signal de commande) à partir des valeurs antérieures de ces entrées/sorties.

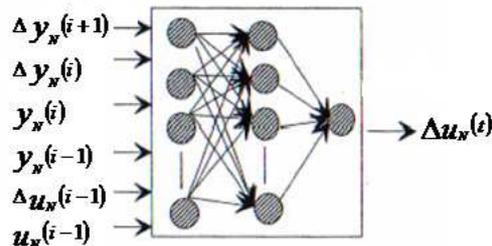


Figure IV.13 Contrôleur neuronal

L'étape de modélisation nécessite l'acquisition d'un fichier d'entrées/sorties du processus pour que les différents modes du processus existent, un signal rampe autour duquel on superpose une séquence binaire pseudo aléatoire afin d'avoir un modèle qui puisse être utilisé en tout point de fonctionnement.

On crée ainsi un fichier d'entrées/sorties que l'on utilisera pour l'apprentissage hors ligne du réseau de neurone.

A partir d'un fichier contenant  $u(t)$  et  $y(t)$  on calcule les variations :

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= u(t) - u(t-1) \\ \Delta y(t) &= y(t) - y(t-1) \end{aligned} \tag{IV.9}$$

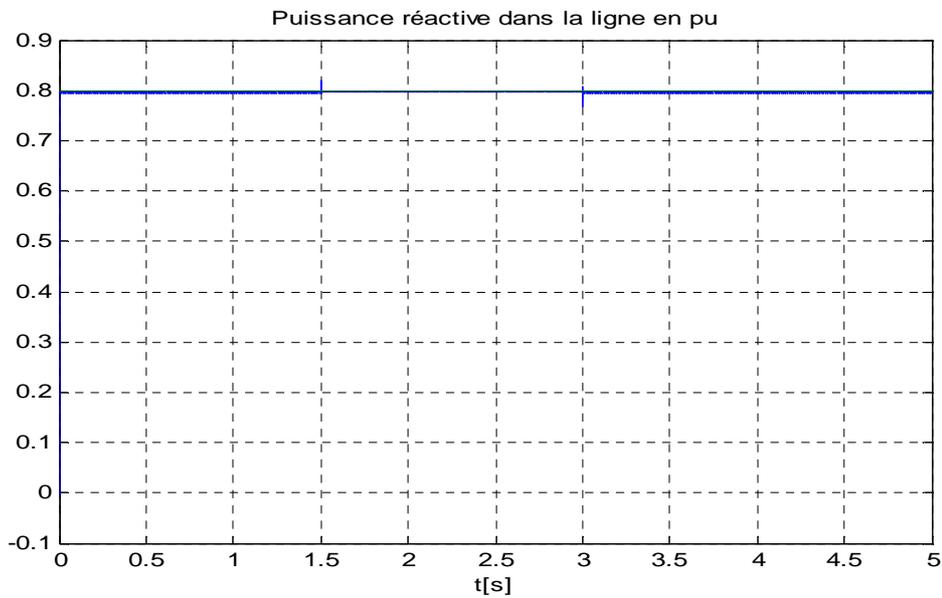
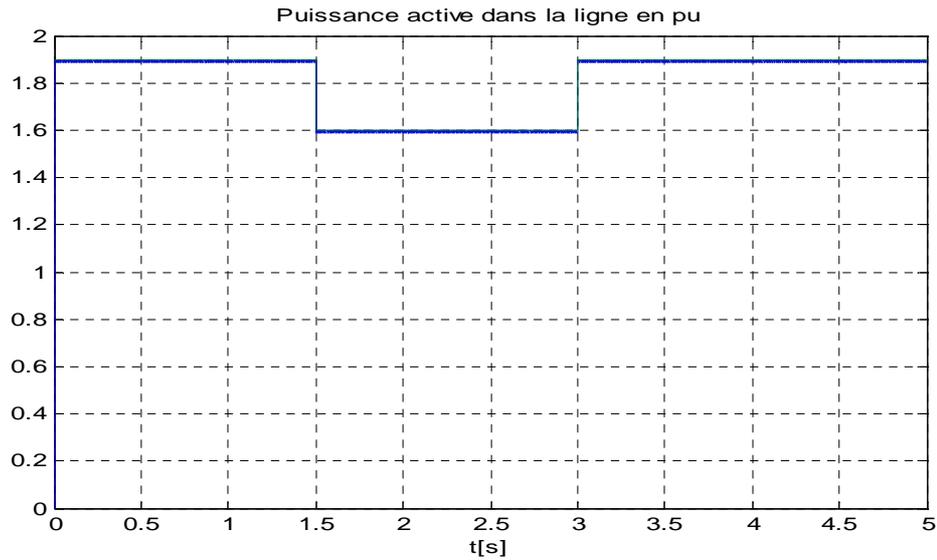
L'utilisation de la sigmoïde unipolaire, nécessite une normalisation des signaux  $u(t)$ ,  $y(t)$ ,  $\Delta u(t)$  et  $\Delta y(t)$ .

---

## Evaluation des performances

### Variation de la puissance active

A l'instant  $t=1.5s$  on diminue la puissance active qui passe de la valeur  $P=1.9pu$  à la valeur  $P=1.6pu$  pour reprendre sa valeur à  $t=3s$ . La puissance réactive est maintenue à la valeur  $Q=0.8pu$ .



## b) Variation de la puissance réactive

A l'instant  $t=1.5s$  on diminue la puissance réactive qui passe de la valeur  $Q=0.8pu$  à la valeur  $0.6pu$  pour reprendre sa valeur initiale à  $t=3s$ . La puissance active est maintenue à la valeur  $P=1.9pu$ .

Les figures IV.16 et IV.17 montrent que les consignes sont respectées.

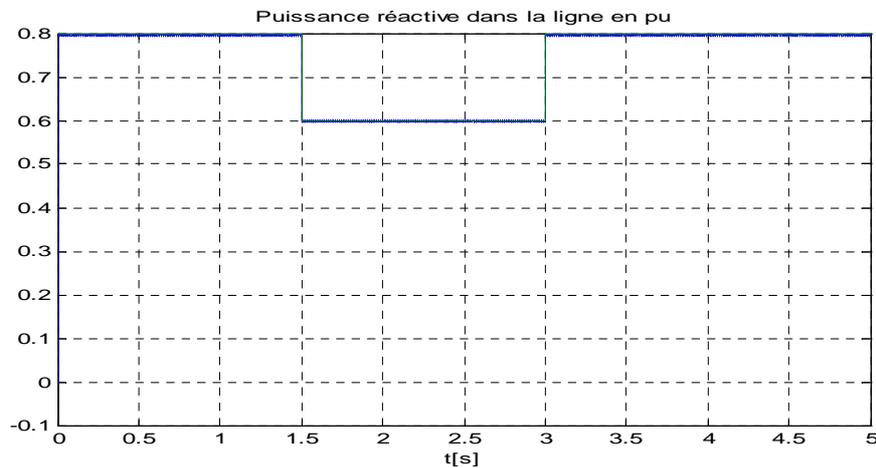


Figure IV.16 : Comportement de la puissance réactive à neuronal inverse

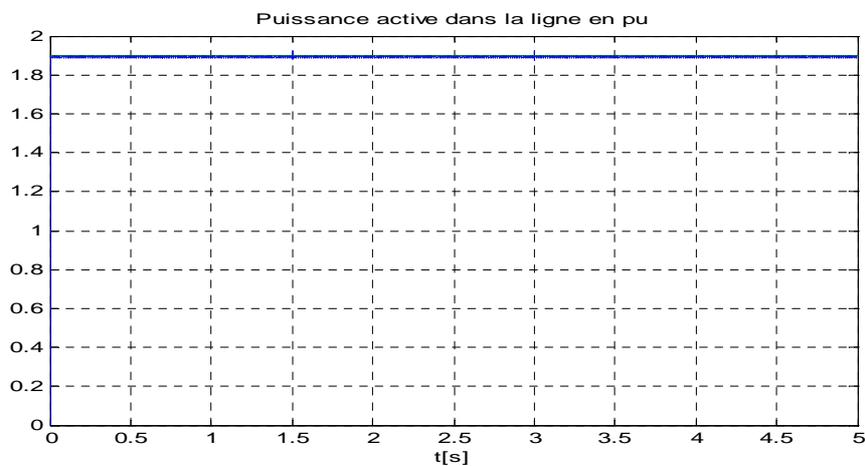
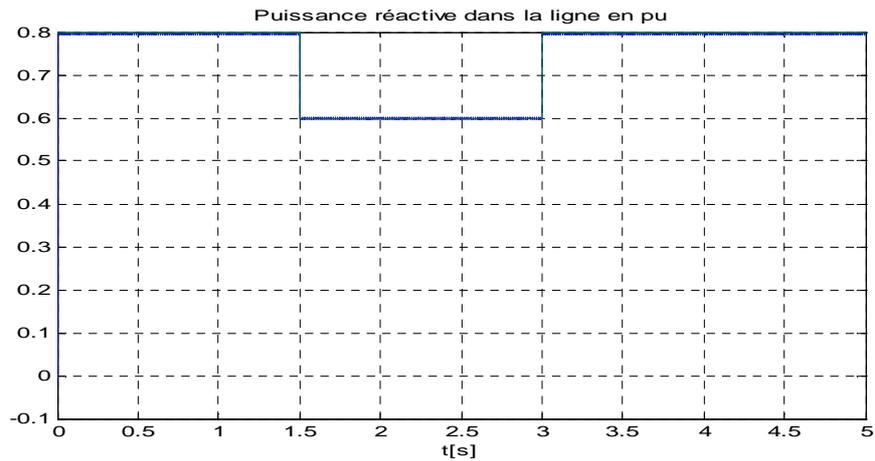


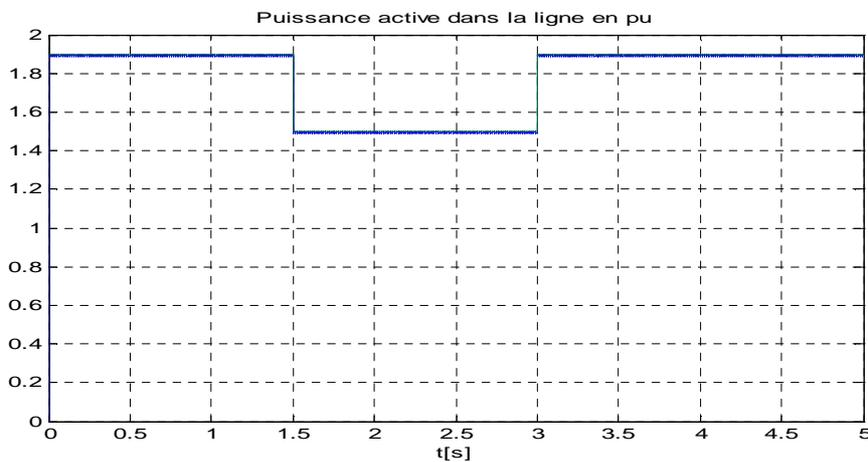
Figure IV.17 : Comportement de la puissance active à neuronal inverse

## c) Variation simultanée des puissances active et réactive

A l'instant  $t = 1.5s$  on diminue la puissance active qui passe de la valeur  $P=1.9pu$  à la valeur  $P=1.5pu$  pour qu'il puisse reprendre sa valeur initiale à  $t=3s$  et on augmente la puissance réactive qui passe de la valeur  $Q=0.8pu$  à la valeur  $Q=0.9pu$  pour qu'il puisse reprendre sa valeur initiale à  $t=3s$ . Les figures III.18 et III.19 montrent que les consignes sont respectées.



**Figure IV.18** : Comportement de la puissance réactive à neuronal inverse



**Figure IV.19** : Comportement de la puissance active à neuronal inverse

On peut bien remarquer d'après les figures précédentes que le régulateur à neuronal inverse donne une meilleure réponse transitoire par rapport au régulateur PI avec un temps de réponse inférieur et un dépassement très réduit et les allures présentent des oscillations avec des amplitudes très faibles comparativement à celles obtenues par le régulateur PI.

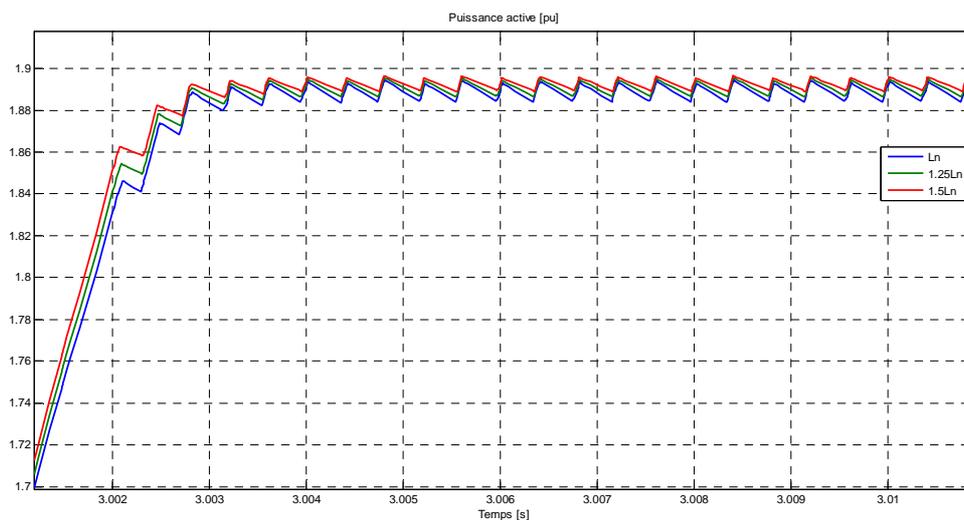
#### IV.14 Test de robustesse

Pour vérifier la robustesse du régulateur à neuronal inverse deux tests ont été effectués. Dans le premier nous avons augmenté l'inductance de la ligne de transmission de 25% de sa valeur nominale et dans le deuxième test nous l'avons augmenté de 50% en conservant les mêmes paramètres de contrôleur qui sont déjà calculés pour la valeur nominale de l'inductance.

On peut bien remarquer d'après les figures précédentes que le régulateur à neuronal inverse donne une meilleure réponse transitoire par rapport au régulateur PI avec un temps de réponse inférieur et un dépassement très réduit et les allures présentent des oscillations avec des amplitudes très faibles comparativement à celles obtenues par le régulateur PI.

### Test de robustesse

Pour vérifier la robustesse du régulateur à neuronal inverse deux tests ont été effectués. Dans le premier nous avons augmenté l'inductance de la ligne de transmission de 25% de sa valeur nominale et dans le deuxième test nous avons l'augmenté de 50% en conservant les mêmes paramètres de contrôleur qui sont déjà calculés pour la valeur nominale de l'inductance.



**Fig** Test de robustesse de régulateur à neuronal inverse

### IV.13 Conclusion

Grâce à l'apprentissage en ligne, les algorithmes d'identification et de réglage dans le cas de la commande par modèle inverse neuronal peuvent détecter toute perturbation extérieure au système et il arrive à maintenir les performances en présence de variation paramétrique telle que l'inductance de la ligne, de plus, le régulateur qui n'est autre que l'inverse du modèle est très facile à déterminer.



---

## CONCLUSION GENERALE

---

L'industrie de l'énergie électrique a subi des changements profonds, suite aux différents bouleversements politiques et économiques de plusieurs pays dans le monde. Ce nouvel environnement du marché de l'électricité, a mis en évidence une clientèle plus importante et plus exigeante vis-à-vis du fonctionnement des réseaux à travers la flexibilité de leur contrôle, la fiabilité et la qualité de l'énergie offerte sur le marché.

Ce mémoire présente et explique le contrôle de l'écoulement de puissance active dans une ligne de transport par un système FACTS, le dispositif choisi pour ce contrôle est le variateur de charge universel UPFC. Ce dispositif est capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive, il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance, à savoir, la tension, l'angle de transport et l'impédance de ligne, pour améliorer les performances du réseau électrique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par les étapes suivantes :

Dans la première étape nous avons présenté en bref un aperçu sur le fonctionnement des réseaux électriques, on a montré les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans une ligne de transport et la chute tension provoquée par le transit de puissance, on a analysé également l'écoulement de puissance dans cette étape, enfin nous avons présenté les différents moyens classiques de compensation.

La deuxième étape de notre travail a été consacrée à la description des différents systèmes permettant d'assurer le transport d'énergie électrique dans les meilleures conditions et qui sont rangés sous l'appellation systèmes FACTS. Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories : les compensateurs parallèles, les compensateurs séries et les compensateurs hybrides (parallèle-série).

Dans la troisième étape nous avons présenté la structure de base et le principe de fonctionnement de l'UPFC, nous avons développé son modèle mathématique quant il est raccordé au réseau électrique. Afin d'analyser l'influence de l'UPFC sur le réseau, nous avons démontré les relations entre les différentes variables du réseau en fonction des paramètres de contrôle de l'UPFC. Nous avons opté pour la commande MLI, car les puissances mises en jeu sont importantes, ce qui nécessite un contrôle de la fréquence des commutations [1]. Nous

avons choisi la méthode (Watt-var Découplé) pour l'identification des références de la partie parallèle et la partie série. Nous avons appliqué le régulateur PI avec compensation de pôles pour la commande des deux parties série et parallèle. Ainsi, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau étudié en grandeurs réduites. Afin de voir le comportement du dispositif UPFC connecté au réseau pour le contrôle de la puissance active nous avons fait des simulations .

Les résultats obtenus par les différentes simulations effectuées ont validé d'une manière générale les modèles des deux parties de l'UPFC ainsi que les calculs théoriques des coefficients des régulateurs utilisés.

Vue les variations spontanées dans les puissances générées par le réseau électrique, le régulateur par modèle inverse neuronal peut détecter toute perturbation extérieure au système. D'autre part, il arrive à maintenir de bonnes performances et une bonne stabilité en présence de variation paramétrique telle que l'inductance de la ligne comparativement aux régulateur PI, de plus, ce régulateur qui n'est autre que l'inverse du modèle est très facile à déterminer, ce qui a été étudié dans la dernière partie.

Enfin nous pouvons dire que les systèmes FACTS découlent d'un concept qui a tendance à élargir son champ d'intervention, il nous semble prioritaire de poursuivre une étude approfondie sur les thématiques suivants :

- Contrôle des réseaux de transport d'énergie électrique par le dispositif UPFC en appliquant une commande intelligente telle que la commande neuronale-floue à modèle inverse.
- L'application de ces commandes à un UPFC multiniveaux.
- Réalisation d'un prototype de laboratoire.

## *BIBLIOGRAPHIE*

---

[1] E. GH. Sahraki

"Apport de l'UPFC à l'Amélioration de La Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques",  
Thèse de Doctorat Université d'Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.

[2] M. Crappe

"Commande et regulation des réseaux électriques",  
Lavoisier 2003.

[3] J.M. Escane

" Réseaux d'énergie électrique – Modélisation : Lignes, Cables, Eyrolles",  
Paris 1997.

[4] P. Bornard, M. Pavard

"Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement"  
Technique de l'ingénieur D 4 090, pp 1-23.

[5] M. Erimia, J. Trecat, A. Germond

" Réseaux électriques –Aspects actuels "  
Editura Technica, Bucuresti 2000.

[6] K. Belacheheb

"Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport "  
Thèse de doctorat de l'université d'HENRI POINCARE NANCY I, 21 Juin 2001.

[7] N.G. Hingorani and L. Gyugyi

"Understanding FACTS"  
IEEE Press., New York ,2000

[8] A. Sonnenmoser and P.W. Lehn

"Line current balancing with a Unified Power Flow Controller"  
IEEE Trans. On Power Delivery , vol. 14, No. 3 , pp. 1151- 1157, July 1999.

[9] J.C. Passelergue

"Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques"  
Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.

[10] P. Petitclair

## *BIBLIOGRAPHIE*

---

“Modélisation et Commande de structures FACTS: Application au STATCOM”

Thèse de doctorat de l’INPG 16 Juillet 1997.

[11] H. CHAIB

“Apport du SMES comme stockage d’énergie aux performances de l’UPFC pour améliorer la stabilité d’un réseau électrique”

Thèse de Magister, université Ibn Khaldoun ,Tiaret 01/2012.

[12] T. Allaoui

"Réglage Robuste de l’UPFC pour Améliorer les Performances d’un Réseau Mono et Multi machines "

Thèse de doctorat, USTO Mohamed Boudiaf, Décembre 2007

[13] E.S. Gholipour

"Apport de l’UPFC à l’amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques"

Thèse de doctorat, faculté des sciences et techniques, université Henri Poincaré, Nancy, France, 2003

[14] N.G. Hingorani and L. Gyugyi

"Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”

IEEE Press, New York, 2000

[15] D.S.S.SABRY

"Renforcement de la stabilité transitoire par l’utilisation des FACTS (UPFC) "

Thèse de Magister, faculté des sciences et des sciences de l’ingénieur, université SKIKDA, 09/ 2005.

[16] G. Glanzmann

“FACTS Flexible Alternating Current Transmission Systems”

EEH-Power Systems Laboratory ETH Zurich 14. January 2005

[17] D. Louardi

" Contrôle de l’écoulement de puissance active par système FACTS"

Thèse de Magister Université de Batna, 25/06/ 2009.

[18] M.Thakur

“Unified Power Flow Controller (UPFC)”

Thesis Master of Science, University of Manitoba, Canada, February 2004.

[19] A. A.Eldamaty

“Damping interarea and torsional oscillations using facts devices”

A Thesis for the Degree of Doctor, in the Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, May 2005

[20] K.K.Sen and M.L.Sen

"Introduction to facts controllers"

A John Wiley & Sons, Inc., publication, Hoboken, New Jersey, 2009.

[21] K. Habur and D. O’Leary

"FACTS for Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy"

Power Transmission and Distribution Group (EV) of Siemens AG in Erlanger, Germany.

[22] E. Gholipour and S. Saadate

“Improving of Transient Stability of Power Systems Using UPFC”

IEEE transactions on power delivery, vol. 20, no. 2, April 2005.

[23] S. H. Hosseini, A. Ajami

“Modelling and Controlling of a New FACTS Device (C-UPFC) for Transmission Line Applications”

Electrical & Computer Engineering Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran.

[24] C.T Chang and Y.YHsu

“Design of UPFC controllers and supplementary damping controller for power transmission control and stability enhancement of a longitudinal power system”

IEE Proc online no. 200201Y9, IEE. 2U02.

[25] K. Sebaa

"Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique"

Thèse de Magister USTHB, Alger, 15 Septembre 2008.

## *BIBLIOGRAPHIE*

---

[26] O. Abdelhamid

"Évaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences"

Thèse de Magister USTHB, Alger, 2008.

[27] H. Alkhatib

"Étude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique "

Thèse de doctorat, université Paul cezanne d'Aix-Marseille (Aix-Marseille iii), 5 décembre 2008.

[28] M. Moudjahed

"Régimes transitoires des systèmes électro énergétique "

Cours polycopié, 5<sup>ème</sup> année Electrotechnique, université Ibn KHALDOUN, Tiaret ,2009/2010.

[29] P. M. Anderson and A. Fouad

"Power System Control and Stability"

Second Edition, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.2003.

[30] Nesmat ABU-TABAK

"Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation"

Thèse de doctorat, l'école centrale de LYON, 19 Novembre 2008

[31] E.S. Gholipour

"Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques"

Thèse de doctorat, faculté des sciences et techniques, université Henri Poincaré, Nancy, France, 2003.

[32] M.Boudiaf

"Contribution de l'UPFC à la stabilisation d'un réseau électrique mono machine 400 kV perturbé"

Thèse de Magister, faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, université Ibn Khaldoun Tiaret, 2007.

[33] K. R. Padiyar

"Power System Dynamics Stability and control"

Second Edition: Indian Institute of Science, Bangalore, 2008

[34] N. G. Hingorani

"Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems"

Proceedings of the IEEE, April 1988.

[35] N. G. Hingorani

"FACTS : Flexible AC Transmission Systems"

EPRI Conference on Flexible AC Transmission System, Cincinnati, OH, November 1990.

[36] N. G. Hingorani

"FACTS - Flexible AC Transmission System"

Proceedings of the Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, London, IEE Publication No. 345, pp. 1-7, September 1991.

[37] N. G. Hingorani

"Flexible AC Transmission"

IEEE Spectrum, vol. 30, no. 4, April 1993.

[38] O. Abdelhamid

"Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences "

Thèse de Magister, USTHB - 2008

[39] O. GUENOUNOU

"Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé"

Thèse de doctorat de l'université de Toulouse 22 avril 2009.

[40] A. EI KEBIR

"Modélisation et commande par modèle inverse neuronal d'un four ventile"

Thèse de magistère de l'université de ENSET –Oran 2009.

[41] P. WIRA

"Approches neuromimétiques pour l'identification et la commande"

Rapport d'Habilitation université de HAUTE ALSACE 27 novembre 2009

# TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : *Fonctionnement des réseaux d'énergie électrique*

I 1 Introduction.....	3
I 1 1 Historique.....	3
I 1 2 Architecture des réseaux électriques.....	3
I 2 Problématique du fonctionnement des réseaux.....	4
I 3 Acheminement de la puissance.....	5
I 4 Puissance transmissible dans une ligne.....	6
I 5 Chute de tension dans une ligne.....	7
I 6 Ecoulement des puissances.....	8
I 6 1 But de l'étude de la répartition de charge.....	8
I 6 2 Modélisation des composants du réseau.....	8
I 6 3 Calcul de flux de puissance.....	9
I 7 Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension.....	11
I 7 1 Condensateurs et inductances fixes.....	11
I 7 2 Groupes de production et compensateurs synchrones.....	12
I 7 3 Compensateurs statiques.....	13
I 7 4 Transformateurs avec prises réglables en charge.....	13
I 8 Conclusion.....	13

## Chapitre II : *Etat de l'art*

II.1 Introduction.....	14
II.2 Compensateurs parallèles.....	14
II.2.1 Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	14

II.2.1.1 TCR (Thyristor Controlled Reactor) .....	15
II.2.1.2 TSC (Thyristor Switched Capacitor).....	15
II.2.1.3 SVC (Static Var Compensator) .....	15
II.2.1.4 TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor) .....	16
II.2.2 Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors .....	16
II.3 Compensateurs séries .....	18
II.3.1 Compensateurs séries à base de thyristor .....	18
II.3.1.1 TCSC ( <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i> ).....	18
II.3.1.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor).....	19
II.3.1.3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) .....	19
II.3.1.4. TSSR (Thyristor Switched Series Reactor).....	20
II-3-2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors.....	20
II.3.2.1. SSSC (Static Synchronous Series Compensator) .....	20
II.4 Compensateurs hybrides série – parallèle .....	22
II.4.1 Compensateurs hybrides à base de thyristors .....	22
II.4.1.1 TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator).....	22
II.4.2 Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors.....	23
II.4.2.1.IPFC (Interline Power Flow Controller).....	23
II.4.2.UPFC .....	24
II.4 Conclusion .....	26

## Chapitre III : Modélisation et commande de l'UPFC

III.1 Introduction .....	27
III.2 Structure de base d'un UPFC connecté à un réseau électrique triphasé .....	27
III.2.1 Principe de fonctionnement de l'UPFC .....	28
III.3 Modélisation de l'UPFC.....	29
III.3.1 Caractéristiques de l'UPFC .....	29

III.3.2 Modélisation de la partie shunt de l'UPFC .....	30
III.3.3 Modélisation de la partie série de l'UPFC .....	33
III.4 Contrôle de l'UPFC.....	36
III.4.1 Partie shunt .....	36
III.4.1.1 Identification des références.....	36
III.4.1.2 Régulation de la tension continue .....	40
III.4.1.3 Commande du convertisseur .....	41
III.4.2 Partie série .....	43
III.4.2.1 Identification des références.....	43
III.4.2.2 Commande du convertisseur .....	46
III.5 Examen de la commande de l'UPFC dans un réseau électrique .....	47
III.5.1 Variation de la puissance active .....	48
III.5.2 Variation de la puissance réactive .....	50
III.5.3 Variation simultanée des puissances active et réactive .....	52
III.6 Conclusion.....	55

## Chapitre IV : Réseaux de neurones artificiels

IV.1 Introduction.....	56
IV.2 Historique.....	56
IV.3 Structure du neurone .....	58
IV.4 Le Neurone Formel (Artificiel).....	59
IV.5 Types des réseaux de neurones artificiels .....	61
IV.5.1 Perceptron .....	61
IV.5.2 Perceptron multicouches .....	61
IV.5.3 Réseau de neurones linéaire .....	62
IV.6 Fonctions d'activation des réseaux de neurones artificiels.....	62
IV.6.1 Fonction binaire à seuil .....	62
IV.6.2 Fonction à rampe avec saturation.....	62

IV.6.3 Fonction sigmoïde.....	63
IV.7 Apprentissage des réseaux de neurones .....	63
IV.7 .1 Algorithme d'apprentissage.....	64
IV.8 Rétro-propagation du gradient .....	64
IV.9 les méthodes de Commande.....	65
IV.9.1 Inverse par apprentissage local .....	65
IV.9.2 Inverse par apprentissage global .....	65
IV.9.3 Apprentissage des réseaux de neurones récurrents .....	65
IV.9.4 Méthode parallèle.....	65
IV.9.5 Méthode série-parallèle.....	66
IV.9.6 Momentum .....	67
IV.10 Commande et identification par réseaux de neurones .....	68
IV.10.1 Identification par modèle direct .....	68
IV.10.2 Identification du modèle inverse.....	69
IV.11 Synthèse d'une commande neuronale par inversion du modèle du processus .....	69
IV.12 Principe de la commande par le modèle inverse neuronal.....	71
IV.13 Evaluation des performances .....	72
IV.14 Test de robustesse .....	74
IV.15 Conclusion.....	75
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>76</b>

## ***BIBLIOGRAPHIE***