

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

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'Automatique

**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **Commande Des Systèmes**

Présenté par
**Kahina BOUNIF
Fetima CHOUGAR**

Mémoire dirigé par Amar HAMACHE

Thème

**Modélisation et Commande Multivariable
d'un UPFC Equipant une ligne THT**

Mémoire soutenu publiquement le 25 juin 2014 devant le jury composé de :

M Amar SI AMMOUR
MCB, UMMTO, Président

M Amar HAMACHE
MAA, UMMTO, Rapporteur

M Boualam SALHI
MAA, UMMTO, Examineur

M Mohammed Achour TOUAT
MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous remercions d'abord DIEU le tout puissant pour la santé, le courage et la foi qu'il nous a donné pour arriver à ce jour.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements pour notre encadreur : Mr Amar HAMACHE pour sa sympathie, ces précieux conseils, son aide, son dévouement pour le travail et surtout pour sa disponibilité et sa patience tout au long de notre travail.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à nos chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien durant toutes ces années d'études.

Dédicaces

Aux êtres les plus chers dans ma vie

<<MES PARENTS>>

Que DIEU leurs donne longue vie et bonne santé.

A mes deux sœurs, Sadjja et Hadjira.

A mon frère Mourad et sa famille.

A mon neveu adoré <<Yasten>>.

A ma binôme Fetima et toute sa famille.

A tous mes amis (es) et camarades.

Kahina

Dédicaces

Aux êtres les plus chers dans ma vie

<<MES PARENTS>>

Que DIEU leurs donne longue vie et bonne santé.

A mes frères et sœurs et leurs familles.

A mon mari et sa famille.

*A mes nièces et neveux adorés <<Aiemane, Celia, Amina, Smail,
Samy>>.*

A ma binôme Kahina et toute sa famille.

A tous mes amis (es) et camarades.

Fetima

Table des figures

Figure 1.1. Structure générale d'un réseau électrique.

Figure 2.1. Schéma du circuit de base de l'UPFC.

Figure 2.2. Circuit unifilaire équivalent de l'UPFC.

Figure 2.3. Répartition des puissances actives au niveau du bus continu.

Figure 2.4. Schéma bloc du bus continu.

Figure 2.5. Circuit du nœud de connexion shunt.

Figure 2.6. Schéma bloc du nœud de connexion shunt.

Figure 3.1: Structure de commande globale de l'UPFC.

Figure 3.2. Structure par retour d'état avec intégrateur.

Figure.3.3. Résultats de simulation du système en situation normale dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur.

Figure.3.4. Résultats de simulation du système en situation perturbée (18% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur.

Figure.3.5. Résultats de simulation du système en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur.

Figure.3.6. Résultats de simulation du système en situation normale dans le cas de la commande par modes glissants.

Figure.3.7. Résultats de simulation du système en situation perturbée (25% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par les modes glissants.

Figure.3.8. Résultats de simulation du système en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par les modes glissants

Tableau

Tableau 1.1. Solutions conventionnelles de réglage des réseaux électriques

Tableau .3.1. Indices de performance en situation normal dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur (p.u)

Tableau .3.2. Indices de performance en situation perturbée (18% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur (p.u)

Tableau .3.3. Indices de performance en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur (p.u)

Tableau .3.4. Indices de performance en situation normale dans le cas de la commande par modes glissants (p.u)

Tableau .3.5. Indices de performance en situation perturbée (25% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par les modes glissants (p.u)

Tableau .3.6. Indices de performance en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par les modes glissants (p.u)

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : de problème, solutions classiques et modernes.	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Structure d'un réseau électrique.....	3
1.3. Grandeurs électriques	5
1.3.1. Tension.....	5
1.3.2. Fréquence	5
1.3.3. Le courant	6
1.4. Solutions conventionnelles	6
1.5. Solutions modernes à bases de FACTS	7
1.5.1. Classification des FACTS.....	7
1.5.1.1. FACTS parallèles	7
1.5.1.2. FACTS série	7
1.5.1.3. FACTS hybrides	7
1.6. Dispositif UPFC	7
1.7. Conclusion	8
Chapitre 2: Modélisation de l'UPFC	
2.1. Introduction.....	10
2.2. Circuit de base d'un UPFC	10
2.3. Modèle en courant triphasé de l'UPFC	11
2.4. Modèle de l'UPFC dans le repère synchrone.....	15
2.5. Modèle de la liaison à courant continu	16
2.6. Modèle de la tension au nœud de connexion shunt.....	17
2.7. Conclusion	19
Chapitre 3: Commande de l'UPFC	
3.1. Introduction.....	20
3.2. Cahier des charges	20
3.3. Schéma de commande	21
3.4. Commande du sous-système externe.....	22
3.4.1. Synthèse de commande de la partie continue	22
3.4.2. Synthèse de commande de la branche shunt	23
3.5. Commande du sous-système interne	24
3.5.1. Commande par retour d'état avec intégrateur.....	24
3.5.1.1. Schéma de commande.....	25

Sommaire

3.5.1.2. Synthèse de la commande	27
3.5.1.3. Simulations.....	27
3.5.1.3.1. Cas sans perturbation	28
3.5.1.3.2. Cas avec perturbation paramétrique	31
3.5.1.3.3. Cas avec perturbation externe	35
3.5.1.4. Interprétation des résultats	37
3.5.2. Commande par modes glissants	38
3.5.2.1. Synthèse robuste.....	39
3.5.2.2. Simulations.....	40
3.5.2.2.1. Cas sans perturbation	40
3.5.2.2.2. Cas avec perturbation paramétrique	44
3.5.2.2.3. Cas avec perturbation externe	46
3.5.2.3. Interprétation des résultats	49
3.6. Conclusion	50
Conclusion générale	51

Annexe

L'évolution sans cesse de la consommation de l'énergie électrique force aujourd'hui tous les pays du monde à coopérer et interconnecter leurs réseaux locaux afin d'avoir un réseau international très puissant. Tous les groupes contribueraient à la stabilisation du réseau et au rejet des perturbations de différentes natures qui pourraient attaquer le réseau à n'importe quel moment. Les interconnexions entre pays ou groupes de pays doivent être capables de réaliser un transport d'énergie bidirectionnel très efficace et très rentable satisfaisant par là les échanges contractuels et la continuité de service.

Les contraintes économiques et environnementales obligent les exploitants de réseaux de minimiser le nombre d'ouvrages vu les difficultés de construire de nouveaux ouvrages et le manque de couloirs de servitude. De plus, les contraintes physiques limitent la capacité de transport des liaisons électriques loin des limites thermiques des liaisons [1]. Cela rend nécessaire l'insertion de dispositifs auxiliaires pour la commande des interconnexions électriques. En effet, selon la longueur et la capacité de transport souhaitée, l'interconnexion électrique est souvent équipée de moyens de compensation et de régulation.

Cependant, la majorité des systèmes de commande les plus utilisés restent conventionnels dans le sens où il y a beaucoup de compensateurs shunts et de transformateurs ou autotransformateurs dotés de régulateurs en charge. Cela fait qu'actuellement et depuis les années quatre-vingt-dix du siècle dernier, beaucoup de recherches sont lancées afin de, d'une part, améliorer le rendement de ces systèmes de commande et d'autre part, développer des dispositifs de commande modernes à l'instar des FACTS acronyme de *Flexible Alternative Current Transmission Systems*.

Les FACTS sont des dispositifs de commande des réseaux électriques utilisant les principes de l'électronique de puissance. En agissant sur les paramètres de la ligne de transport selon que le FACTS est série, shunt ou hybride, il permet d'augmenter sa capacité de transport et d'améliorer son niveau de tension.

Parmi les dispositifs FACTS les plus universels (qui réalisent beaucoup de fonctions) il y a l'UPFC acronyme de *Unified Power Flow Controller* qui est capable de jouer sur les trois paramètres de base qui déterminent le transit de puissance dans une ligne électrique.

Dans le présent projet de fin d'études, nous allons faire l'étude complète de ce dispositif FACTS afin de montrer ses capacités de commande incontestables. Le mémoire s'articule autour de trois chapitres à savoir :

Le premier chapitre présentera quelques généralités sur les réseaux électriques et leurs fonctionnements ainsi que les différents incidents et contingences les plus rencontrés dans le domaine du transport d'énergie électrique. Quelques solutions conventionnelles seront données.

Le chapitre deux exposera, d'une manière très explicite, la modélisation mathématiques du dispositif UPFC en vue de commander et simuler son fonctionnement.

Le dernier chapitre sera consacré à la synthèse de deux lois de commande pour piloter l'UPFC dans la réalisation du cahier des charges.

Enfin, le mémoire sera achevé par une conclusion générale suivie de quelques perspectives.

1.1. Introduction :

Le présent chapitre présente quelques notions de base relatives aux : réseaux électriques et leurs fonctionnements, incidents les plus connus, solutions conventionnelles et modernes. Pour ce qui du dernier point, c'est le dispositif UPFC qui sera adopté comme solution moderne. C'est une variante de FACTS inventée par Laszlo Gyugyi [2, 3] qui consiste en une source de tension et une source de courant connectées entre elles par l'intermédiaire d'un bus à courant continu (DC Link).

1.2. Structure d'un réseau électrique :

La figure 1.1 représente la structure générale d'un réseau électrique maillé avec les différents niveaux de tension (cas du réseau algérien) [4].

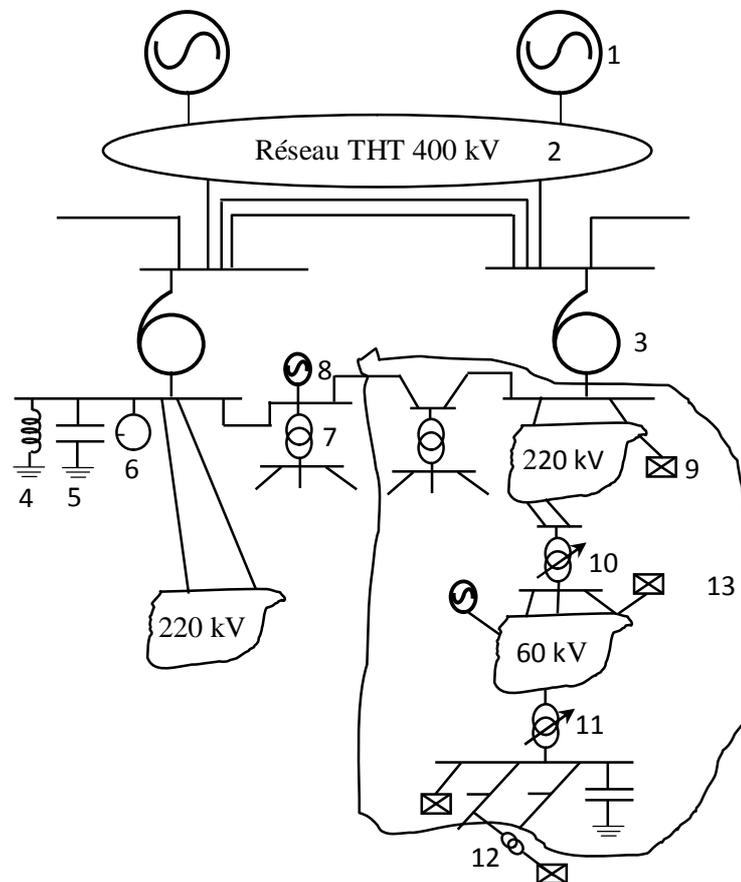


Figure 1.1. Structure générale d'un réseau électrique.

Un réseau électrique peut être défini comme l'ensemble des équipements utilisés pour le transport de l'électricité entre les sources de production et les lieux de consommation tels que

les charges industrielles et les charges domestiques. Le transport utilise une tension alternative triphasée suivant une fréquence de 60 Hz (Amérique du Nord) ou 50 Hz (Europe et reste du monde), ou d'autres pour des réseaux spécifiques. Les méthodes de production reprennent les centrales thermiques (pétrole, gaz, charbon, ...), nucléaires, éoliennes, énergie solaire et panneau photovoltaïques ou barrages hydroélectriques ou centrales marémotrices (se servant de la force des marées), plus quelques petites productions marginales comme la bioélectricité.

La figure 1.1 montre les principaux composants du réseau électrique à savoir :

- 1- **Le groupe** : il produit de la puissance active et fournit ou absorbe de la puissance réactive. Les plus puissants sont raccordés au réseau THT (400 kV) et fixent le cadre global de la tension.
- 2- **Le réseau 400 kV** : c'est un réseau suffisamment maillé pour permettre d'acheminer la puissance réactive à des distances relativement lointaines.
- 3- **L'autotransformateur** : il assure le passage du niveau de tension 400 kV vers le niveau 220 kV. Il est doté de prises réglables qui permettent dans une certaine marge, de modifier la tension aval.
- 4- **La réactance inductive shunt**: elle absorbe de la puissance réactive.
- 5- **La réactance capacitive shunt**: elle fournit de la puissance réactive.
- 6- **Le compensateur synchrone** : permet de faire l'un ou l'autre.
- 7- **Le transformateur THT/HT** : il assure le passage du niveau de tension 220 kV vers le niveau 60 kV (HT).
- 8- **Le groupe de production décentralisée** : il produit une puissance relativement faible souvent à base d'énergie renouvelable (hydraulique, éolienne, photovoltaïque, ...).
- 9- **La charge** : représente les différents consommateurs du produit électricité qui peuvent être industriels, domestiques ou autres
- 10- **Le régleur en charge** : cherche à maintenir une tension avale constante en jouant sur la position des plots dont il est doté.

11- Le transformateur HT/MT : il assure le passage du niveau de tension 60 kV vers la moyenne tension (MT) 30 kV ou 10 kV selon qu'on est en zone rurale ou en ville.

12- Le transformateur MT/BT : il assure le passage du niveau de tension MT vers la basse tension (BT) 380 V.

13- Le réseau de répartition et de distribution : il assure la répartition de l'énergie par zone et la distribution pour alimenter les clients quelque soit leur nature, industrielle ou domestique.

1.3. Grandeurs électriques :

Le réseau électrique nécessite une constante surveillance de certains paramètres afin de maintenir un bon fonctionnement de celui-ci, ainsi que les installations de production et de consommation qui y sont raccordées, dans le domaine d'utilisation prévu. Les principales grandeurs à surveiller sont : la tension, la fréquence et le courant.

1.3.1. Tension :

La qualité de l'énergie fournie à un client dépend fortement de la tension d'alimentation. Celle-ci possède trois paramètres dont : la fréquence, l'amplitude et la forme d'onde. Le gestionnaire du réseau doit veiller à ce que ces paramètres restent proches de leurs valeurs nominales. La tension fluctue en permanence et dépend fortement de la puissance réactive transportée. Cette dernière engendre des chutes de tension ou des surtensions nuisibles.

1.3.2. Fréquence :

De même que la tension, la fréquence est un paramètre très sensible. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour des réseaux autonomes.

1.3.2. Le courant :

Le courant est l'image directe de la puissance. Il est donc dicté par la charge ou l'ensemble des charges connectées au réseau. Toutefois s'il atteint des valeurs excessivement élevées (limites thermiques), comme dans le cas d'un défaut triphasé, le réseau courra un risque d'instabilité et d'effondrement en cascade de tous les ouvrages.

1.4. Solutions conventionnelles :

Le tableau 1.1 résume les différentes techniques conventionnelles utilisées pour le réglage des réseaux électriques [2] :

Le tableau 1.1. Solutions conventionnelles de réglage des réseaux électriques

Solution	Apport	Insuffisances
Compensation capacitive	Compensation des chutes de tension, réduction des pertes	Coût élevé, réponse lente
Compensation inductive	Compensation des surtensions	Coût élevé, réponse lente, pertes élevées
Compensation synchrone	Compensation bidirectionnelle et relativement rapide	Coût très élevé, pollution
Régleur en charge	Maintien de la tension	Réponse lente
Délestage	Maintien de la fréquence, préservation de la stabilité transitoire	Réponse lente, coût élevé
Ilotage	Maintien de la fréquence, préservation de la stabilité transitoire	Réponse très lente
Renforcement d'ouvrage	Maintien de la tension, préservation de la stabilité transitoire	Coût très élevé, réponse très lente, encombrement

1.5. Solutions modernes à bases de FACTS :

La majorité des solutions conventionnelles sus citées souffrent de la lenteur de réponse et des coûts élevés. D'emblé les FACTS, de par leurs réponses très rapides (moins de 100 ms) permettent de contourner la première contrainte. De plus, à long terme, elle est plus économique que de construire de nouveaux ouvrages [1, 2].

1.5.1. Classification des FACTS :

Trois catégories se distinguent selon le mode de connexion au réseau [2, 5]:

1.5.1.1. FACTS parallèles :

Ils sont insérés en shunt et permettent ainsi d'injecter un courant dans le réseau au point de raccordement. La variation du courant injecté permet de modifier le flux de puissance transporté et la tension au point de raccordement. Les principaux FACTS shunt sont : le SVC (*Static Var Compensator*) et le STATCOM (*Static Compensator*) [2].

1.5.1.2. FACTS série :

Ils insèrent en série dans la liaison une impédance ou une source de tension variable. Leur principe d'action se réduit toujours à l'injection d'une tension en série dans la liaison. De tels systèmes sont, du point de vue fonctionnel, modélisé par une source de tension variable. Les principaux FACTS série sont : le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) et le SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) [2].

1.5.1.3. FACTS hybrides :

Ils allient les avantages des dispositifs séries et parallèles commandés d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multivariables en agissant sur le flux de puissance, la tension et l'angle de transport. Les FACTS hybrides les plus connus sont l'UPFC (*Unified Power Flow Controller*) et l'IPFC (*Interline Power Flow Controller*) [2].

1.6. Dispositif UPFC:

L'UPFC était censé être l'ultime solution FACTS, car il possède trois degrés de liberté ; un degré pour la puissance active à travers une liaison radiale et deux degrés pour les

puissances réactives des deux côtés de la ligne. Ce n'est pas seulement l'originalité du concept UPFC qui a beaucoup intéressé les chercheurs, mais il y a aussi l'intérêt de l'utilisation en industrie ; un UPFC de 160 MVA a été déjà mis en service à Inez dans la région centrale sud du système électrique américain AEP [2, 3, 5].

Il s'agit du système le plus sophistiqué des FACTS, proposé par Laszlo Gyugyi [2]. Comme le montre la figure 1.2, il est constitué de deux sources synchrones couplées au réseau par des transformateurs, l'un placé en parallèle et l'autre en série, obtenues par des convertisseurs ayant en commun une capacité de stockage [2, 3].

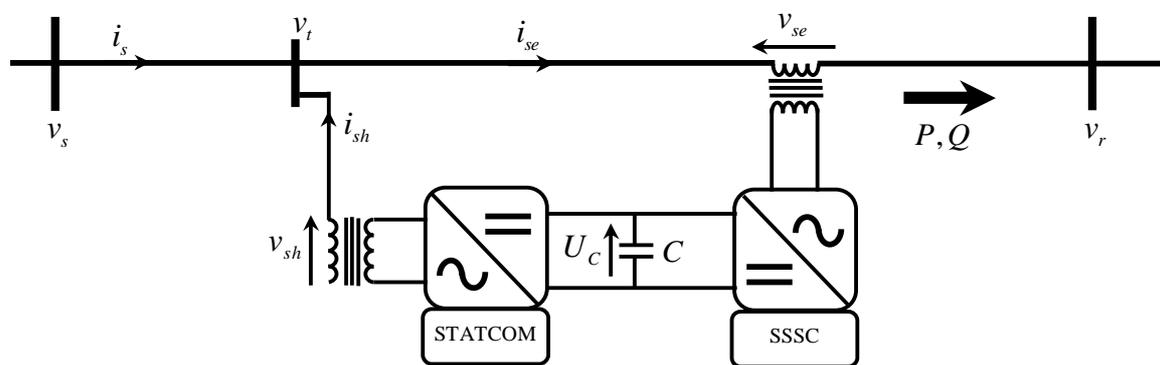


Figure 1.2. Circuit unipolaire de base d'un UPFC équipant une interconnexion électrique.

L'intérêt principal de ce FACTS est de pouvoir contrôler l'amplitude de la tension à son point de connexion et les flux de puissances active et réactive de la ligne de transport à laquelle il est raccordé [3, 6].

Le convertisseur AC-DC est utilisé pour fournir la puissance active nécessaire au deuxième convertisseur DC-AC. Il réalise aussi la fonction de compensation de la puissance réactive, et de ce fait, il joue sur la tension au point de raccordement indépendamment de la puissance active du réseau. Le convertisseur DC-AC injecte une tension V_{se} qui réalise la compensation série et le contrôle du flux de puissance active et réactive [2, 3].

1.7. Conclusion :

Dans le présent chapitre, la notion de réseau électrique a été exposée puis suivi de sa composition, le rôle assuré par chaque composant dans la chaîne de transport du produit électrique et les grandeurs de base régissant son fonctionnement. Les différents incidents et

contraintes techniques et économiques ainsi que les solutions conventionnelles ont été classifiés et analysés.

Comme solutions modernes, les FACTS ont été présentés et classifiés. Grâce à l'utilisation de l'électronique de puissance, ceux-ci répondent efficacement et très rapidement.

L'UPFC, qui fait l'objet de la présente étude, a été brièvement présenté avant qu'il ne soit modélisé en vue de sa commande, dans le prochain chapitre.

2.1. Introduction :

Grâce à sa structure et son système de commande, l'UPFC est considéré comme le dispositif FACTS le plus puissant. Cependant, sa commande exige un modèle très précis qui décrive sa dynamique d'une manière fidèle. Dans le présent chapitre, le modèle mathématique de l'UPFC sera établi dans l'espace d'état en vue d'utiliser des techniques de commande par retour d'état et de l'utiliser en simulation, en absence du système réel.

2.2. Circuit de base d'un UPFC :

Le dispositif UPFC est un FACTS hybride constitué de deux sources de tension concrétisées par deux convertisseurs, alternatif-continu et continu-alternatif, réversibles en courant couplés par un circuit à courant continu ayant un condensateur de stockage tel que montre la figure 2.1. Cette structure proposée initialement par Lazlo et Hingorani [2] permet d'exploiter les trois degrés de liberté qui déterminent la puissance transitée dans une liaison électrique à savoir les tensions des nœuds émetteur et récepteur, en modules et phases, ainsi que l'impédance de la ligne (voir annexe).

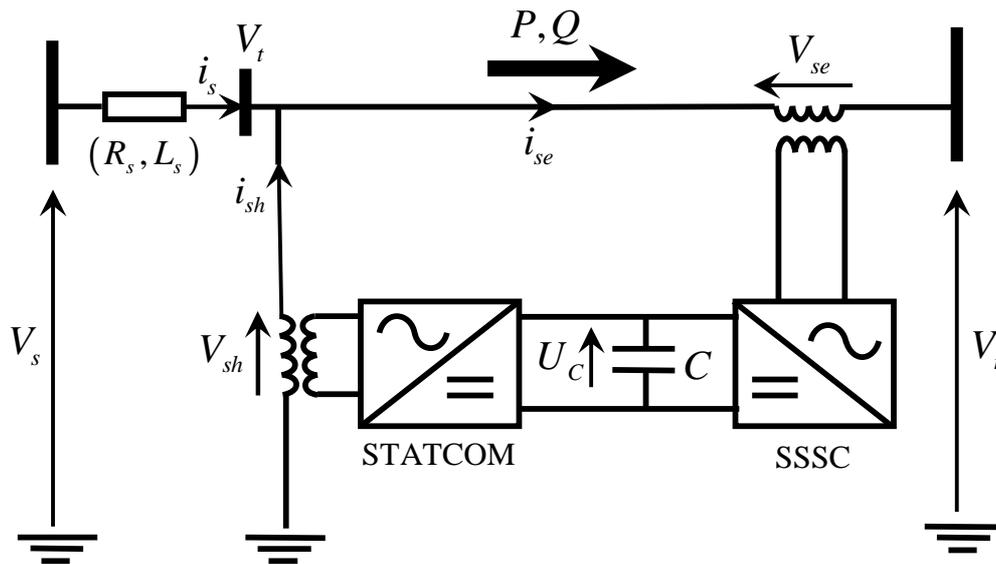


Figure 2.1. Schéma du circuit de base de l'UPFC.

2.3. Modèle en courant triphasé de l'UPFC :

Il s'agit du sous-système des courants qui est hiérarchiquement inférieur [6]. Il est constitué de la ligne de transport, du STATCOM et du SSSC. Le circuit équivalent de ce sous-système est donné à la figure 2.2.

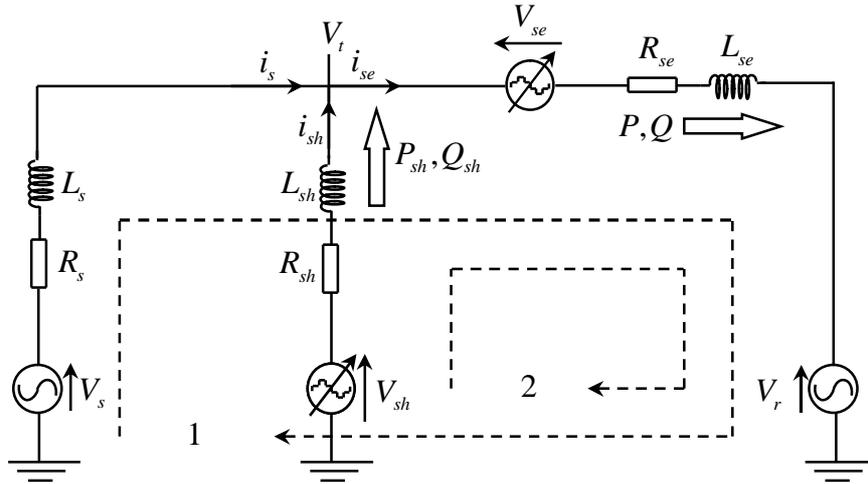


Figure 2.2. Circuit unifilaire équivalent de l'UPFC.

Le tableau ci-dessous donne la signification des grandeurs représentées sur le schéma de la figure 2.2. :

V_s	Tension de la ligne amont
V_r	Tension de la ligne aval
V_{sh}	Tension générée par le convertisseur shunt (STATCOM)
i_{sh}	Courant dans la branche shunt
V_{se}	Tension injectée dans la ligne par le convertisseur série (SSSC)
i_{se}	Courant dans la ligne (branche série)
R_s et L_s	Impédance de la ligne amont

R_{sh} et L_{sh}	Impédance de fuite, ramenée au secondaire, du transformateur shunt
R_{se} et L_{se}	Impédance de la ligne aval augmentée des pertes du transformateur série
P et Q	Puissances active et réactive transitant dans la ligne
P_{sh} et Q_{sh}	Puissances active et réactive transitant dans la branche shunt

L'application de la loi de Kirchoff en courant alternatif, au circuit de la figure 2.2., conduit aux équations suivantes :

$$i_s = i_{se} - i_{sh} \quad (1)$$

La maille (1) conduit à :

$$V_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} + R_{sh} i_{sh} + L_{sh} \frac{di_{sh}}{dt} - V_{sh} = 0 \quad (2)$$

La maille (2) conduit à :

$$V_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} + R_{se} i_{se} + L_{se} \frac{di_{se}}{dt} - V_r = 0 \quad (3)$$

En remplaçant (1) dans (2) et (3), il résulte :

$$\begin{cases} -L_s \frac{di_{se}}{dt} + (L_s + L_{sh}) \frac{di_{sh}}{dt} = R_s i_{se} - (R_s + R_{sh}) i_{sh} + V_{sh} - V_s = 0 \\ -(L_s + L_{se}) \frac{di_{se}}{dt} + L_s \frac{di_{sh}}{dt} = (R_s + R_{se}) i_{se} - R_s i_{sh} + V_{se} - V_s + V_r = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Le système différentiel (4) s'écrit sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{pmatrix} -L_s & L_s + L_{sh} \\ -(L_s + L_{se}) & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_{se}}{dt} \\ \frac{di_{sh}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & -(R_s + R_{sh}) \\ R_s + R_{se} & -R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{se} \\ i_{sh} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{se} \\ V_{sh} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -V_s \\ -V_s + V_r \end{pmatrix} \quad (5)$$

Si les notations suivantes sont adoptées :

$$a_{11} = -(L_s R_{se} + L_{sh} R_s + L_{sh} R_{se}) ;$$

$$a_{12} = R_s L_{sh} - L_s R_{sh} ;$$

$$a_{21} = R_s L_{se} - L_s R_{se} ;$$

$$a_{22} = -(L_s R_{sh} + L_{sh} R_s + L_{sh} R_{sh}) ;$$

$$b = L_s ;$$

$$c = L_{sh} ;$$

$$d = L_{se} ;$$

$$g = \det(L) = L_s L_{sh} + L_s L_{se} + L_{se} L_{sh} .$$

Alors, la résolution du système (5) par rapport à $\frac{di_{se}}{dt}$ et $\frac{di_{sh}}{dt}$ permet d'écrire :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{se} \\ i_{sh} \end{pmatrix} = \frac{1}{g} \left(\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{se} \\ i_{sh} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(b+d) & b \\ -b & b+d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{se} \\ V_{sh} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} cV_s - (b+d)V_r \\ -cV_s - bV_r \end{pmatrix} \right) \quad (6)$$

Il est à noter que l'équation (6) est relative à une phase, il appartient de considérer la même équation relativement aux deux autres phases.

Sous forme compacte et en considérant les trois phases, (6) se réécrit comme suit :

$$\dot{\bar{X}} = \bar{A} \bar{X} + \bar{B} \bar{U} + \bar{W} \quad (7)$$

Où :

\bar{X} représente le vecteur d'état regroupant les courants série et shunt donné par :

$$\bar{X} = [i_{sea} \quad i_{seb} \quad i_{sec} \quad i_{sha} \quad i_{shb} \quad i_{shc}]^T ,$$

\bar{A} est la matrice d'état du système, déterminée par :

$$\bar{A} = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{12} & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & 0 & 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{11} & 0 & 0 & a_{12} \\ a_{21} & 0 & 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & 0 & 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & a_{22} \end{bmatrix},$$

\bar{B} est la matrice de commande, donnée par :

$$\bar{B} = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} -(b+c) & 0 & 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & -(b+c) & 0 & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & -(b+c) & 0 & 0 & b \\ -b & 0 & 0 & b+d & 0 & 0 \\ 0 & -b & 0 & 0 & b+d & 0 \\ 0 & 0 & -b & 0 & 0 & b+d \end{bmatrix},$$

\bar{U} est le vecteur de commande regroupant les tensions série et shunt générées par les deux convertisseurs:

$$\bar{U} = [V_{sea} \quad V_{seb} \quad V_{sec} \quad V_{sha} \quad V_{shb} \quad V_{shc}]^T$$

\bar{W} est le vecteur des termes résiduels série et shunt, il est défini par :

$$\bar{W} = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} bV_{sa} - (b+c)V_{ra} \\ bV_{sb} - (b+c)V_{rb} \\ bV_{sc} - (b+c)V_{rc} \\ -dV_{sa} - bV_{ra} \\ -dV_{sb} - bV_{rb} \\ -dV_{sc} - bV_{rc} \end{bmatrix}$$

Bien évidemment, le système (7) n'est pas facilement exploitable en commande du fait que les grandeurs d'état ainsi que les grandeurs de commande sont alternatives. C'est la raison pour laquelle, il est judicieux d'établir un modèle plus pertinent dans le repère synchrone où toutes les grandeurs apparaissent sous la forme continue.

2.4. Modèle de l'UPFC dans le repère synchrone :

Le modèle du système dans le repère synchrone lié à la tension du nœud émetteur s'obtient par l'application de la transformation de Park à (7). Il en résulte la représentation d'état suivante (voir Annexe):

$$\dot{X} = AX + BU + W \quad (8)$$

Où X , A , B et W sont les homologues de \bar{X} , \bar{A} , \bar{B} et \bar{W} dans le repère synchrone.

Ces grandeurs sont définies telles que :

$$X = [i_{sed} \quad i_{seq} \quad i_{shd} \quad i_{shq}]^T$$

$$A = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} a_{11} & g\omega & a_{12} & 0 \\ -g\omega & a_{11} & 0 & a_{12} \\ a_{21} & 0 & a_{22} & g\omega \\ 0 & a_{21} & -g\omega & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} -(b+c) & 0 & b & 0 \\ 0 & -(b+c) & 0 & b \\ -b & 0 & b+d & 0 \\ 0 & -b & 0 & b+d \end{bmatrix}$$

$$U = [V_{sed} \quad V_{seq} \quad V_{shd} \quad V_{shq}]^T$$

$$W = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} bV_{sd} - (b+c)V_{rd} \\ bV_{sq} - (b+c)V_{rq} \\ -dV_{sd} - bV_{rd} \\ -dV_{sq} - bV_{rq} \end{bmatrix}$$

ω est la pulsation fondamentale de la tension réseau.

Il est à noter que le système (8) est commandable du fait que la matrice de commande B est de rang plein. De même, ce système est observable car la matrice de sortie (matrice identité) est de rang plein.

L'équation (8) révèle que la relation entre les grandeurs d'état et les commandes est linéaire toutefois, cette relation est fortement couplée.

2.5. Modèle de la liaison à courant continu :

Pour garantir un fonctionnement stable et sécurisé des valves de puissance constituant les deux convertisseurs de l'UPFC (IGBT, GTO, MOSFET...etc.), il y a lieu de réguler la tension continue U_c aux bornes du condensateur de couplage. Celle-ci est régie par la loi de conservation des puissances actives relatives à la liaison continue. La figure 2.3 représente la liaison continue ainsi que la répartition des puissances actives [3, 6].

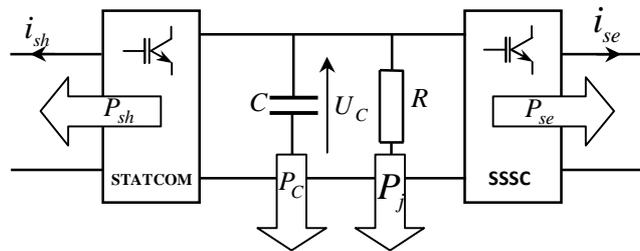


Figure 2.3. Répartition des puissances actives au niveau du bus continu.

La loi de conservation des puissances actives s'énonce comme suit :

$$\frac{dE}{dt} + P_j + P_{se} + P_{sh} = 0 \tag{9}$$

Où : E est l'énergie emmagasinée dans le condensateur. Elle s'exprime par :

$$E = \frac{1}{2} C U_c^2 \tag{10}$$

P_j représente les pertes joule dans les valves de puissance modélisée par la résistance R . Elle s'exprime par :

$$P_j = \frac{U_c^2}{R} \tag{11}$$

P_{se} est la puissance série puisée du condensateur.

Les équations (9), (10) et (11) permettent d'écrire :

$$\frac{C}{2} \frac{dU_C^2}{dt} + \frac{U_C^2}{R} = -P_{sh} - P_{se} \quad (12)$$

L'équation (12) régit le carré de la tension continue qui est la sortie d'un système linéaire de premier ordre dont l'entrée de commande est la puissance shunt P_{sh} . La puissance série P_{se} constitue une perturbation.

La figure 2.4. représente le schéma bloc correspondant à l'équation (12).

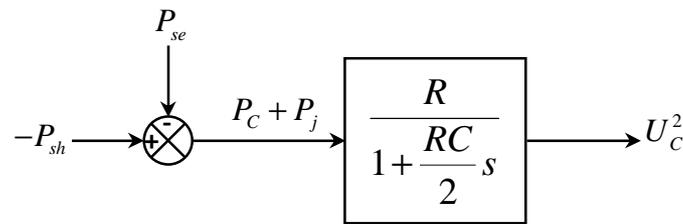


Figure 2.4. Schéma bloc du bus continu.

2.6. Modèle de la tension au nœud de connexion shunt:

Le circuit de la branche shunt est donné à la figure 2.5 et il permet d'établir la relation entre la tension shunt V_t et les autres grandeurs électriques.

L'application de la loi de Kirchhoff au circuit de la figure 2.5 donne :

$$V_t = V_{sh} - R_{sh} i_{sh} - L_{sh} \frac{di_{sh}}{dt} \quad (13)$$

Si le repère synchrone est confondu avec le phaseur de la tension V_t alors,

$$\begin{cases} V_{td} = V_t \\ V_{tq} = 0 \end{cases}$$

Dans le repère synchrone lié à la tension V_t , (13) se réécrit comme suit :

$$V_t = V_{shd} - R_{sh} i_{shd} - L_{sh} \frac{di_{shd}}{dt} - L_{sh} \omega i_{shq} \quad (14)$$

La multiplication de (14) par V_t , membre à membre, et l'exploitation de la relation qui donne les puissances instantanées dans le repère synchrone (voir Annexe B) conduisent à :

$$V_t^2 = V_t V_{shd} - R_{sh} P_{sh} - L_{sh} \frac{dP_{sh}}{dt} + L_{sh} \omega Q_{sh} \quad (15)$$

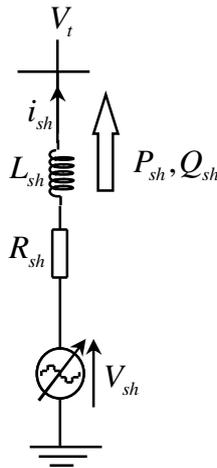


Figure 2.5. Circuit du nœud de connexion shunt.

Etant donné que P_{sh} est l'entrée de commande du bus continue, c'est Q_{sh} qui est choisie comme entrée de commande pour la régulation de la tension V_t .

Finalement et dans l'hypothèse d'une dynamique lente, V_t^2 s'exprime par :

$$V_t^2 = dist + L_{sh} \omega Q_{sh} \quad (16)$$

Avec une grandeur de perturbation donnée par :

$$dist = V_t V_{shd} - R_{sh} P_{sh} - L_{sh} \frac{dP_{sh}}{dt} \quad (17)$$

L'équation (16) est représentée par le schéma bloc ci-dessous :

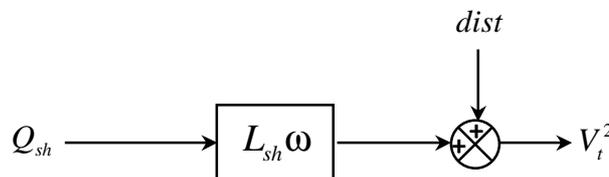


Figure 2.6. Schéma bloc du nœud de connexion shunt.

2.7. Conclusion :

Au cours du présent chapitre, un modèle mathématique de l'UPFC a été établi dans l'espace d'état, sur la base du circuit unifilaire et des équations de Kirchhoff en courant alternatif. Le modèle obtenu a été projeté dans le repère de Park et a permis d'avoir un modèle continu linéaire carré plus simple. Ce dernier servira à la synthèse de lois de commande des courants. Deux autres modèles régissant la tension de la liaison continue et la tension au nœud de connexion shunt ont été établis en exploitant, respectivement, le principe de conservation de la puissance active et la transformation dq.

3.1. Introduction :

Au chapitre précédent, il a été établi le modèle d'état du système englobant l'UPFC et la ligne de transport. Ce modèle servira à la synthèse de lois de commande permettant au système de réaliser le cahier des charges qui sera décrit dans la prochaine section.

Le rôle principale de l'UPFC étant de modifier la caractéristique statique de la liaison électrique et la rendre ajustable selon les besoins en termes de power flow et niveau de tension souhaités. Bien-entendu, cette caractéristique ne doit pas induire des fonctionnements dépassant les limites thermiques de la ligne.

Dans ce chapitre, deux méthodes de commande seront étudiées à savoir la commande par retour d'état avec intégrateur et la commande à structure variable (par modes glissants).

3.2. Cahier des charges :

L'UPFC raccordé à une ligne de puissance, d'une part, sert à améliorer la capacité de transport de celle-ci, et d'autre part, réajuste les différents paramètres du système électrique afin d'atteindre des consignes désirées bien déterminées (valeurs de référence). Le cahier des charges peut être résumé dans les points suivants [7, 8, 9]:

- Les puissances active et réactive transitant dans la ligne doivent suivre leurs consignes contractuelles dictées par l'exploitant du système électrique (Opérateur Système dans le cas de l'Algérie). Ces consignes font l'objet d'études d'exploitation à court-terme ;
- La tension alternative au point de raccordement du STATCOM doit évoluer dans une bande centrée à la valeur nominale et dont la largeur est définie par l'exploitant ;
- La tension continue aux bornes du condensateur du bus continu qui relie les deux convertisseurs doit être proche de la valeur relative au fonctionnement nominal des valves de puissance.

3.3. Schéma de commande :

Le schéma global de commande est donné à la figure 3.1. Il y a l'UPFC, le régulateur multivariable de courant pour le sous-système interne, les deux régulateurs PI de tension pour le sous-système externe, les capteurs de tension et de courant ainsi que les différentes adaptations de grandeurs [2, 6, 9].

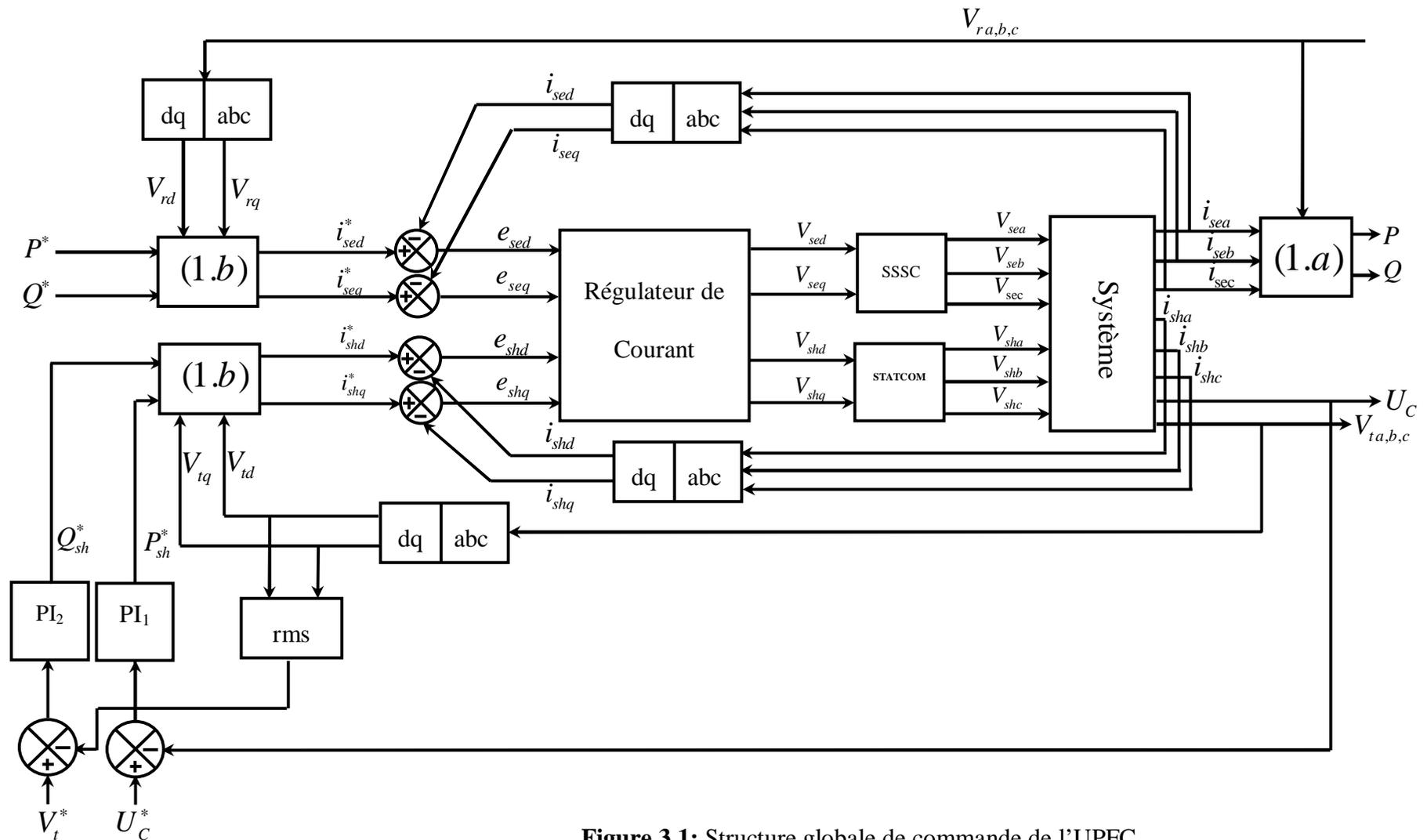


Figure 3.1: Structure globale de commande de l'UPFC.

Il y a lieu de noter que les puissances active et réactive sont liées aux composantes synchrone du courant et de la tension par les relations (voir annexe):

$$\begin{cases} P = V_d i_d + V_q i_q \\ Q = V_q i_d - V_d i_q \end{cases} \quad (1.a)$$

$$\begin{cases} i_d = (P V_d + Q V_q) / (V_d^2 + V_q^2) \\ i_q = (P V_q - Q V_d) / (V_d^2 + V_q^2) \end{cases} \quad (1.b)$$

3.4. Commande du sous-système externe:

Après avoir établi les deux modèles relatifs à la partie shunt (point de connexion du STATCOM) et au bus continu (liaison AC/DC), il y a lieu de faire la synthèse des régulateurs conventionnels PI servant à la régulation de la tension shunt V_s et celle de la tension continue U_C (voir figure 3.1).

La fonction de transfert d'un régulateur PI est donnée par [5]:

$$PI(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \quad (2)$$

où : k_p et k_i sont le gain proportionnel et le gain intégral, respectivement.

3.4.1. Synthèse de commande de la partie continue :

Pour synthétiser la loi de commande de la partie continue, il faut calculer les valeurs des deux gains k_{pC} , k_{iC} du PI [3, 7, 9].

Soit $e_C = U_C^{*2} - U_C^2$, l'erreur de régulation.

D'après (12) du chapitre 2 et (2), la loi de commande P_{sh}^* s'exprime par :

$$P_{sh}^*(t) = - \left(k_{pC} e_C(t) + k_{iC} \int_0^t e_C(t) dt \right) \quad (3)$$

L'équation (12) du chapitre 2 et l'équation (3) conduisent à l'équation de la boucle fermée suivante :

$$U_C^2(s) = \frac{F_1(s)(k_{pC}s + k_{iC})}{s + F_1(s)(k_{pC}s + k_{iC})} U_C^{*2}(s) - \frac{sF_1(s)}{s + F_1(s)(k_{pC}s + k_{iC})} P_{se}(s) \quad (4)$$

Où $F_1(s) = \frac{\frac{2}{C}}{s + \frac{2}{RC}}$ est la fonction de transfert du bus continu.

Après substitution de $F_1(s)$ par son expression, (4) se réécrit comme suit :

$$U_C^2(s) = \frac{\frac{2}{C}k_{pC}s + \frac{2}{C}k_{iC}}{s^2 + \left(\frac{2}{RC} + \frac{2}{C}k_{iC}\right)s + \frac{2}{C}k_{iC}} U_C^{*2}(s) - \frac{\frac{2}{C}s}{s^2 + \left(\frac{2}{RC} + \frac{2}{C}k_{iC}\right)s + \frac{2}{C}k_{iC}} P_{se}(s) \quad (5)$$

Il est clair qu'en régime statique, le régulateur PI₁ rejette la perturbation et permet d'avoir un transfert unitaire donc une erreur statique nulle.

En faisant l'identification du dénominateur de (5) avec le polynôme caractéristique d'un système de 2^{ème} ordre, en l'occurrence $s^2 + 2\alpha w_n s + w_n^2$, les gains de réglage en sont déduits

$$\begin{cases} k_{pC} = \alpha w_n C - \frac{1}{R} \\ k_{iC} = \frac{w_n^2 C}{2} \end{cases} \quad (6)$$

L'amortissement ξ et la pulsation naturelle w_n sont choisis tels que [11] :

$$w_n = \frac{3}{t_r} \text{ et } \alpha = 0.7 \text{ avec } t_r = 100 \text{ ms.}$$

3.4.2. Synthèse de commande de la branche shunt :

Soit $e_t = V_t^{*2} - V_t^2$, l'erreur de régulation.

D'après (16) du chapitre 2 et (2), la loi de commande Q_{sh}^* s'exprime par :

$$Q_{sh}^*(t) = k_{pt} e_t(t) + k_{it} \int_0^t e_t(t) dt \quad (7)$$

L'équation (16) du chapitre 2 et l'équation (7) conduisent à l'équation de la boucle fermée suivante :

$$V_t^2(s) = \frac{\frac{k_{pt}}{k_{it}}s + 1}{\left(\frac{k_{pt}}{k_{it}} + \frac{1}{L_{sh}\omega k_{it}}\right)s + 1} V_t^{*2}(s) + \frac{\frac{s}{L_{sh}\omega}}{\left(\frac{k_{pt}}{k_{it}} + \frac{1}{L_{sh}\omega k_{it}}\right)s + 1} dist(s) \quad (8)$$

Il est clair qu'en régime statique, le régulateur PI₂ rejette la perturbation et permet d'avoir un transfert unitaire donc une erreur statique nulle.

En faisant l'identification du dénominateur de (8) avec le polynôme caractéristique d'un système de 1^{er} ordre, en l'occurrence $1 + ts$, les gains de réglage en sont déduits :

$$\frac{k_{pt}}{k_{it}} + \frac{1}{L_{sh}\omega k_{it}} = t \quad (9)$$

La constante de temps τ et le rapport $\frac{k_{it}}{k_{pt}}$ sont imposés tels que [10]:

$$t_r = 3t \text{ et } \frac{k_{it}}{k_{pt}} = 5 \text{ avec } t_r = 100 \text{ ms.}$$

3.5. Commande du sous-système interne :

3.5.1. Commande par retour d'état avec intégrateur :

La commande par retour d'état ou placement de pôles est une technique très adaptée aux systèmes linéaires. La loi de commande sert à modifier la dynamique de la boucle ouverte en déplaçant les pôles vers des positions désirées. Il existe deux approches différentes à savoir : [3, 6].

- L'approche basée sur la pré-compensation statique. Il s'agit de moduler la consigne pour avoir, en boucle fermée, un gain statique unitaire ;
- L'approche basée sur l'insertion d'un intégrateur dans la chaîne directe du système pour annuler l'erreur statique.

Dans le présent travail, la 2^{ème} approche sera utilisée pour la commande du système interne relatif aux courants dont la réponse doit être très performante en termes de stabilité, rapidité et précision.

Le système est modélisé dans le repère de Park par l'équation d'état (8) vue au chapitre 2. Celle-ci est donné par :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + W \\ y = X \end{cases} \quad (10)$$

3.5.1.1. Schéma de commande :

Cette approche est plus avantageuse par rapport à la première, car elle permet d'annuler l'erreur statique donc permet d'imposer à l'erreur une dynamique désirée.

Dans ce cas, la structure du réglage correspondante est donnée à la figure 3.2 [7, 8].

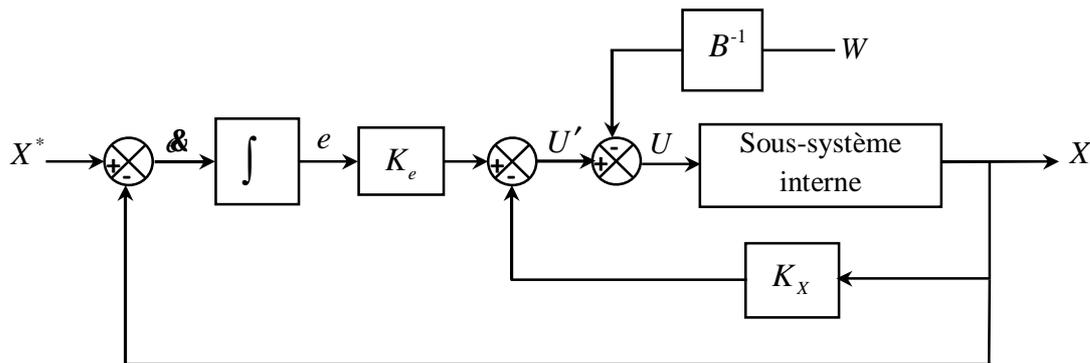


Figure 3.2. Structure par retour d'état avec intégrateur.

D'après la figure 3.2, le système décrit par (2) prend, en boucle fermée la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU' \\ \dot{e} = X^* - X \end{cases} \quad (11)$$

Où : $U' = U + B^{-1}W$ est une entrée de commande virtuelle.

Le système (11) peut se mettre sous la forme d'un système augmenté comme suit :

$$\dot{Z} = A^* Z + B^* U' + TX^* \quad (12)$$

Où :

$$Z = \begin{bmatrix} X \\ e \end{bmatrix}; \quad A^* = \begin{bmatrix} A & 0_4 \\ -I_4 & 0_4 \end{bmatrix}; \quad B^* = \begin{bmatrix} B \\ 0_4 \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} 0_4 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

Avec :

0_4 est la matrice carrée nulle d'ordre 4.

I_4 est la matrice identité d'ordre 4.

La loi de commande par retour d'état avec le vecteur augmenté Z est donnée par l'expression :

$$U' = K Z \quad (13)$$

Où : $K = [K_x \quad K_e]$ matrice des gains du système augmenté.

La substitution dans (12) de la commande U' par son expression (13) donne le système augmenté en boucle fermée suivant :

$$\dot{Z} = (A^* + B^* K) Z + TX^* \quad (14)$$

Dans l'environnement de calcul et simulation MATLAB, la fonction $\gg K = -\text{place}(A^*, B^*, P_o)$ permet de calculer la matrice de retour d'état augmentée. Une fois les pôles désirés sont calculés, la matrice K est décomposée en :

- la matrice de retour d'état K_x regroupant les quatre premières colonnes de K .
- la matrice gain d'intégration K_e regroupant les quatre dernières colonnes de K .

P_o : représente le vecteur des pôles désirés en boucle fermée.

La commande réelle U est donnée en fonction U' par la relation :

$$U = U' - B^{-1}W \quad (15)$$

D'après la figure 3.2, la loi de commande virtuelle U' est explicitée comme suit :

$$U' = K_x X + K_e \int_0^t (X^*(\tau) - X(\tau)) d\tau \quad (16)$$

Les équations (15) et (16) renvoient à l'expression finale de la commande donnée par :

$$U = K_x X - B^{-1}W + K_e \int_0^t (X^*(\tau) - X(\tau)) d\tau \quad (17)$$

3.5.1.2. Synthèse de la commande :

Les pôles désirés du système augmenté, en boucle fermée, permettent de calculer la matrice de retour d'état augmenté. Ils sont imposés comme suit [11] :

- Deux pôles dominants (ayant la dynamique la plus lente) sont calculés en fonction de la réponse oscillatoire amortie désirée. Cela se fait en choisissant l'amortissement ξ et la pulsation naturelle ω_n . En fonction de ces deux paramètres, la paire des pôles dominants est donnée par :

$$P_{1,2} = \omega_n \left(-\xi \pm j\sqrt{1-\xi^2} \right) \quad (18)$$

Avec $\omega_n \approx \frac{3}{t_r}$ où t_r est le temps de réponse pour $\xi = 0.7$.

- Les pôles restants doivent être suffisamment éloignés afin de ne pas influencer significativement la dynamique de la boucle fermée.

Dans le cas de l'UPFC, un temps de réponse $t_r = 8.5$ ms avec un facteur d'amortissement $\xi = 0.7$ sont choisis [11]. Cela donne :

$$P_{1,2} = -248 \pm 253j$$

3.5.1.3. Simulations :

Un programme MATLAB a été élaboré pour la simulation du fonctionnement de l'UPFC. Il implémente la méthode de Butcher-Boole pour la résolution des équations différentielles ordinaires.

Les paramètres du système utilisés dans les simulations dans la figure 2.1 sont tels que (en p.u) [5]:

$$Z_{sh} = 0.025 + j0.625; Z_{se} = 0.42 + j0.304; Z_s = 0.028 + j0.33.$$

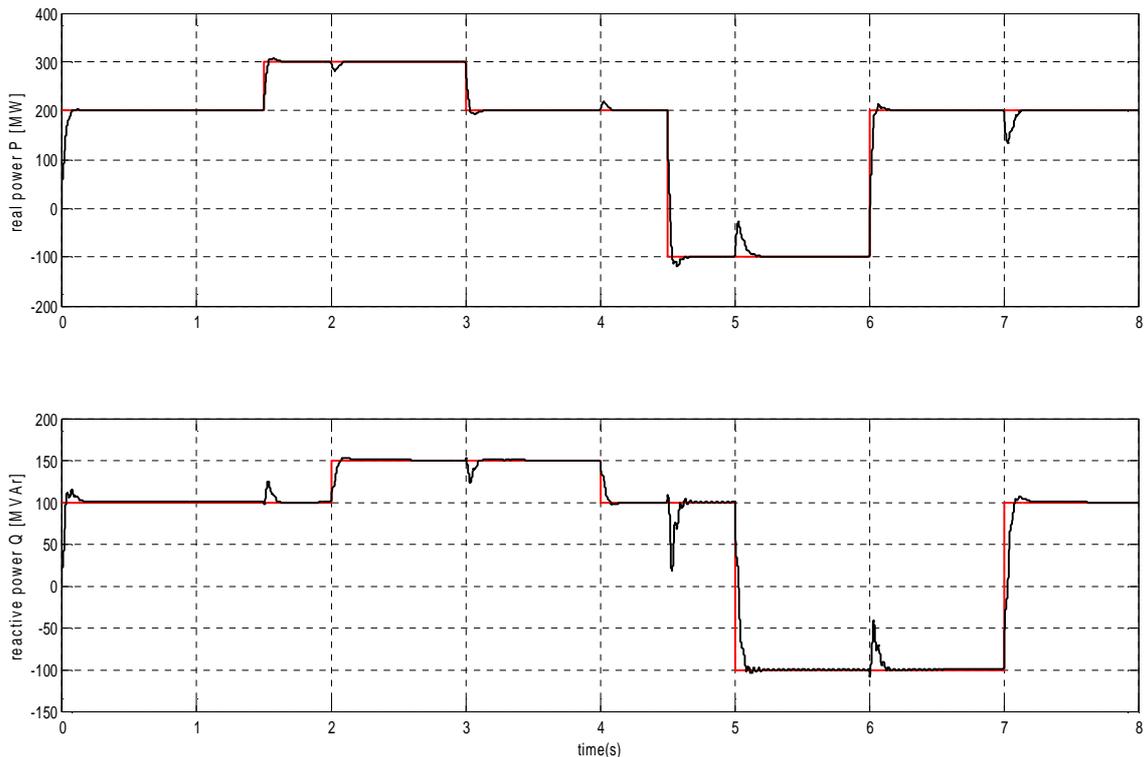
Les grandeurs visualisées sont :

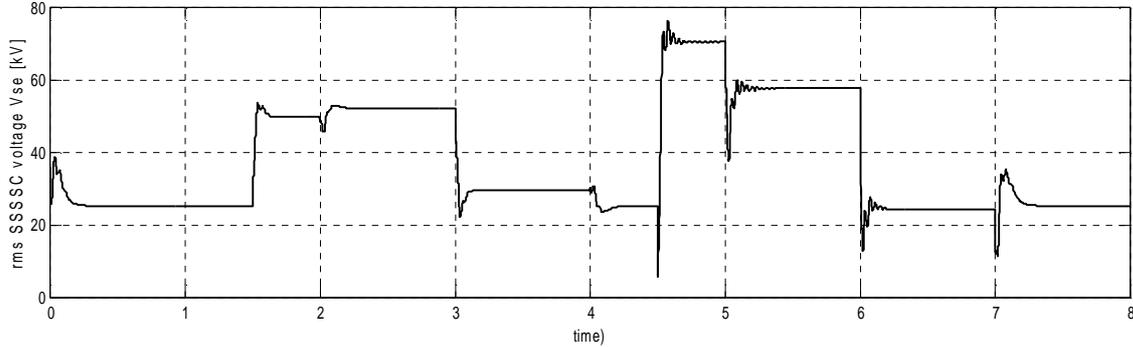
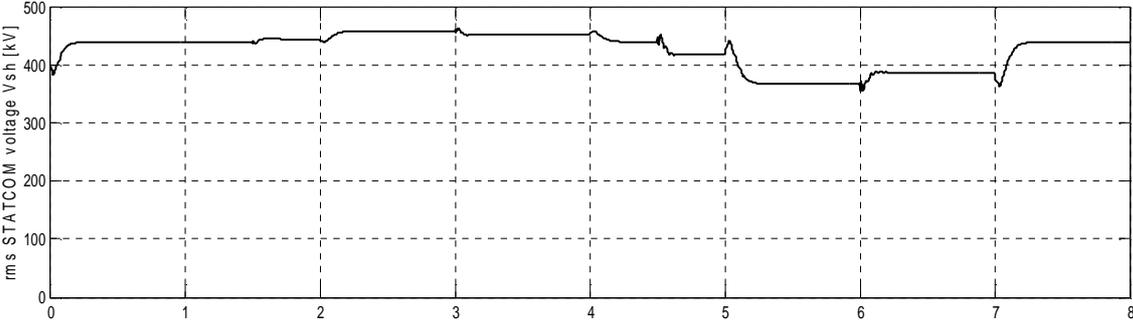
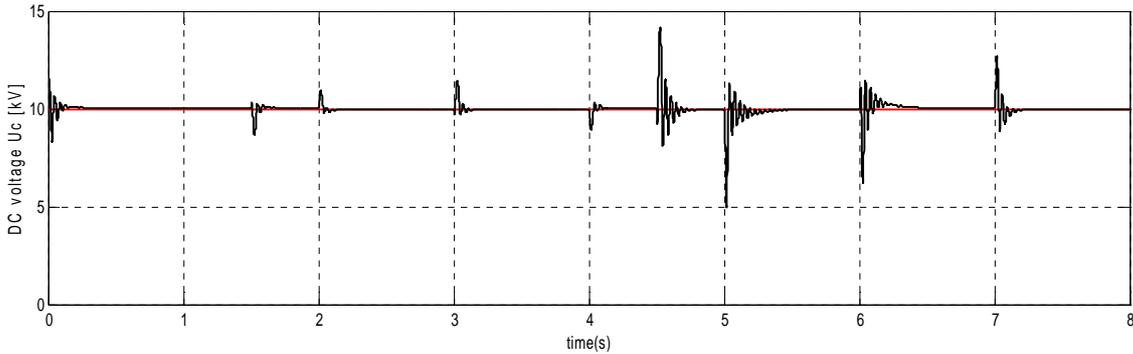
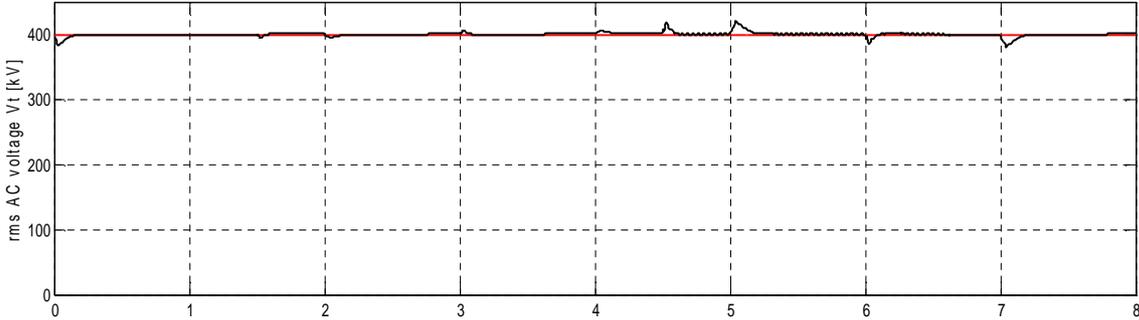
- La puissance active transitée dans la ligne (P) ;
- La puissance réactive transitée dans la ligne (Q) ;
- Le module du vecteur tension série injectée par le SSSC (V_{se}) ;
- Le module du vecteur tension shunt générée par le STATCOM (V_{sh}) ;
- Le courant série injecté par le SSSC (i_{se}) ;
- Le courant shunt injecté par le STATCOM (i_{sh}) ;
- Le module du vecteur tension au point de raccordement (V_t) ;
- La tension de bus continu (U_C).

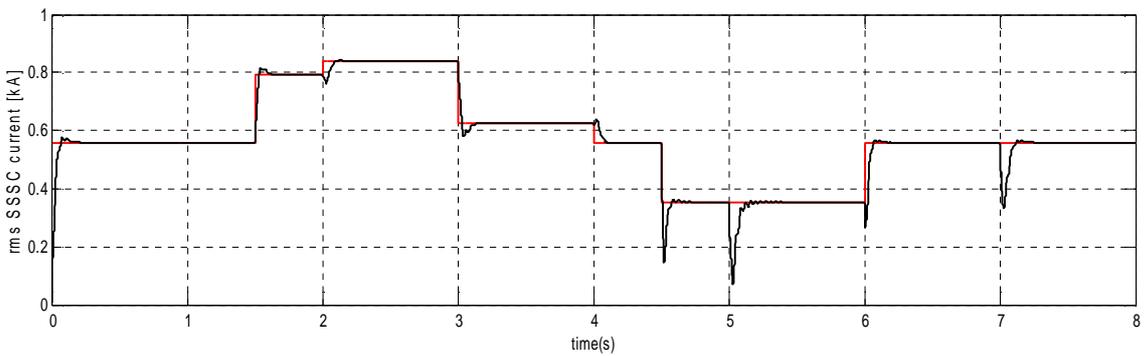
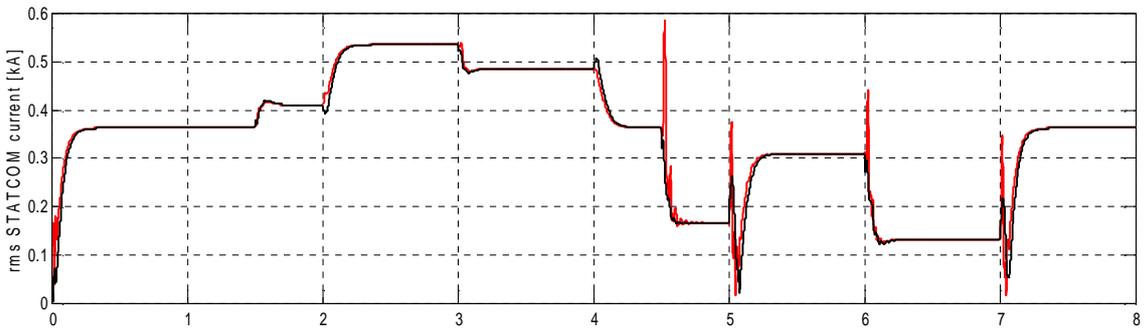
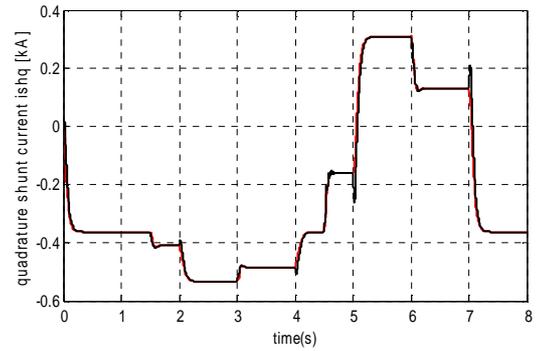
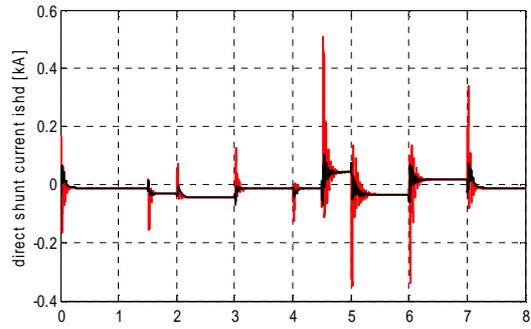
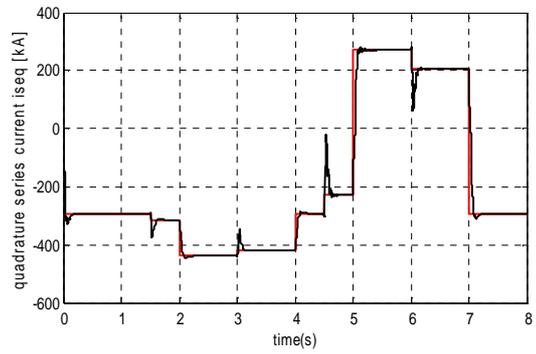
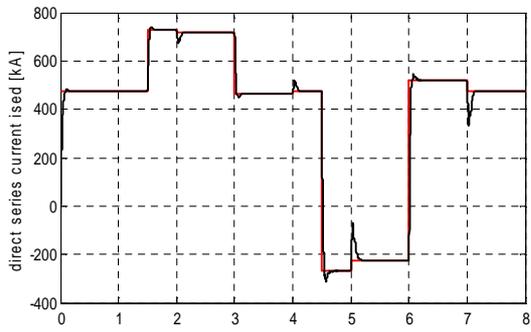
Chaque simulation est suivie d'un tableau donnant les valeurs des indices de performance IAE (intégrale de la valeur absolue de l'erreur) calculés pour chaque sortie à savoir P , Q , V_t et U_C .

Les signaux de référence sont visualisés en couleur rouge et les signaux réels en couleur noire.

3.5.1.3.1. Cas sans perturbation :







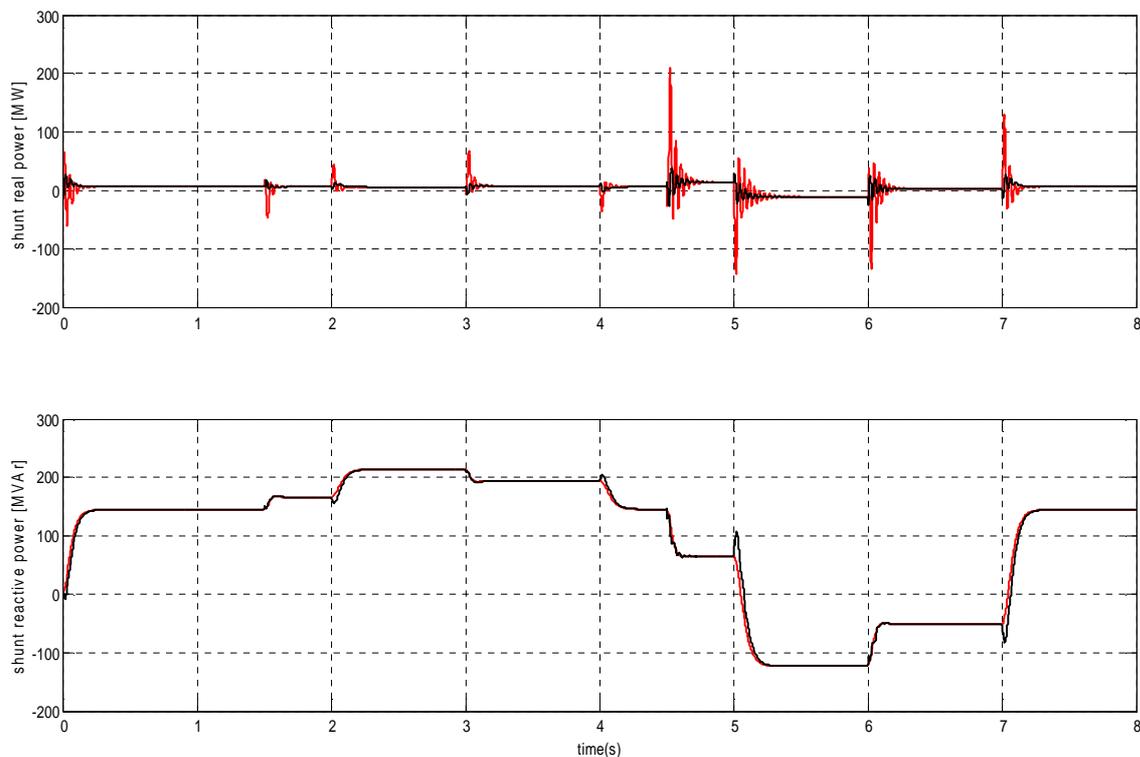


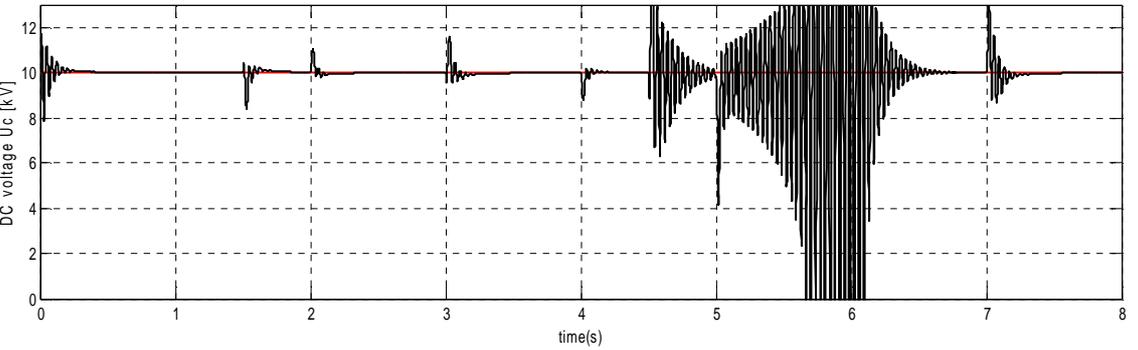
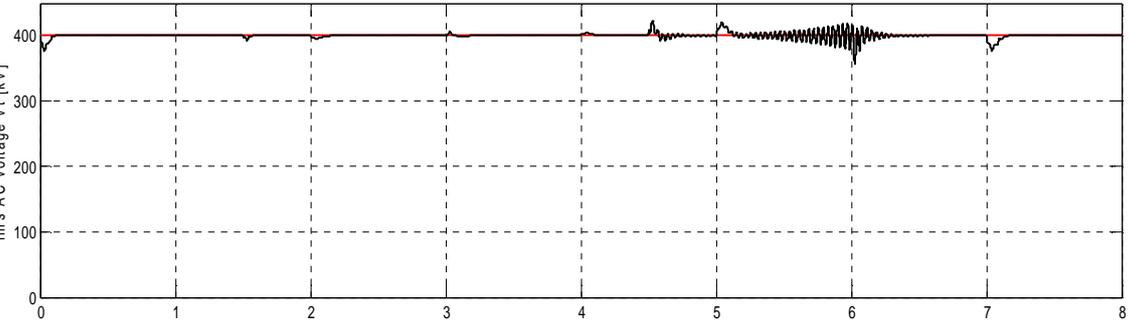
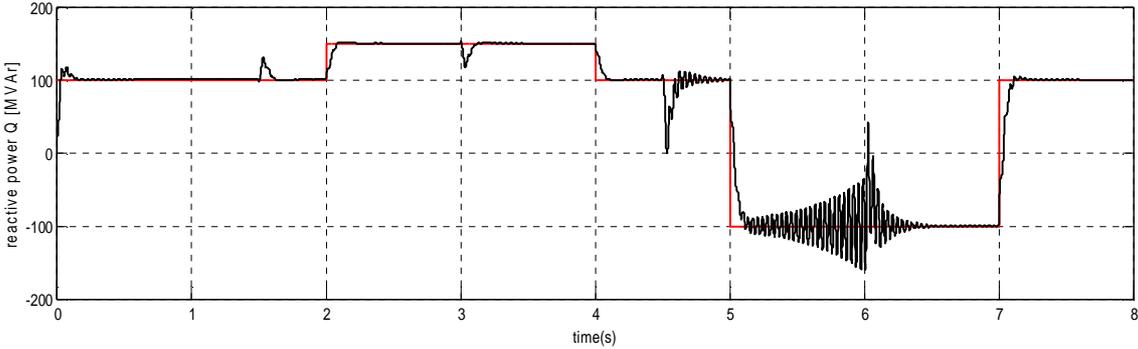
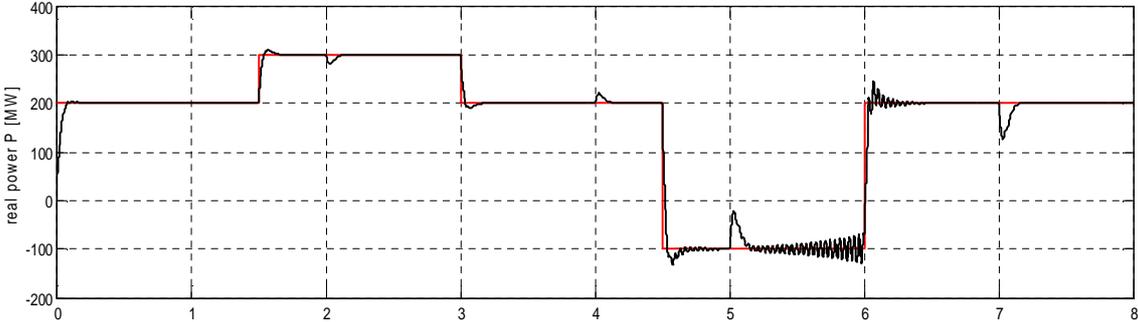
Figure.3.3. Résultats de simulation du système en situation normale dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur.

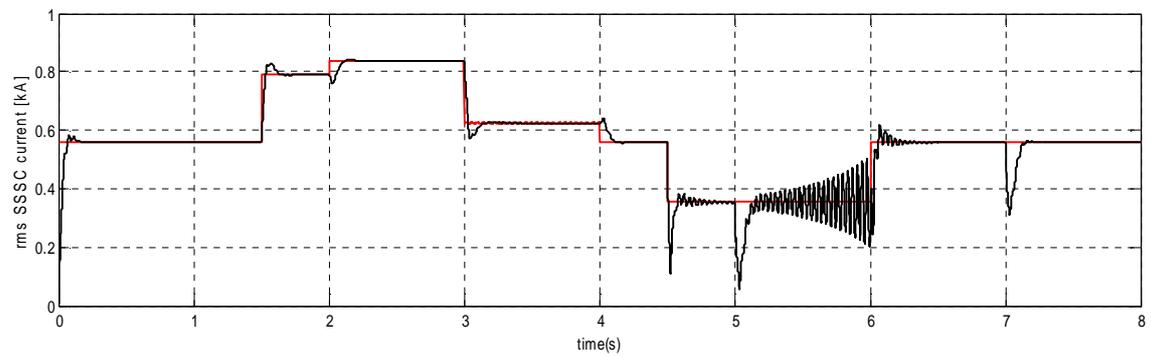
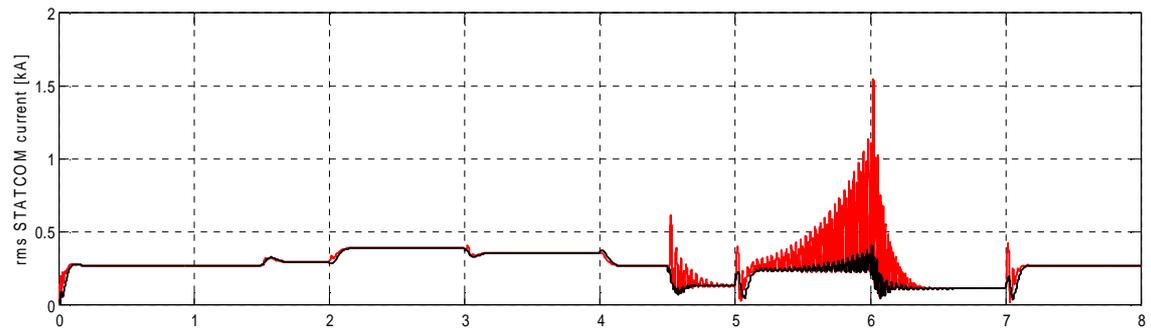
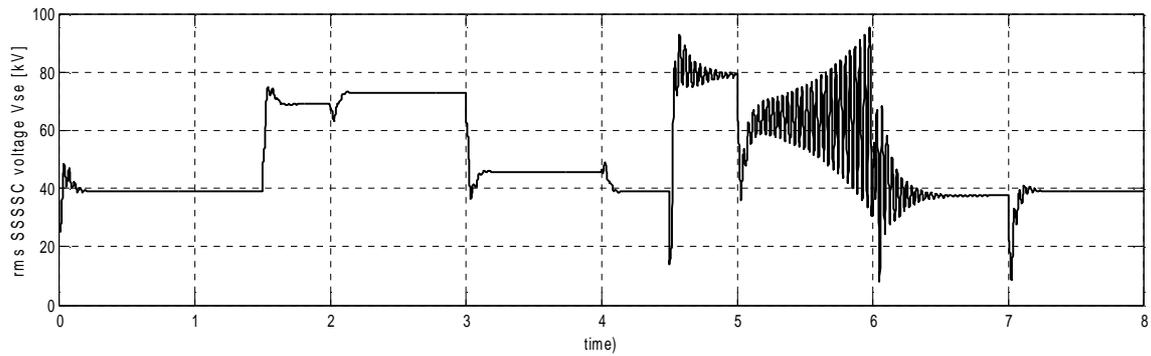
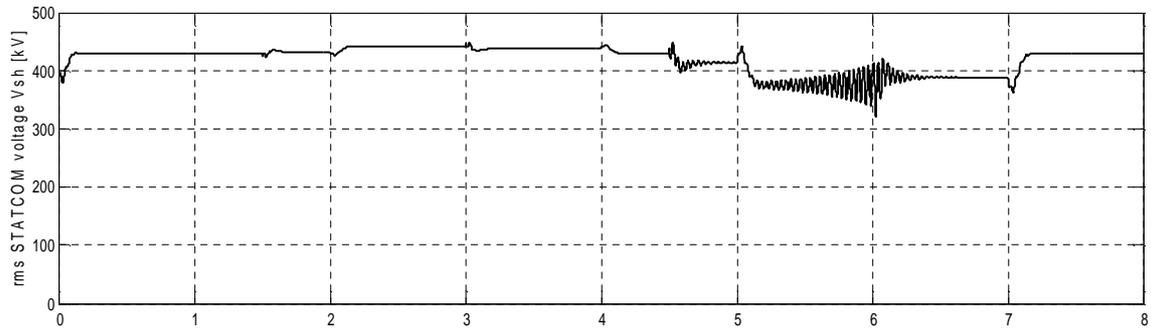
Tableau .3.1. Indices de performance en situation normale dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur (p.u)

	P	Q	V_t	U_C
Indice de performance IAE	0.1908	0.2633	0.0210	0.0916

3.5.1.3.2. Cas avec perturbation paramétrique :

Dans cette partie, les simulations sont faites pour une incertitude de 18% sur le modèle utilisé pour le calcul de la commande.





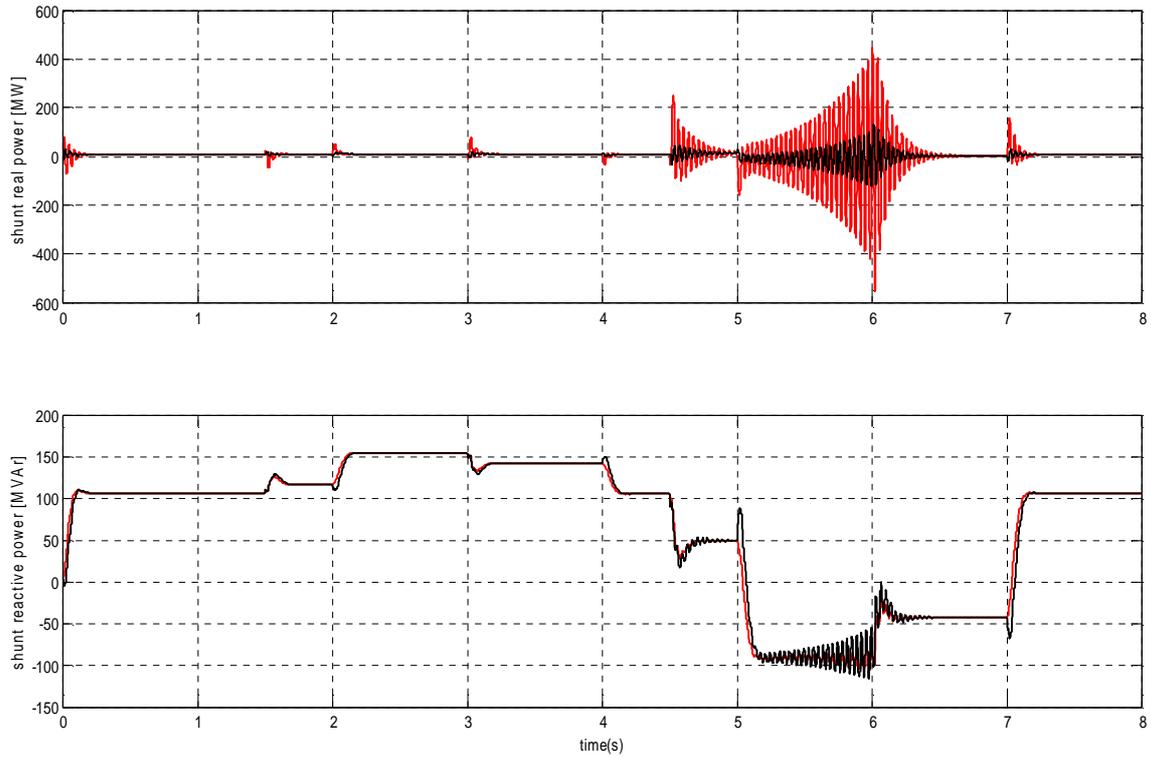


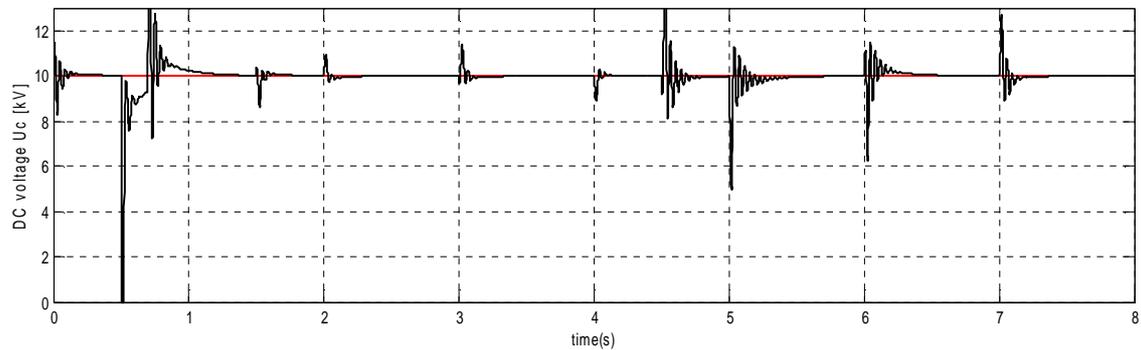
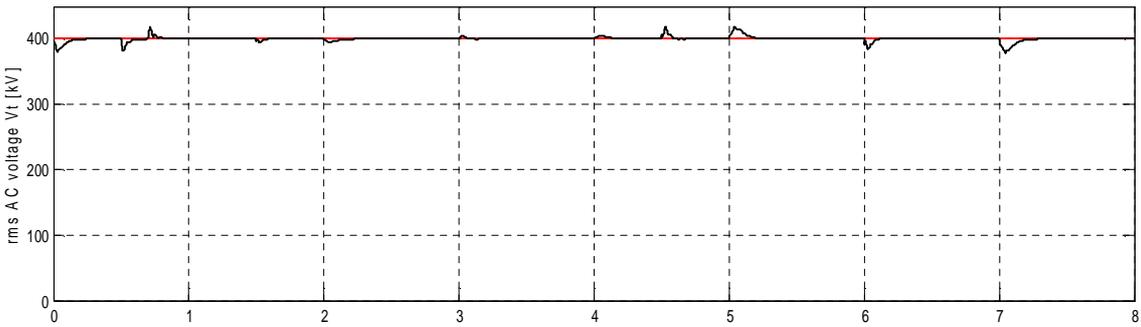
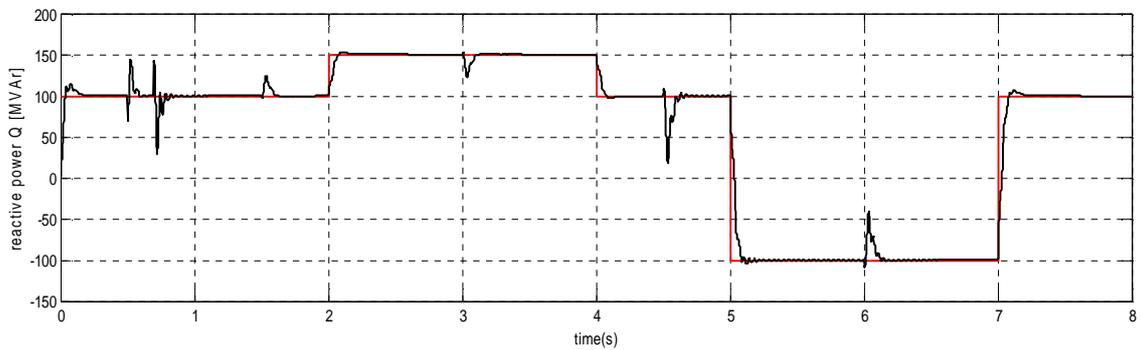
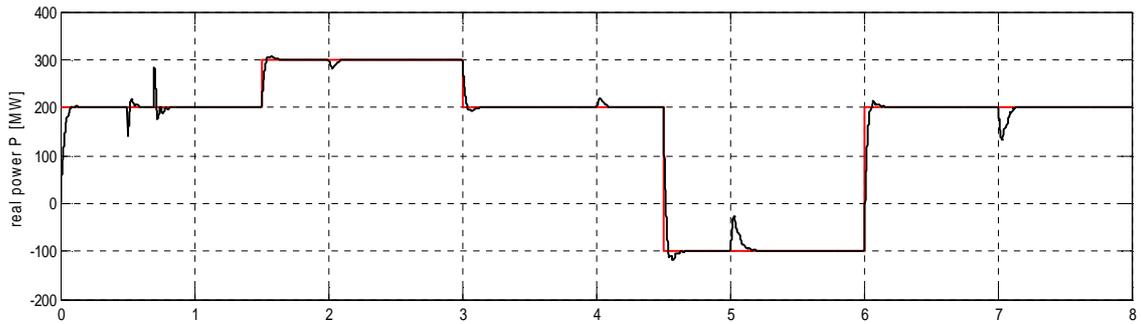
Figure.3.4. Résultats de simulation du système en situation perturbée (18% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur.

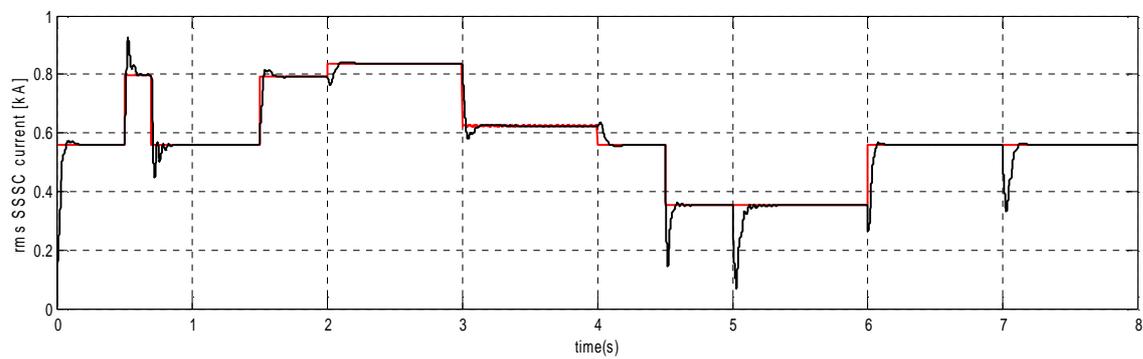
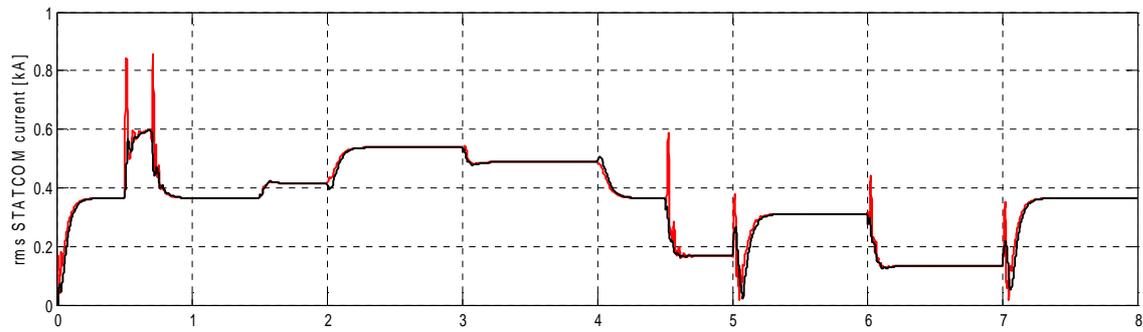
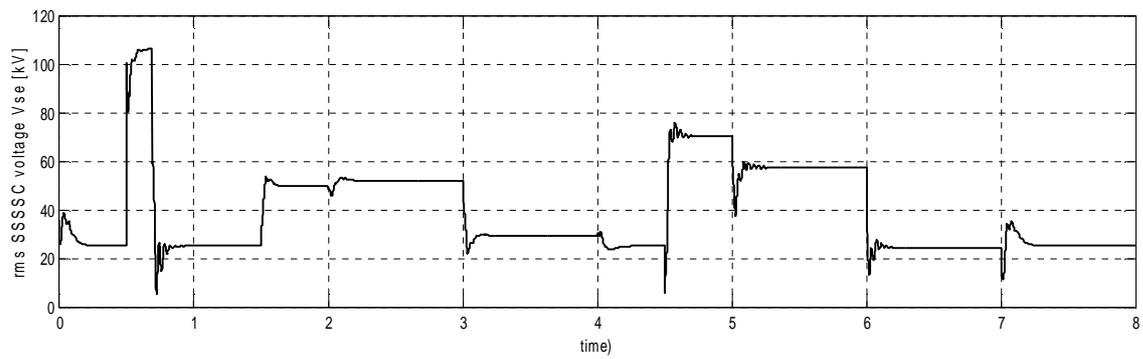
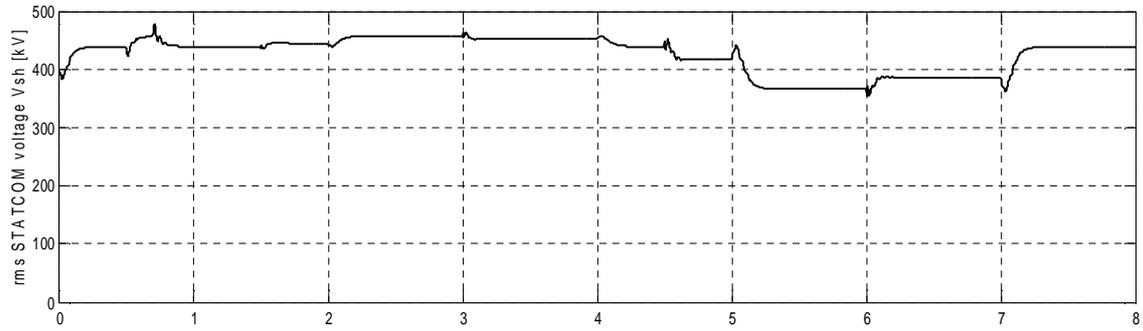
Tableau .3.2. Indices de performance en situation perturbée (18% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur (p.u)

	P	Q	V_t	U_C
Indice de performance IAE	0.3138	0.5369	0.0359	0.5418

3.5.1.3.3. Cas avec perturbation externe :

Dans cette partie, une chute de tension de 30% se produit au côté récepteur à l'instant $t=0.5$ s et dure 200 ms.





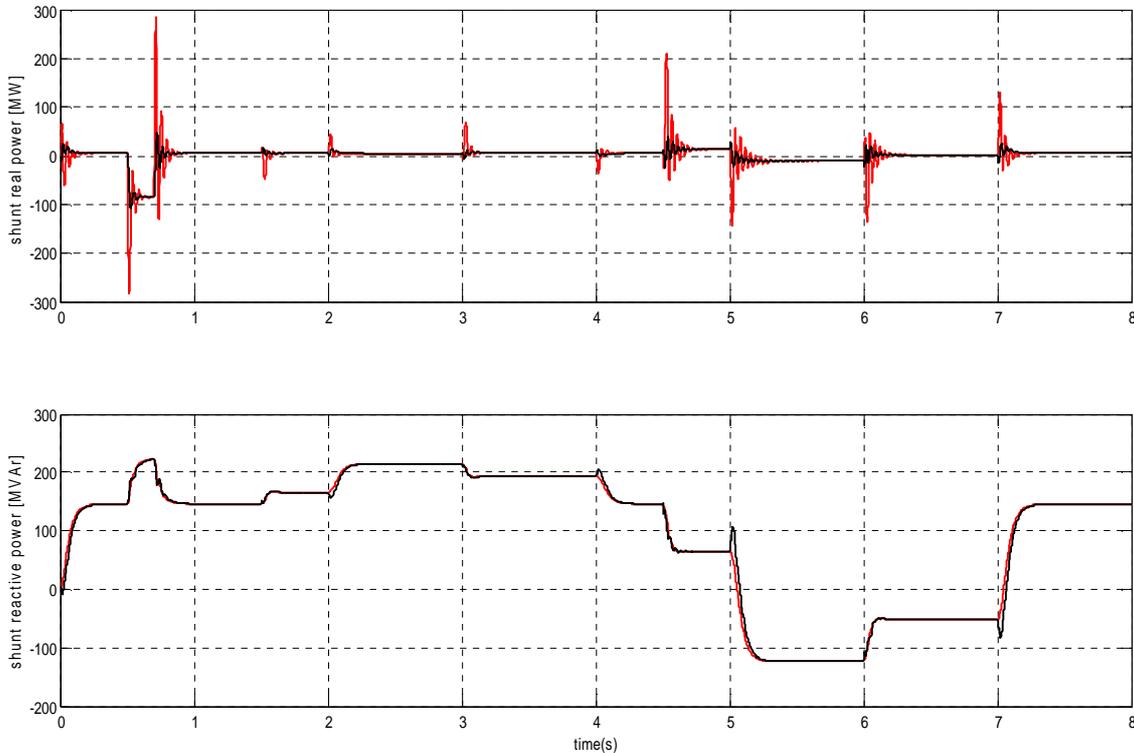


Figure.3.5. Résultats de simulation du système en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur.

Tableau .3.3. Indices de performance en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur (p.u)

	P	Q	V_t	U_C
Indice de performance IAE	0.2040	0.3002	0.0249	0.1658

3.5.1.4. Interprétation des résultats :

Les figures 3.3, 3.4 et 3.5 ainsi que les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 montrent que la poursuite en power flow est effective et que les tensions de commande sont admissibles que ce soit en situation normale ou en situations perturbées. Malgré la forte dépendance du modèle, le régulateur a permis de diminuer la sensibilité aux variations paramétriques grâce à l'action intégrale, à l'inverse du retour d'état conventionnel.

Cependant dans les situations perturbées, des oscillations apparaissent à chaque changement de consigne et des écarts importants sont constatés dans les grandeurs qui sont

censés rester constantes. Par ailleurs, le système perdra la stabilité en boucle fermée si l'incertitude paramétrique dépasse 18%. Cela dévoile la forte corrélation des grandeurs électriques et les capacités de décorrélation limitées de la commande par retour d'état.

3.5.2. Commande par modes glissants :

Vu les performances limitées de la commande par retour d'état, dans cette section, l'application d'une autre technique de commande robuste basée sur les modes glissants est étudiée.

Soient $\Delta A, \Delta B$ et ΔW les parties inconnues et A_n, B_n et W_n les parties nominales des matrices A, B et W , respectivement.

L'équation (10) peut se réécrire comme suit [3] :

$$\dot{X} = A_n X + B_n U + W_n + D \quad (19)$$

Où $D = \Delta A X + \Delta B U + \Delta W$ est le vecteur d'incertitude global. Il regroupe les quatre incertitudes relatives à chaque état et est donné par :

$$D = [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad d_4]^T \quad (20)$$

Dans l'hypothèse d'une incertitude bornée avec des bornes connues, il y a lieu d'écrire, pour $i = 1, 2, 3, 4$:

$$|d_i| \leq \bar{d}_i \quad (21)$$

Un choix évident de la surface de glissement est tel que [6] :

$$S = X^* - X \quad (22)$$

e : l'erreur de poursuite en courant qui réalise l'objectif de commande.

La loi de commande est déduite en mettant :

$$\dot{S} = -K_1 \text{sign}(S) - K_2 \cdot S \quad (23)$$

Où : K_1, K_2 sont deux matrices diagonales définies positives.

L'équation (23) permet d'écrire :

$$\dot{X}^* - \dot{X} = -K_1 \text{sign}(S) - K_2 \cdot S \quad (24)$$

En remplaçant l'équation (19) dans (24), il résulte :

$$A_n X + B_n U + W_n + D = \dot{X}^* + K_1 \text{sign}(S) + K_2 \cdot S \quad (25)$$

En n'utilisant que les valeurs nominales dans la loi de commande, celle-ci peut être déduite de (25) et a pour expression :

$$U = B_n^{-1} [\dot{X}^* - A_n X - W_n + K_1 \text{sign}(S) + K_2 \cdot S] \quad (26)$$

3.5.2.1. Synthèse robuste :

Soit V la fonction de Lyapunov définie positive donnée par l'expression :

$$V = \frac{1}{2} S^T \cdot S \quad (27)$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\dot{V} = S^T \cdot \dot{S} \quad (28)$$

En remplaçant (22) et (26) dans (28), il résulte :

$$\dot{V} = -S^T (K_1 \text{sign}(S) + K_2 S + D) \quad (29)$$

D'une façon plus développée, (29) peut se réécrire comme suit :

$$\dot{V} = -\sum_{i=1}^4 (K_{1i} |s_i| + K_{2i} s_i^2 + d_i s_i) \quad (30)$$

L'équation (30) et le fait que $-d_i s_i \leq \bar{d}_i |s_i|$ permettent de majorer \dot{V} comme suit :

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^4 ((K_{1i} - \bar{d}_i) |s_i| + K_{2i} s_i^2)$$

Si les gains K_{1i} sont choisis tels que :

$$K_{1i} \geq \bar{d}_i$$

alors,

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^4 K_{2i} s_i^2 \quad (31)$$

Par ailleurs, si $a = \min_{i=1,4} \{K_{2i}\}$ alors,

$$\dot{V} \leq -a \sum_{i=1}^4 s_i^2 \quad (32)$$

Les relations (28) et (31) conduisent à :

$$\dot{V} \leq -aV \quad \text{Il n'y a pas 4 l'équation devient } \dot{V} \leq -aV \quad (33)$$

L'expression (32) est une inégalité différentielle, sa solution est :

$$0 \leq V(t) \leq V(0) \cdot e^{-at} \quad (34)$$

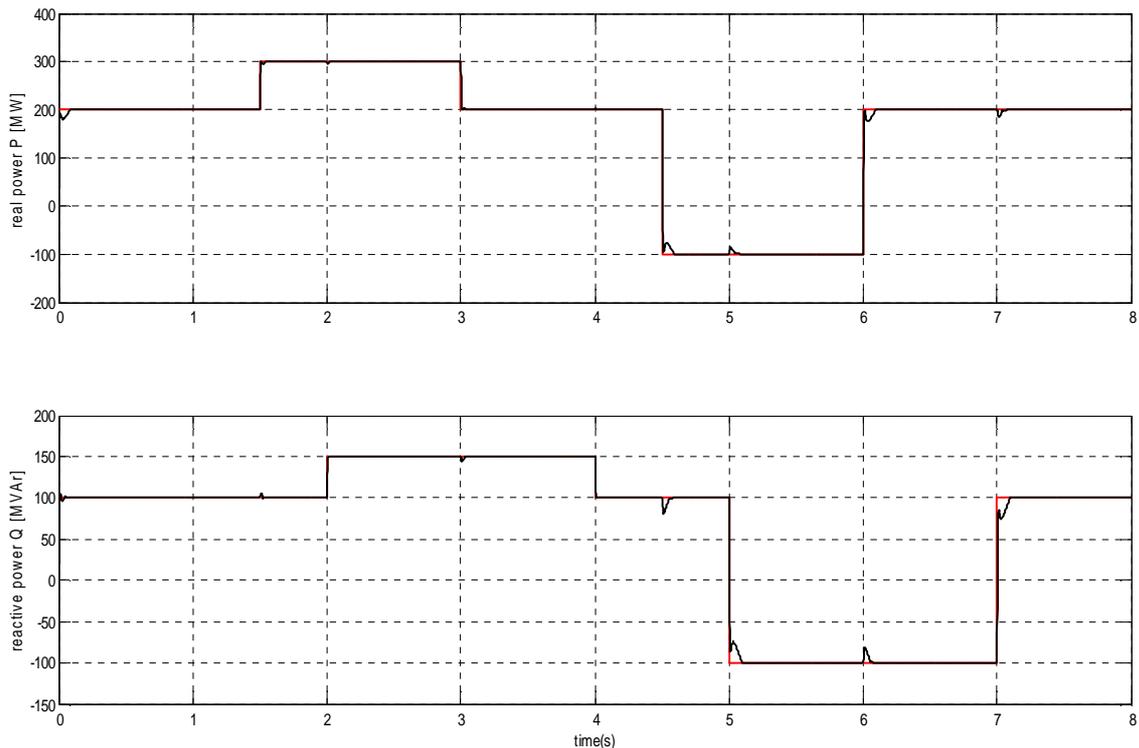
Cela montre que tous les signaux sont bornés et que :

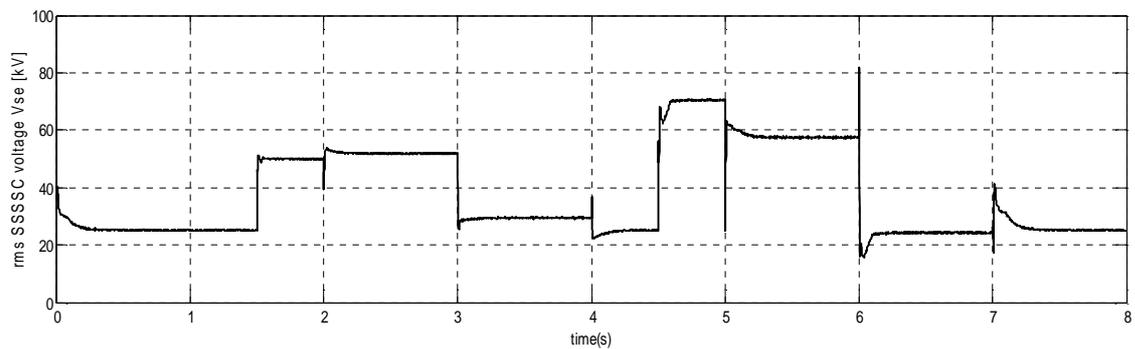
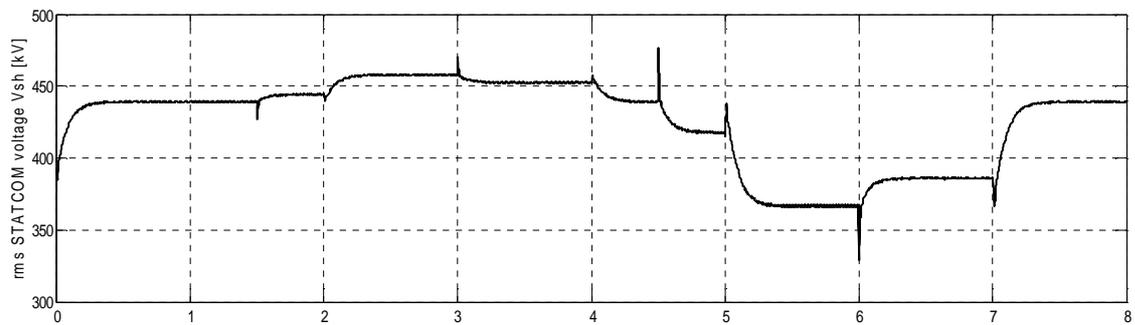
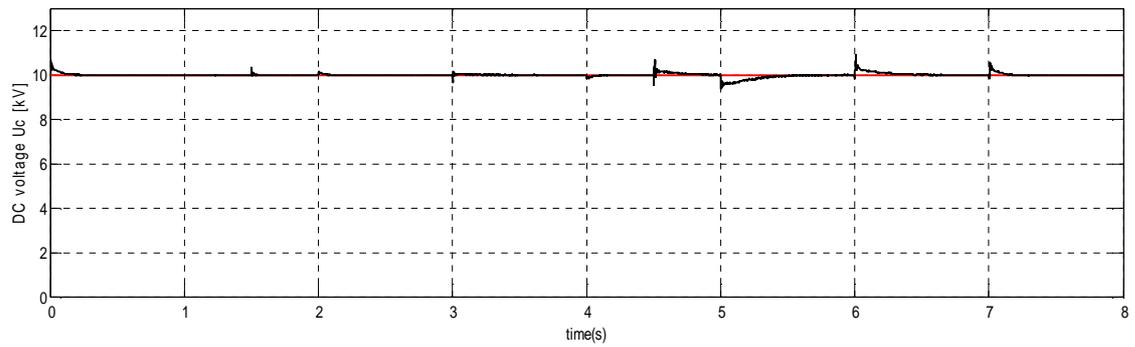
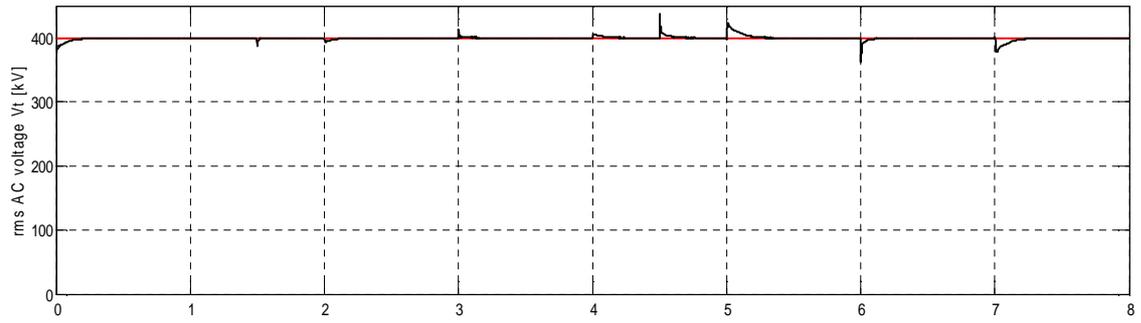
$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow +\infty} V(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} S(t) = 0 \end{cases} \quad (35)$$

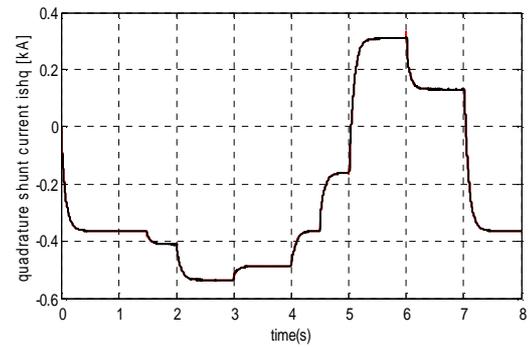
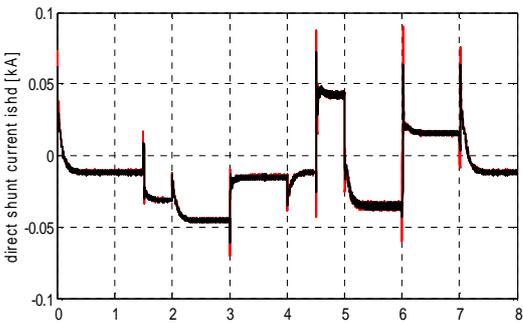
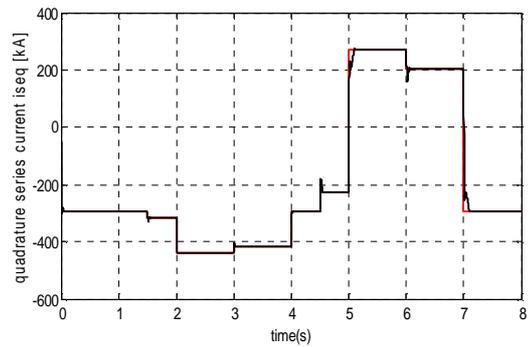
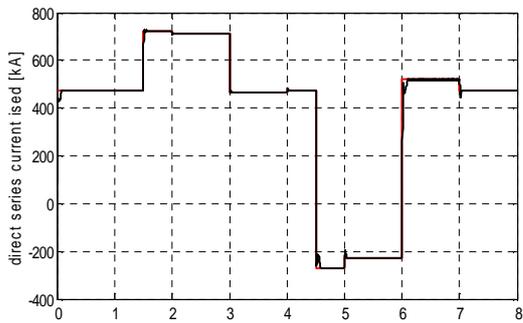
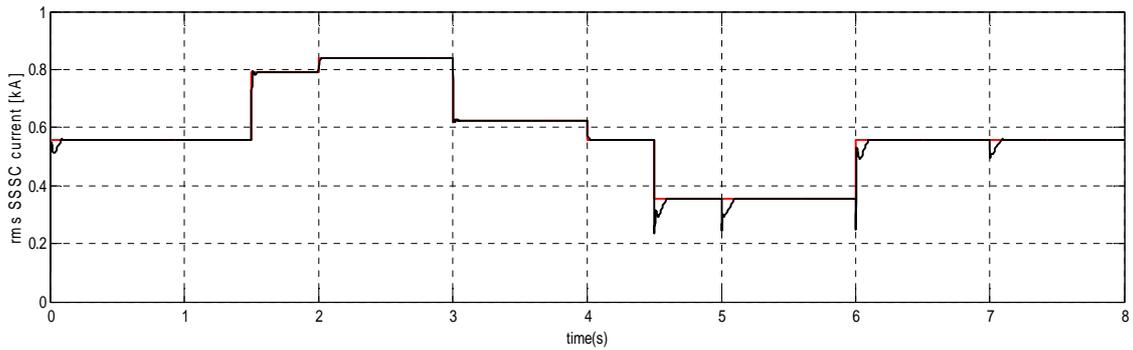
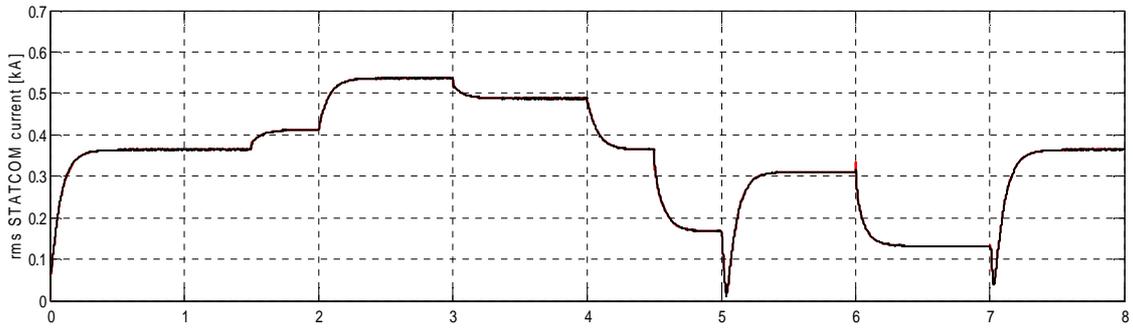
Il y a lieu d'insérer un filtre passe-bas de premier ordre dont la fréquence de coupure est $f_c = 100$ Hz pour filtrer le signal de commande dans le but de diminuer l'inévitable phénomène de chattering.

3.5.2.2. Simulations :

3.5.2.2.1. Cas sans perturbation :







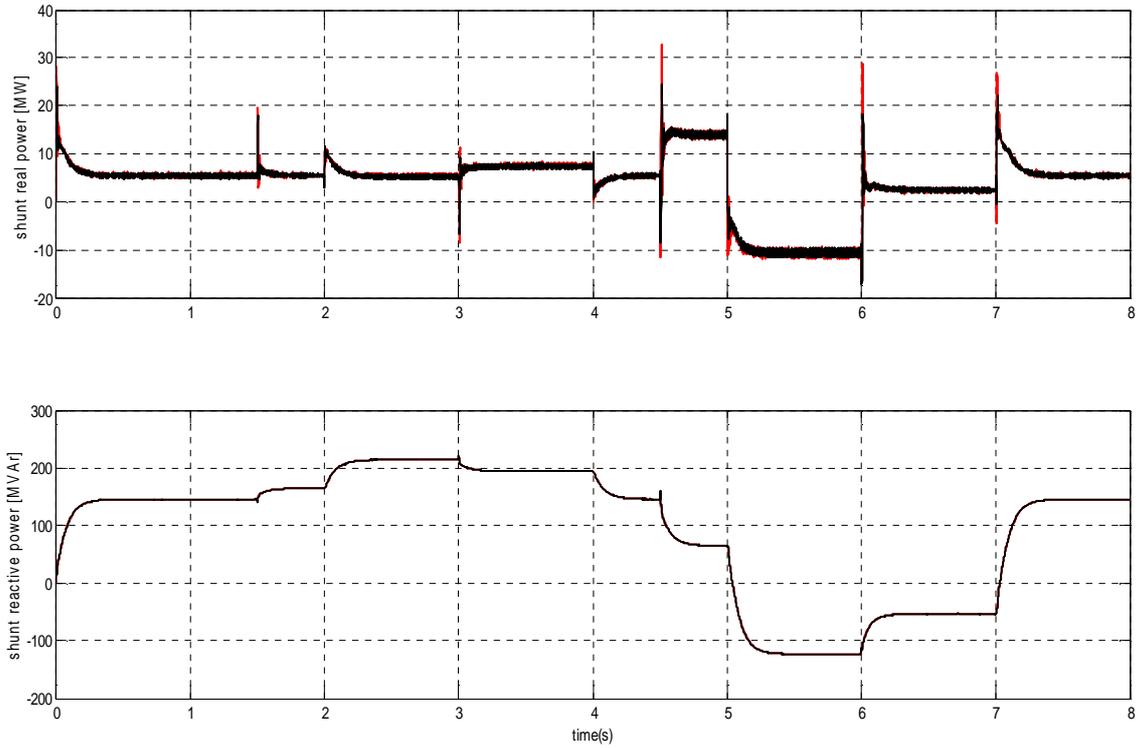


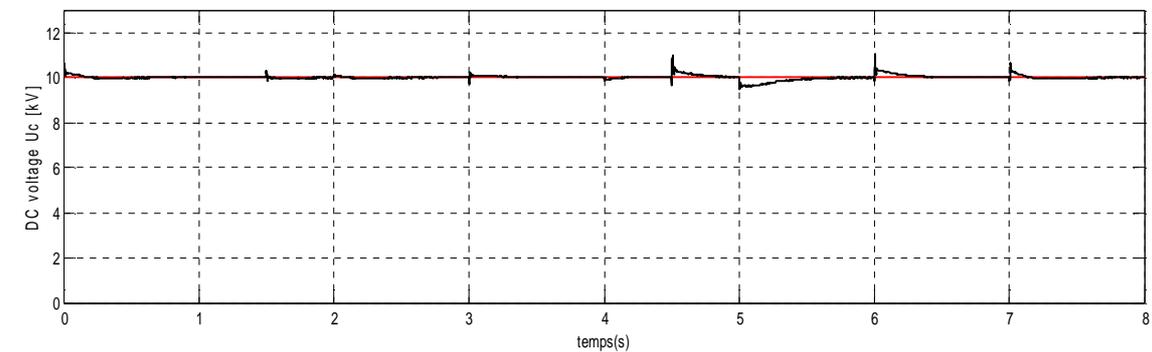
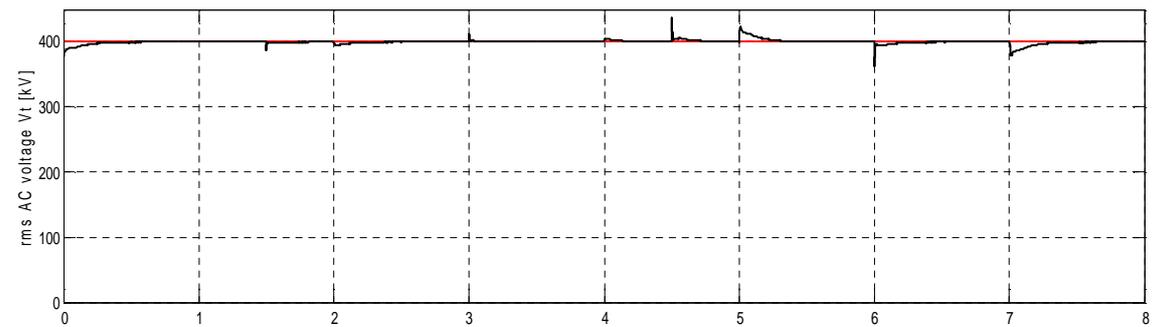
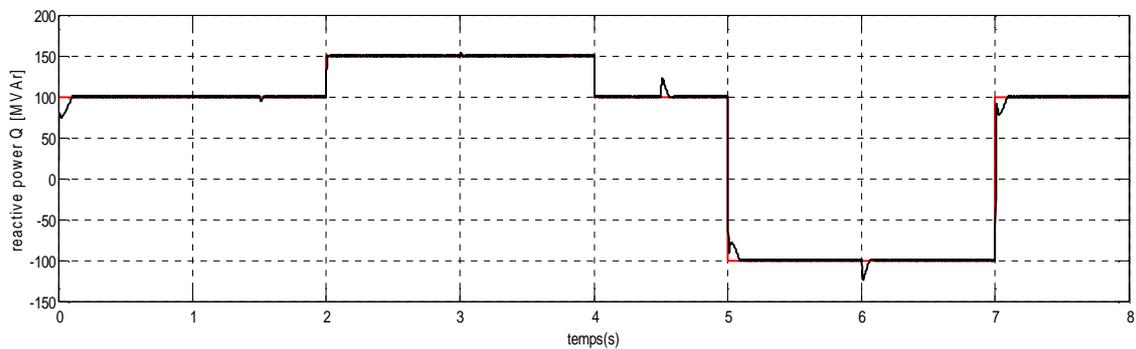
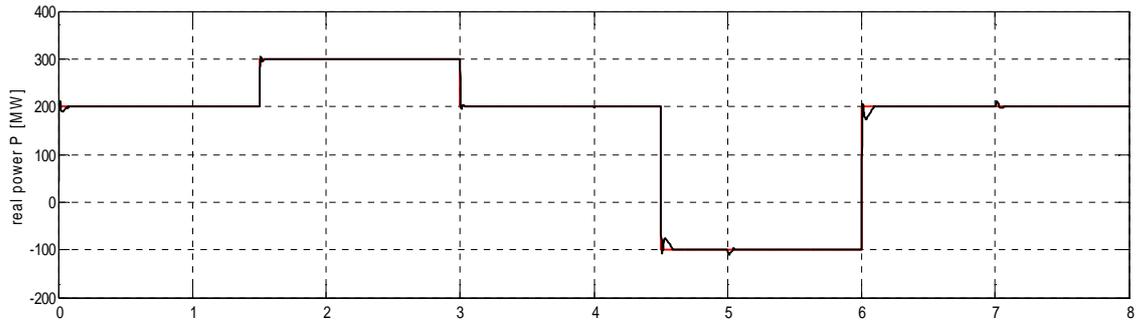
Figure.3.6. Résultats de simulation du système en situation normale dans le cas de la commande par modes glissants.

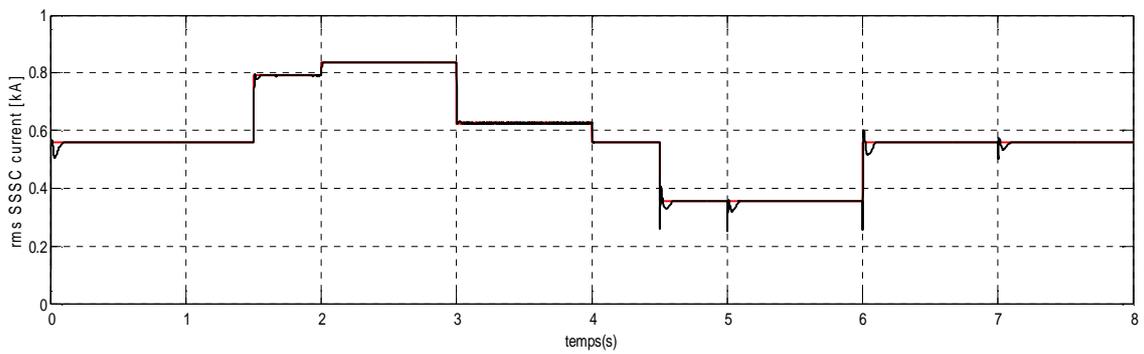
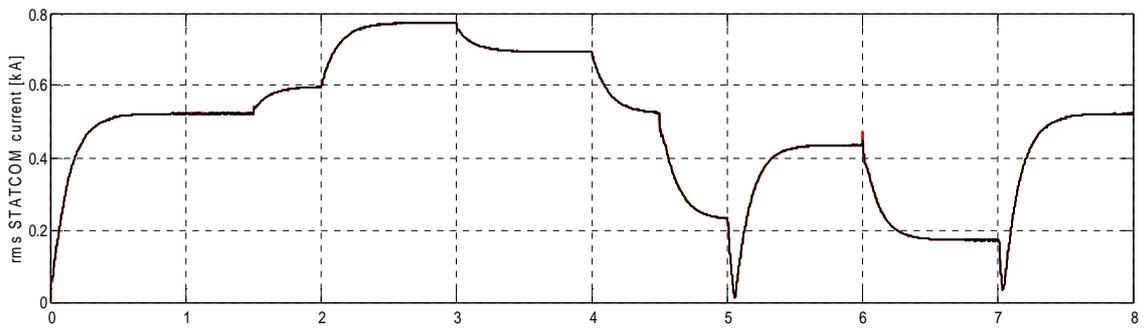
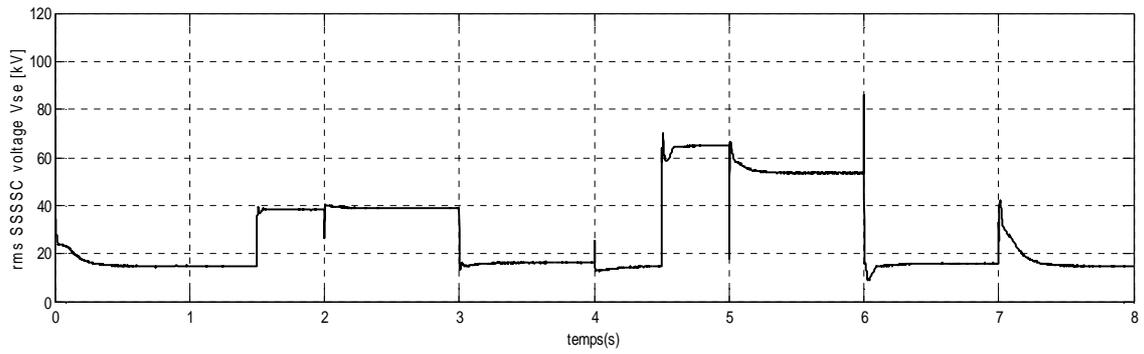
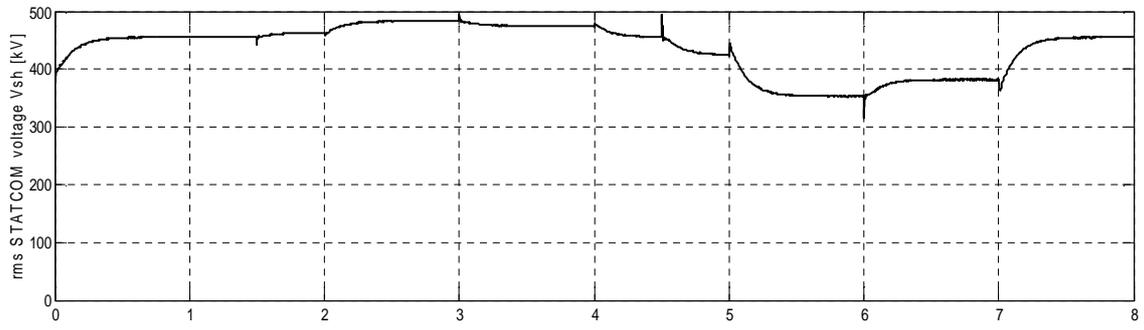
Tableau .3.4. Indices de performance en situation normale dans le cas de la commande par modes glissants (p.u)

	P	Q	V_t	U_c
Indice de performance IAE	0.0477	0.0620	0.0217	0.0351

3.5.2.2.2. Cas avec perturbation paramétrique :

Dans cette partie, les simulations sont faites pour une incertitude de 25% sur le modèle utilisé pour le calcul de la commande.





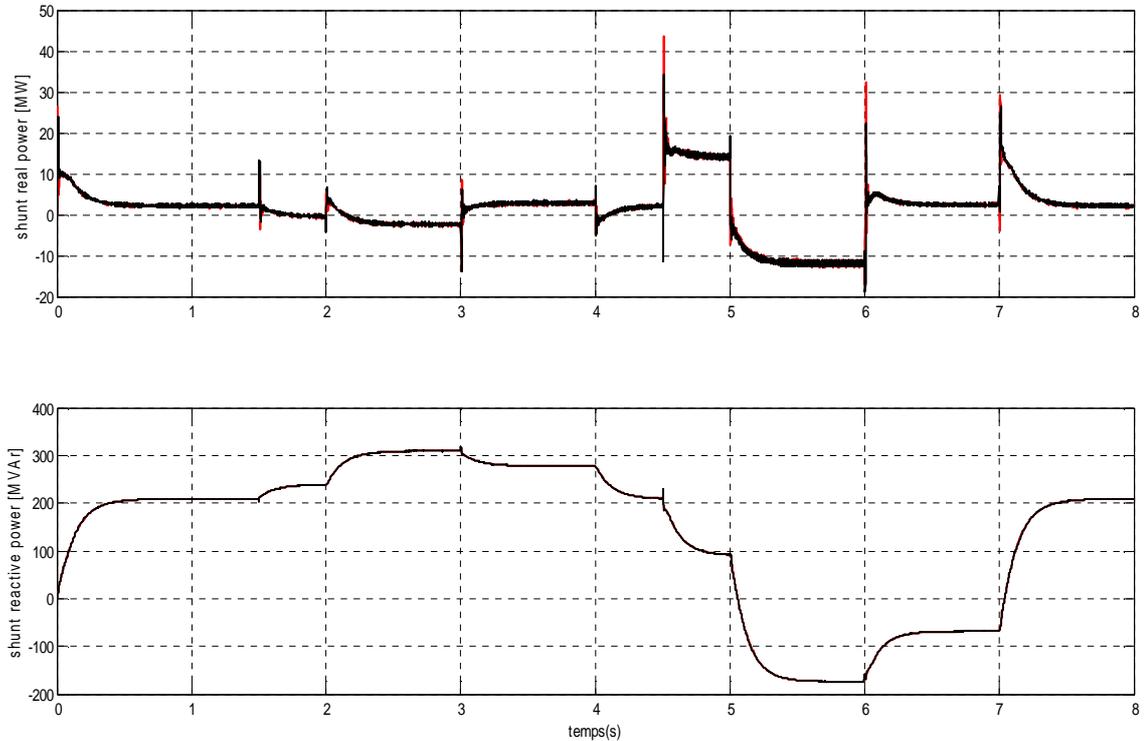


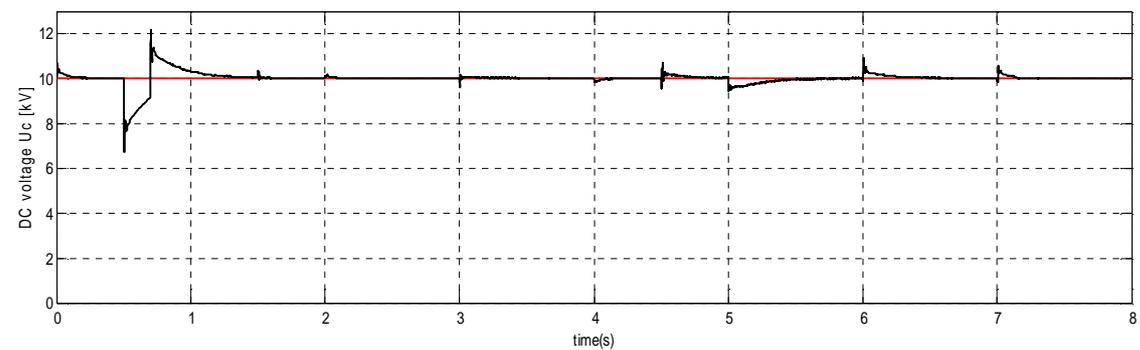
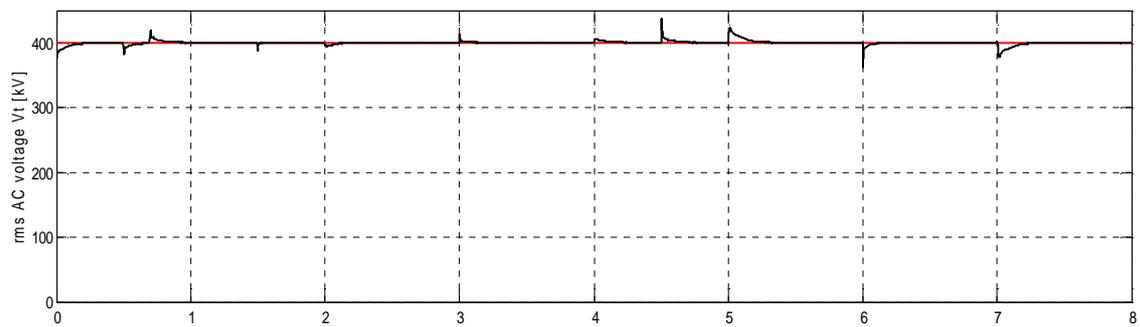
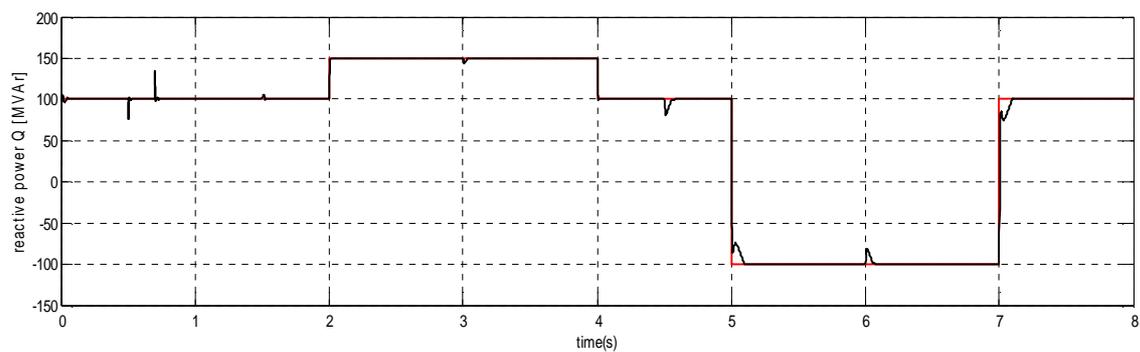
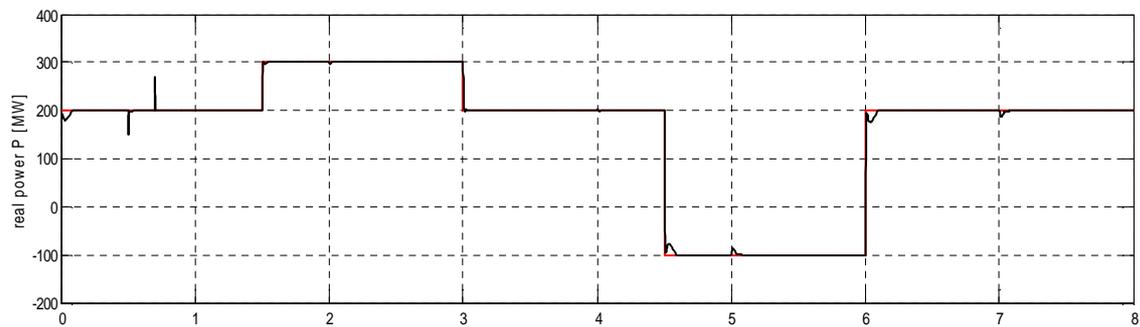
Figure.3.7. Résultats de simulation du système en situation perturbée (25% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par les modes glissants.

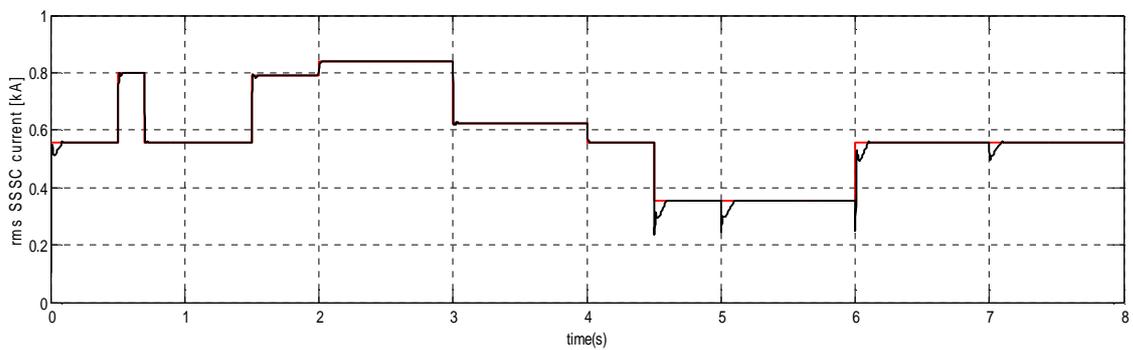
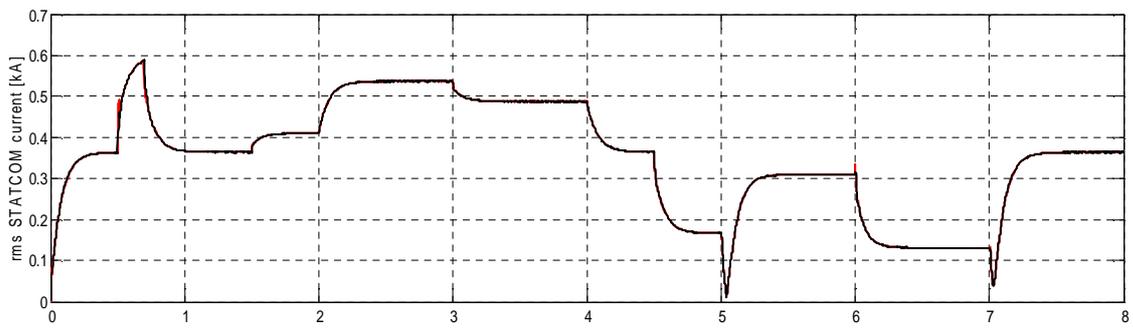
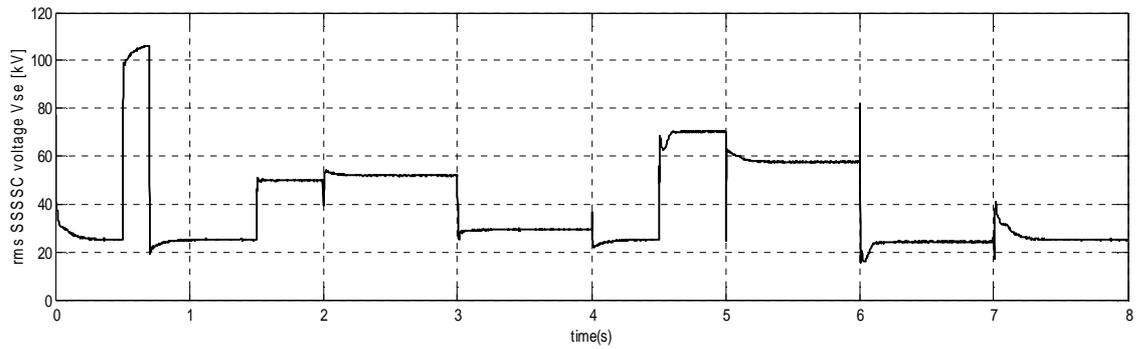
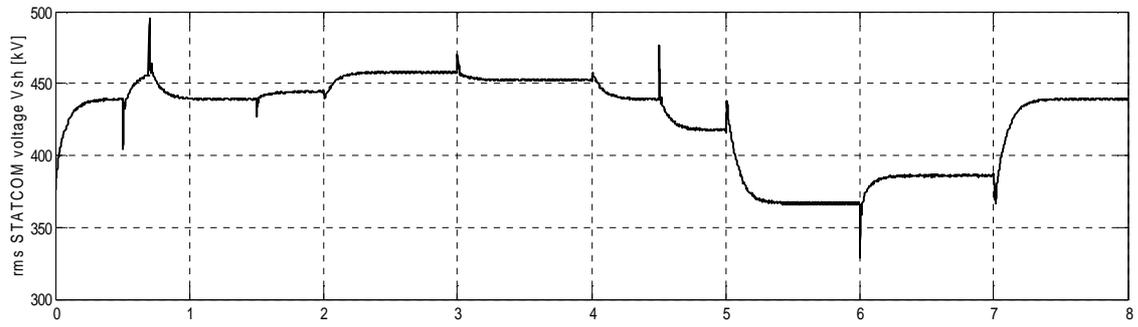
Tableau .3.5. Indices de performance en situation perturbée (25% d'incertitude paramétrique) dans le cas de la commande par les modes glissants (p.u)

	P	Q	V_t	U_C
Indice de performance IAE	0.0397	0.0699	0.0298	0.0419

3.5.2.2.3. Cas avec perturbation externe :

Dans cette partie, une chute de tension de 30% se produit au côté récepteur à l'instant $t=0.5$ s et dure 200 ms.





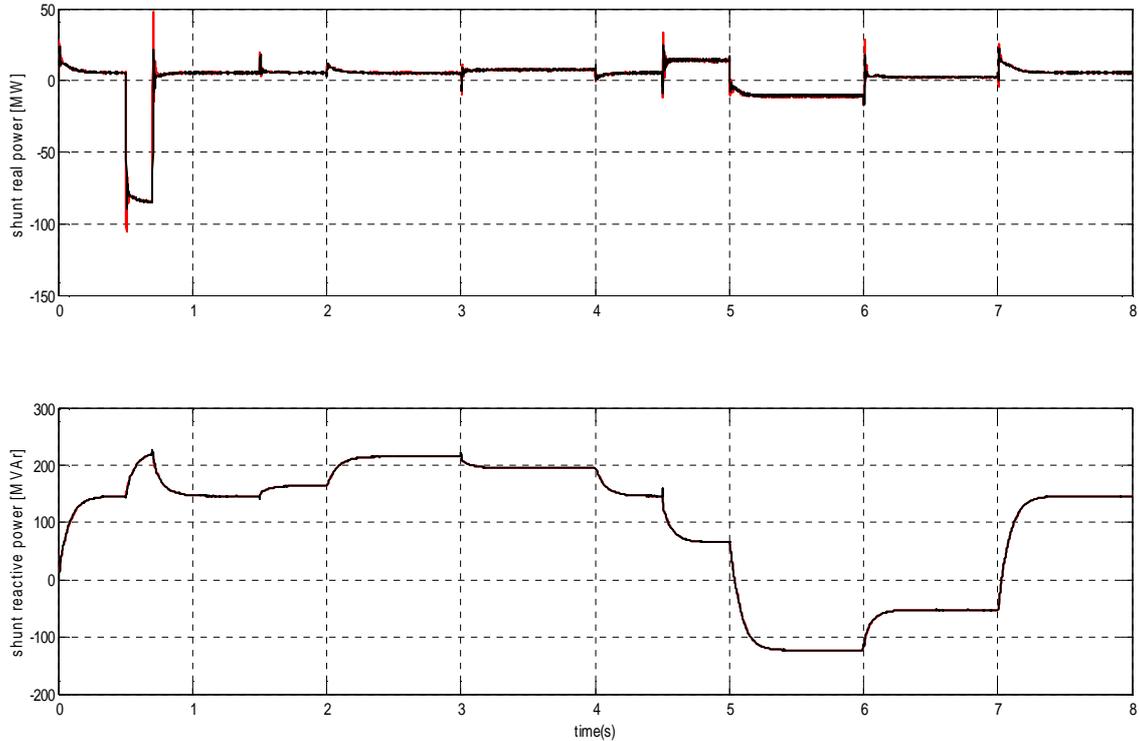


Figure.3.8. Résultats de simulation du système en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par les modes glissants

Tableau .3.6. Indices de performance en situation perturbée (chute de tension de 30%) dans le cas de la commande par les modes glissants (p.u)

	P	Q	V_t	U_C
Indice de performance IAE	0.050	0.0644	0.0253	0.0915

3.5.2.3. Interprétation des résultats :

Les figures 3.6, 3.7 et 3.8 ainsi que les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6 montrent que la poursuite des différentes grandeurs est effective et que les tensions de commande sont admissibles que ce soit en situation normale ou en situations perturbées. Le régulateur a permis de diminuer significativement la sensibilité aux variations paramétriques grâce à son caractère robuste.

Dans les situations perturbées, les réponses se sont nettement améliorées en comparaison à celles obtenues dans le cas de la commande par retour d'état avec intégrateur. De plus, le régulateur a assuré un bon découplage Watt/Var.

3.6. Conclusion :

Dans le présent chapitre, en plus de la synthèse de deux régulateurs de tension pour le sous-système externe, deux techniques de commande multivariable ont été appliquées à la commande du sous-système interne de l'UPFC pour réaliser la poursuite des courants ; entre autres : la commande par retour d'état avec intégrateur et la commande par modes glissants. Les résultats de simulation dans les trois cas étudiés ont montré la supériorité de la technique de commande par les modes glissants.

Dans le travail présenté dans ce projet, la problématique était de commander le fonctionnement d'une interconnexion d'un réseau électrique qui ne cesse d'évoluer vu les changements continus de la production, de la topologie et de la charge. Nous avons passé en revue toutes les solutions conventionnelles (compensations, construction de nouveaux ouvrages, délestage ...) souvent utilisées par les exploitants des réseaux électriques, partout à travers le monde. Etant limitées par la vitesse de réponse et du coût, ces solutions restent insuffisantes.

Les FACTS, ces dispositifs à base d'électronique de puissance apparus il y a environ vingt ans, se substituent d'une façon très efficace aux solutions techniques conventionnelles. En effet, en plus de leurs réponses quasi-instantanées, ils permettent d'exploiter les ouvrages près de leurs limites thermiques voire même de stabilité. De plus, ils sont économiquement très rentables mais à long terme.

Dans ce projet de fin d'études, un dispositif FACTS de type UPFC a été étudié. Un modèle triphasé dans l'espace d'état a été établi puis, projeté dans un repère synchrone, cela a donné un modèle plus simple (réduit) et continu. Le modèle de l'UPFC a été testé par simulation dans le cas de la commande de l'écoulement de puissance à travers une interconnexion électrique à très haute tension. Ce modèle a été utilisé pour démontrer les capacités de l'UPFC dans la régulation des puissances active et réactive ainsi que la tension du bus continu et celle du nœud de connexion shunt. Deux régulateurs ont été conçus et analysés : une commande par retour d'état avec action intégrale et une commande par modes glissants. Une comparaison entre les deux commandes a été faite pour la commande de l'UPFC dans trois situations de fonctionnement différentes à savoir : une situation normale et une situation perturbée ; en considérant des perturbations internes (variations paramétriques) puis externes (chute de tension au nœud récepteur).

Les résultats de simulation ont montré que les deux techniques de commande appliquées au pilotage de l'UPFC ont permis d'avoir des réponses satisfaisantes en fonctionnement normal. Cependant, dans le cas où des incertitudes paramétriques sont considérées, la commande par modes glissants est meilleure. En effet, comparée à la commande par retour d'état avec intégrateur, celle-ci impose une réponse dynamique plus rapide, plus précise et moins sensible aux variations paramétriques et aux changements de

consigne. De même, dans le cas où la tension côté récepteur chute, c'est la commande par modes glissants qui arrive à rejeter la perturbation rapidement et efficacement.

Comme perspectives à ce travail, il serait intéressant d'une part, de tester d'autres techniques de commande pour voir s'il est possible d'améliorer davantage le fonctionnement de l'UPFC, et d'autre part, d'utiliser l'UPFC pour l'amortissement des oscillations hypo-synchrones engendrées par l'apparition d'une contingence sévère (défaut, variation brusque de la charge ...).

La transformation de Park dite transformation d-q est la transformation des grandeurs électriques triphasées (espace vectoriel tridimensionnel) en grandeurs synchrones (espace vectoriel bidimensionnel). L'avantage marquant de cette transformation est que les grandeurs après transformation ne sont plus alternatives mais continues par conséquent, elles sont facilement manipulables.

Cette transformation se fait en deux étapes. La première étape consiste à projeter les grandeurs alternatives triphasées dans le repère diphasé fixe (a, b) (transformation de Concordia) ; dans ce repère les grandeurs biphasées restent sinusoïdales (figure A.1). Vient par la suite la seconde étape (transformation d-q) qui à partir des projections dans le repère fixe renvoie les composantes du vecteur tournant dans le repère synchrone (tournant à la vitesse de synchronisme).

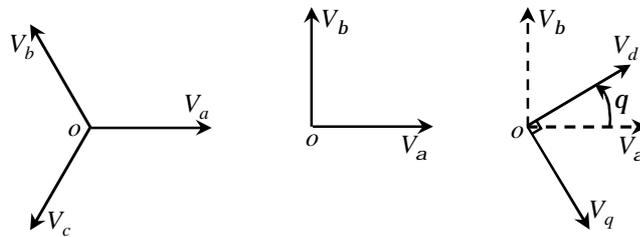


Figure.A.1. Transformation de Park d'un système de tension triphasé.

L'expression analytique de la transformation intermédiaire (Concordia) est donnée par:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

Où la matrice $\mathbf{T}_{\alpha\beta}$ est telle que :

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Avec V_a : Première composante diphasée,

V_b : Seconde composante diphasée,

V_0 : Composante homopolaire,

$(V_a V_b V_c)^T$: Système de tension triphasée.

La matrice de transformation inverse de Concordia est donnée par:

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La transformation d-q est donnée par l'expression (rotation d'un angle q par rapport à l'axe normal au plan (a, b) dans le sens direct)

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{dq} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Où : la matrice \mathbf{T}_{dq} est telle que :

$$\mathbf{T}_{dq} = \begin{bmatrix} \cos(q) & \sin(q) & 0 \\ -\sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Et où : q est l'angle de synchronisme formé par les vecteurs \dot{V}_a et \dot{V}_d ; il est donné par l'expression :

$$\theta = a \tan 2(V_\beta, V_\alpha) \quad (6)$$

La matrice de transformation d-q inverse est donnée par l'expression :

$$\mathbf{T}_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Il est à noter que toutes les transformations précédentes sont orthogonales ; elles conservent donc la puissance instantanée dans les circuits équivalents.

La matrice de transformation de Park est le produit des matrices de transformation \mathbf{T}_{dq} et $\mathbf{T}_{\alpha\beta}$; elle est donnée par :

$$\mathbf{P} = \mathbf{T}_{dq} \cdot \mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(q) & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ -\sin(q) & -\sin(q - \frac{2p}{3}) & -\sin(q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

La matrice inverse est :

$$\mathbf{P}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(q - \frac{2p}{3}) & -\sin(q - \frac{2p}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(q + \frac{2p}{3}) & -\sin(q + \frac{2p}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Transformation de Park d'une équation électrique d'un circuit triphasé inductif :

Le circuit de la figure A.2 représente une phase d'un circuit triphasé inductif équilibré; il est régi par l'équation électrique donnée par :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & R + L \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

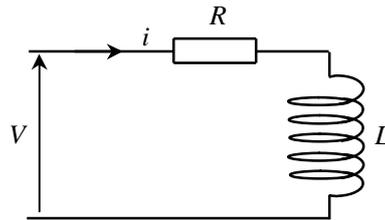


Figure.A.2. Une phase d'un circuit électrique triphasé inductif.

Sous forme compacte, l'équation (10) peut être réécrite comme suit :

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{R} \mathbf{I}_{abc} + L \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{abc} \quad (11)$$

$$\text{Avec : } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_{abc} = (i_a \quad i_b \quad i_c)^T$$

$$\mathbf{V}_{abc} = (V_a \quad V_b \quad V_c)^T$$

Par application de la transformation inverse de Park à l'équation (11) ; il est possible d'écrire :

$$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{R}(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{dq}) + L \frac{d}{dt}(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{dq}) \quad (12)$$

Soit en multipliant à gauche par \mathbf{P} :

$$\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{P}\mathbf{R}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{dq} + L\mathbf{P}\left(\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt}\mathbf{I}_{dq} + \mathbf{P}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{dq}\right) \quad (13)$$

Ce qui donne :

$$\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{R}\mathbf{I}_{dq} + L\left(\mathbf{P}\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt}\mathbf{I}_{dq} + \frac{d}{dt}\mathbf{I}_{dq}\right) \quad (14)$$

Il est clair que :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(q) & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q + \frac{2p}{3}) \\ -\sin(q) & -\sin(q - \frac{2p}{3}) & -\sin(q + \frac{2p}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(q) & -\cos(q) & 0 \\ -\sin(q - \frac{2p}{3}) & -\cos(q - \frac{2p}{3}) & 0 \\ -\sin(q + \frac{2p}{3}) & -\cos(q + \frac{2p}{3}) & 0 \end{bmatrix} \frac{dq}{dt} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (15)$$

En remplaçant dans l'équation (14) le terme $\mathbf{P}\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt}$ par son expression, celle-ci devient :

$$\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{R}\mathbf{I}_{dq} + \begin{bmatrix} 0 & -Lw & 0 \\ Lw & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{I}_{dq} + L \frac{d}{dt}\mathbf{I}_{dq} \quad (16)$$

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour le circuit diphasé équivalent :

$$\begin{cases} V_d = Ri_d - Lwi_q + L \frac{di_d}{dt} \\ V_q = Ri_q + Lwi_d + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (17)$$

Expressions des puissances dans le repère synchrone :

Etant donné que les axes du repère fixe sont tout le temps orthogonaux, on peut considérer l'axe a comme étant un axe des réels et l'axe b comme axe des imaginaires (figure A.3).

Dans ce cas de figure, l'expression de la tension et celle du courant sont données par :

$$\mathbf{V} = V_a + jV_b \quad (18.a)$$

$$\mathbf{I} = I_a + jI_b \quad (18.b)$$

La puissance apparente est donnée par l'expression :

$$\begin{aligned} S &= \mathbf{V} \cdot \bar{\mathbf{I}} = (V_a + jV_b) \cdot (I_a - jI_b) \\ &= (V_a I_a + V_b I_b) + j(V_b I_a - V_a I_b) \end{aligned} \quad (19)$$

On en déduit les expressions de la puissance active et réactive dans le repère fixe :

$$P = V_a I_a + V_b I_b \quad (20.a)$$

$$Q = V_b I_a - V_a I_b \quad (20.b)$$

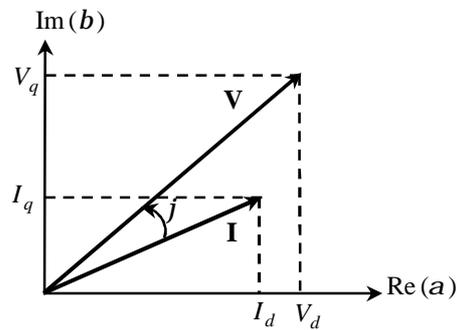


Figure.A.3. Représentation vectorielle de la tension et du courant dans le repère d-q.

Pour exprimer les puissances active et réactive dans le repère synchrone, on utilise la matrice de transformation inverse \mathbf{T}_{dq}^{-1} et on exploite les expressions (20.a) et (20.b) :

$$\begin{aligned} P &= V_a I_a + V_b I_b = \mathbf{V}_{\alpha\beta}^T \mathbf{I}_{\alpha\beta} \\ &= (\mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{V}_{dq})^T \mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{I}_{dq} \end{aligned} \quad (21)$$

Sachant que la matrice \mathbf{T}_{dq}^{-1} est unitaire donc égale à sa transposée, l'équation (21) devient :

$$\begin{aligned} P &= \mathbf{V}_{dq}^T \mathbf{T}_{dq} \mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{I}_{dq} \\ &= \mathbf{V}_{dq}^T \mathbf{I}_{dq} \end{aligned} \quad (22)$$

Finalement, la puissance active est donnée par l'expression (23) :

$$P = V_d I_d + V_q I_q \quad (23)$$

De même,

$$\begin{aligned} Q &= V_b I_a - V_a I_b = \mathbf{V}_{\alpha\beta}^T \mathbf{DI}_{\alpha\beta} \\ &= (\mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{V}_{dq})^T \mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{DI}_{dq} \end{aligned} \quad (24)$$

Où : \mathbf{D} est la matrice carrée définie par :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Le développement de l'équation 17 entraîne :

$$\begin{aligned} Q &= \mathbf{V}_{dq}^T \mathbf{T}_{dq} \mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{DI}_{dq} \\ &= \mathbf{V}_{dq}^T \mathbf{DI}_{dq} \end{aligned} \quad (25)$$

Finalement, la puissance réactive est donnée par l'expression (26) :

$$Q = V_q I_d - V_d I_q \quad (26)$$

Références bibliographiques

- [1] P. KUNDUR, "Power System Stability and Control", Electric Power Research Institute, Palo Alto, California 1993.
- [2] N. HINGORANI, L. GYUGYI, "Understanding FACTS : concepts and technology of flexible AC transmission systems", New York, USA: IEEE Press, 2000.
- [3] A. HAMACHE, H. CHEKIREB, "Adaptive Sliding Mode Control of HV Power System using UPFC", Mediterranean Journal of Measurement and Control. Vol .9, No .3, 2013.
- [4] Gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE, "Mémento de la sûreté du système électrique", 2004, EDF France.
- [5] E. S. GHOLIPOUR, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse de doctorat, université Henry Poincaré, 2003, France.
- [6] A. HAMACHE, H. CHEKIREB, "Multivariable Second Order Sliding Mode based Controller for Unified Power Flow Controller", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014.
- [7] A. HAMACHE, H. CHEKIREB, "Commande par Modes Glissants d'une Interconnexion THT muni d'un dispositif FACTS de type UPFC", International Conference on Electrical Engineering, Electronics and Automatics'10 Bejaia, Algeria, 2-3 November 2010.
- [8] A. HAMACHE, H. CHEKIREB, "Commande Linéarisante centralisée d'une liaison électrique THT équipée d'un UPFC", Journal of Technology de l'ENP, 2012.
- [9] ALI ZANGENEH, AHAD KAZEMI, MAJID HAJATIPOUR AND SHAHRAM JADID, "A Lyapunov theory based UPFC controller for power flow control", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 31, 2009, pp. 302-308.
- [10] M. SEBAA, T. ALLAOUI, M. DENAI, A. CHAKER, "A robust adaptive fuzzy control of a unified power flow controller", Turk J Elec Eng & Comp Sci 2012; 20:87 – 98.
- [11] C. CHE, "Cours d'asservissement linéaire continu", Université de Metz, France.

ملخص:

في هذا العمل تم اقتراح قانوني تحكم لجهاز UPFC للتحكم في تدفق الاستطاعة، التوتر المستمر و التوتر المتناوب. تتمثل هذه القوانين في ارجاع الحالة ونظام الانزلاق. في البداية تمت كتابة نموذج UPFC في فضاء الحالة باستعمال معادلات كرشوف و تحويل dq.

يحتوي هذا النموذج على منبعين للتوتر و رابطة للتيار المستمر. بهدف ازالة تأثيرات ارتيايات النمذجة، قمنا بتطوير طبعات مدرعة لقانوني التحكم هذين. قمنا بعد ذلك بمحاكاة اشتغال UPFC داخل تركيب خط كهربائي ذو توتر عالي جدا يربط بين عقدتين مستقرتين.

نتائج المحاكاة اثبتت انه يمكن التحكم في تدفق الاستطاعة بطريقة جد مرضيه اضافة الى ان قانون التحكم بالانزلاق يبدو اكثر نجاعة بخصوص السرعة، الدقة و ازالة التشويش.

تأملك مفتاحيه: UPFC، تدفق الاستطاعة، نموذج ديناميكي، خط توتر عالي جدا.

Résumé :

Dans ce travail ont été proposées deux lois de commande appliquées à un dispositif UPFC pour commander le flux de puissance, la tension continue ainsi que la tension shunt. Ces techniques de commande sont basées sur le retour d'état et les modes glissants. D'abord, nous avons établi un modèle dynamique de l'UPFC dans l'espace d'état basé sur les équations de Kirchhoff et la transformation (d-q). Ce modèle inclut les deux sources de tension et la liaison à courant continu. De plus, afin d'éliminer l'effet des incertitudes qui peuvent affecter ce modèle, nous avons développé les versions robustes des lois de commande. Dans le cas où les commandes proposées sont appliquées, nous avons simulé le fonctionnement de l'UPFC équipant une ligne électrique (THT) reliant deux nœuds stables. Les résultats de simulation ont montré qu'il est possible de commander le flux de puissance d'une façon satisfaisante. De plus, la commande par modes glissants s'avère plus performante en termes de rapidité, précision et rejet des perturbations.

Mots clés : UPFC, flux de puissance, modèle dynamique, modes glissants, ligne THT.

Abstract :

In this work has been proposed two control laws applied to a UPFC device for controlling power flow, DC voltage and shunt voltage. Those control techniques are based on state feedback and sliding modes. First, we established a state-space dynamic model of UPFC based on Kirchhoff's equations and (d-q) transformation. This model includes the two voltage source inverters and the DC bus voltage link. Furthermore, in order to cancel the effect of uncertainties which can affect this plant, we developed the robust versions of control laws. In the case where the proposed control schemes are used, we simulated the operation of UPFC equipping a High Voltage (EHV) electrical line interconnecting two stable nodes. The simulation results showed that it is possible and achievable to control the power flow with satisfactory performances. The sliding mode based control seems to be more powerful in terms of speed, accuracy and disturbance rejection.

Keywords: UPFC, power flow, dynamic plant, sliding modes, EHV line.