

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DÉPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME

D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN AUTOMATIQUE

THÈME

**Commande prédictive d'un dispositif UPFC
équipant une ligne HT d'un réseau électrique**

Réalisé par :

BELAHMAR Ishak
HAMACHE Djawad

Encadré par :

Pr. CHEKIREB Hachemi
M. A. HAMACHE Amar

Juin 2011

ملخص :

يهدف هذا العمل المقدم في هذه المذكرة الى التحكم المتنبئ لجهاز UPFC الذي يزود خط كهربائي ذو توتر عالي لشبكة كهربائية. بعد طرح إشكالية الشبكة الكهربائية وحالة فنية عن أجهزة FACTS، تطرقنا الى تقديم مبدأ عمل جهاز UPFC و نمذجة رياضية لشبكة كهربائية مزودة بجهاز UPFC. بعد ذلك قمنا بتطبيق تقنيتين للتحكم بهدف التحكم في تدفق الإستطاعة العابرة في الخط ، التقنية الأولى هي التحكم PI. مزود بالتعويض ثم تطبيق تقنية التحكم المتنبئ من نوع MPC لغرض دراسة إستجابة النظام لمختلف حالات العمل قمنا بإجراء محاكاة للتقنيتين التحكم السابقتين ، وفي النهاية المقارنة بين التقنيتين أبرزت إيجابيات التحكم المتنبئ بالنسبة للتحكم الكلاسيكي PI.

كلمات مفتاحية : التحكم المتنبئ، UPFC ، توترعالي ، شبكة كهربائية ، شبكة كهربائية ثلاثية الطور، خط كهربائي، تدفق الإستطاعة
تحويلة PARK، MPC، تحكم PI ، FACTS

Résumé Dans ce travail, notre intérêt s'est porté sur la commande prédictive d'un dispositif UPFC équipant une ligne H.T d'un réseau électrique. Après avoir présenté une problématique sur les réseaux électriques, et un état de l'art sur les FACTS, nous avons abordé le principe de fonctionnement de l'UPFC, puis le modèle mathématique du réseau muni d'un UPFC. Ensuite nous avons appliqué deux stratégies de commande en vue de régler les flux des puissances transitées dans la ligne. La première est une commande classique de type PI muni d'une compensation FEEDFORWARD. La seconde est la commande prédictive de type MPC. Des simulations sont faites pour les deux commandes afin de bien visualiser le comportement du système dans différentes situations de fonctionnement. Enfin, une étude comparative des deux commandes est mise en évidence pour bien illustrer les performances de la commande prédictive par rapport à la commande classique PI.

Mots Clés : Commande prédictive, UPFC, H.T, réseau électrique, réseau triphasé, ligne électrique, flux de puissance, FACTS, régulation PI, FEEDFORWARD, MPC, transformation de Park.

Abstract In this work, our interest has been focused upon predictive control of a UPFC-equipped high-voltage line of an electrical supply network. After having presented problems on the electrical supply networks, and a state of art on FACTS, we dealt with the UPFC operation principle, then with the UPFC-supplied-with network mathematical model. Then we applied two control strategies in order to regulate the forwarded powers flows in the line. The first is a traditional PI control type provided with compensation FEED-FORWARD. The second is a MPC type predictive control. Simulations are made in order to visualize the system's behavior using either control types, in various operating situations. At last, a comparative study between both control strategies is highlighted so that to illustrate predictive control performances compared to traditional PI control ones.

Keywords : Predictive control, UPFC, High voltage, electrical network, three-phase network, electrical line, power flow, FACTS, PI control, FEED-FORWARD, MPC, Park transform.

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger sous la direction de nos deux promoteurs Mr H. CHEKIREB et Mr A. HAMACHE Auxquels nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements pour leurs précieux conseils, leur disponibilité, leurs aide et leurs patience tout au long de notre travail.

Nous tenons à remercier Mr M.TADJINE et Mr MS.BOUCHERIT pour leur aide et leur disponibilité.

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

Nous remercions nos enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique pour leurs efforts voués à nous transmettre le savoir, en particulier ceux du département d'Automatique.

Nous tenons à exprimer notre très grande gratitude, et notre profonde affection à nos chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien, durant toutes ces années d'études.

Nous remercions également tous nos amis et camarades, pour leurs encouragements et leur précieux soutien.

Dédicaces

Je dédie ce travail de fin d'études d'ingéniorat : A ma très chère grand-mère, grâce à qui j'ai pu atteindre ce niveau, qui a été toujours à mes côtés pour me soutenir dans les moments les plus difficiles, pour me conseiller, que Dieu lui donne longue vie et bonne santé.

A mes très chers parents, qui m'ont encouragé pendant toute ma formation, du primaire à l'université, par leurs conseils et dépenses qui m'ont permis d'en arriver au bout, Que Dieu leur donne longue vie et bonne santé.

A tous les membres de ma famille : frères, sœurs, oncles ainsi qu'à leurs femmes, tantes et leurs maris.

A mon oncle khali Belkacem et toute sa famille.

Aux petits Ramzi, Waïl, Rayne, Milissa, Aness, Haïtham, Ziad. A tous mes amis d'enfances.

A tous mes amis en particulier mon binôme Ishak, Saïd, Imad, Toufik, Rachid, Omar, Abd Allah, Hocine, Habib, Khaled, Djamel, Amine ainsi que tous mes amis de l'Ecole Nationale Polytechnique et de l'université de Bejaïa.

A tous mes amis...

Djawad

A ma très chère mère
A mon défunt père et à ma grand-mère
A mes frères et à ma soeur
A tous mes amis et collègues de l'Ecole Nationale Polytechnique
A tous mes anciens amis

ishak

Table des matières

Introduction générale	15
1 Problème de commande des réseaux électriques	17
1.1 Introduction	17
1.2 Le réseau électrique	18
1.3 Réseaux de transport et de répartition	18
1.4 Réseaux de distribution	19
1.5 Problèmes survenant sur le réseau	19
1.5.1 Chute de tension	19
1.5.2 Déséquilibre de tension	20
1.5.3 Creux de tension	20
1.5.4 Surtension	20
1.5.5 Variation de fréquence	21
1.5.6 Présence d'harmoniques	21
1.5.7 Défaits de ligne	22
1.6 Solutions classiques aux problèmes de tension	22
1.6.1 Élévation de tension	22
1.6.2 Compensation traditionnelle	22
1.6.3 Filtres d'harmoniques	24
1.7 Les systèmes FACTS	25
1.7.1 Définition	25

1.7.2 Composants utilisés	26
1.8 Classification des FACTS	26
1.8.1 FACTS parallèles	27
1.8.2 FACTS série	29
1.8.3 Compensateurs hybrides	31
1.9 Conclusion	33
2 Modélisation du système	35
2.1 Introduction	36
2.2 Fonctionnement de l'UPFC	36
2.3 Etablissement du modèle	37
2.4 Transformation de Park	41
2.5 Projection du modèle dans le repère de Park	42
2.5.1 Equations d'état	42
2.5.2 Calcul des puissances	45
2.5.3 Identification des courants de référence	45
2.6 Conclusion	46
3 Commande classique par PI	48
3.1 Introduction	49
3.2 Reformulation du modèle	49
3.3 Expression du régulateur	50
3.4 Calcul des commandes	50
3.5 Simulation et résultats	51
3.5.1 Poursuite d'une référence de puissance	51
3.5.2 Réseau perturbé	54
3.6 Conclusion	58
4 Commande prédictive	59
4.1 Introduction	60
4.2 Différentes variantes de la commande prédictive	60

4.3	Principe de la commande prédictive	62
4.4	Choix du modèle du processus	64
4.5	Mise en forme du modèle	65
4.5.1	Échantillonnage	65
4.5.2	Modèle incrémenté	65
4.5.3	Modèle standard	66
4.6	Le critère de performance	68
4.7	Prédiction	69
4.8	Mise sous forme standard	71
4.9	Le problème standard	73
4.9.1	Formulation du problème standard	73
4.9.2	Résolution du problème standard	73
4.10	Application de la commande sur l'UPFC	77
4.11	Simulation et résultats	77
4.11.1	Influence des paramètres	77
4.11.2	Poursuite d'une référence de puissance	83
4.11.3	Réseau perturbé	85
4.12	Comparaison des deux commandes	89
4.13	Conclusion	91
	Conclusion générale	92
	A Modélisation du réseau électrique	98
	B Régulation de V_t et V_c	99
B.1	Régulation de la tension au point de raccordement	99
B.2	Régulation de la tension du condensateur	99
	C Relations dans le repère de Park	102
C.1	Tension au point de raccordement	102
C.2	Calcul de puissances dans le repère de Park	102

C.2.1	Puissance active	103
C.2.2	Puissance réactive	103

Table des figures

1.1	Structure d'un STATCOM et schéma équivalent	28
1.2	Diagramme vectoriel relatif à l'échange exclusif de puissance réactive	29
1.3	Schéma du SSSC	31
1.4	Schéma d'un IPFC	32
1.5	Schéma d'un UPFC	33
2.1	Schéma de base d'un UPFC	37
2.2	Schéma de L'UPFC, courants et tensions	38
2.3	Schéma d'identification de références	46
3.1	Schéma de régulation PI	51
3.2	Puissance active en aval	53
3.3	Puissance réactive en aval	53
3.4	Courant injecté par le STATCOM	53
3.5	Tension injectée par le SSSC	53
3.6	Tension efficace au noeud de raccordement	53
3.7	Tension aux bornes du condensateur de couplage	53
3.8	Puissance active en aval	55
3.9	Puissance réactive en aval	55
3.10	Courant injecté par le STATCOM	55
3.11	Tension injectée par le SSSC	55
3.12	Tension efficace au noeud de raccordement	55

3.13	Tension aux bornes du condensateur de couplage	55
3.14	Courant de ligne	56
3.15	Puissance active en aval	57
3.16	Puissance réactive en aval	57
3.17	Courant injecté par le STATCOM	57
3.18	Tension injectée par le SSSC	57
3.19	Tension efficace au noeud de raccordement	57
3.20	Tension aux bornes du condensateur de couplage	57
3.21	Courant de ligne	58
4.1	Principe de la commande prédictive	63
4.2	Boucle de réglage de la commande prédictive	63
4.3	Organigramme de l'approche MPC	76
4.4	Puissance active en aval	78
4.5	Puissance réactive en aval	78
4.6	Courant injecté par le STATCOM	79
4.7	Tension injectée par le SSSC	79
4.8	Puissance active	81
4.9	Puissance réactive	81
4.10	Courant injecté par le STATCOM	82
4.11	Tension injectée par le SSSC	82
4.12	Puissance active en aval	84
4.13	Puissance réactive en aval	84
4.14	Courant injecté par le STATCOM	84
4.15	Tension injectée par le SSSC	84
4.16	Tension efficace au noeud de raccordement	84
4.17	Tension aux bornes du condensateur de couplage	84
4.18	Puissance active en aval	86
4.19	Puissance réactive en aval	86
4.20	Courant injecté par le STATCOM	86

4.21	Tension injectée par le SSSC	86
4.22	Tension efficace au noeud de raccordement	86
4.23	Tension aux bornes du condensateur de couplage	86
4.24	Courant de ligne	87
4.25	Puissance active en aval	88
4.26	Puissance réactive en aval	88
4.27	Courant injecté par le STATCOM	88
4.28	Tension injectée par le SSSC	88
4.29	Tension efficace au noeud de raccordement	88
4.30	Tension aux bornes du condensateur de couplage	88
4.31	Courant de ligne	89
A.1	Schéma du réseau étudié	98
B.1	Schéma de réglage de V_t	99
B.2	Schéma du bus continu	100
B.3	Schéma de réglage de la tension V_c	101

Table d'abréviations

Abréviations

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSR	Thyristor Switched Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
SVC	Static Var Compensator
TCBR	Thyristor Control Breaking Resistor
STATCOM	Static Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor
TSSR	Thyristor Switched Series Reactor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
IPFC	Interline Power Flow Controller
UPFC	Unified Power Flow Controller
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn Off

Grandeurs et signaux

V_s	Tension du réseau en amont
V_r	Tension du réseau en aval
V_{sssc}	Tension injectée par le SSSC
V_{stat}	Tension générée par le STATCOM
$V_{sssc,dq}$	Tension injectée par le SSSC écrite dans le repère de Park
$V_{stat,dq}$	Tension générée par le STATCOM écrite dans le repère de Park
V_t	Tension au point de raccordement
V_c	Tension de la capacité de couplage
i_s	Courant dans la ligne en amont
i_r	Courant dans la ligne en aval
i_{sh}	Courant injecté par le STATCOM
$i_{r,dq}$	Courant de la ligne en aval écrit dans le repère de Park
$i_{sh,dq}$	Courant injecté par le STATCOM écrit dans le repère de Park
P_r	Puissance active de la ligne en aval
Q_r	Puissance réactive de la ligne en aval
P_{sssc}	Puissance active injectée par le SSSC
δ	Angle de transport

Paramètres de modélisation

R_s	Résistance de la ligne en amont
L_s	Inductance de la ligne en amont
R_r	Résistance de la ligne en aval
L_r	Inductance de la ligne en aval
R_{sh}	Résistance Shunt
L_{sh}	Inductance Shunt
C	Capacité du condensateur de couplage
R_c	Résistance des pertes des convertisseurs

Introduction générale

Avec la croissance démographique et le développement industriel que connaît le monde, la demande en énergie électrique est en croissance continue. De plus, dans notre ère, les charges sont devenues très sensibles aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations et requièrent une énergie de meilleure qualité. Dans l'industrie, une perte d'alimentation peut causer l'interruption de différents processus de production et occasionner des pertes considérables.

De ce fait, pour maintenir l'équilibre entre la production et la consommation, des centrales électriques sont installées, de nouvelles lignes sont construites, etc... Néanmoins, cela reste insuffisant. Par conséquent, il est aujourd'hui primordial d'avoir des réseaux maillés et de travailler aux limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

L'amélioration de la qualité de l'énergie, l'augmentation de la puissance transitée et le contrôle des réseaux existants peuvent être obtenus grâce à la mise en place de nouvelles technologies. Pour exploiter les réseaux électriques près de leurs limites, de nouveaux dispositifs ont vu le jour sous l'appellation «FACTS». Ces systèmes issus de l'électronique de puissance permettent d'améliorer grandement la performance des réseaux électriques et apportent des solutions dynamiques, efficaces et éprouvées à la commande des réseaux.

Notre projet porte principalement sur l'étude et la commande de l'un de ces dispositifs les plus performants à savoir l'UPFC. Pour accomplir cette tâche, nous avons divisé notre travail sur plusieurs chapitres.

Dans le premier, on exposera les principaux problèmes affectant les réseaux électriques et les solutions classiques utilisés pour pallier à ces problèmes. Par la suite, on présentera les principaux dispositifs FACTS qui permettent une commande plus intelligente et plus souple des flux de puissance et la compensation des chutes de tension dans les réseaux.

Dans le second chapitre, est décrit le fonctionnement de l'UPFC et est établi un modèle de celui-ci dans l'espace d'état. Ensuite, nous introduisons la transformation de Park qui permet de manipuler des grandeurs continues au lieu des grandeurs triphasées. Enfin, nous projetons le modèle précédemment obtenu dans le repère tournant de Park.

Dans le troisième chapitre, on commandera le réseau muni d'un UPFC par un régulateur PI associé à une compensation par FEED-FORWARD. Nous effectuons ensuite des simulations du système dans différentes conditions (fonctionnement normal, court-circuit ...), et analysons les résultats obtenus.

Le quatrième chapitre est consacré à la commande prédictive, où nous présentons son principe et ses paramètres. Par la suite, on va entamer la formulation théorique de celle-ci en détaillant les étapes constituant l'algorithme en partant de la mise en forme du modèle jusqu'à la résolution du problème de commande. On va l'appliquer par la suite sur la ligne de tension équipée d'un UPFC et effectuer des simulations dans les mêmes conditions que celles du PI.

On effectuera aussi une étude comparative des deux commandes, où l'on présentera les avantages et inconvénients de la commande prédictive.

Finalement, on termine ce projet par une conclusion générale où sont résumés les résultats de notre travail et nous proposons quelques perspectives pour les travaux à venir.

Chapitre 1

Problème de commande des réseaux électriques

1.1 Introduction

Avec le développement technologique et industriel, la demande en énergie électrique est en augmentation continue, le réseau de transport d'énergie électrique ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermiques des lignes, ajouté à cela la difficulté de constructions de nouvelles lignes à cause des contraintes environnementale, écologique et économique. Le réseau électrique doit faire face aux besoins des consommateurs et d'acheminer l'énergie électrique aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique ; l'augmentation de la capacité de transit de puissance, et l'amélioration de la qualité de l'énergie. Par conséquent, ces contraintes seront de plus en plus difficile à satisfaire dans les réseaux fortement interconnectés en utilisant des dispositifs de réglage classique à faible fréquence de manœuvre, et à risque de vieillissement accéléré tel que les transformateurs déphaseurs, groupes générateurs et les compensateurs de types série et shunt.

La compagnie américaine EPRI (*Electric Power Research Institute*) a lancé en 1988 un projet d'étude d'une nouvelle génération de dispositif de contrôle rangés sous l'appellation FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) qui met en relief les

avantages de l'électronique de puissance dans la commande, et le contrôle du transport d'énergie électrique en courant alternatif afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans le réseau électrique, et d'améliorer sa stabilité dynamique.

1.2 Le réseau électrique

L'énergie électrique est transportée et distribuée par des lignes aérienne et des câbles souterrains ou sous-marins du point de sa production vers celui de son utilisation, constituant ce qui est appelé un *réseau électrique*. Ces réseaux fonctionnent en courant alternatif à la fréquence de 50Hz, et permettent à l'aide de transformateurs de choisir le niveau de tension le plus adapté techniquement et économiquement, à la production, au transport, à la distribution et à la consommation de l'énergie électrique. En outre, la maîtrise des courts-circuits et la coupure des courants en cas de défaut sont nettement plus aisées à réaliser en courant alternatif qu'en courant continu. Les réseaux électriques modernes en courant alternatif sont organisés en deux types, d'une part, les réseaux de transport et de répartition à tension élevée ($>30\text{kV}$ jusqu'à 400kV) et à structure maillée, d'autre part, les réseaux de distribution à tension typiquement inférieure à 30kV et à structure radiale [15].

1.3 Réseaux de transport et de répartition

Les réseaux de transport et de répartition sont alimentés par des générateurs de grande puissance (dans les 1000 MW) dont la puissance nominale et la localisation font l'objet d'une planification centralisée et dont la production est coordonnée de manière centralisée sur des zones très étendues. Cette production, dite centralisée, participe au contrôle de la fréquence et la tension, nécessaire pour assurer un fonctionnement stable du réseau. Ces réseaux maillés accueillent actuellement l'essentiel de la production mais un faible nombre de clients directement raccordés en haute tension. Cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une production, etc. En effet, lors de l'ouverture d'une ligne, le fait d'avoir cette structure

maillée permet au flux de puissance de trouver un nouveau chemin pour contourner cette ligne en défaut et donc de garantir la continuité de l'alimentation en aval du problème.

1.4 Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution fonctionnent à des tensions inférieures à 30kV et présentent des structures radiales, pour des raisons de coût et de simplicité technique. Ils sont alimentés par un nombre restreint de postes à partir du réseau de transport et de répartition. Ils ne comportent, à l'heure actuelle, que très peu d'unités de production, mais par contre alimentent l'essentiel des consommateurs. Dans la structure radiale, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation vers le point de consommation considérée. Ces flux ainsi que les tensions sont déterminés essentiellement par les charges. Ceci permet notamment la localisation et l'élimination rapide de défauts, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources [16].

1.5 Problèmes survenant sur le réseau

1.5.1 Chute de tension

Les chutes de tension apparaissent lors du transit de puissance dans une ligne. Lorsque celui-ci est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante [11].

Parmi les facteurs qui causent la chute de tension, on trouve :

Production trop éloignée de la consommation

Dans la plupart des cas, les sources de production de l'énergie électrique se trouvent très éloignées des zones de consommation. Le transport de l'énergie s'accompagne de chutes dues au transport de l'énergie réactive.

Manque local de puissance réactive

La chute de tension est principalement due à la puissance réactive transportée par la ligne. Et plus la demande de puissance croît, plus la chute est grande, et le réseau devient impuissant face à la demande.

1.5.2 Déséquilibre de tension

Il est caractérisé par les asymétries d'amplitude ou de déphasage des tensions triphasées en régime permanent. Il se produit dans les systèmes de distributions lorsque les impédances des lignes du réseau sont asymétriques, ou lorsque des branches alimentent un équipement monophasé ou un récepteur triphasé déséquilibré.

1.5.3 Creux de tension

Les creux de tension sont des réductions soudaines de plus de 10% de la tension nominale, suivies de son rétablissement après une courte durée variant entre 8 millisecondes et une minute. Ces derniers sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle [22].

Ils sont caractérisés par leur amplitude et leur durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

1.5.4 Surtension

Les surtensions sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute.

Les surtensions temporaires peuvent être attribuables à des défauts, à des délestages de charge ou à des phénomènes de résonance et de ferrorésonance. Le plus souvent, elles résultent des fluctuations qui se manifestent sur les phases saines lors de courts-circuits monophasés à la terre, par exemple [23].

1.5.5 Variation de fréquence

La fréquence nominale de la tension alternative fournie par le réseau est de 50 ou 60 Hz. Cette valeur est déterminée par la vitesse des alternateurs des centrales.

Le maintien de la fréquence d'un réseau dépend de l'équilibre établi entre la charge et la production. Cette variation de la fréquence et sa durée dépend principalement de la charge et de la puissance de production. Cette variation peut se prolonger dans le cas de défaut [23].

1.5.6 Présence d'harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations qui affectent la forme de la tension. Elles sont caractérisées par des composantes multiples de la fréquence fondamentale. Le courant consommé par les charges connectées au réseau présente une forme de sinusoïde distordue. Cette distorsion de courant implique une distorsion de tension. Les harmoniques sont dues à l'introduction de charges non-linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs...) [11].

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer :

- des vibrations et bruits,
- des échauffements des condensateurs,
- des échauffements dus aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs,
- des échauffements des câbles et équipements,
- des perturbations sur le fonctionnement de certains appareils électroniques.

1.5.7 Défauts de ligne

Les défauts (ou *courts-circuits*) sont des mises en connexion de deux points de tensions différentes par un conducteur de faible résistance. Cette connexion donne naissance à un courant de court-circuit. Dans les réseaux électriques, les courts-circuits sont dûs à un défaut d'isolement qui provoque l'apparition d'un arc électrique. Durant le court-circuit, l'impédance de la branche en défaut diminue. Cette diminution est fonction de la position du point de court-circuit.

Le défaut le plus fréquent est le défaut unipolaire à la terre causé par la mise accidentelle à la terre d'un fil de phase du réseau.

Il peut se produire aussi un défaut entre phases appelé défaut bipolaire qui est le contact accidentel entre deux phases (avec ou sans contact avec la terre).

Plus rarement, il peut se produire un défaut tripolaire dû à un court-circuit entre les trois phases de la ligne. C'est un défaut symétrique [16].

1.6 Solutions classiques aux problèmes de tension

1.6.1 Élévation de tension

Afin de faire face à des chutes de tension affectant les réseaux, les groupes de production sont surexcités pour fournir une puissance plus grande. 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.

Cependant, la capacité de production des centrales est limitée, elle ne peut donc pas compenser des chutes importantes. Elle constitue aussi une solution temporaire car elle exploite les groupes de production en surcharge [22] [19].

1.6.2 Compensation traditionnelle

Compensation parallèle

Elle consiste à enclencher des condensateurs ou des inductances branchés en shunt par le biais de disjoncteurs en différents endroits sur le réseau pour modifier l'impédance de

la ligne, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables.

Cette technique de compensation est dite passive, car elle fonctionne en tout ou rien. Ainsi, soit la réactance est reliée au réseau soit elle est déconnectée. Lorsque que celle-ci est en service, aucune modification des inductances ou des condensateurs n'est effectuée pour essayer de contrôler la tension ou l'écoulement de puissance.

Les batteries de condensateurs compensent la puissance réactive absorbée par la charge et ainsi éviter la transmission de puissance réactive sur de longues distances. De même que les réactances, ces batteries de condensateurs doivent être connectées ou déconnectés par des disjoncteurs.

La compensation réactive shunt est un bon moyen pour contrôler l'impédance caractéristique, dans le but de maintenir un niveau de tension acceptable sur les lignes de transport d'électricité. Par contre, elle ne constitue pas un bon moyen pour augmenter la puissance maximale transportable [13].

Compensation série

Elle consiste à insérer une batterie de condensateurs en série avec la ligne contrôlés à travers des disjoncteurs. Les condensateurs ajoutés ont une capacité fixe qui ne varie pas dans le temps. Cette compensation permet d'une part de diminuer l'impédance électrique de la ligne et d'autre part d'augmenter le transit de la puissance.

Cependant, du fait du nombre limité d'opérations et des délais d'ouverture/fermeture des disjoncteurs, ces réactances et condensateurs connectés en parallèles ou en séries ne doivent pas être commutés trop souvent et ne peuvent pas être utilisés pour une compensation dynamique des réseaux [13].

Compensation synchrone

Un compensateur synchrone est une machine synchrone fonctionnant à vide, 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. Les valeurs typiques vont de 20 à 60 MVAR en fourniture et de 10 à 30 MVAR en absorption. Ces compen-

sateurs sont couplés par l'intermédiaire d'un transformateur. L'avantage par rapport aux condensateurs ou inductances passives est la flexibilité assurée sous toutes conditions de charge. Par contre, ils engendrent un coût relativement élevé tant en investissement qu'en maintenance. [22] [19].

1.6.3 Filtres d'harmoniques

Les filtres permettent de limiter l'amplitude des harmoniques à des faibles valeurs. Il existe trois classes de filtres d'harmoniques :

Les filtres passifs

Le filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible [12].

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients :

- Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire.
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- Le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées.
- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

Les filtres actifs

Les progrès réalisés durant ces dernières années dans le domaine des composants semi-conducteurs commandés ont rendu l'utilisation des filtres actifs intéressante. Ce sont aussi des convertisseurs à commutation forcée, utilisés pour la dépollution harmonique des réseaux. On utilise principalement deux types de filtres :

Les filtres actifs parallèles Ils permettent de neutraliser l'effet d'une harmonique en injectant une grandeur égale à la perturbation mais de phase opposée.

Les filtres actifs série Ils sont destinés à isoler les installations sensibles des perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques et les surtensions. Ainsi, ils compensent la tension au point de connexion de la charge.

Selon différentes conditions et différents objectifs, plusieurs approches du filtrage actif sont envisageables :

- Dépolluer une source polluée pour alimenter une charge sensible.
- Dépolluer une charge polluante pour protéger les autres utilisateurs du réseau.
- Réaliser simultanément ces deux types de dépollution.

Les filtres actifs sont généralement utilisés conjointement avec les filtres passifs [12] [18].

1.7 Les systèmes FACTS

1.7.1 Définition

Les FACTS (*flexible alternative current transmission systems*) sont nés d'études initiés à la fin des années 1980 par EPRI (*Electric Power Research Institute*) aux États-Unis dans la foulée des efforts de développement des liaisons en courant continu à haute tension qui avaient largement démontré la fiabilité des dispositifs de l'électronique de puissance dans les réseaux à haute tension.

Les systèmes FACTS sont des dispositifs créés afin d'améliorer la stabilité du réseau électrique. Ils sont principalement utilisés pour contrôler le flux de puissance à travers le

réseau en améliorant ainsi l'exploitation du réseau.

Les FACTS suscitent de plus en plus d'intérêt, et leur utilisation croît. Ceci est principalement dû à leur technologie d'interruption statique qui leur assure une rapidité très notable par rapport aux anciens systèmes à contacts mécaniques.

1.7.2 Composants utilisés

Les FACTS sont basés sur des composants de l'électronique de puissance, tels que :

Les Diodes et Thyristors classiques

Leur utilisation remonte à plus de 30 ans, et sont largement utilisés dans l'industrie. Ils permettent de commuter à de basses fréquences (quelques KHz), mais ils peuvent manipuler de très grandes puissances (plusieurs GW).

Thyristors GTO

Ce composant récent commandé à l'ouverture et à la fermeture, dont la fréquence de commutation est limitée à quelques centaines de Hertz, il atteint actuellement 6.5kV en tension et 6kA en courant.

Les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Ce sont des composants d'invention récente, ils commutent sur une bande de fréquence qui varie entre 10 à 20kHz, et utilisant des dispositifs MLI (Modulation par Largeur d'Impulsion).

1.8 Classification des FACTS

On peut distinguer trois catégories selon le mode de connexion au réseau :

1.8.1 FACTS parallèles

Ces derniers sont insérés en Shunt sur le réseau, ils permettent ainsi d'injecter un courant sur le réseau au point de raccordement. La variation du courant injecté sur le réseau permet de modifier le flux de puissance active et réactive qui transitent, et aussi sur la tension du point de raccordement.

- Les condensateurs montés en Shunt fournissent de la puissance réactive au réseau augmentant la tension au point de raccordement (utilisés dans le cas d'une forte consommation, où dans des zones éloignées)
- Les réactances montées en Shunt consomment de la puissance réactive diminuant la tension au point de raccordement (utilisées lors des périodes de faible consommation)
- Les sources de tension variable couplées à une impédance permettent de basculer entre les deux modes cités précédemment, ainsi que de stabiliser la tension au point de raccordement selon le cas.

Parmi les compensateurs parallèles les plus utilisés, on trouve :

TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) Ce montage commande la connexion des condensateurs au réseau par des thyristors fonctionnant en pleine onde [21] [8].

TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) Ce montage permet de changer la valeur l'inductance reliée au réseau au terme d'un gradateur. Sa valeur est continuellement variable selon l'angle d'amorçage des thyristors [21] [3].

TCBR (*Thyristor Control Breaking Resistor*) Ce compensateur permet de stabiliser le réseau lors de la présence de perturbations ou défauts [21].

Compensateurs parallèles statiques (SVC) C'est un dispositif hybride qui permet d'associer les bienfaits des TSC et des TCR montés en parallèles connectés au réseau à travers un transformateur de couplage. Il peut fonctionner en plusieurs modes [21] [3] :

Mode TSC seules les capacités sont reliées au réseau

Mode hybride fonctionne en combinaison entre TSC et TCR

Mode TCR le TCR fonctionne seul, les condensateurs déconnectés

Compensateur statique STATCOM Né avec le développement des thyristors GTO de forte puissance, les STATCOM (STATIC COMPENSATOR) ont connu des progrès importants. Parmi leurs avantages [15] :

- ils assurent une réponse très rapide (quasi instantanée)
- ils fournissent un courant acceptable même avec de très faibles tensions d'alimentation

Le STATCOM est constitué d'un convertisseur alternatif-continu à commutation forcée, raccordé coté continu à un élément de stockage d'énergie (condensateur ou accumulateur) et couplé au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur Shunt. La figure [1.1] illustre le montage :

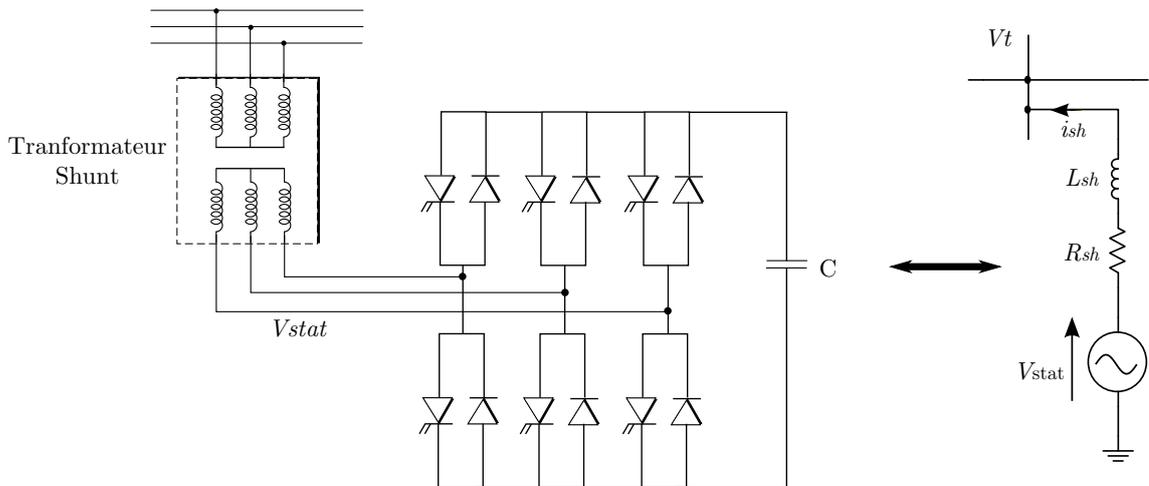


FIGURE 1.1 – Structure d'un STATCOM et schéma équivalent

La tension du coté alternatif est en phase avec celle du réseau de manière à n'échanger que la puissance réactive avec ce dernier. On règle la valeur du courant et le sens de la puissance réactive échangée par la valeur de la tension du convertisseur V_{stat} [21].

- Si $V_{stat} > V_t$, le courant i_{sh} est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V_s ce qui

donne un courant capacitif [Fig :1.2-a].

- Si $V_{\text{stat}} < V_t$, le courant i_{sh} est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension V_s ce qui donne un courant inductif [Fig :1.2-b].
- Si $V_{\text{stat}} = V_t$, le courant i_{sh} est nul, et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

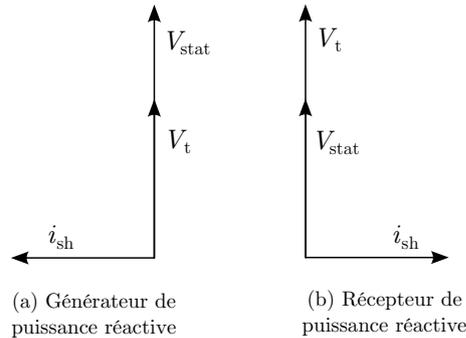


FIGURE 1.2 – Diagramme vectoriel relatif à l'échange exclusif de puissance réactive

Le STATCOM offre plusieurs avantages [15] :

- Réduction de la taille et du coût des composants fixes
- Possibilité de contrôle sans limite de tension contrairement au SVC
- Le courant maximal échangé est indépendant de la tension, et la puissance réactive maximale varie avec la tension. Dans les composants de type SVC, cette puissance variant avec le carré de la tension.

Malgré ses avantages, le STATCOM engendre beaucoup d'harmoniques. Des solutions existent pour pallier à ce problème tels que des filtres de puissance, ou l'utilisation de MLI multi-niveaux [13].

1.8.2 FACTS série

Ces systèmes 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. Si cette tension est en quadrature avec le courant de la liaison, le système

ne doit fournir ou absorber que de la puissance réactive. Par leur influence sur l'impédance effective des lignes, ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité du réseau [15].

Parmi les compensateurs série les plus utilisés, on trouve :

TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité. Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance contrôlée [27].

TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) Il met en œuvre des bancs de condensateurs en gradins, mis en ou hors service par des commutateurs à thyristors placés en parallèle pour réaliser un contrôleur de type série.

TCSR (*Thyristor Controlled Series Reactor*) Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable [21].

TSSR (*Thyristor Switched Series Reactor*) C'est une réactance contrôlée par thyristors [3].

Le compensateur SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) En connectant un SVC en série avec une ligne de transmission à travers un transformateur de couplage, on obtient un SSSC capable de contrôler les flux de puissance sur cette ligne. De même que le STATCOM, le SSSC a une plage de fonctionnement symétrique. En injectant une tension en quadrature avec le courant, il peut modifier ce dernier. Ce type de compensateur série basé sur des thyristors GTO est le plus important dispositif de cette famille. Il présente une alternative au TCSC [16].

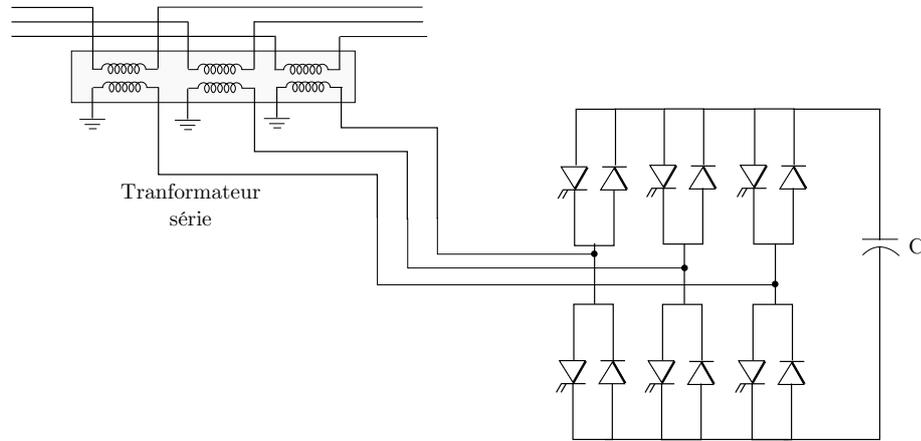


FIGURE 1.3 – Schéma du SSSC

Il est aussi possible de régler de façon continue la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance 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 [21].

Si on utilise un système de stockage d'énergie (condensateurs ou accumulateurs), le SSSC peut, à ce moment là, échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à l'amélioration de la stabilité du réseau. Il est à noter que la tension injectée n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant [21] [9].

Le SSSC a un temps de réponse plus rapide que le TCSC mais cet avantage n'est pas significatif pour une ligne de transmission. Enfin, on peut noter que le SSSC est peu encombrant en comparaison avec un TCSC [13].

1.8.3 Compensateurs hybrides

C'est une combinaison des dispositifs séries et parallèles commandés d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multivariables à savoir le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport.

TCPAR (*Thyristor Controlled Phase Angle Regulator*) ou SPS (*Static Phase Shifter*), le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les anciens transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. [21] [9].

Ce dispositif fait varier l'angle de phase de la tension aux extrémités de la ligne.

IPFC (*Interline Power Flow Controller*) L'IPFC est une association de contrôleurs série placés dans des lignes différentes. Il utilise des convertisseurs DC-AC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC [15] [19].

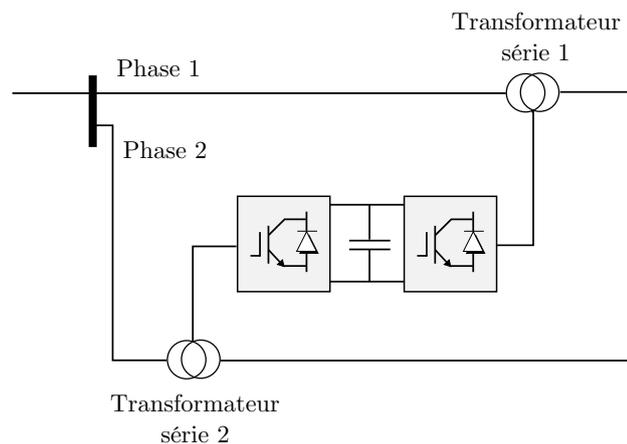


FIGURE 1.4 – Schéma d'un IPFC

On peut l'utiliser afin de forcer des changements de puissance entre les lignes du réseau.

UPFC (*Unified Power Flow Controller*) Il s'agit du système le plus sophistiqué des FACTS, proposé par Laszlo Gyugyi. 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. [21].

L'intérêt principal de ce compensateur est de pouvoir contrôler l'amplitude de la tension à son point de connexion, et les flux de puissance active et réactive de la ligne de

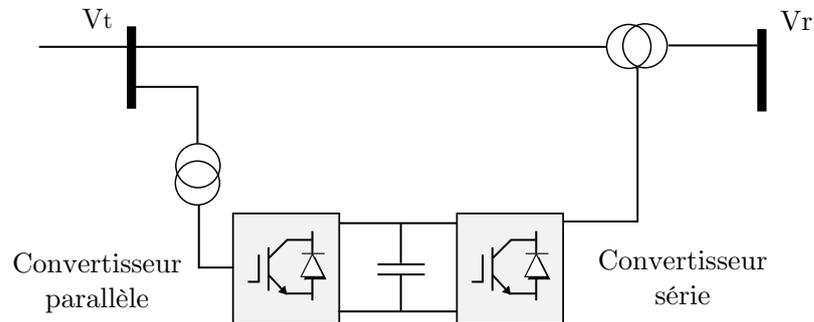


FIGURE 1.5 – Schéma d'un UPFC

transmission dans laquelle il est inséré [8].

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_{SSC} qui réalise la compensation série et le contrôle du flux de puissance active et réactive [13] [26].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a abordé les principaux problèmes affectant le réseau. On a vu aussi que le transfert de puissance dans le réseau électrique s'accompagne de chutes de tension entre les zones de production et ceux de consommation. Une des préoccupations des planificateurs et des exploitants est de s'assurer que la tension dans différents points du réseau restent dans les bornes admissibles.

On a aussi présenté les solutions traditionnelles les plus utilisées, qui manifestent leurs insuffisances par rapport aux nouvelles contraintes pesant sur les réseaux actuels. On a présenté aussi les FACTS, les dispositifs de commande des réseaux électriques issues de l'électronique de puissance et qui permettent d'augmenter considérablement le rendement des réseaux électriques.

Dans la suite de notre travail, on va se consacrer à l'étude de l'un des dispositifs FACTS les plus performants, à savoir l'UPFC. Ce dernier est le compensateur le plus complet qui permet de régler une grande partie des problèmes du réseau électrique.

Cependant, l'UPFC est un équipement cher et ne peut donc trouver d'intérêt qu'en certains points des réseaux soumis à des contraintes particulièrement sévères aussi bien en terme de contrôle des transits de puissance que du maintien de tension.

Chapitre 2

Modélisation du système

Sommaire

2.1	Introduction	36
2.2	Fonctionnement de l'UPFC	36
2.3	Etablissement du modèle	37
2.4	Transformation de Park	41
2.5	Projection du modèle dans le repère de Park	42
2.5.1	Equations d'état	42
2.5.2	Calcul des puissances	45
2.5.3	Identification des courants de référence	45
2.6	Conclusion	46

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objet l'établissement du modèle dynamique de L'UPFC. Ce modèle servira par la suite à la sythèse des lois de commande qui vont piloter le système afin de réliser les objectifs tracés dans le cahier de charges. On se propose alors de décrire le système par sa représentation d'état.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté différents types des systèmes FACTS (série, parallèle et hybrides). L'UPFC (*Unified Power Flow Controller*) est l'un des systèmes FACTS les plus sophistiqués. En plus du contrôle du flux de puissance active et réactive, il permet d'ajuster la tension, l'impédance de la ligne et l'angle de transport.

En premier lieu, nous étudierons ce dispositif en décrivant son principe de fonctionnement. Ensuite, nous établissonsle modèle du réseau équipé de l'UPFC.

2.2 Fonctionnement de l'UPFC

L'UPFC est constitué de deux convertisseurs reliés à travers une capacité, et connectés au réseau à travers des transformateurs de couplage. Le premier est connecté au réseau via un transformateur de tension, l'autre est connecté en série avec un transformateur de courant. On peut le considérer comme une combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC couplés par un bus continu La figure (2.1) illustre ce montage [21].

Le STATCOM est excité de manière à injecter ou absorber la puissance réactive au noeud auquel il est raccordé, mais aussi pour maintenir l'alimentation du SSSC à une tension continue relativement constante [26].

Le SSSC a pour rôle d'injecter une tension synchronisée avec le réseau. La variation de tension engendre donc un échange de puissance active et réactive.

Le SSSC peut travailler en plusieurs modes [8] :

Contrôle de tension La tension injectée est en phase avec la tension de ligne

Contrôle de l'impédance de ligne La tension injectée est en quadrature de phase avec la tension de ligne, elle peut donc être perçue comme une impédance.

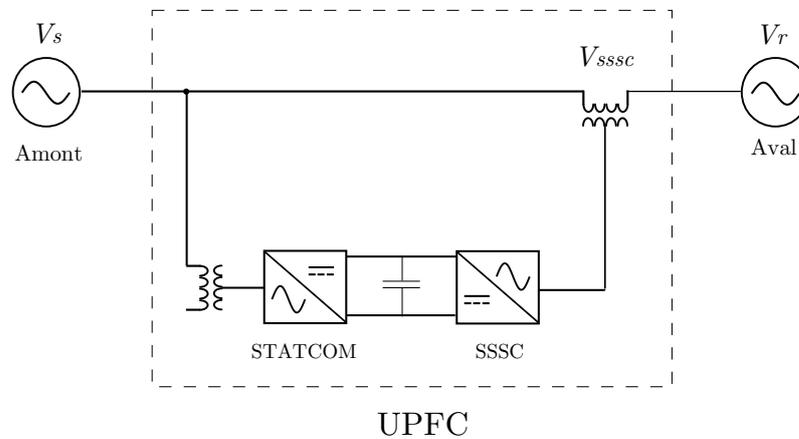


FIGURE 2.1 – Schéma de base d'un UPFC

Contrôle de phase La tension injectée est déterminée de façon à garder la même tension avant et après l'UPFC.

L'énorme avantage de l'UPFC réside dans la flexibilité qu'il offre en combinant les fonctions de plusieurs FATCS en un seul dispositif, à savoir la répartition des flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance. De plus, il peut basculer d'un mode de fonctionnement un autre, en changeant la commande de ses convertisseurs, ce qui permet de faire face à des défauts ou des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions [21] [27].

2.3 Etablissement du modèle

On peut représenter le réseau muni de l'UPFC par le schéma de la figure (2.2).

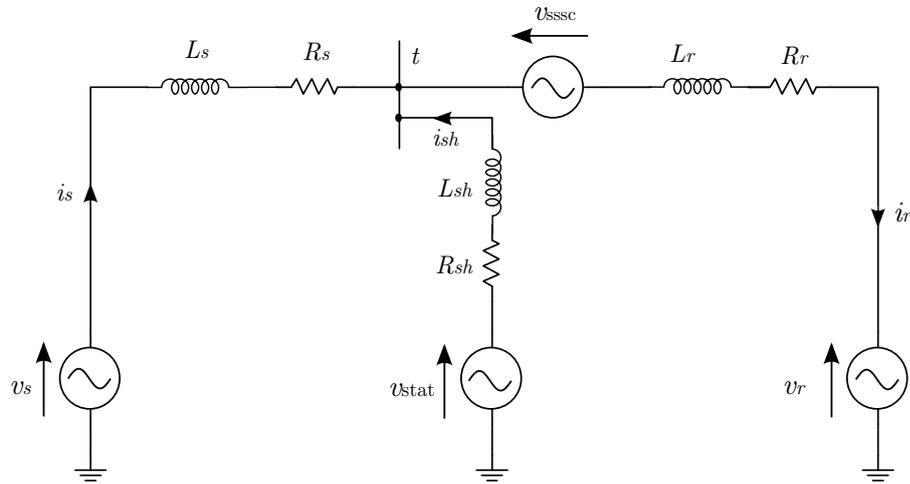


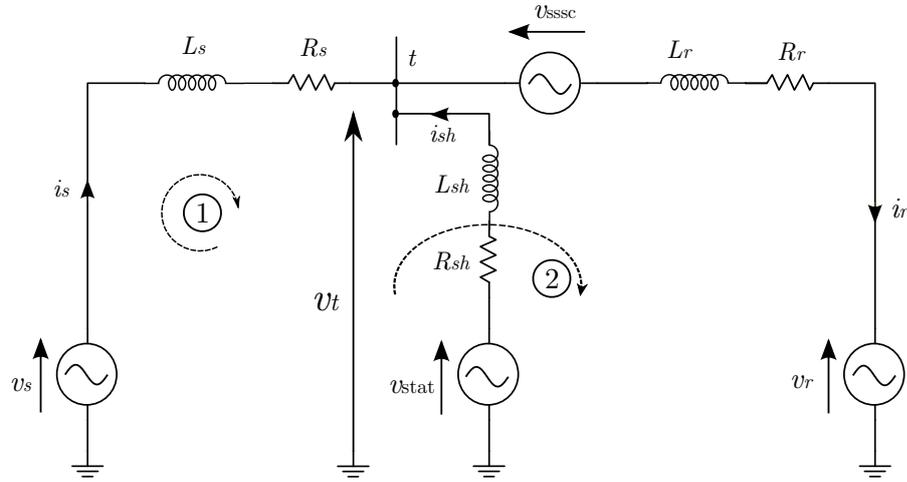
FIGURE 2.2 – Schéma de L'UPFC, courants et tensions

v_s	Tension de la ligne en amont
v_r	Tension de la ligne en aval
v_{stat}	Tension appliquée en Shunt
v_{sssc}	Tension injectée par le SSSC
R_s et L_s	impédance de la ligne en amont
R_{sh} et L_{sh}	impédances des pertes du transformateur Shunt ramenées au secondaire
R_r et L_r	impédance du réseau en aval augmentée des pertes du transformateur série ramenées au secondaire

Le tableau ci-dessus donne la signification des grandeurs représentés sur le schéma de la figure (2.2).

Les tensions v_{stat} et v_{sssc} sont les seules grandeurs que l'on peut contrôler à travers les convertisseurs alors elles sont utilisées comme entrées. Le rôle de ce dispositif est le contrôle du flux de puissance, donc la puissance active P et réactive Q sont considérées comme sorties.

Appliquons les lois de KIRCHHOFF pour écrire les équations du système. Au noeud t , on a :



$$i_s = i_r - i_{sh} \quad (2.1)$$

La maille (1) donne :

$$v_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} + R_{sh} i_{sh} + L_{sh} \frac{di_{sh}}{dt} - v_{stat} = 0 \quad (2.2)$$

La maille (2) donne :

$$v_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} - v_{sssc} - R_r i_r - L_r \frac{di_r}{dt} - v_r = 0 \quad (2.3)$$

Avec :

$$i_s = \begin{bmatrix} i_{s,a} \\ i_{s,b} \\ i_{s,c} \end{bmatrix}; i_r = \begin{bmatrix} i_{r,a} \\ i_{r,b} \\ i_{r,c} \end{bmatrix}; i_{sh} = \begin{bmatrix} i_{sh,a} \\ i_{sh,b} \\ i_{sh,c} \end{bmatrix}$$

$$v_s = \begin{bmatrix} v_{s,a} \\ v_{s,b} \\ v_{s,c} \end{bmatrix}; v_r = \begin{bmatrix} v_{r,a} \\ v_{r,b} \\ v_{r,c} \end{bmatrix}; v_{stat} = \begin{bmatrix} v_{stat,a} \\ v_{stat,b} \\ v_{stat,c} \end{bmatrix}; v_{sssc} = \begin{bmatrix} v_{sssc,a} \\ v_{sssc,b} \\ v_{sssc,c} \end{bmatrix}$$

En remplaçant (2.1) dans (2.2) et (2.3), il résulte :

$$-L_s \frac{di_r}{dt} + (L_s + L_{sh}) \frac{di_{sh}}{dt} = R_s i_r - (R_s + R_{sh}) i_{sh} + v_{stat} - v_s \quad (2.4)$$

$$-(L_s + L_r) \frac{di_r}{dt} + L_s \frac{di_{sh}}{dt} = (R_s + R_r)i_r - R_s i_{sh} + v_{sssc} + v_r - v_s \quad (2.5)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} -L_s I_3 & (L_s + L_{sh}) I_3 \\ -(L_s + L_r) I_3 & L_r I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_r}{dt} \\ \frac{di_{sh}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s I_3 & -(R_s + R_{sh}) I_3 \\ (R_s + R_r) I_3 & -R_s I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{stat} \\ v_{sssc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -v_s \\ -v_s + v_r \end{bmatrix}$$

Posons :

$$L = \begin{bmatrix} -L_s I_3 & (L_s + L_{sh}) I_3 \\ -(L_s + L_r) I_3 & L_r I_3 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s I_3 & -(R_s + R_{sh}) I_3 \\ (R_s + R_r) I_3 & -R_s I_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -v_s \\ -v_s + v_r \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -I_3 & 0 \\ -I_3 & I_3 \end{bmatrix}}_N \cdot \begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix}$$

On peut écrire :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} = L^{-1} R \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} + L^{-1} U + L^{-1} N D$$

La puissance active P et réactive Q sont les images des courants i_r et i_{sh} , on choisit donc $X = [i_r \ i_{sh}]^T$ comme vecteur d'état, $U = [v_{stat} \ v_{sssc}]^T$ comme entrée et $D = [v_s \ v_r]^T$ comme perturbation. On abouti alors à la forme suivante :

$$\dot{X} = AX + BU + B_d D \quad (2.6)$$

avec :

$$A = L^{-1} R = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} (-R_s L_{sh} - R_r L_s - L_{sh} R_r) I_3 & (-L_s R_{sh} + R_s L_{sh}) I_3 \\ (L_r R_s - R_r L_s) I_3 & (-L_s R_{sh} - L_r R_s - L_r R_{sh}) I_3 \end{bmatrix}$$

$$B = L^{-1} = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} L_s I_3 & (-L_s - L_{sh}) I_3 \\ (L_s + L_r) I_3 & -L_s I_3 \end{bmatrix}$$

$$B_d = L^{-1} N$$

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

2.4 Transformation de Park

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

La transformation de PARK d'une grandeur triphasée V_{abc} est une grandeur biphasée donnée par :

$$v_{dq} = T \cdot v_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

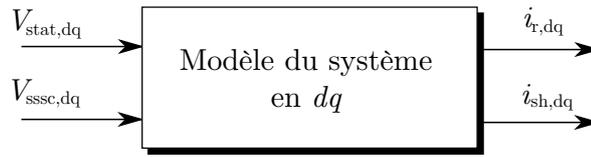
La transformation de Park permet de générer des grandeurs continues à partir des grandeurs triphasées du système. Ainsi, en choisissant une grandeur triphasée comme référence, on pourra écrire toutes les tensions et courants du système dans le repère de PARK. De plus, elle permet d'assurer la conservation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

Pour revenir au repère triphasé, on utilise la transformation de PARK inverse. Elle est définie par :

$$v_{abc} = T^{-1} \cdot v_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}$$

2.5 Projection du modèle dans le repère de Park

L'objet de cette section est l'écriture du modèle du système dans le repère dq . Les équations d'état seront remodelées afin que les tensions et courants triphasés soient écrits dans le repère de PARK. Pour cela, on considère la tension en amont v_s comme référence pour la transformation de PARK.



2.5.1 Equations d'état

On a écrit précédemment l'équation d'état du système [Equ : 2.6] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} v_{stat} \\ v_{sssc} \end{bmatrix} + B_d \begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix}$$

Si on pose :

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{g}(-R_s L_{sh} - R_r L_s - L_{sh} R_r) \\ a_{12} &= \frac{1}{g}(-L_s R_{sh} + R_s L_{sh}) \\ a_{21} &= \frac{1}{g}(L_r R_s - R_r L_s) \\ a_{22} &= \frac{1}{g}(-L_s R_{sh} - L_r R_s - L_r R_{sh}) \\ b_{11} &= -b_{22} = \frac{L_s}{g} \\ b_{12} &= -\frac{1}{g}(L_s + L_{sh}) \\ b_{21} &= \frac{1}{g}(L_s + L_r) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{d11} &= \frac{L_{sh}}{g} \\
b_{d12} &= -\frac{1}{g}(L_s + L_{sh}) \\
b_{d21} &= -\frac{L_r}{g} \\
b_{d22} &= -\frac{L_s}{g}
\end{aligned}$$

On aura :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}I_3 & a_{12}I_3 \\ a_{21}I_3 & a_{22}I_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11}I_3 & b_{12}I_3 \\ b_{21}I_3 & b_{22}I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{stat} \\ v_{sssc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{d11}I_3 & b_{d12}I_3 \\ b_{d21}I_3 & b_{d22}I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix}$$

Soit v une grandeur triphasée, alors on a :

$$v = [v_a \ v_b \ v_c]^T = T^{-1}v_{dq} = T^{-1}[v_d \ v_q]^T$$

Où v_{dq} est la projection de v dans le repère tournant de Park.

En introduisant la transformée de PARK inverse les équations d'état, on aura :

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} (T^{-1}i_{r,dq}) &= a_{11}I_3T^{-1}i_{r,dq} + a_{12}I_3T^{-1}i_{sh,dq} + b_{11}I_3T^{-1}v_{stat,dq} + b_{12}I_3T^{-1}v_{sssc,dq} \\
&+ b_{d11}I_3T^{-1}v_{s,dq} + b_{d12}I_3T^{-1}v_{r,dq}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} (T^{-1}i_{sh,dq}) &= a_{21}I_3T^{-1}i_{r,dq} + a_{22}I_3T^{-1}i_{sh,dq} + b_{21}I_3T^{-1}v_{stat,dq} + b_{22}I_3T^{-1}v_{sssc,dq} \\
&+ b_{d21}I_3T^{-1}v_{s,dq} + b_{d22}I_3T^{-1}v_{r,dq}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{d}{dt}T^{-1}\right)i_{r,dq} + T^{-1}\left(\frac{di_{r,dq}}{dt}\right) &= a_{11}I_3T^{-1}i_{r,dq} + a_{12}I_3T^{-1}i_{sh,dq} + b_{11}I_3T^{-1}v_{stat,dq} + b_{12}I_3T^{-1}v_{sssc,dq} \\
&+ b_{d11}I_3T^{-1}v_{s,dq} + b_{d12}I_3T^{-1}v_{r,dq} \\
\left(\frac{d}{dt}T^{-1}\right)i_{sh,dq} + T^{-1}\left(\frac{di_{sh,dq}}{dt}\right) &= a_{21}I_3T^{-1}i_{r,dq} + a_{22}I_3T^{-1}i_{sh,dq} + b_{21}I_3T^{-1}v_{stat,dq} + b_{22}I_3T^{-1}v_{sssc,dq} \\
&+ b_{d21}I_3T^{-1}v_{s,dq} + b_{d22}I_3T^{-1}v_{r,dq}
\end{aligned}$$

$$T^{-1}\left(\frac{di_{r,dq}}{dt}\right) = \left(a_{11}I_3T^{-1} - \frac{d}{dt}T^{-1}\right)i_{r,dq} + a_{12}I_3T^{-1}i_{sh,dq} + b_{11}I_3T^{-1}v_{stat,dq} + b_{12}I_3T^{-1}v_{sssc,dq}$$

$$\begin{aligned}
& + b_{d11}I_3T^{-1}v_{s,dq} + b_{d12}I_3T^{-1}v_{r,dq} \\
T^{-1}\left(\frac{di_{sh,dq}}{dt}\right) & = a_{21}I_3T^{-1}i_{r,dq} + \left(a_{22}I_3T^{-1} - \frac{d}{dt}T^{-1}\right)i_{sh,dq} + b_{21}I_3T^{-1}v_{stat,dq} + b_{22}I_3T^{-1}v_{sssc,dq} \\
& + b_{d21}I_3T^{-1}v_{s,dq} + b_{d22}I_3T^{-1}v_{r,dq}
\end{aligned}$$

En multipliant les deux membres par T à gauche dans les deux équations :

$$\begin{aligned}
\frac{di_{r,dq}}{dt} & = \left(a_{11}I_2 - T\frac{d}{dt}T^{-1}\right)i_{r,dq} + a_{12}I_2i_{sh,dq} + b_{11}I_2v_{stat,dq} + b_{12}I_2v_{sssc,dq} \\
& + b_{d11}I_2v_{s,dq} + b_{d12}I_2v_{r,dq} \\
\frac{di_{sh,dq}}{dt} & = a_{21}I_2i_{r,dq} + \left(a_{22}I_2 - T\frac{d}{dt}T^{-1}\right)i_{sh,dq} + b_{21}I_2v_{stat,dq} + b_{22}I_2v_{sssc,dq} \\
& + b_{d21}I_2v_{s,dq} + b_{d22}I_2v_{r,dq}
\end{aligned}$$

On a :

$$H = T\frac{d}{dt}T^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}$$

Où ω est la pulsation fondamentale du réseau.

On aboutit enfin au modèle d'état dans le repère de Park :

$$\dot{X}_{dq} = A_{dq}X_{dq} + B_{dq}U_{dq} + B_{d,dq}D_{dq} \quad (2.7)$$

Avec,

$$\begin{aligned}
X_{dq} & = \begin{bmatrix} i_{r,dq} \\ i_{sh,dq} \end{bmatrix}; U_{dq} = \begin{bmatrix} v_{stat,dq} \\ v_{sssc,dq} \end{bmatrix}; D_{dq} = \begin{bmatrix} v_{s,dq} \\ v_{r,dq} \end{bmatrix} \\
A_{dq} & = \begin{bmatrix} a_{11}I_2 - H & a_{12}I_2 \\ a_{21}I_2 & a_{22}I_2 - H \end{bmatrix} \\
B_{dq} & = \begin{bmatrix} b_{11}I_2 & b_{12}I_2 \\ b_{21}I_2 & b_{22}I_2 \end{bmatrix} \quad B_{d,dq} = \begin{bmatrix} b_{d11}I_2 & b_{d12}I_2 \\ b_{d21}I_2 & b_{d22}I_2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

2.5.2 Calcul des puissances

On retrouve les puissances dans le repère de PARK par les expressions suivantes :

$$P_r = V_{r,dq}^T \cdot i_{r,dq} \quad (2.8)$$

$$Q_r = V_{r,dq}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot i_{r,dq} \quad (2.9)$$

$$P_{sh} = V_{t,dq}^T \cdot i_{sh,dq} \quad (2.10)$$

$$Q_{sh} = V_{t,dq}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot i_{sh,dq} \quad (2.11)$$

Où V_t est la tension au point de raccordement du noeud de connexion.

2.5.3 Identification des courants de référence

Les références de puissance $P_r^{\text{réf}}$ et $Q_r^{\text{réf}}$ sont imposées par les exploitants du réseau. Les puissances $P_{sh}^{\text{réf}}$ et $Q_{sh}^{\text{réf}}$ sont obtenues à partir des réglages de la tension au noeud de raccordement V_t et de la tension de la capacité de couplage U_c . Etant donné ces puissances, on doit en extraire les courants de référence $i_{r,dq}^{\text{réf}}$ et $i_{sh,dq}^{\text{réf}}$. De ce fait, pour une tension V et un courant i on a :

$$\begin{cases} P = V_d i_d + V_q i_q \\ Q = V_q i_d - V_d i_q \end{cases}$$

En d'autres termes :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

On en conclut que :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \Gamma^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$$

Finalement, les courants de références sont :

$$\dot{i}_{r,dq}^{\text{réf}} = \Gamma_r^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_r^{\text{réf}} \\ Q_r^{\text{réf}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\dot{i}_{sh,dq}^{\text{réf}} = \Gamma_{sh}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^{\text{réf}} \\ Q_{sh}^{\text{réf}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Tels que :

$$\Gamma_r = \begin{bmatrix} V_{r,d} & V_{r,q} \\ V_{r,q} & -V_{r,d} \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_{sh} = \begin{bmatrix} V_{t,d} & V_{t,q} \\ V_{t,q} & -V_{t,d} \end{bmatrix}$$

Le schéma de la figure (2.3) illustre la procédure d'identification des références.

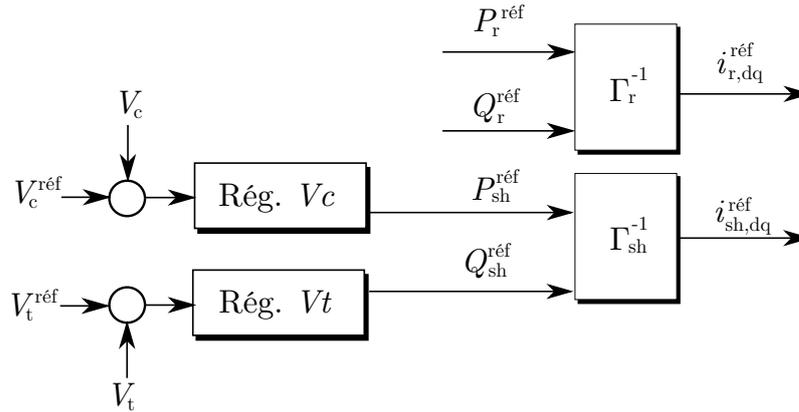


FIGURE 2.3 – Schéma d'identification de références

Remarque : Les détails de la régulation des tensions V_c et V_t sont développés dans l'annexe B.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit le principe de fonctionnement d'un réseau électrique muni d'un UPFC. Ensuite, on a établi le modèle mathématique sous la forme d'équations d'états. Cependant, les commandes actuelles ne pouvant pas suivre des références

sinusoïdales, la transformation de PARK devient un outil nécessaire pour synthétiser les commandes. La projection de notre modèle dans le repère de Park nous permet de manipuler des grandeurs continues au lieu des grandeurs triphasées.

Chapitre 3

Commande classique par PI

Sommaire

3.1	Introduction	49
3.2	Reformulation du modèle	49
3.3	Expression du régulateur	50
3.4	Calcul des commandes	50
3.5	Simulation et résultats	51
3.5.1	Poursuite d'une référence de puissance	51
3.5.2	Réseau perturbé	54
3.6	Conclusion	58

3.1 Introduction

Le régulateur PI est très utilisé dans de nombreux domaines de l'industrie grâce à sa rapidité, précision et facilité d'implémentation. Dans ce chapitre, on va utiliser un régulateur PI afin de suivre une référence de puissance donnée.

Par la suite, on va simuler le comportement de notre système dans différentes situations (fonctionnement normal, creux de tension et court-circuit), et observer l'effet du réglage dans chaque cas.

3.2 Reformulation du modèle

Rappelons que notre système est modélisé par les équations d'état suivantes :

$$\dot{X}_{dq} = A_{dq}X_{dq} + BU_{dq} + B_dD_{dq} \quad (3.1)$$

Ecrivons :

$$\begin{cases} \frac{di_{r,d}}{dt} = a_{11}i_{r,d} + \omega i_{r,q} + a_{12}i_{sh,d} + b_{11}v_{stat,d} + b_{12}v_{sssc,d} + b_{d11}v_{s,d} + b_{d12}v_{r,d} \\ \frac{di_{r,q}}{dt} = a_{11}i_{r,q} - \omega i_{r,d} + a_{12}i_{sh,q} + b_{11}v_{stat,q} + b_{12}v_{sssc,q} + b_{d11}v_{s,q} + b_{d12}v_{r,q} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{di_{sh,d}}{dt} = a_{22}i_{sh,d} + \omega i_{sh,q} + a_{21}i_{r,d} + b_{21}v_{stat,d} + b_{22}v_{sssc,d} + b_{d21}v_{s,d} + b_{d22}v_{r,d} \\ \frac{di_{sh,q}}{dt} = a_{22}i_{sh,q} - \omega i_{sh,d} + a_{21}i_{r,q} + b_{21}v_{stat,q} + b_{22}v_{sssc,q} + b_{d21}v_{s,q} + b_{d22}v_{r,q} \end{cases}$$

On pose :

$$\begin{cases} U_{1,d} = \omega i_{r,q} + a_{12}i_{sh,d} + b_{11}v_{stat,d} + b_{12}v_{sssc,d} + b_{d11}v_{s,d} + b_{d12}v_{r,d} \\ U_{1,q} = -\omega i_{r,d} + a_{12}i_{sh,q} + b_{11}v_{stat,q} + b_{12}v_{sssc,q} + b_{d11}v_{s,q} + b_{d12}v_{r,q} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{2,d} = \omega i_{sh,q} + a_{21}i_{r,d} + b_{21}v_{stat,d} + b_{22}v_{sssc,d} + b_{d21}v_{s,d} + b_{d22}v_{r,d} \\ U_{2,q} = -\omega i_{sh,d} + a_{21}i_{r,q} + b_{21}v_{stat,q} + b_{22}v_{sssc,q} + b_{d21}v_{s,q} + b_{d22}v_{r,q} \end{cases}$$

Alors le système devient :

$$\begin{cases} \frac{di_{r,d}}{dt} = a_{11}i_{r,d} + U_{1,d} \\ \frac{di_{r,q}}{dt} = a_{11}i_{r,q} + U_{1,q} \\ \frac{di_{sh,d}}{dt} = a_{22}i_{sh,d} + U_{2,d} \\ \frac{di_{sh,q}}{dt} = a_{22}i_{sh,q} + U_{2,q} \end{cases}$$

3.3 Expression du régulateur

On définit les deux erreurs de poursuites e_r , e_{sh} par :

$$e_r = i_{r,dq}^{\text{réf}} - i_{r,dq} \quad , \quad e_{sh} = i_{sh,dq}^{\text{réf}} - i_{sh,dq}$$

Les commandes sont alors données par :

$$\begin{aligned} U_{1,dq}(t) &= K_{p1}e_r(t) + K_{i1} \int_0^t e_r(\tau) d\tau \\ U_{2,dq}(t) &= K_{p2}e_{sh}(t) + K_{i2} \int_0^t e_{sh}(\tau) d\tau \end{aligned}$$

3.4 Calcul des commandes

Dans cette section, on s'intéresse à la restitution des commandes réelles v_{stat} et v_{sssc} du système à partir des commandes fictives $U_{1,dq}$ et $U_{2,dq}$. Comme les tensions v_s , v_r et les courants i_r , i_{sh} sont accessibles à la mesure, on peut utiliser la compensation par FEED-FORWARD.

$$\begin{bmatrix} U_{1,d} \\ U_{1,q} \\ U_{2,d} \\ U_{2,q} \end{bmatrix} = A' \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} + B_{dq} \begin{bmatrix} v_{\text{stat},d} \\ v_{\text{stat},q} \\ v_{\text{sssc},d} \\ v_{\text{sssc},q} \end{bmatrix} + B_{d,dq} \begin{bmatrix} v_{s,d} \\ v_{s,q} \\ v_{r,d} \\ v_{r,q} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & \omega & a_{12} & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & a_{12} \\ a_{21} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & a_{21} & -\omega & 0 \end{bmatrix}$$

Les matrices B_{dq} et $B_{d,dq}$ ont été précédemment définies.

On en déduit les commande réelles :

$$\begin{bmatrix} v_{stat,d} \\ v_{stat,q} \\ v_{sssc,d} \\ v_{sssc,q} \end{bmatrix} = B_{dq}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} U_{1,d} \\ U_{1,q} \\ U_{2,d} \\ U_{2,q} \end{bmatrix} - A' \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} - B_{d,dq} \begin{bmatrix} v_{s,d} \\ v_{s,q} \\ v_{r,d} \\ v_{r,q} \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$

Le schéma global de commande est bien illustré par la figure (3.1).

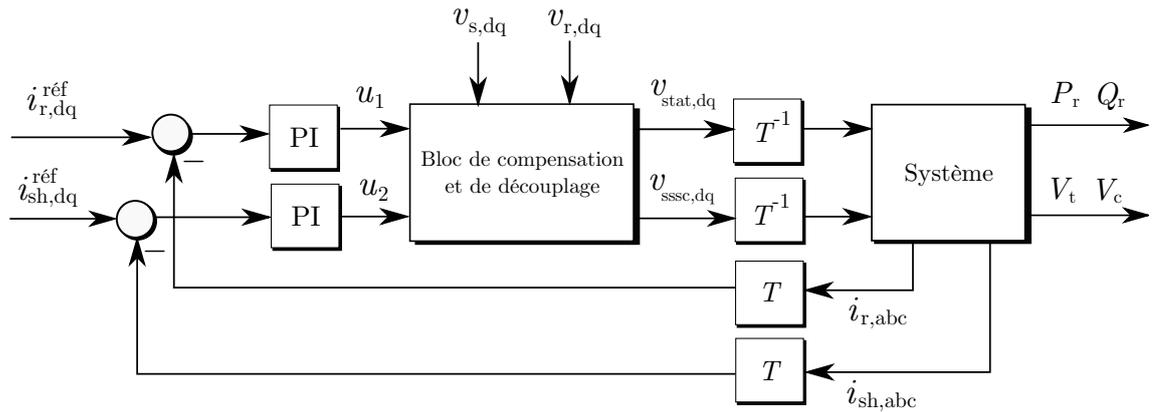


FIGURE 3.1 – Schéma de régulation PI

3.5 Simulation et résultats

3.5.1 Poursuite d'une référence de puissance

Nous avons effectué les simulations sous le logiciel MATLAB. En premier lieu, nous avons choisi les références de puissance transitées dans la ligne comme suit : $P_r^{réf}=100\text{MW}$, $Q_r^{réf}=50\text{MVAR}$.

A l'instant $t=0.33\text{s}$, $P_r^{\text{réf}}=200\text{MW}$. Puis à l'instant $t=0.66\text{s}$, $P_r^{\text{réf}}=-100\text{MW}$.

A l'instant $t=0.5\text{s}$, $Q_r^{\text{réf}}=0\text{ MVAR}$

On va visualiser les signaux suivants :

- La puissance active transitée dans la ligne P_r
- La puissance réactive transitée dans la ligne Q_r
- Le courant shunt injecté par le STATCOM i_{sh}
- La tension série injectée par le SSSC v_{SSC}
- La valeur efficace de la tension au point de raccordement V_t
- La tension aux bornes du condensateur V_c

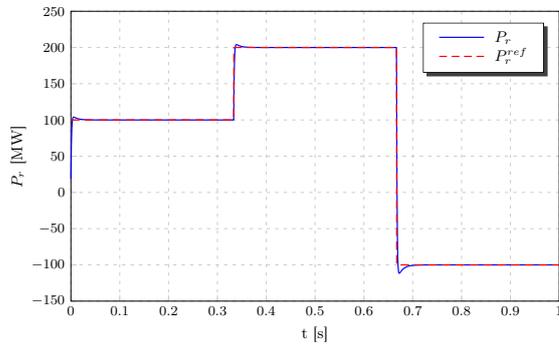


FIGURE 3.2 – Puissance active en aval

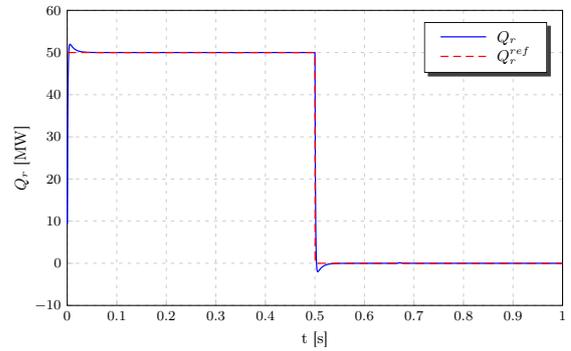


FIGURE 3.3 – Puissance réactive en aval

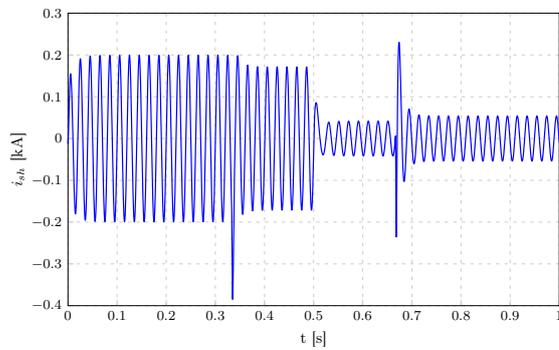


FIGURE 3.4 – Courant injecté par le STATCOM

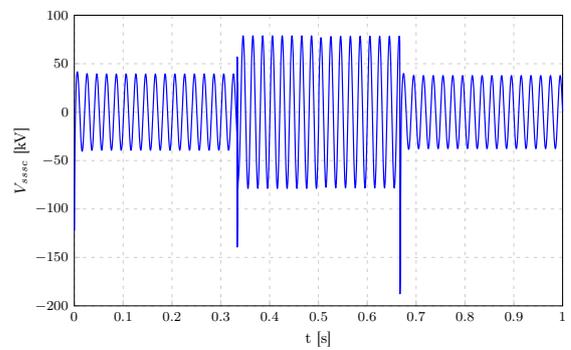


FIGURE 3.5 – Tension injectée par le SSSC

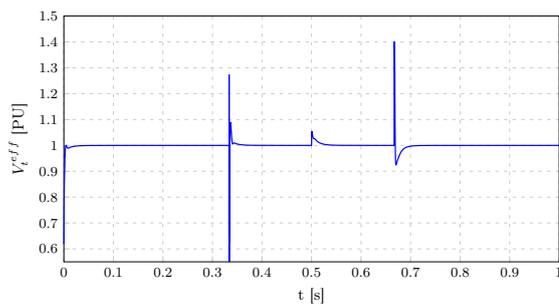


FIGURE 3.6 – Tension efficace au noeud de raccordement

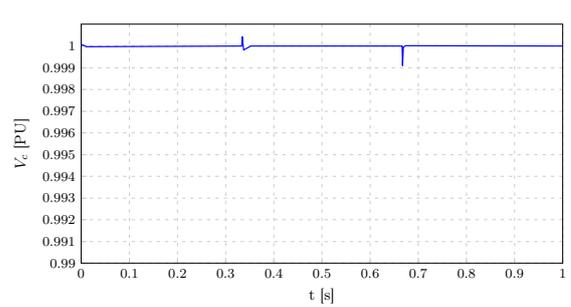


FIGURE 3.7 – Tension aux bornes du condensateur de couplage

Interprétation des résultats De l'instant $t = 0.33s$ à $t=0.66s$, on varie la référence de la puissance active pour quelle devienne $P_r^{\text{réf}}=200\text{MW}$. D'après les résultats de simulation, on remarque que les puissances de la ligne suivent leurs références, ce qui valide le bon fonctionnement des régulateurs de la partie série. Cependant, l'apparition de petites oscillations dues à l'interaction entre la puissance active et réactive. Au moment de l'augmentation de la puissance active demandée par le réseau en aval, la tension injectée par le SSSC augmente et le courant délivré par le STATCOM diminue mais avec de très faibles valeurs, ces variations sont nécessaires pour rétablir l'état de fonctionnement précédent.

À l'instant ($t = 0.50s$), on varie la référence de la puissance réactive pour quelle devienne $Q_r^{\text{réf}}=0\text{MVAR}$. On remarque que le courant délivré par la partie shunt diminue, et le STATCOM absorbe la puissance réactive car l'appel de la puissance réactive du réseau en aval dans l'intervalle $[0.5s, 1s]$ est nul. Contrairement à la période ($t = 0$ à $t=0.50s$), où le courant injecté par la partie shunt augmente ce qui implique l'augmentation de la puissance réactive injecté par le STATCOM pour compenser l'appel de réseau en aval. Ça vérifie le bon fonctionnement des régulateurs de la partie shunt. Et grâce à ces derniers, la tension au point de raccordement ainsi que celle aux bornes du condensateur restent constantes.

De l'instant $t = 0.66s$ à $t = 1s$, on varie la référence de la puissance active pour quelle devienne ($P_r^{\text{réf}}=-100\text{MW}$). À ce moment, la tension injectée par le SSSC diminue car le réseau absorbe la puissance active et le courant délivré par la partie parallèle subit une petite augmentation et se stabilise.

3.5.2 Réseau perturbé

Dans cette partie, on a choisis des références de puissance constantes :

- Puissance active : $P_r^{\text{réf}}=100\text{MW}$
- Puissance réactive : $Q_r^{\text{réf}}=0\text{MVAR}$

Cas 1 : Creux de tension

On suppose qu'un creux de tension de 50% survienne sur le réseau en aval à l'instant $t=0.5s$ et dure 40ms. On visualise les mêmes signaux que précédemment.

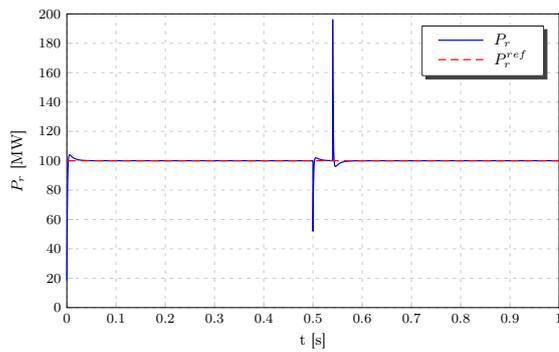


FIGURE 3.8 – Puissance active en aval

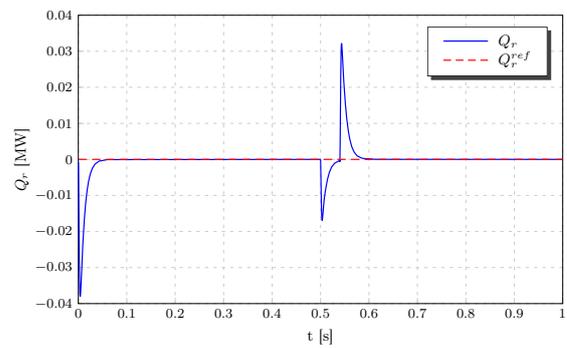


FIGURE 3.9 – Puissance réactive en aval

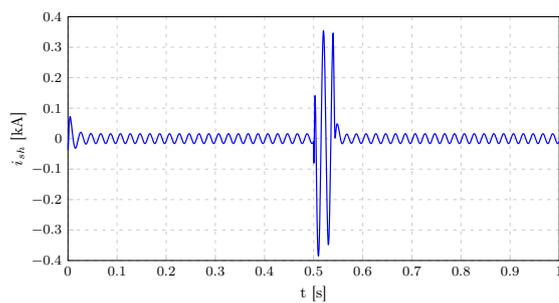


FIGURE 3.10 – Courant injecté par le STATCOM

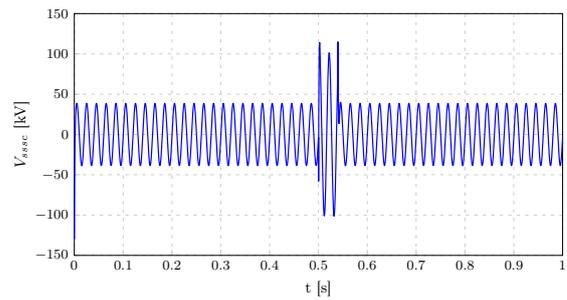


FIGURE 3.11 – Tension injectée par le SSSC

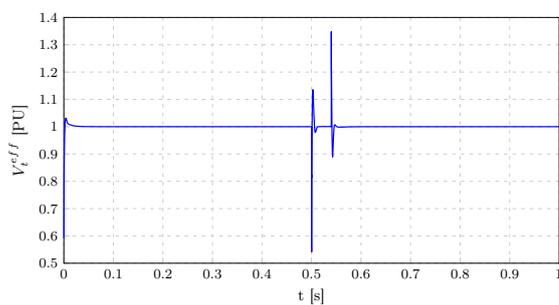


FIGURE 3.12 – Tension efficace au noeud de raccordement

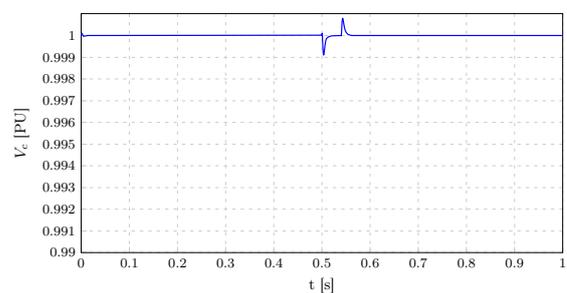


FIGURE 3.13 – Tension aux bornes du condensateur de couplage

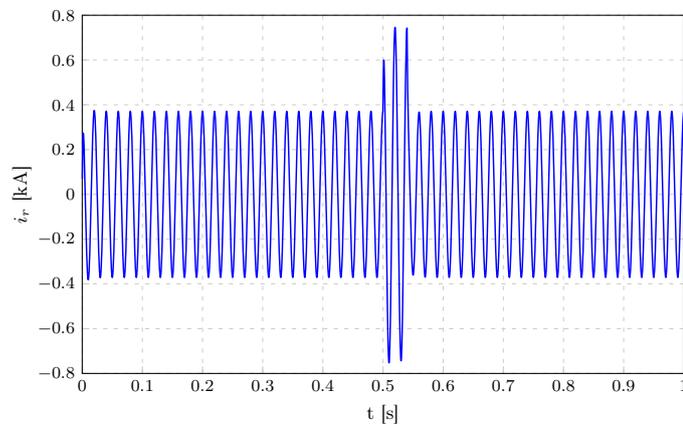


FIGURE 3.14 – Courant de ligne

Interprétation des résultats On remarque l'apparition de deux pics de puissance active d'amplitude considérable aux deux instants $t_1=0.5s$ et $t_2=0.54s$. Ces pics sont dus à la variation brusque de la tension en aval. Cependant, la puissance réactive n'est pas très affectée car la demande en réactif est nulle.

La tension injectée par le SSSC double au moment du creux de tension pour la compenser. À ce moment, le SSSC demande de la puissance de la partie STATCOM, ce qui se traduit par une grande augmentation de la puissance active shunt.

Le courant shunt augmente, ceci est dû à l'action du régulateur pour ramener la tension V_t à sa valeur nominale en injectant du réactif au point de raccordement. On remarque de légères fluctuations sur la tension V_c , causés par la demande en puissance active du SSSC.

On note par ailleurs que le courant de ligne i_r reste dans les bornes admissibles ainsi que les tensions de commande.

Cas 2 : Court-circuit

On suppose qu'un défaut symétrique impédant survienne sur le réseau à l'instant $t=0.5s$ et durant 40ms, on visualise les mêmes signaux que précédemment.

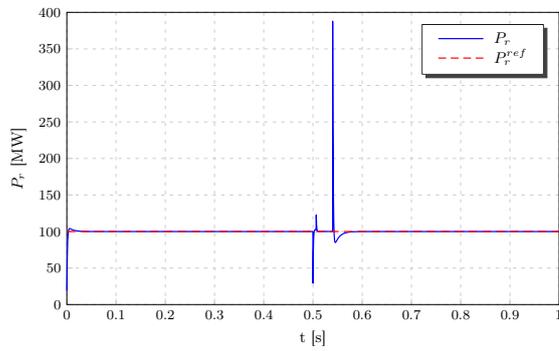


FIGURE 3.15 – Puissance active en aval

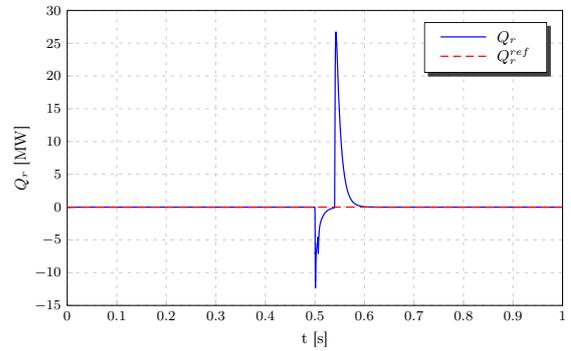


FIGURE 3.16 – Puissance réactive en aval

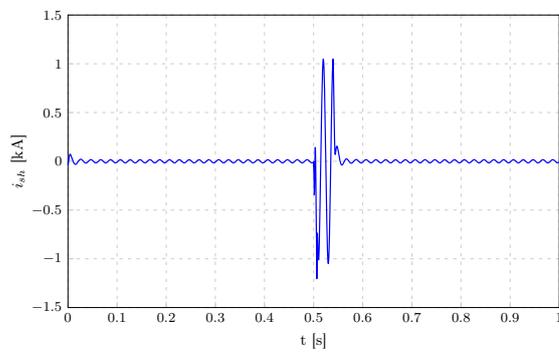


FIGURE 3.17 – Courant injecté par le STATCOM

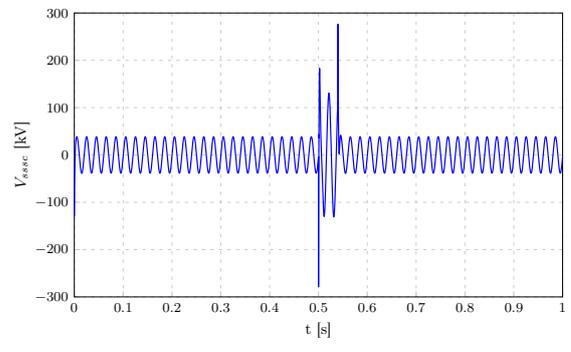


FIGURE 3.18 – Tension injectée par le SSSC

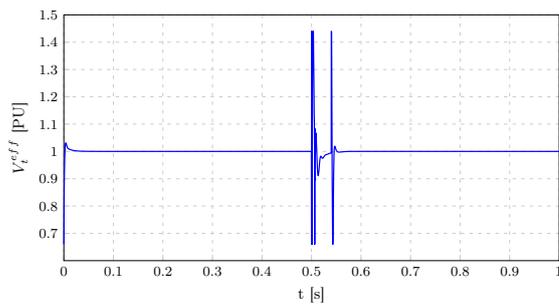


FIGURE 3.19 – Tension efficace au noeud de raccordement

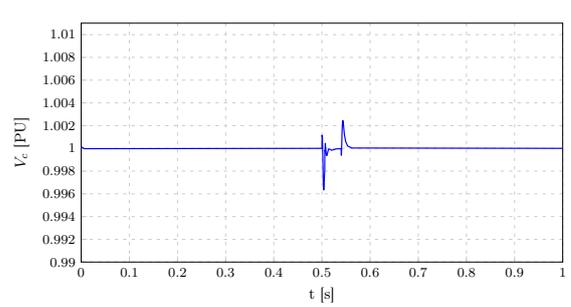


FIGURE 3.20 – Tension aux bornes du condensateur de couplage

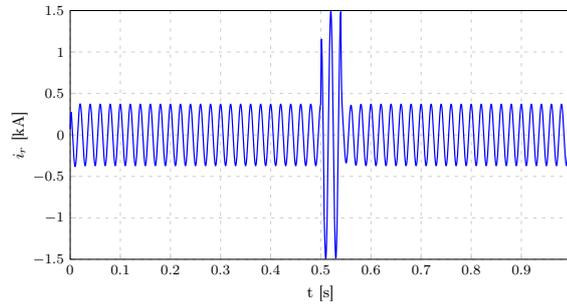


FIGURE 3.21 – Courant de ligne

Interprétation des résultats On remarque l'apparition de deux pics de puissance active et réactive de très grande amplitude aux deux instants $t_1=0.5$ s et $t_2=0.54$ s. Ceci est dû à la présence d'un très grand courant de court-circuit circulant sur la ligne. Mais le régulateur réussit à ramener ces dernières à leurs valeurs de référence après la disparition du court-circuit.

La tension injectée par le SSSC augmente phénoménalement au moment du défaut pour compenser la chute de la puissance. De ce fait, le SSSC demande énormément de puissance de la partie STATCOM, ce qui se traduit par une grande augmentation de la puissance active shunt.

Le courant shunt présente une grande amplitude durant l'apparition du défaut afin de régler la tension V_t à sa valeur nominale. On note par ailleurs que le courant de ligne i_r reste dans les bornes admissibles ainsi que les tensions de commande.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a synthétisé un régulateur PI avec une compensation par FEED-FORWARD. On a ensuite testé le système bouclé dans différentes situations possibles. Dans une situation de fonctionnement normale, le régulateur arrive à suivre des changements de référence de puissance et forcer le transfert de celle-ci. Dans le cas de creux de tension ou de court-circuit, le réseau devient fortement perturbé mais le régulateur arrive à maintenir la stabilité du réseau, et de permettre aux puissances transitées de suivre leurs références.

Chapitre 4

Commande prédictive

Sommaire

4.1	Introduction	60
4.2	Différentes variantes de la commande prédictive	60
4.3	Principe de la commande prédictive	62
4.4	Choix du modèle du processus	64
4.5	Mise en forme du modèle	65
4.5.1	Échantillonnage	65
4.5.2	Modèle incrémenté	65
4.5.3	Modèle standard	66
4.6	Le critère de performance	68
4.7	Prédiction	69
4.8	Mise sous forme standard	71
4.9	Le problème standard	73
4.9.1	Formulation du problème standard	73
4.9.2	Résolution du problème standard	73
4.10	Application de la commande sur l'UPFC	77
4.11	Simulation et résultats	77
4.11.1	Influence des paramètres	77
4.11.2	Poursuite d'une référence de puissance	83
4.11.3	Réseau perturbé	85
4.12	Comparaison des deux commandes	89
4.13	Conclusion	91

4.1 Introduction

Durant les dernières décennies, la MPC (*Model Predictive Control*), ou généralement *Commande Prédictive*, a montré une capacité exceptionnelle à répondre aux nombreux défis de l'industrie moderne dans différents processus. Celle-ci n'est plus considérée comme une simple technique de réglage mais une large discipline. La différence qui sépare les diverses méthodes de cette commande est la formulation mathématique de celles-ci, et ceci afin de garantir la solution au problème de commande en un temps fini.

La commande prédictive est l'une des approches les plus importantes de la commande numérique. Il s'agit d'une technique basée sur la prédiction du comportement futur du processus à commander. Cette prédiction est effectuée grâce à un modèle numérique, afin de déterminer la commande optimale à appliquer pour adopter le profil de fonctionnement souhaité.

Un des principaux atouts de cette commande est le fait que, pour une référence établie sur un horizon temporel, il est possible de faire coïncider la sortie parfaitement avec sa référence en exploitant des prédictions effectuées précédemment.

Dans ce chapitre, on va présenter la philosophie de cette commande et son principe de fonctionnement. Ensuite, on va s'attaquer à la formulation théorique de cette commande qui constitue une des approches les plus modernes. Finalement, on va appliquer cette commande sur notre système et le tester dans différentes situations.

4.2 Différentes variantes de la commande prédictive

Les premiers éléments de la commande prédictive ont été introduits par SMITH vers la fin des années 1950. C'est une méthode plus connue sous le nom de *Prédicteur de Smith*. Celle-ci a pour objectif de compenser l'effet du retard dans la boucle de commande. Cependant, cette méthode est peu robuste, d'une part à cause de sa sensibilité aux erreurs de modélisation et d'autre part à cause de son incapacité à stabiliser des procédés instables

en boucle ouverte.

Vers la fin des années 1970, le concept de commande prédictive a été repris par d'autres chercheurs tels que RICHALLET, AL [5] et CLARKE [2]. Ces derniers ont contribué à la construction des bases de la commande prédictive moderne.

La commande prédictive n'a émergé de manière industrielle qu'à partir du milieu des années 1980, même si de nombreux travaux ont fait état de son intérêt dès la fin des années 1970. La commande prédictive est devenu applicable sur une large classe de systèmes (stable, instable en boucle ouverte, à phase non minimale, avec retard) [28].

Au fil du temps, de nombreuses catégories et dénominations de la commande prédictive ont été proposées. La liste ci-dessous propose un aperçu non exhaustif des plus classiques [28] :

- MPHIC (*Model Predictive Heuristic Control*), connue ensuite sous le nom de MAC (*Model Algorithmic Control*). Cette approche, appliquée aux systèmes industriels multivariables, basée sur des prédictions sur un horizon temporel long, impose des trajectoires de référence pour les sorties et minimise la variance de l'erreur.
- DMC (*Dynamic Matrix Control*) proposée par Shell utilise l'incrément de commande à la place de la commande dans le critère de performance pour un horizon fini de prédiction ; cet algorithme est appliqué à des systèmes multivariables linéaires sans contraintes ; l'erreur de poursuite est minimisée en spécifiant le comportement futur des sorties ; les commandes optimales sont calculées par la méthode des moindres carrés.
- EHAC (*Extended Horizon Adaptive Control*), stratégie de commande prédictive pour les systèmes monovariables, utilise des modèles E/S pour maintenir la sortie future (calculée via la résolution d'une équation diophantienne) le plus près possible de la consigne pendant une période donnée au-delà du retard pur du système.
- EPSAC (*Extended Prediction Self-Adapted Control*) introduit une commande constante pour un système non-linéaire (en linéarisant le système) et utilise un prédicteur sous-optimal à la place de la résolution de l'équation diophantienne ; l'article offre également une démonstration de stabilité.

- GPC (*Generalized Predictive Control*) Cette méthode la plus connue, basée sur un modèle de type CARIMA, introduit un horizon de prédiction sur la commande, agit conformément au principe de l'horizon fuyant et peut être appliquée aux systèmes à non minimum de phase, aux systèmes instables en boucle ouverte, aux systèmes avec retards purs variables.
- PFC (*Predictive Functional Control*) est un algorithme prédictif simple, utilisé surtout pour des systèmes SISO industriels rapides et/ou nonlinéaires, s'avérant pratique pour l'ingénieur en permettant le réglage direct des paramètres (par exemple la constante de temps) associées au temps de montée; pour garder la simplicité, une manque de rigueur en performance et surtout dans la garantie des contraintes est associée à cet algorithme.
- CRHPC (*Constrained Receding Horizon Predictive Control*) propose de prendre en compte des contraintes terminales sous forme égalité sur la sortie sur un horizon fini au-delà de l'horizon de prédiction.
- MPC (*Model Predictive Control*) utilise le formalisme de la représentation d'état pour faciliter l'analyse de la stabilité et de la robustesse.

En fait, toutes ces variantes de stratégies de commande prédictive sont aujourd'hui regroupées sous le terme générique MPC, illustrant ainsi le rôle fondamental du modèle.

Ce bref rappel historique a permis de donner une idée de l'évolution de la commande prédictive, depuis les stratégies classiques bien connues maintenant jusqu'aux développements les plus récents en termes de robustesse et d'application à des systèmes non-linéaires.

4.3 Principe de la commande prédictive

La commande prédictive MPC représente un moyen relativement simple d'aborder une loi de commande dans le domaine temporel, et a démontré au travers de nombreuses applications ses qualités liées à la régulation des systèmes multivariables, des systèmes instables, des systèmes à retard, des systèmes non-linéaires, des systèmes non minimum de phase, des systèmes hybrides [28].

La technique de la commande prédictive est basé sur un modèle discret du processus qui

permet dans un premier temps de prédire la sortie du système sur un horizon fini. Puis, à chaque instant, en minimisant un critère de performance sur cet horizon fini, une séquence de commande est obtenue dont seul le premier élément est appliqué au système. La même procédure est enfin reprise à la période d'échantillonnage suivante, selon le principe de l'horizon fuyant. Le but est de maintenir la sortie du système la plus près possible de la référence désirée, supposée connue sur l'horizon fini de prédiction de façon à mettre en évidence un certain caractère anticipatif. Cette méthode est décrite par le schéma de la figure (4.1) [29].

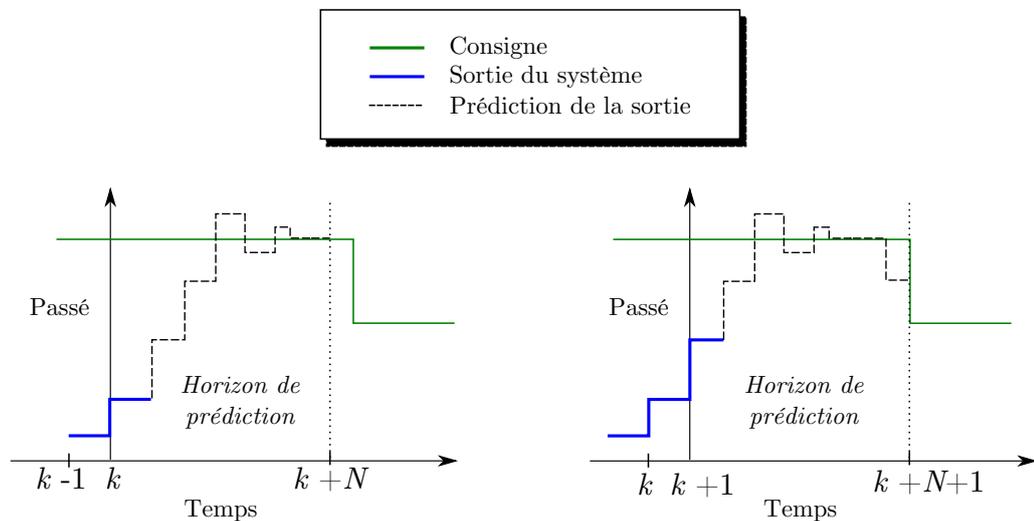


FIGURE 4.1 – Principe de la commande prédictive

On peut présenter la régulation par la commande prédictive par le schéma suivant :

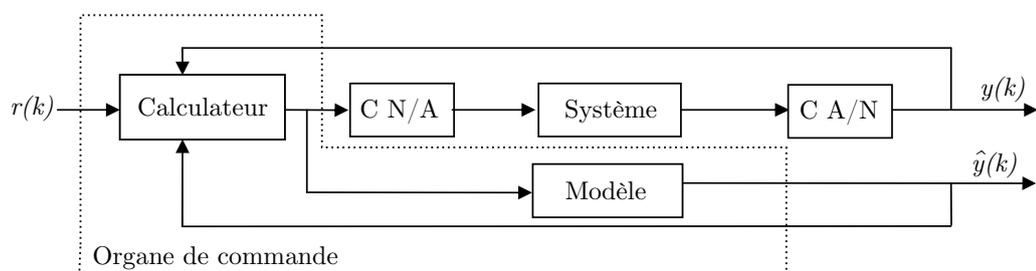


FIGURE 4.2 – Boucle de réglage de la commande prédictive

4.4 Choix du modèle du processus

La loi de commande prédictive implique la connaissance du comportement futur du système obtenu à l'aide d'un modèle du processus. Ainsi l'élément central de la commande MPC est le modèle du système. Ce point fort peut devenir aussi son point faible, selon la qualité du modèle. Trouver le bon modèle (le plus simple possible, mais malgré tout suffisamment significatif et adapté aux besoins, en offrant des prédictions suffisamment précises) implique une connaissance appropriée du système. Le modèle doit être capable de prédire le comportement du système en réponse à une sollicitation donnée [20].

Certes, les systèmes réels sont rarement linéaires, mais dans la pratique la représentation choisie est souvent linéaire, induisant en l'absence de contraintes une structure linéaire de la loi de commande prédictive. Ainsi, de cette manière, l'optimisation et l'analyse hors ligne du comportement en boucle fermée sont beaucoup plus faciles. En dernier lieu, si la modélisation linéaire s'avère insuffisante, une mise en oeuvre via un modèle non-linéaire peut s'envisager.

Ces modèles servant à la prédiction sont classiquement des modèles à temps discret, dès lors que la commande prédictive est plutôt implémentée sous forme discrète sur ordinateur. Malgré tout, des techniques de synthèse à temps continu existent [28].

Plusieurs structures de représentation linéaire d'un système physique sont utilisées pour la modélisation (fonctions de transfert, équations aux différences, représentation d'état). On a choisi l'approche MPC parce que celle-ci est basée sur la représentation d'état qui permet de traiter naturellement les systèmes multivariables contrairement à l'approche GPC qui utilise un modèle Entrée/Sortie (matrice de transfert) rendant ainsi la synthèse plus complexe (résolution des équations de DIOPHANTINE) [28].

En plus, l'approche MPC considère les systèmes multivariables avec leurs couplages et permet de les commander de façon intégrale plutôt qu'une loi de commande prédictive SISO appliqué au système découplé. Dans ce dernier cas, les performances obtenues peuvent être médiocres et peu satisfaisantes.

4.5 Mise en forme du modèle

Considérons un système multivariable décrit par la représentation d'état continue suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} &= A_c \cdot X + B_{c1} \cdot D + B_{c2} \cdot U \\ Y &= C_c X \end{cases}$$

4.5.1 Échantillonnage

On échantillonne le système avec un pas d'échantillonnage T . Il en résulte le système d'état discret suivant :

$$x_o(k+1) = A_o \cdot x_o(k) + B_r \cdot d(k) + B_o \cdot u(k) \quad (4.1)$$

$$y(k) = C_o x(k) \quad (4.2)$$

Le modèle discret précédent liant la sortie du système $y(k)$ à son entrée $u(k)$ est dit *modèle Entrée-Sortie direct (Direct Input-Output model)*. Le vecteur $d(k)$ étant considéré comme une perturbation à rejeter [29].

4.5.2 Modèle incrémenté

Dans de nombreux cas, il n'est pas utile de manipuler le signal $u(k)$, mais son incrément défini par :

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = (1 - q^{-1})u(k) = \Delta(q)u(k)$$

Dans cette représentation, c'est l'incrément de la commande qui est calculé. Il est donc nécessaire d'intégrer ce dernier afin de restituer la commande $u(k)$. Le modèle incrémenté du système est défini par la représentation d'état :

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_{i1} d_i(k) + B_{i2} \Delta u(k) \quad (4.3)$$

$$y(k) = C_i x_i(k) \quad (4.4)$$

Ce modèle résulte du choix du vecteur d'état suivant :

$$x_i(k) = \begin{bmatrix} y(k-1) \\ \Delta x_o(k) \end{bmatrix}$$

Où $\Delta x_o(k) = \Delta(q)x_o(k)$ est l'incrément de l'état du système, et $d_i(k) = \Delta(q)d(k)$ l'incrément de perturbation.

On peut écrire :

$$\begin{aligned} y(k) &= y(k-1) + \Delta y(k) \\ &= y(k-1) + C_o \Delta x_o(k) \end{aligned} \quad (4.5)$$

En introduisant l'opérateur $\Delta(q)$ dans l'équation (4.2), on trouve :

$$\Delta x_o(k+1) = A_o \Delta x_o(k) + B_r \Delta d(k) + B_o \Delta u(k) \quad (4.6)$$

En combinant les équations précédentes, on trouve :

$$x_i(k+1) = \begin{bmatrix} I & C_o \\ 0 & A_o \end{bmatrix} x_i(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ B_r \end{bmatrix} d_i(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ B_o \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (4.7)$$

$$y(k) = [I \quad C_o] x_i(k) \quad (4.8)$$

Avantage du modèle incrémenté L'intérêt principal d'utiliser le modèle incrémenté réside dans la bonne réponse statique du régulateur synthétisé sur la base de ce modèle. L'utilisation des incréments permet l'élimination de l'erreur statique et ceci par l'usage implicite d'un intégrateur [29].

4.5.3 Modèle standard

Dans ce projet, nous allons considérer le modèle standard suivant :

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + B_1w(k) + B_2v(k) \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\tag{4.9}$$

Où $x = x_i$, $A = A_i$, $v(k) = \Delta u(k)$, $B_2 = B_{i2}$ et $w(k)$ est l'incrément de la perturbation augmenté de la référence suivante :

$$w(k) = \begin{bmatrix} \Delta d(k) \\ r(k+1) \end{bmatrix}$$
$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_r & 0 \end{bmatrix}$$

Cette représentation est plus commode car elle permet la manipulation du vecteur référence $r(k)$ comme variable intégrée au modèle du système.

4.6 Le critère de performance

L'objectif de notre réglage étant la poursuite, l'indice de performance sera basé sur l'erreur de poursuite et l'action de commande. Nous choisissons le critère de performance de type GPC [14] :

$$\begin{aligned}
 J(k) = & \sum_{j=N_m}^N (\hat{y}(k+j) - r(k+j))^T (\hat{y}(k+j) - r(k+j)) \\
 & + \lambda^2 \sum_{j=1}^{N_c} \Delta u^T(k+j-1) \Delta u(k+j-1)
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

N_m Horizon de coût minimal

N_c Horizon de commande

N Horizon de prédiction

λ Pondération de l'entrée

$\hat{y}(k+j)$ est la sortie prédite à l'instant $k+j$ en se basant sur la connaissance des instants précédents. Le paramètre λ caractérise le compromis entre la poursuite de la référence et la minimisation de la commande.

Paramètres de réglage Le choix d'un bon modèle du système et d'un correcteur MPC comme stratégie de commande ne résout pas encore le problème. Il reste à déterminer les paramètres de réglage spécifiques à la commande prédictive, qui interviennent dans la formulation du critère. Ces paramètres sont en fait assez similaires dans les différentes approches prédictives, se composant d'horizons de prédiction et de pondérations [28].

Plusieurs manières de choix des paramètres existent. Dans l'approche GPC, pour les systèmes à retard, l'horizon de coût minimal N_m peut être choisi égal à la valeur du retard en pas d'échantillonnage. Pour les systèmes sans retard, il est généralement pris à 1. L'horizon de prédiction est choisi aux alentours du temps de réponse du système en pas d'échantillonnage. L'augmentation de N traduit de meilleures performances en boucle

fermée pourvu que N_c soit suffisamment grand (meilleur conditionnement). Cependant, en pratique, on constate que des valeurs de N_c supérieures à 3 n'apportent pas des changements significatifs [25].

L'horizon de prédiction sur la commande doit être augmenté en fonction de la complexité du système à piloter. Pour les systèmes stables, N_c peut être choisi égal à 1, ou supérieur au nombre de pôles mal-amortis. Pour les systèmes instables, N_c doit être choisi (strictement) supérieur au nombre des pôles instables [29].

Généralement, la pondération sur l'incrément de commande est choisie conformément au critère suivant : l'augmentation de λ conduit à une réponse plus lente du système bouclé avec le correcteur. Pour les systèmes multivariables, la pondération λ joue un rôle très important sur le dépassement et sur la largeur relative de la bande passante. Une normalisation de l'erreur de poursuite par rapport à l'effort de commande s'impose en vue de donner un sens physique au choix de la pondération. Une bonne sélection de ce poids pour le cas MIMO peut s'avérer relativement longue [28].

4.7 Prédiction

La prédiction est le calcul des valeurs futures d'un signal interne du système en se basant sur la valeur les états précédents utilisant le modèle. De toute évidence, la commande prédictive utilise ce procédé pour calculer les prochaines commandes à appliquer au système. Pour cela, nous allons considérer le modèle standard, et considérons $p(k)$ un signal à prédire que l'on va projeter sur le modèle standard [29] :

$$p(k) = C_p x(k) + D_{p1} w(k) + D_{p2} v(k) \quad (4.11)$$

A l'instant k , nous allons définir le vecteur $\tilde{p}(k)$ qui contient les valeurs prédites du signal $\hat{p}(k+j)$ sur tout l'horizon de prédiction N . De la même manière, on construit les vecteurs \tilde{v} et \tilde{w} tels que :

$$\tilde{p}(k) = \begin{bmatrix} \hat{p}(k) \\ \hat{p}(k+1) \\ \vdots \\ \hat{p}(k+N-1) \end{bmatrix} \quad \tilde{v}(k) = \begin{bmatrix} v(k) \\ v(k+1) \\ \vdots \\ v(k+N-1) \end{bmatrix} \quad \tilde{w}(k) = \begin{bmatrix} w(k) \\ w(k+1) \\ \vdots \\ w(k+N-1) \end{bmatrix}$$

Le vecteur \tilde{v} représente les incréments de commande future. De même, le vecteur \tilde{w} contient les estimations futures des perturbations augmentées des références futures.

Afin de prédire le signal $p(k)$, on va utiliser les substitutions successives :

$$\begin{aligned} x(k+j) &= Ax(k+j-1) + B_1w(k+j-1) + B_2v(k+j-1) \\ &= A^2x(k+j-2) + AB_1w(k+j-2) + B_1w(k+j-1) \\ &\quad + AB_2v(k+j-2) + B_2v(k+j-1) \\ &\quad \vdots \\ &= A^jx(k) + \sum_{i=1}^j A^{i-1}B_1w(k+j-i) + \sum_{i=1}^j A^{i-1}B_2v(k+j-1) \\ p(k+j) &= C_px(k+j) + D_{p1}w(k+j) + D_{p2}v(k+j) \\ &= C_pA^jx(k) + \sum_{i=1}^j C_pA^{i-1}B_1w(k+j-i) + D_{p1}w(k+j) \\ &\quad + \sum_{i=1}^j C_pA^{i-1}B_2v(k+j-i) + D_{p2}v(k+j) \end{aligned}$$

En posant :

$$\tilde{C}_p = \begin{bmatrix} C_p \\ C_pA \\ C_pA^2 \\ \vdots \\ C_pA^{N-1} \end{bmatrix} \quad \tilde{D}_{p1} = \begin{bmatrix} D_{p1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ C_pB_1 & D_{p1} & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_pAB_1 & C_pB_1 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & D_{p1} & 0 \\ C_pA^{N-2}B_1 & \cdots & C_pB_1 & D_{p1} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{D}_{p2} = \begin{bmatrix} D_{p2} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ C_p B_2 & D_{p2} & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_p A B_2 & C_p B_2 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & D_{p2} & 0 \\ C_p A^{N-2} B_2 & & \cdots & C_p B_2 & D_{p2} \end{bmatrix}$$

Ainsi le vecteur de prédiction $\tilde{p}(k)$ est donné par :

$$\tilde{p}(k) = \tilde{C}_p x(k) + \tilde{D}_{p1} \tilde{w}(k) + \tilde{D}_{p2} \tilde{v}(k)$$

4.8 Mise sous forme standard

La forme standard du critère MPC est la suivante :

$$\sum_{j=0}^{N-1} z^T(k+j) \cdot \Gamma(j) \cdot z(k+j) \quad (4.12)$$

En choisissant $z(k) = [y(k+1) - r(k+1) \quad \lambda v(k)]^T$ et,

$$\Gamma(j) = \begin{bmatrix} \Gamma_1(j) & 0 \\ 0 & \Gamma_2(j) \end{bmatrix}$$

Avec les matrices $\Gamma_1(j)$ et $\Gamma_2(j)$ construites à partir de l'horizon de coût minimal N_m , et celui de la commande N_c comme suit :

$$\Gamma_1(j) = \begin{cases} 0 & 1 \leq j < N_m \\ I & N_m \leq j \leq N \end{cases}$$

$$\Gamma_2(j) = \begin{cases} I & 1 \leq j \leq N_c \\ 0 & N_c < j \leq N-1 \end{cases}$$

le critère sera donc équivalent au critère GPC précédemment cité en (4.10).

De ce fait, nous pouvons écrire l'indice $z(k)$ suivant le modèle standard [29] :

$$\begin{aligned}
z(k) &= \begin{bmatrix} y(k+1) - r(k+1) \\ \lambda v(k) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} Cx(k+1) - r(k+1) \\ \lambda v(k) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} CAx(k) + CB_1w(k) + CB_2v(k) - r(k+1) \\ \lambda v(k) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Si on écrit $r(k+1) = [0 \quad I] \cdot w(k) = Rw(k)$, on obtient :

$$\begin{aligned}
z(k) &= \begin{bmatrix} CAx(k) + (CB_1 - R)w(k) + CB_2v(k) \\ \lambda v(k) \end{bmatrix} \\
&= \underbrace{\begin{bmatrix} CA \\ 0 \end{bmatrix}}_{C_2} x(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} CB_1 - R \\ 0 \end{bmatrix}}_{D_{21}} w(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} CB_2 \\ \lambda I \end{bmatrix}}_{D_{22}} v(k)
\end{aligned}$$

on définit ensuite le vecteur $\tilde{z}(k)$ contenant les valeurs prédites de l'indice sur l'horizon N , et la matrice diagonale $\tilde{\Gamma}$ comme suit :

$$\tilde{z}(k) = \begin{bmatrix} \hat{z}(k) \\ \hat{z}(k+1) \\ \vdots \\ \hat{z}(k+N-1) \end{bmatrix} \quad \tilde{\Gamma} = \begin{bmatrix} \Gamma(0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Gamma(1) & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Gamma(N-1) \end{bmatrix}$$

L'indice de performance défini en (4.10) peut être réécrit :

$$J(k) = \tilde{z}^T \tilde{\Gamma} \tilde{z}$$

En appliquant l'algorithme de prédiction, on peut estimer le vecteur $\tilde{z}(k)$.

$$\tilde{z}(k) = \tilde{C}_2 x(k) + \tilde{D}_{21} \tilde{w}(k) + \tilde{D}_{22} \tilde{v}(k)$$

Avec,

$$\tilde{C}_2 = \begin{bmatrix} C_2 \\ C_2A \\ C_2A^2 \\ \vdots \\ C_2A^{N-1} \end{bmatrix} \quad \tilde{D}_{21} = \begin{bmatrix} D_{21} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ C_2B_1 & D_{21} & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_2AB_1 & C_2B_1 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & D_{21} & 0 \\ C_2A^{N-2}B_1 & \cdots & C_2B_1 & D_{21} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{D}_{22} = \begin{bmatrix} D_{22} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ C_2B_2 & D_{22} & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_2AB_2 & C_2B_2 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & D_{22} & 0 \\ C_2A^{N-2}B_2 & \cdots & C_2B_2 & D_{22} \end{bmatrix}$$

4.9 Le problème standard

4.9.1 Formulation du problème standard

Nous avons écrits toutes les variables de notre système dans le modèle standard. Le problème standard consiste à calculer le régulateur $v(k) = L(y, \tilde{w}, k)$ de telle façon que le critère

$$J(k) = \tilde{z}^T \tilde{\Gamma} \tilde{z}$$

soit minimisé en tout instant.

4.9.2 Résolution du problème standard

Afin de résoudre le problème standard, on décompose $z(k)$ en deux termes l'un libre et l'autre forcé, tels que :

$$\begin{aligned} \tilde{z}(k) &= \tilde{C}_2 x(k) + \tilde{D}_{21} \tilde{w}(k) + \tilde{D}_{22} \tilde{v}(k) \\ &= \tilde{z}_0(k) + \tilde{D}_{22} \tilde{v}(k) \\ \tilde{z}_0(k) &= \tilde{C}_2 x(k) + \tilde{D}_{21} \tilde{w}(k) \end{aligned}$$

De ce fait, la résolution devient un problème de moindres carrés, et la solution du problème standard peut être calculée analytiquement ou de manière itérative. Pour cela, soient les matrices H , $f(k)$ et $c(k)$ définies par :

$$H = 2\tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22} \quad , \quad f(k) = 2\tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22} \tilde{z}_0(k) \quad \text{et} \quad c(k) = \tilde{z}_0^T(k) \tilde{\Gamma} \tilde{z}_0(k)$$

Le critère J peut se réécrire :

$$\begin{aligned} J(k) &= \tilde{v}^T(k) \tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22} \tilde{v}(k) + 2\tilde{v}^T(k) \tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{z}_0(k) + \tilde{z}_0^T(k) \tilde{\Gamma} \tilde{z}_0(k) \\ &= \frac{1}{2} \tilde{v}^T(k) H \tilde{v}(k) + \tilde{v}^T(k) f(k) + c(k) \end{aligned}$$

La minimisation de $J(k)$ s'effectue en annulant le gradient de celui-ci par rapport à $v(k)$,

$$\frac{\partial J}{\partial \tilde{v}} = H \tilde{v} + f(k) = 0$$

Dans le cas où H est inversible, la solution optimale $v(k)$ est donnée par :

$$\begin{aligned} \tilde{v}(k) &= -H^{-1} f(k) \\ &= -\left(\tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22}\right)^{-1} \tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{z}_0(k) \\ &= -\left(\tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22}\right)^{-1} \tilde{D}_{22}^T \left(\tilde{C}_2 x(k) + \tilde{D}_{21} \tilde{w}(k)\right) \end{aligned}$$

Le principe de l'horizon fuyant impose à ce que seule la première commande soit appliquée au système à l'instant k , et le même calcul est répété en décalant l'horizon d'un pas d'échantillonnage. Par conséquent, à l'instant k le signal de commande est donné par :

$$v(k) = [I \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \tilde{v}(k) = E_v v(k)$$

Finalement :

$$v(k) = E_v \tilde{v}(k)$$

$$\begin{aligned}
&= -E_v \left(\tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22} \right)^{-1} D_{22}^T \left(\tilde{C}_2 x(k) + \tilde{D}_{21} w(k) \right) \\
&= -F x(k) + D_w \tilde{w}(k)
\end{aligned}$$

Avec,

$$\begin{aligned}
F &= E_v \left(\tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22} \right)^{-1} D_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{C}_2 \\
D_w &= E_v \left(\tilde{D}_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{22} \right)^{-1} D_{22}^T \tilde{\Gamma} \tilde{D}_{21} \\
E_v &= [I \quad 0 \quad \dots \quad 0]
\end{aligned}$$

Ce type de commande peut s'apparenter à un retour d'état dont le gain est adaptatif. L'approche MPC peut être résumée par l'organigramme suivant :

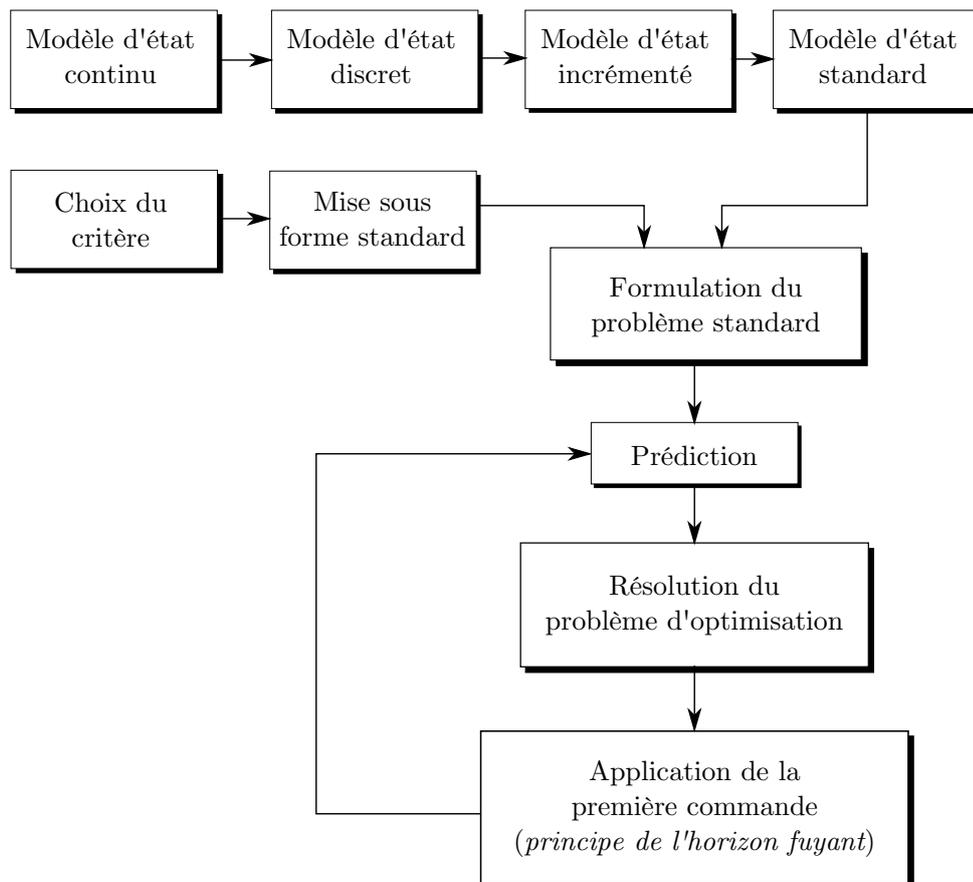


FIGURE 4.3 – Organigramme de l'approche MPC

4.10 Application de la commande sur l'UPFC

Considérons le modèle du réseau équipé d'un UPFC écrit dans le repère de PARK. Nous pouvons écrire ce modèle sous la forme suivante :

$$\dot{X} = A_c \cdot X + B_{c1} \cdot D + B_{c2} \cdot U$$

Où :

$$X = \begin{bmatrix} i_r \\ i_{sh} \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} v_{stat} \\ v_{sssc} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix}$$

$$A_c = A_{dq} \quad B_{c1} = B_{dq} \quad B_{c2} = B_{d,dq}$$

Les tensions V_s et V_r sont considérées comme des perturbations mesurables.

4.11 Simulation et résultats

Dans cette section, on va tester le comportement du réseau muni de l'UPFC sous différentes conditions. Pour effectuer les simulations, on choisit un pas d'échantillonnage $T = 10^{-4}s$ en se basant sur la constante de temps la plus petite.

4.11.1 Influence des paramètres

Dans cette partie, on simule un changement de référence de la puissance active de 100MW à 200MW. On testera ensuite l'influence des paramètres λ , N sur la forme de la réponse ainsi que sur les commandes appliquées.

Influence du paramètre λ

On teste la commande pour différentes valeurs du paramètre λ :

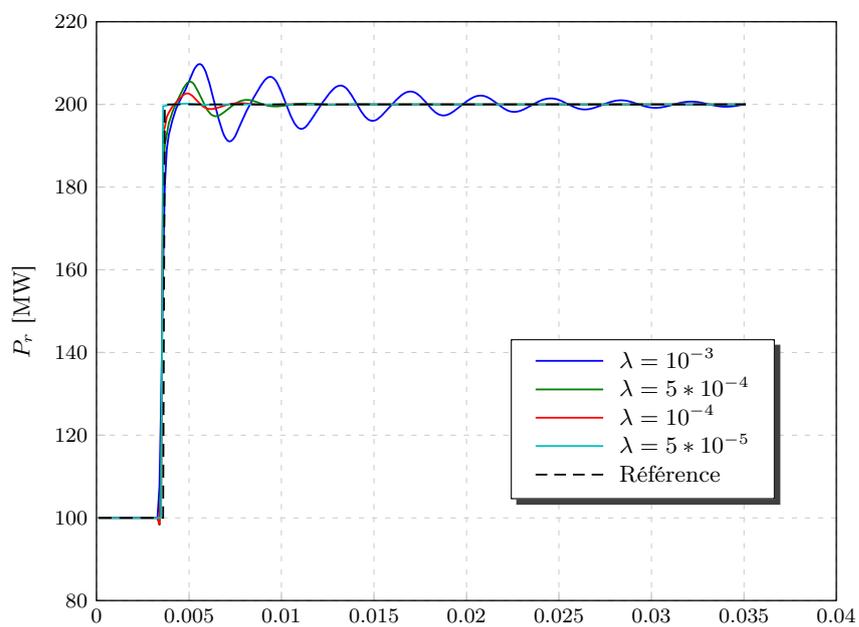


FIGURE 4.4 – Puissance active en aval

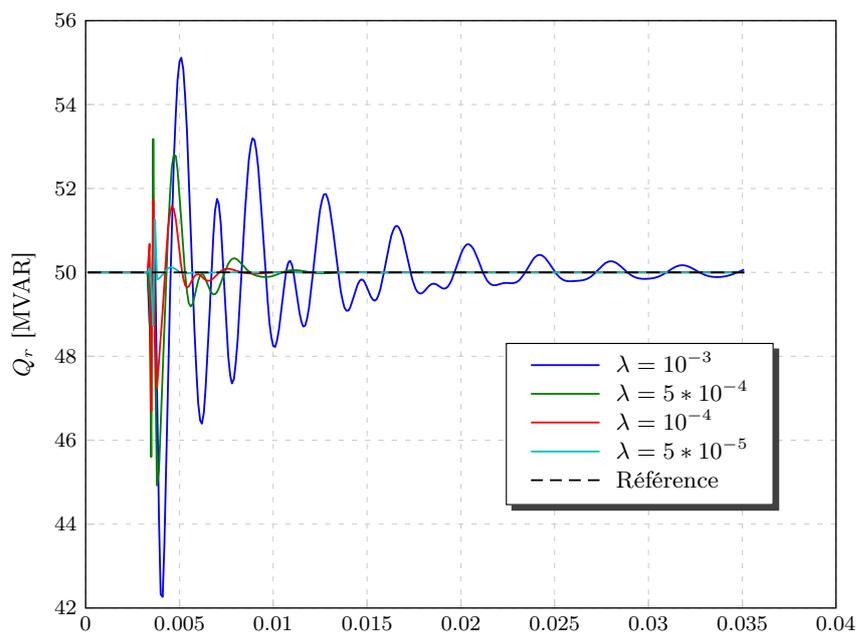


FIGURE 4.5 – Puissance réactive en aval

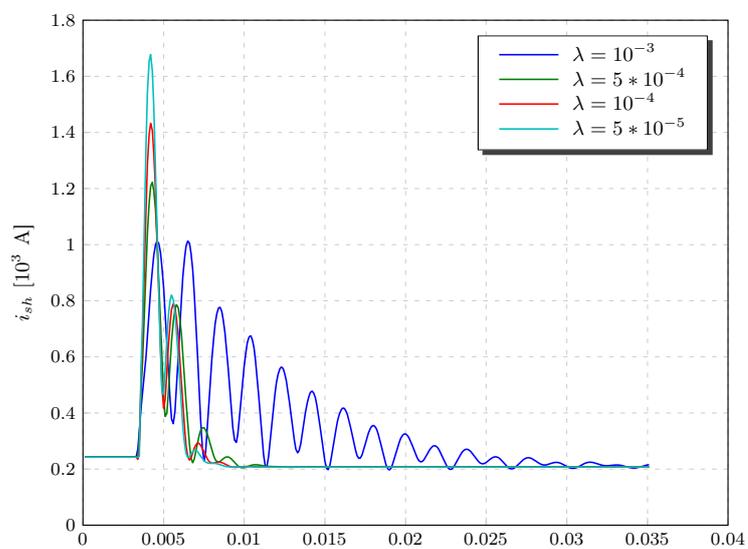


FIGURE 4.6 – Courant injecté par le STATCOM

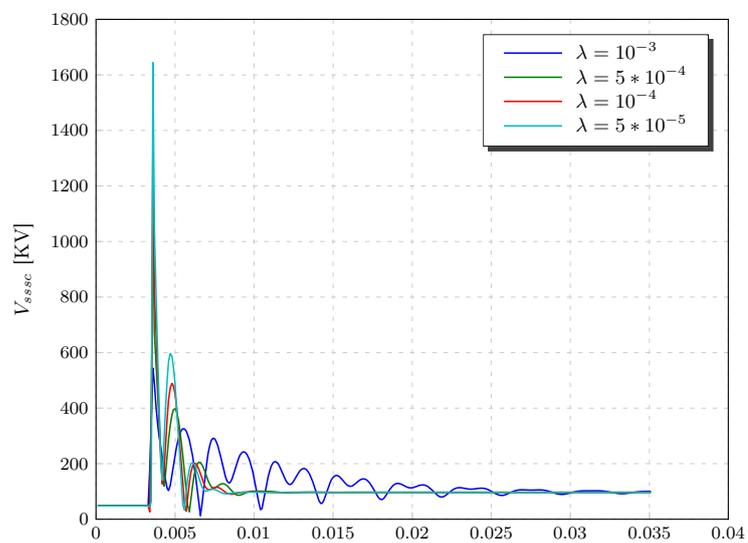


FIGURE 4.7 – Tension injectée par le SSSC

Pour la puissance active P_r , on remarque que plus λ est grand, plus l'amortissement est petit. Par conséquent, le temps de réponse en boucle fermée augmente. La puissance réactive est affectée par le changement de référence de la puissance active à cause du couplage du système, et sa réponse est influencée par la valeur de λ de la même manière que la puissance active.

On remarque que pour les petites valeurs de λ , les commandes i_{sh} et V_{SSC} deviennent plus énergétiques (grand pic au moment du changement de référence).

Par ailleurs, on remarque bien le caractère anticipatif de la commande.

Influence de l'horizon de prédiction N

On teste la commande pour différentes valeurs de l'horizon de prédiction N :

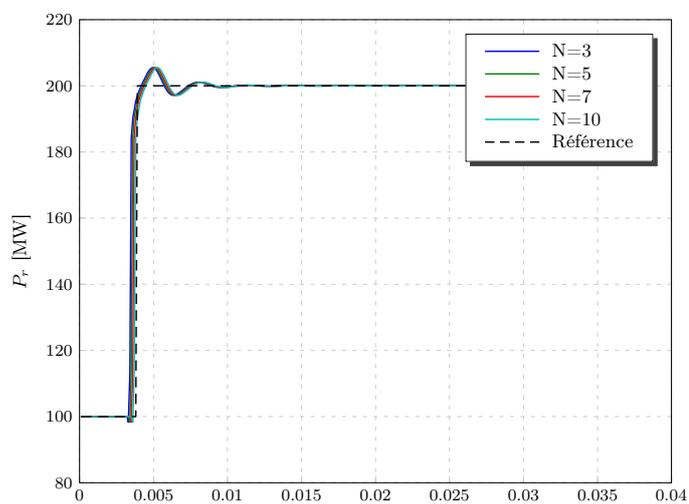


FIGURE 4.8 – Puissance active

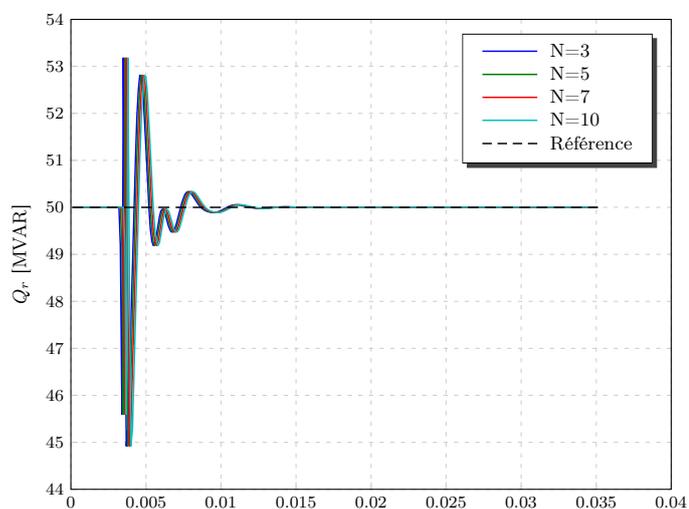


FIGURE 4.9 – Puissance réactive

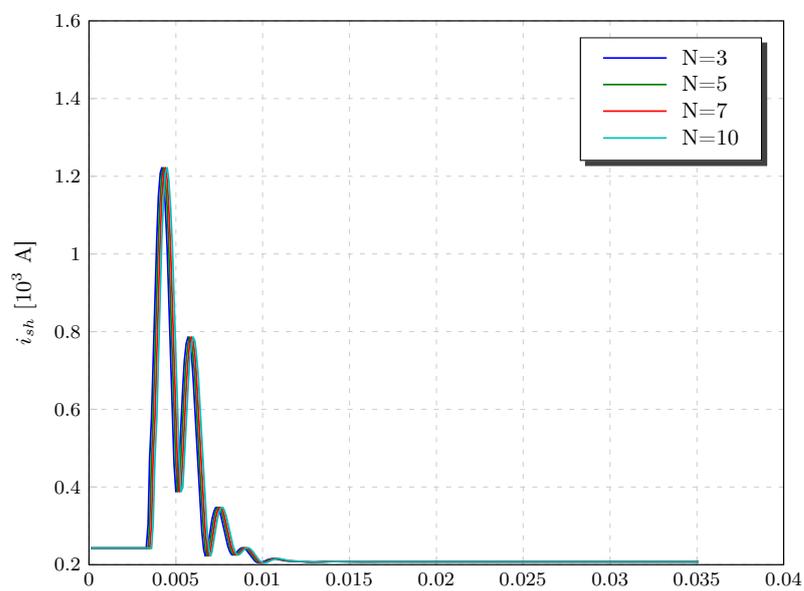


FIGURE 4.10 – Courant injecté par le STATCOM

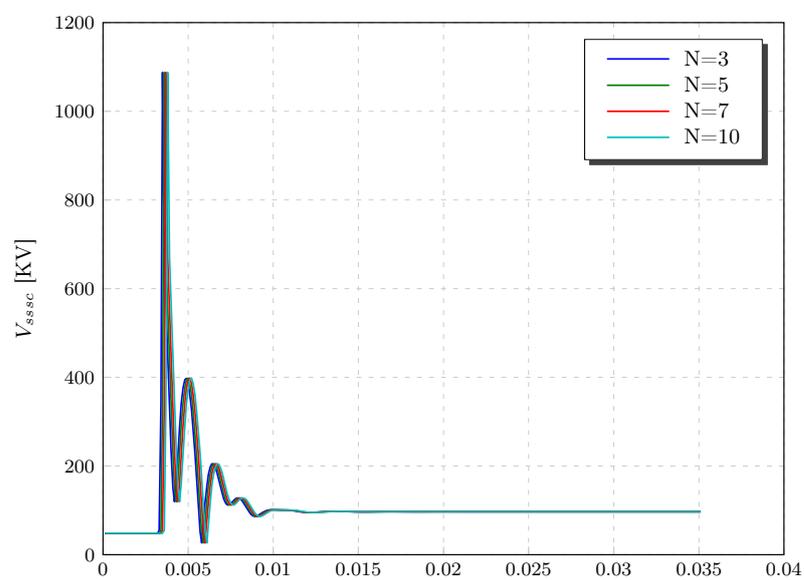


FIGURE 4.11 – Tension injectée par le SSSC

On remarque que pour des valeurs de N plus élevées, l'effet anticipatif et le temps de réponse diminuent. Cependant, les différences entre ces réponses sont très minimes. Puisque un horizon de prédiction plus grand augmente considérablement le temps de calcul, notre choix se porte sur l'horizon $N = 3$.

4.11.2 Poursuite d'une référence de puissance

On choisit le même profil de puissance testé en régulation PI. En premier lieu, $P_r^{\text{réf}}=100\text{MW}$, $Q_r^{\text{réf}}=50\text{MVAR}$. À l'instant $t=0.33\text{s}$, $P_r^{\text{réf}}=200\text{MW}$. Puis à l'instant $t=0.66\text{s}$, $P_r^{\text{réf}}=-100\text{MW}$ (le réseau en amont reçoit la puissance active). À l'instant $t=0.5\text{s}$, $Q_r^{\text{réf}}=0\text{MVAR}$.

On utilisera les paramètres de commande optimaux c'est à dire $N = 3$, $N_m = 1$, $N_c = 2$ et $\lambda = 10^{-4}$.

On va visualiser les signaux suivants :

- La puissance active transitée dans la ligne P_r
- La puissance réactive transitée dans la ligne Q_r
- Le courant shunt injecté par le STATCOM i_{sh}
- La tension série injectée par le SSSC v_{SSC}
- La valeur efficace de la tension au point de raccordement V_t
- La tension aux bornes du condensateur V_c

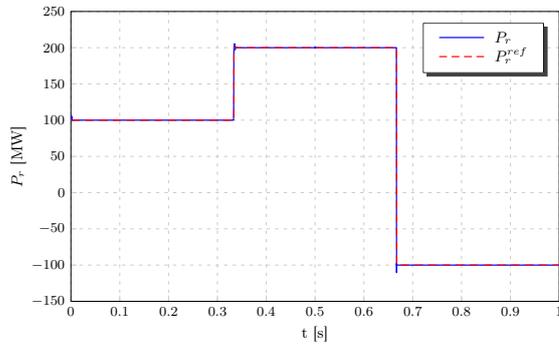


FIGURE 4.12 – Puissance active en aval

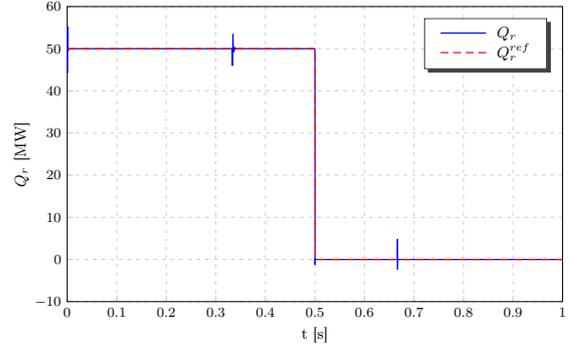


FIGURE 4.13 – Puissance réactive en aval

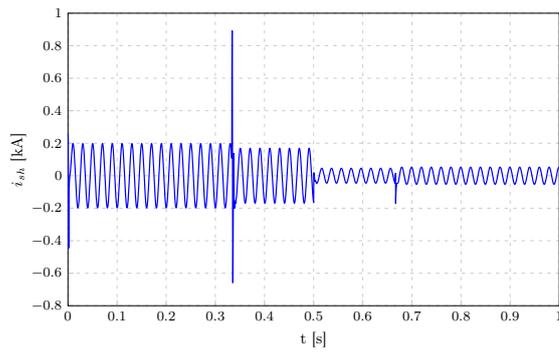


FIGURE 4.14 – Courant injecté par le STATCOM

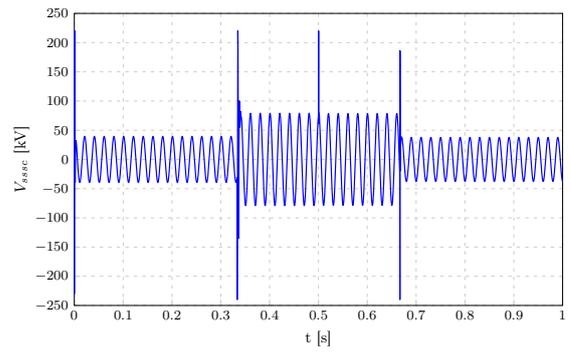


FIGURE 4.15 – Tension injectée par le SSSC

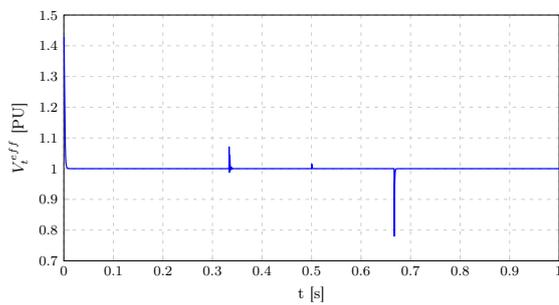


FIGURE 4.16 – Tension efficace au noeud de raccordement

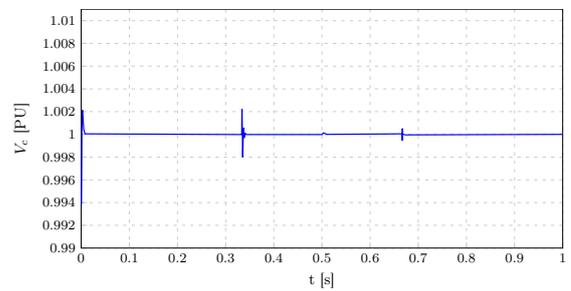


FIGURE 4.17 – Tension aux bornes du condensateur de couplage

Interprétation des résultats De l'instant $t = 0.33s$ à $t=0.66s$, on varie la référence de la puissance active pour quelle devienne $P_r^{\text{réf}}=200\text{MW}$. D'après les résultats de simulation, on remarque que les puissances de la ligne suivent parfaitement leurs références, cela est dû à l'effet anticipatif de la commande. Au moment de l'augmentation de la puissance active demandée par le réseau en aval, la tension injectée par le SSSC augmente et le courant délivré par le STATCOM diminue mais avec de très faibles valeurs, ces variations servent à rétablir l'état de fonctionnement précédent.

À l'instant ($t = 0.50s$), on varie la référence de la puissance réactive pour quelle devienne $Q_r^{\text{réf}}=0\text{MVAR}$. Celle-ci suit parfaitement sa référence. On remarque aussi que le courant délivré la partie shunt diminue, et le STATCOM absorbe la puissance réactive car l'appel de la puissance réactive du réseau en aval dans l'intervalle $[0.5s, 1s]$ est nul. Contrairement à la période ($t = 0s$ à $t=0.50s$), où le courant injecté par la partie shunt augmente ce qui implique l'augmentation de la puissance réactive injecté par le STATCOM pour compenser l'appel de réseau en aval. Et grâce à ces derniers, la tension au point de raccordement ainsi que celle aux bornes du condensateur restent constantes.

De l'instant $t = 0.66s$ à $t = 1s$, on varie la référence de la puissance active pour qu'elle devienne ($P_r^{\text{réf}}=-100\text{MW}$). À ce moment, la tension injectée par le SSSC diminue car le réseau absorbe la puissance active et le courant délivré par la partie parallèle subit à une petite augmentation et se stabilise.

4.11.3 Réseau perturbé

Dans cette partie, on a choisis des références de puissance constantes :

- Puissance active : $P_r^{\text{réf}}=100\text{MW}$
- Puissance réactive : $Q_r^{\text{réf}}=0\text{MVAR}$

Cas 1 : Creux de tension

On suppose qu'un creux de tension de 50% survienne sur le réseau en aval à l'instant $t=0.5s$ et dure 40ms. On visualise les mêmes signaux que précédemment.

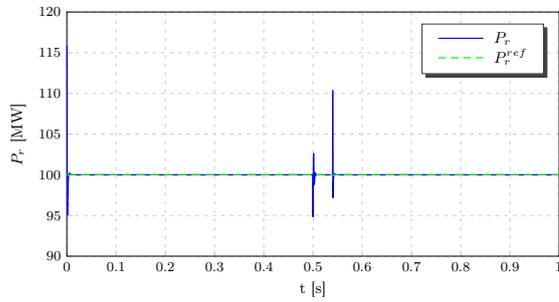


FIGURE 4.18 – Puissance active en aval

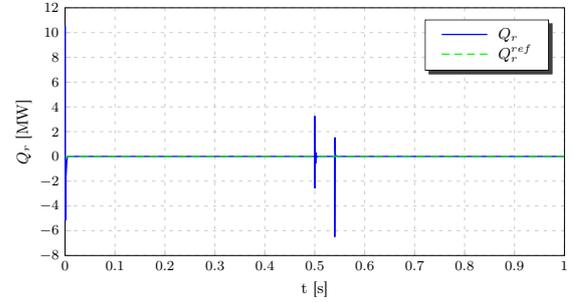


FIGURE 4.19 – Puissance réactive en aval

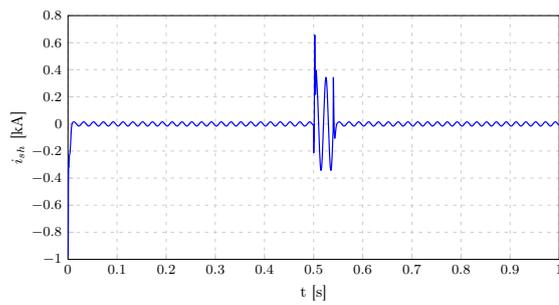


FIGURE 4.20 – Courant injecté par le STATCOM

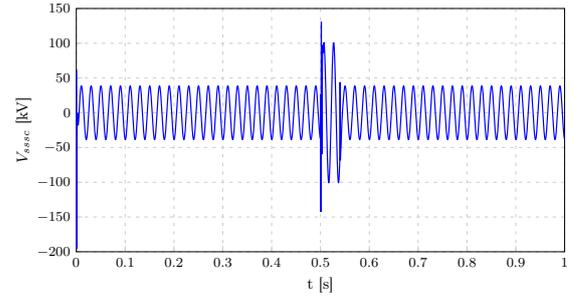


FIGURE 4.21 – Tension injectée par le SSSC

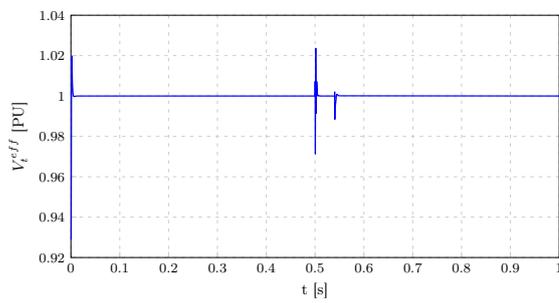


FIGURE 4.22 – Tension efficace au noeud de raccordement

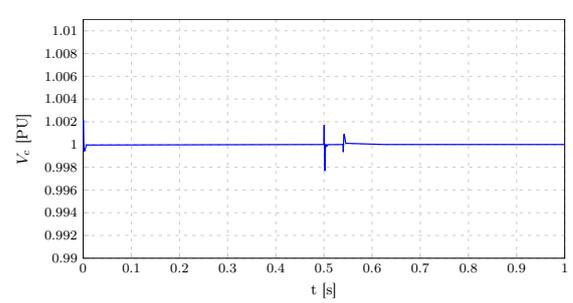


FIGURE 4.23 – Tension aux bornes du condensateur de couplage

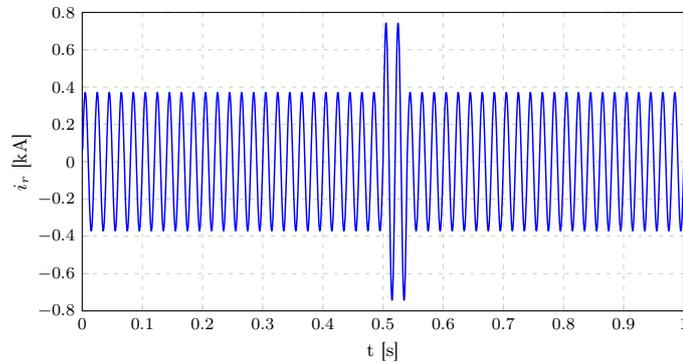


FIGURE 4.24 – Courant de ligne

Interprétation des résultats On remarque l'apparition de deux pics de puissance active d'amplitude faible en comparaison avec ceux du régulateur PI aux deux instants $t_1=0.5s$ et $t_2=0.54s$. Cependant, la puissance réactive est légèrement affectée car la demande en réactif est nulle.

La tension injectée par le SSSC augmente au moment de le creux de tension pour la compenser. On remarque des grands pics de la tension de commande V_{SSC} et du courant shunt i_{sh} par rapport à ceux du régulateur PI afin d'amortir la réponse des puissances et réduire ainsi le temps de réponse. Par conséquent, les puissances reviennent quasi-instantanément à leurs référence à l'apparition de la perturbation. À ce moment, le SSSC demande de la puissance de la partie STATCOM, ce qui se traduit par grande augmentation de la puissance active shunt.

Le courant shunt augmente, ceci est dû à l'action du régulateur pour ramener la tension V_t à sa valeur nominale en injectant du réactif au point de raccordement.

On remarque de légères fluctuations sur la tension V_c , causés par la demande en puissance active du SSSC. On note par ailleurs que le courant de ligne i_r reste dans les bornes admissibles ainsi que les tensions de commande.

Cas 2 : Court-circuit

On suppose qu'un défaut symétrique impédant survienne sur le réseau à l'instant $t=0.5s$ et dure 40ms, on visualise les mêmes signaux que précédemment.

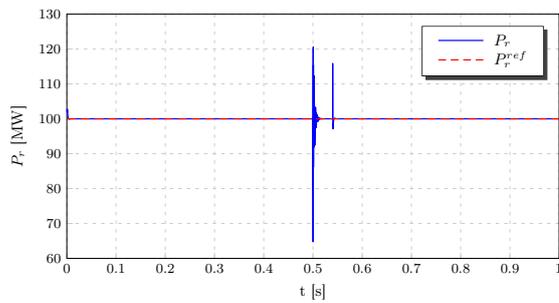


FIGURE 4.25 – Puissance active en aval

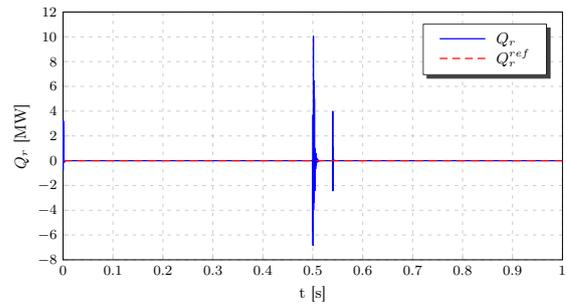


FIGURE 4.26 – Puissance réactive en aval

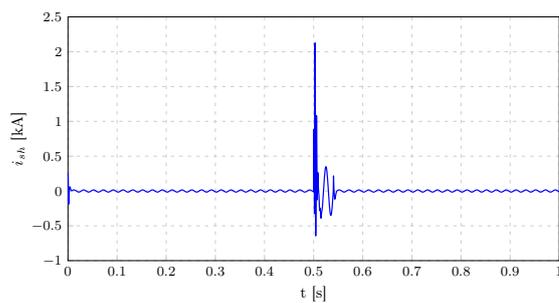


FIGURE 4.27 – Courant injecté par le STATCOM

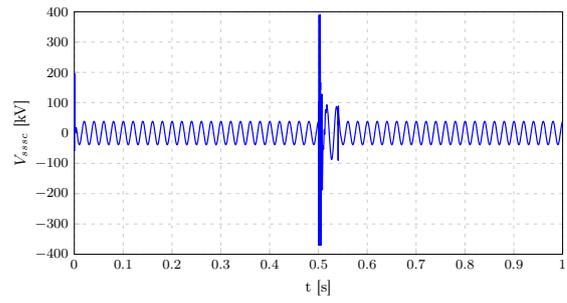


FIGURE 4.28 – Tension injectée par le SSSC

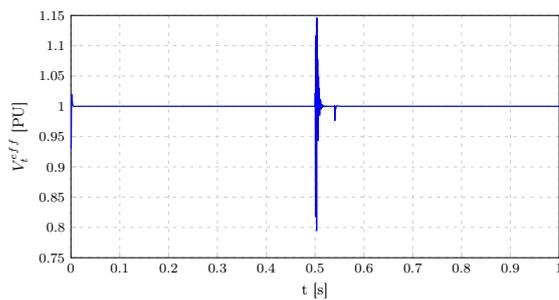


FIGURE 4.29 – Tension efficace au noeud de raccordement

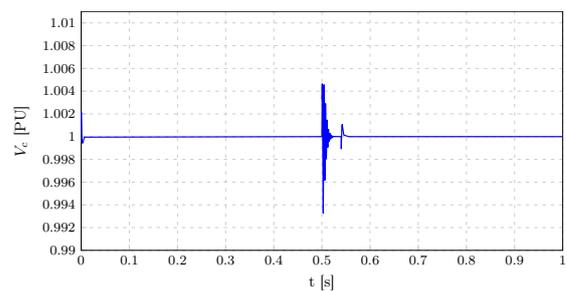


FIGURE 4.30 – Tension aux bornes du condensateur de couplage

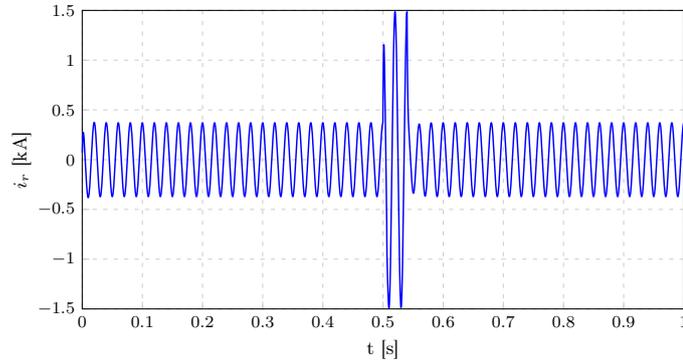


FIGURE 4.31 – Courant de ligne

Interprétation des résultats On remarque l'apparition de deux pics de puissance active d'amplitude faible en comparaison avec ceux du régulateur PI aux deux instants $t_1=0.5s$ et $t_2=0.54s$. Cependant, la puissance réactive est légèrement affectée car la demande en réactif est nulle.

La tension injectée par le SSSC augmente très fortement au moment du court-circuit pour annuler son effet. On remarque des grands pics de la tension de commande V_{SSSC} et du courant shunt i_{sh} par rapport à ceux du régulateur PI afin d'amortir la réponse des puissances et réduire ainsi le temps de réponse. De même que dans le cas du creux de tension, au moment du défaut, le SSSC demande de la puissance à la partie STATCOM, ce qui se traduit par une grande augmentation de la puissance active shunt.

Le courant shunt augmente, ceci est dû à l'action du régulateur pour ramener la tension V_t à sa valeur nominale en injectant du réactif au point de raccordement. On remarque de légères fluctuations sur la tension V_c , causés par la demande en puissance active du SSSC.

On note par ailleurs que le courant de ligne i_r reste dans les bornes admissibles ainsi que les tensions de commande.

4.12 Comparaison des deux commandes

D'après les simulations réalisées sur le système dans des situations différentes, on remarque que la commande prédictive permet l'élimination des perturbations très rapidement

en comparaison avec le PI et permet un suivi parfait de référence grâce à l'effet de l'anticipation. On peut résumer les avantages et inconvénients de cette commande par rapport à ceux du PI par :

Avantages	Inconvénients
Réponse très rapide Effet anticipatif Grande flexibilité des paramètres Compensation intrinsèque des perturbations mesurables (robustesse)	Complexité de l'algorithme de commande Calcul fastidieux Exigence d'un bon modèle

4.13 Conclusion

Dans ce chapitre on'a présenté dans un premier temps le principe de la commande prédictive ayant la particularité de créer un effet anticipatif. De plus on'a vus en évidence les résultats existants dans ce domaine, les besoins industriels et les motivations conduisant à l'utilisation de la commande prédictive. On a aussi vu que le choix d'un bon modèle est nécessaire pour effectuer les prédictions. En se basant sur ces prédictions, un critère de performance est construit et ensuite minimisé afin d'obtenir une séquence de commandes futures. Conformément au principe de l'horizon glissant, seule la première valeur de cette séquence est appliquée au système, toute cette démarche prédictive étant réitérée à la période d'échantillonnage suivante.

On a ensuite examiné l'algorithme d'élaboration de la loi de commande MPC en suivant un schéma de synthèse et en précisant tous les paramètres qui influent sur celle-ci.

Par la suite, on a appliqué cette commande sur notre système. Dans un premier lieu, on a testé cette commande pour différentes valeurs des paramètres et constaté leur influence.

Enfin, on a testé le système dans différentes situations de fonctionnement avec les paramètres optimaux.

Conclusion générale

Le développement de l'électronique de puissance a contribué à l'amélioration de la gestion des réseaux électriques en introduisant des techniques modernes qui se basent sur les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif flexibles appelés FACTS. Le rôle de ces derniers est de contrôler facilement les flux des puissances active et réactive ainsi que l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique transmise.

Dans ce mémoire, notre travail a été consacré à l'étude et à la synthèse d'une commande prédictive appliquée à une liaison électrique équipée d'un UPFC. Cette commande sert à contrôler le flux de puissance d'une ligne électrique. Pour mettre en évidence les performances de cette commande, une étude comparative est faite avec la commande classique de type proportionnelle intégrale (PI).

Avant d'entamer la phase de synthèse des lois de commande, nous avons établi le modèle mathématique du système sous forme d'équations d'états. Une projection de ce modèle dans le repère de Park est nécessaire afin de faciliter la tâche.

Pour la commande classique, nous avons synthétisé un régulateur de type PI. Une simulation est faite pour visualiser les réponses du système dans plusieurs comportements du fonctionnement du réseau électrique. Pour le fonctionnement normal, les puissances transitées suivent les changements de référence occasionnés par la demande du réseau en aval. Et pour le cas de creux de tension ou de court-circuit, le régulateur arrive à maintenir la stabilité du réseau et d'assurer le transit de puissance demandée.

Enfin, une étude de synthèse sur la commande prédictive ainsi que ses étapes de développement sont mises en évidence. Les paramètres optimaux de cette commande sont choisis on effectuant des tests de simulation sur le modèle du système afin d'avoir les meilleures performances. Cette technique permet de déterminer la commande optimale à appliquer pour adopter le profil de fonctionnement souhaité.

Afin de comparer les deux commandes, les tests précédents sont effectués sur la commande prédictive. Pour le fonctionnement normal, les puissances transitées suivent leurs références parfaitement, et dans les cas de court-circuit et creux de tension, le régulateur prédictif arrive à maintenir la stabilité du réseau et de forcer le transit désiré dans un temps de réponse assez petit que celui du cas du PI, mais avec des entrées très énergétiques, ce qui n'est pas le cas avec le PI.

De futurs travaux peuvent être poursuivis dans le cadre de ce projet de fin d'études comme l'application de la commande prédictive sur le modèle non-linéaire de l'UPFC. Cette dernière pourrait améliorer grandement les performances du réseau.

Bibliographie

- [1] H. CHEKIREB A. HAMACHE. Commande par mode glissant d'une interconnexion très haute tension (tth) munie d'un dispositif facts du type upfc. 2-3 November 2010.
- [2] P.S. TUFFS D.W. CLARKE, C. MOHTADI. Generalized predictive control : Parti : The basic algorithm, partii : Extensions and interpretation. 1987.
- [3] H. AMBRIZ-PEREZ et C. ANGELES-CAMACHO E. ACHA, C.R. FUERTE-ESQUIVEL. *Modelling and Simulation in Power Networks*. **John Wiley & Sons**, 2004.
- [4] R. BERBER et H. BOUDJELLA F.Z. GHERBI, F. LAKDJA. Dispatching économique au moyen du dispositif facts. 2010.
- [5] J.L. TESDUD et J. PAPON J. RICHALET, A. RAULT. Model predictive heuristic control : applications to industrial processes. 1978.
- [6] A. TAHRI Mansour BENYAMINA, B. MAZARI. Contrôle par retour d'état d'un compensateur statique d'Énergie réactive avancé. **4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP**, 2007.
- [7] Z. BINT MUDA Nuraddeen MAGAJI, M.W. MUSTAFA. Determination of best location of upfc device for damping oscillation. 2010.
- [8] Abbas M. ABED. Flexible ac transmission systems benefits study, Rapport technique, California Energy Commission, Octobre 1999.
- [9] Abdelaali ALIBI. Contrôle des réseaux électriques par les systèmes facts, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.
- [10] Noureddine BALI. Commande prédictive appliquée au robot puma et au palier magnétique actif, Thèse de doctorat, ENP, 2007.

-
- [11] B. BELMESSAOUD & T. MAHNI. Évaluation de la stabilité statique en tension utilisant la méthode de load flow continu, Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, ENP, juin 2009.
- [12] R. BOUFASSA & O. MEKARNIA. Modélisation et commande d'un upfc utilisé en filtrage des courants harmoniques d'un réseau électrique, Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, ENP, juin 2007.
- [13] Emmanuelle CATZ. Évolutions techniques du système de transport et de distribution d'électricité.
- [14] D.W CLARKE. Application of generalized predictive control to industrial processes. 1988.
- [15] Michel CRAPPE. *Exploitation des réseaux électriques avec l'électronique de puissance*. **Lavoisier**, 2006.
- [16] Michel CRAPPE. *Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques*. **Lavoisier**, 2006.
- [17] Marcelin DABO. Commande prédictive généralisée non-linéaire à temps continu des systèmes complexes, Thèse de doctorat, Université de Rouen, Mai 2010.
- [18] François DEFASS. Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [19] Louardi DELENDI. Contrôle de l'écoulement de puissance active par systèmes facts, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.
- [20] Saida FLILA. Identification optimale et commande prédictive : applications en génie des procédés, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, Février 2010.
- [21] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI. Apport de l'upfc à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques, Thèse de doctorat, Université Henry Poincaré Nancy 1, Octobre 2003.
- [22] Rachida HAIMOUR. Contrôle des puissances réactives et des tensions par des dispositifs facts dans un réseau électrique, Mémoire de Magister, ENSET Oran, 2009.

-
- [23] Foued KOUADRA. Étude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau mt, Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [24] Mehena LOUDAHI. Commande prédictive décentralisée appliquée à un système de suspension active d'un véhicule, Mémoire de Magister, ENP, 2010.
- [25] Salima MEZIANE. Commande adaptative et prédictive de la machine asynchrone, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, Juin 2009.
- [26] Mark NDUBUKA NWOHU. Optimal location of unified power flow controller (upfc) in nigerian grid system. 2010.
- [27] J.C. PESSELERGUE. Interaction des dispositifs facts dans les grands réseaux électriques, Thèse de doctorat, INPG, Novembre 1998.
- [28] Cristina Nicoleta STOICA. Robustification de lois de commande prédictives multivariables, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes, Octobre 2008.
- [29] Ton J.J. VAN DEN BOOM & Anton A. STOORVOGEL. *Model Predictive Control*. **Disc**, 2010.

Annexes

Annexe A

Modélisation du réseau électrique

Dans cet annexe, on va présenter une structure du réseau électrique et proposer un modèle de la ligne. Ce modèle est utilisé pour réaliser les simulations présentées dans notre étude. Pour cela, on considère une ligne de transport de 400kV exploitée en 220 kV ayant comme puissance nominale 400 MVA équipée d'un UPFC installé au milieu de la ligne sur une longueur de 200 Km. Cette ligne est supposée relier les extrémités de deux réseaux électriquement stables.

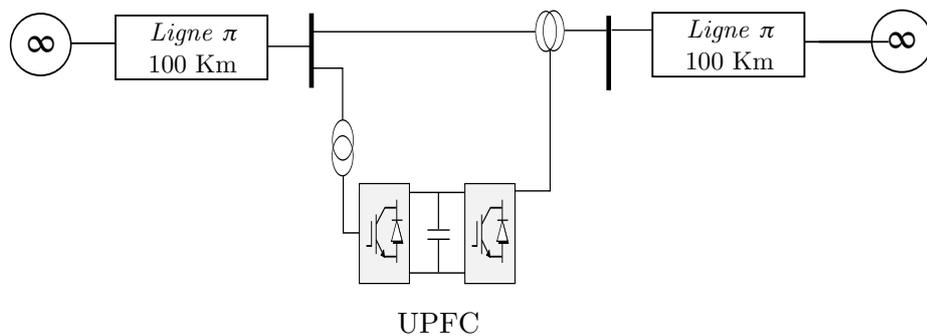


FIGURE A.1 – Schéma du réseau étudié

On a choisit les paramètres du modèle comme ceux présentés dans [21].

Annexe B

Régulation de V_t et V_c

B.1 Régulation de la tension au point de raccordement

La chute de tension au point de raccordement est due essentiellement au transport de la puissance réactive. Donc, pour compenser la tension au point de raccordement V_t , le STATCOM doit injecter du réactif [1].

Pour régler la tension V_t , on utilise un régulateur PI pour déterminer la référence de puissance réactive à injecter. La figure (B.1) schématise ce réglage.

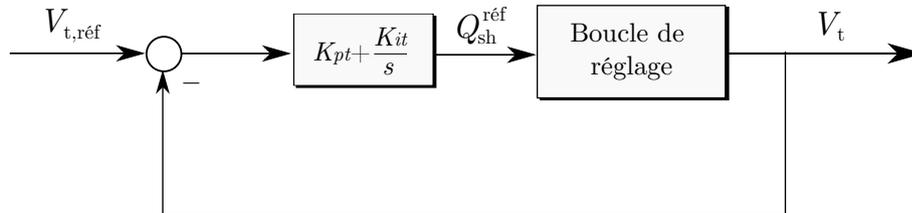


FIGURE B.1 – Schéma de réglage de V_t

B.2 Régulation de la tension du condensateur

Le STATCOM prélève la puissance active nécessaire à l'alimentation du bus continu. Ce dernier transfère cette puissance à l'SSSC afin d'effectuer la compensation série. Le bus continu peut être modélisé par une capacité de stockage en parallèle avec une résistance qui représente les pertes des convertisseurs.

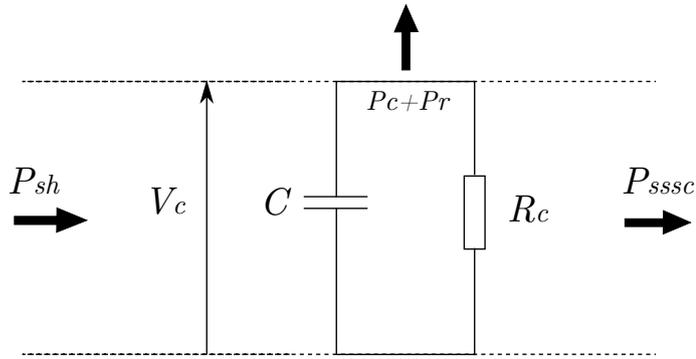


FIGURE B.2 – Schéma du bus continu

On désigne par P_c la puissance de la capacité, et par P_r la puissance des pertes résistives. Le bilan des puissances donne :

$$P_c + P_{Rc} = P_{sh} - P_{sssc}$$

Soit E_c l'énergie emmagasinée par le condensateur :

$$E_c = \frac{1}{2} C V_c^2$$

On peut écrire :

$$\begin{aligned} \frac{dE_c}{dt} + \frac{V_c^2}{R_c} &= P_{sh} - P_{sssc} \\ \frac{1}{2} C \frac{dV_c^2}{dt} + \frac{V_c^2}{R_c} &= P_{sh} - P_{sssc} \end{aligned}$$

On obtient donc la fonction de transfert $F(s)$ reliant V_c^2 à P_{sh} :

$$F(s) = \frac{R_c}{1 + \frac{R_c C}{2} s}$$

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence de la partie shunt qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. Afin de régler la tension V_c , on utilise un régulateur PI présenté par le schéma suivant :

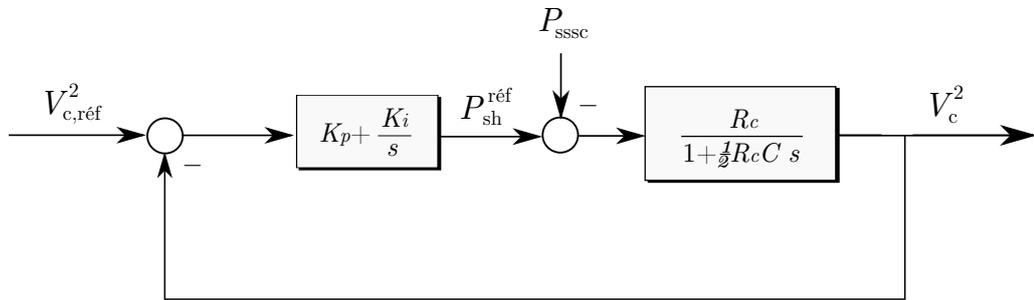


FIGURE B.3 – Schéma de réglage de la tension V_c

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F_{BF} = \frac{(K_p s + K_i) \frac{2}{C}}{s^2 + \frac{2(1+K_p)}{R_c C} s + \frac{2K_i}{C}}$$

Les paramètres du régulateur sont calculés suivant un amortissement et une pulsation donnés en boucle fermée.

Annexe C

Relations dans le repère de Park

C.1 Tension au point de raccordement

La tension au point de raccordement se calcule par (voir figure 2.2) :

$$\begin{aligned} V_t &= V_s - R_s \cdot i_s - L_s \cdot \frac{di_s}{dt} \\ T^{-1}V_{t,dq} &= T^{-1}V_{s,dq} - R_s T^{-1}i_{s,dq} - L_s \left(\frac{d}{dt} \right) (T^{-1}i_{s,dq}) \\ &= T^{-1}V_{s,dq} - T^{-1}R_s i_{s,dq} - L_s \left(\frac{dT^{-1}}{dt} \right) i_{s,dq} - T^{-1}L_s \left(\frac{di_{s,dq}}{dt} \right) \end{aligned}$$

On retrouve alors :

$$V_{t,dq} = V_{s,dq} - R_s \cdot i_{s,dq} - L_s H i_{s,dq} - L_s \frac{d}{dt} i_{s,dq}$$

Tels que $i_{s,dq} = i_{r,dq} - i_{sh,dq}$.

C.2 Calcul de puissances dans le repère de Park

Soit v_{abc} une tension triphasée d'un point de la ligne, et i_{abc} le courant qui le traverse.

On se propose de calculer les puissances active et réactive dans le repère de PARK.

C.2.1 Puissance active

La puissance active instantanée s'écrit :

$$P = v_{abc}^T \cdot i_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

En remplaçant v_{abc} par $T^{-1} \cdot v_{dq}$ et i_{abc} par $T^{-1} \cdot i_{dq}$, on trouve :

$$\begin{aligned} P(t) &= (T^{-1} v_{dq})^T \cdot (T^{-1} i_{dq}) \\ &= v_{dq}^T (T^{-T} T^{-1}) i_{dq} \\ &= v_{dq}^T \cdot i_{dq} \\ &= v_d i_d + v_q i_q \end{aligned}$$

C.2.2 Puissance réactive

La puissance réactive instantanée est donnée par :

$$\begin{aligned} Q &= -\frac{1}{\sqrt{3}} ((v_a - v_b) i_c + (v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b) \\ &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\Lambda} v_{abc} \right)^T i_{abc} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{3}} (\Lambda T^{-1} v_{dq})^T T^{-1} i_{dq} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{3}} (T^{-1} v_{dq})^T \Lambda^T T^{-1} i_{dq} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{3}} v_{dq}^T T^{-T} \Lambda^T T^{-1} i_{dq} \\ &= v_{dq}^T \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} i_{dq} \\ &= v_q i_d - v_d i_q \end{aligned}$$