

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Commande des Systèmes**

Présenté par
Jugurta KROUCHI
Hocine KHATI

Mémoire dirigé par **Amar HAMACHE**

Thème

Modélisation et Commande d'une Interconnexion THT Equipée d'un SSSC

Mémoire soutenu publiquement le 15 / 07 / 2015 devant le jury composé de :

M. Rabah MELLAH
MCA, UMMTO, Président

M. Amar HAMACHE
MAA, UMMTO, Encadreur

Mme. Kheddoudja KHERRAZ
MAA, UMMTO, Examinatrice

Mme. Safia YOUCFI
MAA, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

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

*Nous tenons à remercier notre encadreur
M. Amar HAMACHE pour son aide, ses précieux conseils,
et sa patience tout au long de ce travail.*

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

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

*Nos sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de
près et de loin à l'achèvement de ce travail.*

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents,

Ma famille,

Mon binôme Jugurta et toute sa famille,

Tous mes amis(es) et mes camarades.

HOCINE

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents,

Ma famille,

Mon binôme Hocine et toute sa famille,

Tous mes amis(es) et mes camarades.

JUGURTA

Sommaire

Introduction générale.....	2
Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS	
I.1. Introduction	5
I.2. Généralités sur les réseaux électriques.....	6
I.2.1. Réseau électrique	6
I.2.2. Réseau de transport et d'interconnexion.....	6
I.2.3. Réseau de répartition	6
I.2.4. Réseau de distribution	6
I.2.5. Problèmes liés aux réseaux électriques	8
I.2.5.1. Problèmes liés à La tension	8
I.2.5.2. Problèmes liés au courant transitoire.....	10
I.2.5.3. Problèmes liés à la fluctuation de la fréquence	10
I.3. Flux de puissance	11
I.4. Compensation d'un réseau	12
I.4.1. La puissance active	12
I.4.2. La Puissance réactive	12
I.4.3. La Puissance apparente.....	13
I.4.4. Facteur de puissance	13
I.5. Solutions conventionnelles	15
I.5.1. Compensateurs synchrones	15
I.5.2. Compensateurs statiques (condensateurs et inductances fixes)	16

Sommaire

I.6. Solutions modernes.....	16
I.7. Systèmes FACTS	16
I.7.1. Définition et rôle	16
I.7.2. CLASSIFICATION DES FACTS	17
I.7.2.1. FACTS séries	17
I.7.2.2. FACTS shunts	18
I.7.2.3. FACTS hybrids.....	21
I.8. Dispositif SSSC.....	23
I.8.1. Définition et structure.....	23
I.9. Conclusion.....	24

Chapitre II : Modélisation du SSSC

II.1. Introduction.....	26
II.2. Description et fonctionnement du SSSC	27
II.3. Modélisation du SSSC	30
II.3.1. Transformée de Park.....	32
II.3.2. Application de la transformée de Park au modèle du SSSC triphasé	35
II.4. Simulation en boucle ouverte	38
II.5. Conclusion	40

Chapitre III : Commande du SSSC

III.1. Introduction.....	42
III.2. Cahier des charges	42

Sommaire

III.3. Commande par retour d'état avec intégrateur.....	42
III.3.1.Synthèse de la loi de commande.....	45
III.3.2 .Simulation	45
III.3.3 .Interprétation des résultats de simulation	50
III.4. Commande FTC (Finite Time Control).....	50
III.4.1.Simulation.....	53
III.4.2.Interprétation des résultats de simulation.....	58
III.5. Conclusion	59
Conclusion générale.....	61
Annexe.....	64
Bibliographie.....	68

Table des figures

Fig. I.1. Structure générale d'un réseau électrique.

Fig. I.2 : Qualité de l'onde de tension.

Fig. I.3 : Circuits équivalents d'un réseau électrique.

Fig. I.4 : Triangle des puissances.

Fig. I.5: Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC).

Fig. I.6: Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR).

Fig. I.7: Static Synchronous Series Compensator (SSSC).

Fig. I.8: Thyristor Switched Capacitor (TSC).

Fig. I.9. Thyristor Controlled Reactor (TCR).

Fig. I.10 : Static VAR Compensator (SVC).

Fig. I.11: Static Compensator (STATCOM).

Fig. I.12: Unified Power Flow Controller (UPFC).

Fig. I.13: Thyristor Control Phase Shift Transformer (TCPST).

Fig. I.14: Interligne Power Flow Controller (IPFC).

Fig. I.15 : Schéma simplifié d'un SSSC raccordé à une ligne de transport.

Fig. II.1: Structure de base d'un SSSC raccordé au réseau électrique.

Fig. II.2 : Représentation des modes de compensation.

Fig. II.3 : Schéma d'une ligne électrique équipée d'un SSSC.

Fig. II.4 : Transformée de Park.

Fig. II.5 : Puissance active.

Fig. II.6 : Puissance réactive.

Fig. III.1: Structure de la commande par retour d'état avec intégrateur.

Table des figures

Fig. III.2 : Puissances active et réactive.

Fig. III.3 : Tension injectée par le SSSC.

Fig. III.4 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Fig. III.5 : Puissances active et réactive.

Fig. III.6 : Tension injectée par le SSSC.

Fig. III.7 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Fig. III.8: Puissances active et réactive.

Fig. III.9 : Tension injectée par le SSSC.

Fig. III.10 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Fig. III.11: Structure de la commande FTC.

Fig. III.12 : Puissances active et réactive.

Fig. III.13 : Tension injectée par le SSSC.

Fig. III.14 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Fig. III.15 : Puissances active et réactive.

Fig. III.16 : Tension injectée par le SSSC.

Fig. III.17 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Fig. III.18: Puissances active et réactive.

Fig. III.19 : Tension injectée par le SSSC.

Fig. III.20 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Fig.A.1 : Représentation vectorielle de la tension et du courant dans le repère d-q.

Tableaux

Tab. I.1. Bilan des puissances pour divers récepteurs.

Tab. II .1. Table des indices.

Tab. II .2. Paramètres du système.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, la demande en énergie électrique ne cesse d'augmenter à cause de l'évolution des besoins de la population et de l'industrialisation. Les compagnies d'électricité se forcent à renforcer continuellement leurs réseaux électriques afin d'améliorer la qualité de service et satisfaire les exigences des consommateurs qui vont parfois au-delà des limites des réseaux. De plus, ces mêmes compagnies se trouvent dans la difficulté de construire de nouveaux ouvrages à causes des contraintes environnementales (difficulté de trouver des endroits de passage pour les nouvelles lignes), et économiques (coût de construction élevé) et physiques (limites thermiques des lignes électriques); elles préfèrent donc développer des solutions permettant d'accroître la capacité de transport de puissances à travers les lignes déjà construites.

Actuellement, plusieurs pays optent à interconnecter leurs réseaux locaux dans le but d'aboutir à un réseau plus puissant et plus performant. En effet, l'assistance mutuelle entre plusieurs unités de production assure un transport d'énergie permanent entre les pays en cas de défaillances ou de difficultés de satisfaire la demande des grands consommateurs, procurant ainsi une stabilité au réseau face aux éventuelles perturbations qui peuvent survenir à tout moment. Celles-ci provoquent des pannes importantes sur le réseau à l'image du black out. Par ailleurs, la gestion d'un tel réseau requiert l'insertion de systèmes sophistiqués pour la commande des interconnexions du flux de puissance. Actuellement, la majorité des systèmes utilisés (compensateurs, transformateurs, autotransformateurs...etc.) restent conventionnels du fait que leur manœuvre est assurée par des dispositifs électromécaniques causant une lenteur de réponse.

Depuis plusieurs années, des recherches ont été menées afin d'améliorer le rendement et les performances de ces dispositifs, et ce n'est qu'à la fin du siècle dernier avec la venue des nouveaux équipements d'électronique de puissance issus du progrès apporté par les semi-conducteurs que des dispositifs plus sophistiqués ont vu le jour. Ces dispositifs sous le vocable FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) se raccordent en série, en shunt ou hybride au réseau ouvrant de nouvelles éventualités pour la commande du flux de puissance à travers ces lignes et augmentent la capacité de transport à travers celles-ci.

Le présent travail est consacré à l'étude du rôle et du fonctionnement de l'un des dispositifs FACTS les plus connus qui est le SSSC (Static Synchronous Series Compensator), pour ce faire l'étude sera répartie sur trois chapitres comme suit :

Introduction générale

Dans le premier chapitre, il sera question de décrire certaines généralités sur les réseaux électriques à savoir leurs structures générales, rôles, ainsi que les problèmes et les contraintes compromettant leur fonctionnement. Ensuite, une description des diverses solutions classiques sera donnée, suivie de solutions modernes plus fiables et plus performantes concrétisées par les dispositifs FACTS.

Le second chapitre portera sur l'étude du fonctionnement du dispositif SSSC et sa modélisation en vue de sa commande. En se servant des lois de Kirchhoff, le model obtenu sera projeté dans le plan de Park afin d'en tirer un model linéaire biphasé dont les grandeurs sont facilement manipulables.

Le troisième chapitre fera l'objet d'une synthèse de deux lois de commandes du SSSC afin de satisfaire un certain cahier des charges à savoir: la commande par retour d'état avec intégrateur et la commande à temps finit (FTC). Plusieurs tests seront réalisés par simulation afin de comparer les performances des deux techniques.

Enfin, ce travail se terminera par une conclusion générale incluant quelques perspectives.

Chapitre I :

Etat de l'art des systèmes FACTS

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

I.1. Introduction

Aujourd'hui, la demande en énergie électrique ne cesse de croître, pour répondre aux exigences des différents consommateurs (domestiques, industriels) et assurer la qualité et la continuité de service à tout moment les exploitants sont contraints à améliorer continuellement leurs réseaux électriques en termes de performance, stabilité et sécurité.

Trouver le moyen le plus optimal et le moins coûteux pour transporter l'énergie électrique a toujours représenté un défi pour les gestionnaires des réseaux d'énergie électrique. Traditionnellement, le transport d'électricité se fait à haute tension pour minimiser les pertes joules dans les lignes, puis la moyenne tension (MT) et la basse tension (BT) qui constituent le réseau de distribution électrique sont utilisées pour couvrir le transport d'électricité à une échelle locale permettant ainsi d'alimenter les petites industries, les PME, voire même les ménages.

Les lignes HT et THT (haute tension et très haute tension), pour le réseau de transport, permettent de transporter de grandes quantités d'énergie électrique sur de longues distances avec des pertes minimales, ces lignes s'étendant sur des milliers de kilomètres constituant de fortes interconnexions qui lient des régions voire même des pays et forment un réseau plus performant et plus stable constitué de plusieurs unités de production. Un tel réseau viserait à assurer une assistance mutuelle en cas de défaillance ou de difficultés à satisfaire la demande des grands consommateurs à l'exemple des grandes zones urbaines. Néanmoins un tel système n'est pas à l'abri d'éventuelles perturbations souvent dues aux comportements défavorables de certaines charges et qui entraînent diverses situations indésirables à savoir: les chutes de tension, la surcharge des lignes et les défauts (courts-circuits) de différentes natures. De ce fait, il est indispensable de placer des dispositifs de contrôle adéquats dit compensateurs en référence à leurs stratégie de fonctionnement qui consiste à compenser la puissance réactive en un certain nombre de point du réseau. Cela joue un rôle primordial dans le transport de la puissance électrique et la stabilité du réseau.

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

I.2. Généralités sur les réseaux électriques

I.2.1. Réseau électrique

L'électricité, une fois produite par les centrales électriques (hydrauliques, nucléaires...), doit être acheminée vers les consommateurs (industries, domiciles...), par le biais d'un ensemble d'équipements formant un réseau électrique [6].

Une bonne vieille recette consiste à transporter l'électricité à haute tension afin d'éviter le maximum de pertes possibles puis à la distribuer sur des niveaux de tension plus bas. On peut distinguer trois types de réseaux, selon le niveau de tension :

I.2.2. Réseau de transport et d'interconnexion

Le transport d'électricité est une tâche complexe, pour assurer une meilleure qualité de tension à l'autre bout, les centrales électriques génèrent des tensions triphasées MT qui sont par la suite élevées en tensions THT pouvant atteindre 400 kV, ce qui garantit un transport sur de longues distances avec un minimum de pertes [7],[6].

L'exploitation permet de créer des interconnexions nationales auxquelles toutes les compagnies de production d'électricité peuvent être connectées pour former un réseau national puissant et performant. L'assistance mutuelle entre elles procure une stabilité certaine au réseau face aux défaillances qui peuvent survenir à tout instant. Aujourd'hui la politique d'échange de puissance a permis d'étendre ces interconnexions jusqu'à relier des pays formant ainsi un réseau international plus fiable encore et plus puissant [7],[6].

I.2.3. Réseau de répartition

Il a pour rôle de transporter l'énergie électrique vers les grands consommateurs électriques à l'exemple des industries lourdes, le transport ferroviaire ou autres [7],[9].

I.2.4. Réseau de distribution

Il est généralement constitué de deux types de lignes : les lignes moyennes tensions MT (3 à 50 kV) et les lignes basses tensions BT (110 à 600 V).

Les lignes MT permettent le transport d'électricité à une échelle locale, elles forment la liaison entre les postes de transformation (qui sont reliés en amont au réseau de

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

répartition) et les clients qu'elles alimentent comme les petites entreprises, les PME (petites ou moyennes entreprises) [13],[6].

Les lignes BT présentent les plus petites lignes du réseau .Elles permettent la distribution d'énergie électrique aux ménages et aux artisans, ce sont elles qui nous servent tous les jours pour alimenter notre utilisation électrique quotidienne [7],[9].

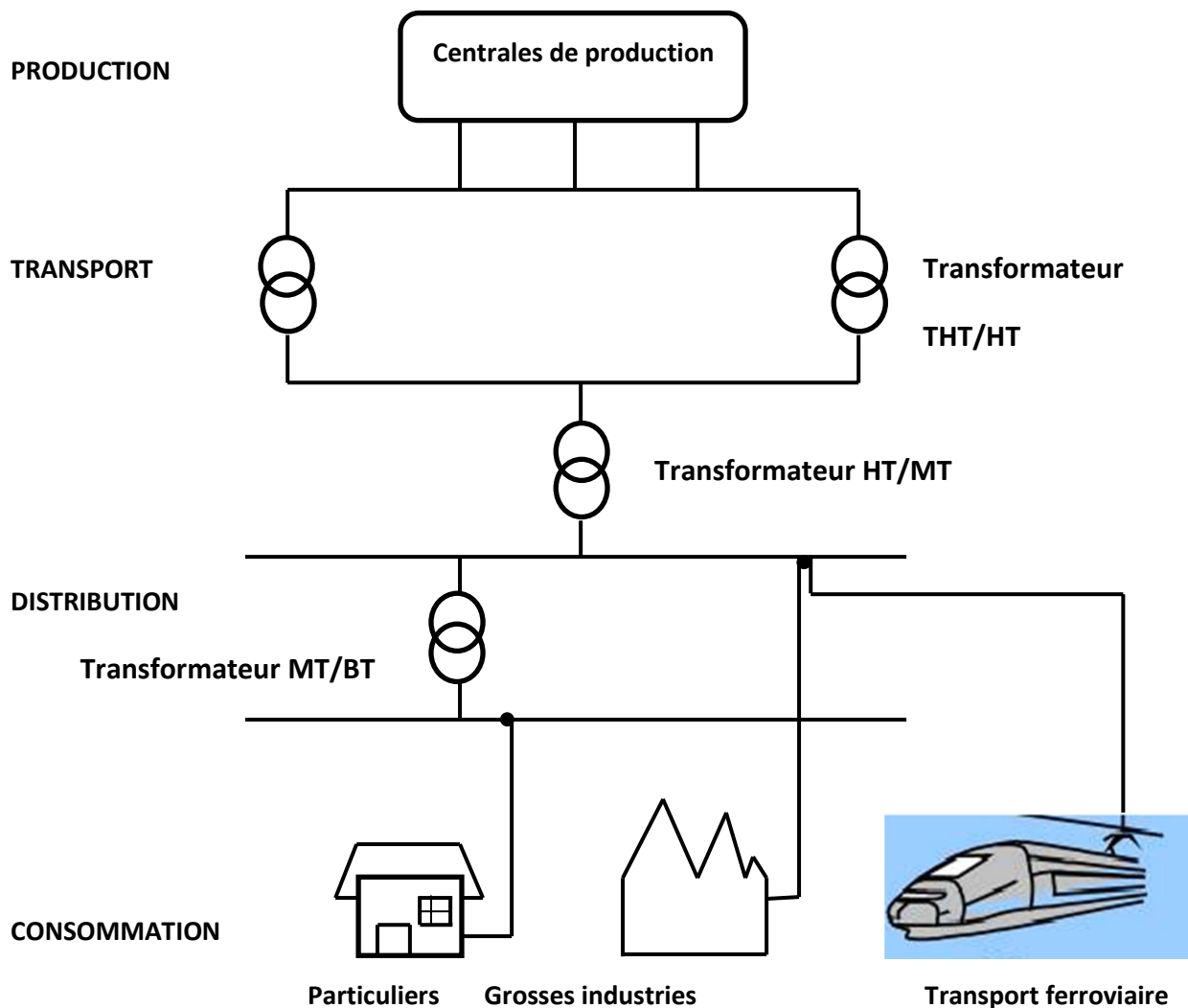


Fig. I.1. Structure générale d'un réseau électrique.

Ces réseaux permettent d'acheminer l'énergie électrique depuis les installations de production jusqu'aux installations de consommation à l'aide de différents composants à savoir :

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

Le groupe : Il produit de l'énergie électrique au moyen de générateurs à courant alternatif, entraînés par des appareils moteurs utilisant les différentes formes naturelles d'énergie (thermiques, hydrauliques, éoliennes, ..., etc.), il génère de la puissance active et fournit ou absorbe de la puissance réactive .il est raccordé directement au réseau THT (réseau de transport) [7],[6].

L'autotransformateur : Il assure le passage du niveau de tension 400 kV vers un niveau de tension de 220 kV, il permet de modifier la tension avale à l'aide de ses prises réglables [7].

Les compensateurs : Ils représentent des réactances inductives ou des réactances capacitives ou la combinaison des deux, ils ont pour rôle d'absorber ou de fournir de la puissance réactive dans réseau [7],[6].

Le transformateur THT/HT : C'est un transformateur abaisseur qui assure la transformation du niveau de tension de 220 kV à niveau de 60 kV (haute tension) [7].

Le régleur de charge : C'est un appareil électromécanique qui permet de maintenir une tension constante aux bornes de la charge [7].

Le transformateur HT/MT : Il assure le passage du niveau de tension 60 kV (haute tension) vers le niveau 30 kV ou 10 kV (moyenne tension) [7].

Le transformateur MT/BT : Il permet de transformer la moyenne tension (30 kV) en basse tension (380 V) [7].

La charge : Elle représente les différents consommateurs de l'énergie électrique qui peuvent être industriels (usines), domestiques (habitations) ou autres [7],[6].

I.2.5. Problèmes liés aux réseaux électriques

I.2.5.1. Problèmes liés à la tension

- **Creux de tension et Coupure brève :** C'est une diminution brutale de la tension d'alimentation à une valeur située entre 90% et 1 % de la tension déclarée, suivie du rétablissement après un court laps de temps. Leur durée peut aller de 10 ms (1/2 période du 50 Hz) à 1 minute. Ils sont produits par des courts-circuits survenant dans

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

le réseau général ou dans les installations de la clientèle, par conséquent, ils peuvent dans certains cas provoquer le déclenchement d'équipements électriques [12].

- **Fluctuations de tension :** Les variations aléatoires et répétitives de la valeur efficace entre 90% et 100 % de la valeur nominale produisent la fluctuation de la tension, ou un phénomène appelé papillotement. Cela provoque des variations de l'intensité des éclairages et des gênes visuelles [12].
- **Surtension :** Ce phénomène se produit lorsque la valeur efficace de la tension dépasse la valeur nominale de 10% à 80 % pendant 0,5 cycles à 1 minute. Cela entraîne des dommages potentiels des appareils électriques à long terme [12].
- **Tension basse (chute de tension) :** Cela se produit quand la tension est en dessous de 90 % de la tension minimale pendant plus d'une minute. En effet, lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension, ce qui entraîne des dommages des appareils électriques [12].
- **Déséquilibre de tension :** C'est la différence observée dans les valeurs efficaces des trois phases, cela est dû à la circulation du courant non équilibré dans les impédances du réseau, causée essentiellement par des installations déséquilibrées à l'exemple des tractions ferroviaires. Il entraîne des altérations du fonctionnement de certains appareils électriques [12].
- **Harmoniques et inter-harmoniques:** Elles sont caractérisées par des variations de la forme de l'onde de la tension et présentent des signaux parasites de fréquence multiple de 50Hz (harmoniques) ou de fréquence quelconque (inter-harmoniques).Elles sont principalement dues à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc,..., etc. Elles entraînent des altérations du fonctionnement de certains appareils électriques ainsi que des perturbations des signaux [12].

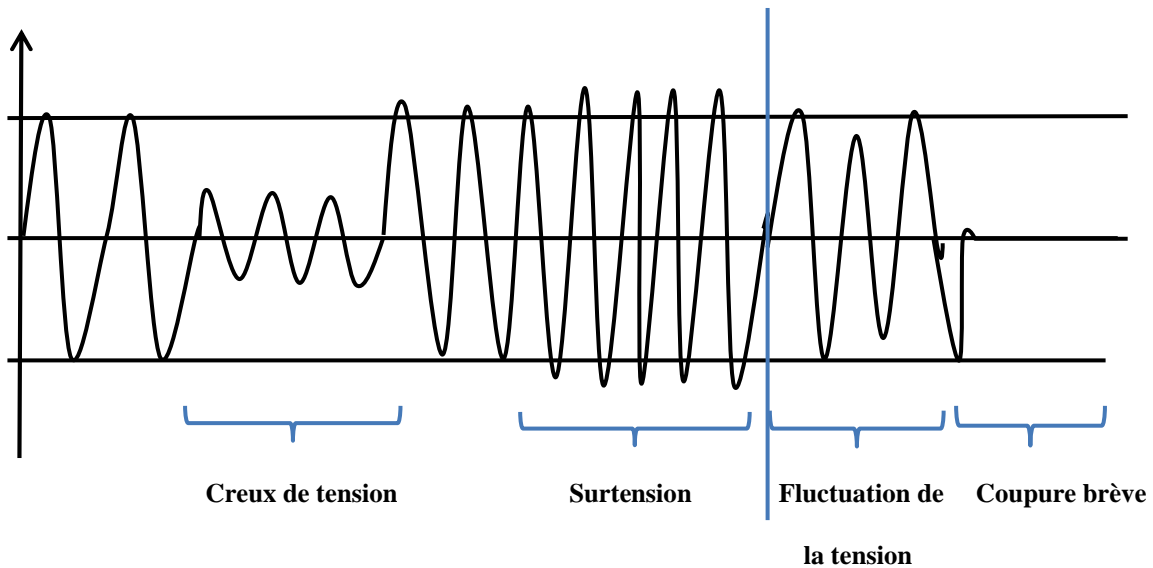


Fig. I.2 : Qualité de l'onde de tension.

I.2.5.2. Problèmes liés au courant transitoire

C'est le dépassement du niveau normal de courant fondamental pendant une durée inférieure à une seconde [12].

I.2.5.3. Problèmes liés à la fluctuation de fréquence

La fréquence d'un réseau interconnecté de transport est essentiellement la même en tout point du réseau, elle est mesurée et contrôlée avec précision (50 Hz) cependant, pour de petits réseaux non interconnectés, il n'est pas toujours possible d'avoir une telle précision, ce qui provoque des variations de fréquence. Donc ce phénomène apparaît lorsqu'il y a un écart de la fréquence par rapport à sa valeur nominale. Cela a des impacts considérables sur les installations électriques [12].

I.3. Flux de puissance

En pratique le transport de puissance électrique à travers les lignes de longues distances est conditionné par les limites thermiques de ces dernières, de plus la consommation excessive de la puissance réactive par certaines charges augmente considérablement les pertes-lignes [9].

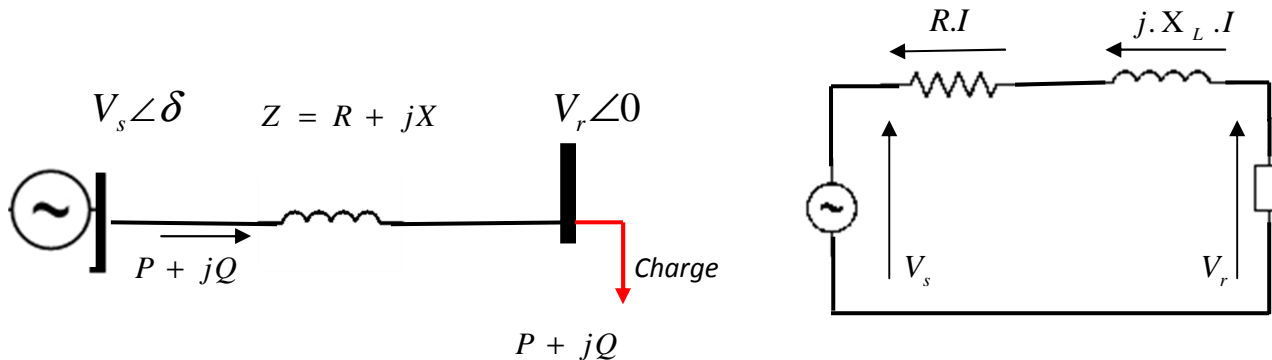


Fig. I.3 : Circuits équivalents d'un réseau électrique.

Dans un réseau électrique, l'équilibre entre l'offre et la demande puissance électrique est permanent, les gestionnaires de transport doivent maintenir cet équilibre à tout moment afin d'éviter toute instabilité du réseau [9].

La puissance maximale que fournit le réseau est imposée par les limites thermiques des lignes électriques et des transformateurs ainsi que la dynamique et la stabilité du réseau, de plus la demande excessive en puissance réactive engendre des pertes joules supplémentaires en amplifiant l'intensité du courant à travers celles-ci, forçant ainsi le réseau à fournir plus de puissance apparente pour une même puissance active. Gérer ce flux de puissances est capital afin de garantir le bon fonctionnement du réseau. Pour ce faire, divers dispositifs ont été mis au point afin de produire suffisamment de puissance réactive appelés compensateurs, certaines structures plus évoluées de ces compensateurs permettent même d'accroître la puissance maximale transportable par le réseau [9].

La puissance active transitée dans la ligne notée P s'exprime par

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X} \sin(\delta) \tag{I.1}$$

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

Avec : V_s et V_r sont respectivement les tensions amont et aval du réseau.

X : Réactance de la ligne.

δ : Angle de transport.

Cette équation montre qu'il est possible d'augmenter le transit de puissance active à travers la ligne en agissant soit sur l'angle de transport (δ), ou bien en réduisant l'impédance de la ligne, ou tout simplement en maintenant la tension entre les deux nœuds [9].

I.4. Compensation d'un réseau

Les récepteurs électriques se manifestent déferrement lorsqu'ils sont traversés par un courant alternatif, ainsi un récepteur inductif a tendance à retarder le courant par rapport à la tension, inversement au récepteur capacitif qui avance le courant. Cette notion de déphasage est d'une extrême importance du fait qu'elle définit le type et la quantité de puissance que va consommer le récepteur, ce qui permet de dimensionner les installations [1].

I.4.1. Puissance active : Elle correspond à un travail physique effectif, elle est à l'origine du mouvement du moteur, de la chaleur dissipée des résistances, ou de la lumière projetée par les lampes. Elle s'exprime généralement en kWh (kilowatt par heure) [1].

Expressions mathématiques :

$$P = u \cdot i \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{En monophasé}) \quad (\text{I.2})$$

$$P = \sqrt{3} \cdot u \cdot i \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{En triphasé}) \quad (\text{I.3})$$

Avec : φ le déphasage entre la tension et le courant.

I.4.2. La Puissance réactive : Elle n'a pas de sens physique direct, elle sert essentiellement à alimenter les circuits magnétiques, elle est donc indispensable pour le fonctionnement des appareils inductifs à l'exemple des machines électriques (machine ou transformateur), elle est exprimée en kVA telles que [1] :

$$Q = u.i.\sin(\varphi) \quad (\text{En monophasé}) \quad (\text{I.4})$$

$$Q = \sqrt{3}.u.i.\sin(\varphi) \quad (\text{En triphasé}) \quad (\text{I.5})$$

I.4.3. La Puissance apparente : Exprimée en VA (volte-ampère), c'est la somme vectorielle des deux puissances précédentes, elle est donnée par [1] :

$$S = u.i \quad (\text{En monophasé}) \quad (\text{I.6})$$

$$S = \sqrt{3}.u.i \quad (\text{En triphasé}) \quad (\text{I.7})$$

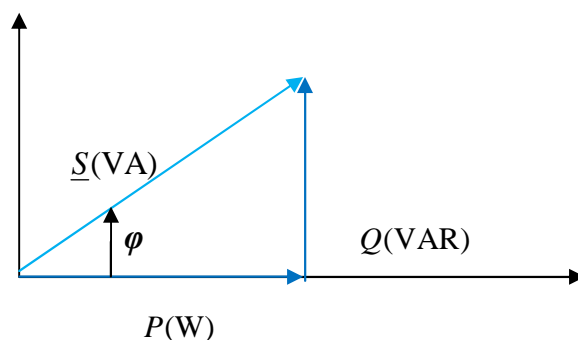


Fig. I.4 : Triangle des puissances.

I.4.4. Facteur de puissance : Il est défini comme étant le rapport entre la puissance active et apparente comme suit : $FP = \cos(\varphi) = \frac{P}{S}$, sa valeur peut donc varier de 0 à 1 permettant ainsi d'identifier les récepteurs plus au moins consommateurs de puissance réactive. Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation de puissance réactive, inversement la consommation de cette puissance est d'autant plus grande que le facteur de puissance s'approche de 0 [1].

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

	Impédance Z	Facteur de puissance $\cos(\varphi)$	Déphasage φ	schéma	Puissance active	Puissance réactive
Conducteur ohmique	R	1	0		RI^2	0
inductance	$L\omega$	0	$\frac{\pi}{2}$		0	$L\omega I^2$
Condensateur	$\frac{1}{C\omega}$	0	$-\frac{\pi}{2}$		0	$-\frac{I^2}{C\omega}$
Circuit RL	$\sqrt{R^2+(L\omega)^2}$	$\frac{R}{Z}$	$\tan^{-1} \frac{L\omega}{R}$		RI^2	$L\omega I^2$
Circuit RC	$\sqrt{R^2+(\frac{1}{C\omega})^2}$	$\frac{R}{Z}$	$\tan^{-1} \frac{1}{RC\omega}$		RI^2	$-\frac{I^2}{C\omega}$
Circuit RLC	$\sqrt{R^2+(L\omega-\frac{1}{C\omega})^2}$	$\frac{R}{Z}$	$\tan^{-1} \frac{LC\omega^2-1}{RC\omega}$		RI^2	$L\omega I^2 + (-\frac{I^2}{C\omega})$

Tab. I.1. Bilan des puissances pour divers récepteurs.

Pour tolérer des charges possédant un facteur de puissance très faible, les compagnies d'électricité sont souvent contraintes à sur-dimensionner l'ensemble de l'appareillages de distribution, ce qui occasionne un important surcoût de conception (agrandir la section des câbles électriques, remplacer les transformateurs...), et c'est pour cette raison qu'il existe

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

toujours un système de taxe qui pénalise financièrement les grands consommateurs de puissance réactive [1].

Pour élever le facteur de puissance, il suffirait alors d'injecter de la puissance réactive au réseau à des points stratégiques appelés points pilotes. Pour réaliser tout cela, on dispose de divers dispositifs appelés alors compensateurs FACTS (Flexible Alternating Current transmission System) dont l'utilisation fiable et performante permet d'apaiser les coûts d'exploitation [3].

I.5. Solutions conventionnelles

Le réseau électrique quelque soit sa nature et sa complexité n'est pas à l'abri d'éventuelles perturbations qui peuvent provoquer son instabilité. Pour éviter cela, diverses solutions ont été mises au point au fil du temps afin d'atténuer ces perturbations et d'assurer un équilibre production-consommation. Certaines solutions sont plus au moins évidentes que d'autres à cause des contraintes économiques (coût de mise en œuvre très élevé) et environnementales dont: le délestage, l'îlotage, le maillage et le renforcement d'ouvrage [3].

La compensation (inductive ou capacitive) représente la solution la plus adéquate et la plus efficace auquel font appel la majorité des compagnies d'électricité aujourd'hui. Elle est réalisée par divers dispositifs (condensateurs, inductances, machines synchrones...) appelés compensateurs classiques qui, en plus de leur faible coût, sont d'un grand intérêt économique [3].

Les compensateurs classiques peuvent être classés comme suit :

I.5.1. Compensateurs synchrones :

Le terme synchrone fait référence à l'utilisation d'une machine synchrone destinée à tourner à vide c'est-à-dire ne produisant pas une puissance active, selon le type d'excitation choisi, la machine peut alors se comporter comme un condensateur si elle est surexcitée ou bien comme inductance si elle est sous-excité [3].

L'avantage avec les machines synchrones est que le contrôle de la puissance réactive injectée au réseau est aisé, puisque il suffirait juste de jouer sur le courant d'excitation, mais elles sont désavantagées par leurs surcoûts de conception ainsi que la limitation de leurs

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

vitesse qui se traduit directement par une limite maximale de la puissance réactive produite [3].

I.5.2. Compensateurs statiques (condensateurs et inductances fixes) :

Ce sont les premiers compensateurs statiques utilisés pour compenser la puissance réactive dans les réseaux car un condensateur en régime alternatif est capable de fournir de la puissance réactive inversement à l'inductance qui en consomme. Ce fut l'idée de base de la conception d'autres compensateurs plus sophistiqués à l'exemple des batteries de condensateurs. Il est vrai que ces derniers tiennent la tête des compensateurs les plus économiques sur le marché mais hélas, leur manœuvre est assurée à l'aide de disjoncteurs ainsi que d'autres dispositifs électromécaniques à réponse lente et qui provoquent certains phénomènes transitoires de tension. De plus, la puissance réactive produite n'est pas modulable (la puissance réactive injectée est nulle ou maximale) ce qui rend la commande du flux de puissance à travers les lignes très difficile voire impossible [3]

I.6. Solutions modernes

Grâce à la maturité de l'électronique de puissance, de nouvelles structures de compensateurs FACTS sont apparues. Ces dispositifs de part leurs réponses très rapides, permettent d'accroître la capacité de transport du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances [5].

I.7. Systèmes FACTS

I.7.1. Définition et rôle

Les systèmes FACTS ont vu le jour au cœur des années trente, puis ont subi des développements et des améliorations jusqu'aux années quatre-vingts où ils ont fortement envahi le marché industriel [4],[5].

Par le biais de la technologie moderne et les nouvelles techniques de contrôle, les FACTS ouvrent de nouvelles perspectives pour contrôler la tension et le flux de puissance

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

dans les réseaux électriques et augmentent considérablement les capacités des lignes de ceux-ci [4].

Les dispositifs FACTS sont constitués principalement de composants d'électronique de puissance (thyristors, GTO (Gate Turn-Off Thyristor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)...) liés à des condensateurs ou des réactances montés en série ou en shunt au réseau. Ils agissent généralement sur la consommation ou l'injection de la puissance réactive, apportant ainsi une modification, réelle ou fictive, de l'impédance et/ou des phases des tensions des nœuds [4],[5].

Le progrès porté par les semi-conducteurs aux équipements d'électronique de puissance a touché significativement les performances des FACTS en termes de fiabilité et de flexibilité.

I.7.2. CLASSIFICATION DES FACTS

Selon la manière dont ils sont connectés au réseau électrique, les FACTS sont classés comme suit [5],[14] :

I.7.2.1. FACTS séries

Ils appartiennent à la famille des compensateurs séries, autrement dit ce sont des dispositifs vus comme étant des impédances variables ou des sources de tension variables. Ce type de FACTS injecte une tension dans la ligne permettant de contrôler la phase et l'amplitude du courant dans celle-ci, par conséquent, ils sont capables de modifier son l'impédance fictive. Parmi les FACTS séries les plus connus, on cite [5] :

- **TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)** : Il est constitué de la mise en parallèle d'un condensateur et d'une inductance contrôlée par deux thyristors [2],[14].

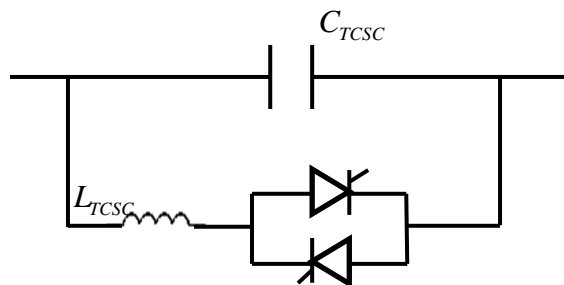


Fig. I.5: Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC).

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

- **TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor):** C'est un compensateur de réactance inductive qui est constitué d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors, ce qui en résulte une réactance inductive série variable [2].

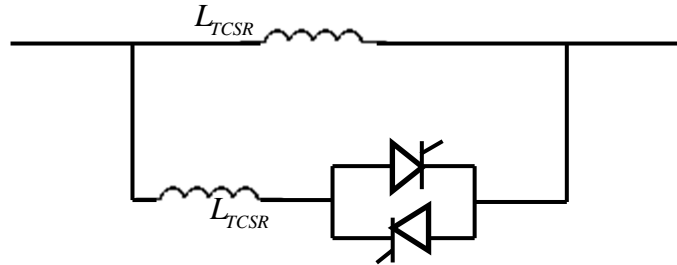


Fig I.6: Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR).

- **SSSC (Static Synchronous Series Compensator):** Il est constitué d'un convertisseur statique avec une source d'énergie, connecté en série avec la ligne de transmission par un transformateur de tension [2],[14].

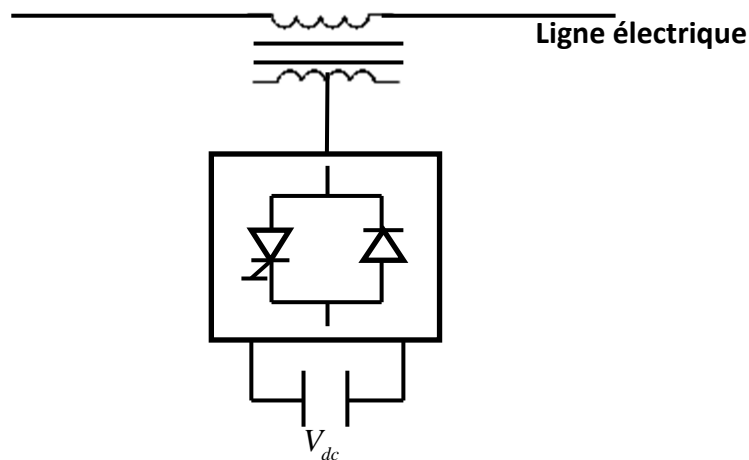


Fig. I.7: Static Synchronous Series Compensator (SSSC).

I.7.2.2. FACTS shunts

De point de vue conception, ils sont similaires aux FACTS séries (impédance variable, source de courant variable,...) .cependant, ils sont reliés en parallèle au réseau, en principe ils injectent du courant dans le point de connexion avec le réseau, ils sont utilisés généralement pour la compensation de l'énergie réactive. Parmi les FACTS shunts les plus utilisés, on peut citer [5],[14] :

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

- **TSC (Thyristor Switched Capacitor)**: Il est constitué d'un condensateur commandé par thyristor fonctionnant en plein onde [2].

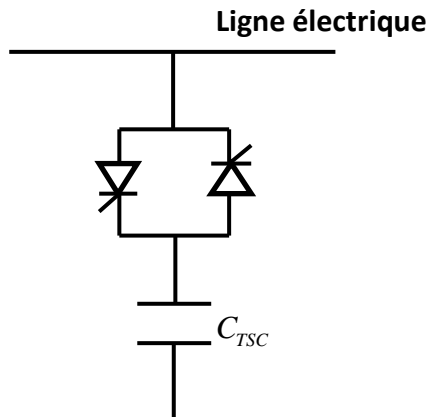


Fig. I.8: Thyristor Switched Capacitor (TSC).

- **TCR (Thyristor Controlled Reactor)** : Il est constitué d'une réactance en série avec un gradateur où la valeur de cette réactance est modifiée selon l'angle d'amorçage des thyristors [2].

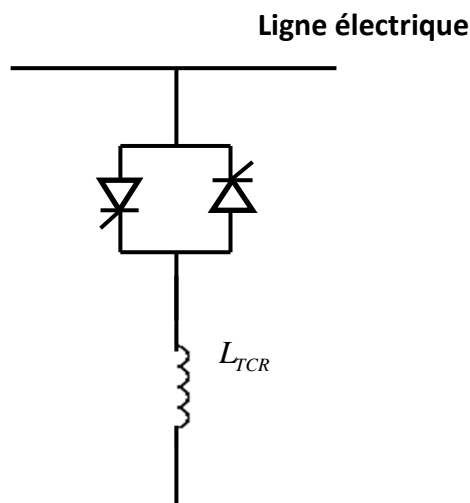


Fig. I.9. Thyristor Controlled Reactor (TCR).

- **SVC (Static VAR Compensator)**: Sa structure de base est l'association d'une inductance commandée par thyristor (TCR) d'un condensateur commuté par thyristor (TSC) en parallèle, connectés au réseau par un transformateur de couplage [2],[14].

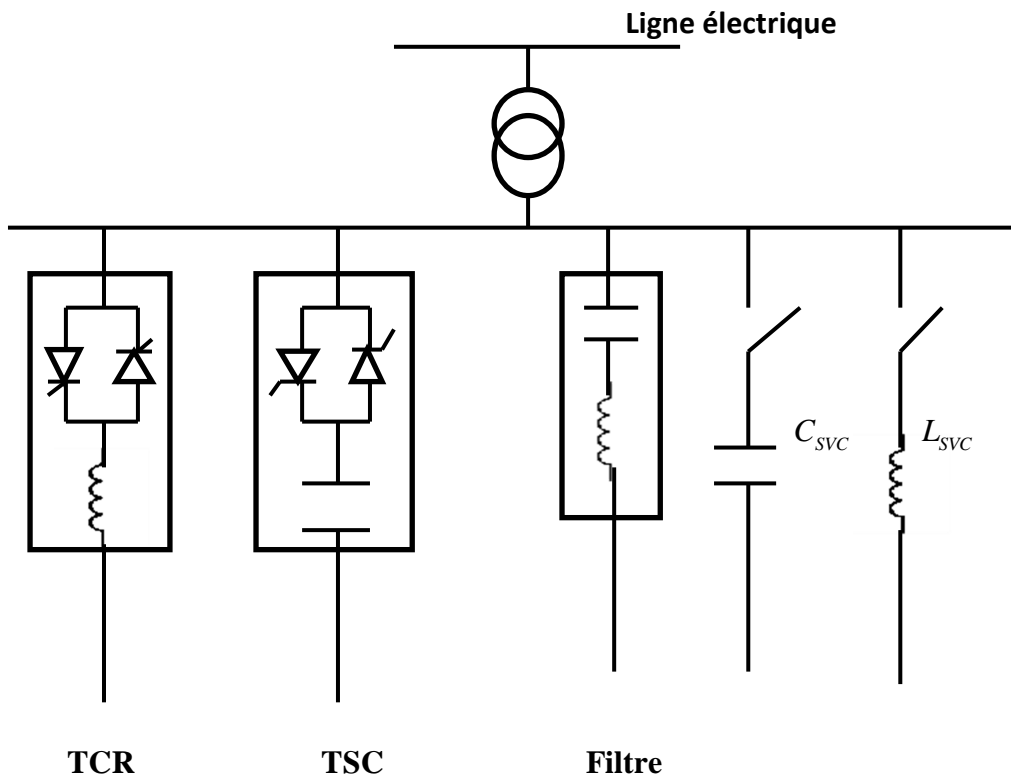


Fig. I.10: Static VAR Compensator (SVC).

- **STATCOM (Static Compensator)** :C'est un compensateur synchrone constitué d'un convertisseur avec une source de tension, d'un transformateur d'accouplement et d'un circuit de commande [2],[14].

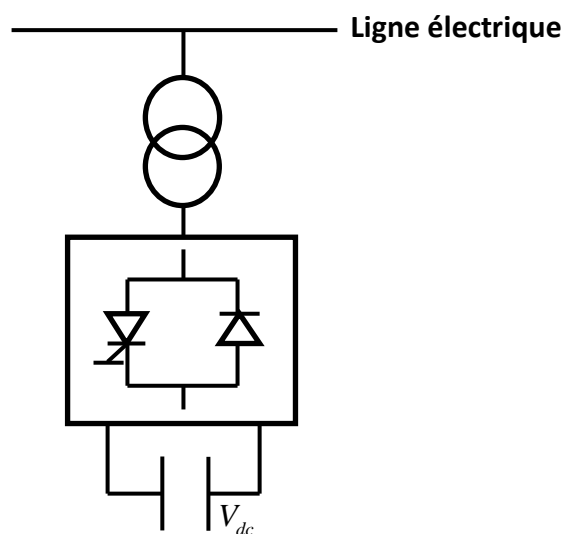


Fig. I.11: Static Compensator (STATCOM).

I.7.2.3. FACTS hybrides

C'est une combinaison des deux familles précédentes (FACTS séries et FACTS shunts), il en résulte des dispositifs plus performants permettant d'avoir un contrôle multi variable, c'est-à-dire, un contrôle simultané sur la tension, l'impédance et la phase, et par conséquent un meilleur contrôle sur le flux de puissance active et réactive. Parmi les FACTS hybrides les plus utilisés, on citera [5],[14] :

- **UPFC (Unified Power Flow Controller):** Il est composé de deux FACTS (SSSC, STATCOM) ayant en commun un condensateur de stockage à leurs côtés continus.[2],[14].

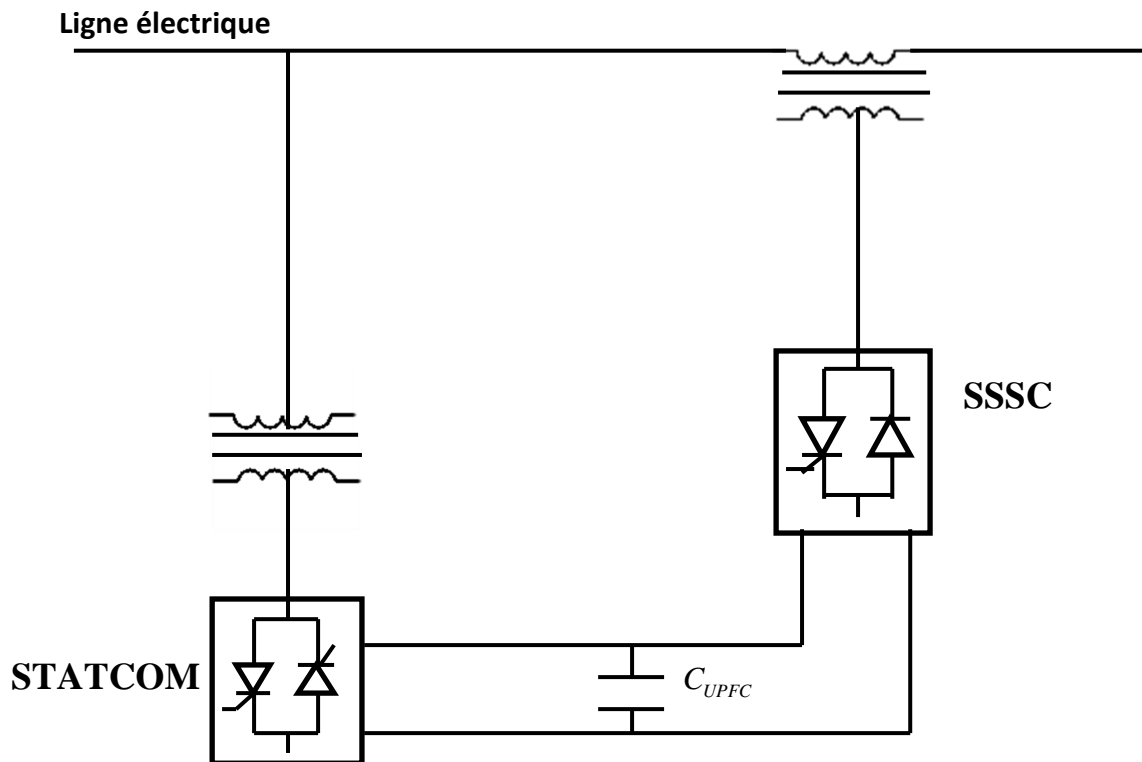


Fig. I.12: Unified Power Flow Controller (UPFC).

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

- **TCPST (Thyristor Control Phase Shift Transformer):** C'est un transformateur déphaseur ajusté par thyristors pour imposer un angle de phase rapidement variable [2].

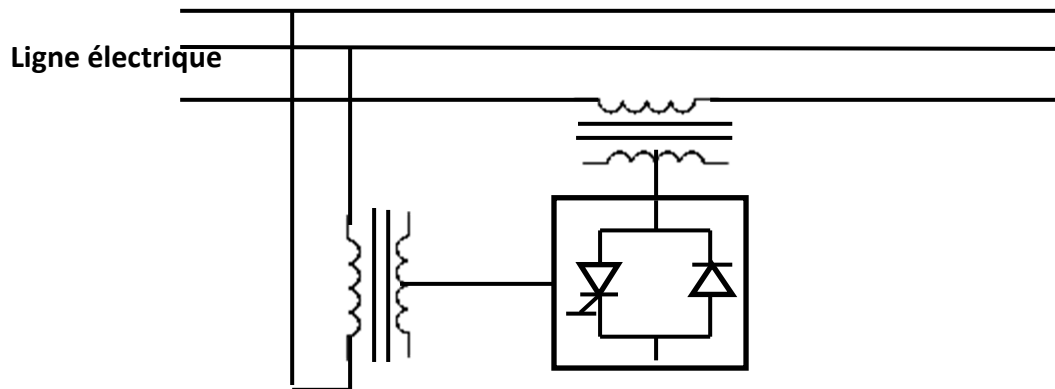


Fig. I.13: Thyristor Control Phase Shift Transformer (TCPST).

- **IPFC (Interligne Power Flow Controller):** Il est constitué de convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser [2],[14].

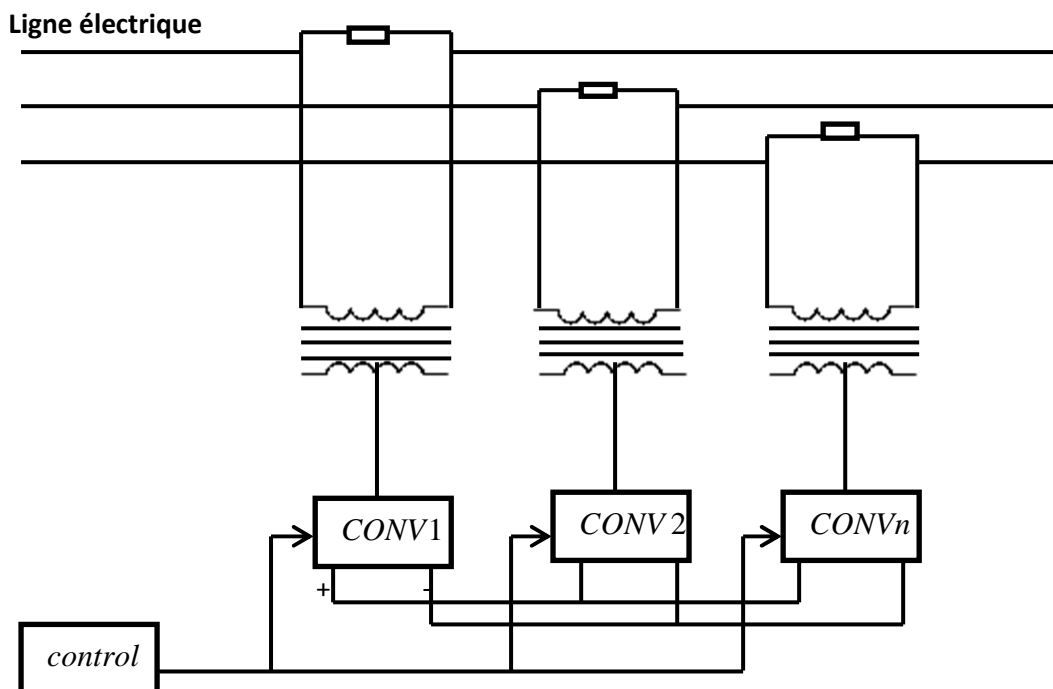


Fig. I.14: Interline Power Flow Controller (IPFC).

I.8. Dispositif SSSC

I.8.1. Définition et structure

Le compensateur statique série synchrone (SSSC) est l'un des plus importants et plus récents dispositifs FACTS, il a été proposé par Lazlo Gyugyi en 1989 comme compensateur de puissance série [2].

Le SSSC est constitué d'un onduleur (convertisseur DC-AC) de type VSC (*Voltage Source Converter*) constitué essentiellement de thyristors GTO, qui a pour rôle de générer une tension sinusoïdale triphasée contrôlable en amplitude et en phase. Cette tension est injectée au réseau à travers un transformateur de couplage placé en série avec la ligne de transport, et ce afin de produire le courant désiré dans la ligne [10].

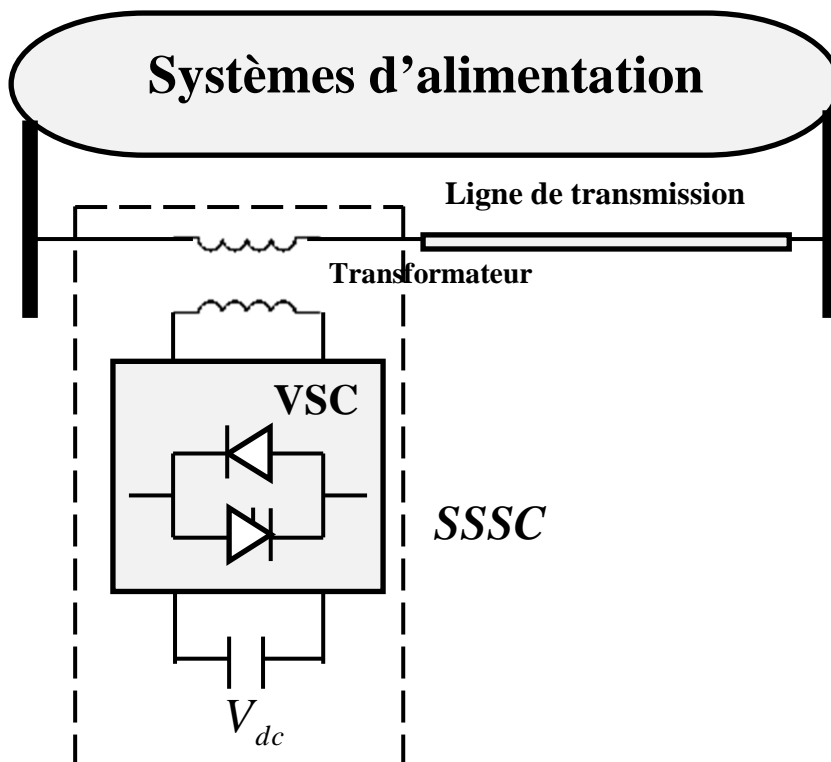


Fig. I.15 : Schéma simplifié d'un SSSC raccordé à une ligne de transport.

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, ont été présentés différents types de réseaux électriques ainsi que leurs rôles dans l'acheminement de l'électricité des centrales de production vers les charges consommatrices.

Ce chapitre a donné aussi une vue globale sur les diverses techniques classiques, qui utilisent des dispositifs traditionnels ayant pour but d'atténuer l'effet des perturbations et améliorer en conséquence, la qualité de l'énergie transportée puis les techniques modernes plus performantes à base de FACTS. Ces derniers sont capables de répondre aux besoins des gestionnaires de réseaux en termes de rapidité et de fiabilité, ce sont des compensateurs statiques dont la fonction principale est d'accroître la capacité de transport d'énergie et améliorer le contrôle.

Le SSSC, objet de ce mémoire, sera modélisé et décrit plus en détail dans les chapitres qui suivent.

Chapitre II :

Modélisation du SSSC

Chapitre II : Modélisation du SSSC

II.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été question de décrire de manière brève ce qu'un réseau électrique et sa constitution lui permettant d'assurer l'acheminement de l'électricité à partir des centrales électriques jusqu'aux divers consommateurs. Ce transport d'électricité n'étant pas à l'abri d'éventuelles perturbations souvent dues aux comportements désagréables de certaines charges et qui dégradent de manière considérable la qualité et la quantité de l'énergie électrique transportée. Une description générale de certaines de ces perturbations du moins les plus fréquentes a été abordée, ainsi qu'une étude technico-économique des divers moyens utilisés afin d'atténuer leur effet. Pour cela, sont utilisés des dispositifs classiques conçus à base d'éléments électriques (capacité, inductance...) et d'autres plus évolués connus sous le vocable de FACTS.

Dans ce chapitre il s'agit d'étudier un dispositif FACTS des plus connus qu'est le SSSC. Une description générale de son fonctionnement sera donnée ainsi que son rôle et son apport dans l'amélioration des performances du réseau électrique. Ensuite, un modèle mathématique régissant le fonctionnement du SSSC raccordé au réseau sera établi. Ce modèle servira plus tard à la synthèse de lois de commande afin de piloter le SSSC dans la réalisation du cahier des charges.

II.2. Description et fonctionnement du SSSC

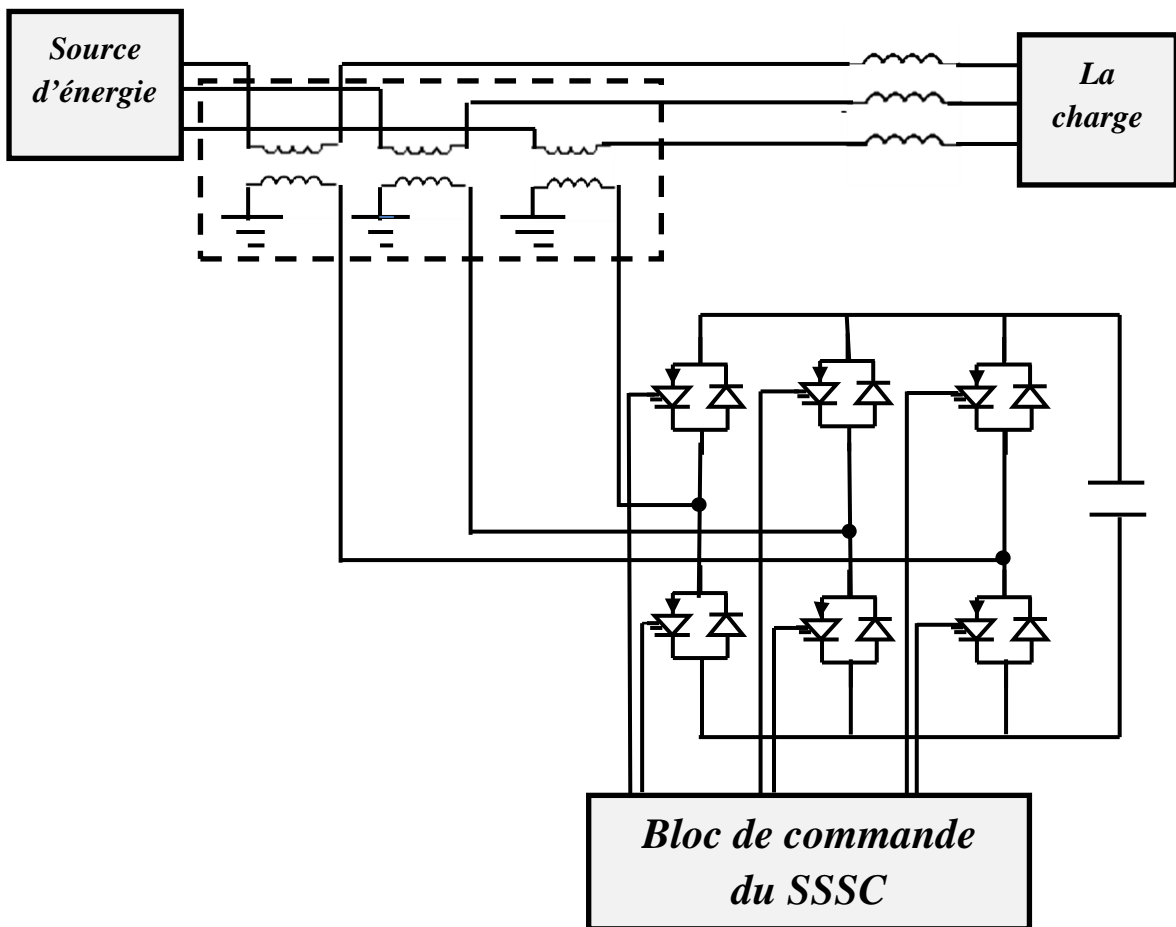


Fig. II.1: Structure de base d'un SSSC raccordé au réseau électrique.

Le SSSC fait partie de la famille des FACTS séries, autrement dit c'est un dispositif qui est placé en série avec la ligne à compenser, comme le montre la figure (II.1). Il est souvent constitué d'un convertisseur à thyristors GTO et alimenté par une source de tension continue, le tout couplé au réseau grâce à un transformateur [13].

La source de tension VSC dont dispose le SSSC représente l'élément clé de son fonctionnement, grâce à celui-ci le SSSC est capable de produire une tension triphasée V_{sh} d'amplitude et de phase contrôlables qui sera ensuite injectée à la ligne électrique. Idéalement, cette tension est en quadrature ($\pm 90^\circ$) avec le courant de la ligne selon le mode de compensation désiré (capacitif ou inductif). Pour illustrer les fonctionnalités de bases du

Chapitre II : Modélisation du SSSC

SSSC, il suffit de se référer à ces deux modes de compensations conventionnels. Ainsi, lorsqu'il s'agit d'une compensation capacitive, il y a lieu d'insérer des éléments capacitifs adéquats dans la ligne, ce qui permet d'injecter une tension retardée de 90° par rapport au courant de la ligne, s'opposant par occasion à la phase de la réactance de la ligne représentée ici par une réactance X . Par conséquent, cela annule une partie de cette réactance. Ce même comportement peut facilement être reproduit grâce à une source de tension alternative (onduleur) et c'est ce que fait le VSC quand le SSSC est réglé en ce mode de compensation, de plus la tension injectée par le VSC à l'avantage de ne pas être accompagnée par des oscillations qui surviennent souvent lors de l'utilisation d'éléments capacitifs (résonance) [11],[13].

L'équation (II.1) montre l'impact de la diminution de la réactance sur la puissance active transmise par la ligne [8] :

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X - X_c} \sin(\delta) \quad (\text{II.1})$$

V_s et V_r présentent respectivement les tensions amont et aval de la ligne.

La valeur de X_c est choisie comme étant un taux de la réactance de la ligne X

$$X_c = K \cdot X \quad \text{Avec} \quad 0 < K < 1 \quad (\text{II.2})$$

L'équation (II.1) se réécrit alors :

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X(1 - K)} \sin(\delta) \quad (\text{II.3})$$

Parler de variation de la réactance n'a pas de sens physique, l'impédance de la ligne étant définie par les caractéristiques intrinsèques de celle-ci, il est donc inconcevable de la modifier physiquement. Lors de la compensation capacitive, ce qui varie réellement c'est le courant de la ligne, en effet la tension V_{sh} injectée se traduit par une augmentation au niveau

Chapitre II : Modélisation du SSSC

de la tension de l'impédance et par conséquent une hausse au niveau du courant de la ligne et ainsi de la puissance transmise qui s'exprime comme suit [8] :

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X - \frac{V_{sh}}{I}} \sin(\delta) \quad (\text{II.4})$$

Du point de vue réactance apparent, elle se trouve réduite et le terme exact ou plutôt le plus utilisé généralement est la variation fictive de l'impédance de la ligne.

Le raisonnement suivi pour le mode de compensation capacitif du SSSC est le même pour le mode de compensation inductif, ainsi pour simuler une inductance associée en série avec la ligne, il suffirait changer les polarités de la tension injectée par le SSSC à travers un contrôle approprié du VSC. Ceci permet d'injecter une tension cette fois-ci 90° en avance par rapport au courant de la ligne ce qui causerait une diminution de la tension donc une diminution du courant de la ligne [8].

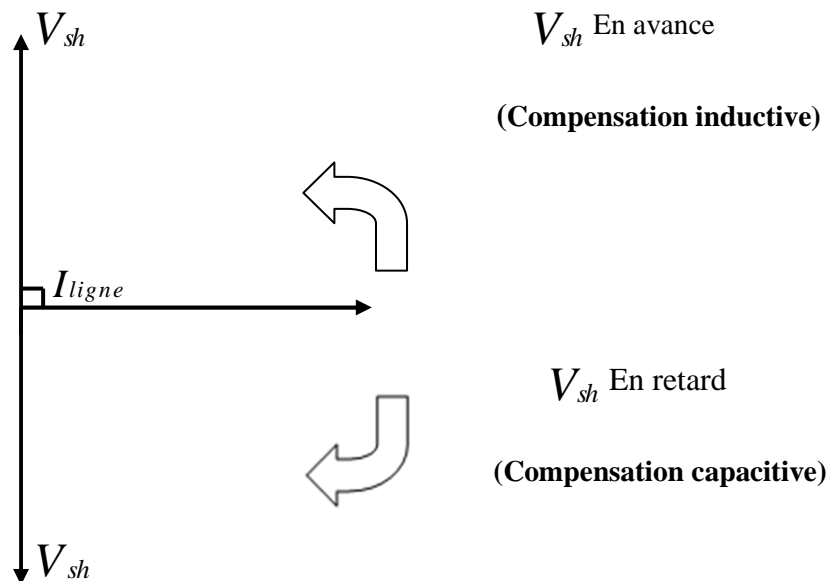


Fig. II.2 : Représentation des modes de compensation.

Chapitre II : Modélisation du SSSC

II.3. Modélisation du SSSC

Une ligne électrique équipée d'un SSSC peut être modélisée par le schéma ci-dessous, la ligne est représentée par ses tensions amont et aval ainsi que son impédance et le SSSC est représenté par une source de tension alternative lié mise en série avec une impédance.

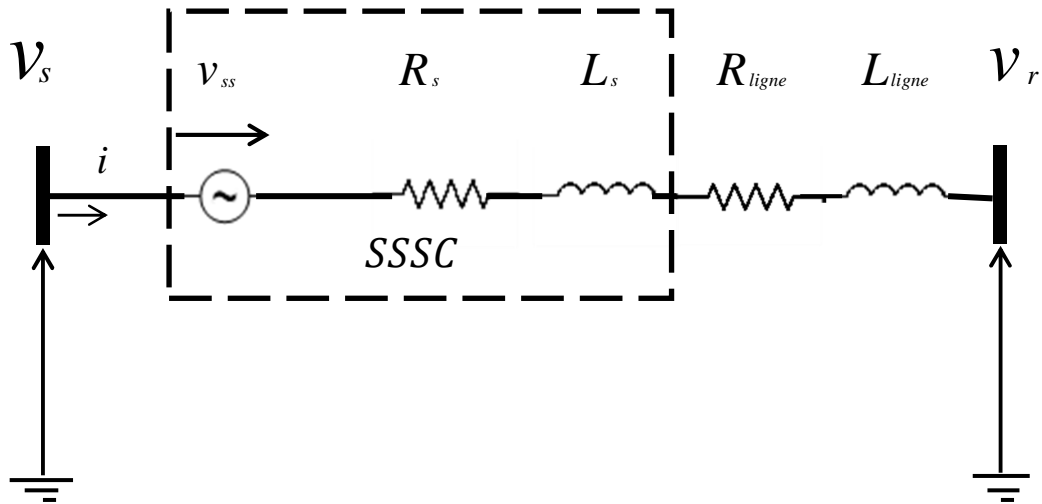


Fig. II.3 : Schéma d'une ligne électrique équipée d'un SSSC.

Le tableau ci-dessous donne la signification des grandeurs représentées sur le schéma de la figure II.3 :

v_s	Tension produite par la source
v_r	Tension de la charge au bout de la ligne
i	Courant de la ligne
v_{ss}	Tension injectée par le SSSC
R_s, L_s	Impédance de fuite du transformateur
R_{ligne}, L_{ligne}	Impédance du réseau

Tab. II .1. Table des indices

Chapitre II : Modélisation du SSSC

L'application des lois de Kirchhoff en courant alternatif triphasé au circuit unifilaire de la figure (II.3) conduit à:

$$v_s + v_{ss} - v_r - Ri - L \frac{di}{dt} = 0 \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\begin{cases} R = R_s + R_{\text{ligne}} \\ L = L_s + L_{\text{ligne}} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Pour les trois conducteurs, on peut écrire:

$$\begin{cases} v_{sa} + v_{ssa} - v_{ra} - Ri_a - L \frac{di_a}{dt} = 0 \\ v_{sb} + v_{ssb} - v_{rb} - Ri_b - L \frac{di_b}{dt} = 0 \\ v_{sc} + v_{ssc} - v_{rc} - Ri_c - L \frac{di_c}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec:

$$i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad v_s = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; \quad v_r = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}; \quad v_{ss} = \begin{bmatrix} v_{ssa} \\ v_{ssb} \\ v_{ssc} \end{bmatrix}$$

Ce système peut être représenté sous sa forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{ssa} \\ v_{ssb} \\ v_{ssc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{ra} \\ v_{sb} - v_{rb} \\ v_{sc} - v_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Chapitre II : Modélisation du SSSC

L'exploitation d'une telle représentation est difficile vu les paramètres qui varient en triphasé donc difficiles à manipuler. On peut avoir recours à un outil mathématique qui est la transformation de Park afin de passer à une représentation bidimensionnelle où les grandeurs seront continues et ce en projetant les grandeurs triphasées dans le repère synchrone lié au phaseur de la tension côté émetteur.

II.3.1. Transformée de Park

La transformée de Park est un outil généralement utilisé en électrotechnique, c'est un changement de repère. Elle permet de transformer des grandeurs électriques triphasées (espace vectoriel tridimensionnel) en grandeurs synchrones (espace vectoriel bidimensionnel), permettant ainsi une manipulation facile des grandeurs. Elle se fait en deux étapes : la première consiste à projeter les grandeurs alternatives triphasées à partir d'un repère (a,b,c) sur un autre repère diphasé fixe (α,β) (transformée de Concordia). La deuxième consiste en une rotation directe qui permet de passer du repère (α,β) à un repère (d,q) avec un angle (θ) (transformée d-q).

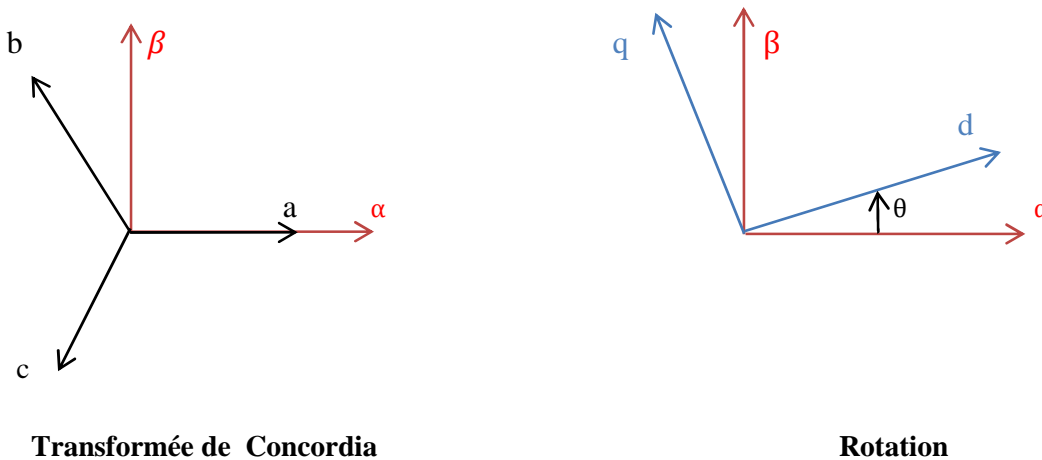


Fig. II.4 : Transformée de Park.

L'expression analytique de la transformée de Concordia est donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_o \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Chapitre II : Modélisation du SSSC

Où la matrice $T_{\alpha\beta}$ est donnée par :

$$T_{\alpha\beta} = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

v_α : Première composante diphasée,

v_β : Seconde composante diphasée,

v_o : Composante homopolaire,

$[v_a \quad v_b \quad v_c]^T$: Système de tension triphasée.

Il est à noter qu'ici v_o la composante homopolaire peut être éliminée si le système est équilibré, dans ce cas la matrice de Concordia peut s'écrire comme suit :

$$T_{\alpha\beta} = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

K est une constante qui prend généralement la valeur $\sqrt{\frac{2}{3}}$ ceci permet de conserver les puissances après transformation du modèle triphasé.

La matrice de la transformée inverse de Concordia est donnée par :

Chapitre II : Modélisation du SSSC

$$T_{\alpha\beta}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La transformée d-q est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = T_{dq} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

La matrice T_{dq} est donnée par :

$$T_{dq} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Avec θ l'angle de synchronisme formé par les vecteurs $\overline{v_\alpha}$ et $\overline{v_d}$ qui est donné par :

$$\theta = a \tan 2(v_\beta, v_\alpha) \quad (\text{II.15})$$

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

$$T_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Chapitre II : Modélisation du SSSC

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

La matrice de transformation de Park est le produit des matrices T_{dq} et $T_{\alpha\beta}$, elle est donnée par :

$$\mathbf{P} = T_{dq} \cdot T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice de transformation de Park inverse est telle que :

$$\mathbf{P}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

II.3.2. Application de la transformée de Park au modèle du SSSC triphasé

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{ssa} \\ v_{ssb} \\ v_{ssc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{ra} \\ v_{sb} - v_{rb} \\ v_{sc} - v_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Afin d'obtenir le modèle en d-q du système, on peut procéder comme suit :

En appliquant la transformée inverse de Park :

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}^{-1} \dot{i}_{dq} = -\frac{R}{L} (\mathbf{P}^{-1} \dot{i}_{dq}) + \frac{1}{L} (\mathbf{P}^{-1} v_{ssdq}) + \frac{1}{L} \mathbf{P}^{-1} (v_{sdq} - v_{rdq}) \quad (\text{II.20})$$

Chapitre II : Modélisation du SSSC

$\dot{\mathbf{i}}_{dq}$, \mathbf{v}_{ssdq} , \mathbf{v}_{sdq} et \mathbf{v}_{rdq} représentent les projections des grandeurs triphasées dans le repère synchrone. En multipliant par P , on obtient :

$$P \frac{d}{dt} P^{-1} \dot{\mathbf{i}}_{dq} = P \frac{R}{L} P^{-1} \dot{\mathbf{i}}_{dq} + P \frac{1}{L} P^{-1} \mathbf{v}_{ssdq} + P \frac{1}{L} P^{-1} (\mathbf{v}_{sdq} - \mathbf{v}_{rdq}) \quad (\text{II.21})$$

D'où:

$$P \left(\frac{dP^{-1}}{dt} \dot{\mathbf{i}}_{dq} + P^{-1} \frac{d\dot{\mathbf{i}}_{dq}}{dt} \right) = -\frac{R}{L} \dot{\mathbf{i}}_{dq} + \frac{1}{L} \mathbf{v}_{ssdq} + \frac{1}{L} (\mathbf{v}_{sdq} - \mathbf{v}_{rdq}) \quad (\text{II.22})$$

Ou encore

$$P \frac{dP^{-1}}{dt} \dot{\mathbf{i}}_{dq} + \frac{d\dot{\mathbf{i}}_{dq}}{dt} = -\frac{R}{L} \dot{\mathbf{i}}_{dq} + \frac{1}{L} \mathbf{v}_{ssdq} + \frac{1}{L} (\mathbf{v}_{sdq} - \mathbf{v}_{rdq}) \quad (\text{II.23})$$

Le système triphasé est considéré équilibré (pas de composante homolaire), on aura donc:

$$P \frac{dP^{-1}}{dt} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \omega \quad (\text{II.24})$$

$$\text{Avec : } \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant le terme $P \frac{dP^{-1}}{dt}$ par sa valeur dans l'équation (II.23), on aura le modèle suivant :

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_d \\ \dot{\mathbf{i}}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_d \\ \dot{\mathbf{i}}_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ssd} \\ \mathbf{v}_{ssq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{sd} - \mathbf{v}_{rd} \\ \mathbf{v}_{sq} - \mathbf{v}_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Chapitre II : Modélisation du SSSC

Avec:

\dot{i}_d, \dot{i}_q : Les composantes directes et en quadrature du courant de la ligne, elles représentent ici les sorties du système, elles seront exploitées plus tard afin d'avoir les valeurs des puissances qui dans le repère de Park s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P = v_{rd} \cdot \dot{i}_d + v_{rq} \cdot \dot{i}_q \\ Q = v_{rq} \cdot \dot{i}_d - v_{rd} \cdot \dot{i}_q \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

v_{ssd}, v_{ssq} : les composante directes et en quadrature de la tension injectée par le SSSC, elles représentent ici les entrées du système sur lesquelles on peut agir pour avoir les puissances désirées .

v_{sd}, v_{sq} : les composantes directe et en quadrature de la tension de source.

v_{rd}, v_{rq} : les composantes directes et en quadrature de la tension de charge (au bout de la ligne).

ω : La pulsation fondamentale de la tension réseau.

Les puissances active et réactive sont les sorties désirées, le modèle s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + d \\ Y = CX \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ssd} \\ v_{ssq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{rd} \\ v_{sq} - v_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{rd} & v_{rq} \\ v_{rq} & -v_{rd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Chapitre II : Modélisation du SSSC

Aussi, les matrices d'état, de commande, d'observation et de perturbation sont données respectivement comme suit :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} v_{rd} & v_{rq} \\ v_{rq} & -v_{rd} \end{bmatrix}; \quad d = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{rd} \\ v_{sq} - v_{rq} \end{bmatrix}$$

II.4. Simulation en boucle ouverte

Simuler le fonctionnement du système en boucle ouverte revient à supposer que le SSSC est débranché, les valeurs des puissances active et réactive dépendent alors des modules et phases des tensions amont et aval ainsi que de l'impédance intrinsèque de la ligne électrique. Pour simuler, un programme Matlab a été établi implémentant la méthode de Butcher Boole pour la résolution numérique des équations différentielles ordinaires (voir annexe).

Les paramètres du réseau choisis pour la simulation sont donnés dans le tableau si dessous :

<i>Tension amont</i>	v_s	$220.10^3 \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\omega t + \delta)$
<i>Tension aval</i>	v_r	$220.10^3 \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\omega t)$
<i>Impédance</i>	$R + jL\omega$	$3.1 + j0.0046\omega$
<i>Fréquence</i>	f	50Hz
<i>Angle de transport</i>	δ	5°

Tab. II .2. Paramètres du système

Chapitre II : Modélisation du SSSC

Les résultats obtenus après simulation sont donnés par les figures (II.5), (II.6) qui suivent.

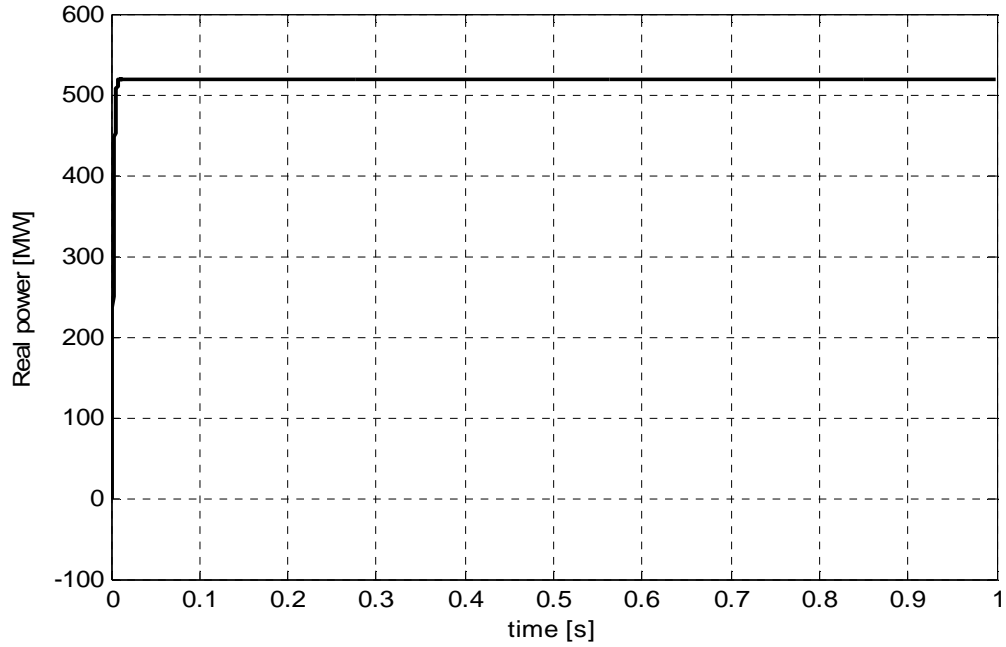


Fig. II.5 : Puissance active.

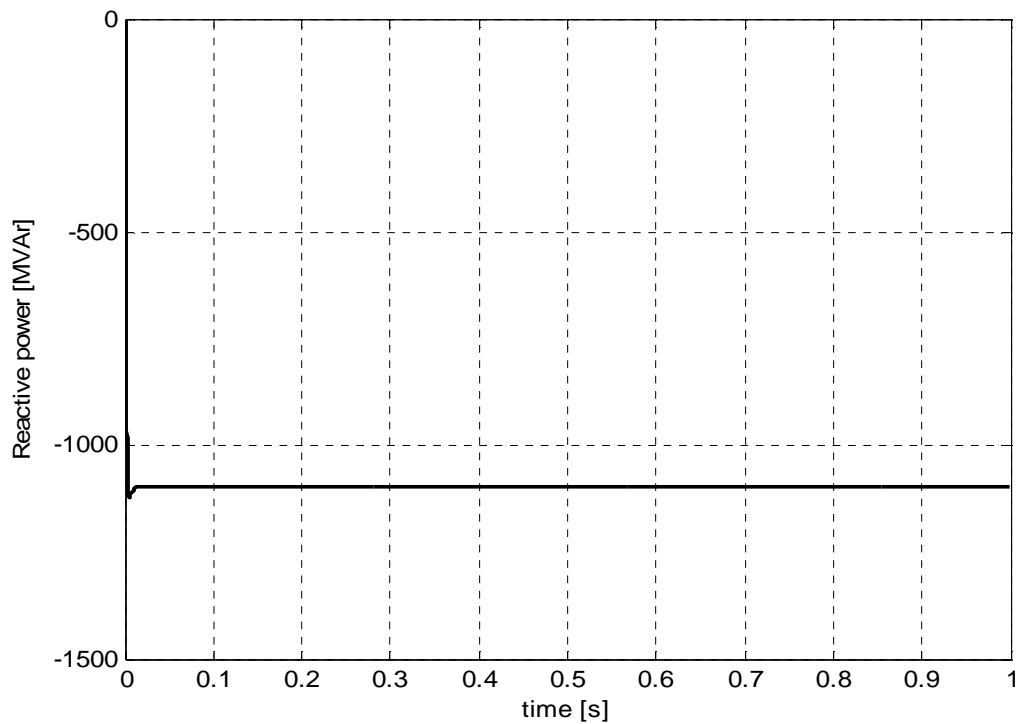


Fig. II.6 : Puissance réactive.

Chapitre II : Modélisation du SSSC

Les résultats de simulation montrent la convergence des puissances actives et réactives vers celle de l'écoulement naturel des puissances, un régime permanent qui dépend des paramètres du réseau (module, phase, impédance). Les puissances active et réactive prennent respectivement les valeurs 519 MW et -1100 MVar.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle du SSSC dans l'espace d'état a été établi, en exploitant, d'une part, les lois de Kirchhoff en courant alternatif triphasé et d'autre part, la transformation de Park. Le modèle obtenu est linéaire carré à deux entrées de commande, concrétisées par les composantes de la tension générée par le SSSC, et deux sorties à savoir les puissances active et réactive transitant dans la ligne.

Le modèle du SSSC servira, dans le prochain chapitre, à la synthèse de lois de commande de celui-ci afin de réaliser le cahier des charges.

Chapitre III :

Commande du SSSC

Chapitre III : Commande du SSSC

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été question d'étudier le rôle et le fonctionnement du SSSC et d'établir un modèle mathématique décrivant l'ensemble formé par ce dispositif avec la ligne du réseau. Dans ce chapitre il s'agit d'exploiter le modèle obtenu afin de synthétiser une loi de commande permettant de piloter le SSSC afin de répondre aux critères imposés par un cahier des charges qui sera décrit ultérieurement dans ce chapitre.

La loi de commande sera réalisée en premier, grâce à une commande par retour d'état avec intégrateur. Des simulations en boucle fermée seront données afin d'analyser le fonctionnement du système piloté par cette loi de commande.

Les lois de commandes classiques peuvent être insuffisantes et leurs performances se dégradent face aux éventuelles erreurs de modélisation et/ou perturbations du système. La fin de ce chapitre fera l'objet de synthèse d'une loi de commande non linéaire robuste qui est la commande FTC (Finite Time Control). Une comparaison des résultats obtenus avec les deux commandes sera faite afin de montrer l'apport de cette commande dans l'amélioration du fonctionnement du système.

III.2. Cahier des charges

Le SSSC injecte une tension en série avec le courant de la ligne, ceci permet de faire varier et de commander le flux des puissances dans celle-ci et imposer ainsi des valeurs de références bien déterminées que le système doit atteindre en un temps de réponse spécifié (souvent de l'ordre de 20 ms), afin d'assurer le bon fonctionnement du réseau.

III.3. Commande par retour d'état avec intégrateur

Une possibilité pour commander un système dynamique linéaire consiste à utiliser la commande par retour d'état, elle permet de placer les pôles du système en boucle fermée n'importe où dans le plan complexe. Cela permet d'imposer une dynamique désirée au régime transitoire du système, quoiqu'elle ne garantisse pas une erreur statique nulle. Pour remédier à cela, une des techniques utilisées consiste à insérer un intégrateur dans la chaîne directe. La figure (III.1) illustre le schéma de commande du système.

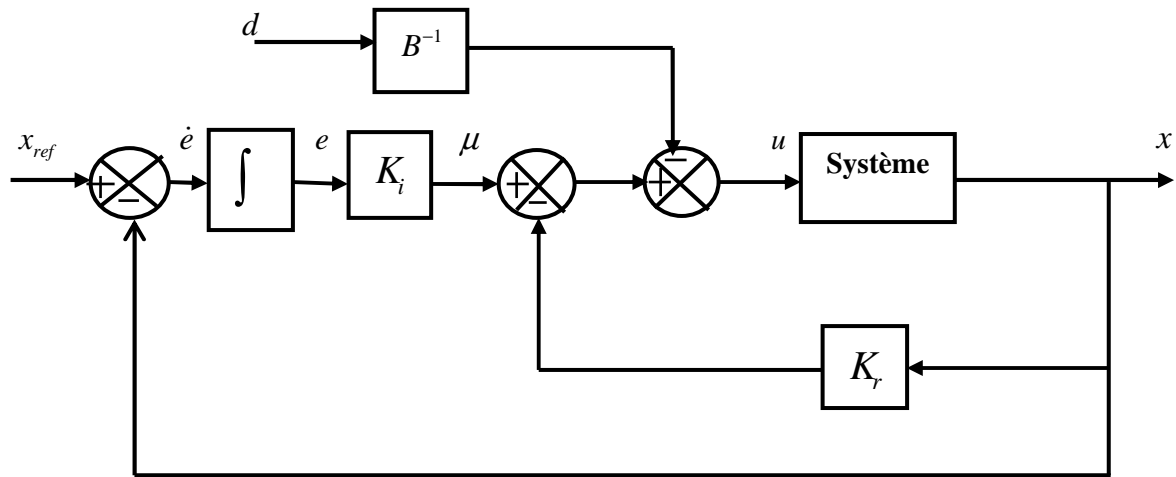


Fig.III.1: Structure de la commande par retour d'état avec intégrateur.

Le modèle du système dans le plan de Park est donné par le model d'état suivant (voir chapitre 2):

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + d \\ Y = CX \end{cases}$$

Avec:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} v_{rd} & v_{rq} \\ v_{rq} & -v_{rd} \end{bmatrix}; \quad d = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{rd} \\ v_{sq} - v_{rq} \end{bmatrix}$$

A partir du schéma de la figure (III.1) le nouveau système peut s'écrire comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B\mu \\ \dot{e} = x_{ref} - x \end{cases} \quad (III.1)$$

Avec $\mu = U + B^{-1}d$ est une entrée de commande virtuelle.

Chapitre III : Commande du SSSC

On peut prendre un nouveau vecteur d'état $Z = \begin{pmatrix} x \\ e \end{pmatrix}$, on obtient alors la nouvelle représentation d'état dite augmentée, telle que:

$$\dot{Z} = \tilde{A}Z + \tilde{B}\mu + Nx_{ref} \quad (III.2)$$

Avec:
$$\dot{Z} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{pmatrix}; \quad \tilde{A} = \begin{pmatrix} A & 0_2 \\ I_2 & 0_2 \end{pmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{pmatrix} B \\ 0_2 \end{pmatrix}; \quad N = \begin{pmatrix} 0_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

Avec: 0_2 la matrice carrée nulle d'ordre 2

I_2 La matrice identité d'ordre 2

La loi de commande du système s'écrit :
$$\mu = -KZ = -(K_r \quad K_i) \begin{pmatrix} x \\ e \end{pmatrix} \quad (III.3)$$

L'insertion de cette commande dans le système (III.2) permet d'avoir le système en boucle fermée suivant:

$$\dot{Z} = (\tilde{A} - \tilde{B}K)Z + Nx_{ref} \quad (III.4)$$

Afin d'imposer le régime dynamique désiré en boucle fermée, il suffit de bien choisir les coefficients de la matrice K de sorte à ce que les pôles du polynôme caractéristique désiré en boucle fermée soient les mêmes avec les valeurs propres de la matrice $(\tilde{A} - \tilde{B}K)$. Ainsi si les coefficients de la matrice K sont bien choisis (pôles à parties réelles négatives), les variables d'état convergent vers des valeurs constantes et la variable d'état ξ tendra vers une valeur finie qui par conséquent fait converger l'erreur vers 0.

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \dot{e} = x_{ref} - x = 0 \quad \text{et donc} \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} x = x_{ref}. \quad (III.5)$$

La matrice de retour d'état K est calculée sous Matlab en utilisant la fonction

Chapitre III : Commande du SSSC

prédéfinie « place », avec $K = -place(\tilde{A}, \tilde{B}, P)$. P représente le vecteur comportant les pôles désirés en boucle fermée, la matrice K obtenue sera ensuite décomposée en la matrice retour d'état K_r et la matrice d'intégration K_i .

III.3.1. Synthèse de la loi de commande

Le calcul des pôles désirés se fait en fonction du régime dynamique désiré qui est défini par un amortissement $\zeta = 0.7$ et un temps de réponse $t_r = 20ms$. De là on peut déduire la paire de pôles dominants qui est donnée par l'équation suivante :

$$P_{1,2} = \omega_n \left(-\zeta \pm j\sqrt{1-\zeta^2} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$\text{avec : } \omega_n = \frac{3}{t_r}. \quad (\text{III.7})$$

Dans ce cas, la paire de pôles dominants est telle que :

$$P_{1,2} = -105 \pm 107j$$

Pour les deux pôles restants, la règle est qu'ils soient choisis de manière à ne pas affecter le régime transitoire du système. L'une des méthodes consiste à choisir ces pôles au moins cinq fois la valeur du pôle dominant.

III.3.2 .Simulation

Pour simuler le comportement du système en boucle fermée, un programme Matlab script a été élaboré, le programme assure le calcul de la loi de commande et se repose sur la méthode de Butcher-Boole pour la résolution des équations différentielles afin de calculer la réponse du système en boucle fermée (voir annexe).

Chapitre III : Commande du SSSC

Test 1 : Réponse du système en l'absence d'incertitudes paramétriques et de perturbations externes :

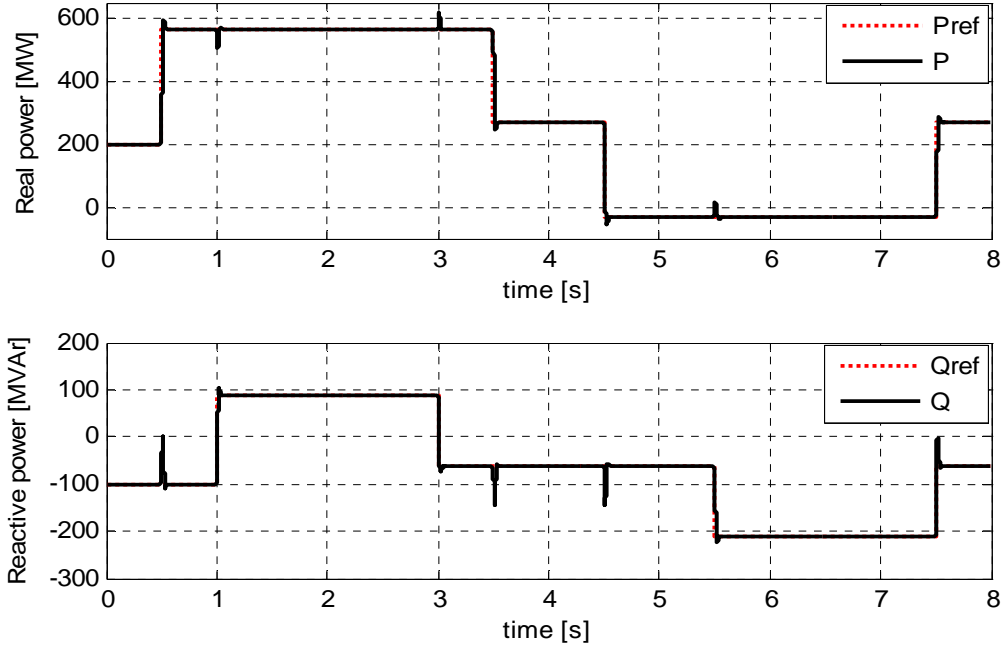


Fig. III.2 : Puissances active et réactive.

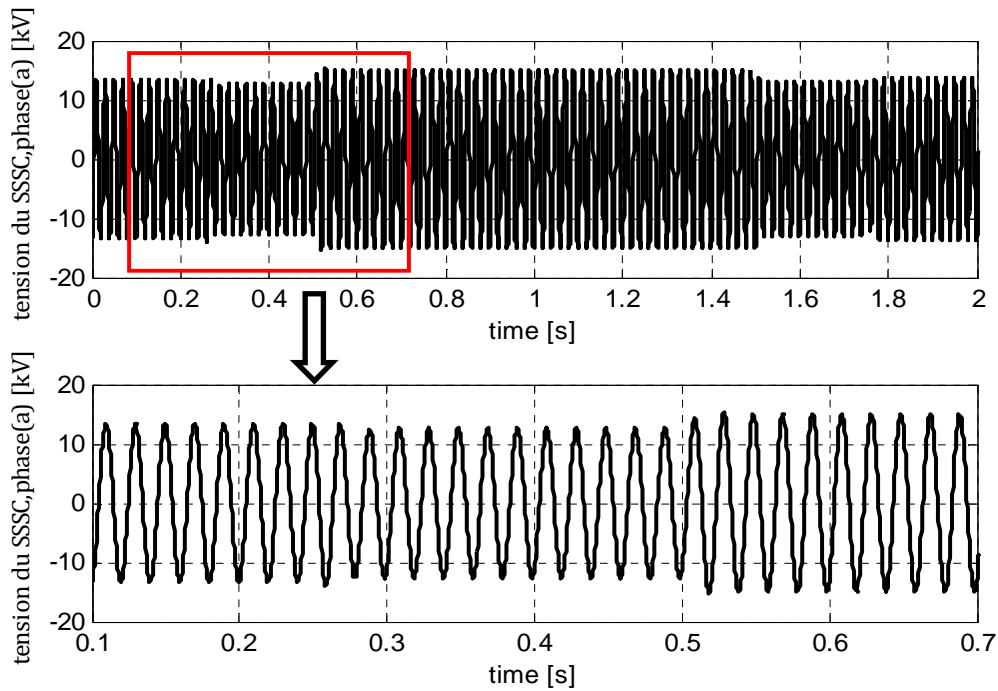


Fig. III.3 : Tension injectée par le SSSC.

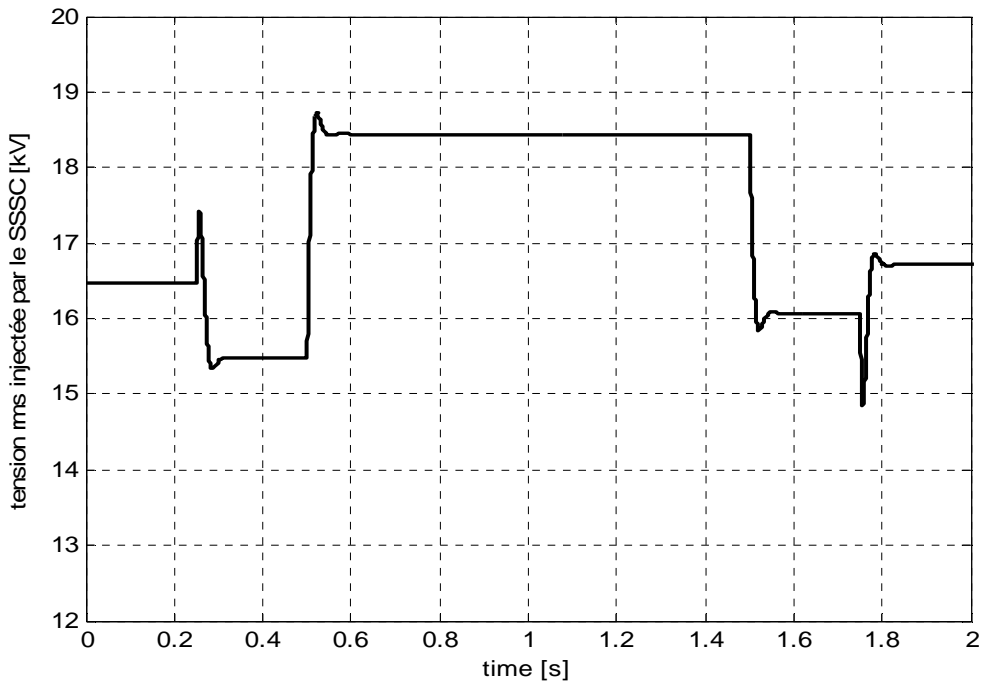


Fig. III.4 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Test 2 : Réponse du système avec 20% d'incertitude paramétrique.

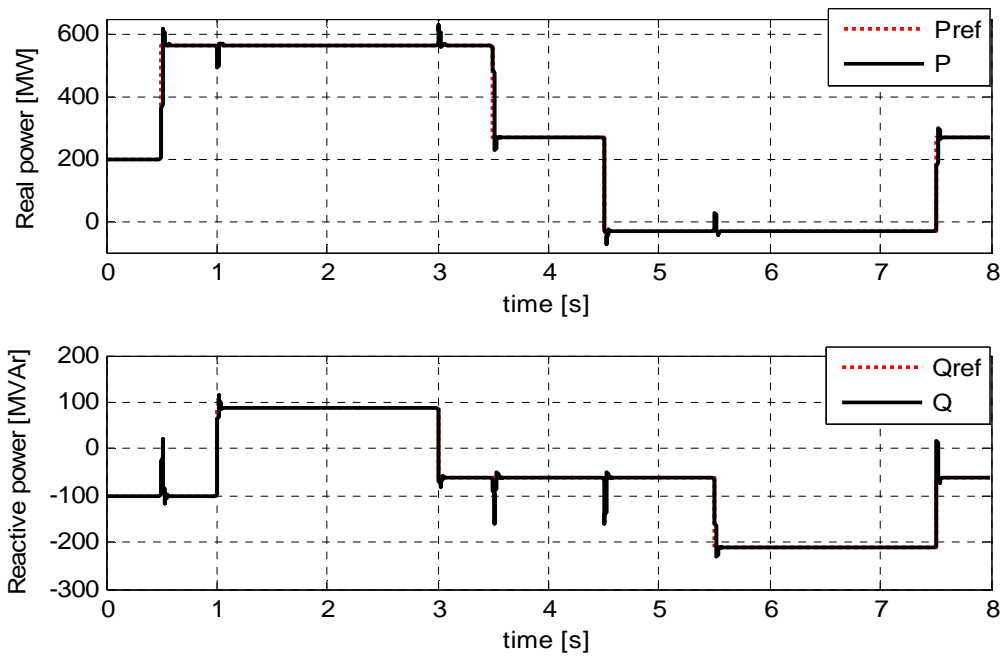


Fig. III.5 : Puissances active et réactive.

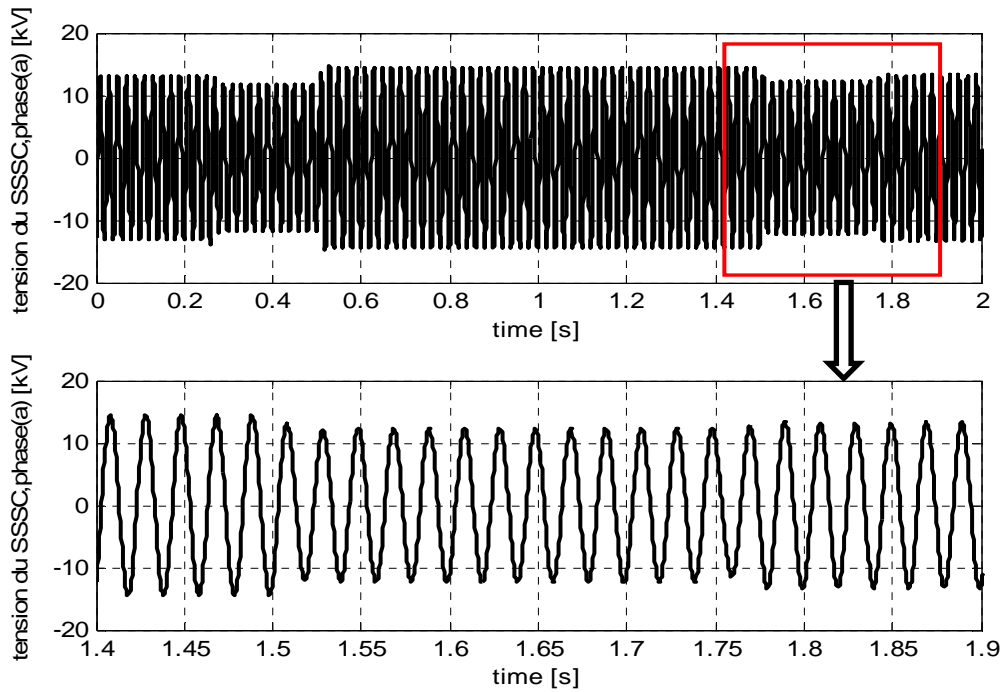


Fig. III.6: Tension injectée par le SSSC.

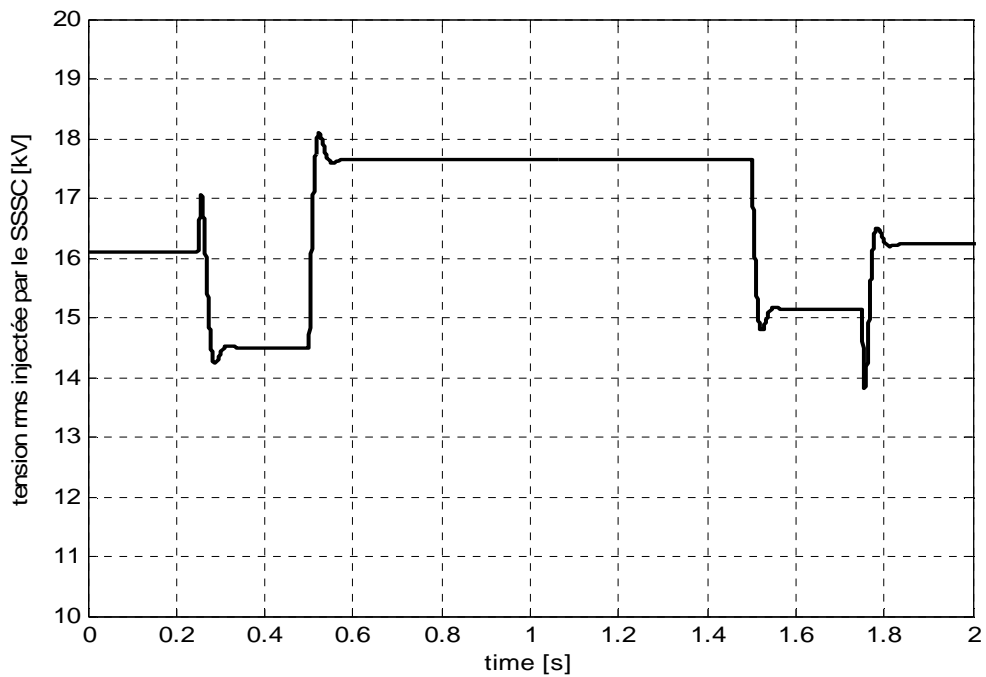


Fig. III.7 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Chapitre III : Commande du SSSC

Test 3 : Réponse du système avec 30% de chute de tension au côté récepteur à l'instant $t=1.5s$ et durant 300 ms.

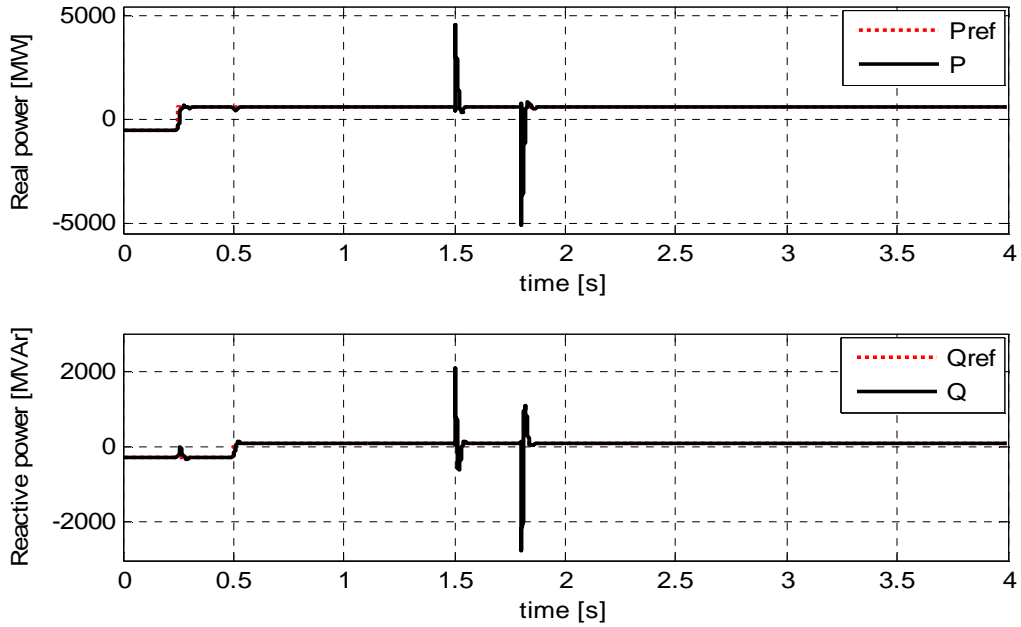


Fig. III.8: Puissances active et réactive.

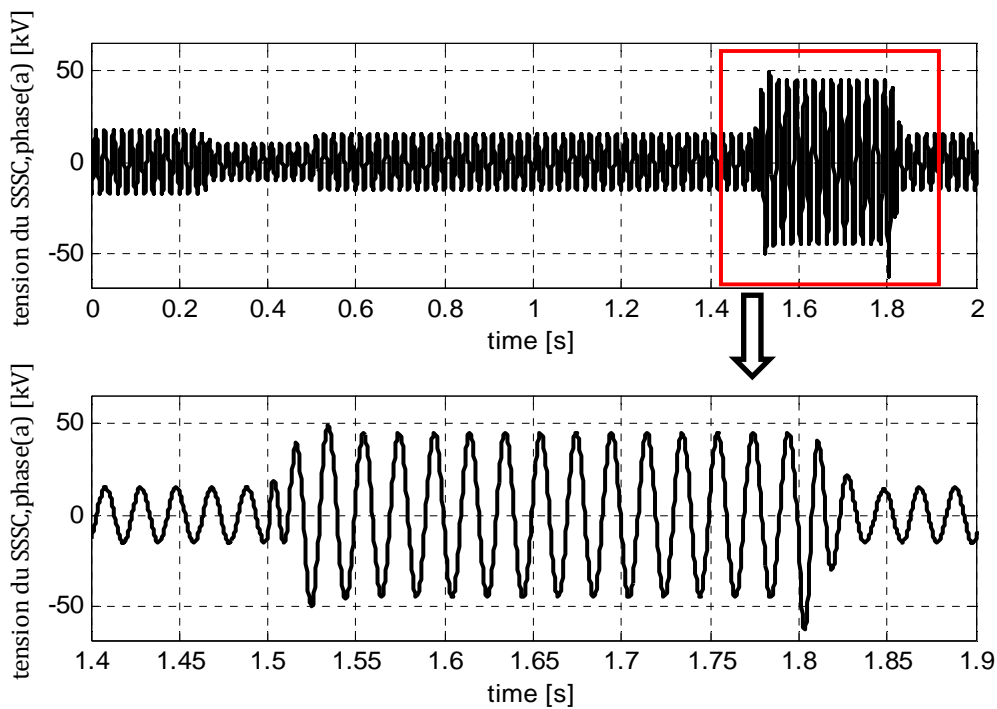


Fig. III.9 : Tension injectée par le SSSC.

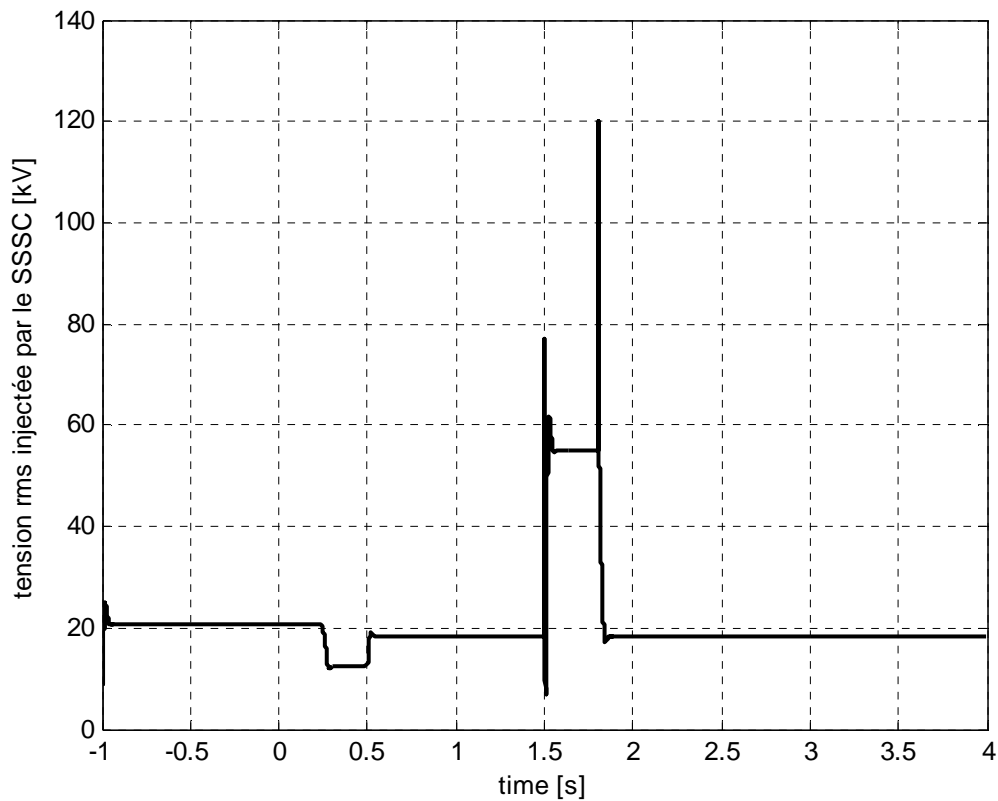


Fig. III.10 : Tension efficace injectée par le SSSC.

III.3.3 .Interprétation des résultats de simulation

A partir des résultats de simulation obtenus, la commande par retour d'état avec intégrateur s'avère fiable et robuste face aux perturbations externes que subit le système. La tension de commande générée est acceptable et réalisable par le SSSC et elle assure au système un bon régime de poursuite des signaux de références, et ceci en un temps de réponse ne dépassant pas les 20ms. Néanmoins, la commande reste sensible aux imprécisions de modélisation. La figure (III.5) montre la dégradation de la commande face à ces variations paramétriques.

III.4. Commande FTC (Finite Time Control)

Dans cette partie, nous utilisons la stratégie de la commande non linéaire par la théorie de Lyapunov.

La théorie de la stabilité joue un rôle central en théorie des systèmes. Différents types de problèmes de stabilité peuvent être rencontrés dans l'étude des systèmes dynamiques. Ici,

Chapitre III : Commande du SSSC

nous entendons par la stabilité des points d'équilibre. La stabilité d'un point d'équilibre est généralement étudiée à l'aide du concept de stabilité au sens de Lyapunov.

Par définition, si un système est dans un état d'équilibre, il restera dans cet état pour t variant dans le temps. L'étude de la stabilité au sens de Lyapunov consiste en l'étude des trajectoires du système quand l'état initial est voisin d'un état d'équilibre. Cela reflète la possibilité de perturbations affectant le système, sous forme de conditions initiales non nulles.

Dans cette section, seules les incertitudes de modélisation W sont considérées. Ces incertitudes sont supposées bornées à bornes connues. Celles-ci vérifient donc:

$$|w_i| \leq \bar{w}_i, \text{ pour } i = 1, 2 \quad (\text{III.8})$$

Où: \bar{w}_i une constante réelle positive.

L'équation d'état du système est donnée par:

$$\dot{X} = AX + BU + d + W \quad (\text{III.9})$$

Soit e l'erreur de réglage en courant donnée par:

$$e = X - X_{ref} \quad (\text{III.10})$$

Avec X_{ref} le vecteur des courants de référence.

En exploitant (III.9) et (III.10), on obtient l'équation dynamique de e suivante:

$$\dot{e} = AX + BU + d - \dot{X}_{ref} + W \quad (\text{III.11})$$

L'équation (III.11) peut se réécrire comme suit:

$$\dot{e} = \mu + W \quad (\text{III.12})$$

Où: μ est une entrée de commande virtuelle. Elle est donnée par l'expression suivante:

$$\mu = AX + BU + d - \dot{X}_{ref} \quad (\text{III.13})$$

Pour une synthèse décentralisée de la loi de commande, (III.12) conduit à:

$$\dot{e}_i = \mu_i + w_i, \text{ pour } i = 1, 2 \quad (\text{III.14})$$

Chapitre III : Commande du SSSC

Soit la fonction de Lyapunov définie positive et radialement non bornée V telle que:

$$V = \sum_{i=1}^2 |e_i| \quad (\text{III.15})$$

Sa dérivée par rapport au temps \dot{V} est donnée par (III.16):

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 \dot{e}_i \cdot \text{sign}(e_i) \quad (\text{III.16})$$

Les équations (III.14) et (III.16) permettent d'écrire:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 (\mu_i + w_i) \cdot \text{sign}(e_i) \quad (\text{III.17})$$

Pour rendre \dot{V} définie négative, l'entrée de commande μ_i est choisie telle que:

$$\mu_i = \left(-k_i |e_i|^\alpha - \bar{w}_i \right) \cdot \text{sign}(e_i) \quad (\text{III.18})$$

Avec: α une constante strictement positive inférieure à 1 et k_1, k_2 sont deux constantes strictement positives.

En effet, la substitution de la commande μ_i par son expression (III.18) dans (III.17) permet d'avoir:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 -k_i |e_i|^\alpha - \bar{w}_i + w_i \cdot \text{sign}(e_i) \quad (\text{III.19})$$

Il est clair que $-\bar{w}_i + w_i \cdot \text{sign}(e_i)$ est une quantité négative, d'où:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^2 -k_i |e_i|^\alpha \quad (\text{III.20})$$

Ou encore:

$$\dot{V} \leq -\beta \left(\sum_{i=1}^2 |e_i| \right)^\alpha \quad (\text{III.21})$$

Où: $\beta = \min \{k_1, k_2\}$.

Chapitre III : Commande du SSSC

Il en découle que:

$$\dot{V} \leq -\beta V^\alpha \quad (\text{III.22})$$

La relation (III.22) montre que V décroît, donc $e(t)$ converge vers zéro en un temps fini et atteint cette valeur au plus après $\bar{t} = V(0)/\beta$ unités de temps. Aussi, le vecteur X converge vers le vecteur d'état désiré X_{ref} .

A partir de (III.13) et sachant que la matrice B est inversible, le vecteur de commande réelle s'exprime comme suit :

$$U = B^{-1}(\mu + \dot{X}_{ref}) \quad (\text{III.23})$$

En se basant sur les relations (III.18) et (III.23) et le fait que $e = X - X_{ref}$, la loi de commande proposée dans cette section est schématisée à la figure (III.11).

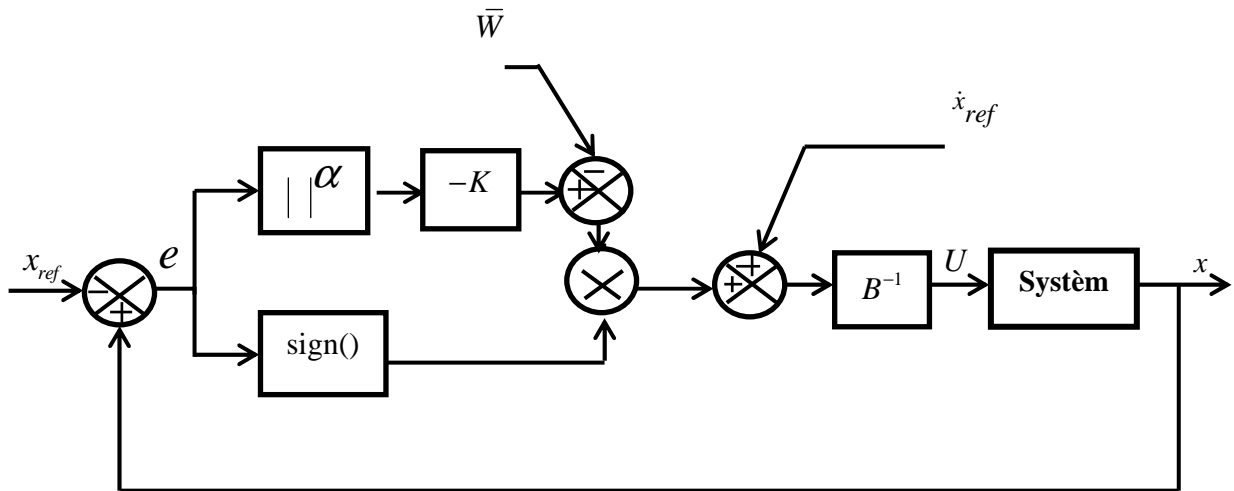


Fig.III.11 : Structure de la commande FTC.

III.4.1.Simulation

Dans cette section, nous testons, par simulation numérique, le fonctionnement du système de puissance équipé du SSSC et piloté par la technique de commande FTC.

Les gains de conception qui ont donné satisfaction sont choisis tels que :

$$[k_1 \quad k_2] = 10^6 \cdot [5 \quad 5]; [\bar{w}_1 \quad \bar{w}_2] = 10^2 \cdot [1 \quad 1]; \alpha = 0.5;$$

Chapitre III : Commande du SSSC

Test 1 : Réponse du système en l'absence d'incertitudes paramétriques et de perturbations externes :

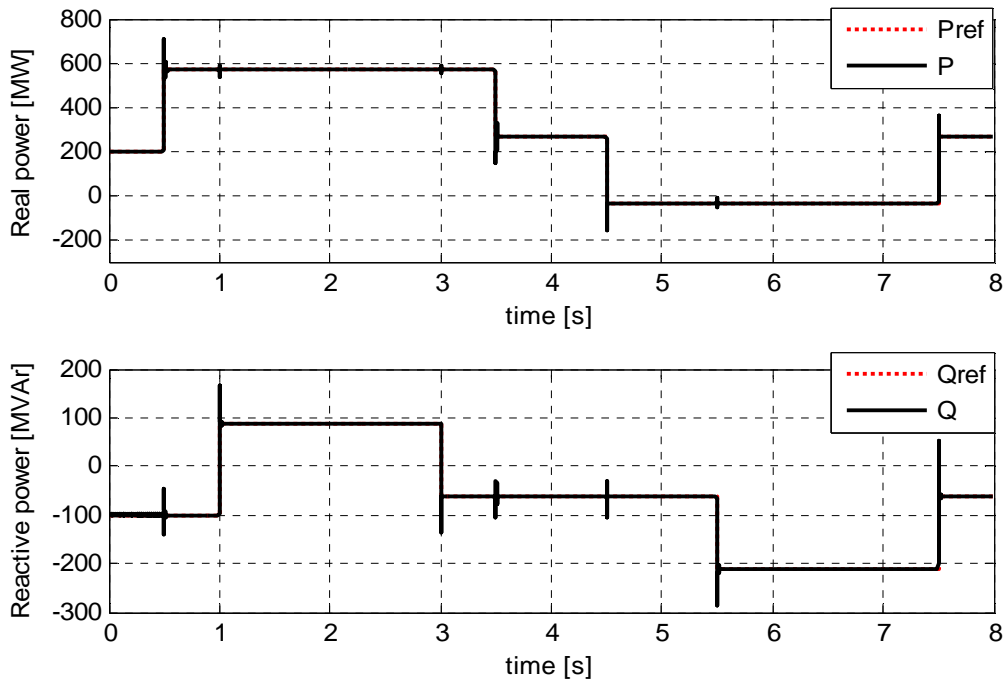


Fig. III.12 : Puissances active et réactive.

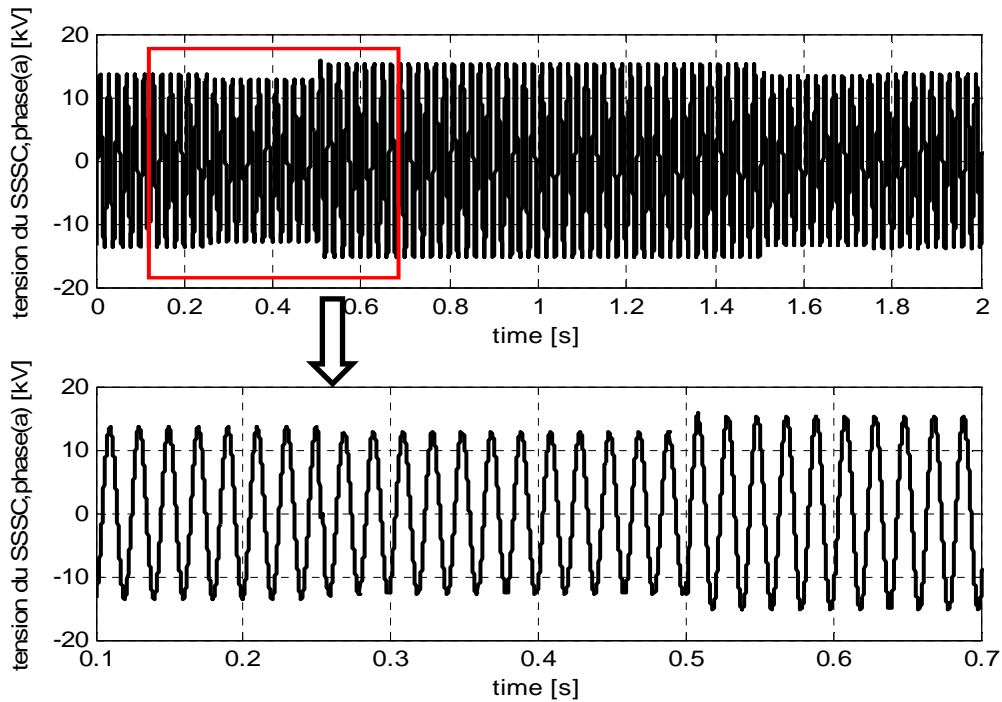


Fig. III.13 : Tension injectée par le SSSC.

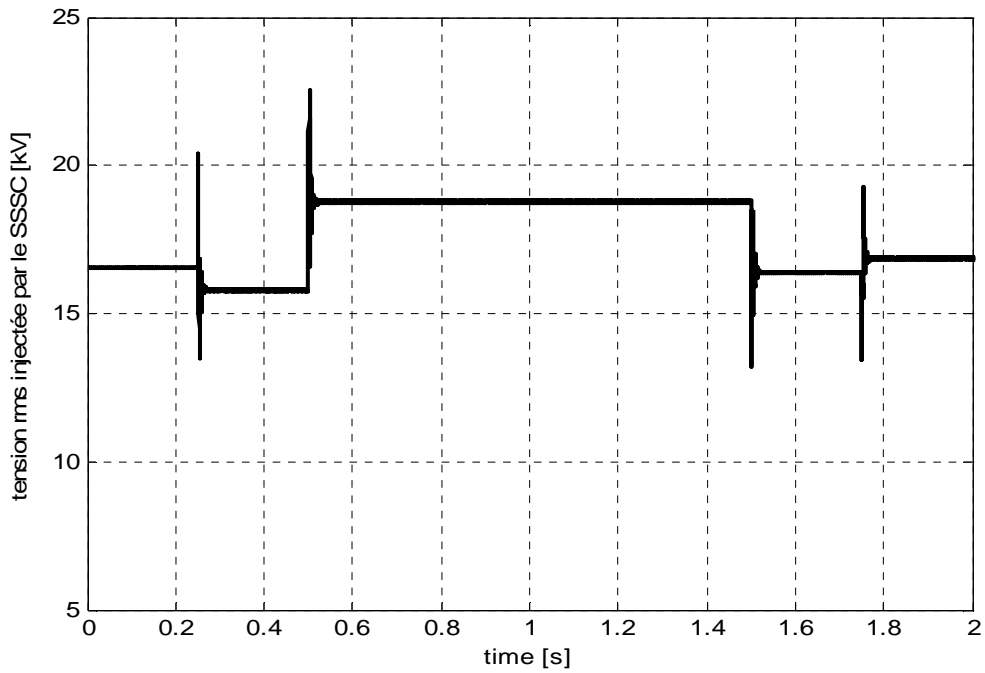


Fig. III.14 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Test 2 : Réponse du système avec 20% d'incertitude paramétrique.

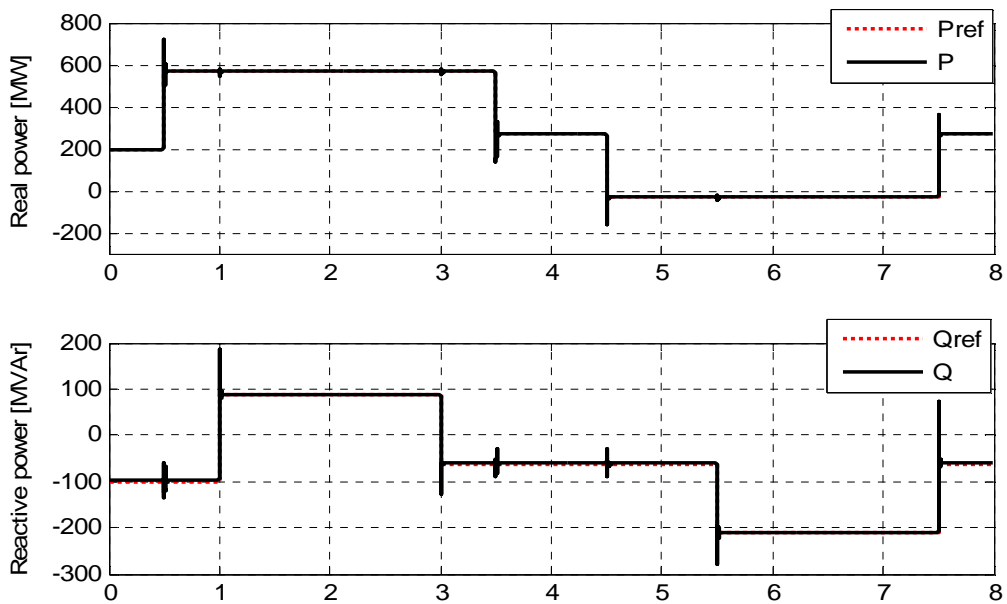


Fig. III.15 : Puissances active et réactive.

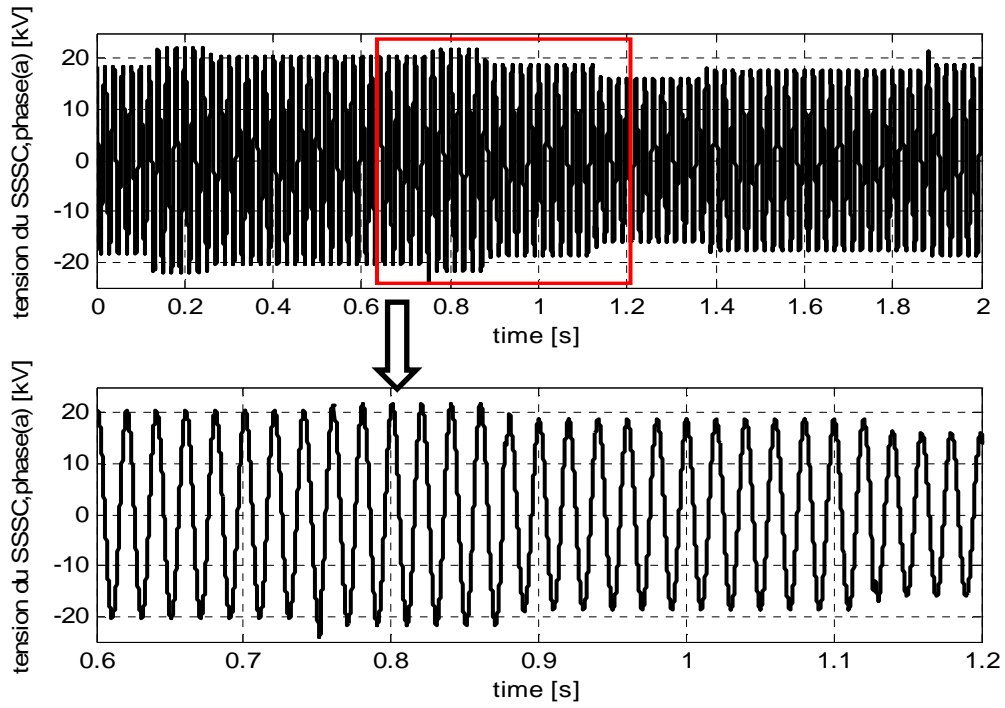


Fig. III.16 : Tension injectée par le SSSC.

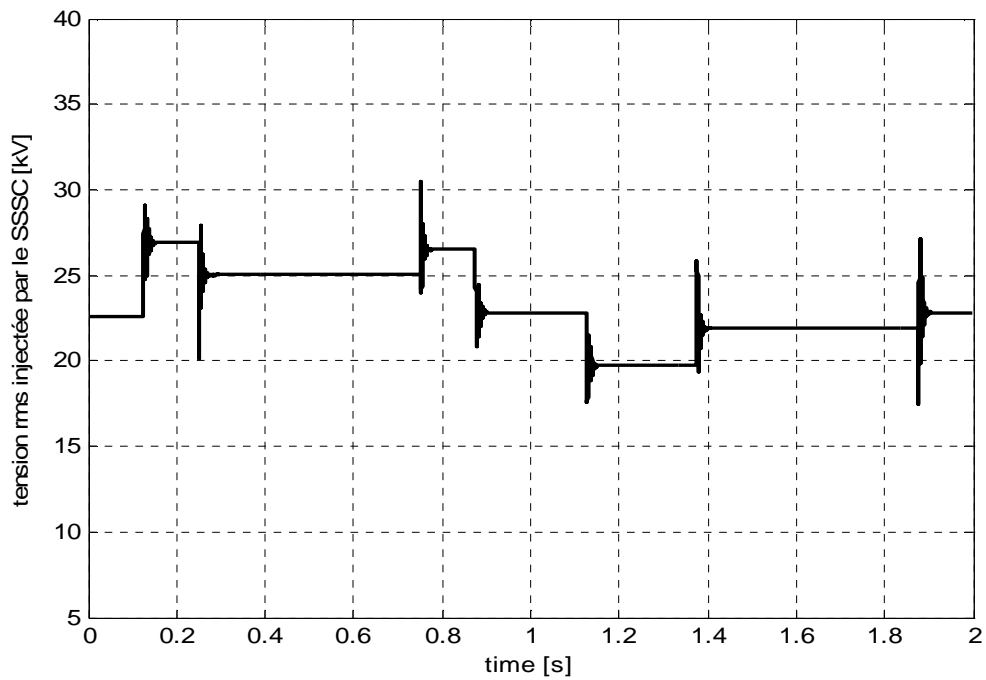


Fig. III.17 : Tension efficace injectée par le SSSC.

Chapitre III : Commande du SSSC

Test 3 : Réponse du système avec 30% de chute de tension au côté récepteur à l'instant $t=1.5s$ et durant 300 ms.

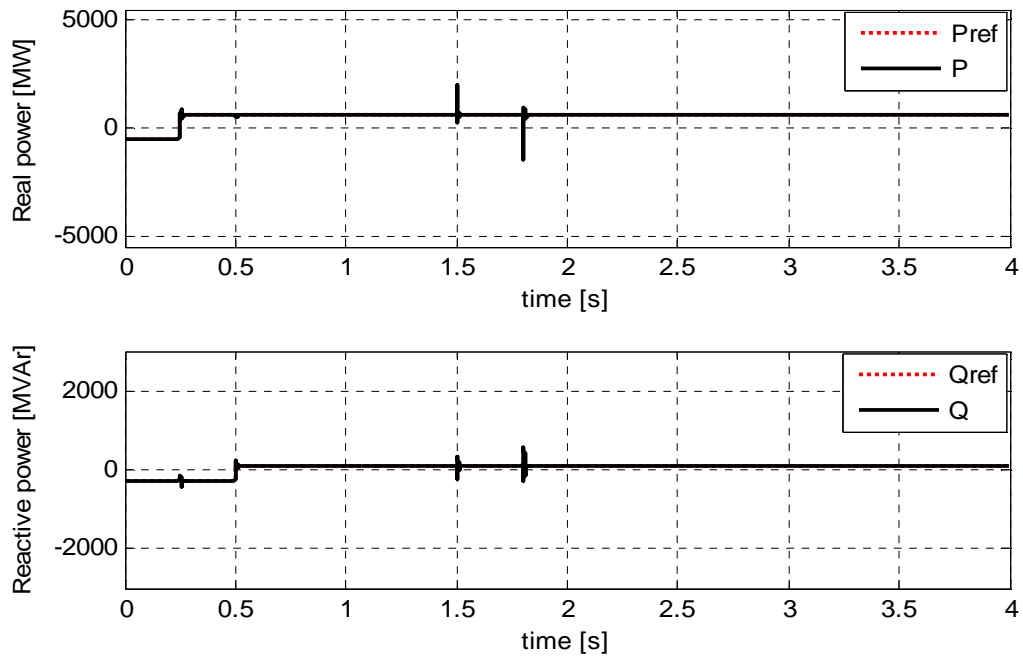


Fig. III.18 : Puissances active et réactive.

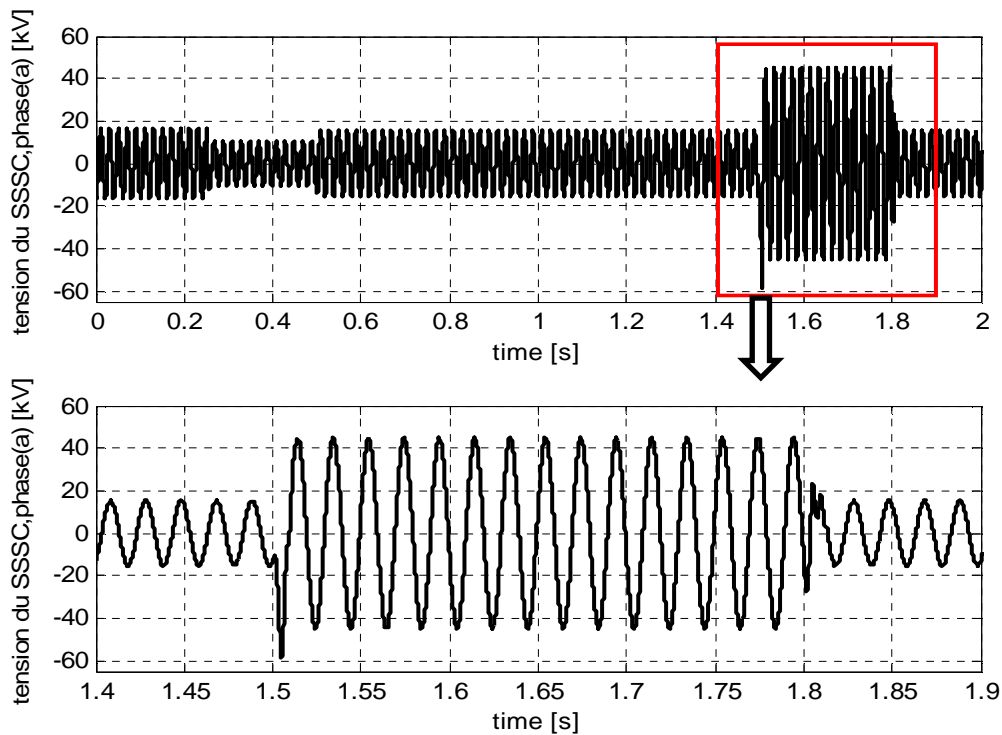


Fig. III.19 : Tension injectée par le SSSC.

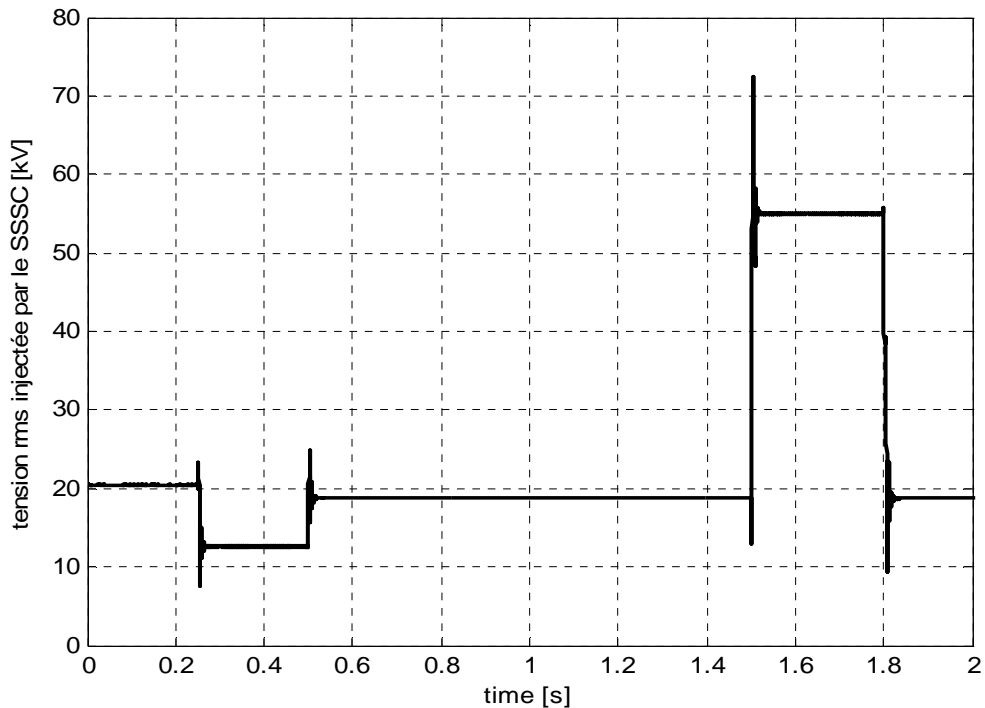


Fig. III.20 : Tension efficace injectée par le SSSC.

III.4.2. Interprétation des résultats de simulation

Les résultats de simulation montrent qu'en terme de précision, la commande FTC est plus performante que la commande par retour d'état avec intégrateur comme le montre la figure (III.12). Le système a tendance à revenir au régime permanent sans pour autant enregistrer des dépassements élevés lors de l'apparition de la perturbation, de plus elle s'avère répondre aux insuffisances de la commande précédente en termes de robustesse face aux perturbations internes du système comme le montre la figure (III.15). En effet, le système de commande reste fiable en termes de régulation des grandeurs à leurs références en présence d'incertitudes de modélisation.

Il est à noter aussi que la réponse du système aux deux lois de commande présente certains dépassements aux instants qui correspondent aux changements de consignes dus au fait que les sorties régulées (puissances active et réactive) sont naturellement fortement liées. Le système à l'instant de changement de consigne de l'une des deux puissances n'arrive pas à

Chapitre III : Commande du SSSC

commander de manière découplée ces deux puissances, cependant, le système parvient à le réduire sans perdre le contrôle. C'est le phénomène d'interaction dynamique.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de synthèse de deux lois de commande du dispositif SSSC. Celles-ci ont été implémentées et testées par simulation dans trois situations différentes.

Les résultats de simulation ont montré que les deux lois de commande sont robustes face aux perturbations externes, et que la commande à temps fini se révèle plus précise et plus fiable que la commande par retour d'état avec intégrateur dont les performances se dégradent face aux perturbations internes du système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'accroissement constant de la demande en énergie électrique pousse les compagnies concernées à améliorer et renforcer continuellement leurs réseaux. Ces réseaux atteignent une complexité qui rend leurs gestions très difficiles sans la présence de dispositifs de commande adéquats. Etant donné que la majorité de ces systèmes, classiques, sont devenus insuffisants et souffrent de la lenteur de réponse. Comme solutions modernes, d'autres dispositifs de commande des réseaux ont vu le jour. Ceux-ci, rassemblés sous le vocable FACTS, sont très sophistiqués et très performants.

Les FACTS sont issue du grand développement des équipements d'électronique de puissance à la fin du dernier siècle, ces dispositifs évolués ouvrent de nouvelles initiatives pour la commande du flux de puissance dans le réseau électrique tout en améliorant la capacité du transit de puissance dans les lignes jusqu'à atteindre leurs limites thermiques.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'un de ces dispositifs FACTS appelé SSSC. Pour illustrer son apport dans la commande du flux de puissance dans le réseau, nous avons commencé par donner quelques généralités sur les réseaux électriques suivies d'une liste de dispositifs de commande conventionnels utilisés par la plus part des compagnies d'électricité pour gérer leurs réseaux. Nous avons parlé d'une part, du fonctionnement global de ces dispositifs et d'autre part, de leurs insuffisances. Ensuite, nous avons présenté les solutions modernes appelées FACTS ainsi que leurs avantages par rapport aux dispositifs conventionnels.

Par la suite, un modèle d'état du SSSC a été établi dans la référence triphasée, puis projeté dans le plan de Park afin d'obtenir un modèle plus simple et continu.

Dans le but de réguler les puissances active et réactive dans la ligne électrique, le modèle du SSSC a servi à la synthèse de lois de commande du SSSC. Deux régulateurs ont été conçus : une commande par retour d'état avec intégrateur et une autre à temps fini (FTC : Finite Time Control). Trois tests ont été réalisés par simulation pour chaque loi de commande à savoir: la situation normale, la situation de perturbations internes et enfin celle des perturbations externes.

Les résultats de simulation du système piloté par les deux lois de commandes, en situation normale, montrent des réponses satisfaisantes en termes de vitesse, précision et robustesse, cependant dans le cas des perturbations, la commande (FTC) est meilleure et plus

Conclusion générale

robuste. La comparaison des résultats de simulation montre que la commande FTC est moins sensible aux perturbations externes, aux incertitudes paramétriques et aux changements de consigne.

Comme perspectives à ce travail, il serait intéressant d'appliquer d'autres techniques de commande intelligentes comme la commande neuronale ou la commande floue pour voir s'il est possible d'améliorer les performances du système.

Annexe

Expressions des puissances dans le repère synchrone

Etant donné que les axes du repère fixe sont tout le temps orthogonaux, on peut considérer l'axe α comme étant un axe des réels et l'axe β comme axe des imaginaires, figure(A.1).

L'expression de la tension et celle du courant sont données par :

$$\begin{cases} V = V_\alpha + jV_\beta \\ I = I_\alpha + jI_\beta \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

L'expression de la puissance apparente est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} S = V \cdot I^* &= (V_\alpha + jV_\beta) \cdot (I_\alpha - jI_\beta) \\ &= (V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta) + j(V_\beta I_\alpha - V_\alpha I_\beta) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Les expressions des puissances active et réactive sont donc données par :

$$\begin{cases} P = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ Q = V_\beta I_\alpha - V_\alpha I_\beta \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

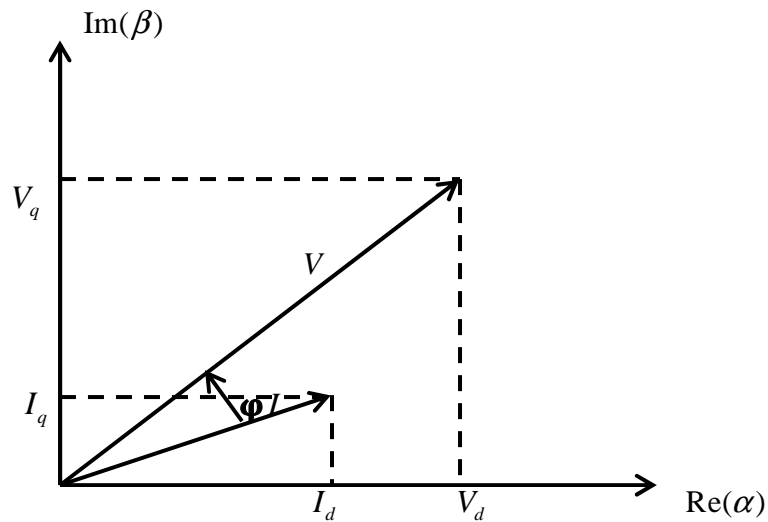


Fig.A.1 : Représentation vectorielle de la tension et du courant dans le repère d-q.

Annexes

Pour exprimer les puissances active et réactive dans le repère synchrone, on utilise la matrice de transformation inverse T_{dq}^{-1} et on exploite les expressions (A.2) et (A.3).

La matrice T_{dq}^{-1} est donnée par :

$$\mathbf{T}_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} P &= V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} = V_{\alpha\beta}^T I_{\alpha\beta} \\ &= (\mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{V}_{dq})^T \mathbf{T}_{dq}^{-1} I_{dq} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Sachant que la matrice \mathbf{T}_{dq}^{-1} est unitaire donc égale à sa transposée, (A.4) peut s'écrire :

$$P = V_{dq}^T \mathbf{T}_{dq} \mathbf{T}_{dq}^{-1} I_{dq} = V_{dq}^T I_{dq} \quad (\text{A.6})$$

La puissance active est donnée donc par l'expression suivante :

$$P = V_d I_d + V_q I_q \quad (\text{A.7})$$

De même :

$$\begin{aligned} Q &= V_{\beta} I_{\alpha} - V_{\alpha} I_{\beta} = V_{\alpha\beta}^T \mathbf{D} I_{\alpha\beta} \\ &= (\mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{V}_{dq})^T \mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{D} I_{dq} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

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

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

Le développement de la relation (A.8) nous donnera :

$$Q = V_{dq}^T \mathbf{T}_{dq} \mathbf{T}_{dq}^{-1} \mathbf{D} I_{dq} = V_{dq}^T \mathbf{D} I_{dq} \quad (\text{A.9})$$

La puissance active est donnée donc par l'expression suivante :

$$Q = V_q I_d - V_d I_q \quad (\text{A.10})$$

Algorithme de Butcher Boole pour la résolution des équations différentielles ordinaires

La méthode de Butcher Boole appelée aussi Runge-Kutta d'ordre 6 est une méthode d'analyse numérique d'approximation de solutions d'équations différentielles ordinaires. Elle repose sur le principe de l'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation, plus précise, et ainsi de suite. Son algorithme est donné comme suit :

Soit $\dot{x} = f(x, u)$

Les équations de Runge-Kutta sont données par :

$$K1 = f(x, u)$$

$$K2 = f\left(x + \frac{K1}{4}h, u\right)$$

$$K3 = f\left(x + \frac{K1 + K2}{8}h, u\right)$$

$$K4 = f\left(x + \frac{K3 - K2}{2}h, u\right)$$

$$K5 = f\left(x + \left(\frac{3}{16}K1 + \frac{9}{16}K4\right)h, u\right)$$

$$K6 = f\left(x + \left(\frac{-3}{7}K1 + \frac{2}{7}K2 + \frac{12}{7}K3 - \frac{12}{7}K4 + \frac{8}{7}K5\right)h, u\right)$$

$$x_{i+1} = x_i + \frac{h}{90} (7K1 + 32K3 + 2K4 + 35K5 + 7K6)$$

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Electrotechnique, Luc Lasne, DUNOD, 2008.
- [2] Narain G.Hingorani,Laszlo Gyugyi, «understanding FACTS,concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems»,New York,IEEE Press,2000.
- [3] T. WILDI and G. SYBILLE, Electrotechnique, 4th ed. 2005.
- [4] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, « Flexible AC Transmission systems: Modeling and Control », Springer 2005.
- [5] Gabriela, Glanzmann, « Flexible Alternating Current Transmission Systems », EEH – Power Systems Laboratory, 14. January 2005.
- [6] J.M. Escane, «Réseaux d'énergie électrique – Modélisation : Lignes, Câbles, Eyrolles», Paris 1997.
- [7] Gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE, « mémento de la sureté du système électrique », 2004, EDF France.
- [8] Xia Jiang, «Operating Modes and Their Regulations of Voltage-sourced Converters Based FACTS Controllers», thèse de Doctorat de L'institut Polytechnique Troy New York, mars 2007.
- [9] Pierre Bornard, Michel Pavard, «Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement", Technique de l'ingénieur traité génie électrique D 4090.
- [10] Kalyan K. Sen, «SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Application», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.
- [11] L. Gyugyi, C.D. Schauder, and K.K. Sen, «Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines», *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.12, no.1, pp.406- 417, Jan 1997.
- [12] M.A.E Alali, «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat de l'université de LOUIS PASTEUR (STRASBOURG), 12 Septembre 2002.
- [13] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho, «FACTS Modelling and Simulation in Power Networks», John Wiley & Sons Ltd, 2004.

[14] Narain G.Hingorani,Laszlo Gyugyi, «understanding FACTS, concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems»,New York,IEEE Press,2000.