

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Badji Mokhtar-
Annaba

Badji Mokhtar- Annaba
University



جامعة باجي مختار

عنابة

Faculté des Sciences

Année : 2016/2017

Département d'électronique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Contribution à la modélisation et à la commande d'un
UPFC dans le cadre de développement des réseaux
intelligent (SMART GRID)

Filière :

Automatique

Spécialité:

Instrumentation et Control Industriel

Par

Sota Mohamed Lamine

DIRECTEUR DE MÉMOIRE : Kherfane Hamid

U.B.M. ANNABA

Devant le jury

PRÉSIDENT :

Saadi Med Nacer

U.B.M. ANNABA

EXAMINATEUR :

Guersi Noureddine

U.B.M. ANNABA

Benoureth Mohamed

U.B.M. ANNABA

REMERCIEMENT

Je dois remercier tous d'abord en premier mon dieu puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée dans ma vie

Je tiens à remercier très particulièrement mon encadreur Pr. KHARFEN HAMIDE pour son aide continue, sa patience ses orientations ponctuelles et ainsi ces encouragements illimités pendant la réalisation de ce travail.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner cette thèse en lui apportant de l'intérêt. Monsieur GERSI.N chef de spécialité, Monsieur SAADI.M. N, Monsieur BENWARETE, Monsieur BENSAKER.B

Je remercie également tous les enseignants de département d'Electronique de l'Université de BADJI MOKHTAR de ANNABA qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

Mes remerciements vont vivement à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOTA M^{ED} LAMINE

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mes frères et mes sœurs

MON encadreur PR.KHARFEN HAMIDE

Tous mes amis.

TITRE :

Contribution à la modélisation et à la commande d'un UPFC dans le cadre du développement des réseaux Intelligents (Smartgrids)

RESUME :

Ce mémoire traite de la modélisation et de la commande d'un appareil d'électronique de puissance qui est composé de deux convertisseurs statiques connectés en topologie universelle : l'UPFC. Dans ce travail, le contrôle du flux de puissance dans les réseaux de distribution électrique est traité comme sa fonction principale. A cet effet, les aspects théoriques et les techniques sont décrits et discutés. Les différentes formes de représentation des modèles mathématiques du système sont exposées et justifiées. Les boucles de contrôle sont expliquées et discutées. La synthèse des correcteurs est abordée et le choix justifié. Enfin, des conclusions sont tirées.

TITLE:

On the modeling and control of a UPFC in the frame of Smart Grids development

ABSTRACT:

This memory deals with modeling and control of a power-electronics-based apparatus composed of two static converters connected in a universal topology: the UPFC. In this work, power flow control in distribution grids is regarded as its main function. Theoretical and technical aspects related to modeling and power flow control are therefore described and discussed. Different ways of representing the mathematical models are exposed and validated. The control loops are addressed and further explained. The synthesis of the controllers is tackled and a choice is justified. Finally, conclusions drawn.

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Introduction Général

Les Smartgrids :

Définition et caractéristiques

Problématique. Objectifs

Objectifs

Chapitre I :

LA COMPENSATION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

I-Introduction.....	P_13
I-1- Généralité sur la compensation	P_13
I-2- Structure topologique des réseaux	P_13
I-2- A-Réseaux radiaux	P_13
I-2- B-Réseaux boucles	P_13
I-2- C-Réseaux maillés	P_14
I-3- Les différentes fonctions du réseau	P_14
I-3- A- Réseau d'utilisation	P_14
I-3- B- Réseaux de distribution	P_14
I-3- C- Réseaux de répartition	P_15
I-3- D- Réseaux de transport et d'interconnexions	P_15
I-4- L'importance de la puissance réactive	P_15
I-5- Principe général de la compensation	P_16
I-6- Moyens de compensation réactive	P_17
I-6- A- Compensation shunt	P_17
I-6- B- Principe de la compensation série	P_19
I-6- C- Compensateurs synchrones	P_19

I-6-D- Bancs de condensateurs	P_19
I-6-E- Compensateurs statiques de puissance réactive	P_19
I-6-F- Compensation réactive dans une ligne électrique	P_20
I-6-G- Compensateur shunt au point milieu	P_20
Conclusion	

Chapitre II :

LES SYSTEME FACTS

II- Introduction.....	P_23
II-1- Réglage de transfert des puissances	P_24
II-2- Contrôle de la tension en régime stationnaire	P_24
II-3- Stabilité dynamique des réseaux électriques	P_25
II-4- Qualité de l'électricité	P_25
II-5- Historique sur les différentes type FACTS	P_25
II-6- Types de FACTS	P_25
II-6-A- Les compensateurs parallèles	P_26
➤ Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	P_26
➤ Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors.....	P_28
II-6-B- Les compensateurs séries	P_30
➤ Compensateurs séries à base de thyristors.....	P_30
➤ Compensateurs séries à base de GTO thyristors.....	P_30
II-6-C- Compensateurs Hybrides (série - parallèle)	P_31
II-7- Les transformateurs utilisables avec les FACTS	P_34
II-8- Systèmes de stockage d'énergie	P_36
II-9- Les Filtres	P_36
II-10- Equations de la puissance avec FACTS	P_37
Conclusion	

Chapitre III :

Modélisation & contrôle-commande d'un UPFC

III-introduction.....	P_40
III-1- Fonctionnement de l'U.P.F.C.....	P_40
III-2- Principe de contrôle de base des puissances active et réactive.....	P_41
III-3- Modélisation de L'UPFC.....	P_43

III-4- Modélisation de la partie série(SSSC).....	P_43
III-5- Modélisation de la partie shunt (STATCOM).....	P_45
III-6-- Modélisation de (DC-LINK).....	P_46
III-6-A- pour le convertisseur shunt.....	P_47
III-6-B- pour le convertisseur série.....	P_47
III-7- synthèse des correcteurs.....	P_48
III-8- la commande.....	P_53
III-9- commande du convertisseur série.....	P_53
III-9-A- Calcul des Référentiels.....	P_53
III-10-- commande du convertisseur shunt.....	P_54
III-10-A- Calcul des courants de Référence $I_{sh_d_réf}$ et $I_{sh_q_réf}$	P_54
III-10-B- Calcul de la puissance active de référence P_{1B_ref}	P_55
III-10-C- Calcul de la puissance réactive Q_{1B}	P_55
III-11- Calcul des Régulateurs PI	P_56
III-11-A-Pour le convertisseur shunt.....	P_56
III-11-B-Pour le convertisseur série	P_57
III-11-C-Pour la tension continue.....	P_57
Conclusion	

Conclusion générale

Liste des symboles et abréviations

Abréviations

- ◆ **FACTS** Flexible Alternatif Current Transmission Systems.
- ◆ **TCR** Thyristor Controlled Reactor
- ◆ **TSR** Thyristor Switched Reactor
- ◆ **TSC** Thyristor Switched Capacitor.
- ◆ **SVC** Static Var Compensator.
- ◆ **STATCOM** Static Compensator.
- ◆ **TCSC** Thyristor Controlled Series Capacitor.
- ◆ **TSSC** Thyristor Switched Serie Capacitor.
- ◆ **TCSR** Thyristor Controlled Series Reactor.
- ◆ **TSSR** Thyristor Controlled Series Reactor.
- ◆ **SSSC** Static Synchronous Series Compensator.

- ◆ **IPFC** Interline Power Flow controller.
- ◆ **UPFC** Unified Power Flow controller.
- ◆ **IGBT** Insulated Gate Bipolar Transistor.
- ◆ **GTO** Gate Turn Off thyristor
- ◆ **TCCR** Thyristor Control Breaking Resistor
- ◆ **PI** Proportionnel Intégral (régulateur).
- ◆ **TCVR** Thyristor Controlled Voltage Regulators.
- ◆ **TCPST** Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer.
- ◆ **MLI** Modulation de Largeur d'Impulsion

Variables

- ◆ **V_s** Tension au point de départ (génération).
- ◆ **V_R** Tension au point d'arrivée (le récepteur).
- ◆ **V_{abc_Ch}** Tension composé de la charge.
- ◆ **I_{abc_Ch}** Courant de la charge.
- ◆ **I_{abc_f}** Courant du filtre.
- ◆ **V_{abc_S}** Tension de la source.
- ◆ **V_{se}** Tension générée par le compensateur série (SSSC).
- ◆ **V_{sed}** La composante directe de la tension générée par le compensateur série.
- ◆ **V_{pq}** La tension à la sortie du transformateur série.
- ◆ **V_{sh}** La tension générée par le compensateur shunt (STATCOM).
- ◆ **V_{shd}** La composante directe de la tension générée par le compensateur shunt.
- ◆ **V_{shq}** La composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt.
- ◆ **I_s** Courant de la ligne.
- ◆ **I_{sd}** Composante du courant de la ligne selon l'axe d.
- ◆ **I_{sq}** Composante du courant de la ligne selon l'axe q.

- ◆ I_{sh} Courant fournit par le compensateur shunt.
- ◆ I_{shd} Composante directe du courant fournit par le STATCOM.
- ◆ I_{shq} Composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.
- ◆ P_s Puissance active fournit par la source.
- ◆ Q_s Puissance réactive fournit par la source.
- ◆ P_R Puissance active au point d'arrivée (le récepteur).
- ◆ Q_R Puissance réactive au point d'arrivée (le récepteur).
- ◆ P_0 Puissance active sans compensation.
- ◆ Q_0 Puissance réactive sans compensation.
- ◆ P_{se} Puissance active fournit par le compensateur série (SSSC).
- ◆ P_{sh} Puissance active fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
- ◆ Q_{se} Puissance réactive fournit par le compensateur série (SSSC).
- ◆ Q_{sh} Puissance réactive fournit par le compensateur shunt (STATCOM).
- ◆ δ L'angle de charge (l'angle entre la tension de départ et la tension d'arrivée).
- ◆ δ_{se} Le déphasage de la tension fournit par le compensateur série (SSSC).
- ◆ δ_{sh} Le déphasage de la tension fournit par le compensateur shunt (STATCOM).

Paramétrés

- ◆ R_1 Résistance au début de la ligne.
- ◆ L Inductance de la ligne.
- ◆ R_{se} La résistance du compensateur série.
- ◆ L L'inductance du compensateur série.
- ◆ R_{sh} La résistance du compensateur shunte.
- ◆ L_{sh} L'inductance de fuit du compensateur shunt.

Liste des figures

Figure 1	Schéma de fonctionnement d'une smartgrid.....	(10)
Figure 1.1.	Schéma simplifié d'un réseau radial	(13)
Figure 1.2.	Schéma simplifié d'un réseau bouclé.....	(13)
Figure 1.3.	Schéma simplifié d'un réseau maillé.....	(14)
Figure 1.4.	Réseau d'utilisation	(14)
Figure 1.5.	Réseau de distribution.....	(15)
Figure 1.6.	Réseau de répartition.....	(15)
Figure 1.7.	Réseau d'interconnexions	(15)
Figure 1.8.	L'intérêt de la compensation.....	(16)
Figure 1.9.	Diagramme vectorielle montre le principe de la compensation.....	(17)
Figure 1.10.	Le changement de la puissance dans une ligne électrique	(17)
Figure 1.11.	Représentation d'un système électrique en π	(18)
Figure 1.12.	Principe de la compensation shunt.....	(18)
Figure 1.13.	Principe de la compensation série.....	(19)
Figure 1.14.	Compensation shunt au point milieu	(20)
Figure 1.15.	Les différentes valeurs de puissances par le changement de k	(20)
Figure 2.1.	Contrôle du transit de puissance.....	(23)
Figure 2.2.	Classification des FACTS.....	(26)
Figure 2.3.	FACTS shunt. Parallèles.....	(26)
Figure 2.4.	Schéma équivalent d'un SVC.....	(27)
Figure 2.5.	Courbe d'un SVC.....	(27)
Figure 2.6.	Schéma du SVC et TCBR.....	(28)
Figure 2.7.	STATCOM en détail	(28)
Figure 2.8.	Schéma équivalent d'un STATCOM.....	(28)
Figure 2.9.	Courbe d'un STATCOM.....	(29)
Figure 2.10.	Schéma de base du STATCOM.....	(29)
Figure 2.11.	FACTS pour compensation série	(30)

Figure 2.12. Schéma équivalent d'un TCSC.....	(30)
Figure 2.13. SSSC en détail.....	(31)
Figure 2.14. Schéma de base du SSSC.....	(31)
Figure 2.15. Schéma équivalent d'une compensation SSSC.....	(31)
Figure 2.16. Schéma équivalent d'une compensation SSSC	(31)
Figure 2.17. Schéma d'un UPFC.....	(32)
Figure 2.18. Schéma équivalent d'un UPFC	(32)
Figure 2.19. Schéma d'un IPC.....	(33)
Figure 2.20. Schéma équivalent d'un IPC.....	(33)
Figure 2.21. L'influence de différents systèmes FACTS sur la puissance active.....	(34)
Figure 2.22. Schéma équivalent d'un transformateur déphaseur	(34)
Figure 2.23. Représentation vectorielle des tensions dans un transformateur déphaseur.....	(35)
Figure 2.24. Représentation vectorielle des tensions dans un QBT	(35)
Figure 2.25. Equivalent d'un TCPST.....	(35)
Figure 2.26. Schéma d'un VTF.....	(36)
Figure 2.27. Schéma d'une station HVDC bipolaire.....	(36)
Figure 2.28. Schéma équivalent d'un SVC après transformation de Kennelly.....	(37)
Figure 3.1 Variateur de Charge Universel.....	(40)
Figure 3.2. Contrôle de base de fonctionnement de l'UPFC.....	(41)
Figure 3.3.A. système à deux machines.....	(41)
Figure 3.3.B. puissances active et réactive en fonction de l'angle de transmission.....	(42)
Figure 3.3.C. diagramme de phase des tensions.....	(42)
Figure 3.3.D. la puissance réactive de source et du récepteur en fonction de la Puissance active transmise.....	(42)
Figure 3.4. Représentation d'un UPFC branché au réseau en vue de sa modélisation.....	(43)
Figure 3.5. Schéma bloc du convertisseur série	(45)
Figure 3.6. Schéma bloc convertisseur shunt	(46)
Figure 3.7. Schéma du DC-Link de l'UPFC	(47)
Figure 3.8. Schéma bloc du DC-Link	(48)
Figure 3.9. Correcteur Proportionnel Intégrateur (PI)	(49)
Figure 3.10 Contrôle du courant avec un correcteur PI en repère tournant.....	(49)
Figure 3.11. Schéma d'ensemble : blocs du correcteur PI, de découplage et du système série.....	(50)

Figure 3.12. Schéma bloc du circuit série	(50)
Figure 3.13. Schéma du bloc de découplage	(51)
Figure 3.14. Schéma de régulation du SSSC (watt-var découplée)	(51)
Figure 3.15. Schéma du correcteur PI associé au modèle du système série simplifié sur l'axe-d (les termes de couplage sont supprimés)	(52)
Figure 3.16. Schéma du correcteur PI et du modèle du système série simplifié sur l'axe-q (les termes de couplage sont supprimés)	(52)
Figure 3.17. Schéma du modèle du système.....	(52)
Figure 3.18. Contrôle de courant par MLI	(53)
Figure 3.19. Schéma global du contrôle par la méthode watt-var découplé du STATCOM.....	(57)
Figure 3.20 : Schéma bloc de régulation des courants.....	(57)
Figure 3.21 : Schéma bloc de régulation de la tension continue.....	(58)
Figure 3.22 : Génération du courant référence actif i_{fd}^*	(58)

Liste des tableaux

Tableau 1 : Sens des échanges entre Source de tension et ligne.....	(29)
Tableau 2 : récapitulatif des différences entre FACTS.....	(33)

P réambule

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre des études d'une master en instrumentation et le contrôle industriel du département d'électronique d'université Badji Mokhtar à SIDI-AMAAR. "ANNABA". Il constitue la phase finale des études pour l'obtention du diplôme en électronique.

Le sujet est : « Contribution à la modélisation et à la commande d'un UPFC dans le cadre du développement des SMARTGRIDS ».

Le travail développé dans ce mémoire s'inscrit dans le travail de mémoire que le candidat SOTA MOHAMED LAMINE effectue à Sélecte, sous la direction du professeur KHERFANE HAMIDE. La mémoire est consacré à le contrôle du flux de puissance, plus spécifiquement à la modélisation et à la commande d'un UPFC.

Mots clés : contrôle de flux de puissance, FACTS, UPFC, contrôle PI

INTRODUCTION GENERAL

Les Smartgrids :

À l'heure où la gestion centralisée et unidirectionnelle des réseaux de distribution d'électricité montre ses limites et où les nouveaux projets prennent en compte la dimension quartier, nous voyons fleurir une multitude de projets se revendiquant smartgrids.

Définition et caractéristiques

Le terme *smartgrids*, littéralement « réseaux intelligents », se définit dans ce contexte comme des « réseaux de distribution et de gestion d'énergie intelligents ».

Concrètement, une smartgrid est un réseau électrique communicant qui intègre les NTIC (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication) dans son fonctionnement. Cela permet d'établir des interactions entre les réseaux d'électricité et les bâtiments auxquels ils sont raccordés. Leur taille est souvent assez vaste pour permettre une mixité d'usage.

L'intérêt d'un tel réseau est que sa gestion devient répartie et bidirectionnelle, les possibilités d'optimisation offertes étant multiples : lissage des pointes et creux journaliers, gestion de l'intermittence des énergies renouvelables (produites sur place), mutualisation... L'objectif principal est une livraison d'électricité plus efficace, économiquement viable et dé carbonée.

Cette notion de smartgrids basés sur l'électricité peut être étendue aux réseaux intelligents de chaleur, de froid et de gaz.

Les smartgrids se basent sur une utilisation de nouvelles technologies au service d'objectifs en partie environnementaux, ce qui s'inscrit dans les théories de la Troisième Révolution Industrielle développées par Jeremy Rifkin.

Les réseaux intelligents peuvent être définis selon quatre caractéristiques en matière de :

- **flexibilité** : ils permettent de gérer plus finement l'équilibre entre production et consommation ;
- **fiabilité** : ils améliorent l'efficacité et la sécurité des réseaux
- **accessibilité** : ils favorisent l'intégration des sources d'énergies renouvelables sur l'ensemble du réseau
- **économie** : ils apportent, grâce à une meilleure gestion du système, des économies d'énergie et une diminution des coûts (à la production comme à la consommation).

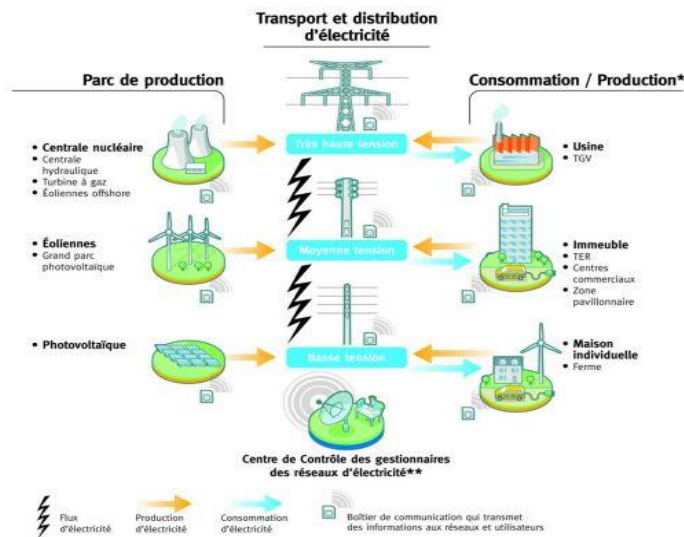


Figure 1 :

Schéma de fonctionnement d'une smartgrid

Problématique. Objectifs

La qualité d'énergie électrique constitue un grand intérêt ces dernières années pour tous les acteurs du système électrique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs ou consommateurs d'électricité. Parmi tous ces acteurs, le gestionnaire de réseau occupe une position centrale. Sa responsabilité est de mettre en œuvre les moyens permettant de veiller sur la qualité de l'énergie électrique au sein de réseaux.

Le besoin de répondre à un ensemble de critères et indices de qualité est devenu primordial, notamment avec les perturbations inévitables qu'a connu tous le système électrique ces derniers temps, telles que les court-circuit, les indisponibilités momentanées de lignes, de générateurs ou de transformateur ainsi que les pertes dans les lignes et les aléas de consommation peuvent affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa stabilité.

Les moyens classiques de contrôle de la qualité s'avèrent trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations qui affectent les réseaux. Les nouveaux contrôleurs à base d'électronique de puissance permettent de résoudre des problèmes de contrôles : de la qualité de la tension, d'amortissement des oscillations, d'amélioration de la répartition des transits de puissance et de stabilité. La maîtrise de la qualité de la tension est sans doute l'application la plus probable, notamment en présence de fortes charges perturbatrices.

Dans notre travail nous avons développé un modèle qui permet d'utiliser ces nouveaux systèmes pour contrôler et corriger en temps réel n'importe quel type de perturbations causant le dysfonctionnement des réseaux électriques.

Cette étude fait partie du cadre des « réseaux intelligents » ou « Smartgrids ». Les réseaux électriques doivent garantir une fourniture électrique de qualité, efficace et fiable, ainsi que faciliter l'intégration des sources d'énergie renouvelable qui sont généralement dispersées sur le territoire. L'évolution progressive vers un réseau électrique plus intelligent demande de nombreuses avancées technologiques. L'objectif final de ce mémoire est de représenter est d'analyser et de développer un appareil qui sert à connecter deux réseaux de distribution.

Jusqu'à présent la connexion des réseaux de distribution n'est pas une pratique courante. Les réseaux de distribution ont une structure radiale et il n'est pas considéré opportun de les mailler (ce qui est par contre le cas des réseaux de transport). Dans le futur, il pourrait être nécessaire de connecter les réseaux de distribution pour acheminer la puissance générée par les sources d'énergie dispersées vers des réseaux de distribution voisins. L'objectif principal de ce dispositif est le contrôle du flux de puissance, et c'est précisément sur cet aspect que ce mémoire a été développé. Néanmoins, les réseaux de distribution souffrent plus de problèmes de qualité d'ondes que les réseaux de transport. Pour cette raison, le fait de pouvoir compenser les perturbations de différentes origines, donnerait une valeur ajoutée à cet appareil.

Les caractéristiques de l'appareil choisi sont les suivantes :

- C'est un appareil de puissance électronique basé sur des sources de tension. Il utilise des interrupteurs statiques.
- Il a une topologie universelle : un compensateur en série et un autre en parallèle reliés grâce à un bus en courant direct (DC).
- Cet appareil est installé dans un réseau de distribution avec les caractéristiques propres d'un réseau de distribution : niveaux de tension particuliers, courants de court-circuit élevés, résistivité plus élevée sur les lignes, augmentation du nombre de câbles, environnement plus perturbé, ...etc.
- La fonction principale de l'appareil en régime permanent est de contrôler le flux de puissance. Les fonctions supplémentaires peuvent inclure la compensation de déséquilibres, papillonnements, harmoniques, creux de tension, ...etc.

Le contrôle de flux de puissance est un problème qui provient typiquement des réseaux de transport. Il existe un Flexible AC Transmission System (FACTS) avec topologie universelle appelé Uniflex Power Flow Controller (UPFC) qui sert surtout à contrôler le flux de puissance en régime permanent mais il présente aussi d'autres fonctionnalités telles que l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau face aux événements, l'amortissement des oscillations dynamiques (habituellement de basse fréquence) et l'augmentation de la capacité de transport. L'UPFC est un FACTS qui offre beaucoup de flexibilité, mais à ce jour, seuls deux cas au niveau mondial sont connus : un en Kentucky, USA, et l'autre en Corée. Son prix élevé pourrait être une cause de freinage de son développement.

Les FACTS peuvent travailler comme sources de courant (CSC : Current Source Converter) ou comme sources de tension (VSC : Voltage Source Converter).

Les convertisseurs qui travaillent en tant que sources de tension ont un côté en tension continue (soutenue par un condensateur) et un côté en tension alternative. Ils travaillent en commutation forcée et sont composés par des interrupteurs de type IGBT, par exemple. Par rapport aux thyristors (utilisés dans les sources de courant) qui sont en commutation naturelle, on va réduire de façon importante le problème du filtrage. Très peu des filtres devront être employés et la superficie de filtrage de chaque côté des convertisseurs pourra être réduite.

Ils existent plusieurs types de FACTS désignés par des acronymes différents. Les piliers basiques des FACTS sont le STATCOM et le SSSC :

- le STATCOM (statique Synchronisme Séries Compensatoire) est un compensateur statique connecté en parallèle.
- le SSSC (statique Synchronisme Séries Compensatoire) est un compensateur connecté en série avec la ligne.

Ce travail contient trois chapitres :

- chap. 1 : LA COMPENSATION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE**
- chap. 2 : LES SYSTEMES FACTS**
- chap. 3 : MODELISATION & CONTRÔLE-COMMANDE D'UN UPFC**

Objectifs :

L'objectif du présent mémoire consiste à :

- comprendre le fonctionnement de l'UPFC et de ses composants.
- décrire mathématiquement l'UPFC : construire un modèle.
 - choisir la forme la plus appropriée pour représenter le modèle mathématique afin de mettre en application plus tard.
 - étudier comment contrôler l'UPFC ; choisir une structure de contrôle ; développer la synthèse de la structure de contrôle (choisir les paramètres de contrôle...etc.) ; mettre en application la structure de contrôle en Matlab/Simulink.
 - tirer des conclusions. Parmi les différentes fonctions que l'UPFC peut effectuer, ce mémoire se concentre sur la fonction de base, c'est-à-dire sur le contrôle de flux de puissance du réseau.

CHAP : (I)

LA COMPENSATION DE

L'ENERGIE

ELECTRIQUE

« Je peux accepter l'échec, tout le monde peut échouer, mais je n'accepterai jamais de ne pas avoir essayé »

Michael Jordan

I. INTRODUCTION :

1) Généralité sur la compensation :

L'électricité est la forme d'énergie la plus facile à utiliser, mais exige des techniques et des investissements très importants pour la faire aboutir jusqu'à l'utilisateur. Cela exige l'installation de divers réseaux qui doivent assurer la canalisation de cette énergie depuis la centrale jusqu'au plus simple utilisateur.

Les postes constituent les nœuds du réseau ; les lignes en forment les branches ; ces branches constituent soit des artères est des antennes (ou dérivation) ; soit des mailles (ou boucles).

2) Structure topologique des réseaux :

Les réseaux doivent assurer le transit de l'énergie électrique avec une sécurité suffisante, cette sécurité d'alimentation est augmentée soit :

- Par les lignes aux appareillages plus solides.
- Par des circuits plus nombreux.

Alors il y'a donc un compromis à réaliser entre le coût des investissements supplémentaires et la valeur de ce qu'ils permettent de sauver ce qui conduit à des topologies de réseaux différents. Radial bouclé et maillé [1]

A. Réseaux radiaux :

Un réseau radial issu d'un poste d'alimentation est constitué de plusieurs artères dont chacune va en se ramifiant, cette structure nous permet d'avoir des points communs, de sorte que le réseau soit bouclable mais non bouclé. Car en un point est placé toujours un appareil de coupure, ouvert en régime normal. Cette disposition permet en cas d'incidents sur une artère de reprendre l'alimentation.

Les réseaux radiaux sont des structures simples et peuvent être contrôlés et protégés par un appareillage simple. Ce sont les réseaux les moins onéreux.

1 : source

2 : poste MT/HT

3 : poste MT/BT

4 : consommateurs

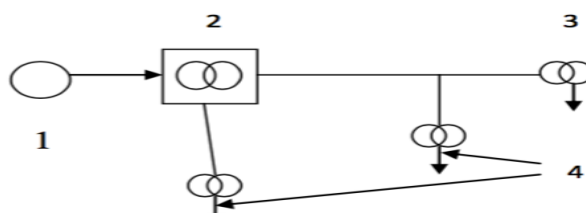


Figure (1.1)

Schéma simplifié d'un réseau radial

B. Réseaux bouclés :

Les réseaux bouclés sont alimentés à la fois par plusieurs sources ; les postes sont raccordés en coupure d'artère cette disposition permet lors d'une coupure, une continuité de service.

L'existence de plusieurs sources en parallèle augmente la sécurité d'alimentation en cas d'avarie de l'une d'elles (transformateurs) ou en cas d'avarie sur une boucle.

Dans ce dernier cas, le tronçon avarié est isolé en deux fractions du réseau. On voit que ce réseau est un peu plus compliqué que le précédent, de plus le contrôle et la protection du réseau nécessitent des dispositifs plus complexes. Cette structure coûte chère car elle nécessite au moins deux cellules de départ en plus.

1 : source

2 : poste MT/HT

3 : poste MT/BT

4 : consommateurs

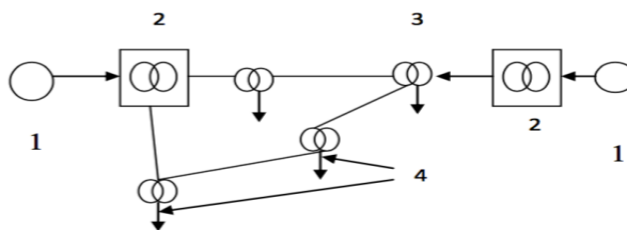


Figure (1.2) : Schéma simplifié d'un réseau bouclé

C. Réseaux maillés :

Ce sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant ainsi une structure analogue aux mailles d'un filet, de plus, le nombre de sources débitant en parallèle peut atteindre plusieurs dizaines.

Cette structure nécessite que tous les tronc de ligne soient capables de supporter des surcharges permanentes et qu'il soit muni à leurs deux extrémités d'appareils de coupure et des isolants en cas d'avarie. On obtient ainsi une meilleure sécurité, mais à un prix plus cher

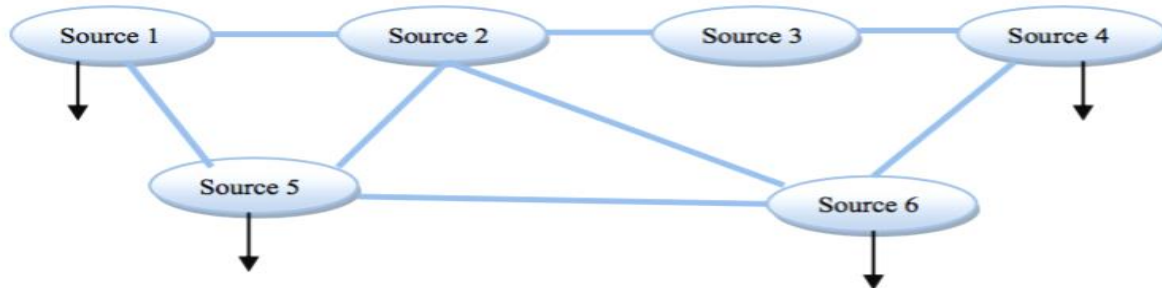


Figure (1.3) :

Schéma simplifié d'un réseau maillé

3) Les différentes fonctions du réseau :

A. Réseau d'utilisation :

Ces sont les réseaux de basse tension (BT) qui alimentent les foyers, l'éclairage, les moteurs, les appareils domestiques et doivent présenter une sécurité totale. Ils sont les plus petites lignes du réseau. Leur tension est comprise entre 230 et 380 volts. Ce sont celles qui nous servent tous les jours pour alimenter nos appareils ménagers. Elles permettent donc la distribution d'énergie électrique vers les ménages et les artisans et représentent plus de la moitié du réseau national

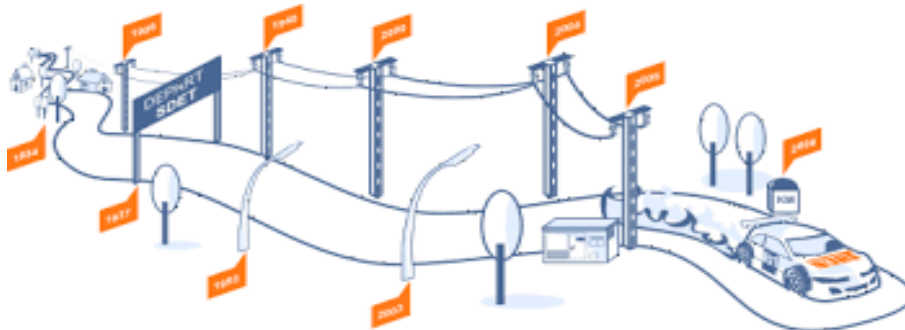


Figure (1.4) :

Réseau d'utilisation

B. Réseaux de distribution :

Ce sont les réseaux de moyenne tension (MT) qui fournissent aux réseaux d'utilisation les puissances nécessaires demandées. Ils doivent observer des distances limitées de voisinage, c'est pour cela que ces réseaux se réalisent en souterrain dans les villes. Ils permettent le transport de l'électricité à l'échelle locale vers les petites industries, les PME et les commerces. Elles font également le lien entre les clients et les postes de transformations des compagnies de distribution du courant. Les lignes MT ont une tension comprise entre 15kv et 30kv

créer leurs propres champs électromagnétiques. L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active" ; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau

De distribution sera ainsi globalement réduite. Les économies d'énergie réalisées se chiffrent par dizaines de pour cent de la consommation globale, situant les procédés de compensation d'énergie réactive en première ligne du combat pour la réduction de l'impact des activités humaines sur l'écosystème de notre planète.

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active. A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, le phénomène flicker, et une meilleure marge pour la stabilité. Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport.

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre-demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

5) Principe général de la compensation :

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "compensation de l'énergie réactive". Pour inciter à cela et éviter de surcalibrer son réseau, le distributeur d'énergie pénalise financièrement les consommateurs d'énergie réactive au-delà d'un certain seuil. On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs.

Pour réduire la puissance apparente absorbée au réseau de la valeur S_2 à la valeur S_1 , on doit connecter une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive QC . Telle que :

$$QC = P \cdot (\text{tg}\varphi_2 - \text{tg}\varphi_1).$$

Le principe de compensation avec des condensateurs peut être représenté par La 1ère figure illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le condensateur.

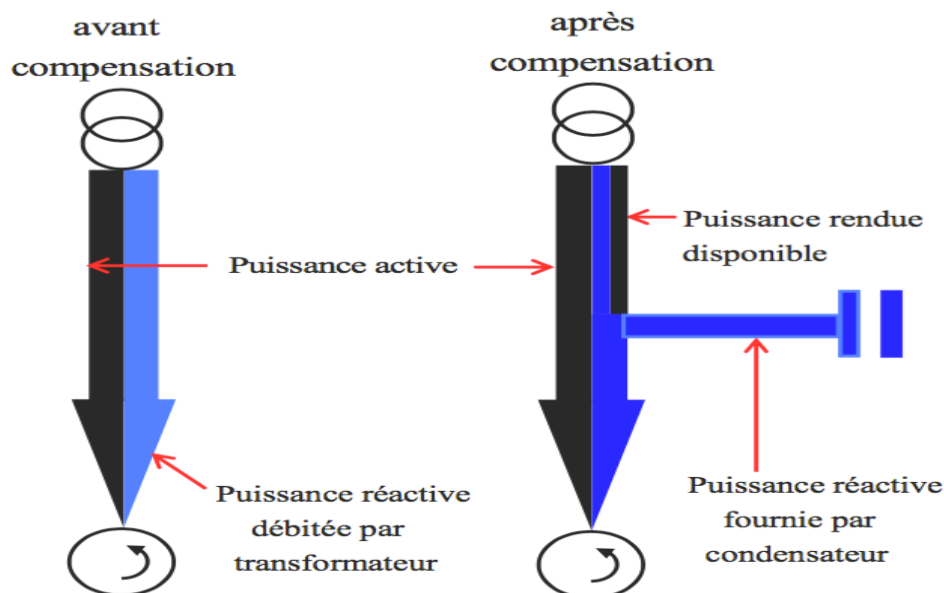


Figure (1.8) :

L'intérêt de la compensation.

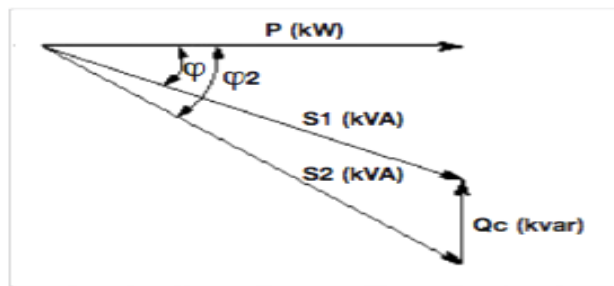


Figure (1 .9) :

Diagramme vectorielle montre le principe de la compensation

L'intérêt économique de la compensation est mesuré en comparant le coût d'installation des batteries de condensateurs aux économies qu'elle procure. Le coût des batteries de condensateurs dépend de plusieurs paramètres dont :

- la puissance installée, ■ le niveau de tension, ■ le fractionnement en gradins, ■ le mode de commande,
- le niveau de qualité de la protection.

Les réseaux électriques à pour but de véhiculer de la puissance depuis la source jusqu'aux centres de consommation dans un réseau à courant alternatif. La puissance apparente S à deux composantes la puissance active P et la puissance réactive Q :

$$S = P + j Q = * (\cos \phi + j \sin \phi 2)$$

En général, l'écart de tension entre deux extrémités d'une ligne est lié au transit de la puissance réactive consommée par la charge. Pour obtenir une tension identique (ou proche) aux deux bouts de la ligne, il faut donc pouvoir produire localement de la puissance réactive.

La présence des moyens de production d'énergie réactive (alternateurs, bancs de condensateurs ou compensateurs statiques) à proximité des zones de consommation contribue donc à maintenir la tension constante sur le réseau. Il est à noter que les solutions peuvent reposer sur des moyens de compensation de puissance réactive statiques (bancs de condensateurs, bancs de bobines) ou dynamiques (alternateurs, FACTS).

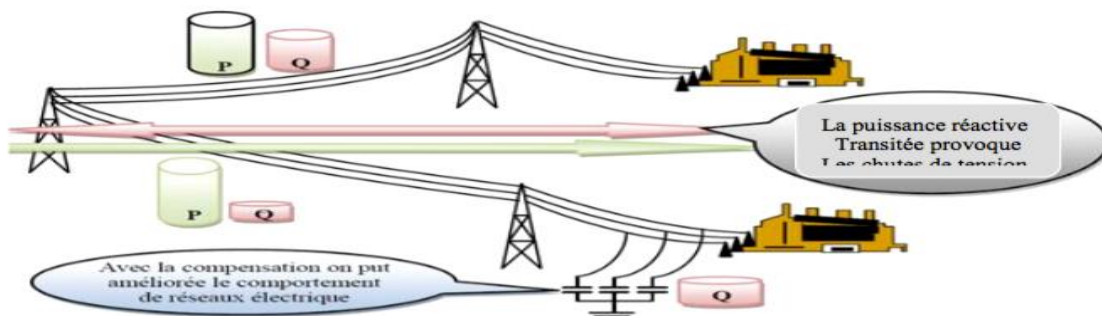


Figure (1 .10) :

Le changement de la puissance dans une ligne électrique

6) Moyens de compensation réactive :

Il existe plusieurs catégories de dispositifs de production de puissance réactive : compensateurs synchrones, les bancs de condensateurs et les compensateurs statiques de puissance réactive.

A. Compensation shunt :

La compensation parallèle (shunt) consiste à enclencher des condensateurs shunt et/ou des inductances shunt connectés entre les phases du réseau et la terre en général par le biais de disjoncteurs à différents endroits sur le réseau pour modifier l'impédance des lignes, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau. Ces éléments permettent de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites admissibles.

Cette technique de compensation est dite passive car elle fonctionne en tout ou rien. C'est-à-dire qu'elle est soit en service, par exemple lorsqu'une inductance shunt est enclenchée, soit complètement hors service lorsque l'inductance est retirée. Lorsqu'elle est en service, aucune modification des inductances ou des condensateurs n'est effectuée pour essayer de contrôler la tension ou l'écoulement de puissance.

D'après la figure (1.10), on voit que ces équipements permettent aussi d'augmenter la puissance active transmise. La puissance transmise peut être augmentée de 50% pour une compensation au niveau de la charge et de 100% pour une compensation au point milieu.

Une ligne HT peut être modélisée par un schéma en π représenté par la figure (1.11).

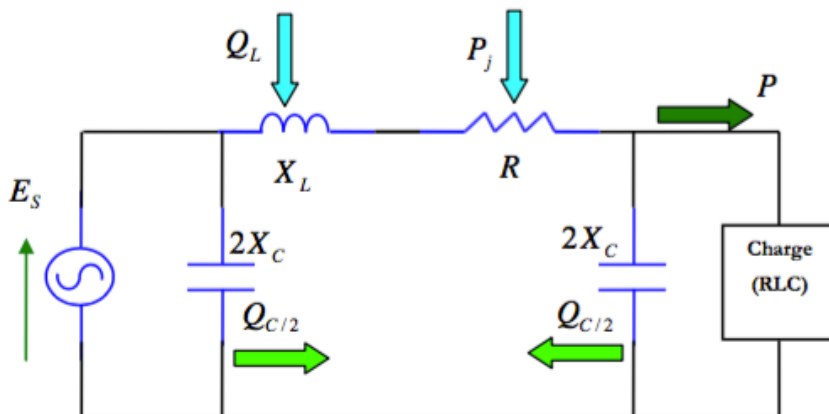


Figure (1 .11) :

Représentation d'un système électrique en π .

Lorsque le réseau n'est pas ou peu chargé, c'est-à-dire que l'impédance de la charge est très élevée, la tension sur la ligne a tendance à monter considérablement (effet Ferranti), cette augmentation de tension est d'autant plus importante que le réseau est exploité à tension élevée et que les lignes sont longues. Pour réduire la tension en bout de ligne, il faut augmenter artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne en diminuant sa capacité shunt. Des inductances shunt sont enclenchées à différents postes sur le réseau. [11]

Cependant, lorsque le réseau est fortement chargé, dans ce cas l'impédance de la charge est très faible et la tension a tendance à diminuer sur le réseau. Pour compenser cet effet, il s'agit de diminuer artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne pour la rendre égale, ou là plus près possible, de l'impédance de la charge. Les réactances shunt deviennent inutiles. Pour maintenir la tension dans les limites contractuelles, le gestionnaire du réseau doit donc augmenter la capacité shunt de la Ligne et connecter des condensateurs shunt dans différents postes du réseau selon la charge. [11]

Les bancs de condensateurs vont compenser la puissance réactive absorbée par la charge et ainsi éviter la transmission de puissance réactive sur de longues distances. Ces bancs de condensateurs doivent être connectés ou déconnectés par des disjoncteurs.

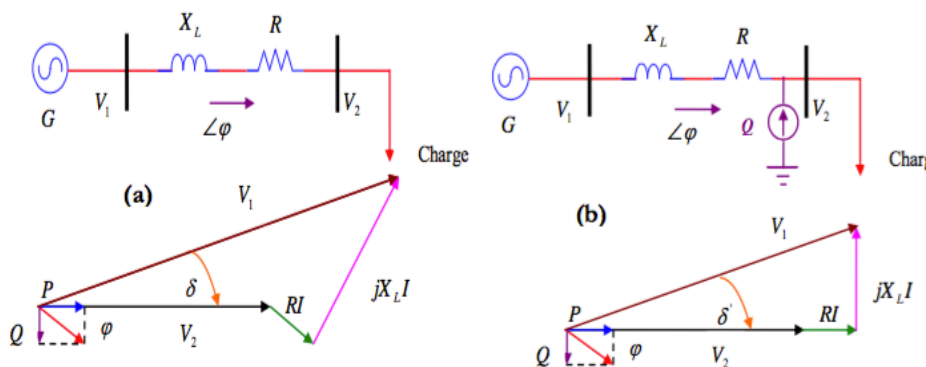
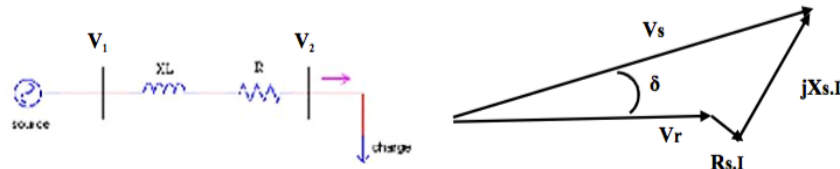


Figure (1 .12) :

Principe de la compensation shunt

B. Principe de la compensation série :

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance inductive sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance active transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductive, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance en ajoutant une réactance de type capacitive. En conservant le même modèle de ligne. On obtient la compensation série donnée par la Figure (1.13)



(a) sans compensation

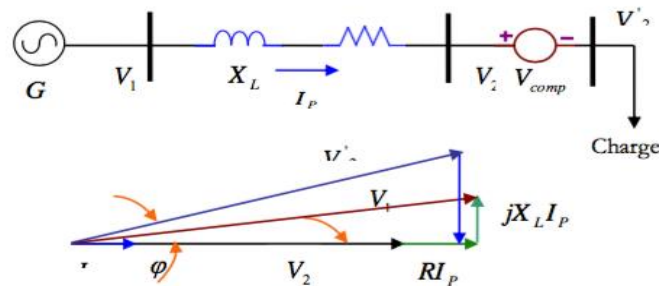


Figure (1.13) :

Principe de la compensation shunt

C. Compensateurs synchrones :

Les compensateurs synchrones sont des alternateurs synchrones connectés au réseau, mais ils ne sont pas entraînés par une turbine et ne fournissent donc pas de puissance active. Comme ils fonctionnent en moteur, ils consomment la puissance active correspondant à la compensation de ces pertes mécaniques et électriques. Par le réglage du courant d'excitation des génératrices, on contrôle la tension à leur nœud de connexion.

D. Bancs de condensateurs :

Les bancs de condensateurs sont des dispositifs statiques de compensation de puissance réactive. Leur connexion sur les systèmes énergétiques permet d'injecter de la puissance réactive. Néanmoins leur fonctionnement en tout ou rien ne permet pas un pilotage de la tension, même s'ils peuvent être connectés par gradins. Les connexions ou déconnexions de condensateurs entraînent une diminution de leur durée de vie. Un inconvénient supplémentaire de ces dispositifs est que la puissance réactive générée diminue avec le carré de la tension ; en effet la puissance réactive générée par un banc de condensateur triphasé de capacité par phase C sous la tension composée U vaut $Q_c = -C_w U^2$.

Une tension basse diminue l'efficacité du condensateur alors qu'il est nécessaire d'injecter plus de puissance réactive. Un autre paramètre important à prendre en compte pour les bancs de condensateur est le niveau de tension auxquels ils sont connectés. Le coût de ces appareils dépend en partie de la qualité du diélectrique utilisé. Les condensateurs sont plus économiques pour des niveaux de tension de l'ordre de 20 kV, c'est-à-dire adaptés aux réseaux de distribution. [10].

E. Compensateurs statiques de puissance réactive :

Les compensateurs statiques de puissance réactive FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) sont des dispositifs plus récents qui associent des bancs de condensateurs et de bobines à des convertisseurs d'électronique de puissance permettant de régler la puissance réactive délivrée et ainsi la tension du nœud de connexion. Ces appareils ont un temps de réponse très court, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.

F. Compensation réactive dans une ligne électrique :

La compensation réactive représente l'application de tous les dispositifs de puissance réactive dans un réseau électrique pour :

- Maintenir le profil du plan de la tension pour les différents niveaux des puissances transportées. - Pour améliorer la stabilité du système par augmentation de la puissance maximale Transmissible.
- Et/ou pour couvrir le besoin en puissance réactive sur la majorité des plans économiques. Idéalement la compensation réactive doit modifier l'impédance de charge en agissant sur la capacité et/ou l'inductance de la ligne pour obtenir une impédance de charge virtuelle s'adaptant aux valeurs de la puissance actuelle transportée par la ligne.

G. Compensateur shunt au point milieu :

Considérons un réseau électrique simple avec un compensateur shunt idéal connecté au point milieu de la ligne de transport donné sur la figure (1.14).

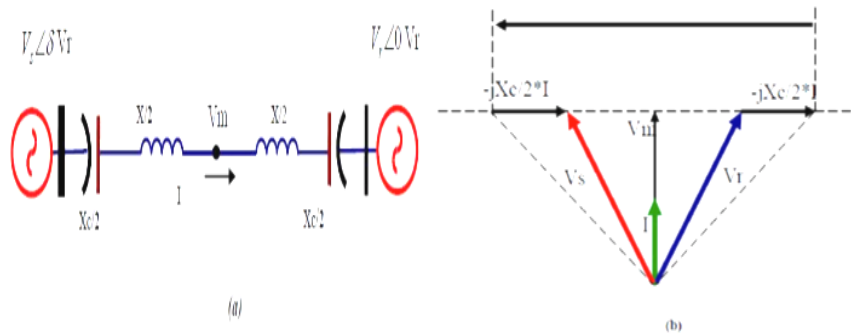


Figure (1.14) :

Compensation shunt au point milieu

La relation entre les différentes tensions et courants, dans l'ensemble ligne électrique et compensateur série, est expliquée par le diagramme de la figure (b).

Systématiquement, en insérant ces condensateurs, la réactance effective de la ligne X_{eff} doit être diminuée et avoir la nouvelle valeur :

$$X_{eff} = X - X_c = X(1 - k)$$

Avec $K = X/X_c$ est défini comme le coefficient de Compensation série.

La puissance transportée par une telle ligne est donnée par l'équation ci-dessus et varie selon la valeur du degré de compensation K comme le montre la figure (I. 15).

$$P = (V_s \cdot V_r \sin \phi) / X(1 - K)$$

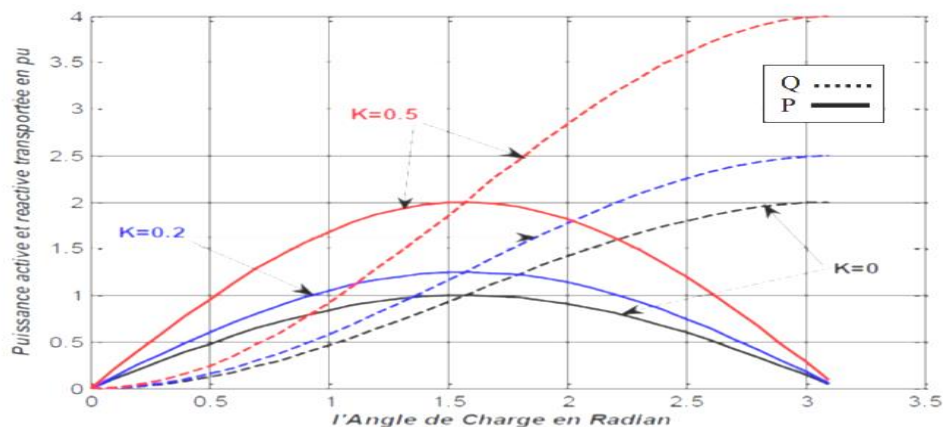


Figure (1.15) :

Les différentes valeurs de puissances par le changement de k

Il est facile d'observer à partir des courbes de la figure (1.15) que la compensation shunt peut augmenter significativement la capacité de transport de la puissance à travers une ligne électrique. [10]

CONCLUSION :

Ce chapitre a traité les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de la tension, ainsi on a présenté une étude qui donne l'intérêt de la compensation des lignes électriques. La compensation conventionnelle (séries et shunts) et la compensation moderne utilisant les dispositifs FACTS qui seront traitées en détail dans le prochain chapitre.

CHAP : *II*

LES SYSTEME

FACTS

Systeme de transmission flexible en courant alternatif

« J'admire ceux qui continuent à danser même lorsque la musique s'est arrêtée, car ce sont ceux qui continuent d'avancer lorsque tout espoir est perdu »

Wilson Kanadi

II. Introduction

Les planificateurs des réseaux de transport mondiaux approchent de plus en plus des limites d'utilisation de leur matériel. En effet, on constate aujourd'hui que, dans de nombreux pays, la consommation d'électricité est en constante augmentation (même s'il y a actuellement une légère stagnation dans les pays industrialisés) du fait de l'industrialisation, de l'urbanisation et de la croissance démographique. De plus, les pressions écologistes associées aux lourdeurs administratives rendent très difficile la construction de nouveaux équipements (lignes, centrales, etc...). Il résulte de tout ceci que les réseaux doivent aujourd'hui transporter plus de puissance avec un dimensionnement non proportionnel. De plus les interconnexions des réseaux entre les pays deviennent de plus en plus nombreuses. Considérant que certains réseaux sont moins fiables que d'autres, le niveau de sécurité global des réseaux mondiaux diminue. Les grands distributeurs d'énergie cherchent donc des solutions à ces problèmes et c'est dans ce contexte qu'est né le projet FACTS (Flexible AC Transmission System) lancé par un consortium de compagnies d'électricités américaines (EPRI) en 1988. L'objectif de ce projet est d'optimiser les transits de puissance dans les réseaux à l'aide de dispositifs à base d'électronique de puissance plus rapides et plus souples d'emploi que les systèmes mécaniques encore largement utilisés aujourd'hui. Il s'agit alors d'améliorer les performances des réseaux affectés par les problèmes pré-cités et de les rendre plus flexibles, notamment en contrôlant leurs transits de puissance.

Un système de transmission flexible en courant alternatif, plus connu sous l'acronyme anglais de FACTS est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la répartition des charges dans le réseau en améliorant ainsi la capacité de transit et en réduisant les pertes, pour contrôler la tension en un point ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité et des groupes de productions qui y sont connectés. Il peut également filtrer certaines harmoniques et donc améliorer la qualité de l'électricité.

La libéralisation du marché de l'électricité a pour conséquence que la production est maintenant faite parfois très éloignée du lieu de consommation, elle n'est également plus aussi prévisible qu'auparavant, les capacités de transit du réseau doivent donc être augmentées, les goulots d'étranglement du réseau aménagés. Le manque d'acceptation de l'opinion publique pour la construction de nouvelles lignes électriques à haute tension et de nouvelles centrales électriques incite les gestionnaires de réseau à construire des FACTS afin d'augmenter les capacités de transit du réseau.

Les FACTS sont très nombreux. Ils font toujours partie de la famille des compensations électriques actives, mais cette compensation est série, parallèle (shunt) ou hybride, c'est-à-dire série et parallèle à la fois. Ils sont principalement constitués de capacités et d'inductances pour générer la puissance réactive, ainsi que d'électronique de puissance ou de disjoncteurs pour interrompre et rétablir le courant au travers des premiers éléments. Un transformateur est parfois utilisé pour diminuer la tension à laquelle sont soumis les autres composants. Les types de FACTS les plus répandus sont les bancs de capacités séries commutées mécaniquement ou par thyristors, les SVC, qui combinent capacité et inductance en parallèle à la ligne, les transformateurs déphaseurs, les STATCOM et SSSC qui sont des sources de tension placées respectivement en parallèle et en série à la ligne.

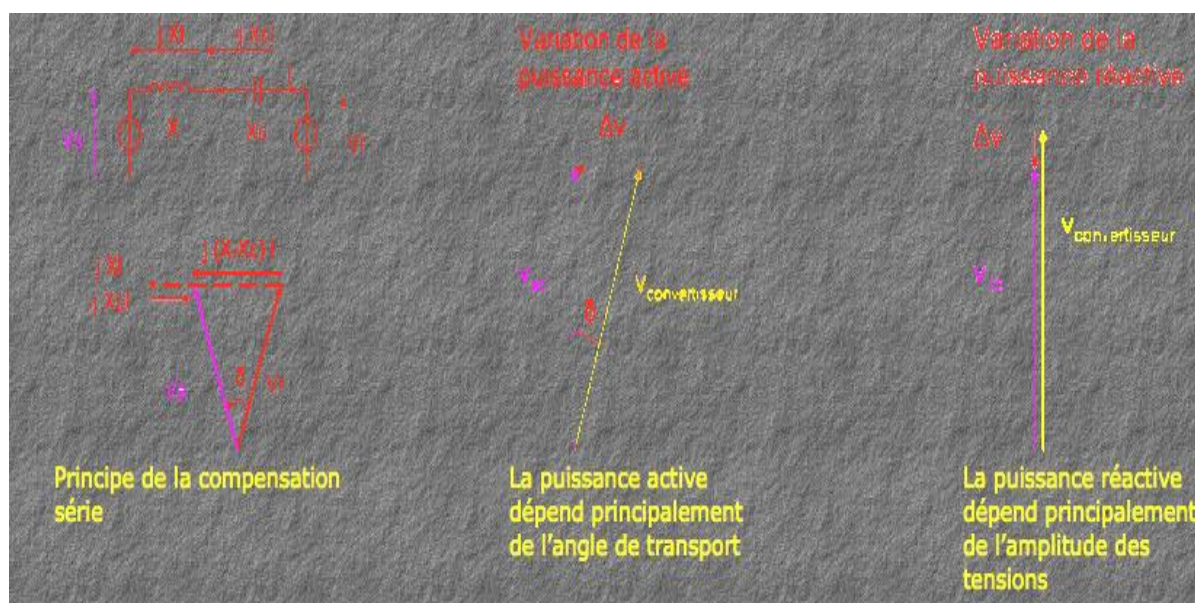


Figure (2.1) : Contrôle du transit de puissance

Principe de la compensation série La puissance active dépend principalement de l'angle de transport La puissance réactive dépend principalement de l'amplitude des tensions

En temps normal les lignes électriques sont chargées dans une fourchette allant d'un tiers à la moitié de leur capacité maximale. En cas de surcharge, une ligne peut atteindre sa limite, elle déclenche alors en quelques secondes, ce qui entraîne la surcharge des lignes avoisinantes qui déclenchent à leur tour, on a alors des déclenchements en cascade qui conduisent à une coupure d'électricité généralisée. Les FACTS tentent d'équilibrer la charge entre les lignes pour prévenir cette situation. Si un défaut a malgré tout lieu, il tentera de rééquilibrer la charge entre les différentes lignes pour arrêter la cascade de déclenchements.

De plus un meilleur équilibrage des charges, entre lignes réduit les pertes. Dit autrement, ils permettent d'éviter la formation de boucle de courant. En effet, les pertes prennent essentiellement la forme de pertes Joule et sont donc proportionnelles au carré du courant, en diminuant le courant par un facteur 2, on réduit les pertes par 4.

Détail

Les puissances active P et réactive Q transportées dans une ligne électrique en courant alternatif

S'expriment comme suit pour une ligne sans perte :

$$P = V_1 * V_2 / X \sin \Delta$$

$$Q = V_1 * (V_1 - V_2 \cos(\Delta)) / X$$

Où Δ est l'angle de transport. Pour résumé 3 paramètres sont importants : l'amplitude des tensions, l'angle de transport et l'impédance. Pour les réseaux en courant alternatif, le contrôle lie la puissance active à la fréquence d'une part, et la puissance réactive au contrôle de la tension de l'autre.

1) Réglage de transfert des puissances :

Pour régler le transfert de puissance, on peut donc choisir de contrôler

L'amplitude des tensions

La valeur de l'impédance

L'angle de transport

Les condensateurs ou bobines montés en série permettent de changer la valeur de l'impédance. Les condensateurs série permettent de diminuer l'impédance des liaisons électriques et d'augmenter la puissance transmissible par ces liaisons. D'une certaine manière, on peut dire qu'ils réduisent la longueur de la ligne. A l'inverse les réactances série augmentent l'impédance d'une liaison électrique, afin de mieux répartir les courants sur les différentes liaisons.

Les condensateurs ou bobines montés en shunt permettent de changer l'amplitude de la tension en un point. En effet les condensateurs shunts fournissent de la puissance réactive, et augmentent localement la tension du réseau. Tandis que les réactances shunts consomment de la puissance réactive, et diminuent la tension du réseau. Les déphasages créés par les UPFC ou les transformateurs déphaseurs influent sur l'angle de transport. Dans le cas, où plus de deux lignes sont en parallèles mais n'ont pas la même longueur électrique, c'est-à-dire le même angle de transport, un réglage de ce dernier paramètre permet de rééquilibrer la charge. Elle évite également les boucles de courant.

Dit autrement, les condensateurs et les bobines permettent au FACTS de fournir ou de consommer dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

L'objectif est d'augmenter la capacité de transit de puissance en s'approchant des limites thermiques des lignes.

La mauvaise acceptation publique pour les lignes électriques, pour des raisons environnementales principalement, rend cet usage des FACTS de plus en plus répandu. Il est bon toutefois de rappeler que le FACTS ne change pas cette limite thermique et ne peut donc augmenter indéfiniment la puissance électrique transportable d'une ligne électrique à haute tension. Les dispositifs FACTS ne remplacent donc pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant.

2) Contrôle de la tension en régime stationnaire :

Les longues lignes ont tendance à avoir des surtensions à leurs extrémités en cas de faible charge, on parle d'effet Ferranti, et au contraire une faible tension en cas de forte charge. Pour maintenir une tension constante, ou du moins pour ne pas dépasser les limites imposées par la régulation, un FACTS monté en parallèle peut être intéressant.

La compensation est localisée dans des postes qui sont répartis à des endroits stratégiques sur la ligne. Puisque la compensation n'est pas répartie d'une façon uniforme, il est impossible de maintenir la tension à sa valeur nominale en tout point de la ligne. Il est donc important de bien sélectionner les endroits où la compensation shunt est installée pour éviter que la tension ne s'écarte trop de sa valeur nominale.

Si le SVC fonctionne en réglage de tension, le système de contrôle ajuste le courant dans le SVC de façon à ce que courant et tension suivent une courbe caractéristique.

3) Stabilité dynamique des réseaux électriques :

Dans le réseau, la génération d'électricité est assurée par des machines synchrones. Les défauts sur les lignes, les ouvertures et fermetures de sélecteur, les pannes de certains équipements peuvent faire osciller la puissance active des générateurs, concrètement les axes des générateurs se mettent à accélérer, d'autres à décélérer. Autrement dit, l'angle de transport se met à osciller. La capacité du réseau à retrouver son synchronisme, est appelée stabilité dynamique.

Les FACTS permettent de régler la tension et l'angle de transport rapidement et permettent ainsi d'amortir les oscillations de puissance active et augmente ainsi la disponibilité et la fiabilité du réseau. En mode transitoire, en cas de défaut, le temps de réaction doit être inférieur à 100ms.

4) Qualité de l'électricité :

Les fournisseurs d'électricité doivent assurer une bonne qualité de la tension, cela veut dire une fréquence et un niveau de tension aussi constants que possible, une forme d'onde sinusoïdale et enfin une symétrie entre phases.

Détail

Cependant le réseau peut subir les défauts suivants.

Les creux de tension et coupures brèves. Après court-circuit dans le réseau.

Les variations rapides de tension.

Les surtensions temporaires ou transitoires.

Les interruptions courtes ou coupure brève.

Un déséquilibre de tension.

Ces défauts peuvent venir du réseau lui-même ou des clients, occasionnels, comme les orages, ou récurrents, comme le démarrage de machines industrielles tel un four à arc. Les FACTS limitent les effets des défauts et des défaillances de l'équipement grâce à leur contrôle de tension par exemple.

Au niveau de la forme d'onde des filtres sont souvent associés aux FACTS afin de limiter les harmoniques environnants ou créés par l'installation elle-même.

Limiter les courants de court-circuit

Certains FACTS, comme les TCSR et les IPC, dans certaines configurations, peuvent également limiter le courant de court-circuit.

5) Historique sur les différents type FACTS :

Les premiers FACTS sont apparus dans les années 1930 afin d'augmenter la capacité de certaines lignes ayant une forte impédance. Les compensateurs montés en série sont utilisés depuis plus de 60 ans dans le monde.

Les premiers SVC sont apparus dans les années 1970 et ont été développés par l'EPRI. Le premier a été mis en service au Nebraska en 1974 par General Electric pour stabiliser la tension devenue fluctuante à cause des laminoirs et des fours à arc environnants. C'est durant la même période que les thyristors ont commencé à être employés.

Les GTO sont commercialisés depuis la fin des années 1980. Le premier TCSC a été construit en 1992 par ABB à Kay-enta aux États-Unis, il a permis d'augmenter la capacité de transmission de la ligne de 30%. Le principe du STATCOM a été inventé en 1976 par Laszlo GYUGYI. Le premier a été installé à INUYAMA au Japon en 1991. Il a été commercialisé par KANSAI Electric Power Corporation et Mitsubishi Electric Power Corporation. Le second a été installé à Sullivan au Nord-Est du Tennessee par Westinghouse Electric Corporation aux États-Unis en 1995. Le principe de l'UPFC a été présenté en 1990 par Laszlo GYUGYI. Le premier UPFC a été mis en service en 1998 au poste électrique de AEP I nez pour le compte d'American Electric Power.

Dans le début des années 1990, le Royaume-Uni et la Norvège ont dérégulé leur marché électrique. Par la suite les autres pays scandinaves et l'Europe en général a emboîté le pas. Aux États-Unis et en Amérique du Sud le marché est également largement libéralisé. Alors que le réseau de transmission électrique est considéré comme un monopole naturel en Europe, l'Australie, la Nouvelle-Zélande et les États-Unis l'ont également partiellement libéralisé. Cela rend la prédiction des flux d'énergie beaucoup plus difficile. Il devient nécessaire de développer le réseau et de le rendre plus contrôlable avec des FACTS.

6) Types de FACTS :

Une construction à base d'électronique de puissance a l'avantage d'être beaucoup plus rapide qu'une construction mécanique, ce qui permet de réagir à des défauts transitoires et de s'adapter instantanément à la charge. Ceux commutés mécaniquement sont lents, peuvent être commutés seulement quelques fois par jour et servent à corriger des problèmes prévisibles et souvent cycliques.

Les FACTS à convertisseurs de tension ont l'avantage d'être plus compacts que ceux à thyristors. Il y a donc moins souvent besoin d'agrandir les stations électriques et donc d'acheter du terrain ce qui est un avantage. Des convertisseurs montés en source de courant sont théoriquement possibles, mais sont moins intéressants économiquement et en termes de performance. Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories :

- les compensateurs parallèles
- les compensateurs séries
- les compensateurs hybrides (série- parallèle)

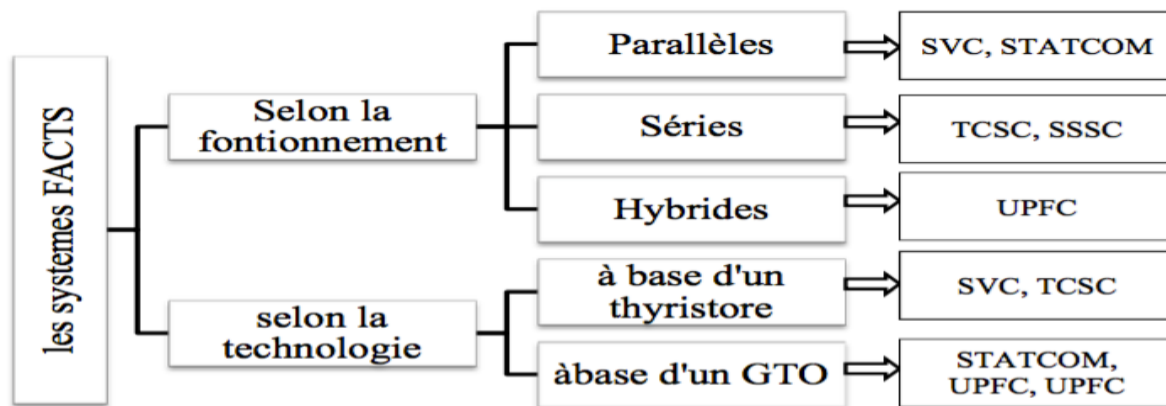


Figure (2.2) : classification des FACTS

A. Les compensateurs parallèles :

La compensation parallèle agit principalement sur la tension et en limite les oscillations. Elle peut également limiter les oscillations de puissance active, mais est moins efficace dans ce rôle que la compensation série. Elle fonctionne en source de courant. Le choix de leur **emplacement** est **déterminant**.

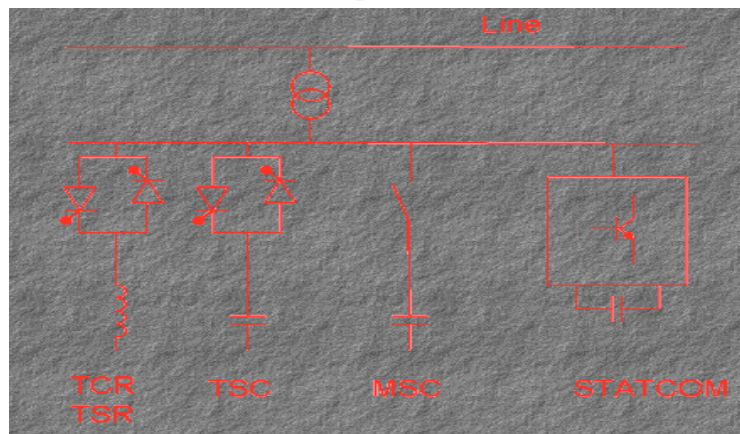


Figure (2.3) : FACTS shunt. Parallèles

Détail

MSC : condensateur commuté mécaniquement, parfois arrangé sous forme de filtre anti-harmonique. Permet de stabiliser la tension en cas de forte charge. (50 = MVAR = 500)

MSR : inductance commutée mécaniquement. Permet de stabiliser la tension en cas de faible charge. (50 = MVAR = 500)

➤ Compensateurs parallèles à base de thyristors

TSC : condensateur commuté par thyristors. L'inductance d'atténuation présente en série, sert à limiter le courant en cas de fonctionnement anormal et à éviter la résonance avec le réseau à des fréquences particulières. En pratique plusieurs capacités sont montées en parallèle, la connexion d'une ou plusieurs capacités de manière discrète permet de contrôler la valeur totale de la capacité connectée au réseau.

TSR : inductance commutée par thyristors

TCR : inductance contrôlée par thyristors. Ainsi il ne consomme pas toujours l'intégralité de la puissance réactive possible.

Susceptance équivalente d'un TCR

Soit l'angle de retard des thyristors du TCR noté α , le courant dans le TCR est :

$$I_{tCR}(t) = 1/L \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2}V \sin(\omega t) dt = \sqrt{2}V/\omega L (\cos(\alpha) - \cos(\omega t))$$

Pour $\alpha \leq \omega t \leq 2\pi - \alpha$ et $I_{tCR}(t) = 0$ sinon

En utilisant une transformée de Fourier on trouve

$$I_{tCR, \text{fondamentale}} = V/j\omega L\pi * (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))$$

On peut calculer alors une susceptance équivalente avec cette valeur de la fondamentale du courant

$$I_{tCR} = -jBV$$

Par identification

$$B = 1/L\omega * (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))/\pi$$

Au-delà de 90° le courant n'est plus parfaitement sinusoïdal, on a alors production d'harmoniques

SVC statique : compensateur d'énergie réactive shunt, dit aussi CSPR, compensateur statique de puissance réactive ou statique compensateur, combinant TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques, dont le premier modèle a été installé en 1979 en Afrique du Sud, est le plus répandu des FACTS. Ils se comportent comme une susceptance variable connectés en shunt au réseau. Ils permettent à la fois d'augmenter et de diminuer la tension, répondant ainsi aux exigences en cas de faible et de forte charge (50 = MVAR = 1000). Les SVC ont un temps de réponse de l'ordre de 30 à 40ms ce qui est beaucoup plus rapide que les interrupteurs mécaniques dont le temps de réponse est d'environ 100 à 150ms. Par ailleurs, les FACTS à interrupteurs mécaniques sont peu flexibles et leurs coûts de maintenance élevés.

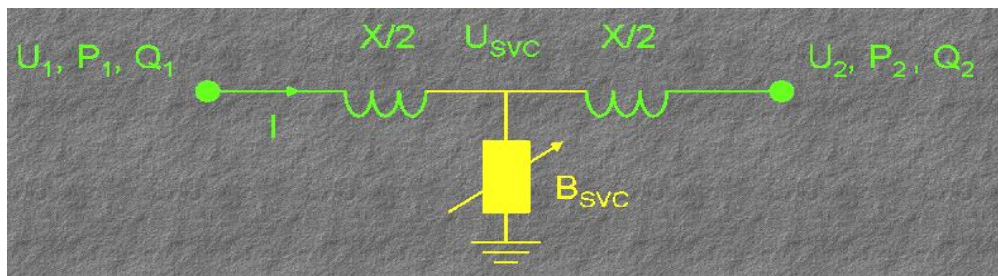


Figure (2.4) : Schéma équivalent d'un SVC

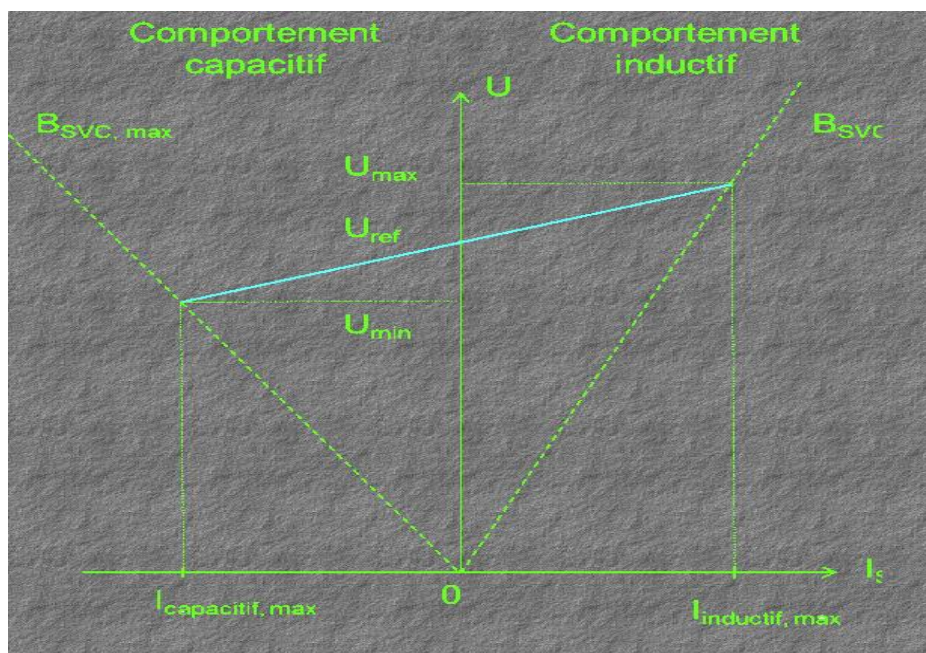


Figure (2.5) : Courbe d'un SVC

Lorsque la tension est basse le système envoie de la puissance réactive, dans le cas contraire en absorbe

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

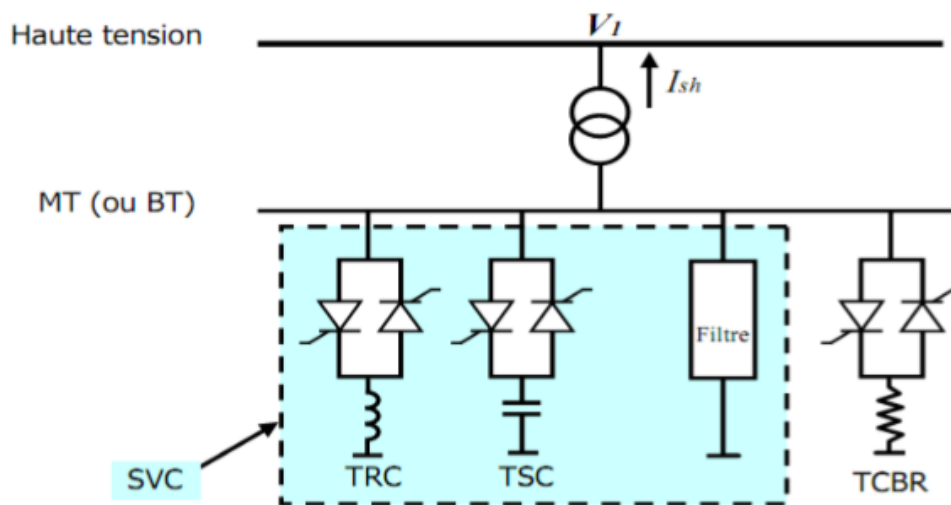


Figure (2.6) : Schéma du SVC et TCBR.

➤ Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

STATCOM ou SVG : il sert à compenser l'énergie réactive dans la ligne, il est branché en shunt. Il correspond basiquement en un circuit à courant continu, constitué de sa plus simple forme par un condensateur, relié par l'électronique de puissance à la ligne. Cet ensemble se comporte comme une source de tension, en la réglant on peut contrôler l'échange de puissance réactive entre ligne et STATCOM. Ainsi si la tension en sortie du STATCOM est plus élevée que celle de la ligne, le courant s'écoule dans la réactance vers la ligne apportant de la puissance réactive à celle-ci. La source de tension peut être à deux niveaux ou multi-niveaux. L'électronique de puissance peut être réalisée à l'aide de GTO, IGCT ou IGBT.

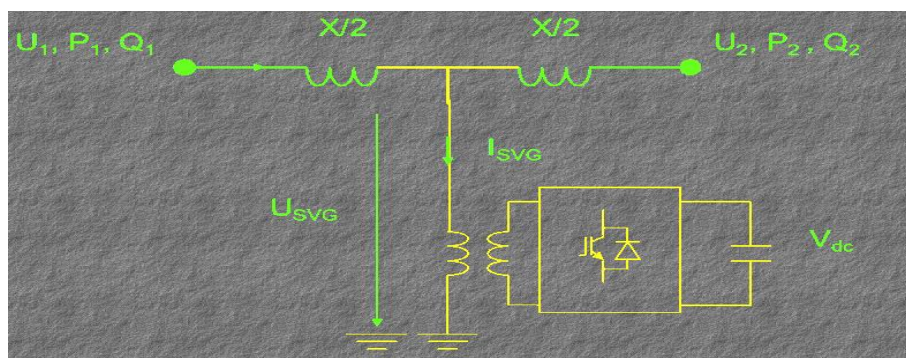


Figure (2.7) : STATCOM en détail

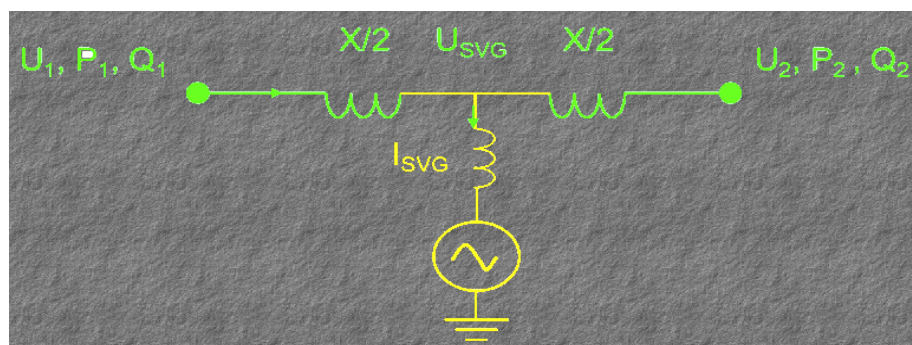


Figure (2.8) : Schéma équivalent d'un STATCOM

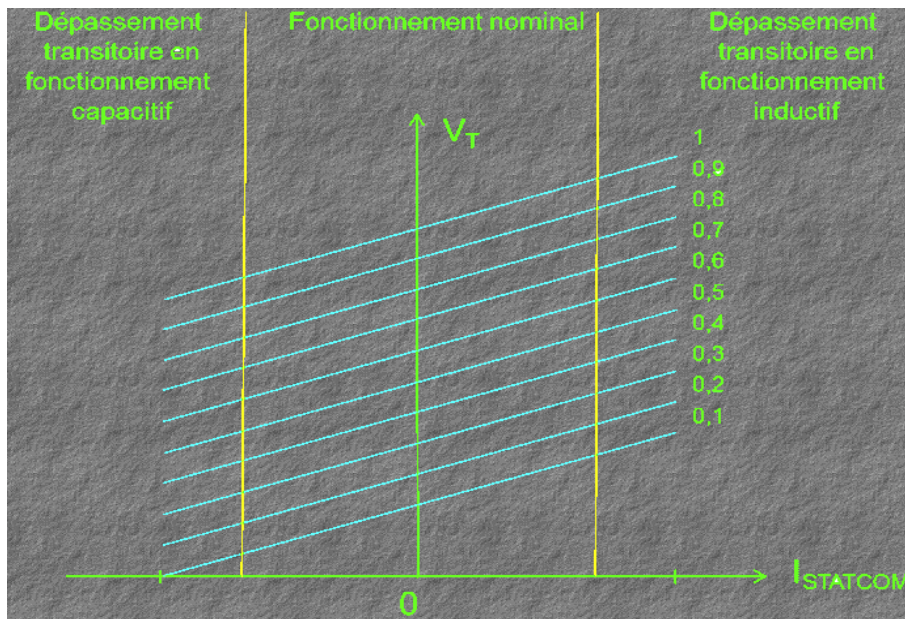


Figure (2.9) : courbe d'un STATCOM

Le STATCOM peut régler sa tension V_T pour fournir ou absorber de la puissance réactive à la ligne. Il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.

Un des avantages du STATCOM est de pouvoir fournir une quantité importante de puissance réactive même quand la tension du réseau est basse à l'inverse d'un SVC. Son temps de réponse est également très faible.

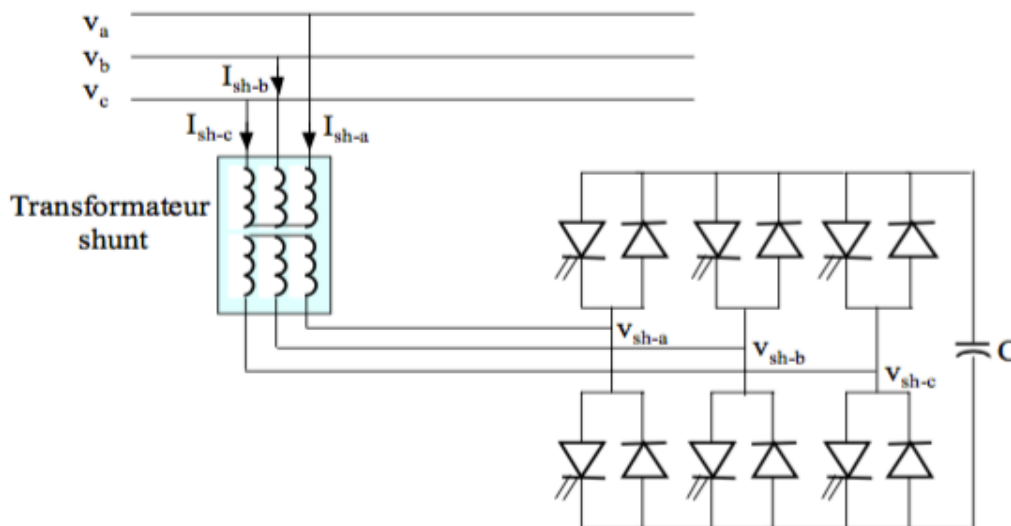


Figure (2.10) : Schéma de base du STATCOM

Sens des échanges entre Source de tension et ligne	
Paramètre	Échange de puissance
$V_{STATCOM} > V_{ligne}$	Puissance réactive envoyée vers la ligne
$V_{STATCOM} < V_{ligne}$	Puissance réactive consommée par le STATCOM
Angle de transport du STATCOM > Angle de transport de la ligne	Puissance active envoyée vers la ligne
Angle de transport du STATCOM < Angle de transport de la ligne	Puissance active consommée par le STATCOM

Tableau 1 : Sens des échanges entre Source de tension et ligne

B. Les compensateurs séries :

La compensation série agit principalement sur la réactance. Elle réduit ainsi le rapport de dépendance tension/charge, et peut influencer sur la répartition de la charge entre différentes lignes. Ses capacités d'amortissement des oscillations de puissance active sont bonnes. Elle fonctionne comme une source de tension. Le choix de leur emplacement n'est pas aussi sensible que dans le cas de compensation parallèle.

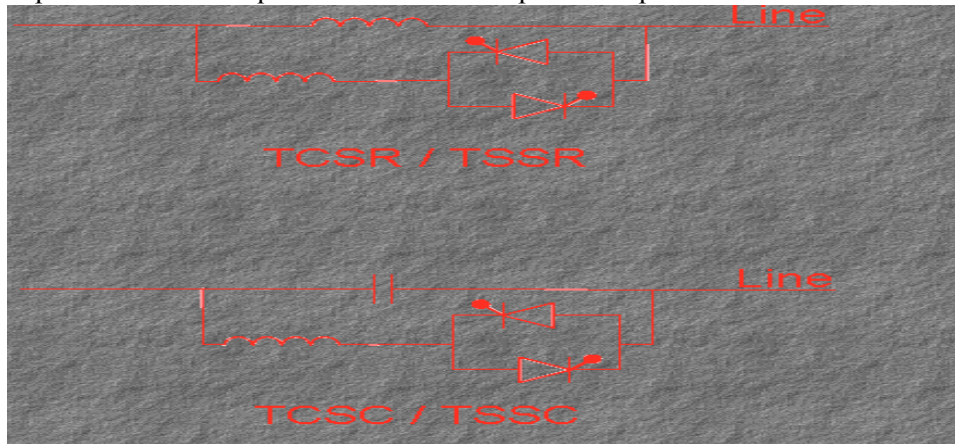


Figure (2.11) : FACTS pour compensation série

➤ Compensateurs séries à base de thyristor

FSC : est constitué d'une capacité qui peut être connecté ou non à la ligne. Influence la valeur de l'inductance de la ligne. Il permet aussi de limiter les résonances sous-synchrones.

TCSR est constitué d'une bobine mis en série avec des thyristors, le tout mis en parallèle avec une autre bobine.

TCSC est constitué d'un condensateur mis en parallèle avec des thyristors et une bobine en série.

Leur contrôle permet de faire varier la longueur électrique de la ligne. La bobine en série avec les thyristors se comportent comme un TCR, mais comme l'impédance de la capacité est inférieure à celle de la ligne, les harmoniques ne se propagent que très peu dans le réseau.

Inductance équivalente d'un TCSC vaut : $X_{TCSC} = jL\omega / (2/\pi ((\pi - \alpha) + [\sin(2\alpha)/2]) - LC\omega^2)$

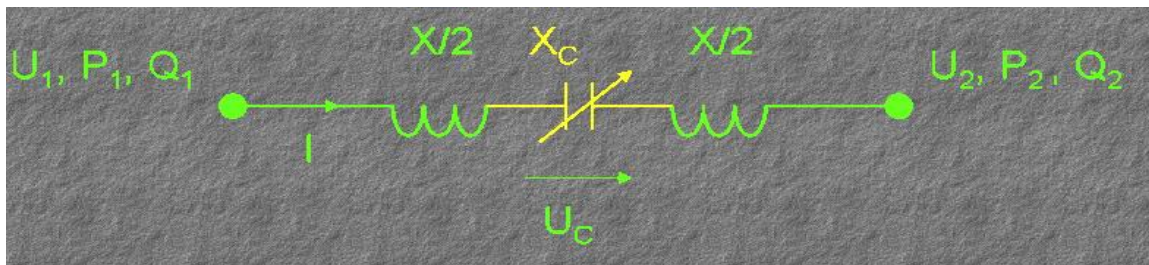


Figure (2.12) : Schéma équivalent d'un TCSC

Détail

TSSC est un TCSC qui ne peut être que connecté ou déconnecté.

TSSR est un TCSR qui ne peut fonctionner qu'avec un angle de retard de 90 ou 180°

TPFC fonctionne comme un FSC en influençant l'inductance de la ligne, à la différence qu'au lieu d'être protégé par des parafoudres, des thyristors sont utilisés pour shunter le courant en cas de besoin (QN = 401 MVAR).

➤ Compensateurs séries à base de GTO thyristors

SSSC : compensateur série. Ce type de compensateur série est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé, autrement dit une source de tension, couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur, cela permet de faire varier la capacité ou l'impédance vues par la ligne. Le contrôle du déphasage entre cette source de tension et la tension de la ligne permet également d'influer sur le transit de puissance active. Mieux, si une source de puissance en courant continu est présente dans le SSSC, celui-ci peut compenser la résistance de la ligne, améliorant le ratio X/R ce qui augmente considérablement la puissance pouvant transiter sur la ligne. Ainsi un SSSC peut faire varier à la fois la puissance active et réactive indépendamment du courant traversant la ligne électrique contrairement aux FSC et TCSC

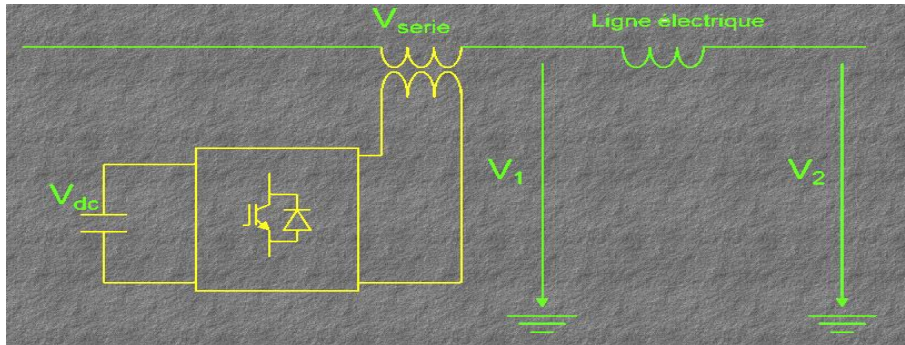


Figure (2.13) : SSSC en détail

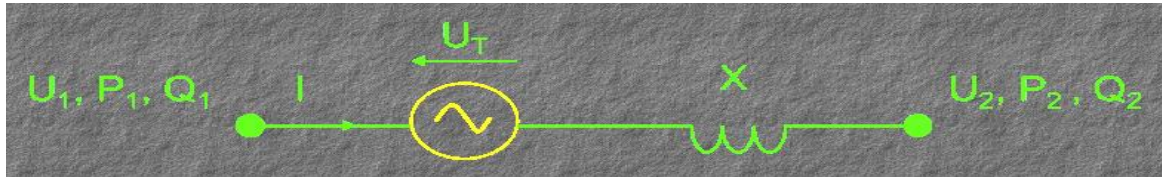


Figure (2.14) : Schéma de base du SSSC

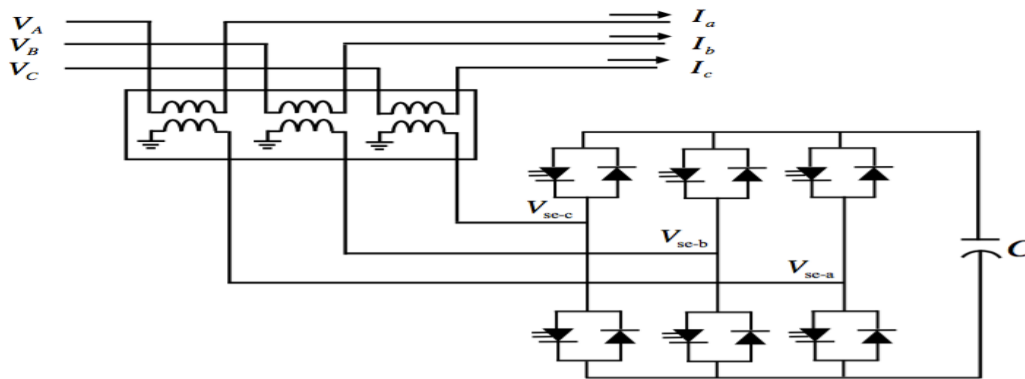


Figure (2.15) : Schéma équivalent d'une compensation SSSC.

C. Compensateurs Hybrides (série - parallèle) :

IPFC, Il a été proposé en 1998. Il utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. Concrètement, il est utilisé dans le cas de lignes multiples reliées à un même poste. L'IPFC est formé de plusieurs SSSC, chacun d'eux fournissant une compensation série à une ligne différente. L'IPFC permet de transférer de la puissance active entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissances active et réactive sur les lignes ou pour décharger une ligne surchargée vers une autre moins chargée. Les tensions injectées possèdent une composante en quadrature et une composante en phase avec les courants respectifs des lignes. La composante en quadrature permet une compensation série indépendante dans chaque ligne, alors que la composante en phase définit le niveau de puissance active échangée avec les autres lignes. Sur la liaison continue, le bilan est toujours nul.

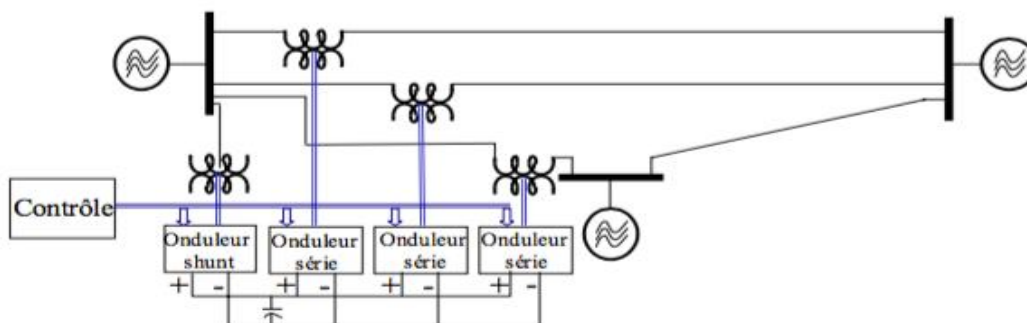


Figure (2.16) : Schéma de base de l'IPFC

UPFC Ce dispositif est l'union de deux compensateurs l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle, le concept de ce dispositif a été présenté en 1990 par L. GYUGYI. Il possède à la fois la fonctionnalité de trois compensateurs (série, parallèle et déphaseur).

Il permet d'influer indépendamment sur la tension, l'impédance et le déphasage. Il peut également limiter le courant de court-circuit

Le principe de l'UPFC consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne pour le réinjecter avec une phase appropriée. Le convertisseur 1, connecté en parallèle, a pour fonction de prélever la puissance active et de la délivrer au convertisseur série 2. Ce dernier génère une tension U_{pq} contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne. Il peut être comparé à un transformateur déphaseur pouvant de plus jouer sur la puissance réactive. L'énorme avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne en un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions. Les UPFC sont les FACTS les plus sophistiqués et également les plus chers.

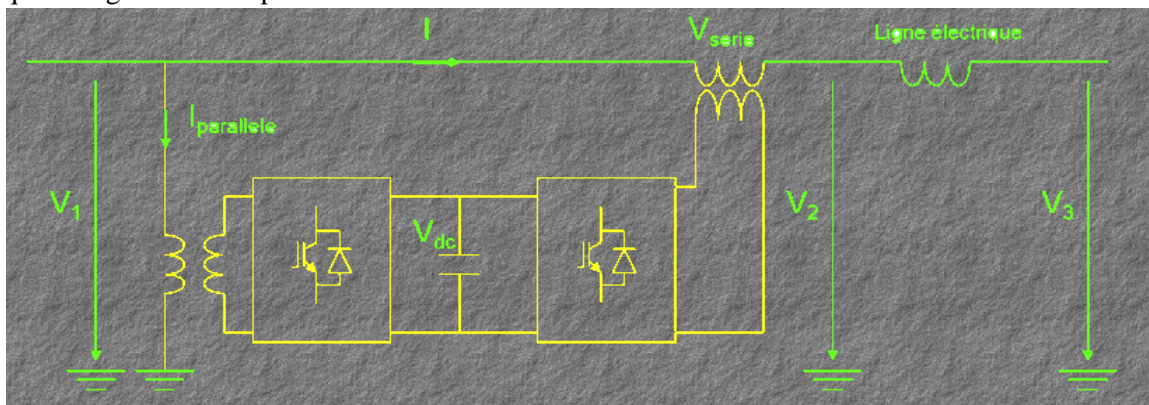


Figure (2.17) : Schéma d'un UPFC

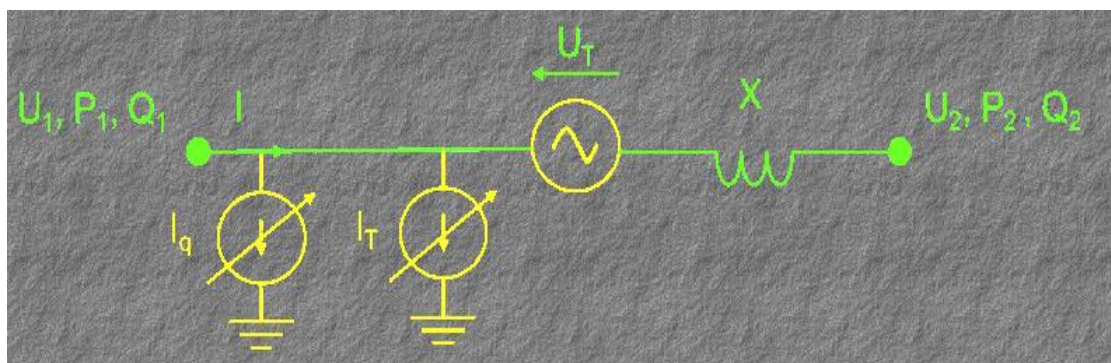


Figure (2.18) : Schéma équivalent d'un UPFC

IPC, Il s'agit d'un dispositif de contrôle qui est composé de deux impédances par phase : l'une inductive et l'autre capacitive, chacune étant directement liée à une unité de déphasage. Les valeurs de ces impédances sont élevées afin de limiter les courants en cas de court-circuit. De par sa conception, l'IPC a les aptitudes suivantes :

- Le contrôle des flux de puissance active
- La limitation des courants de court-circuit
- Le découplage des tensions entre deux nœuds, même en cas de défaut

Explication du schéma de l'IPC

Et	$I_1 = U_2 / Z_{IPC}$
Avec	$I_2 = U_1 / Z_{IPC}$
Où	$Z_{IPC} = X_{IPC} e^{j\alpha_{IPC}}$
Et	$X_{IPC} = X_A / (2 \sin(\alpha_A - \alpha_B / 2))$
	$\alpha_{IPC} = \alpha_A + \alpha_B / 2$

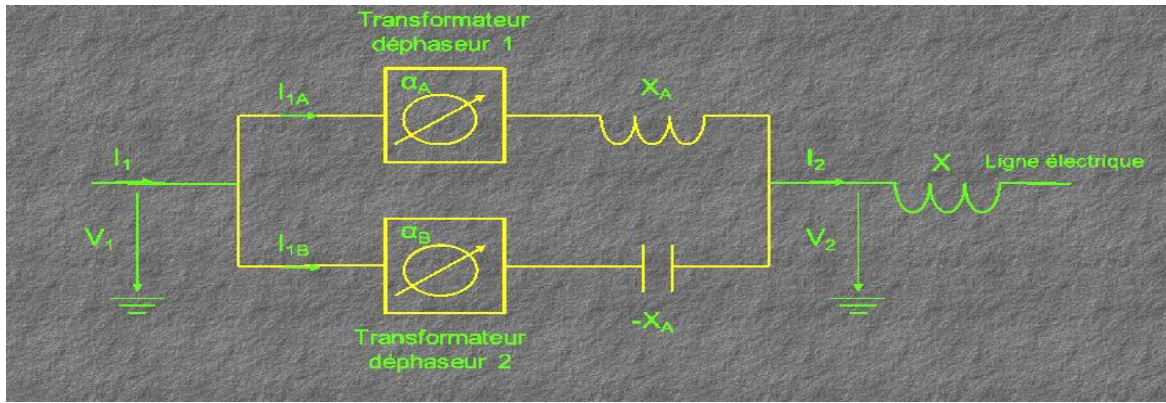


Figure (2.19) : Schéma d'un IPC

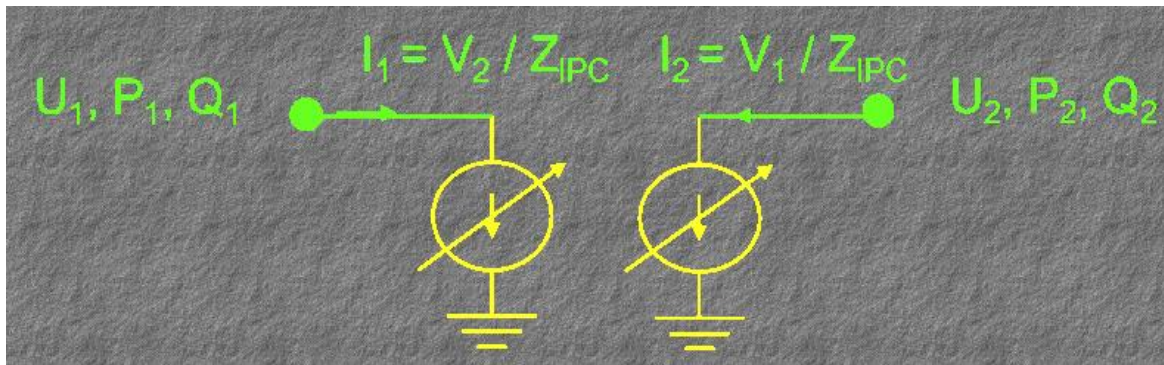


Figure (2.20) : Schéma équivalent d'un IPC

Le choix du type de FACTS doit être effectué en fonction de la configuration du réseau, aucune conclusion générale ne peut être faite. On peut toutefois lister les forces des différents systèmes.

Tableau récapitulatif des différences entre FACTS									
	SVC	STATCOM	CSC	TCSC	Transformateur déphaseur	UPFC	IPC	SSSC	HVDC
Contrôle de la tension	+++	+++	+	+	+	+++	+	+	++
Contrôle du transit de puissance (réseau maillé)	0	0	+	++	+++	+++	+++	++	+++
Stabilité dynamique (ligne point à point)	+	+	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++
Amortissement des oscillations de puissance (ligne point à point)	+	+	+++	+++	++	+++			+++
Amortissement des oscillations de puissance (réseau maillé)	+	+	+	++	++	+++			+++

Tableau :2 récapitulatif des différences entre FACTS

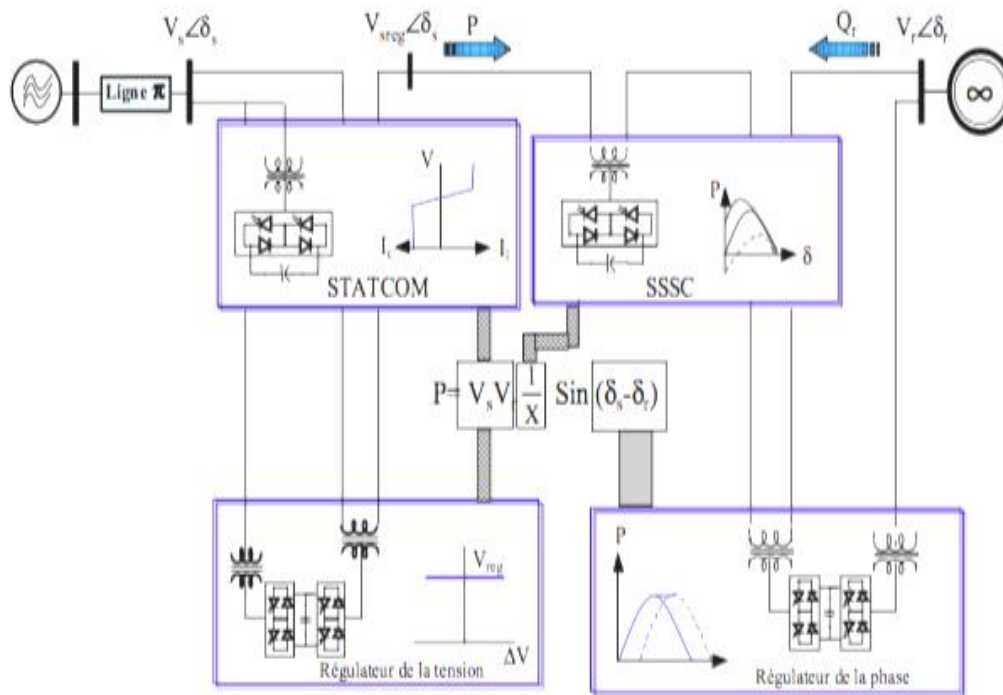


Figure (2.21) : L'influence de différents systèmes FACTS sur la puissance active

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

7) Les transformateurs utilisables avec les FACTS :

Un transformateur est souvent présent entre la ligne et l'électronique de puissance afin d'abaisser la tension vue par ces derniers composants. Ainsi l'isolation électrique pour le système de refroidissement et entre la partie haute tension et la partie contrôle, en basse tension, est limitée et donc plus économique.

Transformateur déphaseur

Bien que très différents des FACTS par leur technologie, les transformateurs déphaseurs ont un rôle analogue aux FACTS : contrôler les transits d'énergie dans un réseau électrique. Il s'agit de transformateurs assez classiques, dont le rapport de transformation est voisin de 1, mais dont les tensions d'entrée et de sortie sont déphasées d'un angle en général réglable. Le contrôle de cet angle permet de modifier le transit de puissance. Ils sont abrégés PST ou PAR. S'ils sont contrôlés par des thyristors TCPST.

Les quadratures booster transformer, QBT sont également des transformateurs déphaseurs, mais dont le fonctionnement est légèrement particulier. La tension qu'ils apportent, U_T , est en effet toujours orthogonale à la tension d'entrée : $U_1 = U_2 + U_T$.

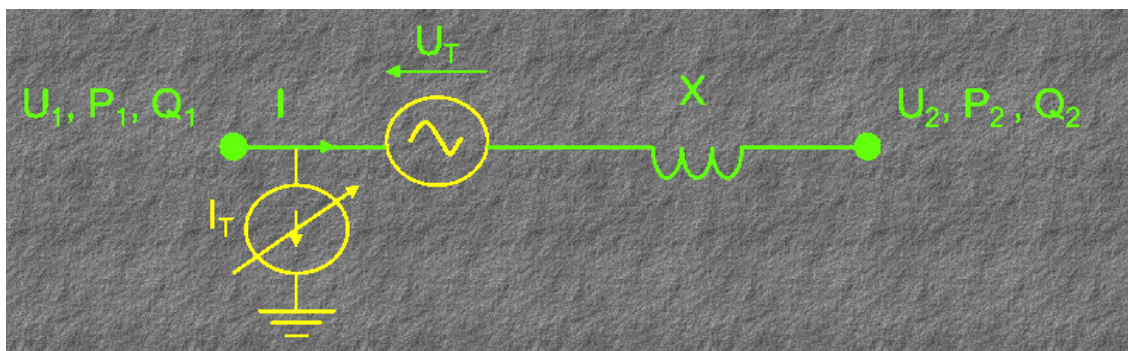


Figure (2.22) : Schéma équivalent d'un transformateur déphaseur

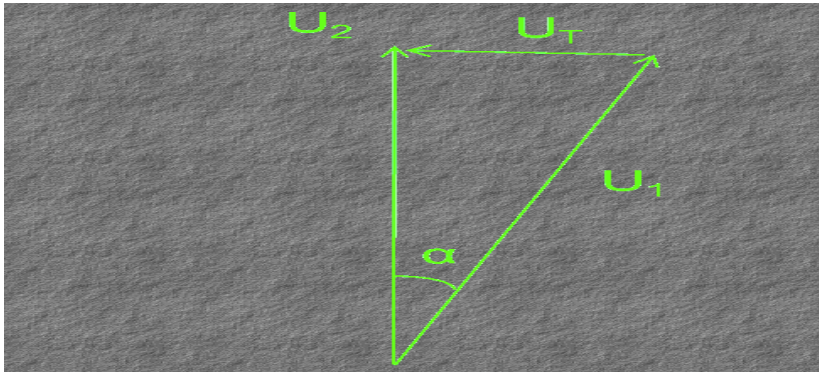


Figure (2.23) : Représentation vectorielle des tensions dans un transformateur déphaseur

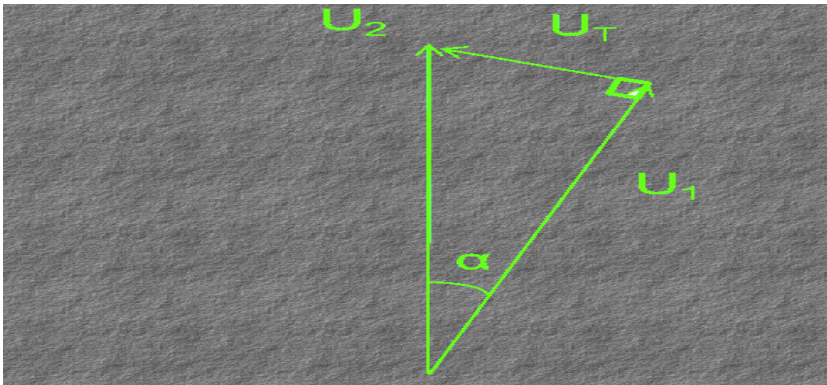


Figure (2.24) : Représentation vectorielle des tensions dans un QBT

TCPAR ou TCPST ou SPS est un transformateur déphaseur dont le changeur de prises est réalisé à base de thyristors afin de lui permettre de répondre aux régimes transitoires. Les changeurs de prises mécaniques sont en effet trop lents pour cet usage. Il ne peut pas générer ou absorber de la puissance réactive mais peut la répartir entre les phases, c'est un des désavantages du système. Même si leur principe est clair, ce système reste pour l'instant à l'état de projet.

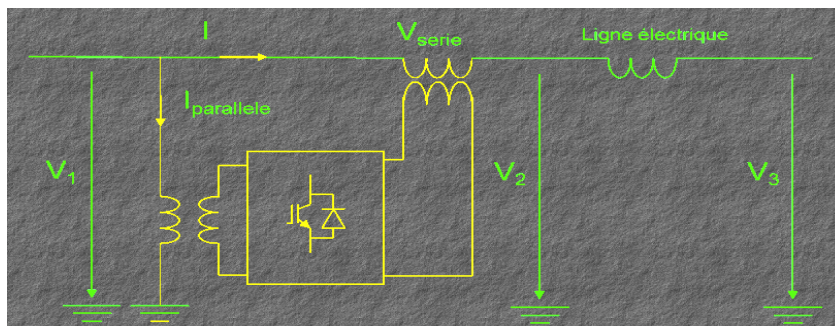


Figure (2.25) : Equivalent d'un TCPST

VFT est un transformateur rotatif, il permet de connecter deux réseaux asynchrones entre eux. Ce faisant, il peut régler l'angle de transport. C'est un transformateur triphasé à deux enroulements avec un secondaire tournant. General électricité défend l'idée que ce système est très fiable et nécessite peu de maintenance à cause de sa faible complexité. En cas de défaut sur l'un des deux réseaux connectés, le transfert de puissance n'est pas interrompu. Il a pour défaut de consommer de la puissance réactive, il faut donc y ajouter des bancs de capacités. Par ailleurs, il n'est pas dynamique à cause de l'inertie de son axe.

Transformateur Sen du nom de ses inventeurs, est un transformateur rotatif, il crée une impédance réglable en série sur la ligne, émulant ainsi soit une capacité, soit une inductance. Il permet également de régler l'angle de transport. Dispositif lent à la base, un changeur de prises à base de thyristor peut permettre, à la manière du TCPAR, de répondre aux phénomènes transitoires. Sinon un changeur de prises mécanique peut être construit.

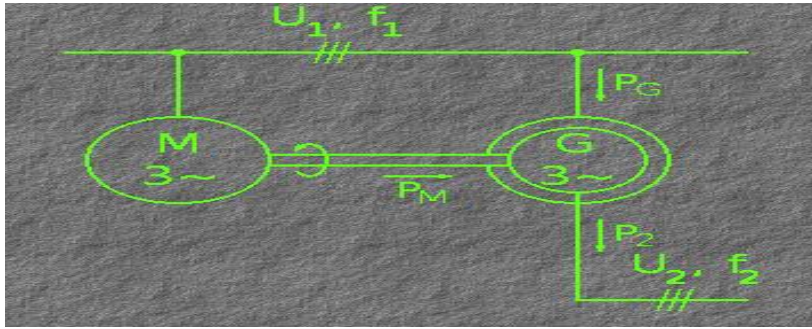


Figure (2.26) : Schéma d'un VTF

GUPFC Consiste en deux convertisseurs : 1 monté en shunt, et deux montés en série sur deux lignes électriques différentes dans un poste électrique.

Il permet de contrôler la tension, ainsi que la puissance active et réactive transitant sur les deux lignes. La puissance active est échangée entre les convertisseurs séries et parallèle à l'aide d'un élément en courant continu commun.

HVDC

Un **HVDC** dit : tête-bêche, dont les deux extrémités sont sur le même lieu et qui ne comporte donc pas de ligne de transmission à courant continu, peut être assimilé à un FACTS, puisque son unique rôle est de commander le transit de puissance entre deux réseaux alternatifs. Dans ce cas, il peut être appelé GPFC.

Ils peuvent être de deux types : soit à base de thyristors et donc commutés par les lignes, ils fonctionnent alors en source de courant, soit à base d'IGBT et donc auto commutée, ils fonctionnent alors en source de tension. Ces derniers convertisseurs permettent de contrôler indépendamment la puissance active et réactive, qui sont corrélées respectivement à l'angle de transport et à la tension de la station.

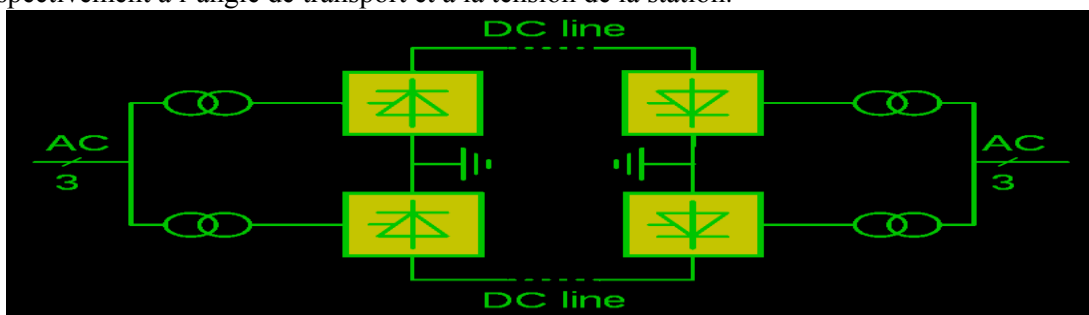


Figure (2.27) : Schéma d'une station HVDC bipolaire

8) Systèmes de stockage d'énergie :

Les systèmes de stockage temporaire d'énergie ne sont pas à proprement parler des FACTS, mais peuvent leur être combinés ou associés et participer à la qualité du réseau électrique.

BESS, stockage d'énergie par batterie, Généralement, les unités BESS sont relativement petites mais permettent un échange de puissance élevée. Leur capacité à ajuster rapidement la quantité d'énergie à fournir ou à absorber est utilisée pour la stabilité transitoire.

SMES : stockage d'énergie par inductance supraconductrice. Le **SMES** sert principalement au contrôle dynamique des transits de puissance dans le réseau électrique.

SCES : stockage d'énergie par super condensateur

KESS : stockage sous forme d'énergie cinétique

CAES : stockage d'énergie par air comprimé

9) Les Filtres :

Un autre avantage des transformateurs triphasés est de permettre de filtrer la troisième harmonique si leur couplage est étoile-triangle. Pour les TCR la logique est poussée plus loin, en installant un transformateur étoile-étoile-triangle, les TCR sont connectés au secondaire et au tertiaire. Dans ce cas, si les charges sont équilibrées les harmoniques 5 et 7 sont également filtrées.

Les **TCR** sont caractérisé par une forte production d'harmoniques d'ordre 5, 7, 11, 13.

Les **TSC** ne génèrent pas de distorsions. Bien que les condensateurs commutés par thyristors ne produisent eux-mêmes pas d'harmoniques, on a installé des réactances afin d'éviter l'amplification des harmoniques existantes dans le réseau.

Les **MCR** peuvent causer des harmoniques si le réacteur a un noyau de fer et qu'il sature. Les FACTS utilisant des technologies multi-niveaux à IGBT typiquement causent peu d'harmoniques. Pour limiter ces harmoniques, ou celles venant de l'extérieur, des filtres passe-haut ou passe-bas sont installés pour les limiter. Ils sont connectés aux jeux de barres par l'intermédiaire de disjoncteurs.

10) Equations de la puissance avec FACTS :

CSC

L'inductance du condensateur est notée X_c

En présence d'un CSC, les formules de la puissance active et réactive transmise deviennent

$$P_1 = V_1 * V_2 / X - X_c \sin \delta$$

$$Q_1 = V_1 * (V_1 - V_2 \cos(\delta)) / X - X_c$$

SVC

La susceptance du **SVC** est notée B_{SVC}

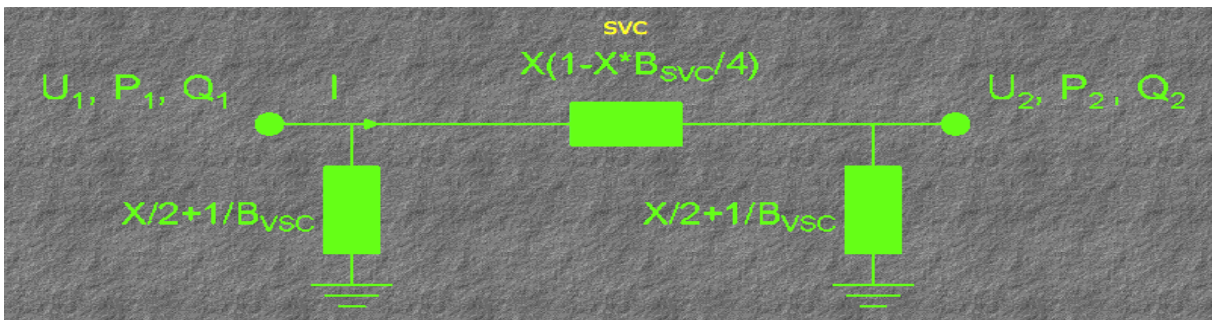


Figure (2.28) : Schéma équivalent d'un SVC après transformation de Kennelly

$$P_1 = V_1 * V_2 / X (1 - X * B_{SVC} / 4) \sin \delta$$

$$Q_1 = V_1 * (V_1 - V_2 \cos(\delta)) / X (1 - X * B_{SVC} / 4)$$

SVG ou STATCOM

$$P_1 = V_1 * V_2 / X * (1 + I_{SVG} * X / 2 * \sqrt{(U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\delta))}) \sin \delta$$

$$Q_1 = U_1^2 / X + -V_1 * V_2 \cos(\delta) / X + I_{SVG} / 2$$

On peut aussi écrire, que la puissance apportée par le **STATCOM** vaut

$$P_{STATCOM} = V_{STATCOM} * V_{\text{ligne}} / X_{STATCOM} * \sin(\delta_{STATCOM})$$

$$Q_{STATCOM} = V_{STATCOM}^2 / X_{STATCOM} - V_{STATCOM} * V_{\text{ligne}} / X_{STATCOM} * \cos(\delta_{STATCOM})$$

Transformateur déphaseur

$$P_1 = V_1 * V_2 / X \sin \delta U_T * V_2 / X \cos \delta$$

$$Q_1 = (U_1^2 + U_T^2 - U_2 * U_1 \cos(\delta) + U_2 * U_T \sin(\delta)) / X$$

SSSC

Avec la tension V_1 considérée égale à V_2

$$P_1 = V_1 * V_2 / X \sin \delta + V_1 * V_{SSSC} / X \cos(\delta / 2)$$

$$Q_1 = (V_1 * (V_1 - V_2 \cos(\delta)) / X - V_1 * (V_{SSSC} \sin(\delta / 2)) / X$$

La puissance apportée par le **SSSC** vaut

$$P_{SSSC} = V_{SSSC} * (V_2 \sin(\delta_2 - \delta_{SSSC}) - V_1 \sin((\delta_1 - \delta_{SSSC}) / X$$

$$Q_{SSSC} = -V_1 * (V_1 - V_{SSSC} \cos(\delta_1 - \delta_{SSSC}) + V_2(V_2 + V_{SSSC}(\delta_2 - \delta_{SSSC}) - 2V_1V_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)) / X$$

Avec δ_{SSSC} la phase de la tension produite par le **SSSC**

δ_1, δ_2 les phases respectivement en entrée et en sortie de la ligne

Si le **SSSC** n'échange aucune puissance active avec le réseau la première équation donne

$$0 = V_2 \sin(\delta_2 - \delta_{SSSC}) - V_1 \sin(\delta_1 - \delta_{SSSC})$$

Autrement dit, la tension du SSSC, la tension série injectée doit être toujours orthogonale au courant de la ligne pour assurer une pure compensation réactive

IPC

$$\begin{aligned}P_1 &= U_1 U_2 / X_{IPC} \cos (\delta + \alpha_{IPC}) \\Q_1 &= U_1 U_2 / X_{IPC} \sin (\delta + \alpha_{IPC}) - U_1^2 X / X_{IPC}^2 \\Q_2 &= U_1 U_2 / X_{IPC} \sin (\delta + \alpha_{IPC})\end{aligned}$$

UPFC

$$\begin{aligned}U_M &= \sqrt{U_1 U_2 + U_T U_2 + 2 * U_1 * U_T \cos (\Phi_T - \delta)} \\ \alpha &= \arctan (U_T * \sin (\Phi_T - \delta) / U_1 + U_T \cos (\Phi_T - \delta)) \\ P_1 &= V_1 * U_M / X \sin \delta + \alpha \\ Q_1 &= U_M / X (U_M - U_2 \cos (\delta + \alpha) + U_T \sin (\delta + \alpha) + X * I_q)\end{aligned}$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de dispositifs FACTS shunt série et hybride, leur technologie et mode de fonctionnement. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation et le contrôle du compensateur hybride UPFC le plus parfait FACTS.

Chap. : (III)

MODELISATION

& CONTRÔLE-COMMANDE D'UN

UPFC

(Unified Power Flow Controller)

« Le rire c'est comme les essuie-glaces, il permet d'avancer même s'il n'arrête pas la pluie »

G.Jugno

III. Introduction :

Gyugyi a présenté le concept de l'UPFC (ou variateur de charge universel) en 1991. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique : la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport. Comparativement à d'autres types de FACTS, l'UPFC est capable d'améliorer la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance, la répartition du flux d'énergie et le réglage de tension. L'objectif de ce chapitre est de décrire les principes fondamentaux d'un UPFC

L'UPFC se compose de deux onduleurs à source de tension à éléments entièrement commutables (GTO, IGBT) qui sont connectés à travers un lien continu commun (DC-Link). L'un, monté en shunt, appelé STATCOM (statique compensateur), injecte un courant presque sinusoïdal de grandeur réglable. Le second, monté en série, appelé SSSC (statique séries synchrones compensateur), injecte en série une tension presque alternative avec une amplitude et un angle de phase réglables dans la ligne de transport. Chaque onduleur peut permuter la puissance réactive nécessaire localement, et de produire la puissance active comme résultat de l'injection en série d'une tension. La fonction fondamentale de l'onduleur shunt (ond1) est de fournir ou d'absorber la puissance active demandée par l'onduleur série (ond2) à travers la liaison DC commune. Il peut aussi produire ou absorber la puissance réactive selon la demande et assurer un support à la tension au point de connexion du réseau

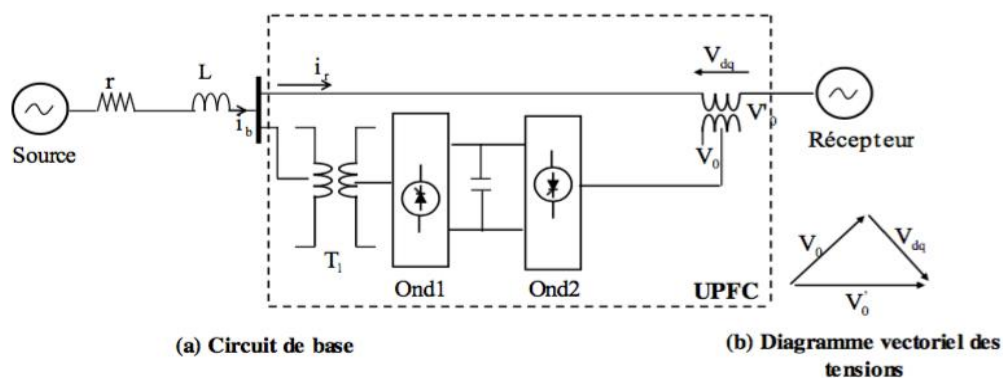


Figure (3.1) : Variateur de Charge Universel

L : inductance de la ligne.

R : résistance de la ligne.

V₀ : tension de la ligne de transmission.

1. Fonctionnement de l'U.P.F.C

L'onduleur (2) fournit la fonction principale de l'UPFC, en injectant une tension V_{dq} à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase sont ajustables [$(0 < V_{dq} < V_{dq \text{ max}})$ et $(0 < \rho < 360^\circ)$] (figure 3-1. B). Ainsi, on peut modifier statiquement les puissances active et réactive transmises par la ligne de transmission.

En général, la valeur maximale de la tension additionnelle est de 20% à 30% de la tension V_0 . Le variateur de charge universel doit être dimensionné par rapport à cette tension et au courant transmis. Le réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

1. Contrôle de tension : la tension injectée V_{dq} est en phase avec la tension V_0 (figure 3-2. A).
2. Contrôle de l'impédance de la ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne I_r . Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série (figure 3-2. d) ; on a $V_{dq} = V_c$.
3. Contrôle de phase : si la tension V_{dq} est injectée avec un angle variable alors que l'amplitude de la tension V_0 reste constante (figure 3-2.c) ; on a $V_{dq} = V_\sigma$.

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances active et réactive qui transitent dans la ligne. De plus l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations (figure 3-2. d) et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre

on a: $V_{dq} = V_c + \Delta V + V_0 + V_\sigma$.

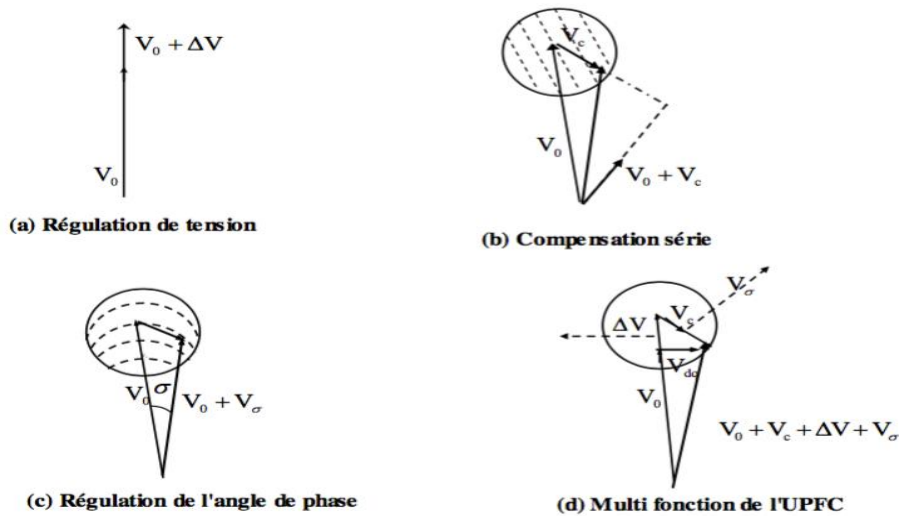


Figure (3.2) : Contrôle de base de fonctionnement de l'UPFC

L'énorme avantage de L'UPFC est bien sûr la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport, et de l'impédance de la ligne avec un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ces onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions. Il pourra alterner différentes fonctions, par exemple la fonction série pourra être utilisée afin d'amortir les oscillations de puissance alors que la partie shunt pourra être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud de connexion et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série

2. Principe de contrôle de base des puissances active et réactive

Considérons le système simple de deux machines montré dans la figure 3-3. A

Avec : V_s : tension coté générateur.

V_r : tension coté récepteur.

X : réactance inductive de la ligne.

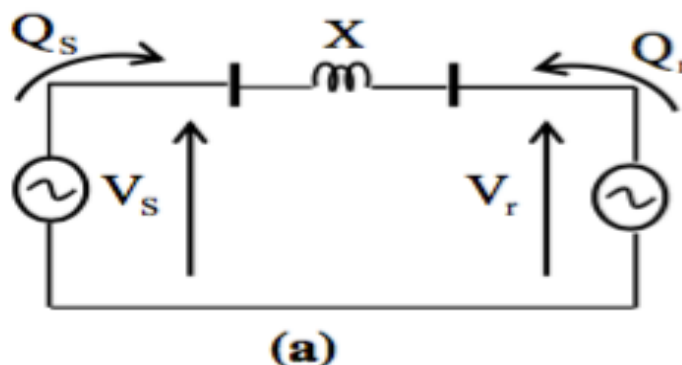
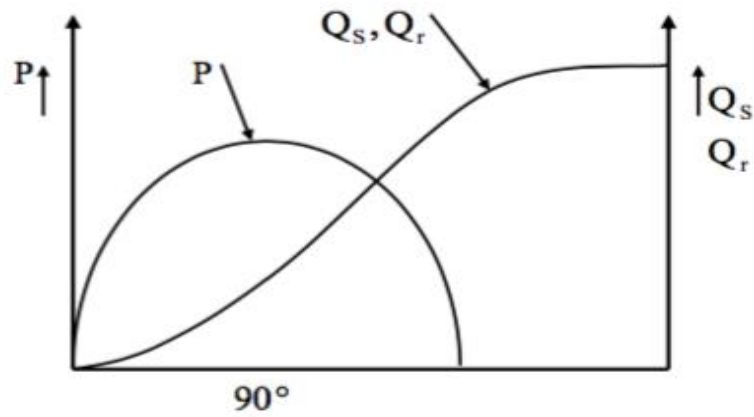


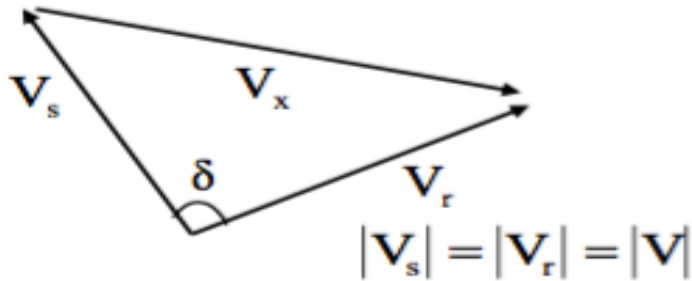
Figure (3.3) : A) système à deux machines.

D'après cette figure :



b) puissances active et réactive en fonction de l'angle de transmission.

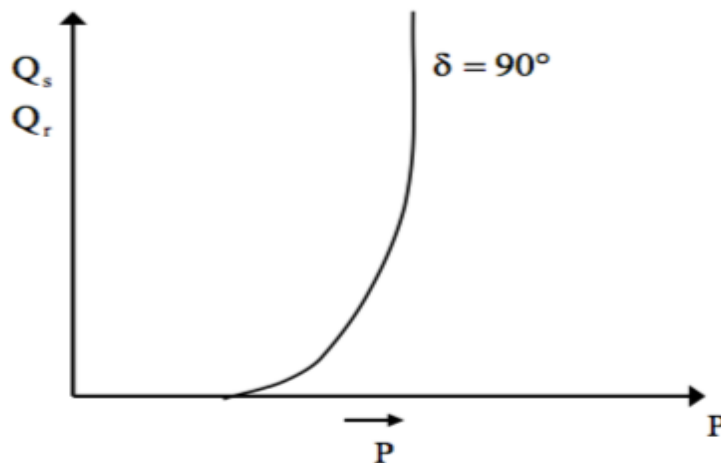
La puissance électrique transmise $P = (V^2/X) \sin \delta$ et la puissance réactive $Q = Q_s = Q_r = V^2/(1 - \cos \delta)$ assurée aux extrémités de la ligne sont montrées en fonction de l'angle δ



(c)
$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta$$

c) diagramme de phase des tensions.

Les tensions du système sont représentées dans le diagramme vectoriel en fonction de l'angle de transport δ .



d) la puissance réactive de source et du récepteur en fonction de la Puissance active transmise.

A puissance réactive ($Q = Q_s = Q_r$) est montrée en fonction de la puissance active transmissible P correspondant aux valeurs stables de ($0 \leq \delta \leq 90^\circ$).

3. Modélisation de L'UPFC :

Nous allons modéliser les équations du système physique afin de pouvoir le contrôler. Le modèle simple de l'UPFC peut être représenté sous la forme suivante :

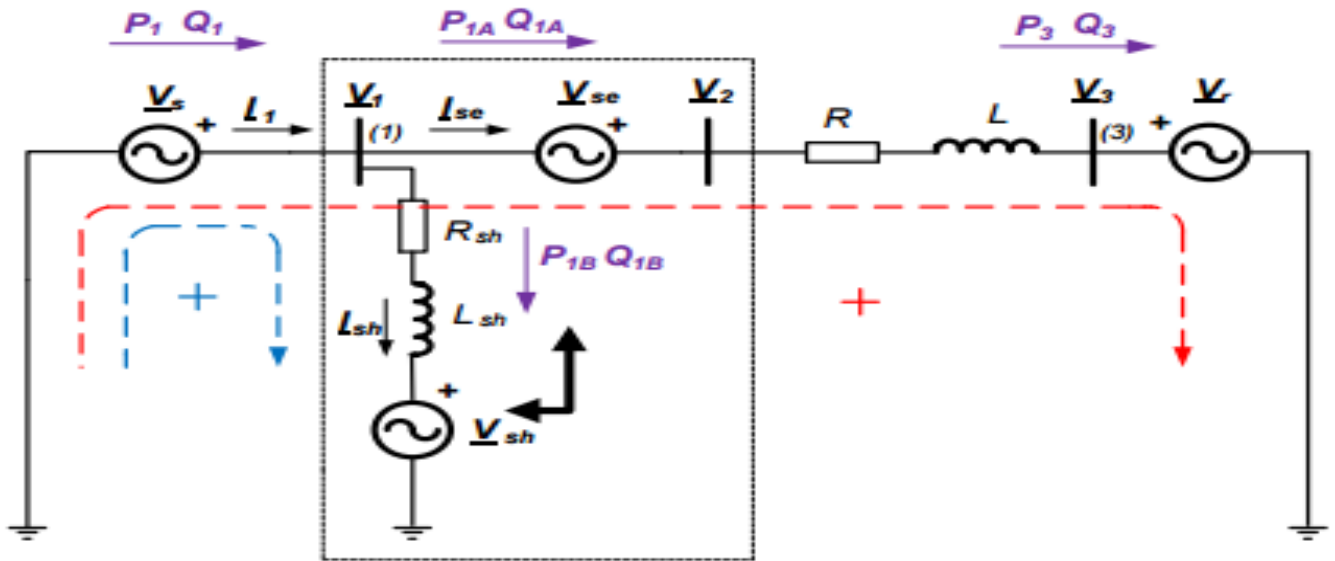


Figure 3-4. Représentation d'un UPFC branché au réseau en vue de sa modélisation.

On va considérer que :

- ◆ Le circuit est équilibré.
- ◆ La résistance Rse et l'inductance Lse de l'ensemble du convertisseur, du transformateur et du filtre sont prises nulles. En réalité, elles sont incluses dans les valeurs de la résistance R et de l'inductance L de la ligne.
- ◆ La résistance Rsh et l'inductance Lsh représentent la résistance et l'inductance de l'ensemble constitué du convertisseur shunt et de la ligne shunt.
- ◆ Les modules des vecteurs des tensions Vs et Vr sont les mêmes ($\|V_s\| = \|V_r\|$).
- ◆ On choisit l'angle du vecteur tension Vr comme angle de référence. Cela signifie que $V_r = V_r$ et que

$$V_s = V_s e^{j0}$$

- ◆ Les potentiels Vs et V1 sont les mêmes ($V_s = V_1$).
- ◆ Les potentiels Vr et V3 sont les mêmes ($V_r = V_3$).
- ◆ La réactance totale de la ligne se trouve d'un seul côté du convertisseur (à droite), car l'UPFC se trouve à proximité de la source Vs.
- ◆ Les pertes internes de l'UPFC sont négligées.

La puissance active dont a besoin le compensateur série est fournie par le compensateur shunt via le DC-Link. Dans la Figure (3-3), la tension Vse injectée/absorbée par le compensateur série correspond à la différence entre les tensions V2 et V1 (3-1). L'intensité Ish fournie/absorbée par le convertisseur shunt est la différence entre les courants I1 et Ise (3-2)

$$V_{se} = V_2 - V_1 \quad (3-1)$$

$$I_{sh} = I_1 - I_{se} \quad (3-2)$$

4. Modélisation de la partie série (SSSC) :

Nous allons écrire sous forme vectorielle les équations électriques du circuit série. Pour cela nous appliquons la deuxième loi de Kirchhoff en considérant le sens horaire (signalé en rouge) comme sens provisoire du courant.

On obtient alors l'équation suivante :

$$V_s + V_{se} - RI_{se} - L \frac{dI_{se}}{dt} - V_r = 0 \quad (3-3)$$

Cette équation (3-3) peut être exprimée dans le référentiel abc sous la forme :

$$V_s(abc) + V_{se}(abc) - V_r(abc) - RI_{se}(abc) - L \frac{dI_{se}(abc)}{dt} = 0 \quad (3-4)$$

L'équation (3-4) peut se réécrire sous forme matricielle de la manière suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sea} \\ I_{seb} \\ I_{sec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{sea} \\ I_{seb} \\ I_{sec} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sa} - V_{ra} + V_{sea} \\ V_{sb} - V_{rb} + V_{seb} \\ V_{sc} - V_{rc} + V_{sec} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

L'équation peut être aussi s'exprimer en fonction des coordonnées statiques $\alpha\beta$:

$$\begin{aligned} V_{s\alpha} + V_{se\alpha} - R I_{se\alpha} - L \frac{dI_{se\alpha}}{dt} - V_{r\alpha} &= 0 \\ V_{s\beta} + V_{se\beta} - R I_{se\beta} - L \frac{dI_{se\beta}}{dt} - V_{r\beta} &= 0 \end{aligned} \quad (3-6)$$

En passant au référentiel (d_q) avec la transformation de Park Deux termes de couplage ($\omega L I_{seq}$ et $\omega L I_{sed}$) liés à la rotation induite par la transformation de Park apparaissent dans les équations (3-7) et (3-8).

$$V_{sd} + V_{sed} - V_{rd} - R I_{sed} - L \frac{dI_{sed}}{dt} + \omega L I_{seq} = 0 \quad (3-7)$$

$$V_{sq} + V_{seq} - V_{rq} - R I_{seq} - L \frac{dI_{seq}}{dt} - \omega L I_{sed} = 0 \quad (3-8)$$

Sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{rd} + V_{sed} \\ V_{sq} - V_{rq} + V_{seq} \end{bmatrix} \quad (3-8.A)$$

Si on tient compte de l'égalité des tensions V_s et V_1 ($V_s = V_1$) et des tensions V_r et V_3 ($V_r = V_3$), les équations précédentes peuvent s'exprimer sous la forme suivante :

$$\frac{dI_{sed}}{dt} = \frac{1}{L} [V_1 d + V_{sed} - V_3 d] - \frac{R}{L} I_{sed} + \omega L I_{seq} \quad (3-9)$$

$$\frac{dI_{seq}}{dt} = \frac{1}{L} [V_1 q + V_{seq} - V_3 q] - \frac{R}{L} I_{seq} - \omega L I_{sed} \quad (3-10)$$

Nous appliquons ensuite la transformation de Laplace à ces équations. Cette transformation fournit les relations suivantes :

$$I_{sed}(P) = \frac{1}{P} \left[\frac{1}{L} (V_1 d - V_3 d + V_{sed}) - \frac{R}{L} I_{sed}(P) + \omega L I_{seq}(P) \right] \quad (3-11)$$

$$I_{seq}(P) = \frac{1}{P} \left[\frac{1}{L} (V_1 q - V_3 q + V_{seq}) - \frac{R}{L} I_{seq}(P) - \omega L I_{sed}(P) \right] \quad (3-12)$$

Les expressions des courants du convertisseur série peuvent être réécrites dans le domaine de Laplace sous la forme suivante :

$$I_{sed}(P) = \frac{1}{P + \frac{R}{L}} \left[\frac{1}{L} (V_1 d - V_3 d + V_{sed}) + \omega L I_{seq}(P) \right] \quad (3-13)$$

$$I_{seq}(P) = \frac{1}{P + \frac{R}{L}} \left[\frac{1}{L} (V_1 q - V_3 q + V_{seq}) - \omega L I_{sed}(P) \right] \quad (3-14)$$

Ces équations correspondent à notre modèle de convertisseur série. Elles seront utilisées pour construire, sous Simulink, le bloc qui représente la partie série du système. De ce fait, les équations (3-11) et (3-12) sont représentées par le schéma bloc suivant :

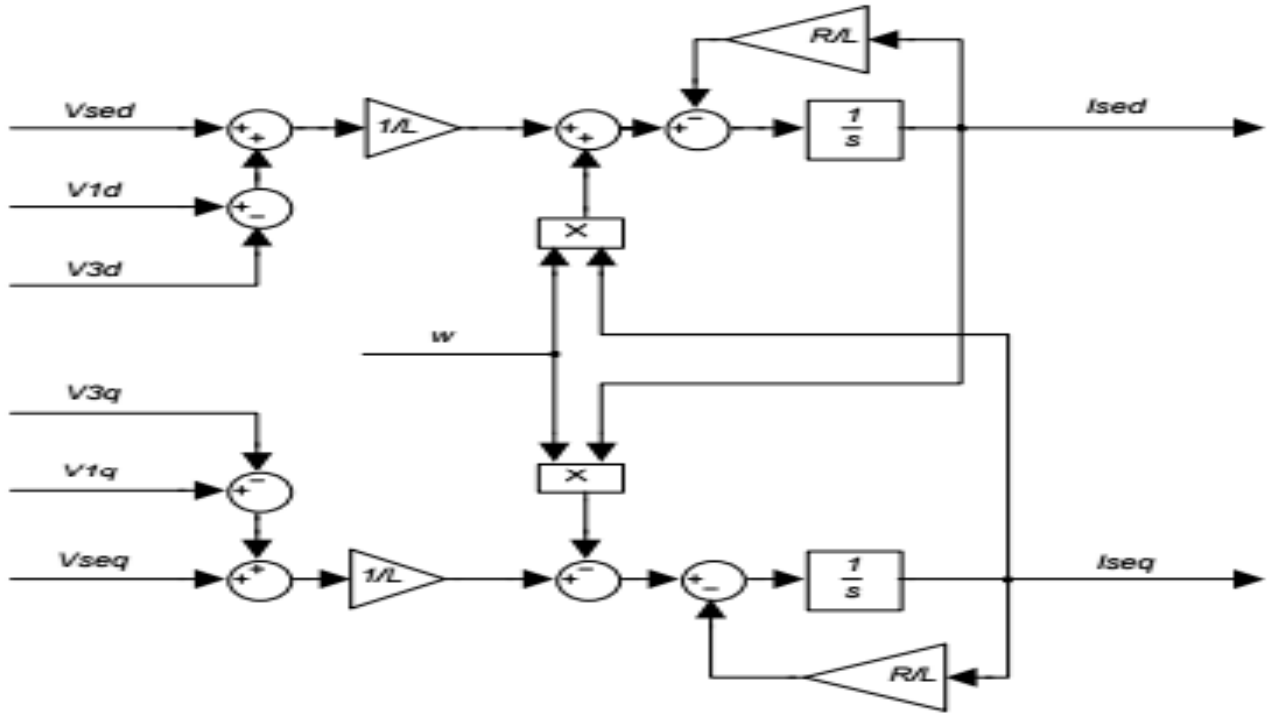


Figure 3-5 Schéma bloc du convertisseur série

5. Modélisation de la partie shunt(STATCOM) :

En utilisant la même méthode, les équations électriques du circuit shunt présentées dans la Figure 3-4 peuvent être écrites sous forme vectorielle. Pour cela, nous appliquons la deuxième loi de Kirchhoff en choisissant le sens horaire (signalé en bleu) comme sens provisoire du courant. On obtient alors, pour chaque phase, l'équation suivante :

$$\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_{sh} - R_{sh} \mathbf{I}_{sh} - L_{sh} \frac{d\mathbf{I}_{sh}}{dt} = \mathbf{0} \quad (3-15)$$

L'équation (3-15) peut être exprimée dans le référentiel abc sous la forme :

$$\mathbf{V}_s(abc) - \mathbf{V}_{sh}(abc) - R_{sh} \mathbf{I}_{sh}(abc) - L_{sh} \frac{d\mathbf{I}_{sh}(abc)}{dt} = \mathbf{0} \quad (3-16)$$

En passant à la forme matricielle, on obtient la relation suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{sa} - V_{sha} \\ V_{sb} - V_{shb} \\ V_{sc} - V_{shc} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme (transformation de Park), Deux termes de couplage (ωL_{shq} et ωL_{shd}) liés à la rotation induite par la transformation de Park. On obtient alors le couple d'équations suivant :

$$\mathbf{V}_{sd} - \mathbf{V}_{shd} - R_{sh} \mathbf{I}_{shd} - L_{sh} \frac{d\mathbf{I}_{shd}}{dt} + \omega L_{sh} \mathbf{I}_{shq} = \mathbf{0} \quad (3-18)$$

$$\mathbf{V}_{sq} - \mathbf{V}_{shq} - R_{sh} \mathbf{I}_{shq} - L_{sh} \frac{d\mathbf{I}_{shq}}{dt} - \omega L_{sh} \mathbf{I}_{shd} = \mathbf{0} \quad (3-19)$$

Sous forme matricielle on écrit le système du STATCOM comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & +\omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{shd} \\ V_{sq} - V_{shq} \end{bmatrix}$$

Si on tient compte que $V_s = V_1$, le système d'équations précédent peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$\frac{d\mathbf{I}_{shd}}{dt} = \frac{1}{L_{sh}} [\mathbf{V}_1 \mathbf{d} - \mathbf{V}_{shd}] - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \mathbf{I}_{shd} + \omega L_{sh} \mathbf{I}_{shq} \quad (3-20)$$

$$\frac{dI_{shq}}{dt} = \frac{1}{L_{sh}} [V1q - V_{shq}] - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shq} - \omega L_{sh} I_{shd} \quad (3-21)$$

Nous lui appliquons ensuite la transformation de Laplace. Nous obtenons ainsi les équations suivantes :

$$I_{shd}(P) = \frac{1}{P} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V1d - V_{shd}) - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd}(P) + \omega L_{sh} I_{shq}(P) \right] \quad (3-22)$$

$$I_{shq}(P) = \frac{1}{P} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V1q - V_{shq}) - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shq}(P) - \omega L_{sh} I_{shd}(P) \right] \quad (3-23)$$

Les expressions des intensités du convertisseur shunt peuvent aussi s'écrire sous la forme suivante :

$$I_{shd}(P) = \frac{1}{P + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V1d - V_{shd}) + \omega I_{shq}(P) \right] \quad (3-24)$$

$$I_{shq}(P) = \frac{1}{P + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V1q - V_{shq}) - \omega I_{shd}(P) \right] \quad (3-25)$$

Le système d'équations ainsi obtenu correspond au modèle du convertisseur shunt que nous allons utiliser pour construire, sous Simulink, le bloc qui représente la partie shunt du système. De ce fait, les équations (3-22) et (3-23) sont représentées par le schéma bloc suivant.

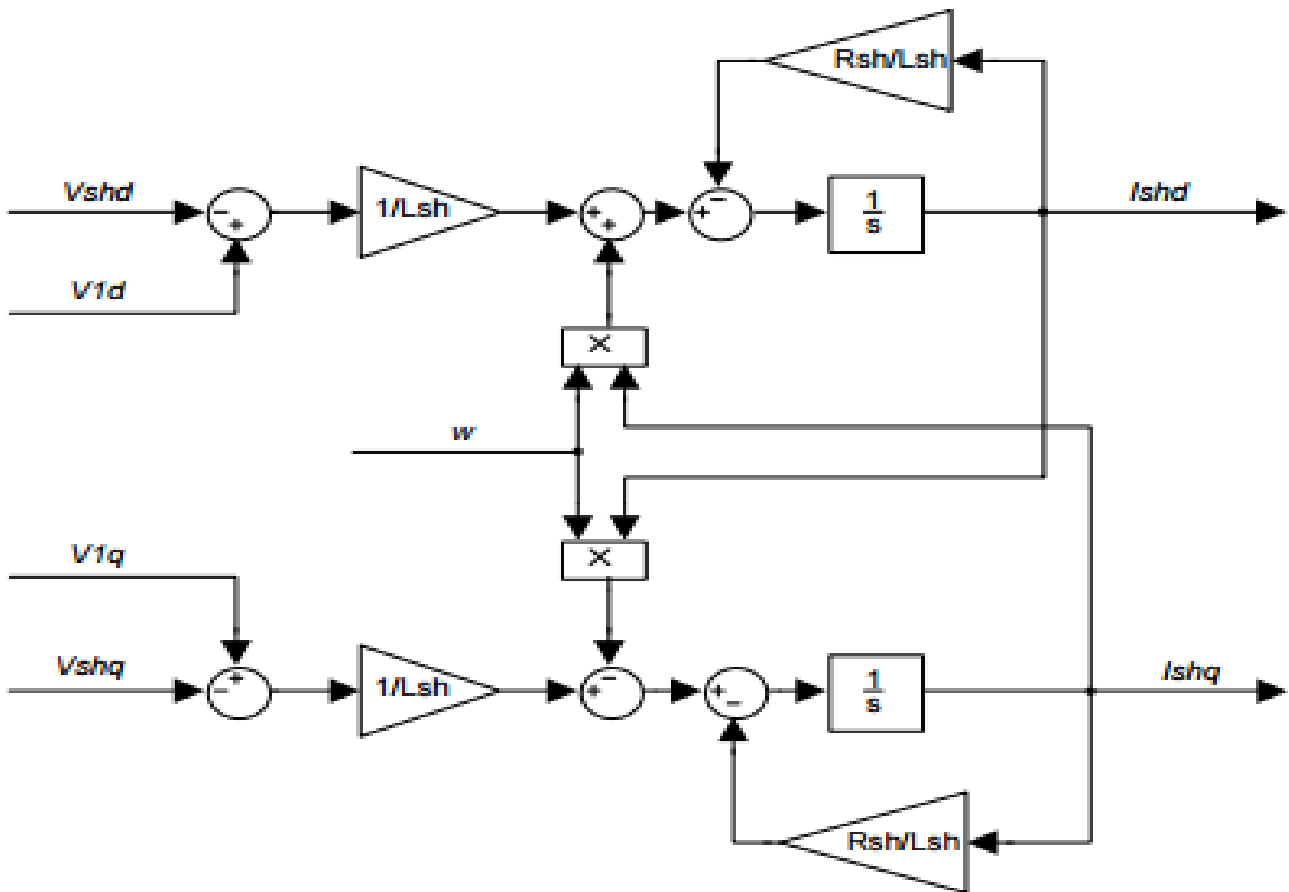


Figure 3-6. Schéma bloc convertisseur shunt

6. Modélisation de (DC Link) :

Le DC-Link relie le convertisseur série et le convertisseur shunt de l'UPFC. Pour modéliser le DC-Link, nous utiliserons le modèle monophasé du convertisseur suivant.

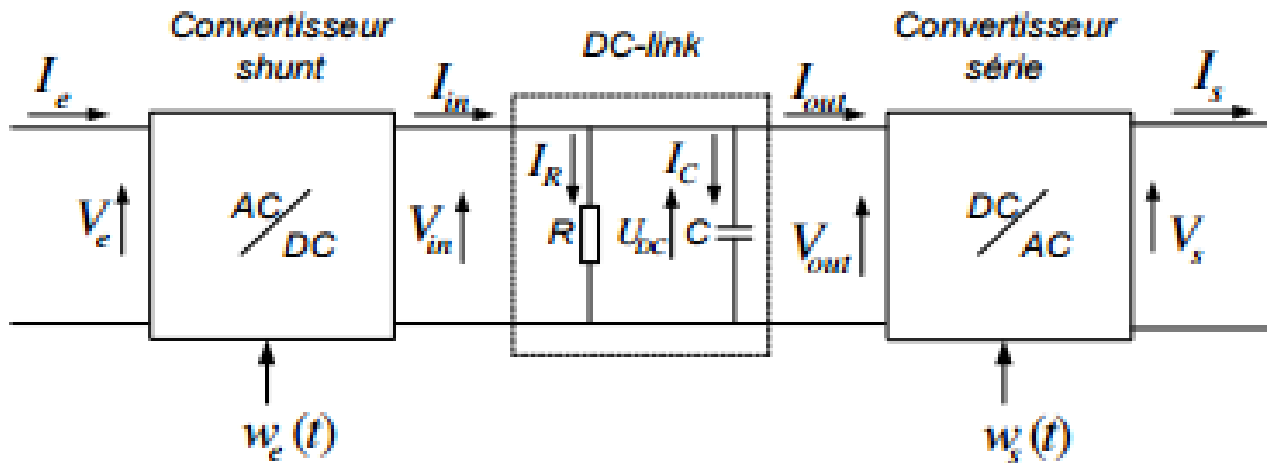


Figure 3-7 Schéma du DC-Link de l'UPFC

Nous allons d'abord définir les relations d'entrée/sortie de nos convertisseurs. On va les assimiler à un quadripôle dont la fonction de modulation $w(t)$ (relie leurs entrées et leurs sorties de la façon suivante :

♦ **Pour le convertisseur shunt**

L'équation vérifiée par le quadripôle est la suivante :

$$\begin{bmatrix} I_e \\ V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{w_e(t)} & 0 \\ 0 & w_e(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

Dans la matrice carrée, en raison de l'indépendance du courant I_e vis-à-vis de la tension V_{in} , le terme croisé $M(12)$ est nul ($M(12) = 0$). Comme le courant I_{in} ne dépend pas non plus de la tension V_e , le terme croisé $M(21)$ est également nul ($M(21) = 0$). Les termes de l'équation (3-26) peuvent être réécrits sous la forme suivante :

$$V_e = w_e(t) V_{in} \quad (3-27)$$

$$I_e = \frac{1}{w_e(t)} I_{in} \quad (3-28)$$

Dans ce quadripôle, la puissance instantanée est conservée. La relation suivante est donc vérifiée :

$$I_e V_e = I_{in} V_{in}$$

♦ **Pour le convertisseur série**

De la même façon que pour le shunt, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{w_s(t)} & 0 \\ 0 & w_s(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{out} \\ V_{out} \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

Dans la matrice carrée, comme le courant I_s ne dépend pas de la tension V_{out} , le terme croisé $M(12)$ est nul ($M(12) = 0$). De même, le courant I_{out} étant indépendant de la tension V_s , le terme croisé $M(21)$ est nul ($M(21) = 0$).

Les termes de l'équation (3-29) peuvent être réécrits sous la forme suivante :

$$V_s = w_s(t) V_{out} \quad (3-30)$$

$$I_s = \frac{1}{w_s(t)} I_{out} \quad (3-31)$$

Dans ce quadripôle, la puissance instantanée est conservée. La relation suivante est donc vérifiée :

$$I_s V_s = I_{out} V_{out}$$

Les équations vérifiées par le DC-Link présenté à la Figure 3-7 sont les suivantes :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} I_c$$

$$I_c = I_{in} - I_R - I_{out}$$

$$I_R = \frac{V_{in}}{R} \quad (3-32)$$

En raison de l'égalité des tensions U_{dc} , V_{in} et V_{out} ($U_{dc} = V_{in} = V_{out}$), on obtient, à partir des équations (3-32),

l'expression de U_{dc} suivante :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{1}{RC}U_{dc} + \frac{1}{C}I_{in} - \frac{1}{C}I_{out} \quad (3-33)$$

L'équation précédente peut être exprimée en fonction des courants I_e et I_s observés des parties alternatives à travers les fonctions de modulation des intensités.

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{1}{RC}U_{dc} + \frac{1}{C}W_e(t)I_e - \frac{1}{C}W_s(t)I_s \quad (3-34)$$

Si, dans l'équation précédente, nous remplaçons les termes $w_e(t)$ et $w_s(t)$ par la fonction modulation des tensions, on obtient la relation suivante :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{1}{RC}U_{dc} + \frac{1}{C} \frac{V_e}{U_{dc}} I_e - \frac{1}{C} \frac{V_s}{U_{dc}} I_s \quad (3-35)$$

Mais, comme les puissances actives du côté shunt et série ont pour valeurs respectives $P_{sh}=P_e=V_eI_e$ et $P_{se}=P_s=V_sI_s$, on peut écrire :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{1}{RC}U_{dc} + \frac{1}{C} \frac{P_{sh}}{U_{dc}} - \frac{1}{C} \frac{P_{se}}{U_{dc}} \quad (3-36)$$

En multipliant à gauche et à droite, l'équation (3-36) par U_{dc} , on aura :

$$U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{1}{RC}(U_{dc})^2 + \frac{1}{C}P_{sh} - \frac{1}{C}P_{se} \quad (3-37)$$

Si nous appelons $Z = (U_{dc})^2$, la dérivée de Z sera $\frac{dz}{dt} = 2U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt}$. La relation (3-37) devient :

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{2}{RC}z + \frac{2}{C}P_{sh} - \frac{2}{C}P_{se} \quad (3-38)$$

En remplaçant Z par $(U_{dc})^2$, on obtient l'équation finale suivante :

$$\frac{d(U_{dc})^2}{dt} = -\frac{2}{RC}(U_{dc})^2 + \frac{2}{C}(P_{sh} - P_{se}) \quad (3-39)$$

Si on regarde l'équation (3-39), on voit que la puissance active fait varier la tension du condensateur. La variation de tension du condensateur dépend donc du transfert de la puissance active.

Nous allons utiliser l'équation (3-39) dans MATLAB/SIMULINK pour former un bloc ayant la forme suivante :

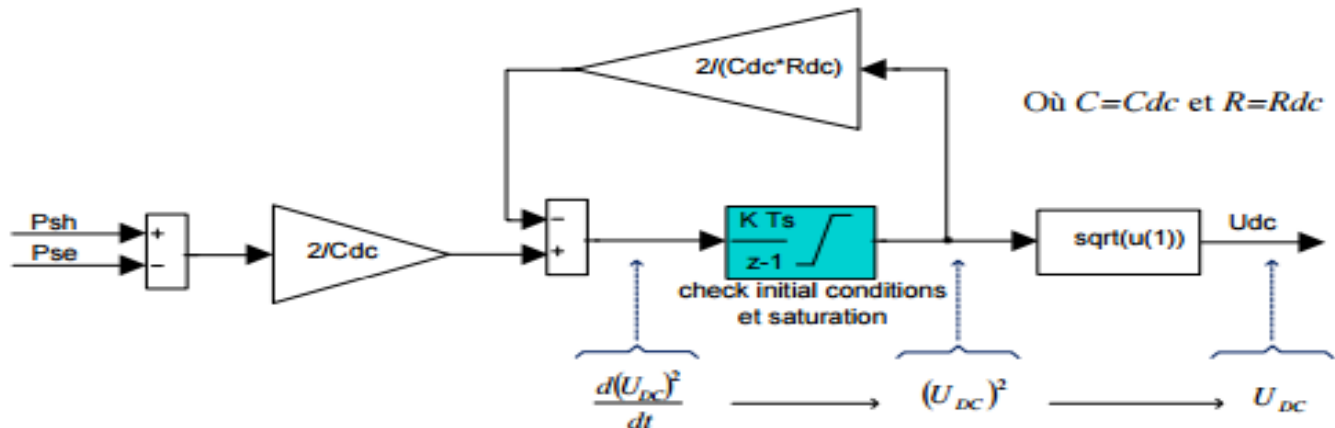


Figure 3-8 Schéma bloc du DC-Link

7. Synthèse des correcteurs :

Dans ce paragraphe, on va décrire avec plus de détails la synthèse du système de contrôle avec un correcteur PI. Le correcteur PI est le correcteur le plus classiquement utilisé pour le contrôle /commande des systèmes continus et discrets. Il est composé de deux termes (3-40) : un terme proportionnel et un terme intégral. Ce correcteur est présenté à la Figure 3-9.

$$C_{pi}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (3-40)$$

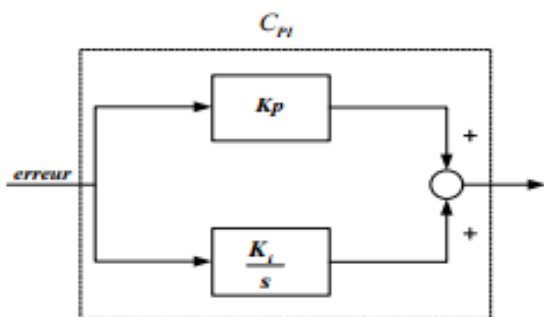


Figure 3-9 Correcteur Proportionnel Intégrateur (PI)

Le correcteur PI classique comme le correcteur P n'est pas bien adapté pour les applications de commande des signaux alternatifs. Par conséquent, la solution qu'on va adopter consiste à utiliser les correcteurs PI dans un référentiel tournant déterminé avec la transformation de Park. Ainsi, si le repère tourne à la même vitesse et dans le même sens que le phaseur équivalent du courant, les projections du courant dans ces repères seront vues comme des signaux continus. Dans cette configuration le correcteur PI pourra très bien éliminer l'erreur statique du système.

C'est pour cela qu'on va utiliser des référentiels tournants obtenus par les transformations de Clarke/Concordia ($abc \rightarrow \alpha\beta$) et le changement de rotation ($\alpha\beta \rightarrow dq$). Pour réaliser ces transformations, l'estimation de la phase du vecteur spatial de la tension est une étape-clé, car il est extrêmement important d'avoir une valeur très précise de l'angle θ . Cette valeur sera calculée au moyen d'un système de synchronisation appelé PLL ou Phase Lock Loop. Le fonctionnement de la PLL est expliqué en annexe

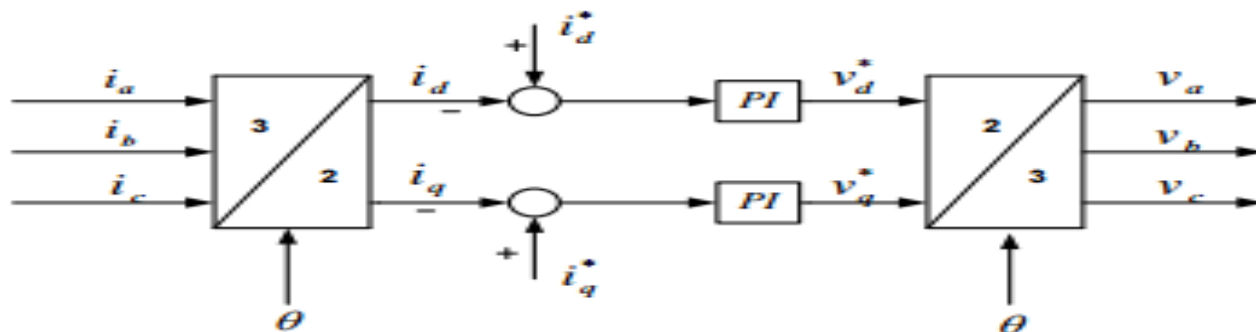


Figure 3-10 Contrôle du courant avec un correcteur PI en repère tournant

Nous allons montrer de quelle façon le modèle de notre système peut être simplifié afin de réaliser la synthèse du correcteur PI. De ce fait, nous allons partir de notre modèle « complet » établi dans le référentiel dq. Puis nous allons introduire les considérations sur le découplage ainsi que la prise en compte des perturbations, pour finalement aboutir sur un modèle simplifié qui permettra la synthèse du correcteur PI.

Dans le cas général, la partie parallèle de l'UPFC compense la puissance réactive au point de raccordement et régule la tension aux bornes du condensateur. La régulation de la tension continue compense la puissance active demandée par la partie série et bien évidemment les pertes des onduleurs et des transformateurs. Il faut déterminer les références pour commander le dispositif. Il existe plusieurs méthodes d'identification des références, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Méthode basée sur le principe du courant actif
- Méthode Watt-Var Découplé
- Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Nous avons choisi la méthode Watt-Var Découplé pour notre commande

Modèle « complet » dans le référentiel dq. Le schéma de la Figure 3-11 représente le système de commande composé :

- ◆ Du modèle du système établi dans le repère dq,
- ◆ Du bloc de découplage des grandeurs,
- ◆ Du bloc associé à notre correcteur PI.

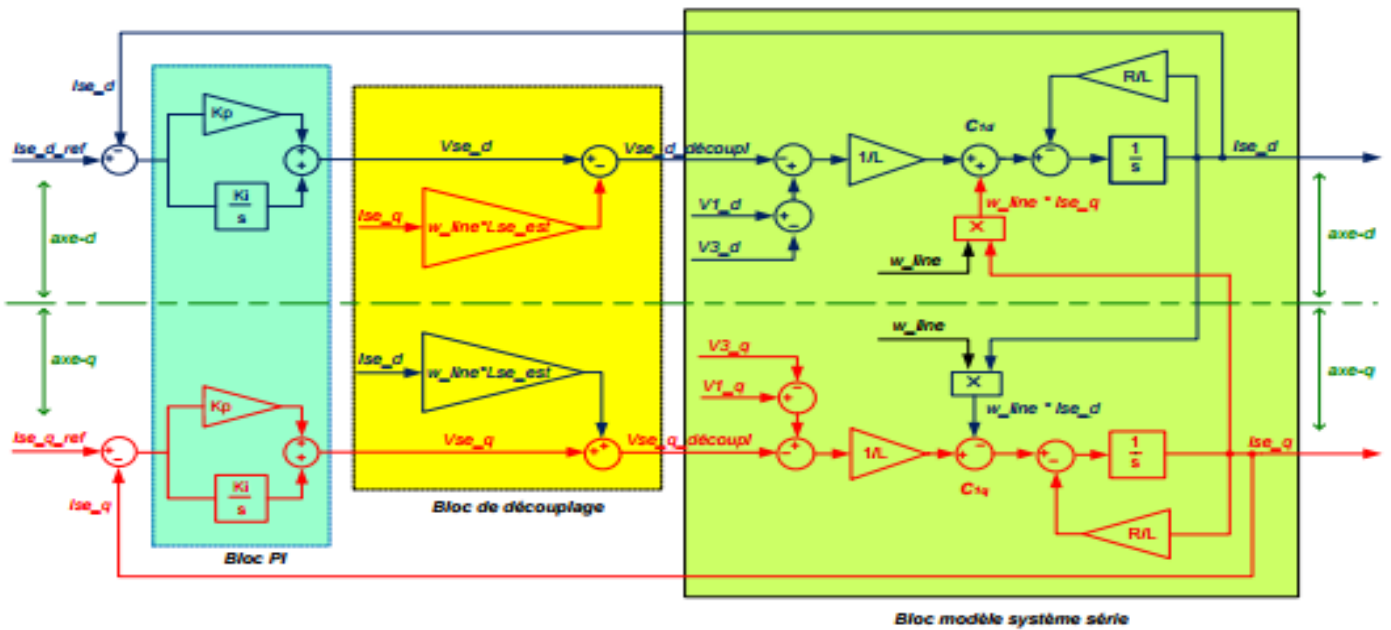


Figure 3-11 Schéma d'ensemble : blocs du correcteur PI, de découplage et du système série

Dans le schéma précédent, il existe un effet de couplage et un effet dû à les perturbations

Découplage

Le découplage est utilisé dans les circuits série et shunt de notre système. Nous allons décrire son principe lorsqu'il est appliqué au circuit série en sachant que, pour le circuit shunt, le principe est le même. Quand nous sommes passés des équations du repère abc (3-4) aux équations dans le repère dq (3-7) et (3-8) avec la transformation de Park, deux termes de couplage ($\omega L I_{seq}$ et $\omega L I_{sed}$) sont apparus. On trouve ainsi sur l'axe d des termes de couplage avec I_{seq} et sur l'axe q des termes de couplage avec I_{sed} . Sur la Figure 3-10, nous avons représenté le schéma bloc du circuit série avec l'axe-d en bleu et l'axe-q en rouge. On peut ainsi constater que les axes d et q ne sont pas indépendants : l'axe-d est relié à l'axe-q par les valeurs $w_line * I_{se_q}$ tandis que l'axe q est relié à l'axe-d par les valeurs $w_line * I_{se_d}$.

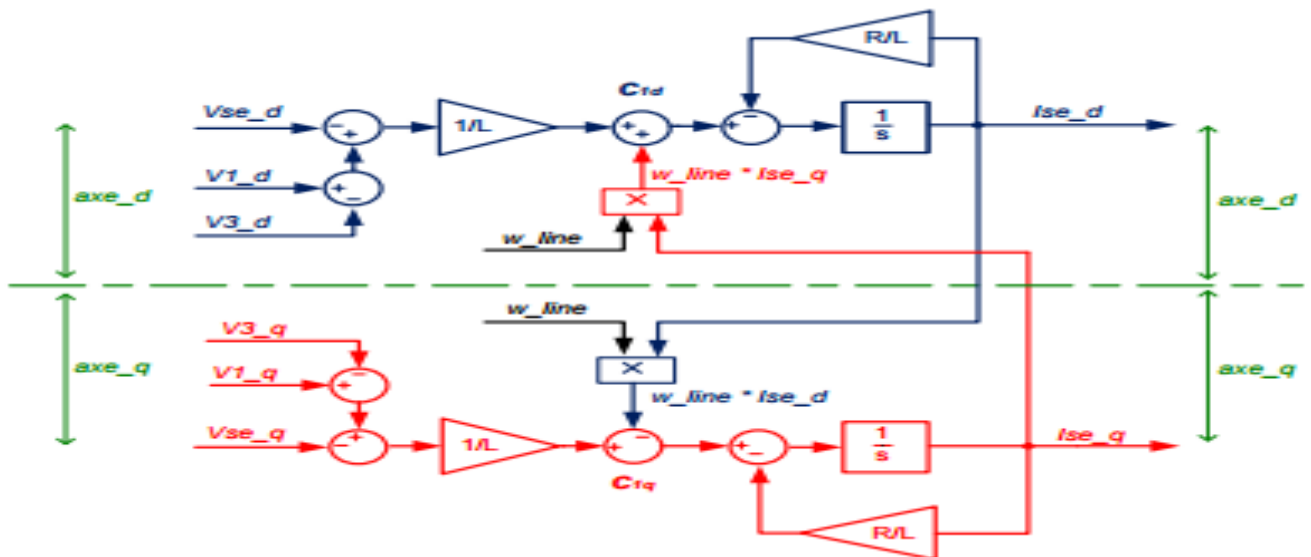


Figure 3-12 Schéma bloc du circuit série

Pour piloter correctement notre convertisseur, nous avons besoin de supprimer cette interdépendance des axes d et q. On va donc créer un bloc de découplage qui va reproduire le signal de couplage que nous voulons éliminer puis on va introduire ce signal avec un signe contraire à l'entrée de notre système. De ce fait, le signal de découplage compensera le couplage existant entre les axes d et q. Pour choisir la valeur du signal que notre bloc de découplage doit créer, il faut tenir compte du lieu dans lequel on va l'injecter. En effet, notre modèle de système n'est accessible physiquement qu'à son entrée ou à sa sortie. Il n'est pas accessible directement au niveau des comparateurs $C1d$ et $C1q$. En considérant le contenu du bloc du modèle du circuit série (Figure 3-12), on en déduit que :

o Pour que l'axe-d soit indépendant de l'axe-q, on doit introduire le signal du découplage « $w_{line} * I_{se_q}$ » avec signe contraire par la borne V_{se_d} . Ce signal devra être multiplié préalablement par $\frac{1}{L}$ avant d'arriver au comparateur $C1d$. Il faudra donc le multiplier par le coefficient L afin d'annuler ce facteur. De ce fait, le signal à introduire par la borne V_{se_d} sera « $w_{line} * L * I_{se_q}$ ».

o Pour rendre l'axe-q indépendant de l'axe-d, on applique le raisonnement précédent. On obtient que le signal à introduire par la borne V_{se_q} est « $w_{line} * L * I_{se_d}$ ».

Notre bloc de découplage aura donc la forme présentée sur la Figure 3-13 :

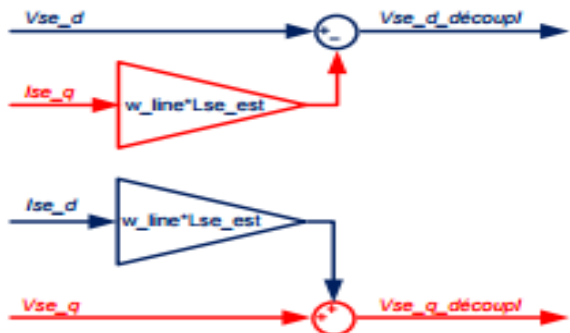


Figure 3-13 Schéma du bloc de découplage

On va procéder au découplage des deux composantes de courant de la ligne, Pour cela on pose :

$$X_1 = \frac{1}{L}(V_{1d} - V_{3d} + V_{sed})$$

$$X_2 = \frac{1}{L}(V_{1q} - V_{3q} + V_{seq})$$

Avec:

$$X_1 = (K_P + \frac{K_i}{s})(I_{se_refd} - I_{sed}) - \omega_{line} L I_{seq}$$

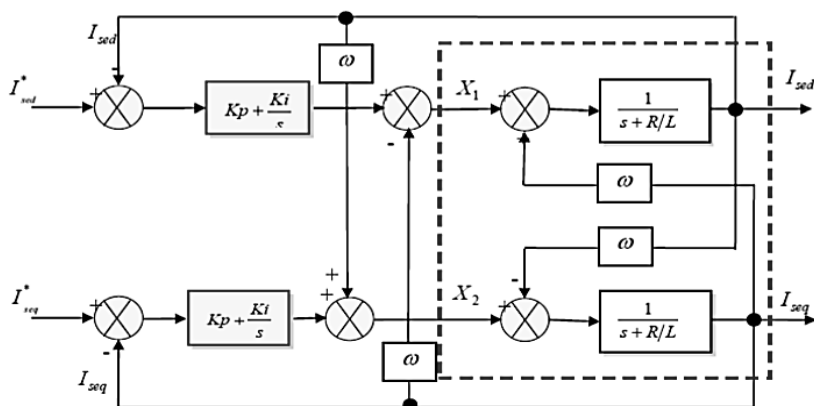
$$X_2 = (K_P + \frac{K_i}{s})(I_{se_refq} - I_{seq}) + \omega_{line} L I_{sed}$$

X_1 et X_2 étant les sorties des deux régulateurs PI des courants I_{sed} et I_{seq} respectivement

. En substituant les quatre équations précédentes dans le système d'équation (3-8.A) après avoir appliqué la transformation de Laplace, on aboutit à un système de deux équations découplées ayant les fonctions de transfert en boucle fermée suivante :

$$F_{11}(S) = \left(\frac{I_{sed}}{I_{se_refd}} \right) = \left(\frac{K_i + S K_p}{K_i + S \left(\frac{R}{L} + K_p \right) + S^2} \right)$$

$$F_{22}(S) = \left(\frac{I_{seq}}{I_{se_refq}} \right) = \left(\frac{K_i + S K_p}{K_i + S \left(\frac{R}{L} + K_p \right) + S^2} \right)$$



Le schéma bloc de la méthode watt-var découplé est représenté sur la figure (3-14). Comme nous l'avons déjà montré, le découplage s'effectue par la séparation du système en deux boucles fermées, où le contrôle est optimal par rapport au critère quadratique de l'erreur dynamique si les gains sont maximaux

Figure (3.14) : Schéma de régulation du SSSC (watt-var découplée).

Après le découplage il ne nous restera que notre PI avec un modèle série du système sans couplage, et si nous représentons ces conditions dans l'axe-d et l'axe-q séparément on obtiendra les schémas de la Figure 3-15 et de la Figure 3-16 suivantes :

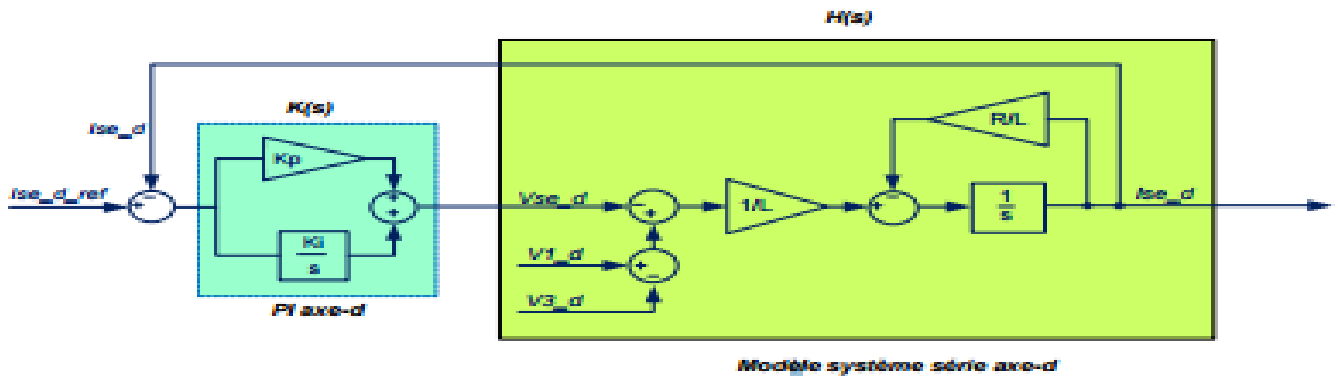


Figure 3-15 Schéma du correcteur PI associé au modèle du système série simplifié sur l'axe-d (les termes de couplage sont supprimés)

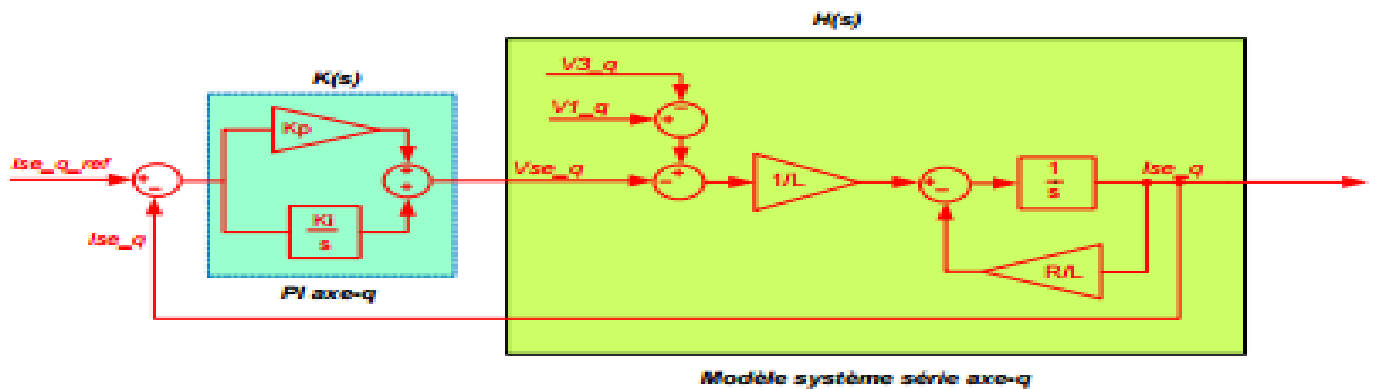


Figure 3-16 Schéma du correcteur PI et du modèle du système série simplifié sur l'axe-q (les termes de couplage sont supprimés)

Perturbations :

Dans notre système série, les entrées $V1d$, $V1q$, $V3d$ et $V3q$ peuvent être considérées comme des perturbations du système. Néanmoins, dans notre cas, nous considérerons qu'elles sont constantes. Nous n'en tiendrons donc pas compte au moment de concevoir la synthèse des contrôleurs.

On va maintenant se concentrer sur le modèle $H(s)$ du système série. En raison de la symétrie des systèmes pour les axes d et q, on étudiera indifféremment l'un des deux axes. Le schéma du système dans l'axe-d (Figure 3-15) ou dans l'axe-q (Figure 3-16) peut être écrit sous forme générique comme l'indique la Figure 3-17.

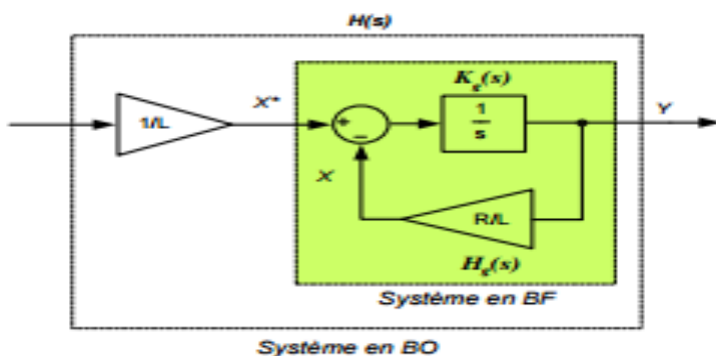


Figure 3-17 Schéma du modèle du système

De façon générale, la fonction de transfert d'un système en boucle fermée (BF), comme celle de la Figure 3-15 est de la forme :

$$\frac{y}{X^\circ} = \frac{Kg(S)}{1+Kg(S)Hg(S)} \quad (3-41)$$

Notre fonction de transfert $\frac{y}{X^\circ}$ peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{y}{X^\circ} = \frac{\frac{1}{s}}{1+\frac{1R}{sL}} = \frac{\frac{1}{s}}{\frac{Ls+R}{Ls}} = \frac{L}{Ls+R} = \frac{\frac{L}{R}}{\left(\frac{L}{R}\right)s+1} \quad (3-42)$$

Notre modèle du système peut à nouveau être simplifié :

$$\frac{\frac{L}{R}}{\left(\frac{L}{R}\right)s+1} \frac{1}{L} = \frac{\frac{1}{R}}{\left(\frac{L}{R}\right)s+1} = \frac{1}{s+\frac{R}{L}} \quad (3-43)$$

On voit que cette équation rassemble à l'équation d'un système de premier ordre de la forme :

$$\frac{\frac{1}{R}}{\left(\frac{L}{R}\right)s+1} = \frac{K}{s+1}$$

Donc le modèle de notre système H(s) est un système de premier ordre où les termes K et τ de l'équation, prendront les valeurs suivantes :

$$K = \frac{1}{R} \quad \tau = \frac{L}{R}$$

8. La Commande

Pour cette partie il y a deux méthodes pour la commande :

Commande par hystérésis

Commande par MLI

La rapidité du contrôle par hystérésis à réagir au changement brusque de référence, donne des performances dynamiques et statiques meilleures. Malgré ces avantages, nous avons choisi la commande par MLI car le dispositif UPFC commande de fortes puissances et a besoin d'une fréquence fixe pour les commutations.

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de

Commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la figure (3-18).

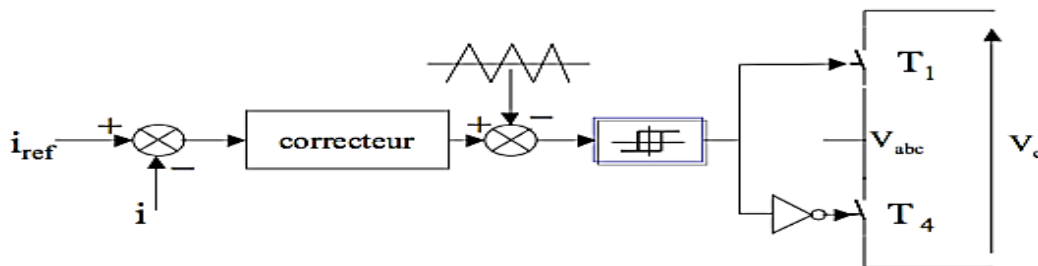


Figure (3.18) : Contrôle de courant par MLI

9. Commande du convertisseur série :

A. Calcul des référentiels

Le système H(s) du convertisseur série est commandé par un système en boucle fermée dans lequel il y a un PI. Ce système en boucle fermée a besoin des intensités de référence $I_{se_d_réf}$ et $I_{se_q_réf}$.

Pour calculer les courants de référence $I_{se_d_réf}$ et $I_{se_q_réf}$ à appliquer au système en boucle fermée, on utilise les équations que les lient avec les grandeurs P_3 , Q_3 , V_{3d} et V_{3q} . On s'intéressera en particulier aux puissances P_3 et Q_3 car elles font partie des objectifs premiers de notre convertisseur. Nous voulons demander à notre convertisseur d'atteindre les valeurs de P_3 et Q_3 présélectionnées à travers les références imposées au système P_{3_ref} et Q_{3_ref} .

Pour déduire ces équations, on va se référer à la Figure 3-4. Nous en déduisons que la puissance apparente qui traverse la ligne série (au point 3 par exemple) est la suivante :

$$S_3 = \frac{1}{2} \mathbf{3}(V_3 I_{se}^*) = P_3 + jQ_3 \quad (3-44)$$

Les valeurs de la tension et du courant sont exprimées en valeurs efficaces. On sait aussi que les vecteurs de la tension et du courant peuvent être décomposés selon deux termes

$$V_3 = V_{3d} + jV_{3q} \quad (3-45)$$

$$I_{se} = I_{sed} + jI_{seq} \quad (3-46)$$

Si dans l'équation (3-44), on introduit les termes V_3 et I_{se} obtenus précédemment, on a l'expression suivante :

$$S_3 = \frac{3}{2} (V_{3d} + jV_{3q}) (I_{sed} + jI_{seq})^* \\ = \frac{3}{2} [(V_{3d}I_{sed} + V_{3q}I_{seq}) + j (V_{3q}I_{sed} - V_{3d}I_{seq})] \quad (3-47)$$

Dans l'expression obtenue, les termes de la puissance active P_3 et de la puissance réactive Q_3 sont les suivants :

$$P_3 = \frac{3}{2} (V_{3d}I_{sed} + V_{3q}I_{seq}) \quad (3-48)$$

$$Q_3 = \frac{3}{2} (V_{3q}I_{sed} - V_{3d}I_{seq}) \quad (3-49)$$

Dans l'expression précédente, l'intensité I_{se} et les puissances P_3 et Q_3 qu'on veut faire circuler sur la ligne correspondent à nos valeurs de référence, c'est-à-dire on a :

$$I_{se} = I_{se_ref}, P_3 = P_3_ref \text{ et } Q_3 = Q_3_ref.$$

Si on introduit ces conditions dans les équations (3-48) et (3-49), on obtient pour le courant de référence les valeurs suivantes :

$$I_{sed_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_3_ref V_{3d} + Q_3_ref V_{3q}}{V_3^2 d^2 + V_3^2 q^2} \quad (3-50)$$

$$I_{seq_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_3_ref V_{3q} - Q_3_ref V_{3d}}{V_3^2 d^2 + V_3^2 q^2} \quad (3-51)$$

10. Commande du convertisseur shunt :

Le système $H(s)$ du convertisseur shunt est aussi commandé par un système en boucle fermée dans le quelle il y a un PI. Ce système en boucle fermée a besoin des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$

Les hypothèses faites pour le calcul des références de la commande du circuit shunt sont les suivantes :

- ♦ Les intensités de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$ sont calculées à partir des valeurs des puissances active et réactive de référence P_{1B_ref} et Q_{1B_ref} respectivement absorbées ou injectées par la partie-parallèle de l'UPFC au point de connexion.

- ♦ La puissance active fournie par le convertisseur série provient :

- o du convertisseur shunt (en régime permanent),

- o de la capacité du bus DC (en régime transitoire).

Dans un cas idéal, sans pertes et en régime permanent, la puissance active P_{1B} serait égale à la puissance active P_{se} sollicitée par le convertisseur série, $P_{1B_ref} = P_{se}$

A. Calcul des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$

Le calcul des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$ est réalisé de façon analogue au calcul des références du courant de la boucle série. A cet effet, les équations qui lient ces grandeurs avec P_{1B} , Q_{1B} , V_{1d} et V_{1q} sont employées.

Pour déduire ces équations, la Figure 3-4 est prise comme référence. La puissance apparente qui traverse la ligne shunt (à l'origine du point 1) est la suivante :

$$S_{1B} = \frac{1}{2} 3(V_1 I_{sh}^*) = P_{1B} + jQ_{1B} \quad (3-52)$$

On sait aussi que les vecteurs de la tension et du courant peuvent se décomposer en deux termes

$$V_1 = V_{1d} + jV_{1q} \quad (3-53)$$

$$I_{sh} = I_{shd} + jI_{shq} \quad (3-54)$$

Si on introduit dans l'équation (3-52) les termes V_1 et I_{sh} obtenus précédemment, on obtient l'expression suivante :

$$S_{1B} = \frac{3}{2} (V_{1d} + jV_{1q}) (I_{shd} + jI_{shq})$$

$$= \frac{3}{2} [(V_{1d}I_{shd} + V_{1q}I_{shq}) + j (V_{1q}I_{shd} - V_{1d}I_{shq})] \quad (3-55)$$

Dans cette expression, les termes de la puissance active P1B et de la puissance réactive Q1B sont les suivantes :

$$P_{1B} = \frac{3}{2} (V_{1d}I_{shd} + V_{1q}I_{shq}) \quad (3-56)$$

$$Q_{1B} = \frac{3}{2} (V_{1q}I_{shd} - V_{1d}I_{shq}) \quad (3-57)$$

Dans les expressions (3-56) et (3-57), l'intensité Ish et les puissances (P1B et Q1B) sont des valeurs de référence, c'est-à-dire que Ish=Ish_ref , P1B= P1B_ref et Q1B= Q1B_ref. Si on intègre convenablement ces grandeurs dans les équations (3-56) et (3-57), on obtient les valeurs des courants de référence suivantes :

$$I_{shd_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_{1B_ref}V_{1d} + Q_{1B_ref}V_{1q}}{V_{1d}^2 + V_{1q}^2} \quad (3-58)$$

$$I_{seq_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_{1B_ref}V_{1q} - Q_{1B_ref}V_{1d}}{V_{1d}^2 + V_{1q}^2} \quad (3-59)$$

B. Calcul de la puissance active de référence P1B_ref

Dans un cas idéal, sans pertes et en régime permanent, la puissance active P1B serait égale à la puissance active Pse sollicitée par le convertisseur série, P1B_ref=Pse. Cependant, ceci ne constitue pas un cas réaliste. Parce que le réseau est affecté par des phénomènes transitoires et des pertes qui imposent que la puissance fournie par le convertisseur shunt soit supérieure à celle demandée par le convertisseur série. La valeur de la puissance de référence P1B_ref doit tenir compte de ces pertes et phénomènes transitoires (Ploss). L'expression de cette puissance de référence est :

$$P_{1B} = P_{se} + P_{loss} \quad (3-60)$$

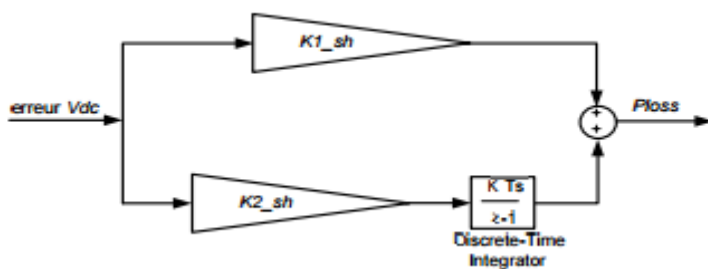
Si on n'avait pas tenu compte des pertes Ploss, la puissance active du convertisseur série Pse n'aurait pas été totalement satisfaite par la puissance du convertisseur shunt P1B. Dans ces conditions, la tension Vdc du DC-LINK aurait subi des fluctuations.

Comme indiqué précédemment, la puissance active de référence de la partie shunt de l'UPFC P1B_ref est la somme de la puissance active série Pse et de la puissance des pertes Ploss.

♦ Pour calculer la puissance Pse, l'équation (3-48) du circuit série est exploitée. Elle est cependant référencée par rapport au convertisseur série et non pas par rapport au point 3 de la ligne série. De ce fait, l'équation (3-48) devient :

$$P_{se} = \frac{3}{2} (V_{sed}I_{sed} + V_{seq}I_{seq}) \quad (3-61)$$

♦ Pour calculer la puissance Ploss, on utilise un système de contrôle en boucle fermée pour lequel la tension Vdc referme la boucle par le système Hs. Malgré la nature non linéaire de la boucle de régulation du bus DC,



C. Calcul de la puissance réactive Q1B

Le facteur de puissance au point 1 de la Figure 3-4 est choisi comme unitaire, c'est-à-dire que l'UPFC consomme de la puissance active mais pas de puissance réactive (Q1_ref=0). Si la première loi de Kirchoff est appliquée sous ces conditions, on pourrait écrire :

$$Q_{1_ref} + Q_{1A} + Q_{1B_ref} = 0 \quad \rightarrow \quad Q_{1B_ref} = 0 - Q_{1A} \quad (3-62)$$

La puissance réactive de la partie shunt de l'UPFC est égale à la différence entre la puissance réactive du système (Q1) et la puissance réactive série (Q1A). Comme on considère que la puissance Q1 est nulle (Q1=0), la puissance Q1B_ref est égale en magnitude à la puissance Q1A. Pour calculer la puissance réactive Q1A de la branche série, on va utiliser l'équation qui la lie avec les grandeurs **V1q**, **V1d**, **Iseq** et **Iseq**.

Pour déduire cette équation, on va se référer à la Figure 3-4. Nous pouvons dire que la puissance apparente qui traverse la ligne série (à l'origine du point 1) est la suivante :

$$S_{1A} = \frac{1}{2} 3(V_1 I_{se}^*) = P_{1A} + jQ_{1A} \quad (3-63)$$

Les vecteurs de la tension et du courant peuvent se décomposer en deux termes :

$$V_1 = V_{1d} + jV_{1q} \quad (3-64)$$

$$I_{se} = I_{sed} + jI_{seq} \quad (3-65)$$

Si on insère dans l'équation (3-63) les termes V_1 et I_{se} obtenus précédemment, l'expression suivante est obtenue :

$$S_{1A} = \frac{3}{2} (V_{1d} + jV_{1q}) (I_{sed} + jI_{seq}) \\ = \frac{3}{2} [(V_{1d}I_{sed} + V_{1q}I_{seq}) + j(V_{1q}I_{sed} - V_{1d}I_{seq})] \quad (3-66)$$

Dans l'expression obtenue, les termes de la puissance active P_{1A} et de la puissance réactive Q_{1A} sont les suivants :

$$P_{1A} = \frac{3}{2} (V_{1d}I_{sed} + V_{1q}I_{seq}) \quad (3-67)$$

$$Q_{1A} = \frac{3}{2} (V_{1q}I_{sed} - V_{1d}I_{seq}) \quad (3-68)$$

11. Calcul des Régulateurs PI :

A. Pour le convertisseur shunt

Les Puissances actives et réactives échangées entre le STATCOM et le réseau sont contrôlés par la régulation des composantes directe et quadratique du (I_{fd} et I_{fq}). Le modèle des équations (3-69) peut être décuplé par les étapes suivant :

$$V_{Fd} = V_d - L_F \omega I_{Fd} + V_{cha} \\ V_{Fq} = V_q + L_F \omega I_{Fq} + V_{cha} \quad (3-69)$$

Avec :

$$V_d = R_F I_{Fd} + L_F \left(\frac{dI_{Fd}}{dt} \right) \\ V_q = R_F I_{Fq} + L_F \left(\frac{dI_{Fq}}{dt} \right) \quad (3-70)$$

Alors la fonction de transfert de l'équation (3-70) définie comme suit :

$$F(S) = \left(\frac{1}{L_f S + R_f} \right)$$

La fonction de transfert de l'onduleur est généralement choisie égale à $Gond(P) = 1$. Donc la fonction de transfert globale en boucle ouvert est :

$$H_{BO}(S) = \left(\frac{K_{pc} S + K_{ic}}{S} \right) \left(\frac{1}{L_f S + R_f} \right) \quad (3-71)$$

A partir d'équation (3-71), en déduire la fonction de transfert en boucle fermée peut être comme suit :

$$H_{BF}(S) = \left(\frac{K_{pc} S + K_{ic}}{L_f S^2 + (R_f + K_{pc}) S + K_{ic}} \right)$$

Pour un bon choix des coefficients K_{pc} et K_{ic} , on applique la méthode de placement des pôles. Les systèmes de régulation est un système du deuxième ordre :

$$G(S) = S^2 + 2\xi\omega_{nc} S + \omega_{nc}^2$$

Et par identifications, on peut écrire :

$$K_{pc} = 2\xi\omega_{nc} L_F - R_F$$

$$K_{ic} = L_F \omega_{nc}^2$$

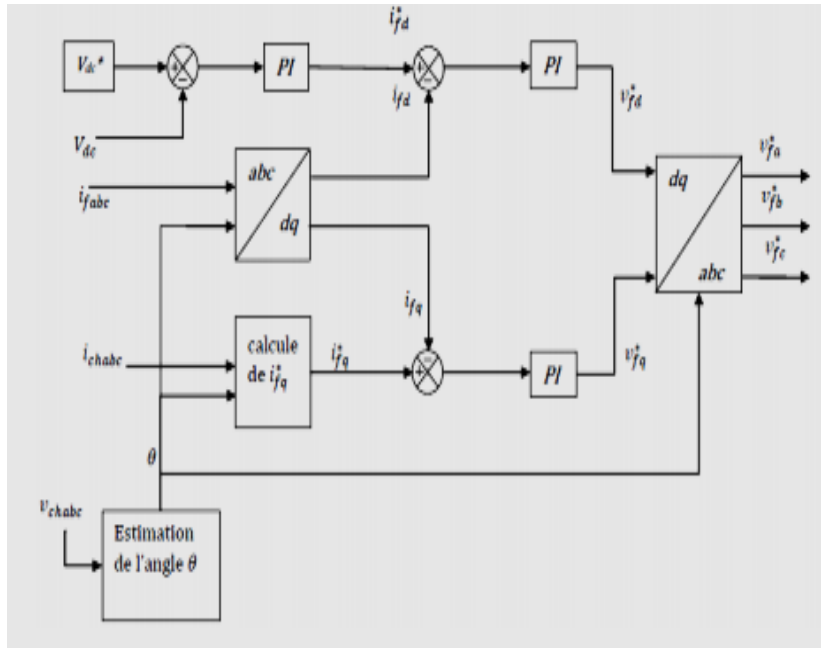


Figure (3-19) : Schéma global du contrôle par la méthode watt-var découplé du STATCOM

Le schéma simplifié de la boucle fermée est donné par la figure suivante

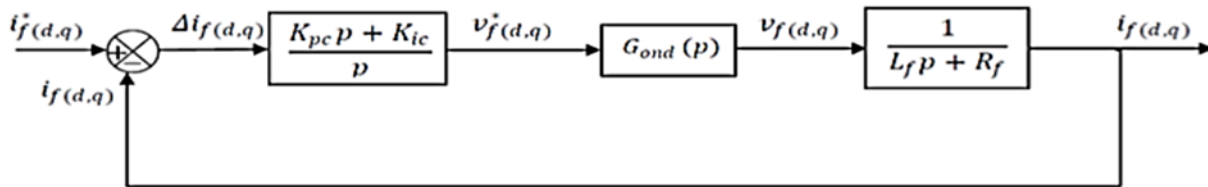


Figure (3.20) : Schéma bloc de régulation des courants

B. Pour le convertisseur série :

La régulation proportionnelle intégrale utilisée dans le modèle de la figure (3-14) assure un contrôle optimal par rapport au critère quadratique de l'erreur dynamique si les gains sont maximaux donc :

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_p \text{ max} ; \mathbf{K}_i = \mathbf{K}_i \text{ max}$$

De même que pour les régulateurs du STATCOM, et sans refaire tout le détail de la méthode, en introduisant la condition (3-69) liant les paramètres du régulateur nous aurons ce qui suit :

$$\frac{\mathbf{K}_i}{\mathbf{K}_p} = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{L}} = \frac{1}{\mathbf{TBO}}$$

Avec :

$$\mathbf{K}_p = \frac{1}{\mathbf{T}}$$

Et on obtient :

$$\mathbf{K}_p = 3 \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{L}}$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{K}_p \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{L}}$$

C. Pour la tension continue :

Pour la régulation de la tension continue aux bornes des condensateurs par un régulateur PI, on applique la transformation de Laplace sur l'équation de courant équivalent du bus continu suivant :

$$\mathbf{I}_{c\acute{e}q} = \mathbf{C}_{\acute{e}q} \left(\frac{d\mathbf{V}_{dc}}{dt} \right) \quad (3-72)$$

L'application de la transformation de Laplace sur l'équation (3-72) donnée :

$$\mathbf{I}_{c\acute{e}q}(\mathbf{S}) = \mathbf{C}_{\acute{e}q} \mathbf{S} \mathbf{V}_{dc}(\mathbf{S})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc} = \left(\frac{1}{C_{\acute{e}q}S}\right) I_{c\acute{e}q}(S)$$

Alors la boucle fermée de régulation de la tension continue est représentée par le schéma suivant :

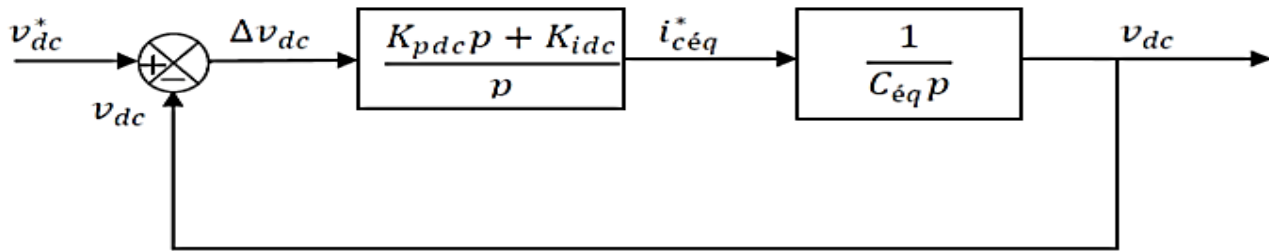


Figure (3.21) : Schéma bloc de régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée correspondante à la Figure (3-21) est :

$$H_{dc}(S) = \left(\frac{K_{pdc}(S) + K_{idc}}{C_{\acute{e}q}(S)^2 + K_{pdc}(S) + K_{idc}}\right)$$

La fonction de transfert $H_{dc}(P)$ c'est un système du deuxième ordre représenté généralement comme suit :

$$G_{dc}(S) = S^2 + 2\xi\omega_{ndc} S + \omega_{ndc}^2$$

Et par identification on trouve :

$$K_{pdc} = 2\xi\omega_{ndc} C_{\acute{e}q}$$

$$K_{idc} = C_{\acute{e}q} \omega_{ndc}^2$$

La régulation du bus continu fournit la référence du courant côté continu $I_{c\acute{e}q}^*$ puis en calcul la référence du courant du côté alternatif I_{fd}^*

$$I_{fd}^* = -\left(\frac{v_{dc}}{v_{chd}}\right) I_{c\acute{e}q}^*$$

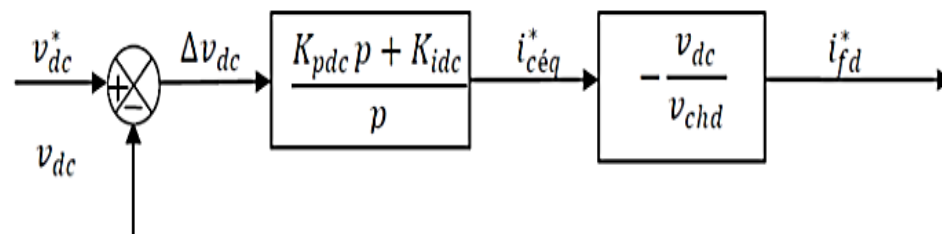


Figure (3.22) : Génération du courant référence actif i_{fd}^*

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord développé le modèle mathématique de l'UPFC, nous avons également choisi la méthode watt-var découplé pour identifier les références du système de commande des deux parties (STATCOM et le SSSC), ensuite nous avons pris la méthode basée sur la MLI pour le contrôle des deux onduleurs de l'UPFC, en choisissant le régulateur PI avec compensation de pôles pour la partie shunt et pour la partie série. En fin nous avons calculé les coefficients des régulateurs utilisés.

Conclusion générale :

La rédaction de ce mémoire est le résultat de six mois de travail sous l'encadrement du docteur KHERFAN HAMIDE qui correspond à un sujet complètement nouveau où j'ai pu acquérir les connaissances théoriques nécessaires (notamment sur les convertisseurs et réseaux électriques)

Pendant ce travail, j'ai été confronté à des réflexions approfondies sur le fonctionnement, la modélisation et le contrôle de l'UPFC c'est pour sa mon mémoire porte sur l'établissement des relations algèbro-différentielles qui interviennent dans un UPFC.

Le modèle proposé dans ce mémoire représente les premiers pas vers une structure plus complexe, où cet appareil pourrait aussi compenser les perturbations de différentes origines dans la qualité d'onde de réseau.

L'UPFC est une combinaison entre STATCOM et SSSC couplés par une liaison DC (dc Link) pour un flux bidirectionnel de la puissance active entre les bornes de sorties AC de l'SSSC et shunt du STATCOM. Notre travail a été consacré à la modélisation, l'identification des références et l'élaboration de la commande de l'UPFC dans le but de contrôler l'écoulement de puissance sur une ligne électrique.

Dans la partie modélisation, nous avons présenté le modèle mathématique d'un UPFC inséré sur une ligne électrique. Afin d'analyser l'influence de l'UPFC sur la ligne, nous avons démontré les relations entre les différentes variables de cette dernière en fonction des paramètres du contrôle de l'UPFC.

Nous avons opté pour la commande MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion), car les puissances mises en jeu sont importantes, ce qui nécessite un contrôle de la fréquence des commutations.

Nous avons choisis la méthode dite "Watt-Var Découplé" comme méthode d'identification des références. Les performances des contrôleurs PI ont été développés et évaluée sous l'environnement SIMULINK/MATLAB

En définitive, ce mémoire a permis de modéliser et de contrôler le flux de puissance d'un UPFC, qui est la fonction principale de cet appareil. Ces résultats peuvent être la base, d'une étude plus approfondie sur ces convertisseurs dans les réseaux de distribution.

Bibliographie :

- [1] : ESKANDAR GHOLIPOUR SHAHRAKI, Apport de l'UPFC à l'Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques, Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré Nancy-1 2003.
- [2] : A.BOUZIDI et M.BOUCHAREB, Commande par Mode Glissant Floue d'un D-Statcom Multi-niveaux, Université de M'Sila 2011.
- [3] : N. G. HINGORANI and L. GYUGYI, "Understanding FACTS", IEEE Press, New York, 2000.
- [4] : Brahim Bekki, "Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d'un Réseau Electrique Haute Tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Septembre 2006. [5] : L.BOUKARANA, Contrôle du Flux de Puissance d'un Réseaux Electrique 400 KV par l'UPFC, Thèse d'ingénieur d'état, Université de Batna, Mai 2011.
- [6]: Z. Huang, Y. Ni, C.M. Shen, et al, "Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems - Modeling, Interface, Control Strategy, and Case Study", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 15, No. 2, pp. 817-824, May 2000.
- [7] : K. Benrehal, "Modélisation et simulation d'un système FACTS : UPFC", thèse de magistère, Université de Batna, Janvier 2009
- [8] G. Bonal, G. Séguier, « Entraînements électriques à vitesse variable », Ed. TEC & DOC, 1998
- [9] I Etxeberria-Otadui, « Systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – Applications à la qualité d'énergie », thèse Institute National Polytechnique de Grenoble, France, 2003.
- [10] T. Wildi, G. Sybille « Electrotechnique », Ed. De Boeck, 2005
- [11] Lopez de Heredia Bermeo, « Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la base tension à la montée en tension » thèse Institute National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [12] S. Aurtenechea Larrinaga, M.A. Rodriguez Vidal, E. Oyarbide and J.M. Torrealday Apraiz," Predictive Control Strategy for DC/AC Converters Based on Direct Power Control", IEEE transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 3, June 2007.
- [13] Jean-Paul Louis, "Modèles pour la commande des actionneurs électriques », Ed. Lavoisier, Hermès, 2004.
- [14] Jean-Paul Louis, "Modélisation des machines électriques en vue de leur commande », Ed. Lavoisier, Hermès, 2004.
- [15] : Rabia Guedouani, "Etude et Commande des Différentes Cascades Redresseurs de Tension Triphasé MLI - Onduleur de Tension à Cinq Niveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone de Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2009.
- [16] Notes des cours « Traction et propulsion électrique », « Génération et T&D électrique ». CNAM 2007/2008.
- [17] JL Thomas « Electrotechnique exercices et problèmes corrigés compléments de cours ELT 201 » CNAM/MEDIAS 2007
- [18] L. Gyugy « Unified Power Flow control concept for flexible AC transmission systems »IEEE Proceeding 1992.
- [19] L. Gyugy « The Unified Power Flow controller: A new approach to Power transmission control »IEEE Transactions on Power Delivery 1995.
- [20] H. Fuyita "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series-and Shunt-Active Filters". IEEE 1998.
- [21] M. Aredes « An Universal Active Power Line Conditioner ». IEEE Transactions on Power Delivery. 1998.
- [22] Bruce A. Renz "AEP's Inez Project Demonstrates Unified Power Flow Control". IEEE.Power Engineering Review. 1996.
- [23] B.H. Chung, J-B Choo, X. Xy, B.P. Lam "Study of Operational Strategies of UPFC in KEPCO transmission System". IEEE, 2005.

[24] M. Boyra, J.L. Thomas, "Size comparison of UPFC and MVDC for MV distribution grid interconnection" SPEEDAM 2010, 14-16 juin 2010, Pisa, Italie.

[25] M. Boyra, J.L. Thomas, "On some sizing aspects of UPLC and MVDC for Smart Grids", EPE-PEMC 2010, 6-8 septembre 2010, Ohrid, Macedonia.

Annexe

Transformations

Système triphasé Soit un système équilibré avec un couplage en étoile tel qu'il est montré dans la Figure 4-1; dans ce circuit, le vecteur spatial X_t tourne à une vitesse angulaire ω et sa valeur dépend des valeurs de x_a , x_b et x_c [8]

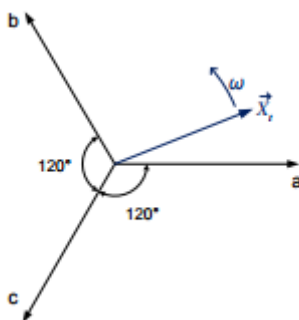


Figure 4-1 Système triphasé

$$X_t = \begin{bmatrix} Xa(t) \\ Xb(t) \\ Xc(t) \end{bmatrix}$$

Si le système est équilibré $I_a + I_b + I_c = 0$, le contrôle à deux variables fixera la troisième, car la somme des trois variables est égale à zéro.

Transformation 3/2

Le but d'utiliser cette transformation est de passer d'un système triphasé en abc vers un système diphasé en $\alpha\beta$, c'est-à-dire de référentiels triphasés avec des coordonnées a, b et c, à des référentiels diphasés avec des coordonnées α et β . Dans ce nouveau système, les coordonnées α et β sont fixes par rapport aux axes a, b, c; plus précisément, α est en phase avec l'axe a. D'autre part, la composante homopolaire est nulle. Le schéma est de la forme suivante. [6][7]

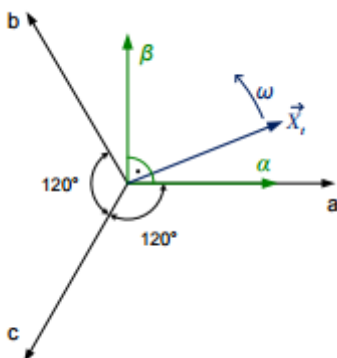


Figure 4-2 Repères abc et $\alpha\beta$

Pour réaliser cette transformation, on pourrait utiliser la transformation de Clarke, qui est de la forme :

$$\begin{bmatrix} X\alpha(t) \\ X\beta(t) \\ X0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa(t) \\ Xb(t) \\ Xc(t) \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

La matrice de Clarke n'est pas orthogonale, donc ne conserve pas la puissance instantanée, mais conserve les modules des vecteurs d'entrée et de sortie (I, U). En effet, la matrice de Clarke [CL] est inversible (c'est-à-dire qu'il existe une $[CL]^{-1}$, mais elle n'est pas orthogonale (c'est-à-dire $[CL]^T \neq [CL]^{-1}$) car cette matrice ne remplit pas que $[CL] [CL]^T = 1$.

$[CL] \neq$ orthogonale \rightarrow ne conserve pas la puissance instantanée

Transformation de Concordia

La matrice de Concordia est orthogonale (c'est-à-dire $[Co]^T = [Co]^{-1}$), donc conserve la puissance instantanée mais

non les modules des vecteurs d'entrée et de sortie (I,U). En réalité, on pourrait dire que Concordia a rendu la matrice de Clarke orthogonale. La matrice de Concordia Co est de la forme [6][7]

$$\begin{bmatrix} X\alpha(t) \\ X\beta(t) \\ X0(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa(t) \\ Xb(t) \\ Xc(t) \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

Et si on considère comme nul le terme homopolaire, la transformation de Concordia obtenue [Co32] permet dans tous les cas de déduire les composantes $\alpha\beta$ des composants abc :

$$\begin{bmatrix} X\alpha(t) \\ X\beta(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa(t) \\ Xb(t) \\ Xc(t) \end{bmatrix} = [\text{Co32}] \begin{bmatrix} Xa(t) \\ Xb(t) \\ Xc(t) \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

Cette transformation est utile mais non suffisante. En effet, ce système présente l'inconvénient que le signal d'entrée n'est ni en phase, ni en amplitude avec le signal de sortie. Pour résoudre cela, on va essayer de se débarrasser de la composante alternative instantanée, en se mettant dans un référentiel tournant. En fait, si on récapitule, pour passer des repères abc aux repères dq il faut :

- ◆ Passer d'un système triphasé en abc à un système diphasé en $\alpha\beta$, grâce à la matrice de Concordia.
- ◆ Puis, on fait un changement de rotation de $\alpha\beta$ vers dq, grâce à une matrice de rotation [R] que nous allons décrire par la suite

Nous verrons plus tard que la matrice de Concordia [Co] et la matrice de rotation [R] permettent d'obtenir la matrice de Park

Changement de rotation.

Comme nous l'avons indiqué, les axes dq vont tourner en quadrature et à la même vitesse angulaire ω que le vecteur X mais avec un décalage de $\delta-\theta$ entre le vecteur X et l'axe d, selon montre la Figure 4-3

Pour passer d'un référentiel dq à $\alpha\beta$, on doit arriver à une équation de la forme :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = [\mathbf{R}] \begin{bmatrix} X \\ X \\ X0 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

Nous allons calculer la valeur de la matrice [R]

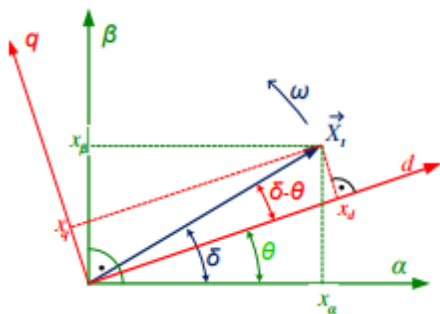


Figure 4-3 Changement de repère $\alpha\beta$ en dq

$$\begin{aligned} X\alpha &= \|X\| \cos\delta \rightarrow \cos\delta = \frac{X\alpha}{X} \\ X\beta &= \|X\| \sin\delta \rightarrow \sin\delta = \frac{X\beta}{X} \end{aligned} \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} Xd &= \|X\| \cos(\delta-\theta) = \|X\| [\cos\delta \cos\theta + \sin\delta \sin\theta] = X\alpha \cos\theta + X\beta \sin\theta \\ Xq &= \|X\| \sin(\delta-\theta) = \|X\| [\sin\delta \cos\theta - \cos\delta \sin\theta] = X\beta \cos\theta - X\alpha \sin\theta \end{aligned} \quad (4-6)$$

Donc la valeur de la matrice de rotation [R] est la suivante :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \\ X0 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

Et si on annule le terme homopolaire, la matrice de changement de rotation restera de la forme :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Pour calculer la relation entre $\alpha\beta$ et dq , on peut simplement tenir compte que la matrice de rotation est orthogonale (c'est-à-dire $[R]^T = [R]^{-1}$) et écrire :

$$\begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xd \\ Xq \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

Transformation de Park

La transformation de Park nous permet de passer de coordonnées abc à des coordonnées dq par la matrice de Park [P] .

La matrice de Park est le produit de deux matrices d'ordre 3, une matrice de rotation [R] (voir l'équation (4-7)), caractéristique d'une rotation d'angle θ dans un plan, et une autre matrice qui est soit la matrice de Clarke, ce qui définit [PCL] (voir équation (4-10)), soit la matrice de Concordia, ce qui définit [PCo] (voir équation (4-11)). [7]

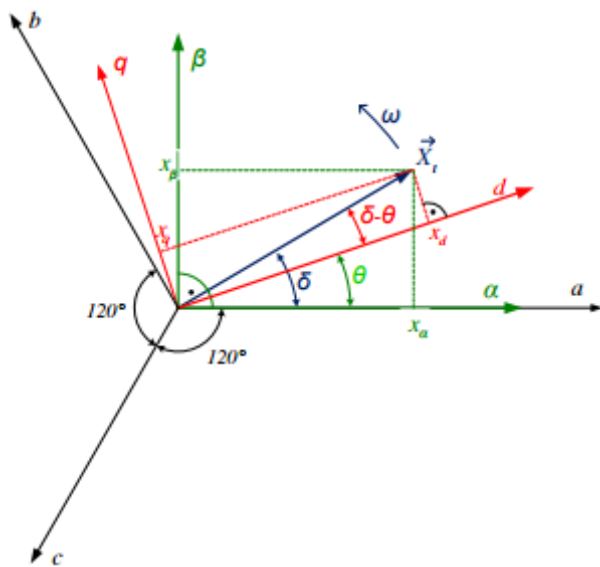


Figure 4-4 Représentation des repères abc, $\alpha\beta$ et dq

Dans cette figure, le vecteur X tourne à la vitesse angulaire ω . Le référentiel d, q tourne à la même vitesse angulaire que le vecteur X. Les référentiels $\alpha\beta$ et abc ne tournent pas.

$$[\text{PCL}] = [\text{R}] [\text{CL}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

$$[\text{PCo}] = [\text{R}] [\text{Co}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Nous allons utiliser la transformation de Concordia. Pour cette raison, pour le restant du calcul, la transformation de Park [PCo] obtenue à partir de Concordia dans l'équation (4-11), va être appelée [P] , c'est-à-dire $[P] = [\text{PCo}]$.

On peut donc écrire :

$$[P] = [\text{R}] [\text{Co}] \quad (4-12)$$

Pour passer d'un référentiel abc à un référentiel dq, on va multiplier les valeurs en abc par la transformation de Park, c'est-à-dire :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

Et si on souhaite passer de dq à abc, nous écrirons :

$$\begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

Application de la transformation de Park

Nous allons appliquer la transformation de Park à notre système et pour mieux comprendre nous allons représenter le schéma unifilaire de la Figure 3-2 avec une forme multifilaire.

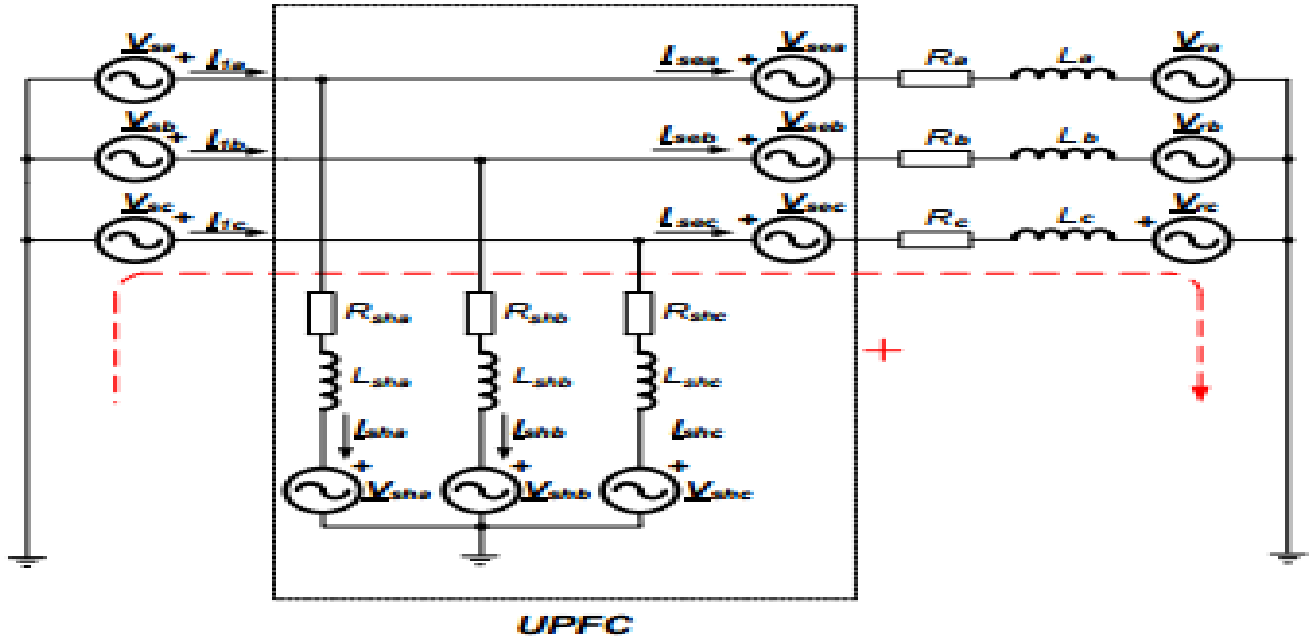


Figure 4-5 Schéma multifilaire d'un UPFC branché au réseau

A partir du système représenté sur la Figure 3-2, nous allons écrire les équations électriques du circuit série dans les référentiels abc. Pour cela nous appliquons la deuxième loi de Kirchhoff, en considérant le sens horaire (signalé en rouge) comme sens provisoire du courant. On obtient les équations suivantes :

Les équations en référentiels abc du système sont les suivantes :

$$\begin{aligned} Vsa + Vsea - Ra Isea - La \frac{dIsea}{dt} - Vra &= 0 \\ Vsb + Vseb - Rb Iseb - Lb \frac{dIseb}{dt} - Vrb &= 0 \\ Vsc + Vsec - Rc Isec - Lc \frac{dIsec}{dt} - Vrc &= 0 \end{aligned} \quad (4-15)$$

Ou ce qui est équivalent :

$$Vs(abc) + Vse(abc) - Vr(abc) - R Ise(abc) - L \frac{dIse(abc)}{dt} = 0 \quad (4-16)$$

Où [R] est la matrice diagonale de résistances de la ligne et [L] la matrice diagonale d'inductances de la ligne.

Pour passer de l'équation (4-16) à une équation avec des coordonnées dq, on va multiplier chaque terme (des deux côtés de l'équation) par la matrice de transformation de Park [P]

$$[P]Vs(abc) + [P]Vse(abc) - [P]Vr(abc) - [P][R]Ise(abc) - [P][L] \frac{dIse(abc)}{dt} = 0 \quad (4-17)$$

Comme les matrices [R] et [L] sont diagonales. Les produits [P][R] et [P][L] sont commutatifs, c'est-à-dire [P][R] = [R][P] et [P][L] = [L][P], et l'expression précédente peut être écrite ainsi :

$$[P]Vs(abc) + [P]Vse(abc) - [P]Vr(abc) - [P][R]Ise(abc) - [P][L] \frac{dIse(abc)}{dt} = 0 \quad (4-18)$$

En raison de la dépendance de [P] avec le temps par la variable angulaire θ , la dérivée du produit [P] Ise(abc) sera :

$$\frac{d}{dt}([P]Ise(abc)) = \left(\frac{d}{dt}[P]\right)Ise(abc) + [P] \frac{dIse(abc)}{dt} \quad (4-19)$$

Ainsi l'équation (8-19) s'écrit :

$$\begin{aligned} [P]Vs(abc) + [P]Vse(abc) - [P]Vr(abc) - [P][R]Ise(abc) - \left[L \frac{d}{dt}([P]Ise(abc))\right] + \\ [L] \left(\frac{d}{dt}[P]\right)Ise(abc) = 0 \end{aligned} \quad (4-20)$$

L'équation (4-20) peut s'écrire en fonction du référentiel dq et on retrouve l'équation classique avec un terme

supplémentaire :

$$\mathbf{Vs}(dq0) + \mathbf{Vse}(dq0) - \mathbf{Vr}(dq0) - [\mathbf{R}]\mathbf{Ise}(dq0) - [\mathbf{L}]\mathbf{Ise}(dq0) + [\mathbf{L}][\mathbf{P}^\circ][\mathbf{P}]^{-1}\mathbf{Ise}(dq0) = 0 \quad (4-21)$$

On va calculer le produit $[\mathbf{P}^\circ][\mathbf{P}]^{-1}$ du terme supplémentaire. En effet, si $\theta = \omega t$ le calcul de $[\mathbf{P}^\circ]$ conduit à l'équation suivante :

$$[\mathbf{P}^\circ] = \omega \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\cos\theta & -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

Le terme $[\mathbf{P}^\circ][\mathbf{P}]^{-1}$ s'exprime alors comme suit :

$$\omega \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\cos\theta & -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

Et en utilisant les relations trigonométriques adéquates, on arrive à une matrice indépendante de l'angle θ :

$$[\mathbf{P}^\circ][\mathbf{P}]^{-1} = \omega \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

L'expression finale de l'équation (4-21) est définie par :

$$\mathbf{Vs}(dq0) + \mathbf{Vse}(dq0) - \mathbf{Vr}(dq0) - [\mathbf{R}]\mathbf{Ise}(dq0) - [\mathbf{L}]\mathbf{Ise}(dq0) + [\mathbf{L}] \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{Ise}(dq0) = \mathbf{0} \quad (4-25)$$

Nous retrouvons alors les équations traditionnelles en référentiels dq :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{sd} + \mathbf{V}_{sed} - \mathbf{V}_{rd} - \mathbf{R}\mathbf{I}_{sed} - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}_{sed}}{dt} + \omega \mathbf{L}\mathbf{I}_{seq} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{V}_{sq} + \mathbf{V}_{seq} - \mathbf{V}_{rq} - \mathbf{R}\mathbf{I}_{seq} - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}_{seq}}{dt} + \omega \mathbf{L}\mathbf{I}_{sd} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{V}_{s0} + \mathbf{V}_{se0} - \mathbf{V}_{r0} - \mathbf{R}\mathbf{I}_{se0} - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}_{se0}}{dt} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4-26)$$

Comme le composant homopolaire est nul, l'équation (4-26) reste de la forme :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{sd} + \mathbf{V}_{sed} - \mathbf{V}_{rd} - \mathbf{R}\mathbf{I}_{sed} - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}_{sed}}{dt} + \omega \mathbf{L}\mathbf{I}_{seq} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{V}_{sq} + \mathbf{V}_{seq} - \mathbf{V}_{rq} - \mathbf{R}\mathbf{I}_{seq} - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}_{seq}}{dt} + \omega \mathbf{L}\mathbf{I}_{sd} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4-27)$$

Nous aurions pu calculer les équations pour le circuit shunt, les résultats auraient été identiques.

Dans la démonstration de l'équation (4-27), il faut remarquer la propriété majeure du passage du référentiel abc au référentiel en dq, « le couplage ». En effet, il y a deux termes de couplage qui sont donnés par la rotation de la transformation de Park. Ce couplage est représenté par $\omega \mathbf{L}_{seq}$ sur l'axe d, et par $\omega \mathbf{L}_{sd}$ sur l'axe q. Cela veut dire que les axes d et q ne sont pas indépendants, c'est-à-dire que les perturbations d'un axe auront des répercussions sur l'autre.

2. PLL

Introduction :

Synchronisation – Détection de la phase

La détection de la phase et de la fréquence de la tension du réseau constitue un point clé dans la conception des systèmes de commande des appareils électroniques connectés au réseau. Les méthodes basées sur repères tournants sont spécialement sensibles au manque de robustesse des systèmes de synchronisation, car toute la

commande est fondée sur l'estimation de l'angle de phase.

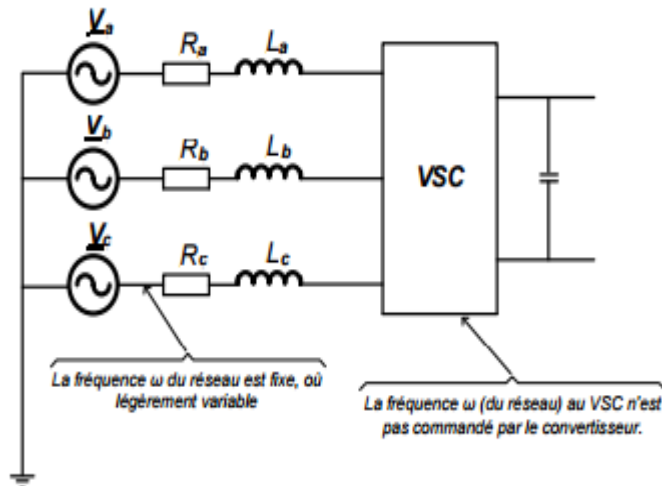
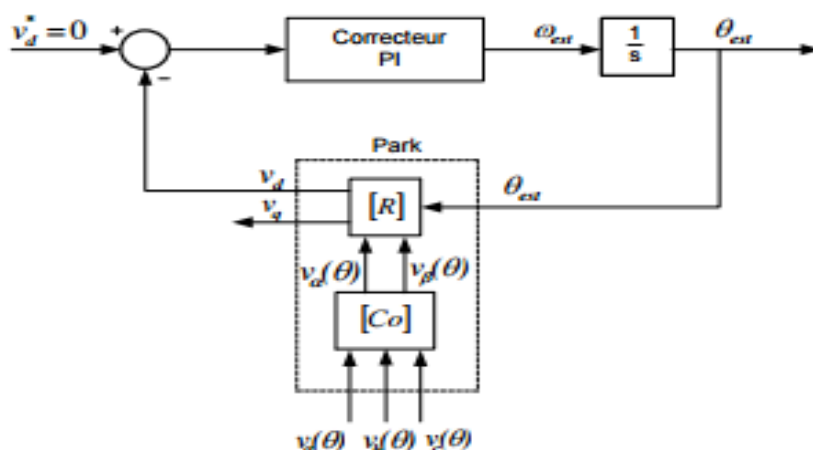


Figure 4-6 Détail de la fréquence ω dans la ligne et le convertisseur

Généralement, si le réseau est équilibré et libre de perturbations, la plupart des systèmes de synchronisation étudiés dans la littérature fonctionnent acceptablement. Le problème s'impose quand le réseau n'est pas équilibré et subit des perturbations où la fréquence varie. Normalement la fréquence du réseau ne varie pas beaucoup (environ $\pm 1\text{Hz}$). Les perturbations peuvent être des harmoniques, du flicker (modulation en amplitude), des déséquilibres ou des creux de tension (qui peuvent produire des déséquilibres ou des sauts de phase). Il y a différentes techniques de synchronisation du réseau, la plus connue est certainement la boucle à verrouillage de phase ou phase locked loop (PLL). Son principe de fonctionnement est expliqué par la suite.

PLL (Phase Locked Loop)

La boucle à verrouillage de phase ou Phase Locked Loop (invention française datant de 1932) est un dispositif permettant d'asservir la phase instantanée du signal de sortie à la phase instantanée du signal d'entrée. La structure de la boucle à verrouillage de phase est légèrement différente entre les systèmes monophasés et les systèmes triphasés. Comme dans ce document, la PLL est utilisée dans le cadre d'un système triphasé, la boucle à verrouillage triphasé sera expliquée



La Figure 4-7 illustre le schéma de la PLL triphasé :

- i. Les tensions triphasées sont transformées au moyen de la transformation de Park. La transformation de Park a besoin de l'angle de phase estimé pour sortir les projections du vecteur de tension dans les axes dq.
- ii. L'angle de phase est estimé par un correcteur (généralement un PI) qui assure que la projection v_d (ou v_q , selon si l'axe d s'aligne au flux ou à la tension) est nulle.

Figure 4-7 Schéma de principe de la boucle à verrouillage de phase triphasé

L'angle de phase estimé $\theta(\text{est})$ doit être le même que l'angle de phase θ du réseau, et cette condition peut s'accomplir si la tension $v_d = 0$, dans la projection du vecteur V_t sur les repères tournants dq de la Figure 4-8, c'est-à-dire si l'axe q est superposé au vecteur V_t , comme indique la Figure 4-9

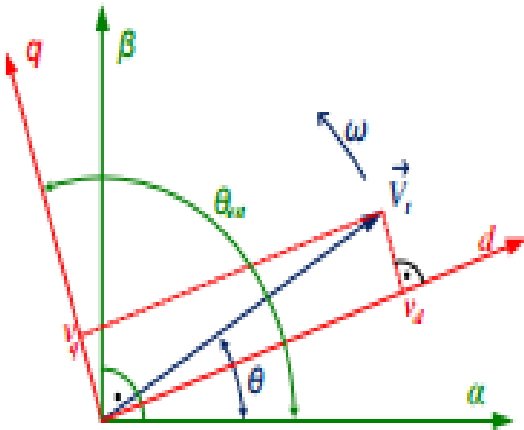


Figure 4-8 Diagramme vectoriel du repère tournant dq avec $\theta \neq \theta(\text{est})$

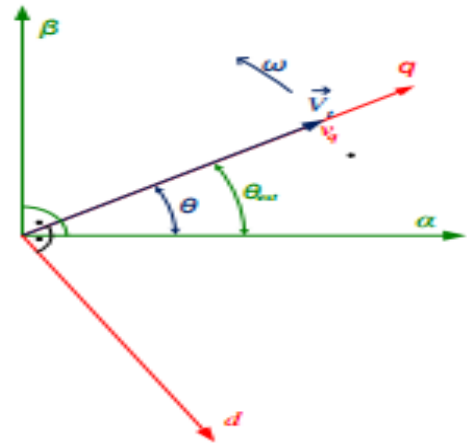


Figure 4-9 Diagramme vectoriel du repère tournant dq avec $\theta = \theta(\text{est})$

Donc l'objectif de la PLL est de calculer/estimer la valeur de la $\theta(\text{est})$ qui fasse que l'axe q soit parfaitement superposé au vecteur V_t . Le principe qui est utilisé pour vérifier ce calage est de simplement vérifier si on a une projection du vecteur V_t sur l'axe d qui ne soit pas nulle. En effet, s'il existe une $V_d \neq 0$, cela voudrait dire que nous ne sommes pas calés correctement.