

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies



Mémoire de Fin d'Etudes
Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

*Compensation statique d'énergie réactive
dans le réseau électrique*

diriger par:

LABBI YACINE

Réaliser par:

**MEHDA AMARA
FRJ DJAT MOHAMMED SEGHJR**

Soutenu le 10 Juin 2012

Remerciement

Nous tenons, en premier lieu à remercier Allah pour le courage et la patience qu'il nous a donné afin de mener ce projet à terme.

Nous remercions également tous les enseignants de l'électrotechnique en particulier :

Monsieur Zegab Abou Baker

*Nous tenons à remercier **Labbi Yacine**, Professeur à l'Université d'EL-OUED qui à accepté de nos encadrons. Nos exprimons notre profonde reconnaissance et gratitude à :*

*Monsieur **Labbi Yacine** pour son encouragement pendant toute la période du projet malgré toutes les difficultés.*

Nos remerciements vont à tous les Messieurs les enseignants de réseaux électrique.

Enfin, nous ne saurions oublier de trop remercier nos familles pour leur soutien le long de ce parcours.

Nous Tenons à remercier avant tout Dieu tout puissant qui nous a donné la volonté, la force et la patience pour élaborer notre travail.

Nos remerciement vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur coùtions.

Alors que ce travail s'achève, il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et en particulier ma famille surtout ma mère et mon père ainsi sans oublier tous mes amis.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I Compensation Classique

I-1	Introduction :.....	3
I-2	Le Facteur De Puissance :.....	3
I-2-1	Définition :.....	3
I-2-2	Les avantages d'un bon facteur de puissance :.....	4
I-2-3	Les inconvénients d'un mauvais facteur de puissance :.....	5
I-3	L'effet Des Sources De L'énergie Réactive :.....	5
I-3-1	Les sources :.....	5
I-3-2	Effets du transit de l'énergie réactive :.....	5
I-3-2-1	Pertes actives :	6
I-3-2-2	La chute de tension :.....	6
I-4	COMPENSATION : COMMENT ? ET POURQUOI ?.....	7
I-5	Compensation de L'énergie Réactive :	8
I-6	Les Moyens De Compensation :.....	9
I-7	Différents Type De Compensation :.....	9
I-7-1	Compensation shunt :.....	9
I-7-2	Compensation séries :.....	10
I-8	Conclusion:.....	10

Chapitre II FACTS

II-	Introduction :.....	11
II-1	Principe De Fonctionnement Des FACTS :.....	11
II-1-1	Ligne de transport seul :.....	11
II-1-2	Compensation shunt par un compensateur d'énergie réactive.....	12
II-1-3	Principe de la compensation série :.....	13
II-1-4	La compensation par déphasage :.....	15
II-2	Réalisation Technique Des Compensateurs :.....	16
II-2-1	Compensation shunt :.....	16
II-2-1-1	Compensation par SVC (Static Var Compensator) :	16
II-2-1-1-1	Définition :	16
II-2-1-1-2	Principe de fonctionnement :.....	17
II-2-1-2	Le STATCOM (StaticCompensator) :.....	19
II-2-2	Les systèmes de compensation série :	21
II-2-2-1	Le compensateur série commande par thyristor (TCSC : Thyristors Controlled Séries Compensator).....	21
II-3	Les Avantages De La Technologie Des Dispositifs FACTS :.....	23

Chapitre III Modélisation Des Dispositif UPFC

Introduction :	24
III-1 Caractéristiques D'un Compensateur Statique UPFC:	24
III.2 Modélisation D'un UPFC :	25
III.2.1 Modélisation de la partie shunt :	26
III.2.2 Modélisation de la partie série :	26
III.3 Contrôle De L'UPFC :	27
III.3.1 Partie série :	27
III.3.2 Partie shunt :	28
III.3.3 Commande de l'onduleur :	28
III.4. Le réseau test :	28
III.5 Conclusion :	32
Conclusion générale.....	33
Liste des figures	34
Bibliographie.....	36

Liste de figures

<i>Figure I.1 : représentation des puissances par FRESNEL.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I. 2 : schéma de ligne HT ou THT en Π</i>	<i>5</i>
<i>Figure I. 3: présentation La chute de tension.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.4.a : diagramme traduisant les change d'énergie dans le circuit d'alimentation d'un récepteur est montrant l'intérêt de la compensation.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.4.b : Diagramme vectoriel représentant l'importance de la compensation.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.5 : Compensation Shunt.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.6 : Compensation série.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure II.1 : Courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure II.3 : Compensation shunt d'une ligne.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure II.4: courbes de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure II.5 : Principe de la compensation série.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure II.6 : courbe de puissance avec et sans compensation ;série.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure II.7 : Principe de compensation par déphasage.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.8 : compensation par déphasage pour $\alpha = \pi / 5$</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.9: schéma du SVC.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.10 : Présentation d'un compensateur SVC.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.11 : forme d'onde du courant dans un RCT.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.12 : fonctionnement du compensateur statique.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II.13 : Structure de STATCOM.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.14.a : Courant capacitif.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.14.b : Courant inductif.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.15 : Caractéristique statique du STATCOM.....</i>	<i>21</i>

Figure II.16 : Insertion d'un TCSC sur une ligne22

Figure II.17 : Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristor.....22

Figure III.1 Schéma général du système de contrôle

UPFC.....25

Figure III.2 Schéma simplifié d'un STATCOM (partie parallèle de l'UPFC)

connecté au réseau.....26

Figure III.3 Schéma simplifié d'un UPFC (partie série) connecté au

réseau.....27

Figure III.4 Modèle mathématique d'un UPFC connecté au

réseau.....27

Figure III.5 Schéma équivalent en grandeurs réduites.....28

Figure III.6 Résultats des simulations pour le contrôle de la puissance

dans la ligne.....31

Introduction Générale

L'énergie électrique joue un rôle très important dans la société moderne d'aujourd'hui.

C'est une énergie largement utilisée pour l'éclairage, les systèmes informatiques, les systèmes de communication, les systèmes de transport, l'industrie et pour d'autres domaines. Elle rend notre vie plus sûre, plus saine, et plus commode. Elle est produite en même temps qu'elle est consommée; donc, en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. Le transport de l'énergie électrique est assuré par le réseau électrique interconnecté qui peut être considéré comme l'un des systèmes les plus complexes jamais construits par les êtres humains.

Ce réseau doit assumer la continuité de service et l'économie. La première exigence est améliorée via un nombre augmenté de sources d'énergie électrique disponibles en parallèle. La deuxième est augmentée par les lignes de transport supplémentaires permettant à une charge d'acquérir la puissance la moins chère dans le système électrique interconnecté.

Les caractéristiques du réseau électrique s'expriment en termes de grandeurs électriques,

Données temporelles et disposition spatiale. Les grandeurs électriques qui sont la fréquence et la tension sont influencées par l'intensité du courant qui circule dans les lignes et les câbles ; celle-ci sont liées aux puissances active et réactive générées, transportées et consommées. La puissance active est produite par les alternateurs à partir d'une énergie thermique ou mécanique, et consommée également sous forme thermique ou mécanique par les récepteurs ; tandis que la puissance réactive, elle est produite ou consommée dans tous les éléments du réseau. Les variations de l'équilibre entre l'offre et la demande énergétiques entraînent des perturbations et des variations des grandeurs électriques que l'on doit maintenir dans des fourchettes acceptables. La disposition spatiale ou la structure topologique du réseau électrique est à l'échelle des continents, des pays ou des régions, des sites industriels et des bâtiments du tertiaire. Dans les deux premiers cas il y a trois niveaux dans l'acheminement de l'énergie électrique : le transport, la répartition et la distribution.

Il y a beaucoup de facteurs attribués au succès du fonctionnement de ces systèmes de puissance. Un de ces facteurs les plus importants est le prix de l'électricité. Ce dernier est influencé par trois facteurs : les coûts de production, les coûts de transport et les coûts de la distribution. Les coûts de production représentent le coût pour produire l'électricité à la source. Les coûts de transport représentent le coût pour transporter l'électricité par lignes à haute-tension du lieu de production jusqu'aux distributeurs. Les coûts de distribution sont les coûts pour acheminer de l'électricité de faible tension jusqu'aux utilisateurs résidentiels, commerciaux et industriels.

La nouvelle loi sur la libération du marché dans quelques pays, ainsi que l'évolution croissante de la demande sur l'énergie électrique ne va pas sans poser des problèmes.

Ce sont les raisons qui ont poussés les distributeurs et les exploitants d'énergie électrique à chercher des nouvelles techniques pour remédier ces problèmes.

Le concept FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems), s'impose comme solution pour couvrir un certain nombre de technologie destiné à renforcer la sécurité, la capacité de transit et la flexibilité des réseaux de transport d'énergie.

Les solutions FACTS permettent aux opérateurs de réseaux d'accroître la capacité du parc existant, tout en maintenant ou en améliorent les marges d'exploitation indispensables à la stabilité de réseaux.

L'objectif de ce travail est d'analyser l'impact des dispositifs compensation dynamique sur la stratégie de réglage de tension aussi que le control des flux de puissance transitées dus au but d'améliorée les indices de qualités de l'énergie électrique dans un réseau. Les FACTS utilisé au cours de ce travail sont de dispositif des types shunt, séries et mixtes.

Pour arriver a cet objectif, le travail a été décomposer comme suit :

Le premier nous avons donné dans ce chapitre généralité sur la compensation classique.

Et le 2^{eme} chapitre on a illustré dans ce chapitre la technologie FACTS.

Nous avons dans le dernier chapitre donné la modélisation des dispositifs UPFC (FACTS).

Chapitre I

Compensation Classique

I-1 Introduction :

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante du 20^{ème} siècle et la plus utilisée dans le monde.

L'énergie électrique provient de la transformation des diverses autres formes d'énergie naturelles ou artificielles.

Les productions industrielles du courant ont pour sources d'énergie :

- ❖ l'énergie chimique (piles électrochimique, piles à combustibles)
- ❖ l'énergie thermique (turbines à vapeur, turbines à gaz)
- ❖ l'énergie hydraulique (turbines hydraulique)
- ❖ l'énergie nucléaire (centrales nucléaire)
- ❖ l'énergie solaire (centrales photovoltaïque, piles voltaïque, photopiles)
- ❖ l'énergie géothermique, et l'énergie éoliennes, sont aussi des sources de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Actuellement la production, la transmission et la distribution de l'énergie électrique sont exécutées en courant alternatif triphasée.

L'énergie électrique elle se décompose en deux :

- énergie active.
- énergie réactive, et énergie résultante est appelé énergie apparente.

On est amené à reconnaître que les deux attributs essentiels de la qualité de cette énergie sont :

- la permanence de la mise à disposition des usages.
- La constance d'une tension sur laquelle elle est délivrée.

I-2 le facteur de puissance :

I-2-1 Définition :

C'est le quotient de la puissance active consommée et de la puissance apparente fournie.

$$F = \frac{P(W)}{S(VA)} = \cos \varphi$$

Le $\cos \varphi$ est le facteur de puissance du fondamental et ne prend pas en compte la puissance véhiculée par les harmoniques. Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation.

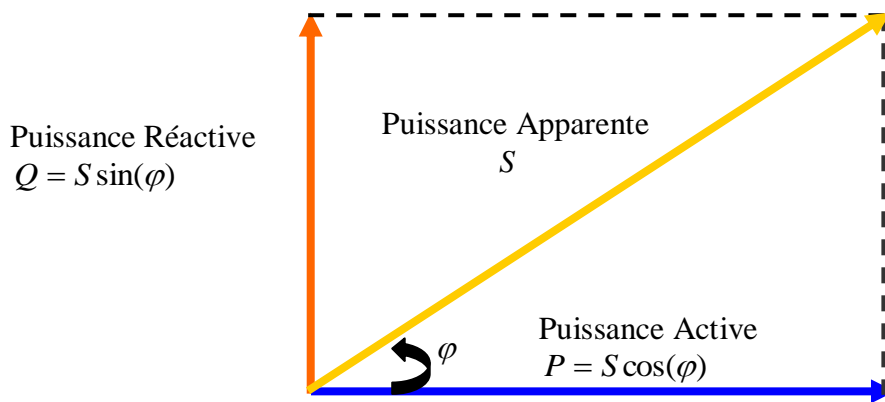


Figure I.1 : représentation des puissances par FRESNEL

Une trop grande consommation d'énergie réactive pour une installation électrique va augmenter considérablement ses courants en ligne bien sa puissance active n'est pas changée.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U} \quad (\text{I.1})$$

Si Q augmente on a l'augmentation de I .

L'amélioration du facteur de puissance tend idéalement à lui donner une valeur proche de 1.

En pratique, on se contente d'une valeur proche de 0.9 (inductif).

I-2-2 Les avantages d'un bon facteur de puissance :

Un bon facteur de puissance, c'est-à-dire $\cos \varphi$ élevé (proche de 1), ou $\text{tg} \varphi$ faible (proche de 0).

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivant :

- La diminution de la facturation d'énergie réactive.
- La diminution de la puissance souscrite en KVA.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- Diminution de la section des câbles.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire.

I-2-3 Les inconvénients d'un mauvais facteur de puissance :

Comme nous venons de le voir précédemment, pour une même puissance utile fournie par un appareillage électrique, il faut transporter dans tous les circuits électrique une intensité d'autant plus grande que le $\cos \varphi$ est faible, cela entraîne :

- Une surfacturation par un surconsommation ou une pénalité.
- Une dégradation de la capacité de transport de l'énergie électrique par des câbles.
- Un surdimensionnement des installations neuves : câbles (section), transfo, etc...
- Des renforcements prématurés des installations existantes.
- Ne laisse pas de réserve de marche au secondaire du transformateur.

I-3 L'effet Des Sources De L'énergie Réactive :

I-3-1 Les sources :

Tous les machines électriques à courant alternative et les réseaux électriques consomment ou produisent l'énergie électrique active ou réactive a partir des sources.

Par exemple les sources réactives sont :

- ✓ Les moteurs synchrones.
- ✓ Les condensateurs shunts.
- ✓ Les centrales électriques.
- ✓ Les lignes ouvertes.

I-3-2 Effets du transit de l'énergie réactive :

Pour satisfaire à la demande de la consommation active de la consommation active de la clientèle, on essaye de minimiser les pertes actives entraînées par le transport, ainsi que la chute de tension, ces deux grandeurs sont en rapport avec le transit de la puissance réactive.

Considérons une liaison assimilable à une impédance $Z = R + jX$, qui transporte de A vers B une puissance $S = P + jQ$, figure (I.2)

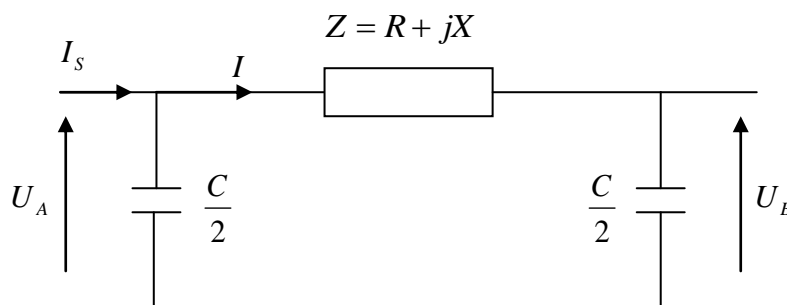


Figure I. 2 : schéma de ligne HT ou THT en Π

I-3-2-1 Pertes actives :

- Les pertes de puissance active sont calculées d'après la formule :

$$\Delta P = 3RI^2$$

- Le courant qui circule dans cet élément est :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$$

$$\Delta P = \frac{R \cdot (P^2 + Q^2)}{U_B^2}$$

$$\Rightarrow \Delta P = \frac{R \cdot P^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{U_B^2} \quad (\text{I.2})$$

φ : Angle de déphasage entre la puissance active et la puissance apparente, alors $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$

Remarque :

Le transit de puissance réactive entraîne une augmentation des pertes actives.

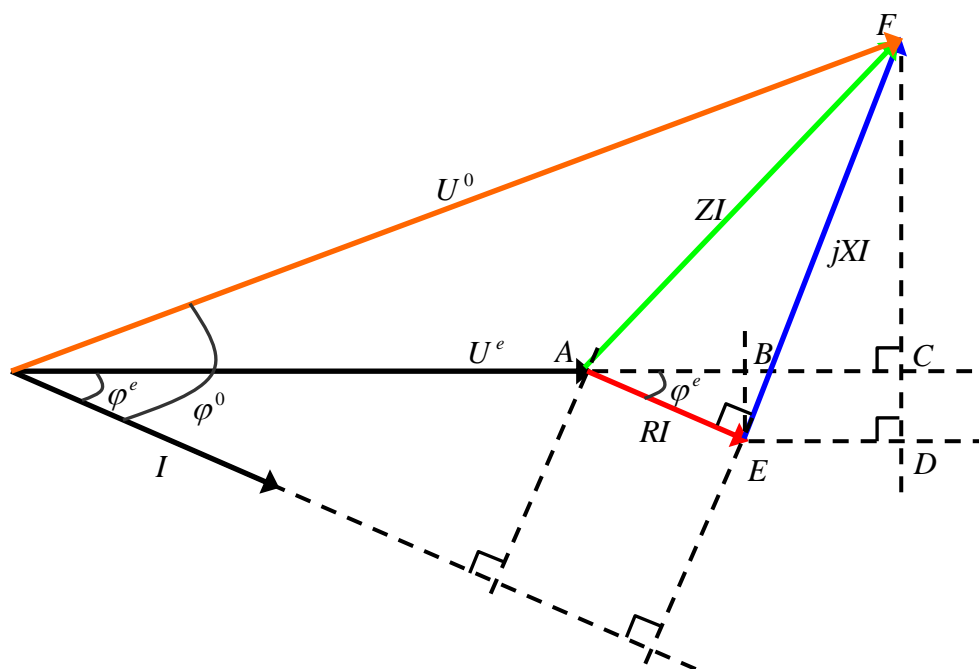
I-3-2-2 La chute de tension :

Figure I.3: présentation la chute de tension

La chute de tension entraînée par ce transport est :

$$\overline{\Delta U} = (AB + BC) + j(FD - CD)$$

Tel que :

$$AB + BC = RI \cos \varphi^e + XI \sin \varphi^e$$

$$FD - CD = XI \cos \varphi^e - RI \sin \varphi^e$$

Donc :

$$\overline{\Delta U} = \frac{RI \cos \varphi^e + XI \sin \varphi^e}{U^e} + j \frac{XI \cos \varphi^e - RI \sin \varphi^e}{U^e}$$

$$\overline{\Delta U} = \frac{RP + XQ}{U_B} + j \frac{XP - RQ}{U_B} \quad (I .3)$$

ΔU : Chute de tension.

$\overline{\Delta U}$: Chute de tension complexe.

R : Résistance de la ligne AB.

X : Réactance inductif de la ligne AB.

Remarque :

Pour les réseaux de transport R est faible devant X , donc cette chute de tension est majorée principalement par le transit de la puissance réactive.

Le transit de la puissance réactive entraîne :

- ❖ des pertes active, et chutes de tension
- ❖ des surinvestissements.
- ❖ Déréglage de la tension du réseau dans une plage déterminée.

I-4 COMPENSATION : COMMENT ? ET POURQUOI ?

Les réseaux électriques à pour but de véhiculer de la puissance depuis sa source jusqu'aux centres de consommations dans un réseau à courant alternative [2]. La puissance apparente S à deux composantes : la puissance P et la puissance Q liées par le déphasage.

$$S = P + jQ = UI[\cos \varphi + j \sin \varphi]$$

Le premier apparaît comme utile. L'autre comme une puissance parasite dont la circulation sur le réseau provoque des phénomènes indésirables.

On voit donc l'intérêt économique de réduire les transits de la puissance réactive pour réduire les pertes.

Mais comme les charges alimentées par le réseau absorbent en général de la puissance réactive, on cherchera à compenser cette puissance le plus près possible des consommateurs.

La chute de tension à travers le réseau est donnée par :

$$\Delta U^* = \frac{PR + QX}{U^2}$$

Par conséquent le transit de la puissance réactive est une composante de la chute de tension, composante qui est d'autant plus grande que le rapport X/R est plus grand. Ce qui est le cas de réseau de transport à haute tension. Il apparaît clairement que la compensation de la puissance réactive et la tenue du plan de tension sont initialement liées et indissociables.

I-5 Compensation de L'énergie Réactive :

Pour limiter les courants en ligne et donc l'énergie réactive absorbée par l'installation, on doit donc installer des sources d'énergie réactive en parallèle sur notre installation. On appelle cette technique " *Compensation de l'énergie réactive* ". Cette compensation permet d'améliorer le facteur de puissance ($\cos \varphi$). Soit un appareil ou groupe d'appareils appelant une puissance active P (W) et une puissance réactive (VAR). On souhaite réduire la $\tan \varphi$ à une valeur plus faible $\tan (\varphi')$. [3]

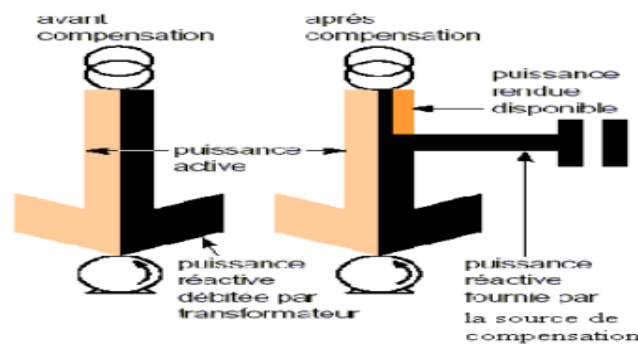


Figure I.4.a : diagramme traduisant les change d'énergie dans le circuit d'alimentation d'un récepteur est montrant l'intérêt de la compensation.

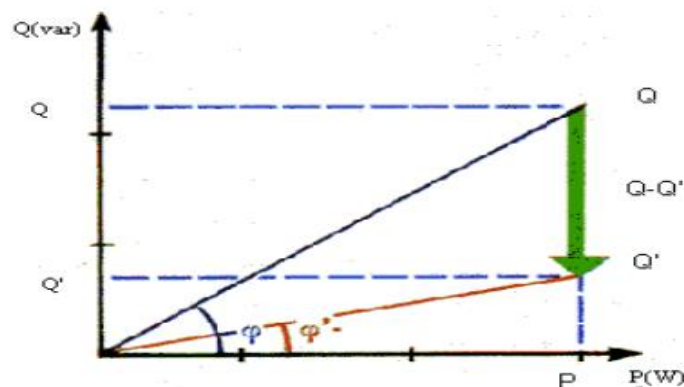


Figure I.4.b : Diagramme vectoriel représentant l'importance de la compensation

Q : la puissance réactive appelée par la charge seule.

$Q-Q'$: la puissance réactive fournie par la source supplémentaire.

Q' : la puissance réactive transitée par la source principale.

P : la puissance active appelée par la charge.

$$Q = P.tg \varphi \quad \text{et} \quad Q' = P.tg \varphi'$$

La puissance des condensateurs à installer sera égale à

$$Q_b = Q - Q' \quad (I.4)$$

$$Q_b = P(tg \varphi - tg \varphi') \quad (I.5)$$

les valeurs de $\cos \varphi$ et de $tg \varphi$ évoluent avec le temps il convient d'utiliser des valeurs moyennes de ces dernières pour l'utilisation de la formule (I.5).

I-6 Les Moyens De Compensation :

Il y a plusieurs sources qui sont capables de produire de l'énergie réactive, ce qui permet de les utiliser comme des moyens de compensation d'énergie réactive et peut les classer comme suit :

- Les compensateurs rotatifs: qui sont les moteurs synchrones.
- Les compensateurs statiques: qui sont les batteries de condensateurs

I-7 Différents Type De Compensation :

I-7-1 Compensation shunt :

Les condensateurs de puissance sont les plus souvent installés en dérivation sur le réseau. C'est ce que l'on nomme " la compensation shunt ".

Pratiquement, ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile ou triangle.

Les condensateurs fournissent à la pulsation ω une puissance Q_C , la dimension du condensateur est liée à sa puissance.

Les condensateurs SHUNT sont utilisés soit en basse tension souvent auprès des appareils d'utilisation les plus puissants, soit en moyenne tension où ils sont regroupés en batteries de quelques MVAR.

En moyenne tension, les batteries sont installées par l'intermédiaire d'un disjoncteur sur le jeu de barres moyennes tensions des postes HT/MT. Ces batteries compensent les charges réactives locales et une partie des pertes réactives sur les réseaux en amont.

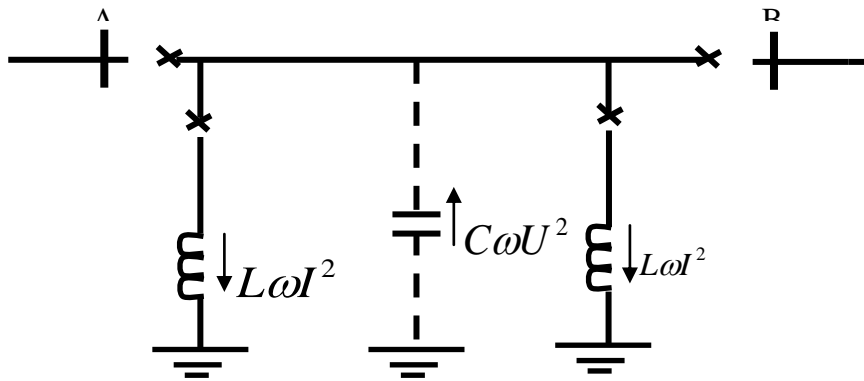


Figure I.5 : Compensation Shunt

I-7-2 Compensation séries :

Les condensateurs sont placés en séries sur une ligne dont ils compensent la réactance. La compensation série est employée sur certaines lignes à haute tension à la fois très longues et très chargées. Elle est justifiée par des considérations telle que la stabilité. Ce type de compensation est assez exceptionnel.

Mentionnons que les principaux problèmes résident dans la protection contre les surintensités qui traversent les batteries lorsqu'un court-circuit se produit sur la ligne où elles sont installées.

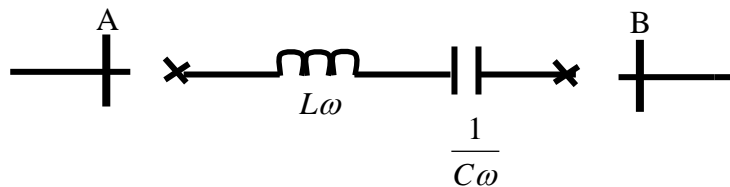


Figure I.6 : Compensation série

I-8 Conclusion :

D'après ce chapitre nous faire une présentation sur la généralité et notion de base de la compensation classique et leur avantage, mais pour autre efficacité et amélioration dans le temps réel et pour une compensation dans un temps important et continue nous présente le compensation ou les system transmission flexible en courant alternative FACTS dans la prochaine chapitre.

Chapitre II

FACTS

II- Introduction :

L'augmentation de la demande en énergie électrique a eu pour résultat, un rapide développement des réseaux électriques. Il existe différents domaines d'analyse des réseaux électriques, tels que la stabilité, le contrôle de la tension et de l'écoulement de puissance. La compensation de l'énergie réactive des ligne de transmissions modifie les caractéristiques électriques de manière à répondre à d'éventuelles demandes en charge. On trouve deux sortes de compensation : la compensation shunt et série. La compensation shunt est utilisée afin de contrôler la tension et la puissance transmise le long des lignes. La compensation série quand à elle, est utilisée dans le but de contrôler la transmise par la réduction ou l'augmentation de l'impédance de la ligne, cette compensation est employée dans le cas de longues lignes de transmissions.

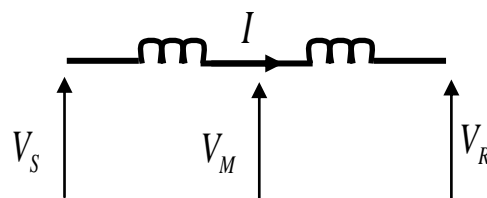
Les méthodes traditionnelles de compensation réactive en régime permanent utilisent des capacités fixes ou des compensateurs synchrones. Ces méthodes de compensation ne sont pas très efficaces lors de l'apparition de sévère perturbation, ce qui affecte négativement le réseau.

II-1 Principe De Fonctionnement Des FACTS :

Nous nous intéressons qu'aux principaux dispositifs FACTS cités plus haut, ces derniers sont des compensateurs shunts, série et des déphaseurs. Pour cela nous prendrons l'exemple d'une ligne de transport dans laquelle sont insérés ces dispositifs.

II-1-1 Ligne de transport seul :

On considère une ligne de transport, que l'on peut décomposée en deux demi ligne d'impédance $\frac{X_L}{2}$.



V_S : Tension aux bornes de la source.

V_R : Tension aux bornes du récepteur.

V_M : Tension aux milieu de la ligne.

X_L : Impédance (réactance) de la ligne.

I : Courant de ligne.

On considère que les tensions à chaque extrémité de la ligne sont égales à V et que le déphasage entre elles sont δ_{12} . La puissance transmise sur la ligne, est alors donnée par l'équation (II.1) :

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta_{12}. \quad (\text{II.1})$$

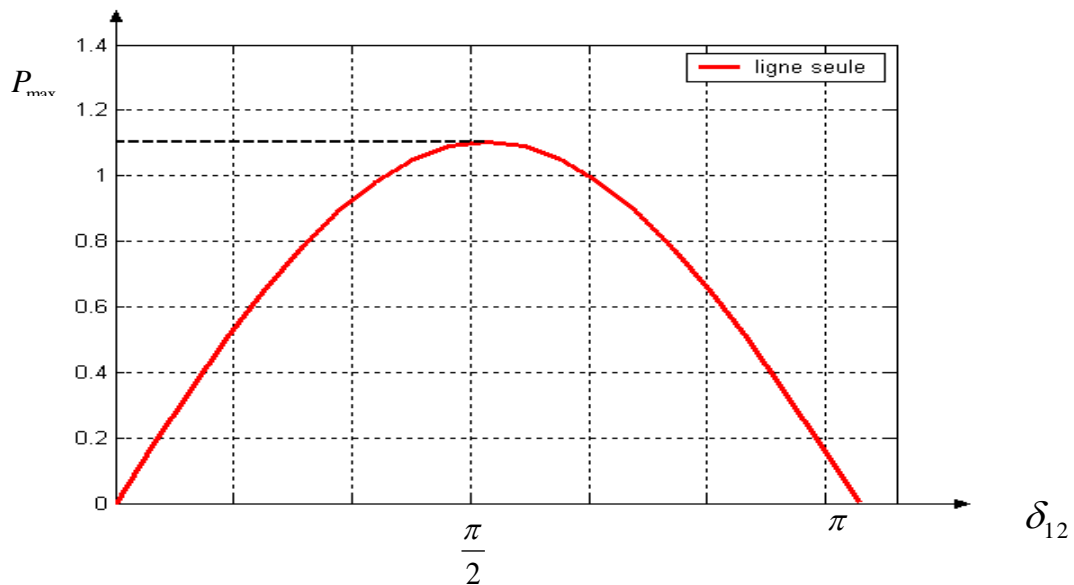


Figure II.1 : Courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission

Le transfert maximal de puissance transmissible sur la ligne est alors obtenu pour un déphasage δ_{12} de $\frac{\pi}{2}$ (Figure II.1).

II-1-2 Compensation shunt par un compensateur d'énergie réactive :

On insère maintenant au milieu de la ligne un compensateur d'énergie réactive idéal. Ce dispositif permet de maintenir la tension V_M à la tension V , en contrôlant le flux de puissance réactive (Figure II.2). En effet, la chute de tension à travers une ligne est donnée par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne.

$$\Delta V = \frac{X_L Q}{V} \quad (\text{II.2})$$

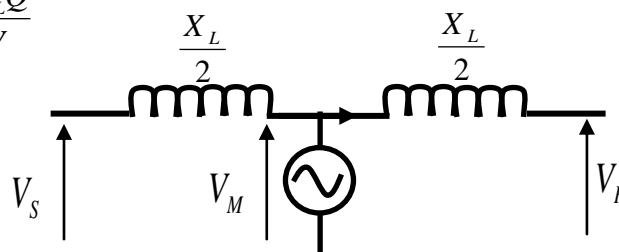


Figure II.3 : Compensation shunt d'une ligne.

L'équation (II.4) donne l'expression de la puissance transmise par la ligne compensée. On remarquera que la puissance maximal transite est doublée et est obtenu pour un déphasage $\delta = \pi$ (Figure II.4). Une compensation shunt permet donc de doubler le transit de puissance maximal d'une ligne.

$$P = \frac{2V^2}{X_L} \sin \frac{\delta_{12}}{2} \quad (\text{II.3})$$

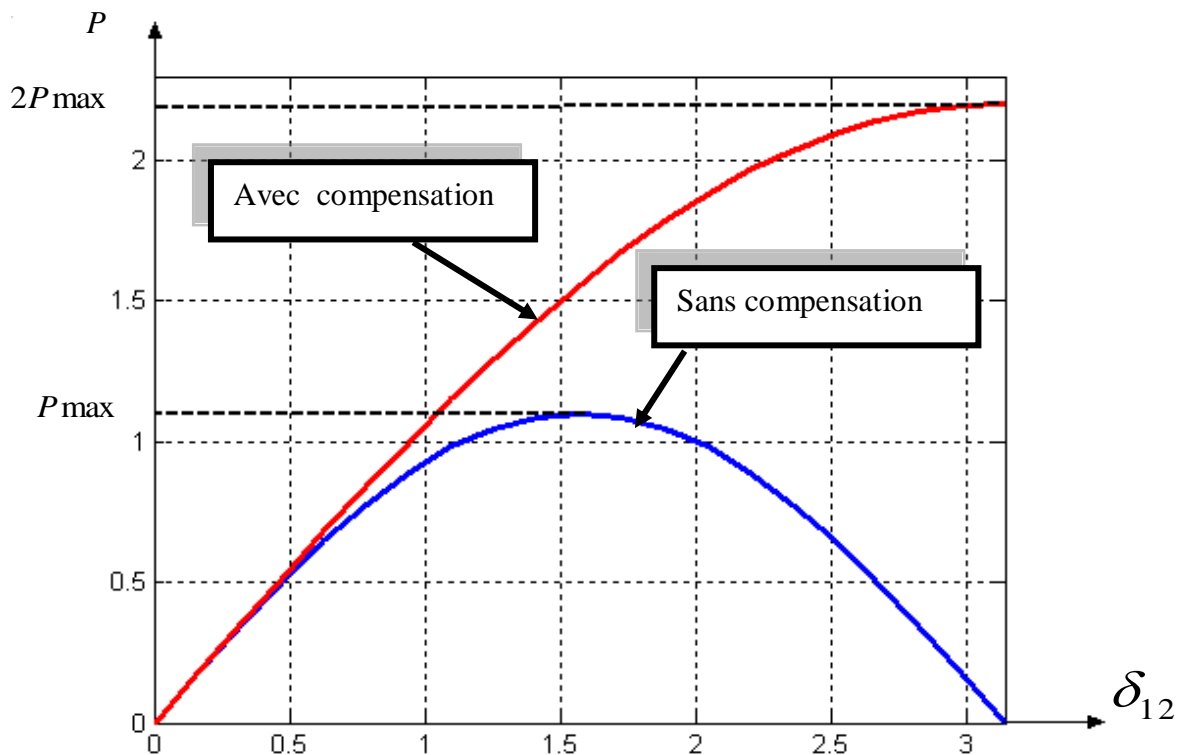


Figure II.4: courbes de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission.

II-1-3 Principe de la compensation série :

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductif, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance de type capacitif. En conservant le même modèle de ligne, on obtient la compensation série donnée par la (figure II.5).

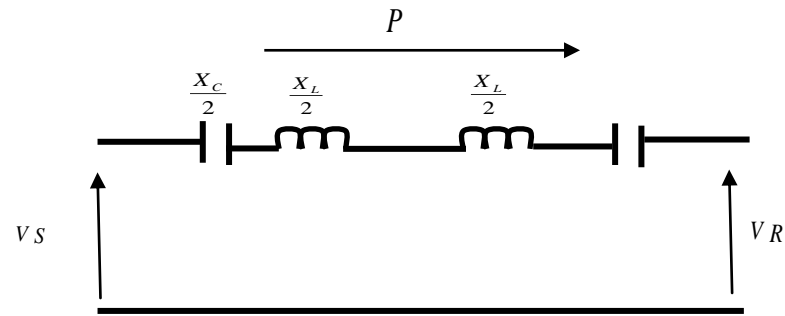


Figure II.5 : Principe de la compensation série

La réactance introduite aura la valeur X_C , donnée par l'équation (II.4) :

$$X_C = s.X_L \quad (\text{II.4}), \quad s : \text{est le degré de compensation } 0 \leq s < 1$$

L'impédance totale entre le récepteur et la source est maintenant donnée par l'équation (II.5).

La puissance transmise, exprimée par l'équation (II.6) est alors fonction du degré de compensation s (figure II. 6)

$$X_{total} = X_L - X_C = X_L(1-s) \quad (\text{II.5})$$

$$P = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \sin \delta_{12} \quad (\text{II.6})$$

Avec ce type de compensation les condensateurs doivent, échanger de l'énergie réactive en quantité importante. Les propriétés sont similaires à celles de la compensation d'énergie réactive.

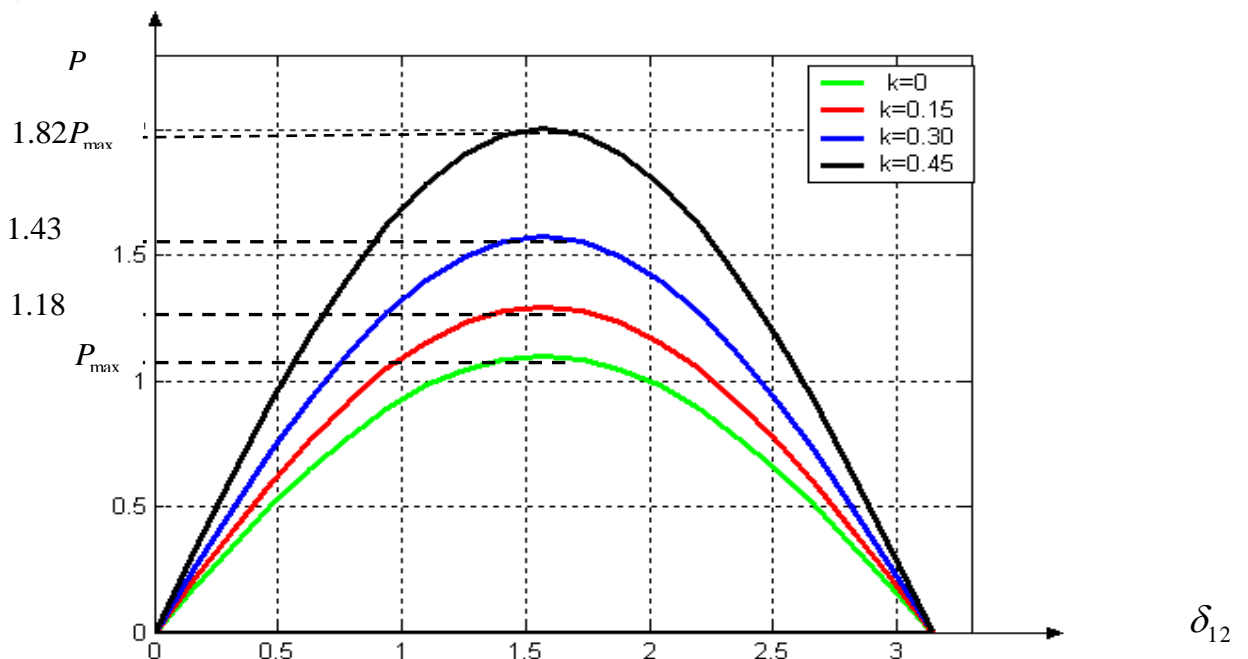


Figure II.6 : courbe de puissance avec et sans compensation. ;série

II-1-4 La compensation par déphasage :

Le principe de cette compensation est basé sur l'insertion d'un déphaseur sur la ligne. Ce dispositif est modélisé par une source de tension, d'amplitude et phase variables. On peut alors avoir en sortie du déphaseur une tension V_S de même amplitude qu'à l'entrée V_G mais déphasée de l'angle α (Figure II.7)

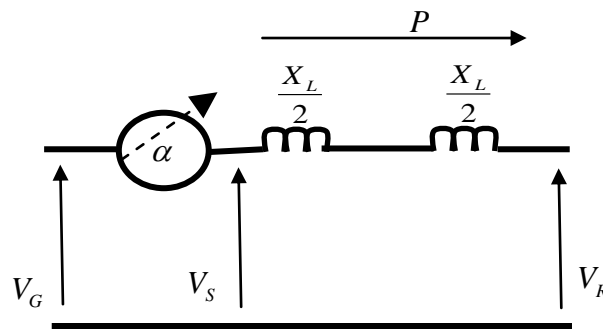


Figure II.7 : Principe de compensation par déphasage.

La puissance transmissible sur la ligne est alors fonction de l'angle déphasage α équation (II.7).

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta + \alpha) \quad (\text{II.7})$$

Pour ce type de compensation, la puissance maximale n'est pas augmentée, mais le réglage de α permet de régler le transit de puissance. Ce dispositif fonctionne finalement comme une vanne électronique.

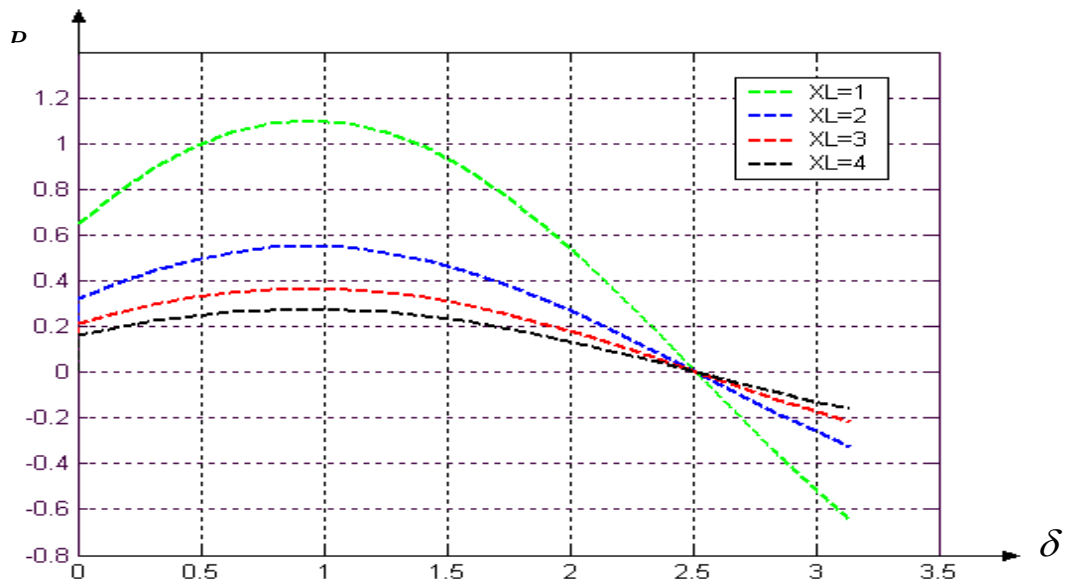


Figure II.8 : compensation par déphasage pour $\alpha = \pi / 5$

II-2 Réalisation Technique Des Compensateurs :

Les principaux compensateurs présentés nous montrons maintenant les moyens techniques de réalisation. Diverse méthodes existaient bien avant le lancement du projet FACTS, mais l'évolution des composants de l'électronique de puissance tel que les GTO (Gate tured-off : thyristor à ouverture par la gâchette).

II-2-1 Compensation shunt :

Le compensateur d'énergie réactive a déjà fait ses preuves sous la forme d'une machine synchrone couplée au réseau et fonctionnant à vide. La puissance active alors consommée est uniquement liée aux pertes des machines. Le réglage du transfert d'énergie réactive se fait par le biais de l'excitation de la machine.

Ce principe de réglage, outre les nuisances sonores, nécessite un coup d'investissement initial et d'entretien non négligeables. Par ailleurs, l'inertie de la machine implique des temps de réponse conséquents.

Des inductances et des condensateurs commandés par des interrupteurs mécaniques ont été largement utilisés et le demeurent encore. Ce sont tout simplement des l'inductances ou des batteries condensateurs qui sont connectées au réseau en fonction de l'énergie réactive que l'on veut absorber ou fournir. Cette technique ne permet pas un réglage fin, et n'a pas un temps de réponse suffisamment rapide pour compenser de fortes variations d'énergie, de plus, les parties mécaniques demandent une importante.

II-2-1-1 Compensation par SVC (Static Var Compensator) :

II-2-1-1-1 Définition :

Compensateur statique de puissance réactive rapide peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation d'un compensateur statique de puissance réactive en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profile de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillation des amplitudes de tension.

Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques les RCT (Réactances commandés par thyristor) a fait leur apparition vers la fin de années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristors

tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

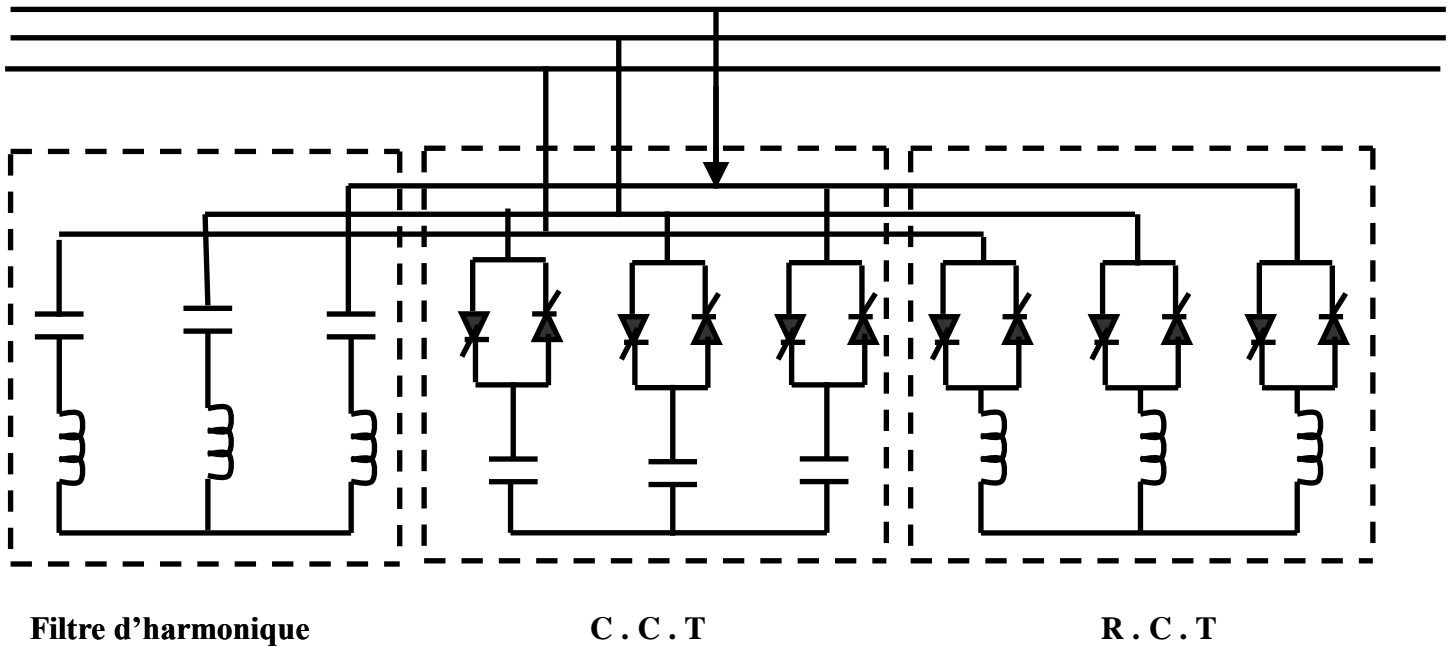


Figure II.9: schéma du SVC

II-2-1-1-2 Principe de fonctionnement :

La figure (II.10) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive X_C et d'une bobine d'inductance avec la réactance X_L

Ce système utilise l'angle d'amorçage α des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu

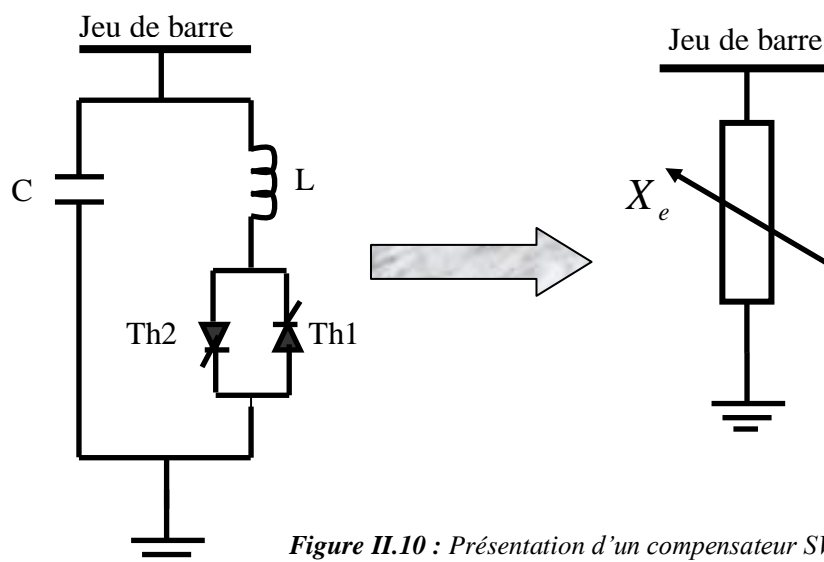


Figure II.10 : Présentation d'un compensateur SVC

La figure (II.11) donne les formes d'onde du courant. Le schéma de figure (2.9) est en étoile mais pour éliminée les harmonique de rang (3, 9, 15,.....) ces dispositifs sont dans la pratique connectés en triangle. Pour limitée la pollution harmonique du réseau. On peut encore éliminée les harmoniques de rang (5, 7, 17, 19,.....) en connectant deux secondaires d'un transformateur, ceux-ci décalés de trente degré (3

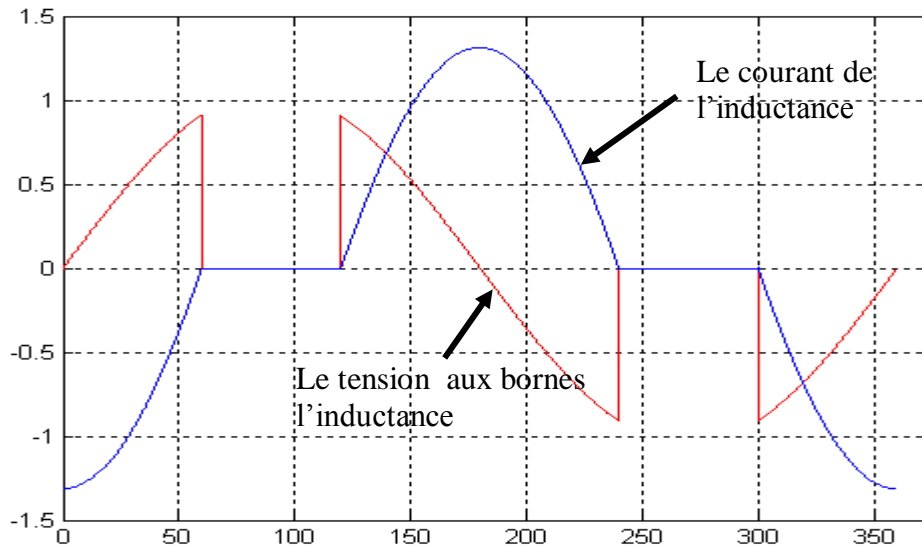


Figure II.11 : forme d'onde du courant dans un RCT

Le RCT ne peut absorbée que de l'énergie réactive, puisque il est constitue d'élément inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnement cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies.

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés sur les harmoniques à éliminer l'association de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif à été installé en 1979 en Afrique de Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (II.12) trois zone sont distinctes :

- Pour $V_{MIN} \leq V \leq V_{MAX}$: est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT .
- Pour $V > V_{MAX}$: est une zone où le RCT donne son énergie maximale (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V < V_{MIN}$: est une zone où seule les capacités sont connectées au réseau.

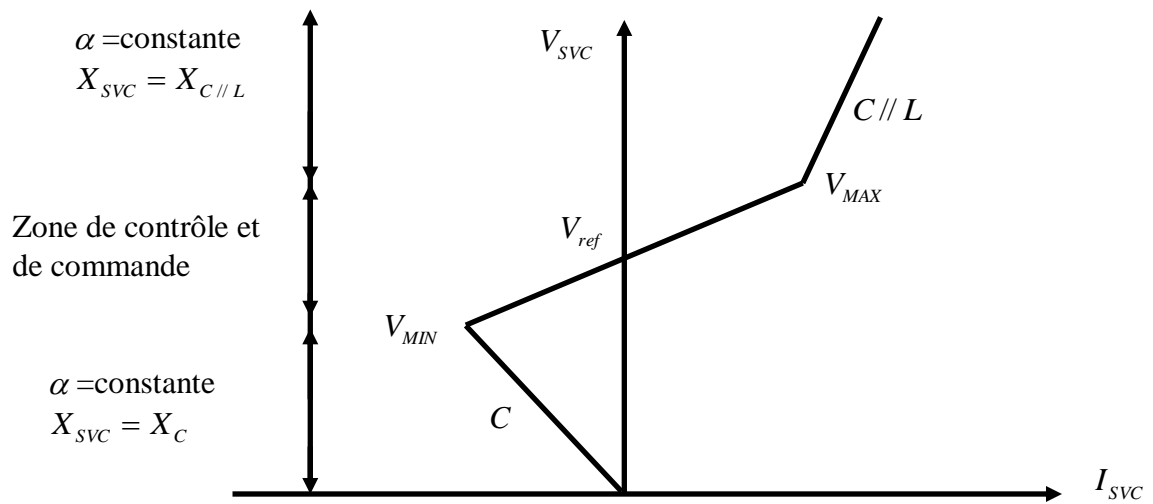
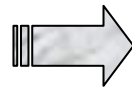


Figure II.12 : fonctionnement du compensateur statique

Exemple de SVC

- 160 SVC utility inst. since 1975
- In service today > 32 000 MVA
- 500 MVA in manufacturing



II-2-1-2 Le STATCOM (Static Compensator) :

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé), ASVC (Advanced Static Var Compensator), SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser). Son principe de fonctionnement est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'être créées par un groupe tournant. Le schéma de STATCOM est donné par la figure (II.13).

Le STATCOM peut être conçu pour agir également en tant que filtre actif pour absorber les harmoniques du système.

Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO forte puissance.

Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formés de GTO et de diodes en antiparallèle.

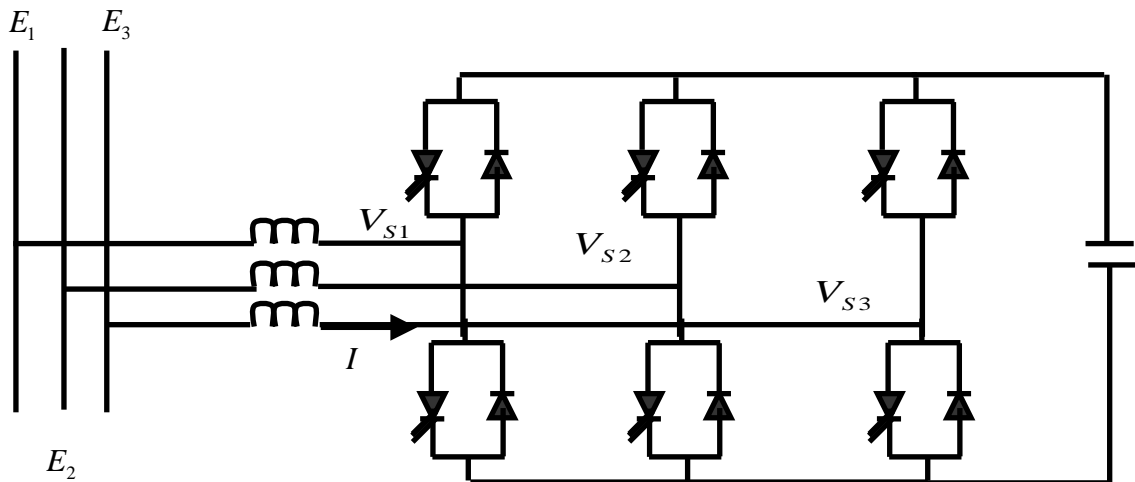


Figure II.13 : Structure de STATCOM

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

L'échange d'énergie réactive se fait par le control de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau E .

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

- Si $V_s < E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est capacitif (Figure II.14-a).
 - Si $V_s > E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est inductif (Figure II.14-b).
- Si $V_s = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

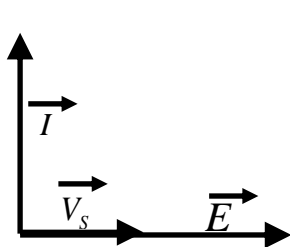


Figure II.14.a : Courant capacitif

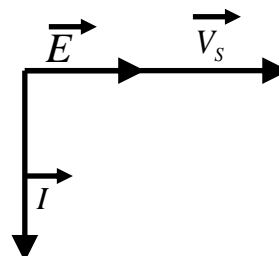


Figure II.14.b : Courant inductif

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrée. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie V_s est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

D'avantage de ce dispositif est pouvoir échange de l'énergie avec un comportement inductif et capacitif uniquement à l'aide d'une inductance.

Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui peut entraîner des résonances avec les éléments inductifs. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (II.15) ce dispositif à l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension E diminue, contrairement au SVC.

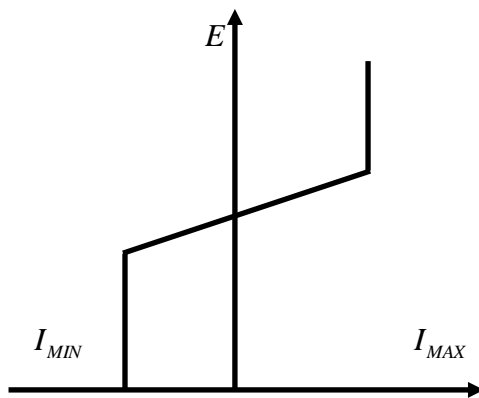


Figure II.15 : Caractéristique statique du STATCOM

II-2-2 Les systèmes de compensation série :

Le principe de ces compensateurs est de modifier l'impédance de la ligne de transport en insérant des éléments en série avec la ligne. Pour modifier l'impédance d'une ligne essentiellement inductive. On insère de éléments capacitifs. On va bien sur chercher à contrôler l'impédance de la ligne, en utilisent des condensateurs séries réglables.

II-2-2-1 Le compensateur série commande par thyristor (TCSC : Thyristors Controlled Series Compensator) :

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Cet ensemble est inséré sur la ligne de transmission (Figure II.16).

Où

X_C : est l'impédance du condensateur du TCSC.

X_I : est l'impédance de l'inductance du TCSC.

X_L : est l'impédance de la ligne.

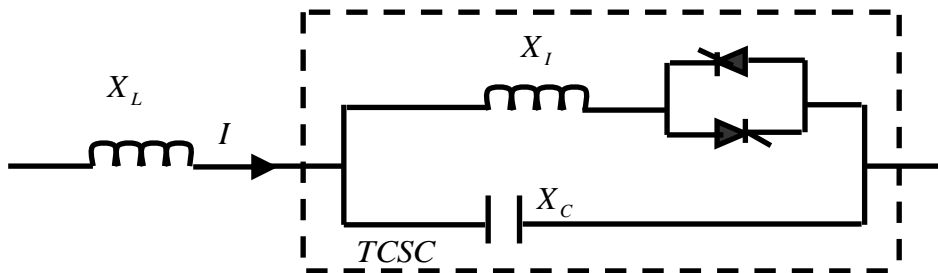


Figure II.16 : Insertion d'un TCSC sur une ligne

Ce dispositif a trois modes de conduction :

- 1- Les thyristors ne sont pas commandés, l'impédance du dispositif est alors X_C
- 2- Les thyristors sont commandés en pleine conduction, l'impédance équivalente est égale à l'impédance du condensateur X_C en parallèle avec l'impédance de l'impédance de l'inductance X_I .
- 3- Les thyristors sont en conduction partielles, l'impédance du dispositif est donc fonction de l'angle de retard à l'amorçage α (Figure II.17).

On remarque qu'il y'a une zone où l'impédance n'est pas déterminée.

L'avantage du TCSC est d'obtenir une impédance variable avec un temps de réponse intéressant. Mais il peut engendrer des instabilités s'il est commandé près de la résonance.

Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.

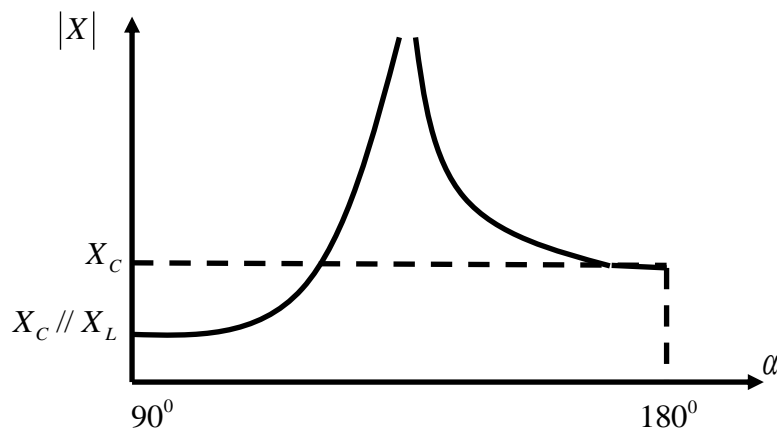


Figure II.17 : Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors

A la réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relié à travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de 180 degrés, le réacteur devient non conducteur et le condensateur en série a sa impédance normale. Pendant que l'angle est avancé de 180 degrés, l'impédance capacitive augmentée. A l'autre extrémité, quand l'angle d'amorçage de RCT est de 90 degrés, le réacteur devient entièrement conduisant, et toute impédance devient inductive, par ce que l'impédance de réacteur est conçue pour être beaucoup inférieure au condensateur en série impédance. Avec 90 degré, le TCSC aide en limitant le courant de défaut.

Inductive de série sans a –coup variable.

Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôlés de réacteur comme limiteur de courant de défaut.

II-3 Les Avantages De La Technologie Des Dispositifs FACTS :

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité du système énergétique (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

Chapitre III

Modélisation Des Dispositif UPFC

Introduction :

Les dispositifs FACTS ils sont capable de réaliser plusieurs fonctions, telles que : augmentation de la capacité de transfert, renforcement de la stabilité et amélioration économique du réseau électrique.

L'implantation d'un dispositif nécessite une nouvelle méthode d'études et d'analyses des réseaux électriques.

Dans ce chapitre, nous donne un exemple du modèle utilisée au l'implantation de dispositif dans le réseau UPFC.

III-1 Caractéristiques D'un Compensateur Statique UPFC:

Dans ce chapitre nous avons étudié le comportement du système et la synthèse des lois de commande, il est nécessaire d'établir un modèle adéquat du dispositif. Nous avons étudié un réseau réel associé à un UPFC. Le modèle détaillé représente correctement les limites de commande et de fonctionnement du contrôleur et peut être considéré comme un modèle avancé.

La conception, les principes de fonctionnement, le modèle mathématique et les blocs de commande de base de l'UPFC sont expliqués dans le troisième chapitre ainsi que les résultats des simulations obtenus par Matlab (**SimPowerSystems Demos V 7.0**).

Il est constitué de deux onduleurs de puissance qui sont connectés à travers un circuit continu commun. L'un des onduleurs, connecté en parallèle, assure la compensation de la puissance réactive. L'autre, branché en série avec la ligne de transmission, permet de contrôler le transit de puissances actives et réactive.

Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance ; la tension, l'impédance et l'angle de transport de la ligne.

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé et

l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la figure III.1.

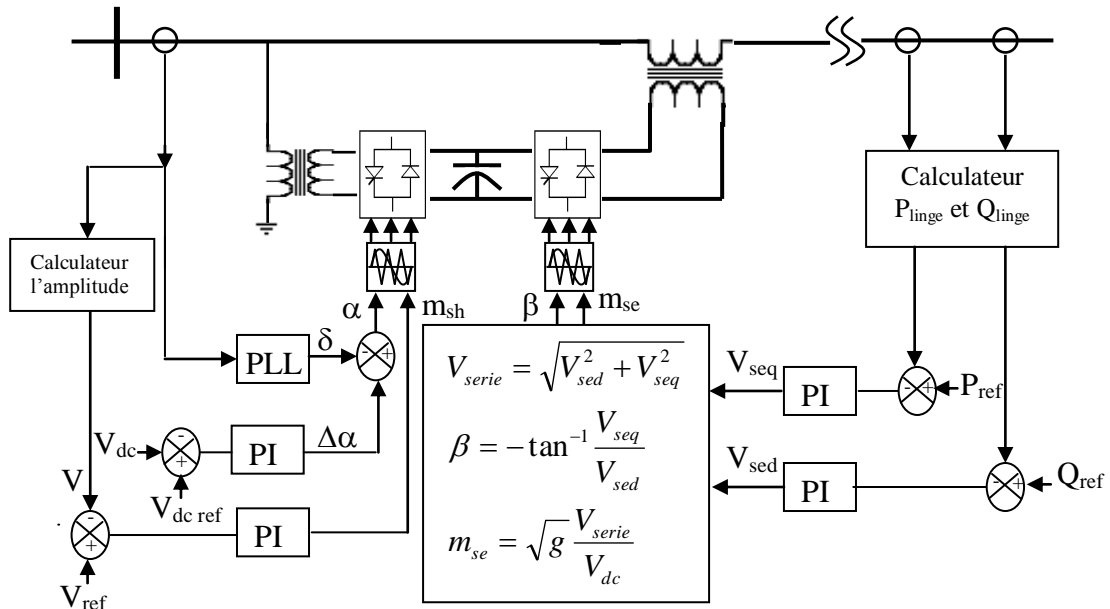


Figure III.1 Schéma général du système de contrôle UPFC

L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase est ajustable. Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

- régulation de tension avec injection de tension.
- contrôle de l'impédance de ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne. Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- contrôle de phase : l'amplitude et la phase de la tension injectée sont calculées de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC.

III.2 Modélisation D'un UPFC :

Un système de contrôle efficace est essentiel afin de tirer l'avantage maximum des possibilités inhérentes de l'UPFC. La raison unique des caractéristiques de l'UPFC est commandée indépendamment de la puissance active et réactive. Pour tenir compte de la nécessité la commande d'active et réactive puissance indépendante dans un UPFC, une commande à trois niveaux de convertisseur ou une certaine prolongation de la technique de MLI utilisée dans des convertisseurs à deux niveaux doit être mise en application.

Les équipements d'UPFC utilisés est basé sur deux convertisseurs identiques, chacun composé de structures multiples de valve de la puissance élevée GTO alimentant un transformateur intermédiaire. La tension de sortie de convertisseur est une sinusoïde de 48 impulsions produites par la commutation appropriée des valves entre le positif. Zéro et négative de tensions de condensateur DC.

III.2.1 Modélisation de la partie shunt :

La structure triphasée de la partie shunt (nommé STATCOM) est donnée sur la figure III.2. Pour simplifier les calculs, nous considérons les valeurs en grandeur réduite et ainsi nous n'avons plus besoin du rapport de transformation du transformateur shunt. L'onduleur est modélisé par des interrupteurs idéaux en série avec la résistance R représentant les pertes par conduction. Le réseau électrique est représenté par les trois tensions simples (v_a , v_b , v_c), celles au point de raccordement de la partie shunt. Chaque capacité est en parallèle avec une résistance qui représente ses pertes.

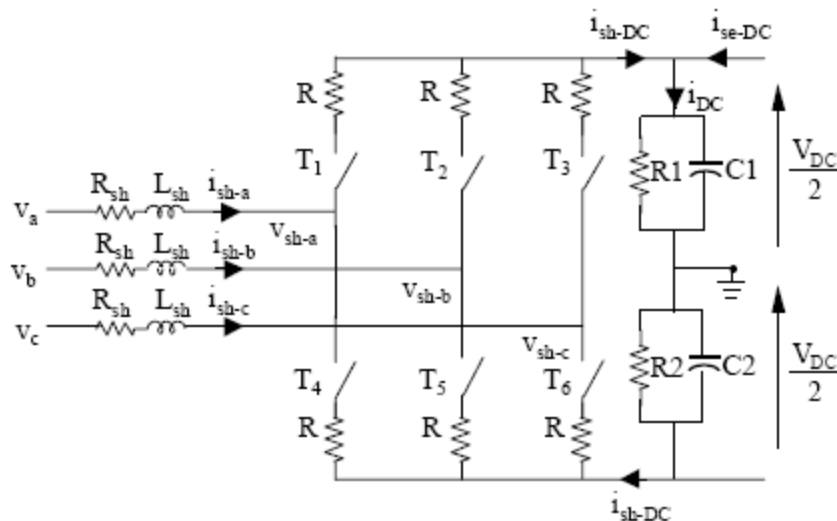


Figure III.2 Schéma simplifié d'un STATCOM (partie parallèle de l'UPFC) connecté au réseau

III.2.2 Modélisation de la partie série :

La structure de cette partie est identique à celle de la partie parallèle. Le bus de tension continu est le même. Côté alternatif, le transformateur de liaison est représenté par trois transformateurs monophasés élévateurs. Les inductances de fuites et les résistances des transformateurs sont notées L_{se} et R_{se} (Fig. III.3).

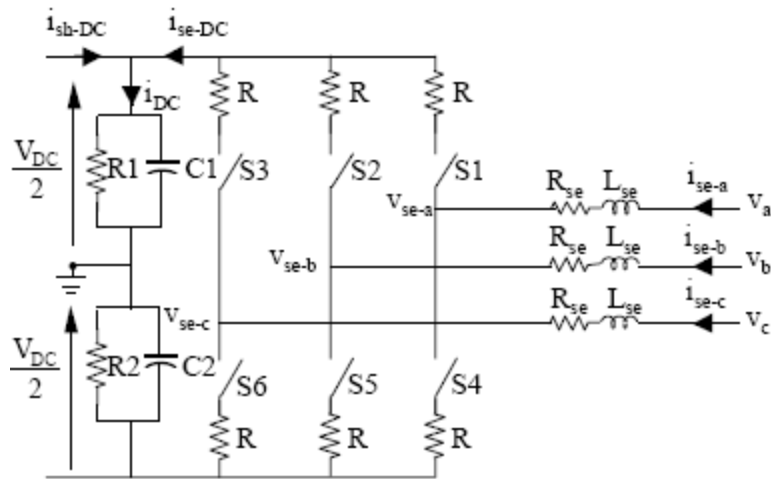


Figure III.3 Schéma simplifié d'un UPFC (partie série) connecté au réseau

III.3 Contrôle de L'UPFC :

Le contrôle d'un UPFC se décompose de deux parties, celle de la partie parallèle et celle de la partie série. Pour chacune, nous allons développer des différentes méthodes de commande de système.

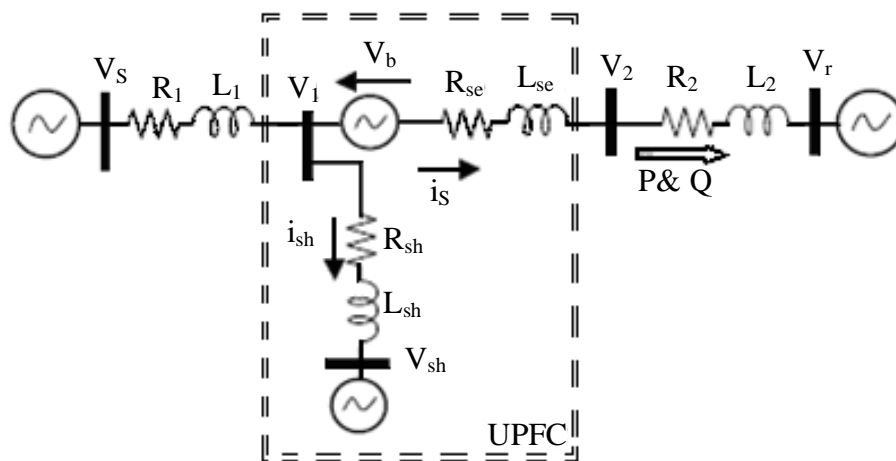


Figure III.4 Modèle mathématique d'un UPFC connecté au réseau

III.3.1 Partie série :

La partie série est utilisée pour le contrôle des puissances active et réactive transitées. Il existe plusieurs de contrôle du convertisseur série, méthodes parmi lesquelles nous pouvons citer un système de contrôle de l'écoulement de puissance active dans la ligne de transmission et tension à la fin de Jb de réception; un autre système de contrôle pour l'écoulement de puissance active et réactive dans la ligne de transmission.

III.3.2 Partie shunt :

Le courant shunt est commandé en variant l'amplitude et l'angle de la tension de convertisseur shunt.

III.3.3 Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- commande par hystérésis,
- commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

III.4. Le réseau test :

Considérons le réseau teste de notre étude qui est constitué d'un générateur connecté au réseau infini par le transformateur T et ligne de transmission d'énergie (**SimPowerSystems Demos V 7.0**).

En considérant les grandeurs réduites du système, le schéma équivalent du réseau est présenté par la figure III.5.

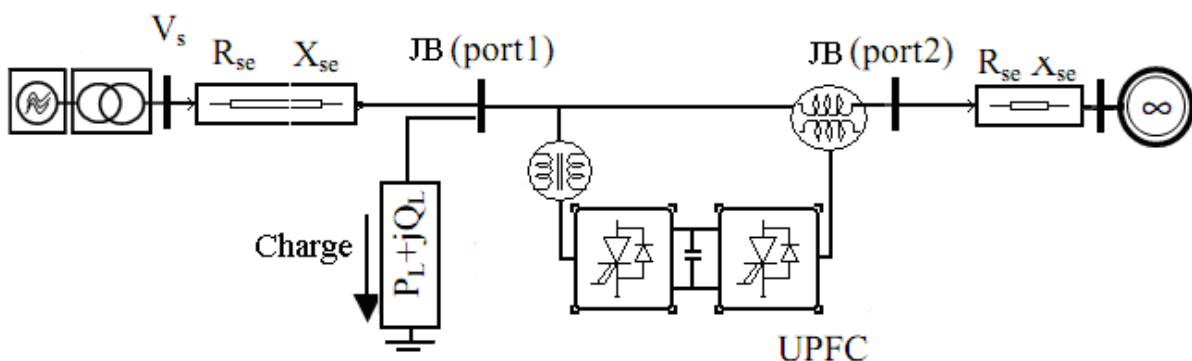


Figure III.5 Schéma équivalent en grandeurs réduites :

Nous considérons d'abord la base du système en grandeur réduite comme suit :

$$S_{base}=1000 \text{ MVA} \quad \text{et} \quad U_{base}=400 \text{ KV}$$

Par conséquent les deux autres bases du système (le courant et l'impédance:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}U_{base}} = 1443 \text{ A}$$

$$Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = 160 \text{ } \Omega$$

Nous avons d'abord choisi les références des système : $P = 1 \text{ p.u}$ et $V_{dc} = 3.38 \text{ p.u}$ et $V_1 = 1 \text{ p.u}$, $V = 1 \text{ p.u}$.

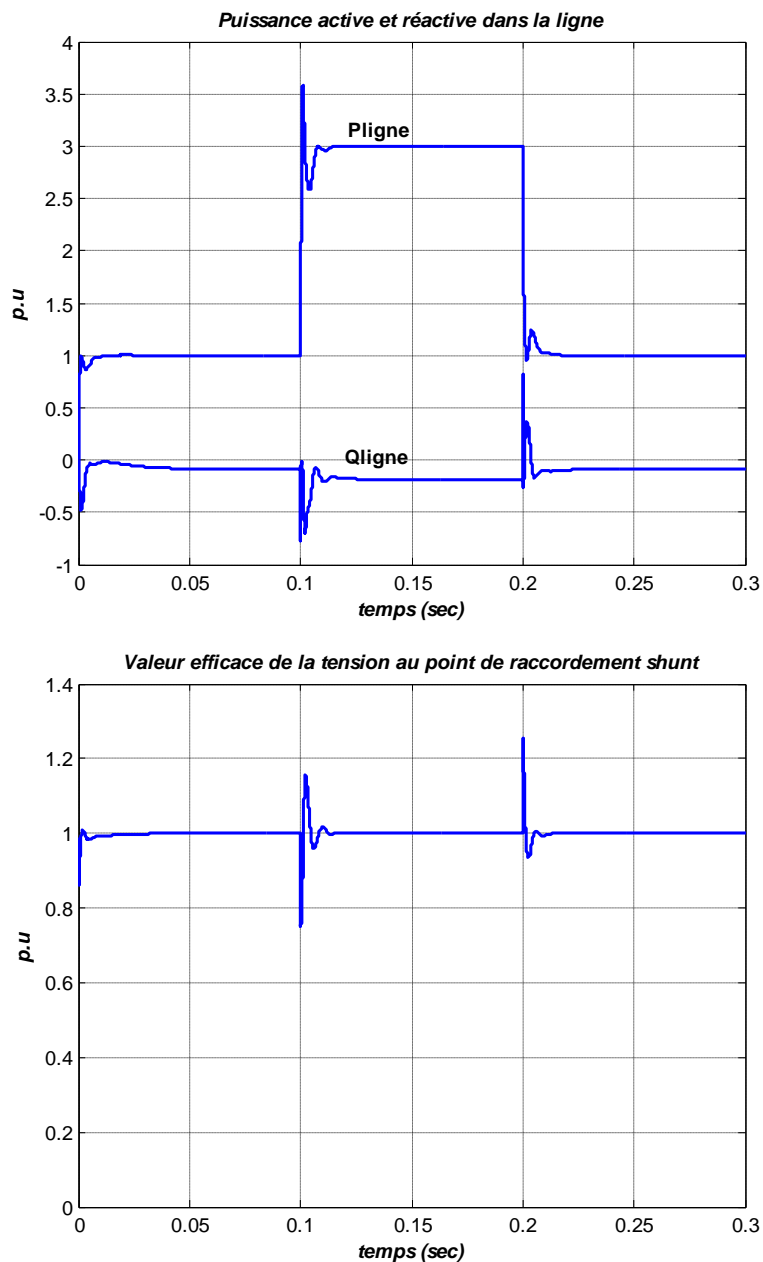
Et la charge applique est $P_{ch} = 3 \text{ p.u}$ et $Q_{ch} = 2 \text{ p.u}$

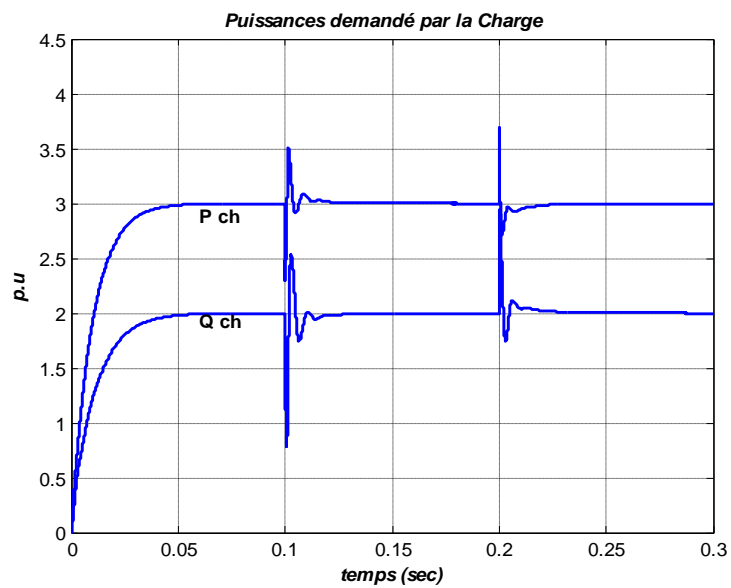
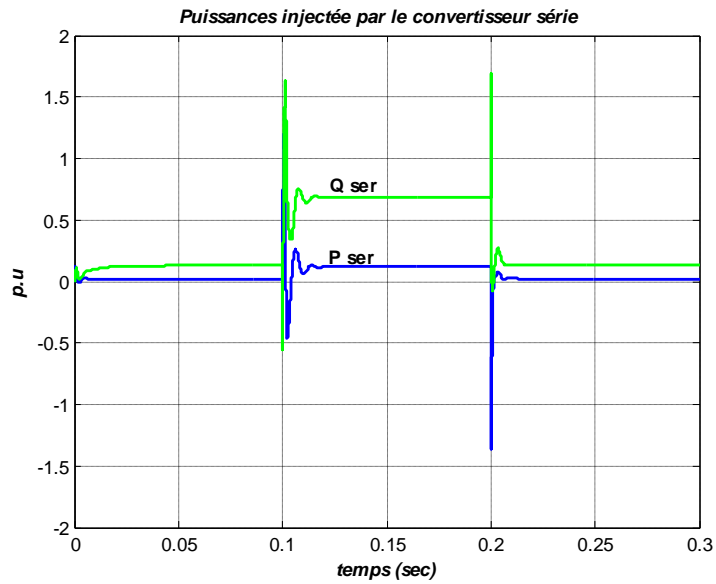
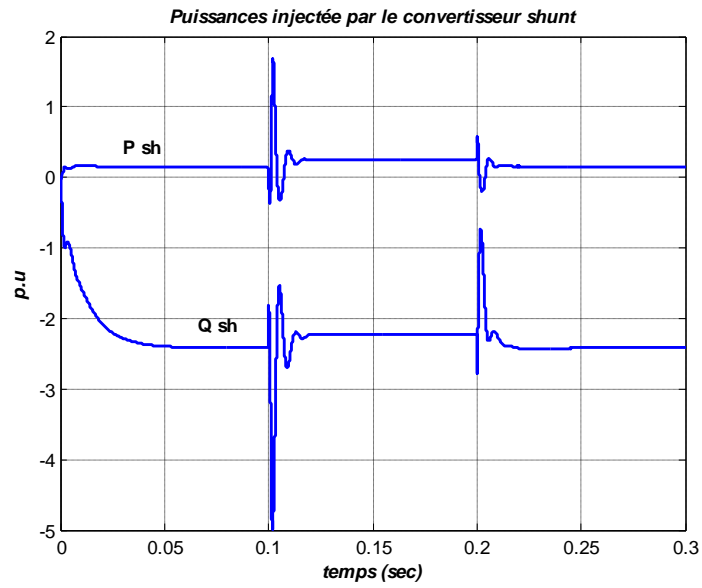
A l'instant $t = 1 \text{ s}$, nous avons changé les références de puissance pour qu'elles deviennent : $P=3 \text{ p.u}$. Ensuite, à l'instant $t=2 \text{ s}$ nous avons remis les références initiales.

La figure III.6 montre les variations de :

- la puissance active et réactive
- la tension injectée en série
- la puissance réactive injectée par partie parallèle
- la valeur efficace de la tension au point de raccordement
- la tension aux bornes du condensateur

Nous remarquons que les puissances actives suivent leurs consignes, cela valide le bon fonctionnement des régulateurs de la partie série. Grâce aux régulateurs de la partie parallèle, la tension au point de raccordement ainsi que celle aux bornes du condensateur restent constantes. En effet, la partie parallèle injecte (ou consomme) de la puissance réactive de manière à ce que la tension du réseau reste constante.





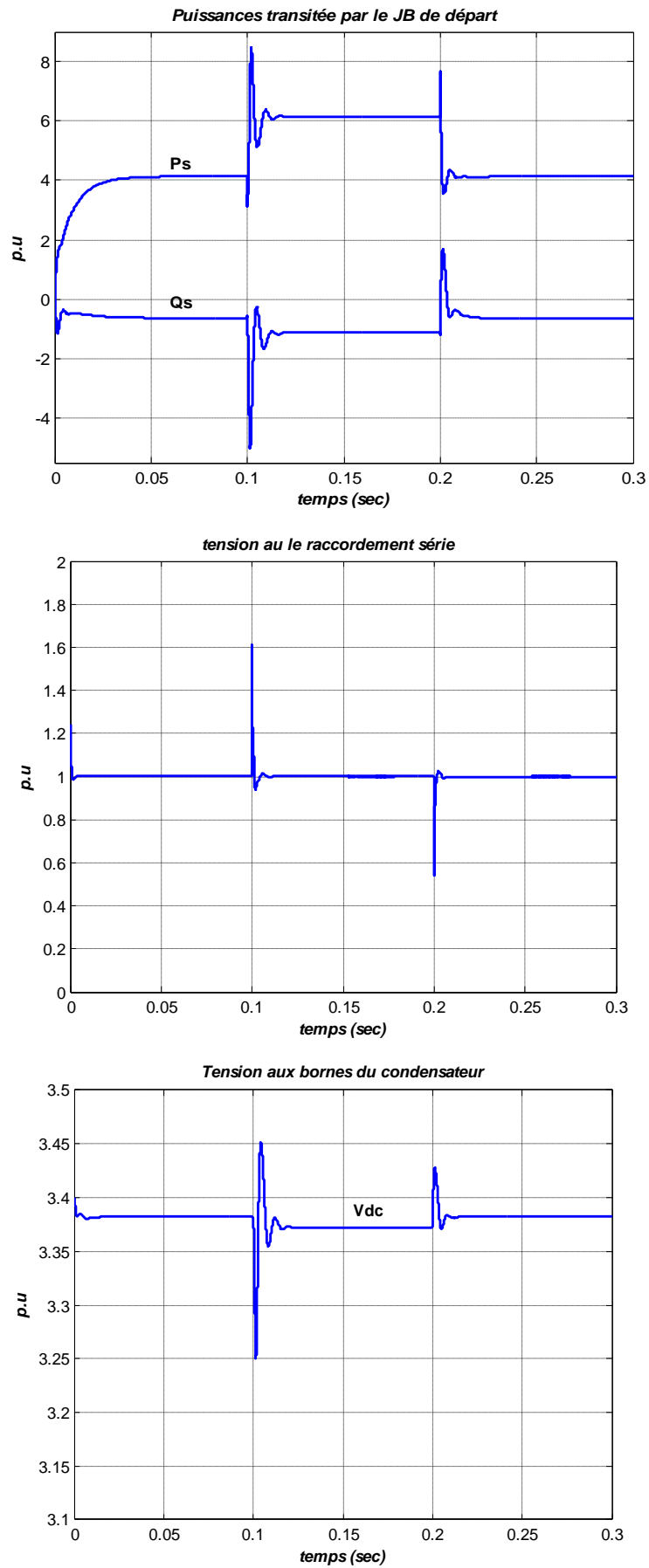


Figure III.6 : Résultats des simulations pour le contrôle de la puissance dans la ligne

III.5 Conclusion :

L'UPFC est un dispositif puissant parmi les systèmes FACTS, dans ce chapitre nous avons vu ses caractéristiques. Nous avons également identifié les références du système de commande pour la partie parallèle et la partie série.

Enfin, nous avons fait des simulations. Les résultats obtenus par ces différentes simulations ont validé d'une manière générale les différents modèles des deux parties de l'UPFC.

Conclusion Générale

L'étude de l'impact des dispositifs de compensation dynamique sur les réseaux électriques, est devenu l'un des sujets qui intéressent dans les études de génie électrique aussi dans les autres recherches.

Les différents types de compensations classique et les dispositifs de compensations (FACTS) ont été étudiés dans ce travail et implanter dans des réseaux test. On a abordé d'une manière générale les avantages et les inconvénients de ces moyens de compensations dynamiques, en vue d'améliorer les indices de qualité de l'énergie électrique, et l'amélioration des performances du système énergétique.

On peut dire pour que l'étude de L'UPFC est un dispositif puissant parmi les systèmes FACTS pour le grandeurs soit la puissance et soit la tension.

D'autre part une modélisation mathématique efficace des dispositifs FACTS, permet aussi d'élaborer une étude proche de la réalité.

Bibliographie

- [1] L.Belkacem & K. Saber “Compensation dynamique de l’énergie réactive dans les réseaux électriques” Université de Biskra promotion juin 2005.
- [2] G.Seddik & D.M lakhdar “ l’impact des dispositifs de Compensation dynamique (FTCTS) sur les réseaux de transport” Université de Biskra promotion juin 2006.
- [3] B. Khaled & Z.Hakim “ Etude des compensateurs statiques de l’énergie réactive SVC dans un réseau électrique” Université de Biskra promotion juin 2005.
- [4] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI, Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques, Docteur de l’Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.