

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES TECHNIQUES AVANCÉES



Département Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme Master en traction électrique

La compensation de la puissance réactive avec facts

Ibtissem CHEURFA

Sous la direction de **M.Amar HAMACHE**

Présenté et soutenu publiquement le (26/06/2024)

Composition du jury :

M .Souleyman BENKRAOUDA	(MCB-ENSTA-Alger)	Président
M .Mohamed AISSIOU	(MCA-ENSTA-Alger)	Examineur
M .Amar HAMACHE	(MCA-ENSTA-Alger)	Promoteur

Année universitaire (2023/2024)

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents Cheurfa Yazid et Afnai Nadia,

qui ont toujours été là pour moi, pour leur soutien moral et financé, leurs encouragements, surtout pour m'avoir toujours guidés et épaulés lors de mes études. Pour leurs sacrifices, la confiance qu'ils m'ont accordés ainsi la force et la croyance pour être là aujourd'hui. Aucune dédicace ne peut suffire pour exprimer toute ma tendresse et l'affection que je vous apporte à tout deux.

A mon cher frère Moussa,

Et mes chères soeurs Houda, Siham, Sabrina, Ikram,
pour leur présence à mes côtés, leur soutien et motivation.

A Mme. NADI Souad ingénieur de laboratoire,
pour sa bienveillance et sa gentillesse.

A mes chers beaux-frères Ziad, Abderazek, Hamou,
pour leurs encouragements.

A mes très chères nièces Amelia et Marwa,

A mon très cher neveu Ilyas,

**A mes amies Djamila, Nardjes, Zahra, Ines, Rahma, Meriem, Aya,
Soumia, Nadjat, Maroua et Taiba,**

A Monsieur Benmeddour Mohamed borhane,
qui as été une source constante de soutien et d'inspiration tout au long de ce parcours. Ta présence a rendu cette aventure plus significative et plus enrichissante. Ce mémoire est autant le tien que le mien.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Ibtissem

Remerciements

je souhaite tout d'abord exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur **Amar HAMACHE** pour avoir proposé ce sujet de mémoire, pour m'avoir encadré, et suivie durant la réalisation de mon étude, pour sa disponibilité et le fait qu'il nous ait fait profiter de son expérience, afin de contribuer à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements, à Monsieur **Souleyman BENKRAOUDA**, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury, Monsieur **Mohamed AISSIOU**, d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance pour l'opportunité qui m'a été offerte de réaliser ce stage au sein de SONATRACH. Cette expérience a été extrêmement enrichissante tant sur le plan professionnel que personnel, et je suis profondément reconnaissantes.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe de CIS, en particulier à Monsieur **A. Lounis**, Monsieur **F. Boukoucha**, et Monsieur **H. Boumedien**, pour leurs précieux conseils tout au long de cette période. Leur aide m'a permis de mieux comprendre le fonctionnement du service, et j'ai été touché par leur accueil chaleureux.

Je remercie enfin toute personne qui de près ou de loin, de façon active ou passive a contribué à la réalisation de ce mémoire.

Abstract

This thesis focuses on an in-depth study of relative power and compensation methods in electrical networks, with particular attention to FACTS (Flexible AC Transmission Systems). It examines the impact of these systems on improving the stability and efficiency of power transmission networks. The analysis highlights the benefits of FACTS in managing reactive power, reducing energy losses, and increasing transmission capacity. The thesis also discusses the crucial role of FACTS systems in facing contemporary energy challenges, such as the integration of renewable energies and the increasing demand for electricity. Finally, it explores future prospects for research and development in the field of electrical network compensation.

Keywords : Relative Power, Electrical Network Compensation, FACTS Systems, Reactive Power Management, Renewable Energies, Power Transmission, Network Stability.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie de la puissance relative et des méthodes de compensation dans les réseaux électriques, avec une attention particulière portée aux systèmes FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Il examine l'impact de ces systèmes sur l'amélioration de la stabilité et de l'efficacité des réseaux de transmission d'énergie. L'analyse met en lumière les avantages des FACTS dans la gestion de la puissance réactive, la réduction des pertes d'énergie et l'augmentation de la capacité de transmission. Le mémoire discute également du rôle crucial des systèmes FACTS face aux défis énergétiques contemporains, tels que l'intégration des énergies renouvelables et la demande croissante en électricité. Enfin, il explore les perspectives d'avenir pour la recherche et le développement dans le domaine de la compensation des réseaux électriques.

Mots clés : Puissance Relative, Compensation des Réseaux Électriques, Systèmes FACTS, Gestion de la Puissance Réactive, Énergies Renouvelables, Transmission d'Énergie, Stabilité du Réseau.

Table des matières

Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Liste des acronymes	8
Introduction générale	10
1 Généralités	11
1.1 Introduction.....	11
1.2 La puissance relative dans les circuits électriques.....	11
1.2.1 Sens physique de le "puissance imaginaire"	12
1.2.2 Le théorème de Boucherot.....	13
1.2.3 Puissance transmise par une ligne électrique	14
1.2.4 La chute de tension.....	14
1.2.5 Pertes actives	15
2 La compensation	16
2.1 Principe de la compensation shunts.....	16
2.2 Principe de la compensation séries.....	16
2.3 Principe de la compensation par déphasage.....	17
2.4 Moyens de compensation réactive	18
2.4.1 Compensateurs synchrones.....	18
2.4.2 Bancs de condensateurs	18
2.4.3 Compensateurs statiques de puissance réactive	18
3 Les systèmes de transmission flexibles en courant	20
3.1 Définition.....	20
3.2 Les différents types de systèmes FACTS	20
3.3 Applications Pratiques des Dispositifs FACTS	21
3.4 Structure des principaux dispositifs FACTS.....	21
3.4.1 Dispositifs de compensation dynamique shunts.....	21
3.4.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC)	21
3.4.1.1.2 Principe de fonctionnement	22
3.4.1.1.3 Les avantages.....	22
3.4.1.2 STATCOM (static Compensator)	22
3.4.1.2.1 Définition.....	22
3.4.1.2.2 Principe de fonctionnement	23
3.4.2 Dispositifs de compensation dynamique série	23
3.4.2.1 La capacité série commande par thyristor	23
3.4.2.1.1 Définition.....	23

3.4.2.1.2	Principe de fonctionnement	24
3.4.2.1.3	Les avantages.....	24
3.4.3	Compensateur statique série synchrone.....	24
3.4.3.1	Définition	24
3.4.3.2	Principe de fonctionnement	24
3.4.3.3	Avantages.....	25
Conclusion générale		26
Références		27

Liste des figures

Figure 1.1:	Association en parallèle d'éléments Résistif, inductif et capacitif	12
Figure 1.2:	Puissances instantanées consommées par une résistance, une inductance et un condensateur associés en parallèle	12
Figure 1.3:	Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne	14
Figure 2.1:	Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation	17
Figure 2.2:	Principe de compensation par déphasage	17
Figure 3.1:	Schéma de base du STATCOM	23

Liste des tableaux

Tableau 1.1:	La puissance active et réactive absorbées par la résistance, inductance et capacité	12
Tableau 3.1:	les chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde, ainsi que leurs puissances installées.....	21

Liste des acronymes et symboles

- ASVC** : Advanced Static Var Compensator.
- CCT** : Condensateurs Commandés par thyristor ;
- EPRI** : Electric Power Research Institute.
- FACT** : Flexible AC Transmission Systems.
- GTO** : Gate Turn-Off Thyristor.
- Hz** : Hertz
- MVAR** : Méga VoltAmpère Réactif.
- RCT** : Réacteur Contrôlé en Tension.
- SVC** : Static Var Generator.
- STATCOM** : Static Synchronous Compensator.
- STATCON** : Static Condenser.

Introduction générale

Le système électrique peut être limité par divers facteurs statiques et dynamiques restreignant sa capacité de transport, tels que la stabilité angulaire, l'amplitude de la tension, les limites thermiques, ainsi que la stabilité transitoire et dynamique. Ces contraintes déterminent la puissance électrique maximale qui peut être transmise sans endommager les lignes de transport et les équipements électriques. En principe, ces limitations peuvent toujours être surmontées par la mise en service de nouvelles lignes de transport et de centrales de production (Hamache, 2015).

L'industrialisation, l'augmentation du nombre de clients et l'expansion des zones desservies sont les principaux facteurs contribuant à l'augmentation de la consommation d'énergie électrique et à une chute de tension. Ainsi, dès le départ, il est clair qu'il est nécessaire d'augmenter le nombre de stations de production d'électricité, de lignes, de transformateurs, etc., ce qui entraîne une augmentation des coûts et une détérioration de l'environnement naturel. Par conséquent, il est aujourd'hui crucial de disposer de réseaux interconnectés et de fonctionner près des limites de stabilité pour répondre à ces nouveaux besoins. En réponse à ces défis, les systèmes flexibles de transport à courant alternatif (FACTS) offrent une solution efficace. Ces systèmes peuvent résoudre les contraintes du réseau sans nécessiter de modifications profondes (Hamache, 2015).

Les dispositifs FACTS utilisent des contrôleurs électroniques statiques pour améliorer la contrôlabilité et accroître la capacité de transport du réseau électrique. Introduit en 1988 par le Dr. N. Hingorani, ce concept repose sur l'incorporation de dispositifs électroniques de puissance connectés au côté haute tension du réseau (Hamache, 2015).

Grâce aux nombreux avantages économiques et techniques qu'ils offrent, les FACTS ont attiré l'intérêt des grandes entreprises de fabrication d'équipements électriques, des services publics et des organismes de recherche dans le monde entier. Cela a conduit à des avancées technologiques significatives au bénéfice des systèmes FACTS, avec plusieurs types de dispositifs FACTS installés dans les réseaux électriques à travers le monde (Belatel, 2017).

Ce travail se compose de trois chapitres. Le premier chapitre explique le concept de la puissance réactive et le phénomène de la chute de tension. Le deuxième chapitre traite du principe de la compensation des réseaux électriques et de ses différents types. Le dernier chapitre présente les systèmes FACTS, leur fonctionnement et leurs avantages.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

Les méthodes traditionnelles d'amélioration et de contrôle du comportement d'un réseau électrique (telles que les transformateurs à prises réglables en charge, les transformateurs déphaseurs, les compensateurs en série ou en parallèle commutés par disjoncteurs, la modification des consignes de production, le changement de topologie du réseau et l'action sur l'excitation des générateurs) pourraient à l'avenir se révéler trop lentes et insuffisantes pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, en tenant compte notamment des nouvelles contraintes (Mancer, 2012).

Il est probable qu'à l'avenir, il sera nécessaire de compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à réponse rapide récemment développés, connus sous le nom de FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux. Le développement récent des dispositifs FACTS offre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par une action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux maintenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

1.2 La puissance relative dans les circuits électriques

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. À 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, et pour l'amélioration de la marge de stabilité (Mancer, 2012).

Avec l'augmentation de la complexité des réseaux électriques actuels, la contribution des générateurs à la production d'énergie réactive s'est avérée insuffisante. Une grande partie de cette énergie est générée par les dispositifs de compensation présents dans les lignes de transport. Pour assurer une qualité d'énergie optimale, il est essentiel de maintenir un équilibre entre l'offre et la demande d'énergie réactive, de fournir une tension aussi stable que possible

et de respecter un ensemble de contraintes techniques.

1.2.1 Sens physique de le "puissance imaginaire"

Pour valoriser la puissance réactive, il est essentiel de comprendre sa nature. Cela nécessite de revenir à sa définition et à son interprétation physique. La puissance instantanée d'un système électrique monophasé est définie par une certaine formule qui est la suivante :

$$P(t) = v(t)i(t) \quad (1.1)$$

$$v(t) = V_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin(\Omega t) \quad (1.2)$$

$$i(t) = I_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin(\Omega t - \phi) \quad (1.3)$$

Où V_{eff} et $i(t) = I_{\text{eff}}$ sont les valeurs efficaces de la tension et du courant, la pulsation, et ϕ le déphasage du courant par rapport à la tension prise comme référence de phase. Si l'on considère une charge R L C connectée en parallèle et alimentée par une source de tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz (1.1), les différents éléments vont absorber des courants dépendant de leurs impédances.

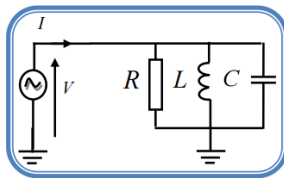


Figure 1.1 – Association en parallèle d'éléments Résistif, inductif et capacitif

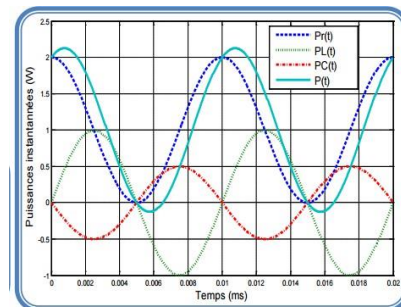


Figure 1.2 – Puissances instantanées consommées par une résistance, une inductance et un condensateur associés en parallèle

Chaque élément va absorber la puissance active et réactive démontrées dans le tableau (1.1) :

TABEAU 1.1 – La puissance active et réactive absorbées par la résistance, inductance et capacité

Charge	Impédance	Courant	Déphasage I/V	P	Q
Résistance	R	V/R	0	V^2/R	0
Inductance	$jL\omega$	$V/L\omega$	$+90^\circ$	0	$V^2/L\omega$
Capacité	$1/jC\omega$	$C\omega V$	-90°	0	$-C\omega V^2$

La puissance instantanée consommée par chacun de ces éléments est sinusoïdale et d'une fréquence double de celle de la source d'alimentation. La puissance instantanée de chaque élément peut être résumé par les expressions suivantes :

$$P_R(t) = V_R(t) \cdot i_R(t) = \frac{V^2}{R} \cos^2(t) = \frac{V^2}{2R} (1 + \cos(2t)) \quad (1.4)$$

$$P_L(t) = v_L(t) \cdot i_L(t) = V \cos(t) \frac{V}{L} \cos(t + \frac{\pi}{2}) = \frac{V^2}{2L} \sin(2t) \quad (1.5)$$

$$P_C(t) = v_C(t) \cdot i_C(t) = V \cos(t) \cdot CV \cos(t + \frac{\pi}{2}) = \frac{CV^2}{2} \sin(2t) \quad (1.6)$$

Nous pouvons ensuite représenter les puissances instantanées absorbées par chacun de ces éléments (Figure. 1.2). La puissance active P est par définition la moyenne de la puissance instantanée. La puissance instantanée absorbée par un élément résistif $P_R(t)$ oscille ainsi à une fréquence égale à 100 Hz. Avec une valeur moyenne non nulle. :

$$P_R(t) = \frac{V^2}{2R} = \frac{V_{eff}^2}{2R} = P \quad (1.7)$$

La puissance instantanée appelée par une inductance ou un condensateur a des propriétés différentes. Cette puissance instantanée est encore sinusoïdale de fréquence 100 Hz. De plus elle est en opposition de phase avec celle absorbée par l'inductance. La quadrature de phase entre la tension et le courant dans les dipôles inductifs ou capacitifs se traduit par une puissance instantanée de moyenne nulle. La puissance réactive Q désigne alors l'amplitude de cette puissance instantanée pour l'inductance.

$$Q = \frac{V^2}{2L} = \frac{V_{eff}^2}{L} \quad (1.8)$$

pour le conducteur :

$$Q = \frac{CV^2}{2} = -CV_{eff}^2 \quad (1.9)$$

Lorsque les dipôles sont en convention récepteur, la puissance réactive absorbée par l'inductance est positive, et on considère que l'inductance consomme de la puissance réactive. Quant au condensateur, la puissance réactive est négative et on considère qu'elle est fournie par le dipôle.

1.2.2 Le théorème de Boucherot

Le théorème de Boucherot permet de faire le bilan des puissances entre les différents éléments d'un circuit : « La puissance active consommée dans un dipôle linéaire est la somme des puissances actives consommées par chacun des éléments composant ce dipôle. »

« La puissance réactive d'un dipôle linéaire est la somme algébrique des puissances réactives consommées par chacun des éléments de ce dipôle. »

Ce théorème met en évidence le découplage entre les éléments consommant la puissance active, qui peut être transformée en puissance utilisable (thermique, mécanique, chimique. . .) et ceux consommant ou produisant de la puissance réactive, qui n'est qu'échange entre ces éléments (Hannebel, 2015).

1.2.3 Puissance transmise par une ligne électrique

La sûreté du système, le bon fonctionnement des installations raccordées et la réduction des pertes en lignes rendent nécessaire de garder la tension à chaque nœud du réseau dans une plage contractuelle de tension.

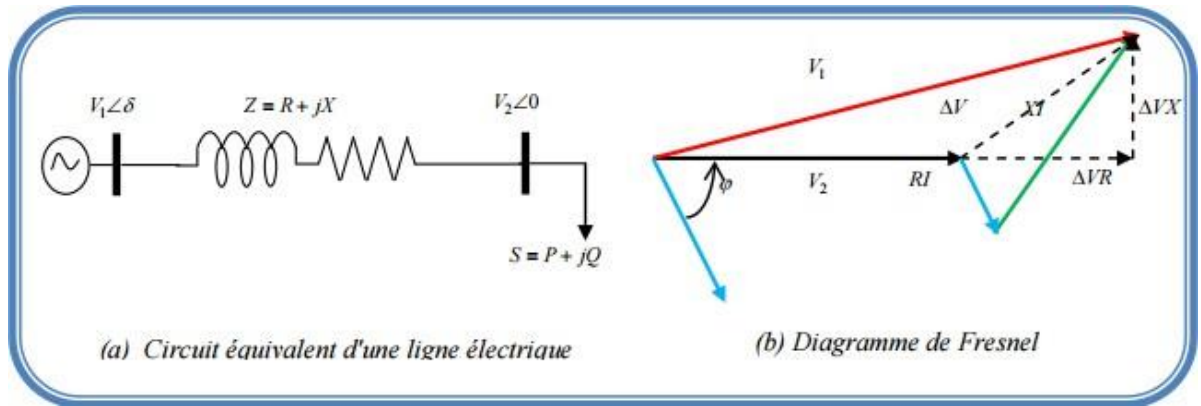


FIGURE 1.3 – Modélisation simplifiée du transport d'énergie dans une ligne

Pour simplifier, considérons le schéma de la figure (1.3), qui représente une ligne électrique $Z = R + jX$ alimentant une charge $(P + jQ)$. Ce modèle est simple, mais il permet d'expliquer qualitativement le lien entre les modules et phases des tensions à chaque extrémité de la ligne d'une part, et les transits de puissance active et de puissance réactive d'autre part $S = P + jQ$.

1.2.4 La chute de tension

La circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse au bout de ligne que son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante. La chute de tension V , à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure. (1.3) (b) est donnée par la formulation suivante :

$$\Delta V = V_1 - V_2 = Z * I \quad (1.10)$$

Par projection selon les axes horizontal et vertical, nous obtenons deux équations réelles :

$$V_1 \cos \delta = V_2 + RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \quad (1.11)$$

$$V_1 \sin \delta = -RI \sin \varphi + XI \cos \varphi \quad (1.12)$$

En élevant au carré puis en sommant ces deux expressions, nous obtenons :

$$V_1^2 = V_2^2 + R^2 I^2 + X^2 I^2 + 2(RV_2 I \cos \varphi + XV_2 I \sin \varphi) \quad (1.13)$$

Il est possible alors de remplacer les différents termes de cette expression en faisant intervenir les puissances :

Avec : $P = V_2 I \cos \varphi$ la puissance active monophasée consommée par la charge,

$Q = V_2 I \sin \varphi$ la puissance réactive monophasée appelée par la charge,

$P_j = RI^2$ les pertes par effet Joule dans la ligne $Q_L = XI^2$ la puissance réactive consommée par la réactance de ligne On obtient donc :

$$V_1^2 - V_2^2 = RP_j + XQ_L + 2(RP + XQ) \quad (1.14)$$

$$(V_1 - V_2)(V_1 + V_2) = RP_j + XQ_L + 2(RP + XQ) \quad (1.15)$$

En notant $V = V_1 + V_2/2$ et $\Delta V = V_1 - V_2$ la chute de tension, nous obtenons :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{1}{2}RP_j + \frac{1}{2}XQ_L + RP + XQ}{V^2} \quad (1.16)$$

Dans un réseau de transport d'énergie bien dimensionné, les pertes par effet Joule dans les lignes représentent habituellement quelques pour-cent de la puissance totale transitée. Si l'on considère un cas où la consommation de puissance réactive de la ligne par rapport à la puissance transitée est faible, nous obtenons la relation simplifiée suivante [2] :

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{RP + XQ}{V^2} \quad (1.17)$$

1.2.5 Pertes actives

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

$$\Delta P = 3RI^2 \quad (1.18)$$

Le courant qui circule dans cet élément est :

$$I = S / \sqrt{3U} \quad (1.19)$$

$$\Delta P = \frac{R \cdot P^2 (1 + \tan^2 \varphi)}{(U^e)^2} \quad (1.20)$$

Chapitre 2

La compensation

Les réseaux électriques ont 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 :

$$S = P + jQ = UI(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2.1)$$

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 (Mancer, 2012).

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{RP + XQ}{V^2} \quad (2.2)$$

La répartition 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) (Hannebel, 2015).

2.1 Principe de la compensation shunts

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_S , en contrôlant le flux de puissance réactive. En effet, la chute de la tension à travers une ligne est donnée par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne.

2.2 Principe de la compensation séries

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance capacitive sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance 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.

$$\Delta V = \frac{X_L \cdot Q}{V} \quad (2.3)$$

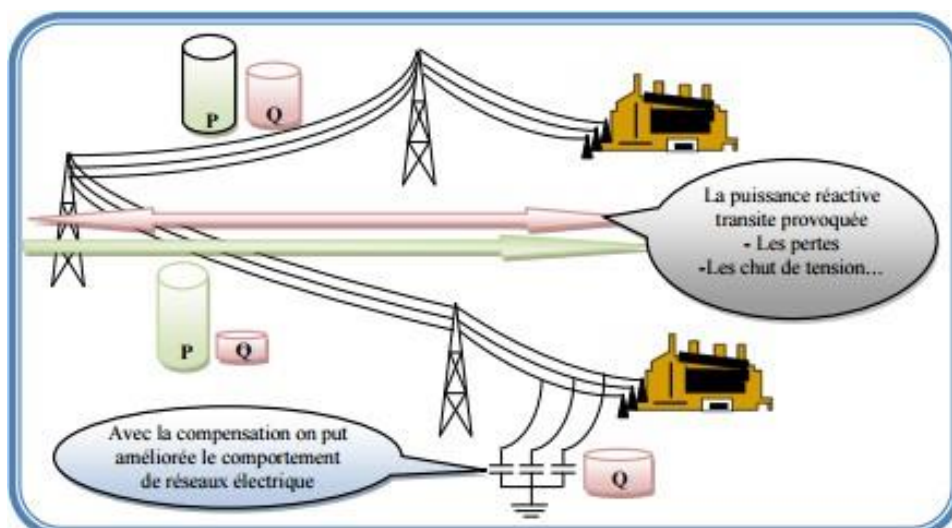


Figure 2.1 – Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation

L'équation (1.24) donne l'expression de la puissance transmise par la ligne compensée. On remarque que la puissance maximale transmise est doublée et est obtenue pour un déphasage $\delta_{12} = 180$. Une compensation shunts permet donc de doubler le transit de puissance maximal d'une ligne par la formule :

$$P = \frac{2V^2}{X_L} \sin \frac{\delta_{12}}{2} \quad (2.4)$$

2.3 Principe de 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 de phase variables. On peut alors avoir à la sortie du déphaseur une tension V_S de même amplitude qu'à l'entrée V_G mais déphasée d'un angle α . La puissance transmissible est alors fonction de l'angle de déphasage.

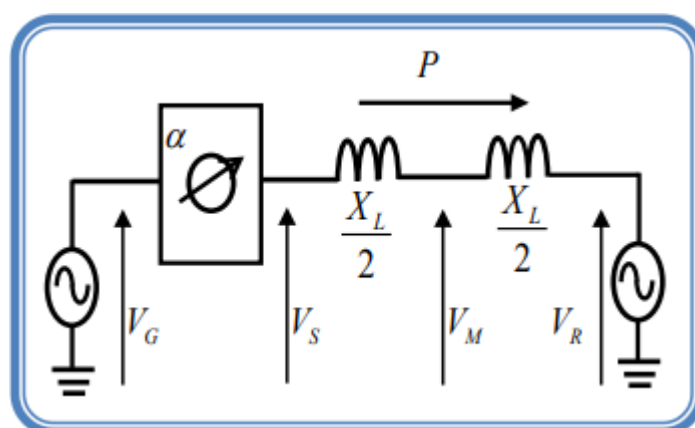


Figure 2.2 – Principe de compensation par déphasage

Pour ce type de compensation, la puissance maximale n'est pas augmentée, mais le réglage de

permet de régler l'acheminement de puissance. Ce dispositif fonctionne finalement comme une vanne électronique.

2.4 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.

2.4.1 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. A l'instar des générateurs synchrones, leur courant d'excitation est réglable, permettant ainsi de contrôler la tension à leur nœud de connexion.

2.4.2 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.

2.4.3 Compensateurs statiques de puissance réactive

Les compensateurs statiques de puissance réactive, ou FACTS (de l'anglais 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.

Chapitre 3

Les systèmes de transmission flexibles en courant

3.1 Définition

Un système FACTS est un dispositif basé sur l'électronique de puissance, conçu pour améliorer la capacité d'un réseau électrique interconnecté. En 1988, l'Electric Power Research Institute (EPRI) a lancé un projet d'étude des systèmes FACTS utilisant des composants électroniques de puissance tels que les thyristors GTO, afin de mieux maîtriser le transit des puissances et l'exploitation des réseaux électriques. Le principal problème des systèmes électromécaniques classiques est leur temps de réponse lent. En revanche, la technologie FACTS, qui utilise des interrupteurs statiques, assure un temps de réponse rapide grâce à l'absence d'inertie. Les systèmes FACTS peuvent donc contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter leur capacité de transport, tout en maintenant, voire en améliorant, la stabilité des réseaux(Padiyar, 2009).

3.2 Les différents types de systèmes FACTS

En général, les systèmes FACTS sont divisés en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs en série** : Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et agissent comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Ils sont utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et influencent l'impédance effective des lignes, ce qui permet de contrôler le flux de puissance et sa stabilité. En général, ces dispositifs injectent une tension en série avec la ligne de transmission.
- **Compensateurs en dérivation (shunts)** : Ces dispositifs consistent en une impédance variable, une source variable, ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement utilisés pour la compensation de la puissance réactive et, par conséquent, pour le contrôle de la tension aux nœuds.
- **Compensateurs hybrides série-shunt** : Cette catégorie combine des dispositifs en série et en dérivation, coordonnés pour accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un

contrôle multivariable, servant à gérer le flux de puissance active et réactive, ainsi que la tension et l'angle de transport de l'énergie (Alibi, 2009).

3.3 Applications Pratiques des Dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont souvent considérés comme une technologie nouvelle, mais des centaines d'installations dans le monde, notamment les SVC depuis les années 1970, avec une puissance totale installée de 90 000 MVAR, démontrent leur acceptation. (Abdelhak Bensefia, 2015).

Le tableau (3.1) résume les chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde, ainsi que leurs puissances installées :

TABLEAU 3.1 – les chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde, ainsi que leurs puissances installées

Type	Nombre	Puissance installée en MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1200
Série Compensation	700	350.000
TCSC	10	2000
UPFC	2-3	250

3.4 Structure des principaux dispositifs FACTS

3.4.1 Dispositifs de compensation dynamique shunts

Vers la fin des années 60, plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leur apparition. Ces dispositifs présentaient l'avantage d'éliminer les composants mécaniques et d'offrir un temps de réponse très court. Ils étaient principalement constitués d'une inductance en série avec un gradateur, où le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

Tous les compensateurs en parallèle injectent du courant dans le réseau via le point de raccordement. Lorsqu'une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives transitant dans la ligne (Mancer Aggouni, 2007).

3.4.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC)

Le compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation en dérivation appartenant à la famille des systèmes flexibles de transport à courant alternatif

(FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement, améliorant ainsi les performances des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC à des points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes, tout en maintenant un profil de tension stable sous divers régimes. De plus, en fournissant une puissance réactive, un compensateur statique peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension.

3.4.1.1.2 Principe de fonctionnement Le dispositif 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 continue. Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisqu'il est constitué d'éléments inductifs. C'est pour cela que l'on associe ces dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournissent de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent 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 pour éliminer les harmoniques 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 a été installé en 1979 en Afrique du Sud.

La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure. 1.16 trois zones 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 (bute de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V < V_{min}$: est une zone où les seules capacités sont connectées au réseau.

3.4.1.1.3 Les avantages : le Système de Compensation de la Puissance Réactive (SVC) offre plusieurs bénéfices :

- il stabilise la tension dans les réseaux électriques fragiles.
- il diminue les pertes lors de la transmission.
- il accroît la capacité de transport d'électricité.
- il élève la limite de stabilité du système.

3.4.1.2 STATCOM (static Compensator)

3.4.1.2.1 Définition

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).

Un STATCOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant alternatif contrôlé en phase et en amplitude. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par la figure (3.1).

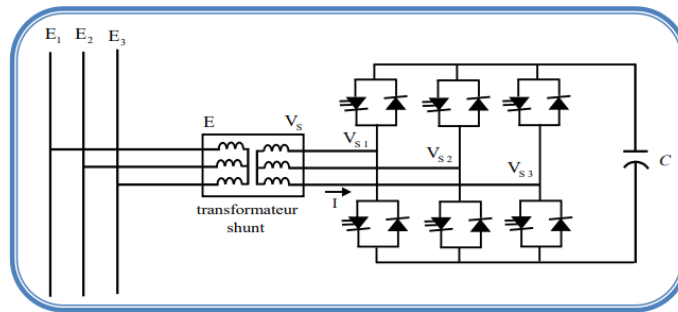


Figure 3.1 – Schéma de base du STATCOM

3.4.1.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir été créées par un groupe tournant.

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 de forte puissance.

Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau électrique [(MancerAggouni, 2007) (lirezaGholamiShabanpour, 2010) (ZhangHandschinSYao, 2004)].

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

3.4.2 Dispositifs de compensation dynamique série

Ces compensateurs sont installés en série avec le réseau et peuvent être utilisés pour ajuster l'impédance de manière variable (inductive, capacitive) ou comme source de tension variable. En pratique, ils modifient généralement l'impédance des lignes de transmission en ajoutant des éléments en série avec celles-ci.

3.4.2.1 La capacité série commandée par thyristor

3.4.2.1.1 Définition Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC) est un dispositif de compensation série qui utilise l'électronique de puissance comme composant principal. Il est installé en série avec le réseau pour réguler le flux de puissance, amortir les résonances sous-synchrones et atténuer les oscillations de puissance. Ce type de compensateur a été développé dans les années 1980.

3.4.2.1.2 Principe de fonctionnement Ce dispositif de Réactance Commandée par Thyristor (RCT), lorsqu'il est associé à un condensateur en série, permet de modifier la réactance de manière variable. Lorsque l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, le réacteur cesse de conduire et le condensateur présente son impédance normale. En avançant l'angle de 180 degrés, l'impédance capacitive du condensateur augmente. À l'inverse, lorsque l'angle d'amorçage du RCT est de 90 degrés, le réacteur devient entièrement conducteur, rendant l'impédance globale inductive, étant donné que la réactance du réacteur est conçue pour être beaucoup plus faible que celle du condensateur en série. Dans cette configuration à 90 degrés, le TCSC aide à limiter le courant de défaut.

Lorsque l'angle d'amorçage du RCT est à 180 degrés, il cesse de conduire, agissant alors comme un limiteur de courant de défaut non contrôlé. Le dispositif peut fonctionner selon trois modes distincts :

- mode hors circuit : les thyristors sont en pleine conduction.
- mode bloqué : les thyristors sont bloqués.
- mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage, permettant ainsi de régler la réactance du TCSC entre des valeurs inductives et capacitives

3.4.2.1.3 Les avantages : les avantages incluent la correction des déséquilibres de courant de charge, la diminution des risques de résonance hypo-synchrone, ainsi que l'amélioration de la stabilité dynamique par l'amortissement des oscillations de puissance et le maintien de la stabilité de tension.

3.4.3 Compensateur statique série synchrone

3.4.3.1 Définition

Le SSSC est un système d'électronique de puissance connecté en série qui injecte une tension dans la ligne de transmission via un transformateur série. Il partage une fonction similaire au TCSC (lirezaGholamiShabanpour, 2010). Cependant, contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le SSSC offre un réglage continu. De plus, grâce à la structure des convertisseurs de tension (VSC), il permet l'intégration potentielle d'un système de stockage d'énergie.

3.4.3.2 Principe de fonctionnement

Le rôle du SSSC est d'injecter une tension triphasée à la fréquence du réseau en série avec la ligne de transport. Cette tension est déphasée de 90 degrés par rapport au courant de la ligne. Il permet ainsi un réglage continu de la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance simulée dans la ligne. L'avantage de ce compensateur réside dans sa capacité à simuler les fonctions d'un condensateur ou d'une inductance sans avoir à les introduire physiquement. Cela prévient l'apparition d'oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau.

3.4.3.3 Avantages

L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau.

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a exploré les concepts fondamentaux de la puissance relative et les diverses méthodes de compensation dans les réseaux électriques, en mettant un accent particulier sur les systèmes FACTS. Ces technologies avancées représentent une pierre angulaire dans la modernisation des infrastructures de transmission d'énergie, permettant une régulation précise et flexible de la puissance et une réponse rapide aux fluctuations de demande.

La compensation joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances du réseau en réduisant les pertes d'énergie, en améliorant la qualité de l'énergie et en augmentant la capacité de transmission. Les systèmes FACTS, en particulier, offrent des solutions innovantes pour relever les défis posés par l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables et par la nécessité d'une distribution d'énergie plus durable et plus efficace.

À mesure que le monde s'oriente vers une consommation énergétique plus verte et plus intelligente, la recherche dans le domaine de la compensation des réseaux électriques et des systèmes FACTS continuera d'être un domaine d'étude prometteur. Les développements futurs pourraient inclure l'amélioration des technologies existantes, l'exploration de nouveaux matériaux et techniques, ainsi que l'intégration plus poussée de l'intelligence artificielle pour une gestion optimisée du réseau.

Ce mémoire souligne l'importance stratégique de poursuivre les avancées dans ce domaine pour assurer un avenir énergétique stable, efficace et respectueux de l'environnement.

Références

- Abdelhak Bensefia, R. . K. e. (2015). *Étude de l'écoulement de puissance d'un réseau Électrique par hvdc* (Thèse de doctorat non publiée). FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES.
- Alibi, A. (2009). *Contrôle des réseaux électriques par les systèmes facts : (flexible ac transmission systems) "* (Thèse de doctorat non publiée). l'Université de Batna.
- Belatel, M. (2017). Compensation dans les réseaux électriques par un système facts de type statcom. *Proceeding of Engineering and Technology–PET*, 30, 37–42.
- Hamache, A. (2015). *Investigation sur les modèles de commande d'un upfc en vue de réguler le flux de puissance dans une interconnexion tht d'un réseau électrique* (Thèse de doctorat non publiée). Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- Hannebel, M. (2015). *valorisation des services système sur un réseau de transport d'électricité en environnement concurrentiel* (Thèse de doctorat non publiée). l'université paris.
- lirezaGholamiShabanpour, S. (2010). *Power flow study and comparison of facts : Series (sssc), shunt (statcom), and shunt-series (upfc)* (Thèse de doctorat non publiée). Power Flow Study and Comparison of FACTS : Series (SSSC), Shunt (STATCOM), and Shunt-Series (UPFC).
- Mancer, N. (2012). *Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (facts)* (Thèse de doctorat non publiée). Université Mohamed Khider – Biskra.
- MancerAggouni, N. . Y. (2007). *modélisation et integration des dispositifs de compensation dynamique fact)* " (Thèse de doctorat non publiée). Mémoire de l'ingénieur d'état.
- Padiyar, K. R. (2009). *Facts controllers in power transmission and distribution* (Thèse de doctorat non publiée). New age international publishers.
- ZhangHandschinSYao, P. (2004). *Multi-control functional static synchronous compensator (statcom) in power system steady-state operations* (Thèse de doctorat non publiée). Electric Power Systems Research 72.