

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

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de la Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention de diplôme

**Master**

En

« Electrotechnique »

Spécialité :

« Electrotechnique Industrielle »

Titre :

**Impact de l'UPFC sur le calcul d'écoulement de  
puissance dans les réseaux de distributions**

Réalisé par :

Abderraouf CHENNOUFI

Ahmed KOUCHI

Encadré par :

Dr .Youcef BOT

Année Universitaire 2022/2023

## **Remerciements :**

*En préambule à ce mémoire, nous remercions ALLAH qui nous a aidé et donné la patience et le courage durant cette longue d'année d'étude.*

*Nos remerciements vont tout d'abord à notre promoteur :*

*Dr. BOT Youcef Pour nous avoir proposé ce sujet, pour son encadrement, le temps qu'il a consacré à la correction et à la relecture de ce document ainsi que ses conseils précieux qui nous ont permis d'aboutir à l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous remercions très chaleureusement notre faculté des sciences et de la technologie au niveau de l'université Djilali Bounaama Khemis Miliana.*

*Nous présentons nos respects et nos sincères remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté de faire partie du jury et de nous avoir consacré de leur temps précieux.*

*Merci à tous qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

## ***Dédicace***

*Nous remercions tout d'abord ALLAH tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail. Nous tenons à remercier :*

### ***Nos parents***

*Qu'ont toujours avec leurs précieuses prières poussé fort vers meilleur,*

*Nos chers frères et sœurs*

*Tous nos amis*

*Tous nos professeurs qui nous ont tant appris.*

*Pour toute ma famille d'électrotechnique.*

*Pour tout ce que nous aime*

CHENNOUFI Abderraouf

KOUCHI Ahmed

# SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : La technologie systèmes flexibles de transmission à courant alternatif (FACTS)	
	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.1 Introduction	2
I.2 Histoire	2
I.3 Définition	3
I.4 Types de FACTS	4
I.4.1 Compensateurs séries	5
I.4.1.1 Compensateurs séries à base de thyristors	5
I.4.1.2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors	6
I.4.2 Compensateurs parallèles (shunt)	8
I.4.2.1 Compensateurs parallèle à base de thyristors	8
I.4.2.2 Compensateurs Parallèles à Base de GTO thyristors	11
I.4.3 Compensateurs hybrides (série-parallèle)	14
I.4.3.1 Compensateurs hybrides à base de thyristors	14
I.4.3.2 Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors	16
I.5 Conclusion	17
Chapitre II : L'écoulement de puissance dans les réseaux électriques	
	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.1 Introduction	18
II.2 Principe de fonctionnement d'un réseau électrique	18
II.3 Formulation des équations du Load Flow	21
II.4 Méthodes numériques appliquées pour la résolution de l'écoulement de puissance	22
II.4.1 Méthode Gauss-Seidel	23

II.4.2	Méthode Newton-Raphson	24
II.4.3	Méthode découplée rapide	26
II.5	Calcul de l'écoulement de puissance d'un réseau test	27
II.5.1	Schéma	27
II.5.2	Paramètres	27
II.5.3	Résultats de calcul de l'écoulement de puissance	29
II.6	Conclusion	31
Chapitre III : La modélisation de l'UPFC et leur intégration dans l'algorithme de l'écoulement de puissance		<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.1	Introduction	32
III.2	Modélisation de l'UPFC	32
III.3	L'algorithme de l'écoulement de puissance modifié	34
Modèle de flux d'énergie		35
III.4	Simulation en présence l'UPFC	37
III.4.1	Cas 1 : L'UPFC sur la ligne 4 (cote Nœud bilan)	37
III.4.2	Cas 2 : L'UPFC sur la ligne 1 (cote Nœud générateur)	41
III.4.3	Cas 3 : L'UPFC sur la ligne 7 (loin de nœud bilan et nœud générateur)	44
III.4.4	Cas 4 : L'utilisation de deux UPFC simultanément sur la ligne 1 et la ligne 7 (nœud générateur et nœud charge)	47
III.5	Conclusion	51
Conclusion générale		52

## Liste des figures

### Chapitre I : La technologie systèmes flexibles de transmission à courant alternatif (FACTS)

Figure I.1 : Schéma électrique unifilaire simplifié d'un TCSC.	8
Figure I.2 : Schéma du TCSR.	8
Figure I.3 : Schéma de base du SSSC.	9
Figure I.4 : Caractéristique statique du SSSC.	10
Figure I.5 : Schéma du TCR.	11
Figure I.6 : Schéma du TSC.	12
Figure I.7 : Schéma électrique unifilaire simplifié d'un SVC.	12
Figure I.8 : Schéma du SVC et TCBR.	13
Figure I.9 : Schéma de base d'un STATCOM.	13
Figure I.10 : Diagramme vectoriel du STATCOM.	15
Figure I.11 : Schéma du TCPAR.	17
Figure I.12 : Diagramme vectoriel du TCPAR.	17
Figure I.13 : Schéma de principe d'UPFC.	18
Figure I.14 : Schéma de base de l'IPFC.	19

### Chapitre II : L'écoulement de puissance dans les réseaux électriques

Figure II.1 : Exemple d'un réseau à deux jeux de barres.	22
Figure II.2 : schéma équivalent d'un réseau à deux jeux de barres.	22

Figure II.3 : Schéma unifilaire du système à 9 nœuds IEEE. 33

Figure II.4: Modèle en  $\pi$  d'une ligne. 35

### **Chapitre III : La modélisation de l'UPFC et leur intégration dans l'algorithme de l'écoulement de puissance**

Figure III.1 : Système de régulateur unifié de flux de puissance (UPFC). 39

Figure III.2 Circuit équivalent du régulateur de flux de puissance unifié. 41

Figure III.3 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 4. 45

Figure III.4 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC. 46

Figure III.5 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC. 46

Figure III.6 : Les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC. 47

Figure III.7 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC. 47

Figure III.8 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 1. 48

Figure III.9 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC. 49

Figure III.10 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC. 49

Figure III.11 : les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC. 50

Figure III.12 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC. 50

Figure III.13 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 7. 52

Figure III.14 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC. 52

Figure III.15 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC. 53

Figure III.16 : Les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC. 53

Figure III.17 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC. 54

Figure III.18 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 1 et 7 simultanément. 55

Figure III.19 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC.	55
Figure III.20 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC.	56
Figure III.21 : Les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC.	56
Figure III.22 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC.	57

## **Liste des tableaux**

Tableau II.1 : Productions, consommations et tensions prévues.	34
Tableau II.2 : Paramètres des lignes.	35
Tableau II.3 : Les tensions des nœuds.	36
Tableau II.4 : Les puissances et les pertes actives et réactives des lignes.	36

## *Liste des symboles et abréviations*

### **Abréviations**

FACTS : Systèmes de transmission alternatifs flexibles

GTO : Thyristor Commandable à l'Ouverture

IGBT : Transistor Bipolaire à Grille Isolée

TCR : Réacteur contrôlé par thyristor

TCSR : Réacteur à série contrôlée Thyristor

TSC : Condensateur à commutation thyristor

SVC : Compensateur statique Var

STATCOM : compensateur statique

TCSC : Condensateur de série contrôlé par thyristor

TSSC: Condensateur à commutation thyristor

TCSR : Réacteur à série contrôlée Thyristor

TSSR : Réacteur à série commutée Thyristor

TCBR : Résistance de rupture de contrôle du thyristor

SSSC : Compensateur de série synchrone statique

TCPAR : Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor

UPFC : Régulateur de débit d'alimentation unifié

IPFC : Régulateur de débit d'alimentation interligne

## **Variables**

$P_{Ch}$  : Puissance active absorbée par la charge.

$Q_{Ch}$  : Puissance réactive absorbée par la charge.

$P_J$  : Puissance active dissipée dans la ligne par effet Joule.

$Q_L$  : Puissance réactive absorbée par la ligne.

$Q_C$  : Puissance réactive générée par la ligne.

$V_S$  : Tension de la source.

$V_R$  : Tension aux bornes de la charge.

$V$  : Tension de ligne à neutre (tension simple).

$U$  : Tension de ligne à ligne (tension composé).

$V_{se}$  : Tension série de l'UPFC.

$P_{se}$  : Puissance active fournit par le compensateur série.

$Q_{se}$  : Puissance réactive fournit par le compensateur série.

## **Paramètres**

$R$  : Résistance de la ligne.

$X_L$  : réactance inductive de la ligne.

$X_C$  : réactance capacitive de la ligne.

$Z_{se}$  : L'impédance série de transformateur de couplage.

$R_{se}$  : La résistance d'une phase du transformateur de couplage série.

$X_{se}$  : La réactance totale d'une phase du transformateur de couplage série.

$C$  : La capacité du circuit continu commun DC.

# ***Introduction générale***

## *Introduction générale*

La demande en énergie électrique ne cesse de croître et le souci majeur des entreprises de production d'énergie électrique est de répondre à la croissance du marché et aux exigences des consommateurs en assurant une fourniture régulière et sans interruption. Pour des raisons écologiques et des contraintes économiques la construction de nouveaux ouvrages est éloignée. L'éventualité est de multiplier les interconnexions et d'augmenter les capacités de transmission des ouvrages existants obligeant ainsi l'exploitation des lignes de transmission dans des conditions critiques qui peuvent affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa zone de stabilité.

Des systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la microélectronique de commande ont été récemment étudiés et réalisés, et sont actuellement pour certains en application normale, pour d'autres, en applications pilotes ou à l'état de prototypes. Ces systèmes sont désignés par l'acronyme général FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems).

Ce travail présente un modèle mathématique du l'UPFC. Ce dernier est incorporé dans l'algorithme du calcul d'écoulement de puissance pour étudier le contrôle de flux de puissance dans les lignes électriques de distribution.

Cette étude est organisée à trois chapitres :

Le premier chapitre présente la technologie systèmes flexibles de transmission à courant alternatif (FACTS). Le deuxième chapitre traite l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques. Le troisième et dernier chapitre présente la modalisation de l'UPFC et la comparaison des résultats avec et sans UPFC en termes de tensions, de flux de puissance active et réactive pour démontrer la performance du modèle UPFC. A la fin le mémoire termine par une conclusion générale.

**Chapitre I : La technologie systèmes  
flexibles de transmission à courant  
alternatif (FACTS)**

## **I.1 Introduction**

Depuis son émergence à la fin du XIXe siècle jusqu'à aujourd'hui, l'industrie électrique a été confrontée à différents problèmes de contrôle, de stabilité/sécurité, de transmission et d'approvisionnement fiables des systèmes énergétiques. Pour chacun de ces aspects, des développements, de nouvelles solutions, diverses stratégies et de nouveaux équipements, sont le résultat de décennies d'efforts continus par des experts et des fabricants dans le domaine. Ces dernières années, inspiré par les développements récents de l'électronique de puissance et leurs contributions remarquables au contrôle du réseau, un nouveau concept ou concept "FACTS concept" a été introduit dans le domaine de la recherche et du développement. Les avantages potentiels de l'équipement FACTS sont maintenant reconnus, permettant aux services publics d'exploiter leurs systèmes de transmission en vrac de manière plus efficace et rentable. Plusieurs institutions majeures dans ce domaine, telles que l'EPRI (L'Electric Power Research Institute), Westinghouse Electric Company (entreprise américaine) ou d'autres, ont investi dans le développement ultérieur de tous les dispositifs entrant dans le cadre conceptuel de FACTS. Pour votre information, Westinghouse Electric Company a développé le concept de base du système FACTS il y a plus de 25 ans et a introduit la première électronique de puissance pour contrôler un appareil FACTS il y a environ une décennie [1].

## **I.2 Histoire**

Les premiers FACTS sont apparus dans les années 1930 pour augmenter la capacité de certaines lignes à haute impédance. Les compensateurs standard sont utilisés dans le monde entier depuis plus de 60 ans. Le premier SVC est apparu dans les années 1970 et a été développé par l'EPRI. Le premier a été commandé par General Electric au Nebraska en 1974 pour stabiliser la tension devenue fluctuante en raison des laminoirs et des fours à arc électrique environnants. C'est à cette même époque que débute l'utilisation des thyristors. GTO a été mis sur le marché depuis la fin des années 1980, et le premier TCSC a été construit par ABB à Kayne Tower aux États-Unis en 1992, ce qui a permis d'augmenter la capacité de transmission de la ligne de 30 %. Le principe de STATCOM a été inventé par Dr.Laszlo GYUGYI en 1976. Le premier INUYAMA (ville de la montagne du chien) a été installé au Japon en 1991. Il est vendu par Kansai Electric Power Company et Mitsubishi Electric Power Company. Le second a été installé

à Sullivan, dans le nord-est du Tennessee en 1995 par Westinghouse Electric Company. Le principe de l'UPFC a été proposé par Laszlo GYUGYI en 1990. Le premier UPFC a été mis en service en 1998 au poste d'AEP Inose pour le compte d'American Electric Power. Au début des années 1990, les marchés de l'électricité ont été déréglementés au Royaume-Uni et en Norvège. Par la suite, d'autres pays scandinaves et l'Europe ont généralement emboîté le pas. Aux États-Unis et en Amérique du Sud, les marchés ont également été largement libéralisés. Alors que les réseaux de transmission sont considérés comme un monopole naturel en Europe, l'Australie, la Nouvelle-Zélande et les États-Unis ont également été partiellement libéralisés. Cela rend plus difficile la prévision du flux d'énergie. Il est nécessaire de développer le réseau et de le rendre plus contrôlable grâce à FACTS [2].

### **I.3 Définition**

Flexible AC Transmission Systèmes (FACTS) est un concept qui facilite l'utilisation de l'électronique de puissance pour augmenter la contrôlabilité et la capacité utilisable de la transmission AC. Ces possibilités découlent de la capacité de FACTS à contrôler les paramètres pertinents et contraints du réseau électrique, tels que l'impédance série, l'impédance shunt, l'angle de phase et l'apparition de diverses oscillations à des fréquences inférieures à la fréquence nominale. Cela signifie que l'idée de base du concept FACTS est de faire du système de transmission de puissance un système actif, de s'adapter en permanence aux nouvelles situations, de jouer un rôle actif dans l'augmentation de la flexibilité des conditions de transmission de puissance et d'assurer sa propre stabilité dynamique.

En d'autres termes, dans la grille, le système FACTS représente un appareil ou un contrôleur avec des avantages majeurs dans de nombreuses fonctions, notamment :

- Meilleur contrôle du flux de puissance pour suivre les corridors de transmission prescrits.
- Maintenir les charges sûres sur les lignes de transmission proches des limites thermiques tout en évitant les surcharges et en réduisant les marges de production et en permettant de transférer plus de puissance entre les zones contrôlées.

- Atténue les oscillations de puissance qui peuvent endommager l'équipement et/ou limiter la capacité de transmission disponible en modulant rapidement l'impédance de ligne effective en réponse à la dynamique du système électrique.
- Prévenir les pannes en cascade en limitant l'impact des pannes et des pannes d'équipement.
- Réduire les coûts financiers et/ou l'impact environnemental en évitant potentiellement la construction de nouvelles lignes d'extension.
- Maintenance minimale de l'équipement FACTS.

La première génération de contrôleurs FACTS était basée sur l'utilisation de composants électromécaniques. Depuis le début des années 1990, avec le développement rapide de l'électronique de puissance moderne, des contrôleurs FACTS de deuxième et troisième génération plus avancés ont été développés, offrant une flexibilité très importante. Ces contrôleurs FACTS sont conçus avec une électronique de puissance très complexe telle que des sources de tension synchrones (SVS) basées sur des commutateurs VSI (Voltage Source Inverters) tels que les GTO et les IGBT. Ces composants se caractérisent par des temps de réponse très rapides, offrent un grand potentiel pour la commande équilibrée des flux de puissance et également pour la stabilité des systèmes de puissance. Pour ces dernières opérations, les modèles appropriés de nouveaux contrôleurs sont nécessaires pour évaluer leurs effets sur l'exécution dynamique des systèmes de puissance [1].

## **I.4 Types de FACTS**

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), les systèmes FACTS sont : "des systèmes de transmission CA incorporant des contrôleurs basés sur l'électronique de puissance pour améliorer la contrôlabilité du réseau et la capacité de transmission de ligne.

En général, les FACTS peuvent être divisés en trois catégories selon la manière dont ils sont connectés au réseau :

- Compensateur série : connecté en série avec le système d'alimentation.
- Compensateur de shunt (shunt) : connecté en parallèle avec le système d'alimentation.
- Compensateurs hybrides utilisant les deux couplages (série et parallèle).

Ces types se divisent en deux catégories selon la technologie d'électronique de puissance utilisée :

- Compensateurs à base de thyristors.
- Compensateurs à base de thyristors GTO.

### Compensateurs séries

Ces systèmes sont insérés en série en tant que sources à impédance (inductive ou capacitive) ou à tension variable. Le rôle principal des compensateurs série basés sur des composants passifs commutés est de modifier l'impédance de ligne. Ils fonctionnent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transmission, ce qui aide à compenser la chute de tension inductive. Les compensateurs de série les plus connus sont :

#### I.4.1.1 Compensateurs séries à base de thyristors

- **TCSC (thyristor controlled series capacitor)**

Les TCSC sont des compensateurs série à base de thyristors. Apparu au milieu des années 80, il s'apparente à une impédance contrôlée, résultat d'un condensateur connecté en parallèle avec une branche réactive commandée par thyristor (figure (I.1)). Les TCSC permettent de modifier leur réactance, et leur rôle principal est de pouvoir contrôler la puissance circulant dans la ligne de transmission où ils se trouvent [3].

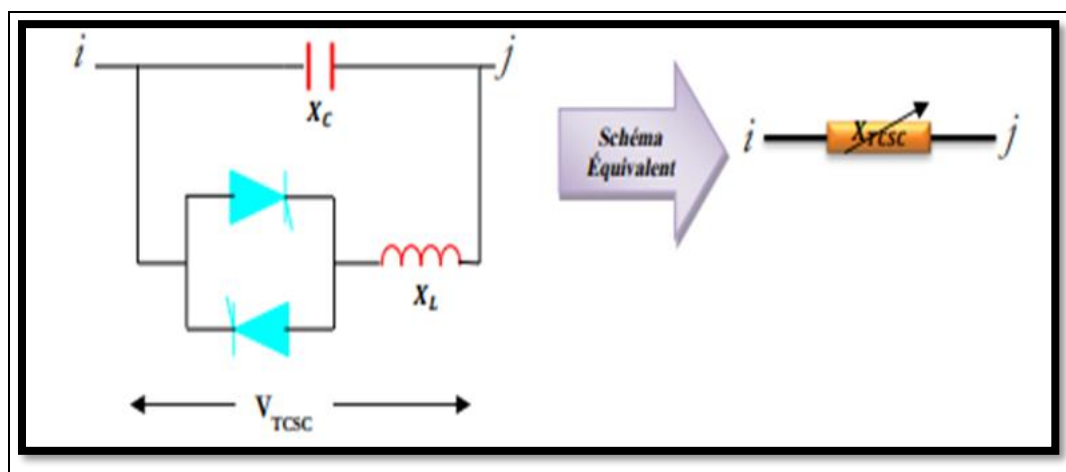


Figure I.1 : Schéma électrique unifilaire simplifié d'un TCSC [3]

- **TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)**

Un TCSR est un compensateur inductif constitué d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par un thyristor pour fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur contrôlable par thyristor est de 180 degrés, il arrête la conduction et la réactance incontrôlable  $X_1$  agit comme un limiteur de courant de défaut. Lorsque l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue à 90 degrés, qui est la combinaison parallèle des deux réactances [4].

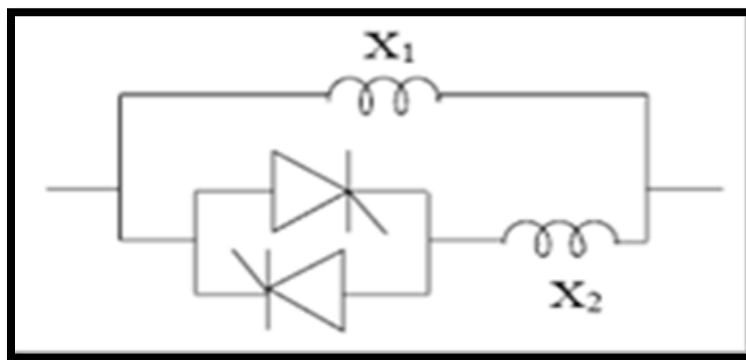


Figure I.2 : Schéma du TCSR [4].

- **TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)**

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° [6].

- **TSSR (Thyristor Switched Serie Reactor)**

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage peut être soit de 90 degrés soit de 180 degrés [6].

#### I.4.1.2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors

Le compensateur série à base de GTO thyristors le plus connu est le :

- **SSSC (Static Synchronous Series Compensator)**

Il s'agit d'un convertisseur de source de tension placé en série avec une ligne de transmission de puissance via un transformateur, et ce type de compensateur est le dispositif le plus important de la famille. Il se compose d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne. La figure (I.3) montre la connexion du SSSC à la ligne de transmission [8].

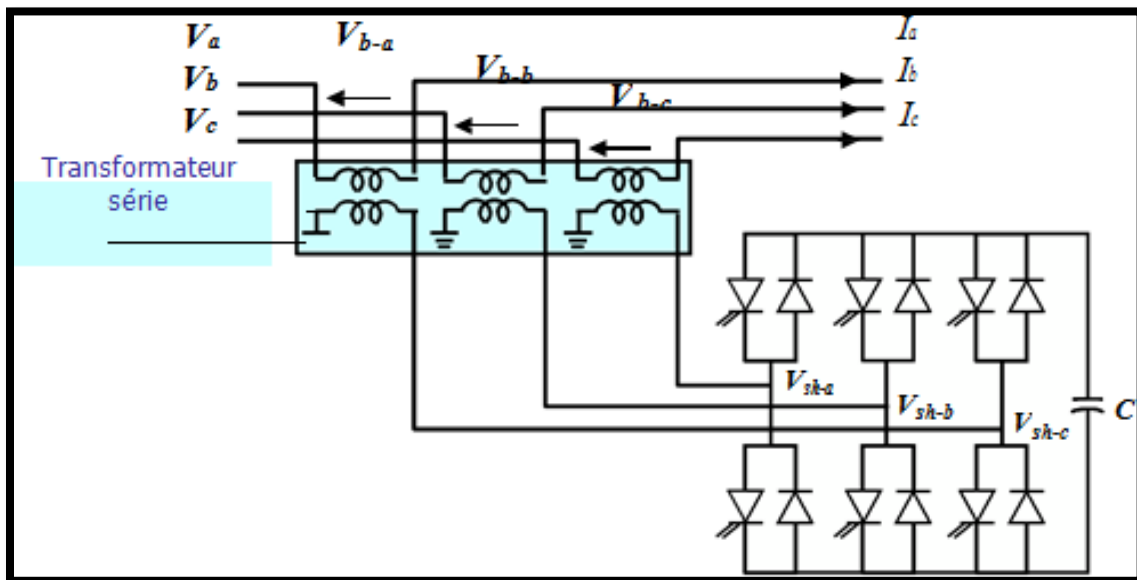
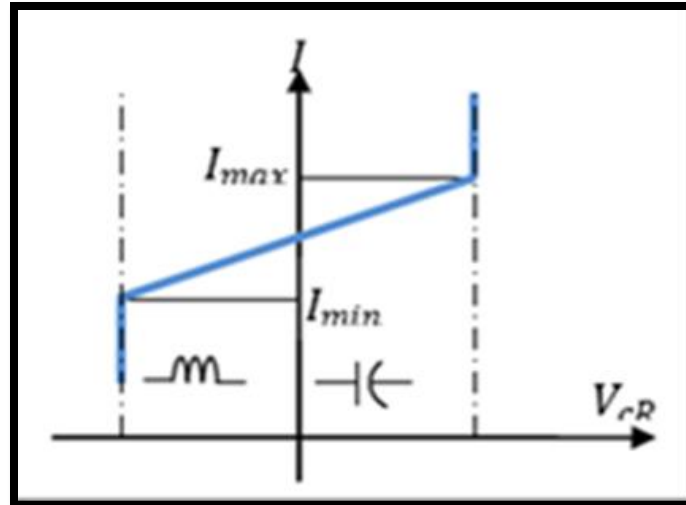


Figure I.3 : Schéma de base du SSSC [5].

Le compensateur est principalement utilisé pour contrôler le flux de puissance et améliorer l'amortissement des oscillations du réseau. Il injecte une tension triphasée à la fréquence du réseau, en série avec la tension de la ligne de transmission.

En principe, ce compensateur est capable d'échanger de la puissance active et réactive avec le réseau. Si seule une compensation de puissance réactive est requise, la source d'énergie représentée par le condensateur peut être petite, alors seule l'amplitude de la tension est contrôlée, car le vecteur de tension injecté est perpendiculaire au courant de ligne.

La caractéristique statique de ce compensateur est donnée par la Figure suivante :



**Figure I.4 : Caractéristique statique du SSSC [5].**

En revanche, si cette source d'énergie est suffisamment puissante, l'amplitude et la phase de la tension injectée peuvent être contrôlées. L'avantage de ce compensateur n'est pas d'introduire physiquement des condensateurs ou des impédances, mais de simuler leur fonction, ce qui évite les oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau [5].

### **Compensateurs parallèles (shunt)**

Ces compensateurs sont connectés en parallèle avec les lignes électriques. Un compensateur shunt est utilisé comme source de courant. Ils injectent ou consomment du courant variable du réseau via des points de connexion. Cette injection de courant modifie la puissance réelle et réactive transmise dans la ligne. Les compensateurs shunt les plus couramment utilisés sont :

#### **I.4.1.3 Compensateurs parallèle à base de thyristors**

IL s'agit de:

- **TCR (Thyristor Controlled Reactor) ou TSR ( Thyristor Switched Reactor )**

Le circuit TCR est constitué d'une impédance en série avec deux thyristors montés en anti-parallèle, comme le montre la Figure (I.5), la valeur de l'impédance change constamment avec l'amorçage des thyristors. Lorsqu'un signal de déclenchement est envoyé au thyristor, le thyristor

se met à conduire et la tension à ses bornes est positive, et lorsque le courant qui le traverse s'annule, le thyristor cesse de conduire. Un dispositif TCR seul ne suffit pas à compenser la puissance réactive dans le réseau, car il n'a pas de source de puissance réactive. Typiquement, une batterie de condensateurs est agencée avec un TCR comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance [7].

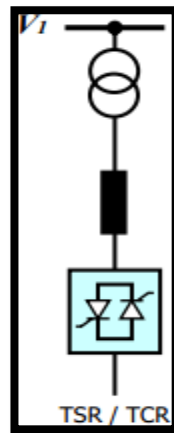


Figure I.5 : Schéma du TCR [5].

- **TSC (Thyristor Switched Capacitor)**

Le TSC se compose d'un condensateur en série avec la vanne triac et l'inductance d'amortissement. La fonction principale de l'interrupteur à thyristor est d'allumer et d'éteindre le condensateur pendant un nombre entier de demi-cycles de la tension appliquée.

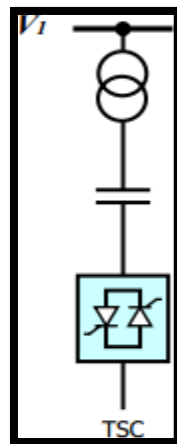


Figure I.6 : Schéma du TSC [5].

L'inductance du circuit TSC est utilisée pour limiter le courant dans des conditions anormales et pour régler le circuit sur la fréquence souhaitée [7].

- **(SVC) (Static Var Compensator)**

Les compensateurs shunt SVC sont des générateurs statiques (absorbeurs) d'énergie réactive. Il est apparu au début des années 1970 et se compose d'une batterie de condensateurs commutés par thyristors (TSC), d'une batterie de bobines de commande de thyristors (TCR) et d'un filtre harmonique, comme illustré à la figure (I.7) [3].

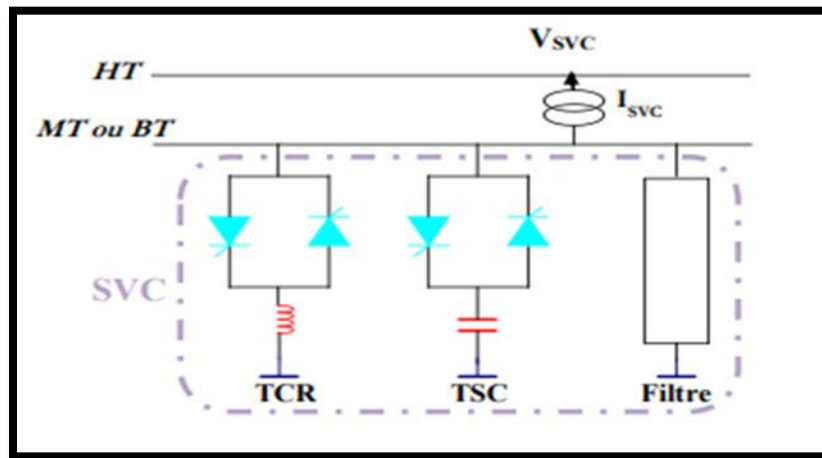


Figure I.7 : Schéma électrique unifilaire simplifié d'un SVC [3].

- **TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)**

Ce type de compensateur est installé en parallèle et permet d'augmenter la stabilité du réseau en présence de perturbations. La figure (I.8) montre un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'une batterie de condensateurs et d'un filtre d'harmoniques [5].

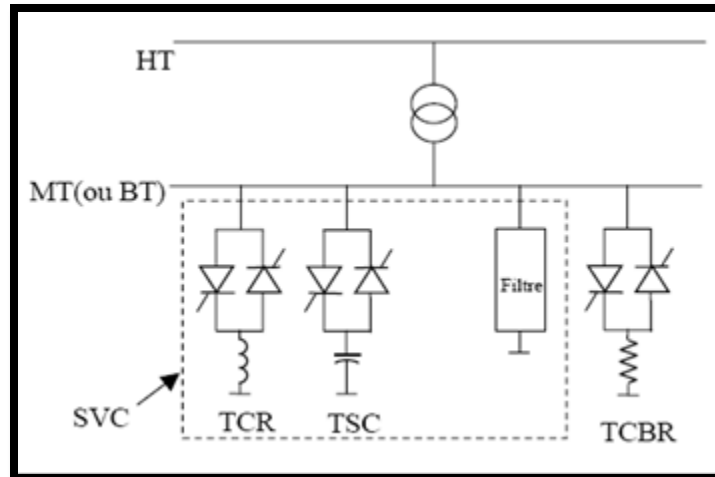


Figure I.8 : Schéma du SVC et TCBR [5].

#### I.4.1.4 Compensateurs Parallèles à Base de GTO thyristors

Les composantes principales des compensateurs décrits sont des condensateurs et des réactances, donc des éléments pour le stockage d'énergie. Ces compensateurs fonctionnent comme une impédance variable et, ils contrôlent la consommation de la puissance réactive en changeant l'impédance du système. Une source à base de semi-conducteurs est capable de fournir ou d'absorber des Vars. Cette source peut être de type source de courant ou source de tension.

- **STATCOM (Static Synchronous Compensator)**

STATCOM (Static Synchronous Compensator) est le premier FACTS introduit dans le réseau utilisant VSC (Voltage Source Inverter). Un STATCOM est un convertisseur statique de source de tension, généralement connecté en parallèle avec le secteur via un transformateur abaisseur. En réglant le déphasage du VSC égal à celui de la tension alternative au point de connexion, le courant dans l'impédance du réseau répond parfaitement. STATCOM avait jusqu'à présent différents noms :

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (Static Condenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVC light
- SVC plus

Ce type de compensateur Largement connu à la fin des années 1970, il Il faudra attendre les années 1990 pour que ce type de compensateur connaisse un essor important du fait du développement des commutateurs GTO de forte puissance.

STATCOM a des fonctionnalités comparables à SVC avec des performances dynamiques supérieures. STATCOM a plusieurs avantages, à savoir :

- Gamme de plage de travail plus large que le SVC conventionnel.
- Performances dynamiques supérieures au SVC classique.
- Bonne réponse en basse tension : STATOM délivre son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.
- Il ne comporte pas d'éléments capacitifs susceptibles de résonner avec les éléments inductifs du réseau.
- Contrôle de tension optimal avec contrôle de phase individuel pendant les perturbations du système.
- La disponibilité d'une cabine amovible permet une flexibilité opérationnelle maximale.
- La conception modulaire du convertisseur permet une adaptation à une large plage de puissance.

La figure (I.9) montre le schéma de base du STATCOM, où l'unité de commutation se compose d'un GTO et d'une diode antiparallèle bidirectionnelle. Le rôle de STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. A cet effet, l'onduleur est couplé au réseau via une inductance, qui est généralement l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

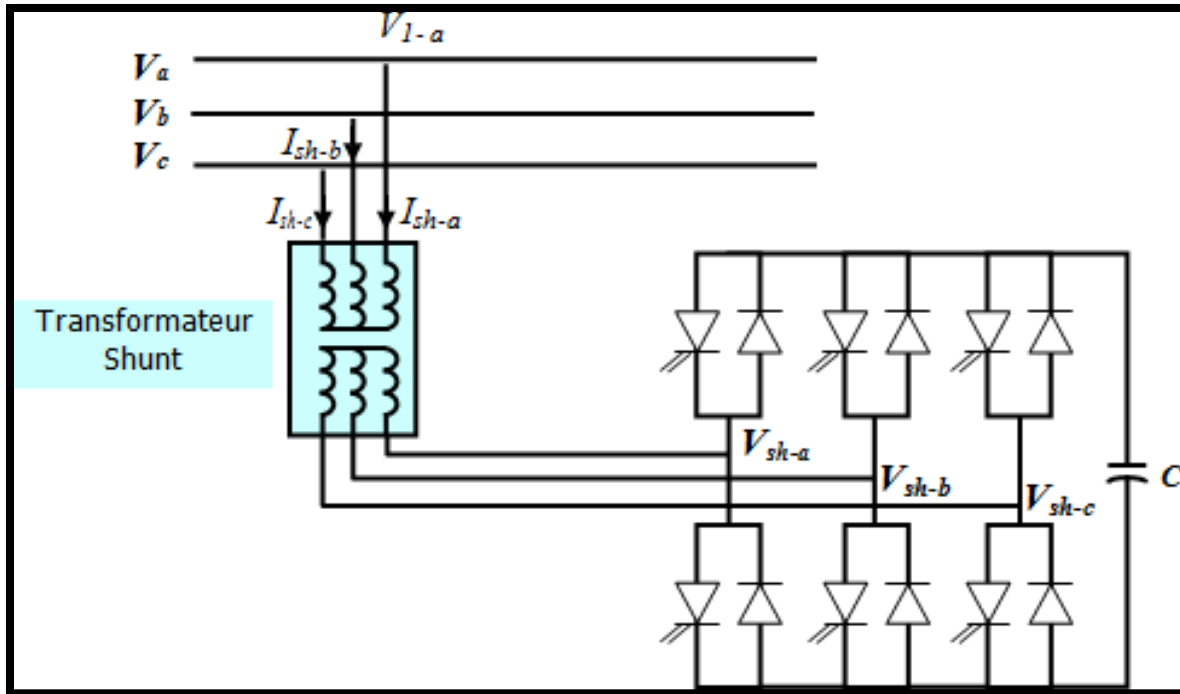
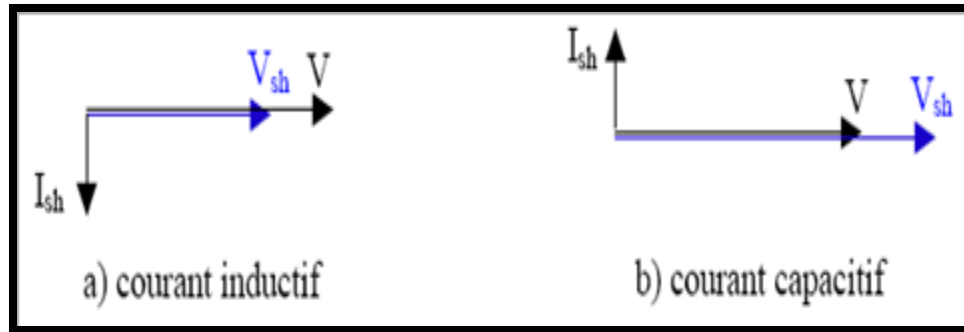


Figure I.9 : Schéma de base d'un STATCOM [5].

L'échange d'énergie réactive se fait en contrôlant la tension de l'onduleur  $V_{sh}$ , qui est en phase avec la tension du bus  $V_1$  connecté à STATCOM.

Le fonctionnement peut être décrit comme suit : Si l'amplitude de tension générée par l'onduleur est supérieure à celle du système, un courant réactif sera injecté dans le système, et l'onduleur se comportera comme un schéma de source de puissance réactive (I.10.b), si égale au réseau. Si la tension est inférieure à la tension du réseau, il n'y aura pas d'échange de puissance réactive. Enfin, si elle est inférieure à la tension du réseau, le courant réactif sera absorbé par l'onduleur (Figure (I.10.a)).

Le contrôle du flux de puissance active est effectué via l'angle de phase entre la tension de l'onduleur et la tension du système. S'il n'y a pas de déphasage entre ces deux tensions, aucune puissance réelle ne circulera.



**Figure I.10 : Diagramme vectoriel du STATCOM.**

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive en utilisant uniquement des inductances. Contrairement aux SVC, il n'y a pas d'éléments capacitifs pour provoquer une résonance avec les éléments inductifs du réseau. Contrairement au SVC, ce dispositif présente l'avantage de fournir un courant constant important même lorsque la tension  $V$  est réduite. STATCOM remplit les fonctions suivantes :

- Stabilisation dynamique de la tension : augmente la capacité de transfert d'énergie et réduit les variations de tension.
- Amélioration de la stabilité de la synchronisation : meilleure stabilité transitoire, meilleur amortissement du système d'alimentation
- Amélioration de la qualité de l'énergie.
- Support de la tension en régime permanent [5].

### **Compensateurs hybrides (série-parallèle)**

Ce type de compensation est une structure hybride entre compensation shunt et série. Les compensateurs hybrides peuvent remplir toutes les fonctions des dispositifs FACTS en série et en parallèle. Ils permettent de contrôler les niveaux de tension, les angles de transfert d'énergie et le flux de puissance active et réactive. Il existe plusieurs compensateurs de thyristors hybrides à base de thyristors et à base de GTO. Nous pouvons citer :

#### **I.4.1.5 Compensateurs hybrides à base de thyristors**

- **TCPAR ( Thyristor Controlled Phase Angle Regulator )**

Un TCPAR (Static Phase Shifter) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Cet appareil a été créé pour remplacer le déphaseur par un Transformateur On-Load Tap Changer à commande mécanique (LTC : Load Tap Changer), composé de deux transformateurs, l'un en série avec la ligne et l'autre en parallèle avec la ligne. Ces derniers ont des rapports de transformation différents ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ) et les deux transformateurs sont reliés par des thyristors. Son principe de fonctionnement est d'injecter une tension orthogonale à la tension à déphaser sur les trois phases de la ligne de transmission. Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé et une seule étude a été menée pour introduire des déphaseurs à thyristor dans les interconnexions du nord-ouest du Minnesota et du nord de l'Ontario.

Il présente l'avantage qu'aucune harmonique n'est générée car les thyristors sont commandés aussi intégralement sur les interrupteurs. D'autre part, le déphasage ne changeant pas en permanence, il faut ajouter un compensateur shunt, ce qui entraîne des coûts d'installation supplémentaires.

L'amplitude de la tension injectée est la combinaison du secondaire du transformateur parallèle avec les rapports de transformation  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ . Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre jusqu'à 27 valeurs différentes [5].

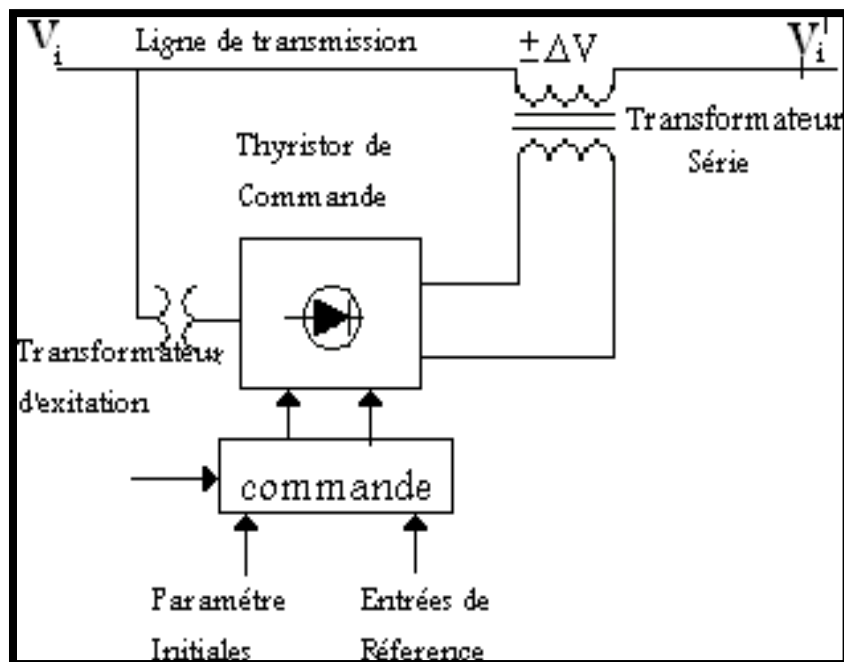


Figure I.11 : Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR [24].

Puis en introduisant un déphasage  $\alpha$ , l'angle de transmission total de la ligne de force devient  $(\delta \pm \alpha)$ . Avec ce compensateur, le module de la tension aval n'est pas égal au module de la tension amont. Les caractéristiques statiques de ce compensateur sont illustrées à la Figure (I.12) [5].

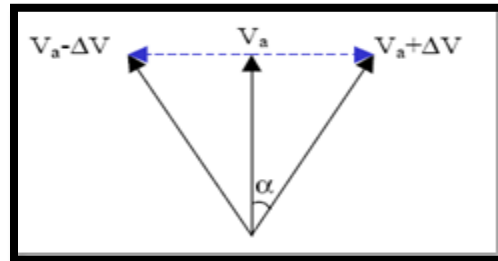


Figure I.12 : Diagramme vectoriel du TCPAR.

#### I.4.1.6 Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors

- UPFC ( Unified Power Flow Controller)

Un contrôleur de charge universel (UPFC) est un dispositif FACTS à topologie universelle utilisé dans les réseaux de transmission, principalement pour réguler la tension, le déphasage de tension à la fin de la ligne et l'impédance de la ligne. L'UPFC se compose de deux onduleurs de tension à thyristor GTO, les deux onduleurs sont interconnectés via des condensateurs, l'onduleur n° 1 est connecté au réseau en parallèle via un transformateur triphasé parallèle et l'onduleur n° 2 est connecté au réseau en série comme indiqué dans la figure (I.13) illustrée.

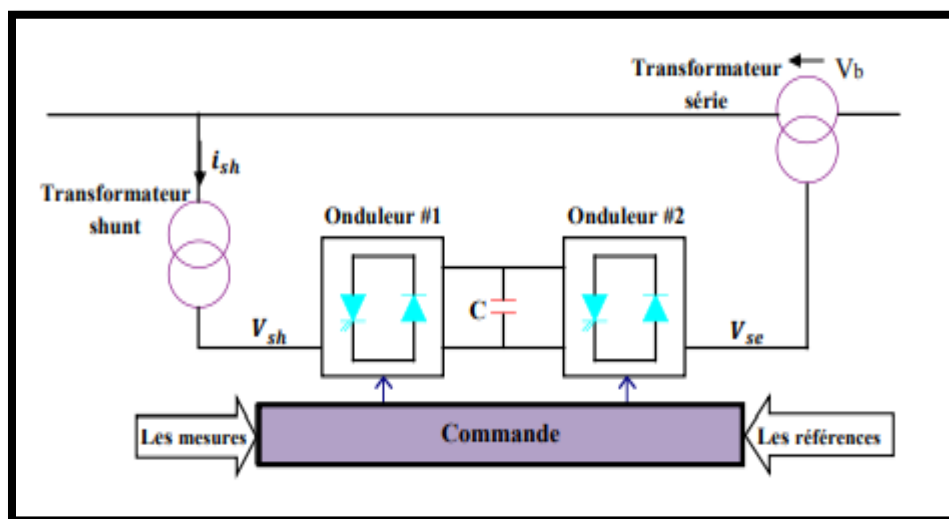
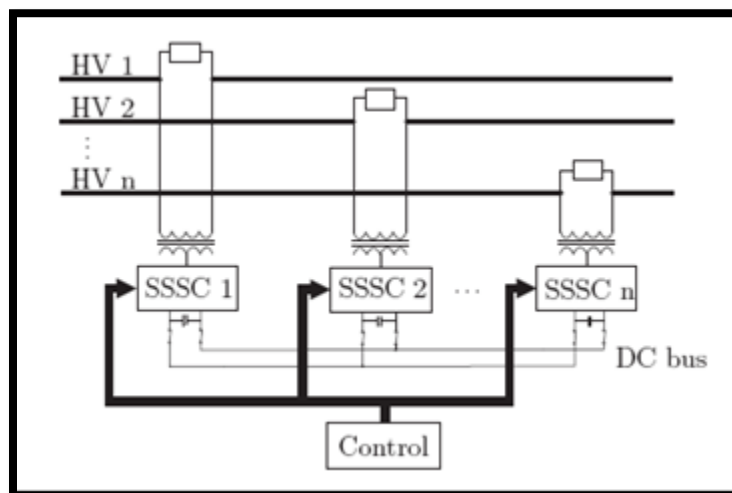


Figure I.13 : Schéma de principe d'UPFC [3].

La mise en parallèle permet de gérer l'injection ou l'absorption de puissance réactive et la charge du bus continu. Les connexions série permettent de gérer indirectement la puissance réelle et réactive transmise par la ligne en injectant une tension série [3].

- **IPFC ( Interline Power Flow Controller)**

La fonction principale d'un compensateur hybride IPFC est de compenser un certain nombre de lignes de transmission dans un poste à l'aide d'un convertisseur DC-AC placé en série avec les lignes à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC. Il est utilisé également afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau. La première proposition de L'IPFC est faite en 1998 par Gyugyi, Sen et Schuder. La figure (I.14) représente le schéma de base d'un IPFC [5].



**Figure I.14 : Schéma de base de l'IPFC [5].**

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons défini la technologie systèmes flexibles de transmission à courant alternatif (Facts) peuvent être utilisés dans la compensation de l'énergie réactive pour augmenter la capacité de transmission et assurer la sécurité du réseau. Nous avons exposé aussi les différents types de Facts qui sont (parallèle, série et hybride)

# **Chapitre II : L'écoulement de puissance dans les réseaux électriques**

## II.1 Introduction

Ce chapitre présente le principe de fonctionnement d'un réseau électrique ainsi que la formulation des équations Load Flow et les méthodes numériques appliquées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance les plus utilisées pour sa résolution (Newton-Raphson et Gauss-Seidel). On a aussi les calculs d'écoulement de puissances d'un réseau de test et on a finis ce chapitre avec une petite conclusion.

## II.2 Principe de fonctionnement d'un réseau électrique

Le rôle fondamental du réseau est de fournir la puissance active et réactive nécessaire aux différents appareils qui y sont connectés. Les points de production et de consommation sont interconnectés par des lignes de transmission.

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement, considérons le système de distribution d'alimentation à double bus illustré sur la figure.

Les jeux de barres sont alimentés par des unités de production générant respectivement la puissance  $S_{g1}$  et  $S_{g2}$ . La demande pour chaque bus est définie comme  $S_{d1}$  et  $S_{d2}$ .

Les deux tiges sont reliées par une ligne de transmission. Ceci est représenté par son modèle  $\pi$  caractérisé par une impédance série  $Y_s$  et deux admittances parallèles  $Y_p$  avec deux tensions de bus notées respectivement  $V_1$  et  $V_2$ .

Dans la formulation du modèle, la puissance générée et demandée par chaque bus est combinée pour obtenir la puissance nette  $S$ , définie comme la différence entre la production et la consommation électrique du bus  $i$ . Pour un système à deux bus, ces puissances injectées sont [15] :

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = (P_{g1} - P_{d1}) + j(Q_{g1} - Q_{d1}) \quad (\text{II.1})$$

$$S_2 = P_2 + jQ_2 = (P_{g2} - P_{d2}) + j(Q_{g2} - Q_{d2}) \quad (\text{II.2})$$

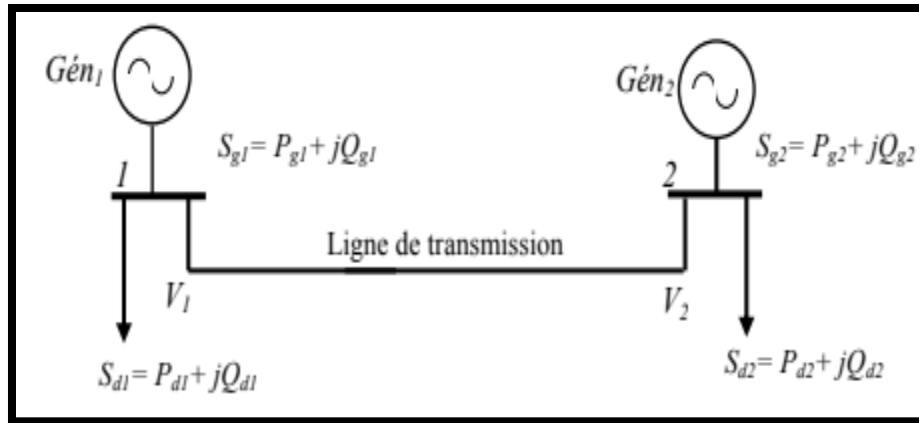


Figure II.1 : Exemple d'un réseau à deux jeux de barres.

Un réseau électrique réel ne peut pas être aussi simple, mais il ne s'agit que d'un objet de démonstration, le circuit de l'image représente un circuit primaire très simplifié par rapport à un réseau normal.

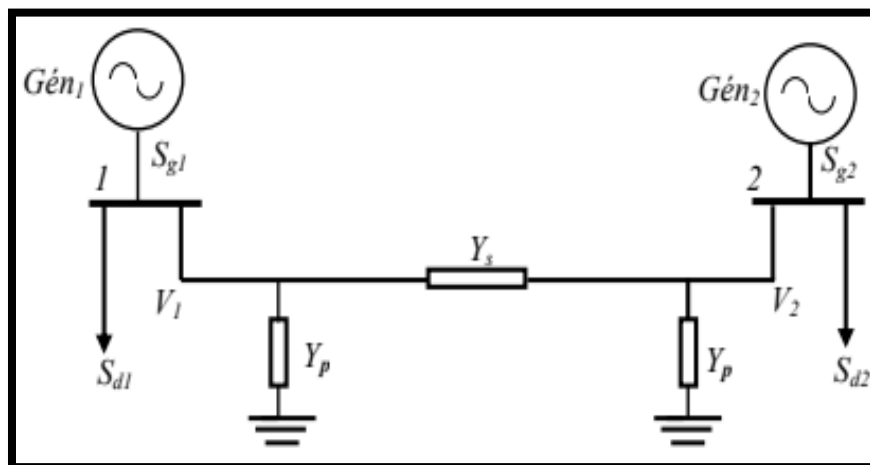


Figure II.2 : schéma équivalent d'un réseau à deux jeux de barres.

La puissance apparente  $S_1$  injectée au jeu de barre 1 est donnée par l'équation :

$$S_1 = V_1 I_1^* \quad (\text{II.3})$$

Où  $I_1$  est le courant circulant dans le bus  $i$ . Ce courant est constitué de deux composantes, une composante  $V_1 Y_p$  traversant l'admittance parallèle et une composante  $(V_1 - V_2) Y_s$

traversant l'admittance série de la ligne de réseau équivalente. Selon les lois de Kirchhoff appliquées aux jeux de barres de classe 1 :

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = V_1 Y_P + (V_1 - V_2) Y_S \quad (\text{II.4})$$

Au niveau du jeu de barre 2 :

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = V_2 Y_P + (V_2 - V_1) Y_S \quad (\text{II.5})$$

Après le développement des équations on trouve :

$$I_1 = (Y_P + Y_S)V_1 - Y_S V_2 \quad (\text{II.6})$$

$$I_2 = -Y_S V_1 + (Y_P + Y_S)V_2 \quad (\text{II.7})$$

La forme matricielle du système d'équation est :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_P + Y_S & -Y_S \\ -Y_S & Y_P + Y_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

L'équation peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_P + Y_S \quad (\text{II.10})$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_S \quad (\text{II.11})$$

On peut écrire le système d'une manière plus simple :

$$[I]_{bus} = [Y]_{bus}[V]_{bus} \quad (\text{II.12})$$

Au lieu de la manière suivante :

$$[V]_{bus} = [Z]_{bus}[I]_{bus} \quad (\text{II.13})$$

–  $[Y]_{bus}$  La matrice admittance du réseau.

–  $[Z]_{bus}$  La matrice impédance du réseau.

$Y$  ou  $Z$  décrivent les caractéristiques physiques du réseau, c'est-à-dire comprennent toutes les caractéristiques statiques de la ligne. Une bonne combinaison de leurs éléments est fondamentale pour le succès d'un modèle qui reflète la topologie du système.

Nous obtenons l'équation de flux de puissance qui relie la puissance réelle et réactive injectée dans les bus  $i$  et  $j$  à la tension :

$$S_1^* = (P_1 - jQ_1) = (Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2)V_1^* \quad (\text{II.14})$$

$$S_2^* = (P_2 - jQ_2) = (Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2)V_2^* \quad (\text{II.15})$$

On peut écrire le système comme suit :

$$S_1^* = (P_1 - jQ_1) = V_1^* \sum_{j=1}^2 Y_{1j}V_j \quad (\text{II.16})$$

$$S_2^* = (P_2 - jQ_2) = V_2^* \sum_{j=1}^2 Y_{2j}V_j \quad (\text{II.17})$$

Chaque tension au jeu de barres  $V_i$  à une amplitude  $|V_i|$  et un angle de phase  $\theta_i$  ainsi que chaque élément de la matrice admittance et en général du type complexe, donc on peut écrire :

$$V_i = |V_i| \quad (\text{II.18})$$

$$V_i = |V_i| \angle \theta_i \text{ et } Y_j = |Y_{ij}| \angle \delta_{ij} \quad (\text{II.19})$$

D'ici on peut écrire les équations de l'écoulement de puissance :

$$P_1 - jQ_1 = \sum_{j=1}^2 |Y_{1j}| |V_1| |V_j| \exp(\theta_j - \theta_1 + \delta_{1j}) \quad (\text{II.20})$$

$$P_2 - jQ_2 = \sum_{j=1}^2 |Y_{2j}| |V_2| |V_j| \exp(\theta_j - \theta_2 + \delta_{2j}) \quad (\text{II.21})$$

Séparons les parties réelles et imaginaires :

$$P_1 = \sum_{j=1}^2 |Y_{1j}| |V_1| |V_j| \cos(\theta_j - \theta_1 + \delta_{1j}) \quad (\text{II.22})$$

$$P_2 = \sum_{j=1}^2 |Y_{2j}| |V_2| |V_j| \cos(\theta_j - \theta_2 + \delta_{2j}) \quad (\text{II.23})$$

$$Q_1 = -\sum_{j=1}^2 |Y_{1j}| |V_1| |V_j| \sin(\theta_j - \theta_1 + \delta_{1j}) \quad (\text{II.24})$$

$$Q_2 = -\sum_{j=1}^2 |Y_{2j}| |V_2| |V_j| \sin(\theta_j - \theta_2 + \delta_{2j}) \quad (\text{II.25})$$

Après le développement on trouve:

$$\begin{cases} P_1 = P_{g1} - P_{d1} = |Y_{11}| |V_1|^2 \cos(\delta_{11}) + |Y_{12}| |V_1| |V_2| \cos(\theta_2 - \theta_1 + \delta_{12}) \\ P_2 = P_{g2} - P_{d2} = |Y_{22}| |V_2|^2 \cos(\delta_{22}) + |Y_{21}| |V_1| |V_2| \cos(\theta_1 - \theta_2 + \delta_{21}) \\ Q_1 = Q_{g1} - Q_{d1} = -|Y_{11}| |V_1|^2 \sin(\delta_{11}) - |Y_{12}| |V_1| |V_2| \sin(\theta_2 - \theta_1 + \delta_{12}) \\ Q_2 = Q_{g2} - Q_{d2} = -|Y_{22}| |V_2|^2 \sin(\delta_{22}) - |Y_{21}| |V_1| |V_2| \sin(\theta_1 - \theta_2 + \delta_{21}) \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

### II.3 Formulation des équations du Load Flow

Les formules mathématiques sont basées sur des systèmes d'équations non linéaires. Ces équations peuvent être établies en utilisant n'importe quelle configuration J-B ou n'importe quelle boucle de référence. Les coefficients de l'équation dépendent du choix des variables

indépendantes (courant, tension). Par conséquent, n'importe quelle matrice d'admittance ou d'impédance peut être utilisée.

La solution des équations algébriques décrivant le système d'alimentation est basée sur une technique itérative qui doit satisfaire aux lois de Kirchhoff selon lesquelles la somme algébrique de toutes les distributions au niveau du bus doit être égale à zéro, tout comme la somme algébrique de toutes les tensions dans la boucle. Les lois de Kirchhoff sont utilisées comme test de convergence de solution dans la méthode itérative.

Étant donné que le réseau est généralement équilibré, une représentation de réseau à une seule ligne est suffisante pour les problèmes de flux de puissance.

La tension et la puissance au bus  $i$  sont exprimées comme suit [16] :

$$V_i = |V_i|(\cos\theta_i + j\sin\theta_i) \quad (\text{II.27})$$

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = (P_{gi} - P_{di}) + j(Q_{gi} - Q_{di}) \quad (\text{II.28})$$

$|V_i|$  : Amplitude de la tension au jeu de barre  $i$ .

$\theta_i$  : Angle de la phase au jeu de barre  $i$ .

$S_i$  : Puissance apparente au jeu de barre  $i$ .

$P_i, Q_i$  : Puissances active et réactive au jeu de barre  $i$ .

$P_{di}, Q_{di}$  : Puissances active et réactive demandées au jeu de barre  $i$ .

$P_{gi}, Q_{gi}$  : Puissances active et réactive générées au jeu de barre  $i$ .

## II.4 Méthodes numériques appliquées pour la résolution de l'écoulement de puissance

L'analyse numérique impliquant la solution d'équations simultanées algébriques forme la base pour la solution des équations de rendement dans les analyses des systèmes d'alimentation électrique assistée par ordinateur, p. ex., pour l'analyse du débit de charge.

La première étape de l'analyse du flux de charge consiste à former l'admission du bus  $Y$  en utilisant la ligne de transport et données d'entrée de transformateur. L'équation nodale pour un réseau de système d'alimentation utilisant le bus  $Y$  peut être écrite comme suit [17] :

$$I = Y_{\text{bus}} V \quad (\text{II.29})$$

L'équation nodale peut être écrite sous une forme généralisée pour un système  $n$  bus.

$$I_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} V_j \text{ pour } i=1, 2, 3, n \quad (\text{II.30})$$

La puissance complexe fournie au bus  $i$  est :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (\text{II.31})$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (\text{II.32})$$

En substituant à  $I_i$  en termes de  $P_i$  et  $Q_i$ , l'équation donne :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=1}^n V_{ij} - \sum_{j=1}^n V_{ij} V_j \quad ; \quad j \neq i \quad (\text{II.33})$$

L'équation ci-dessus utilise des techniques itératives pour résoudre les problèmes de flux de charge. Par conséquent, il est nécessaire de revoir la forme générale des diverses méthodes de solution; Gauss-Seidel, Newton Raphson et Fast découplé flux de charge.

### Méthode Gauss-Seidel

Cette méthode est développée sur la base de la méthode de Gauss. C'est une méthode itérative utilisée pour résoudre ensemble de non linéaire équations algébriques. La méthode utilise une estimation initiale de la valeur de la tension, pour obtenir un calcul valeur d'une variable particulière. La valeur initiale est remplacée par une valeur calculée. Le processus est alors re-tourbé jusqu'à ce que la solution d'itération converge. La convergence est assez sensible aux valeurs de départ supposées.

Mais cette méthode souffre de faibles caractéristiques de convergence.

Il s'agit d'une méthode itérative qui est utilisée pour résoudre l'équation pour la valeur de  $V_i$ , et la séquence itérative devient :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^*} + \sum y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum y_{ij}} \quad ; \quad j \neq i \quad (\text{II.34})$$

En utilisant la loi actuelle de Kirchhoff, on suppose que le courant injecté dans bus  $i$  est positif, puis le réel et l'alimentation réactive dans les bus, tels que les bus générateurs,  $P_i^{sch}$  et  $Q_i^{sch}$  ont une valeur positive. Le réel et les puissances réactives qui s'échappent des bus, comme les bus de charge  $P_i^{sch}$  et  $Q_i^{sch}$  ont une valeur négative.  $P_i$  et  $Q_i$  sont résolus à partir de l'équation qui donne :

$$P_i^{(k+1)} = \text{Real} \left[ V_i^{*(k)} \left\{ \sum_{i=0}^n Y_{ij} - \sum_{ji} V_i^{(k)} \right\} \right] \quad j \neq i \quad (\text{II.35})$$

$$Q_i^{(k+1)} = \text{Imaginary} \left[ V_i^{*(k)} \left\{ \sum_{j=1}^n Y_{ij} - \sum_{ji}^n V_i^{(k)} \right\} \right] \quad j \neq i \quad (\text{II.36})$$

L'équation de flux de puissance est généralement exprimée en termes de matrice d'admission du bus, en utilisant les éléments diagonaux de l'admission bus et les éléments non-diagonaux de la matrice, puis l'équation devient :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{P_i^{\text{sch}} - jQ_i^{\text{sch}} + \sum y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \quad (\text{II.37})$$

Et :

$$P_i^{(k+1)} = \text{Real} \left[ V_i^{*(k)} \left\{ V_i^{*(k)} Y_{ii} + \sum_{i=1, j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right\} \right] \quad j \neq i \quad (\text{II.38})$$

$$P_i^{(k+1)} = \text{Imaginary} \left[ V_i^{*(k)} \left\{ V_i^{*(k)} Y_{ii} + \sum_{i=1, j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right\} \right] \quad j \neq i \quad (\text{II.39})$$

L'admission à la prise en charge par le sol de la ligne et les autres admissions fixes au sol sont comprises dans l'élément diagonal de la matrice.

### Méthode Newton-Raphson

Cette méthode a été nommée d'après Isaac Newton et Joseph Raphson. L'origine et la formulation de Newton-Raphson date de la fin des années 1960. Il s'agit d'une méthode itérative qui se rapproche d'un ensemble non linéaire équations simultanées à un ensemble d'équations linéaires simultanées utilisant l'expansion de la série de Taylor et les termes sont limitées à la première approximation. C'est la méthode la plus itérative utilisée pour le flux de charge parce que sont les caractéristiques de l'agence sont relativement plus.

L'approche Newton-Raphson est relativement bonne car elle peut résoudre des cas qui conduisent à des divergences avec d'autres processus populaires. Si la valeur supposée est proche de la solution, alors le résultat est obtenu très rapidement, mais si la valeur supposée est plus éloignée de la solution, alors la méthode peut prendre plus de temps à converger. Une autre méthode itérative de débit de charge largement utilisée pour résoudre l'équation non linéaire.

La matrice d'admission est utilisée pour écrire des équations pour les courants entrant dans un système d'alimentation.

L'équation est exprimée sous forme polaire, dans laquelle  $\mathbf{j}$  comprend le bus  $\mathbf{i}$

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| < \theta_{ij} + \delta_j \quad (\text{II.40})$$

La puissance réelle et réactive au bus  $\mathbf{i}$  est :

$$P_i - jQ_i = V_i I_i^* \quad (\text{II.41})$$

Substitution d'Ii dans l'équation 40 à partir de l'équation 41 :

$$P_i - jQ_i = |V_i| < -\delta_i \sum_{j=1}^n |V_j| |Y_{ij}| < \delta_{ij} + \delta_j \quad (\text{II.42})$$

Les parties réelles et imaginaires sont séparées :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.43})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.44})$$

Les équations ci-dessus et constituent un ensemble d'équations algébriques non linéaires en termes de  $|V|$  par unité et  $\delta$  en radians. Les équations sont développées dans la série de Taylor au sujet de l'estimation initiale et négligeant tout d'ordre supérieur, l'ensemble suivant d'équations linéaires est obtenu.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left[ \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \right] \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left[ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \right] \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left[ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \right] \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \left[ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} : \quad (\text{II.45})$$

Dans l'équation ci-dessus, l'élément de l'amplitude et de l'angle de tension variable du bus mou est omis parce que ils sont déjà connus. L'élément de la matrice jacobienne sont obtenus après des dérivés partiels des équations sont exprimées, ce qui donne une relation linéarisée entre de faibles variations de l'amplitude de tension et angle de tension. L'équation peut être écrite sous forme de matrice comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

$J_1, J_2, J_3, J_4$  sont les éléments de la matrice jacobienne.

La différence entre le calendrier et les valeurs calculées appelées résidus de puissance pour les termes  $\Delta P_i^{(k)}$  et  $\Delta Q_i^{(k)}$  est représenté comme suit :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (\text{II.47})$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (\text{II.48})$$

Les nouvelles estimations de tension du bus sont :

$$\delta^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (\text{II.49})$$

$$|V^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (\text{II.50})$$

### Méthode découplée rapide

La méthode de découplage rapide du flux de puissance est l'une des méthodes améliorées, qui repose sur une simplification de la méthode Newton-Raphson et rapportée par Stott et l'Alsace en 1974. Cette méthode, comme le Newton-Raphson méthode, offre des simplifications de calcul, une convergence rapide et des résultats fiables et est devenu une méthode utilisée dans l'analyse du débit de charge. Cependant, découplage rapide dans certains cas, où la résistance à la réaction élevée (R/X) rapports ou charge lourde (basse tension) à certains bus sont présents, ne converge pas bien parce qu'il est une méthode d'approximation et de faire quelques hypothèses pour simplifier la matrice jacobienne. Pour ces cas, de nombreux efforts et des développements ont été faits pour surmonter ces obstacles à la convergence. Certains d'entre eux visaient des systèmes à rapport R/X élevé et d'autres à bus basse tension.

Cette méthode est une modification de Newton-Raphson, qui profite du faible couplage entre  $P$ -  $\delta$  et  $Q$  -  $V$  en raison des rapports X: R élevés. La matrice jacobienne de l'équation est réduite de moitié par ignorent l'élément de  $J_2$  et  $J_3$ . L'équation est simplifiée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

L'équation d'expansion donne deux matrices distinctes :

$$\Delta P = J_1 \Delta \delta = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \quad (\text{II.52})$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta|V| = \left[ \frac{\partial P}{\partial |V|} \right] \Delta|V| \quad (\text{II.53})$$

$$\frac{\Delta P}{V_i} = -B' \Delta \delta \quad (\text{II.54})$$

$$\frac{\Delta Q}{V_i} = -B'' \Delta|V| \quad (\text{II.55})$$

$B'$  et  $B''$  sont les parties imaginaires de l'admission de bus. Il est préférable d'ignorer tous les éléments connectés shunt, quant à simplifier la formation de  $J_1$  et  $J_4$ . Cela ne permettra qu'une seule matrice que l'inversion répétée. Les variations successives de la magnitude et de l'angle de phase sont : [2]

$$\Delta \delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \quad (\text{II.56})$$

$$\Delta|V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (\text{II.57})$$

## II.5 Calcule d'écoulement de puissance d'un réseau test

Pour calculer l'écoulement de puissance d'un réseau on a suivi les étapes suivantes :

### Schéma

Pour étudier l'écoulement de puissance, nous considérerons le réseau IEEE de 9 nœuds représenté à la figure (II.3).

LA méthode numérique appliquée pour la résolution de l'écoulement de puissance est la méthode Newton-Raphson.

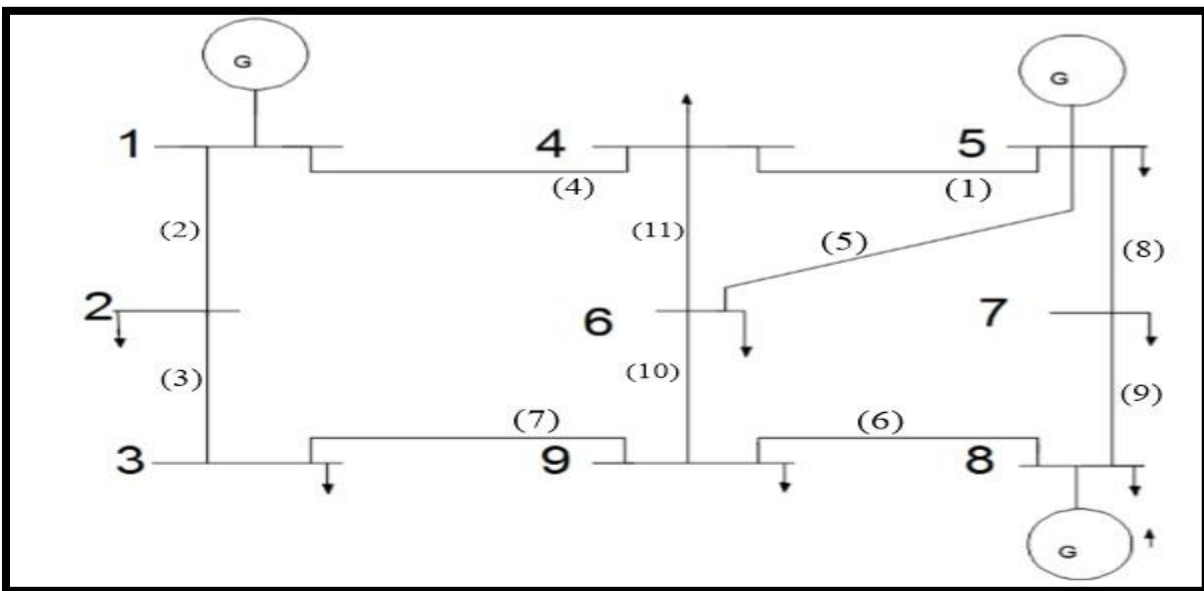


Figure II.3 : Schéma unifilaire du système à 9 nœuds IEEE.

### Paramètres

- **Base de travail**

Tous les calculs sont menés sur les grandeurs normalisées (p.u.) par la base suivante :

- SBase=100 MVA
- UBase=400 Kv

### ❖ Productions, consommations et tensions prévues

Le tableau (II.1) montre la production et la consommation de puissance active et Réagit à tous les nœuds (sauf le nœud d'équilibrage, puisqu'il est responsable de l'équilibrage La puissance active du générateur et la puissance et les pertes consommées par la charge dans le réseau). Ces données sont suffisantes pour calculer l'état du réseau, c'est-à-dire les tensions d'amplitude et de phase, et la puissance active fournie par les générateurs Bilan, puissance réactive fournie par tous les générateurs, et en Fil. C'est le calcul du flux de puissance.

nœud	Type de nœud	V	phase	P Charge	Q Charge	P gen	Q gen
		[p.u.]	[deg]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]
nœud 1	Slack	1,03	0	0	0		
nœud 2	PQ	1	0	10	5		
nœud 3	PQ	1	0	25	15		
nœud 4	PQ	1	0	60	40		
nœud 5	PV	1,06	0	10	5	80,0000	
nœud 6	PQ	1	0	100	80		
nœud 7	PQ	1	0	80	60		
nœud 8	PV	1,01	0	40	20	120,0000	
nœud 9	PQ	1	0	20	10		

**Tableau II.1 : Productions, consommations et tensions prévues.**

### ❖ Lignes

Les lignes sont modélisées par des modèles en  $\pi$  (voir Figure (II.4)). Leurs paramètres (impédance série et réactance shunt capacitive) sont données ci-dessous (tableau 2.2).

Dans ce tableau, B/2 représente l'admittance du shunt qui doit être affectée à chaque extrémité Selon le modèle  $\pi$ , correspond à la moitié de l'admittance capacité totale de la ligne.

$i$	$j$	$R, pu$	$X_L, pu$	$B/2, pu$	$X'$
1	2	0,018	0,054	0,0045	1
1	4	0,015	0,045	0,0038	1
2	3	0,018	0,056	0	1
3	9	0,02	0,06	0	1
4	5	0,013	0,036	0,003	1
4	6	0,02	0,066	0	1
5	6	0,06	0,03	0,0028	1
5	7	0,014	0,036	0,003	1
6	9	0,01	0,05	0	1
7	8	0,032	0,076	0	1
8	9	0,022	0,065	0	1

Tableau II.2 : Paramètres des lignes

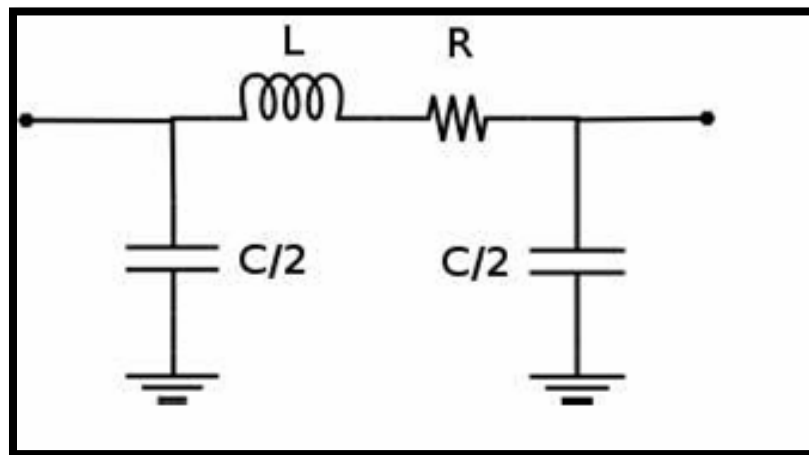


Figure II.4: Modèle en  $\pi$  d'une ligne.

### Résultats de calcul de l'écoulement de puissance

Les tensions complexes des nœuds et le transit de puissance active et réactive du

Système d'essai sont résumés dans le tableau II.3 et II.4.

nœud	V	phase
	[p.u.]	[deg]
1	1,0300	0,0000
2	1,0131	-1,1825
3	1,0006	-2,1805
4	1,0275	-2,9294
5	1,0600	-4,2306
6	1,0046	-3,2359
7	1,0215	-4,1317
8	1,0100	-1,4645
9	1,0011	-2,5718

**Tableau II.3 : Les tensions des nœuds**

<i>Depuis nœud</i>	<i>Pour nœud</i>	<i>ligne</i>	<i>P<sub>ij</sub> flux</i>	<i>P<sub>ji</sub> flux</i>	<i>P pertes</i>	<i>Q<sub>ij</sub> flux</i>	<i>Q<sub>ji</sub> flux</i>	<i>Q pertes</i>
i	j		[MW]	[MW]	[MW]	[MVar]	[MVar]	[MVar]
Bus4	Bus5	1	31,3978	-29,9622	1,4356	-103,6282	106,95	3,3218
Bus1	Bus2	2	45,6766	-45,2712	0,4053	16,9163	-16,6396	0,2767
Bus2	Bus3	3	35,2712	-35,0293	0,2419	11,6396	-10,8869	0,7527
Bus1	Bus4	4	110,8081	-108,9601	1,8481	-28,5494	33,2893	4,7398
Bus6	Bus5	5	-61,6552	66,1737	4,5185	-61,9198	63,5819	1,6621
Bus9	Bus8	6	-31,0664	31,2802	0,2138	-2,9771	3,6089	0,6318
Bus3	Bus9	7	10,0293	-10,0058	0,0235	-4,1131	4,1835	0,0704
Bus5	Bus7	8	33,7885	-32,3943	1,3942	99,9011	-96,9662	2,9349
Bus7	Bus8	9	-47,6057	48,7198	1,1141	36,9662	-34,3202	2,646
Bus6	Bus9	10	-21,0154	21,0722	0,0568	11,4906	-11,2064	0,2842
Bus4	Bus6	11	17,5623	-17,3295	0,2328	30,339	-29,5707	0,7682
Total pertes active					11,4847	Total pertes réactive		18,0885

**Tableau II.4 : Les puissances et les pertes actives et réactives des lignes.**

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes en mesure d'étudier le problème de la répartition des charges. Il occupe une place très importante dans le programme de commande et de contrôle du réseau électrique. Largement utilisé dans les centres de contrôle des systèmes électriques, étudier les problèmes de fonctionnement du réseau et améliorer le calcul des pertes de transmission et des facteurs de pénalité. Ça donne toutes les variables (arguments et modules) pour les tensions des nœuds de réseau et la puissance active et réactive.

La méthode la plus courante pour résoudre le problème de répartition de la charge, c'est la méthode de Newton-Raphson car le jacobien qu'elle utilise donne tout les changements de puissance en tant que variables d'état (modules et arguments des tensions).

***Chapitre III : La modélisation de  
l'UPFC et leur intégration dans  
l'algorithme de l'écoulement de  
puissance***

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder trois volets importants : (i) la modélisation de l'UPFC, (ii) l'algorithme de l'écoulement de puissance modifié et (iii) la comparaison des résultats obtenus avec et sans UPFS en termes de tensions, de flux de puissance active et réactive pour démontrer la performance du modèle UPFC. Nous clôturons ce chapitre par une conclusion.

### III.2 Modélisation de l'UPFC

L'UPFC peut être considérée comme composée de deux VSC partageant un condensateur commun sur leur côté CC et d'un système de contrôle unifié. Une représentation schématique simplifiée de l'UPFC est donnée à la figure III.1

L'UPFC permet de contrôler simultanément le flux de puissance active, le flux de puissance réactive et l'amplitude de la tension aux terminaux de l'UPFC. Le régulateur peut également être réglé pour contrôler un ou plusieurs de ces paramètres dans n'importe quelle combinaison ou pour n'en contrôler aucun [22].

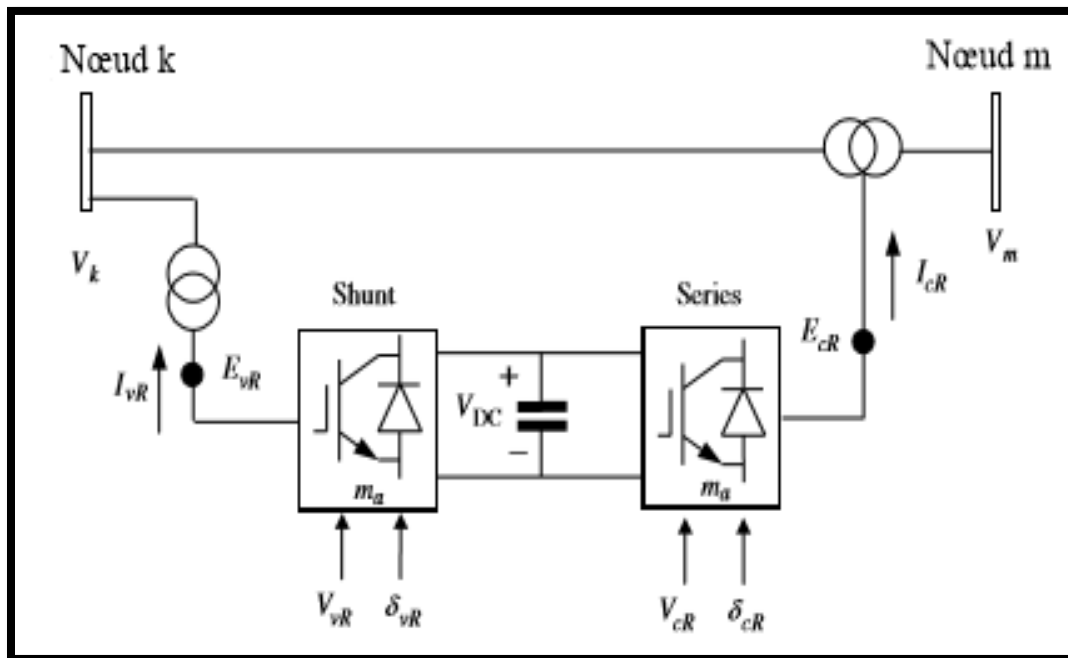


Figure III.1 : Système de régulateur unifié de flux de puissance (UPFC).

La puissance active demandée par le convertisseur série est prélevée par le convertisseur shunt sur le réseau CA et fournie au nœud m par la liaison CC. La tension de sortie du

convertisseur série est ajoutée à la tension nodale, disons au nœud  $k$ , pour augmenter la tension nodale au nœud  $m$ . L'amplitude de la tension de sortie assure la régulation de la tension  $V_{CR}$ , et l'angle de phase  $\delta_{CR}$  détermine le mode de contrôle du flux de puissance.

En plus de jouer un rôle de soutien dans l'échange de puissance active qui a lieu entre le convertisseur série et le système CA, le convertisseur shunt peut également générer ou absorber de la puissance réactive afin de fournir une régulation indépendante de la magnitude de la tension à son point de connexion avec le système CA.

Le circuit équivalent de l'UPFC illustré à la figure III.1 se compose d'une source de tension shunt, d'une source de tension série et d'une équation de contrainte de puissance active qui relie les deux sources de tension. Les deux sources de tension sont connectées au système CA par des réactances inductives représentant les transformateurs VSC. Dans une UPFC triphasée, les expressions appropriées pour les deux sources de tension et l'équation de contrainte sont les suivantes [22]:

$$E_{vR}^\rho = V_{vR}^\rho (\cos \delta_{vR}^\rho + j \sin \delta_{vR}^\rho), \quad (\text{III.1})$$

$$E_{cR}^\rho = V_{cR}^\rho (\cos \delta_{cR}^\rho + j \sin \delta_{cR}^\rho), \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Re}\{-E_{vR}^\rho I_{vR}^{*\rho} + E_{vR}^\rho I_m^{*\rho}\} = 0. \quad (\text{III.3})$$

Où  $\rho$  indique les quantités de phase  $a, b$ , et  $c$ .

Tout comme les sources de tension shunt et série utilisées pour représenter le STATCOM et le SSSC, respectivement, les sources de tension utilisées dans l'application UPFC ont également des limites.

Sur la base du circuit équivalent illustré à la figure III.1, et en supposant des paramètres triphasés, l'équation d'admittance de transfert suivante peut être écrite :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_k \\ \mathbf{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{Y}_{cR} + \mathbf{Y}_{vR}) & -\mathbf{Y}_{cR} & -\mathbf{Y}_{cR} & -\mathbf{Y}_{vR} \\ -\mathbf{Y}_{cR} & \mathbf{Y}_{cR} & \mathbf{Y}_{cR} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k \\ \mathbf{V}_m \\ \mathbf{E}_{cR} \\ \mathbf{E}_{vR} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

### III.3 L'algorithme de l'écoulement de puissance modifié

Le principe de base du fonctionnement de l'UPFC a été examiné au chapitre III. Il s'ensuit qu'un circuit équivalent composé de deux sources de tension synchrones coordonnées doit représenter la UPFC de manière adéquate pour l'analyse en régime permanent de la fréquence fondamentale. Un tel circuit équivalent est illustré à la figure III.2. Les sources de tension synchrones représentent la composante fondamentale en série de Fourier des formes d'ondes de tension commutées aux bornes du convertisseur CA de l'UPFC [22].

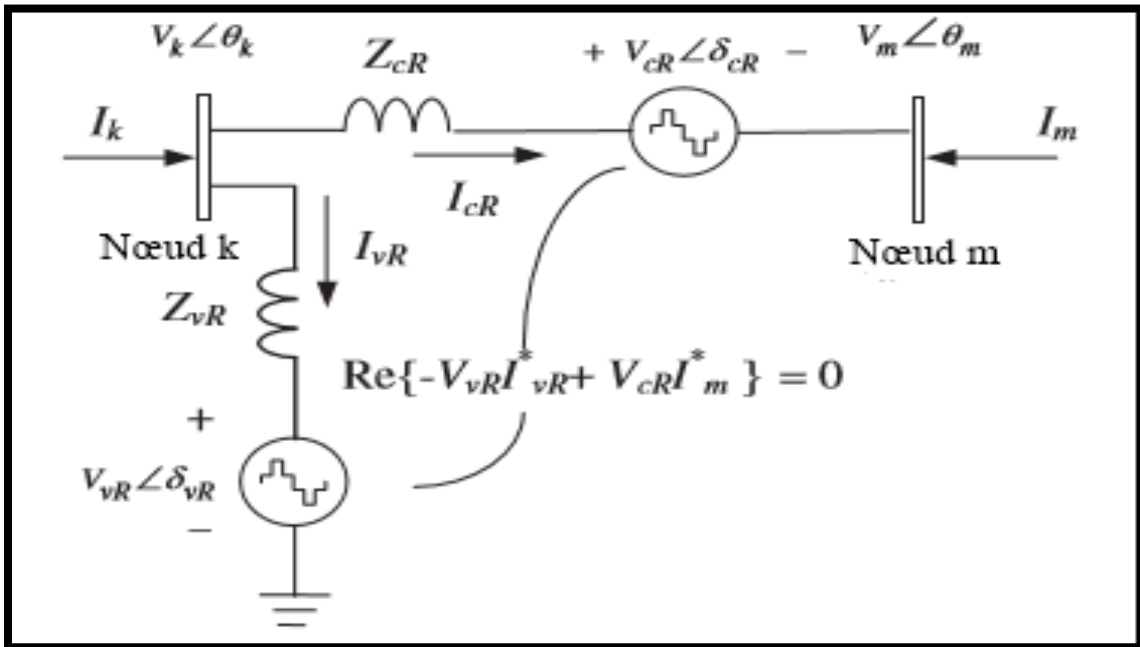


Figure III.2 : Circuit équivalent du régulateur de flux de puissance unifié.

Les sources de tension UPFC sont les suivantes:

$$E_{vR} = V_{vR}(\cos \delta_{vR} + j \sin \delta_{vR}), \quad (\text{III.5})$$

$$E_{cR} = V_{cR}(\cos \delta_{cR} + j \sin \delta_{cR}), \quad (\text{III.6})$$

Où  $V_{vR}$  et  $\delta_{vR}$  sont les grandeurs contrôlables ( $V_{vR\min} \leq V_{vR} \leq V_{vR\max}$ ) et l'angle de phase ( $0 \leq \delta_{vR} \leq 2\pi$ ) de la source de tension représentant le convertisseur shunt. La magnitude  $V_{cR}$  et l'angle de phase  $\delta_{cR}$  de la source de tension représentant le convertisseur en série sont contrôlées entre les limites ( $V_{cR\min} \leq V_{cR} \leq V_{cR\max}$ ) et ( $0 \leq \delta_{cR} \leq 2\pi$ ), respectivement.

L'angle de phase de la tension injectée en série détermine le mode de contrôle du flux de puissance. Si  $\delta_{cR}$  est en phase avec l'angle de tension nodale  $\theta_k$ , l'UPFC régule la tension terminale. Si  $\delta_{cR}$  est en quadrature par rapport à  $\theta_k$ , il contrôle le flux de puissance active, agissant comme un déphaseur. Si  $\delta_{cR}$  est en quadrature avec l'angle du courant de ligne, il contrôle le flux de puissance active, agissant comme un compensateur en série variable. Pour toute autre valeur de  $\delta_{cR}$ , l'UPFC fonctionne comme une combinaison de régulateur de tension, de compensateur série variable et de déphaseur. L'amplitude de la tension injectée en série détermine la quantité de flux de puissance à contrôler [22].

### Modèle de flux d'énergie

Sur la base du circuit équivalent illustré à la figure III.2 les équations de puissance active et réactive sont, au Nœud  $k$  :

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] + V_k V_{cR} [G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{cR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{cR})] + V_k V_{vR} [G_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (\text{III.7})$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] + V_k V_{cR} [G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{cR}) - B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{cR})] + V_k V_{vR} [G_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (\text{III.8})$$

À Nœud  $m$  :

$$P_m = V_m^2 G_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)] + V_m V_{cR} [G_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{cR}) + B_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{cR})] \quad (\text{III.9})$$

$$Q_m = -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k)] + V_m V_{cR} [G_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{cR}) - B_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{cR})] \quad (\text{III.10})$$

Convertisseur en série :

$$P_{cR} = V_{cR}^2 G_{mm} + V_{cR} V_k [G_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_k) + B_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_k)] + V_{cR} V_m [G_{mm} \cos(\delta_{cR} - \theta_m) + B_{mm} \sin(\delta_{cR} - \theta_m)] \quad (\text{III.11})$$

$$Q_{cR} = -V_{cR}^2 B_{mm} + V_{cR} V_k [G_{km} \sin(\delta_{cR} - \theta_k) - B_{km} \cos(\delta_{cR} - \theta_k)] + V_{cR} V_m [G_{mm} \sin(\delta_{cR} - \theta_m) - B_{mm} \cos(\delta_{cR} - \theta_m)] \quad (\text{III.12})$$

Convertisseur shunt :

$$P_{vR} = -V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k)], \quad (\text{III.13})$$

$$Q_{vR} = V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (\text{III.14})$$

En supposant des vannes de convertisseur sans pertes, la puissance active fournie au convertisseur shunt,  $P_{vR}$  représente la puissance active demandée par le convertisseur en série,  $P_{CR}$  donc:

$$P_{vR} + P_{CR} = 0 \quad (\text{III.15})$$

En outre, si l'on suppose que les transformateurs de couplage ne contiennent aucune résistance, la puissance active au bus k correspond à la puissance active au bus m. En conséquence:

$$P_{vR} + P_{CR} = P_k + P_m = 0 \quad (\text{III.16})$$

Les équations de puissance de l'UPFC, sous forme linéarisée, sont combinées avec celles du réseau CA. Dans le cas où l'UPFC contrôle les paramètres suivants : (1) l'amplitude de la tension à la borne du convertisseur shunt (bus k), (2) le flux de puissance active du bus m au bus k, et (3) la puissance réactive injectée au bus m, et en considérant que le bus m est un bus PQ, le système d'équations linéarisé est le suivant :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & 0 & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{vR}} V_{vR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \delta_{cR} \\ \Delta V_{cR} \\ V_{cR} \\ \Delta \delta_{vR} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Si la régulation de tension au Nœud  $k$  est désactivée, la troisième colonne de l'équation III.17 est remplacée par les dérivées partielles des puissances de désadaptation du bus et de l'UPFC par rapport à la magnitude de la tension du bus.  $V_k$ . En outre, l'augmentation de l'amplitude de la tension de la source shunt,  $\Delta V_{vR}/V_{vR}$  est remplacée par l'augmentation de l'amplitude de la tension au bus  $k$ ,  $\Delta V_k/V_k$ .

Si les deux nœuds  $k$  et  $m$ , sont PQ le système d'équations linéarisé est le suivant :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{mk} \\ \Delta Q_{mk} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}} V_{cR} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \delta_{cR} \\ \Delta V_{cR} \end{bmatrix} \quad (III.18)$$

Dans ce cas,  $V_{vR}$  est maintenue à une valeur fixe dans les limites prescrites,  $V_{vR \min} \leq V_{vR} \leq V_{vR \max}$ . [22]

### III.4 Simulation en présence l'UPFC

En prend le réseau qui a été utilisé en chapitre II et on ajoute l'UPFC dans les lignes (4, 7, 1) respectivement et deux l'UPFC en même temps dans les lignes 1 et 7.

#### Cas 1 : L'UPFC sur la ligne 4 (cote Nœud bilan)

Après avoir ajouté l'UPFC entre le nœud 1 et le nœud 4 (ligne 4), comme indiqué dans la figure III.3, nous avons obtenu les histogrammes suivants lors de la simulation :

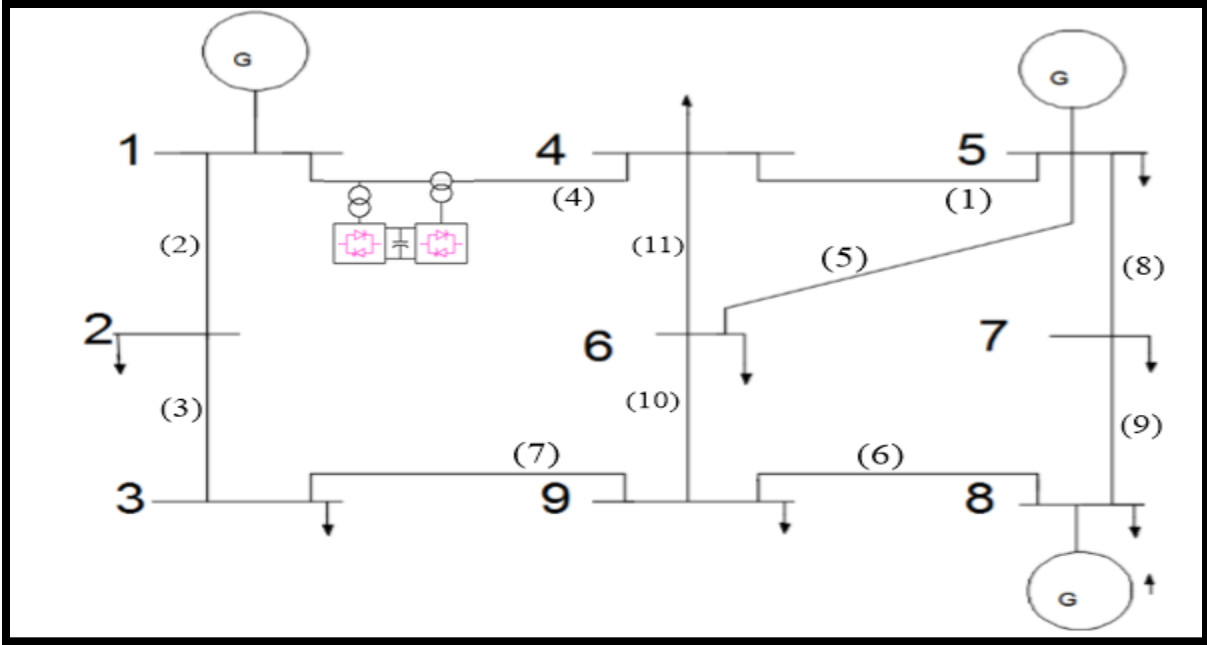


Figure III.3 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 4.

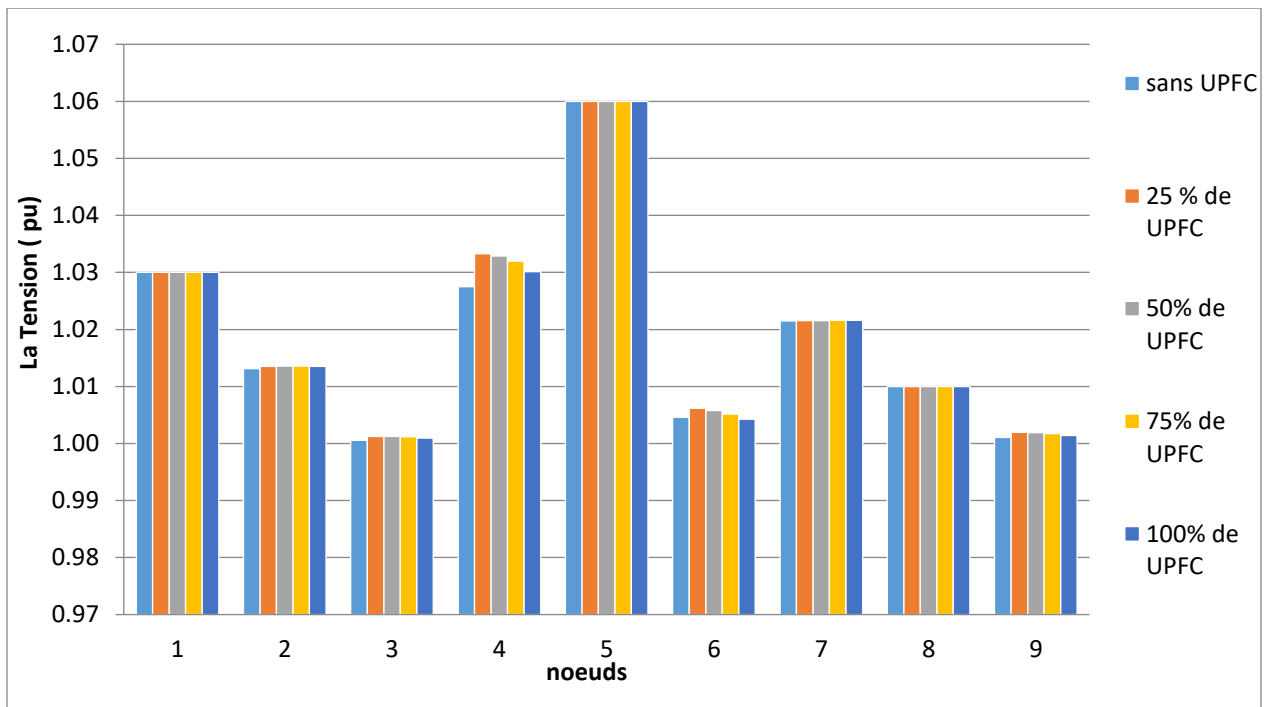


Figure III.4 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC.

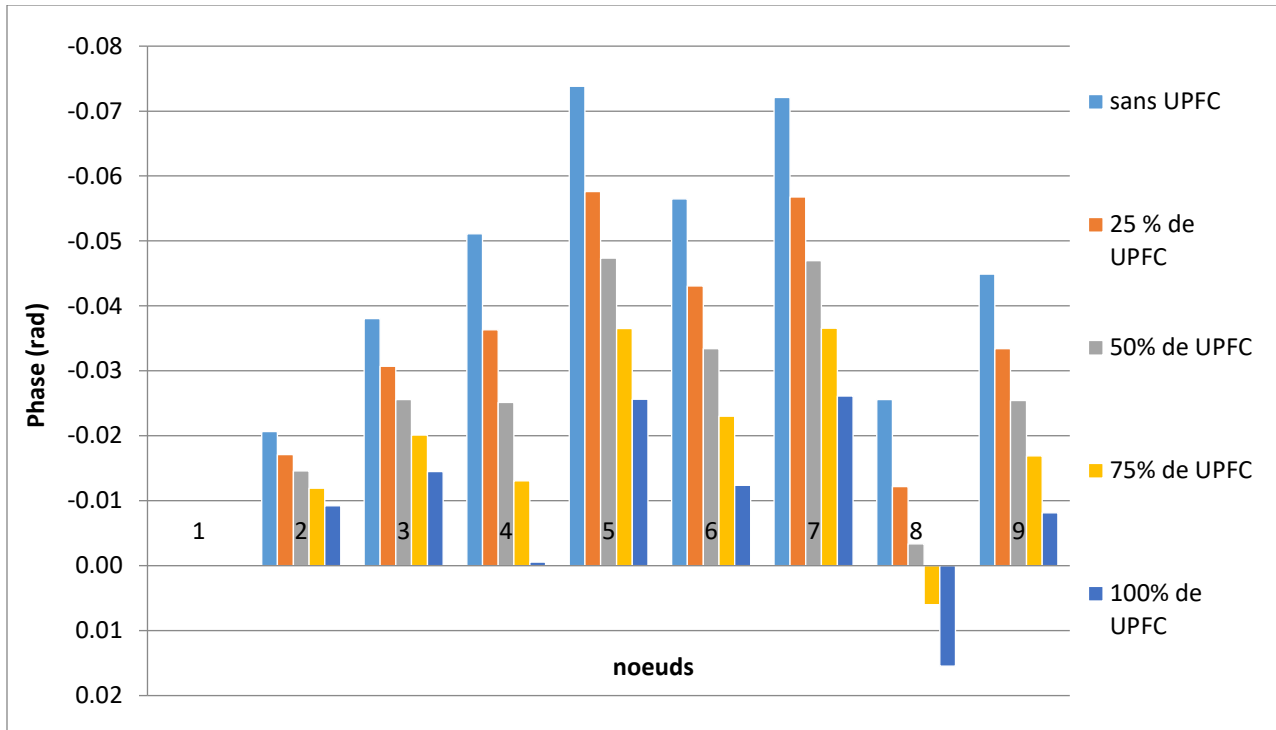


Figure III.5 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC.

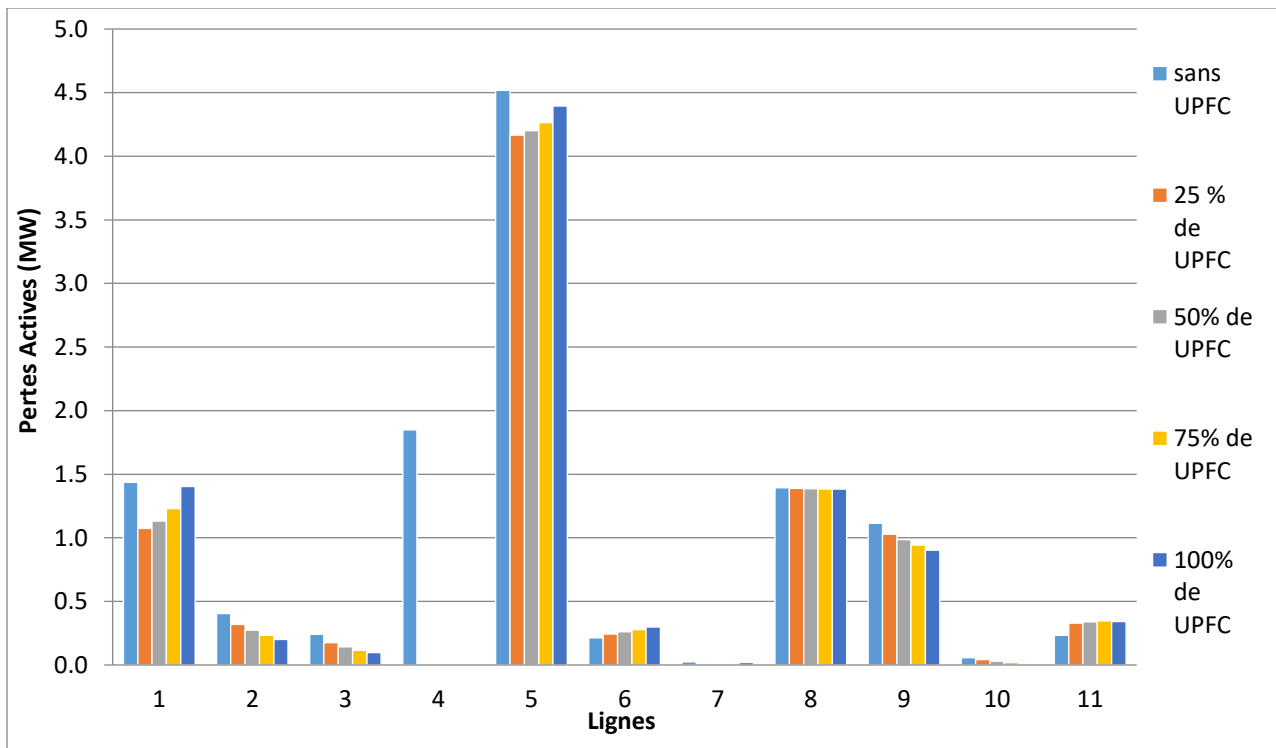
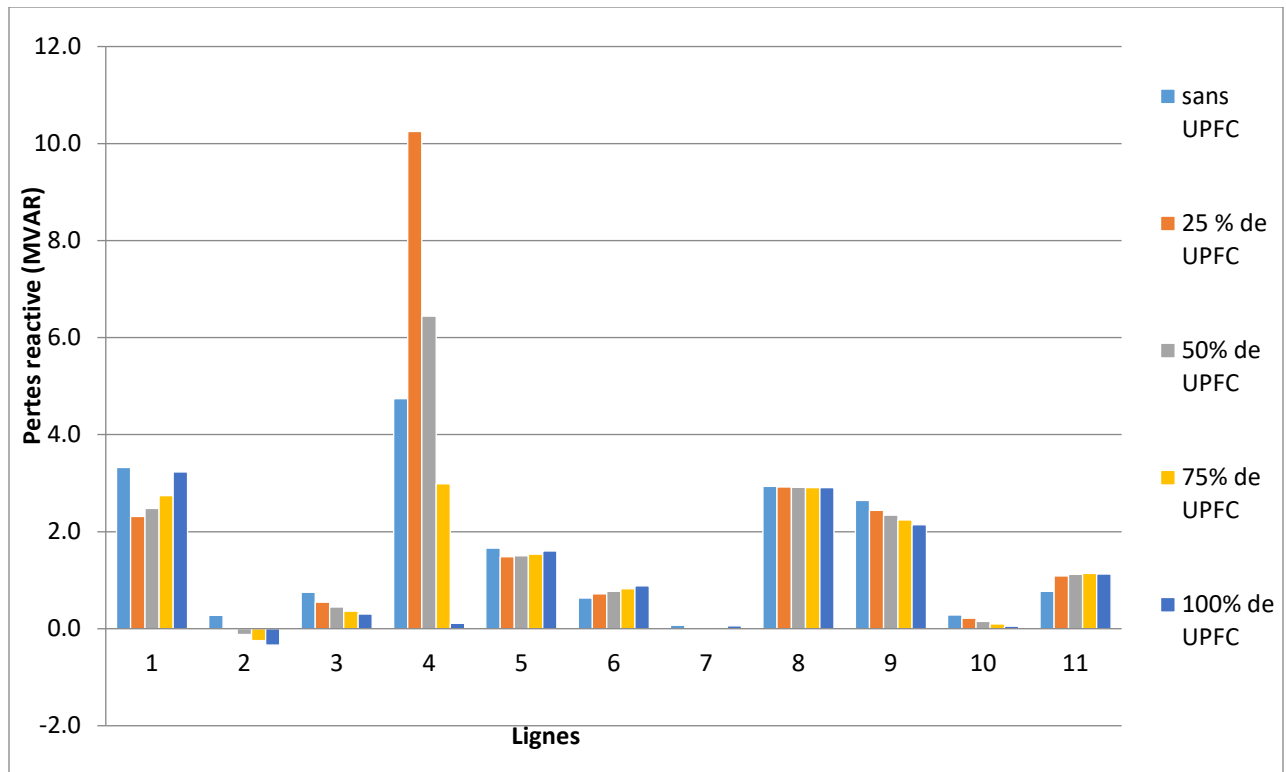


Figure III.6 : Les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC.



**Figure III.7 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC.**

On peut voir que :

- Les tensions au niveau du nœud bilan et du générateur restent les mêmes avec ou sans l'UPFC.
- Il y a une variation de la tension à tous les nœuds, en particulier au niveau du nœud 4, auquel l'UPFC est connecté.
- La valeur de la phase au nœud bilan reste inchangée, c'est-à-dire égale à zéro, tandis qu'elle augmente dans tous les autres nœuds.
- On peut observer une réduction des pertes actives sur la ligne 4, passant de 1,8480 MW à 0 MW, indépendamment du pourcentage d'injection de l'UPFC. De plus, il y a également une modification des pertes actives sur les autres lignes.
- Il est remarquable que les injections de l'UPFC entraînent une augmentation des pertes réactives. De plus, il est intéressant de noter que plus le pourcentage d'injection de l'UPFC n'est élevé, meilleures sont les performances en termes de réduction des pertes réactives.

## Cas 2 : L'UPFC sur la ligne 1 (cote Nœud générateur)

Après avoir ajouté l'UPFC entre le nœud 4 et le nœud 5 (ligne 1), comme indiqué dans la figure III.8, nous avons obtenu les histogrammes suivants lors de la simulation :

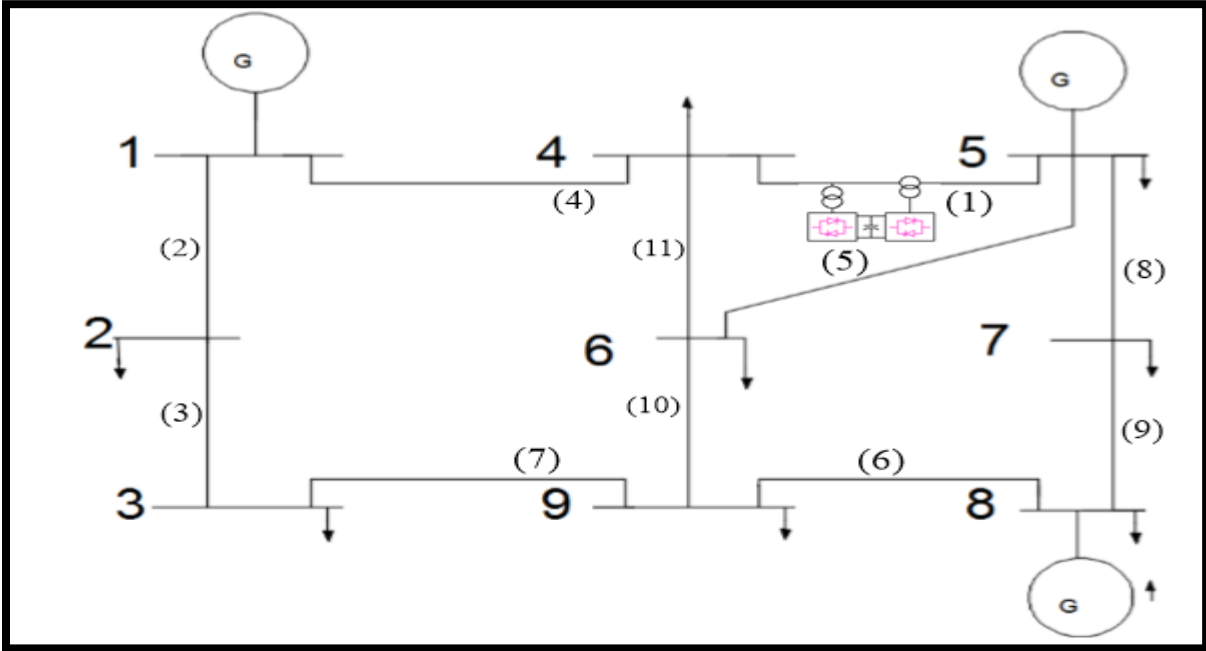


Figure III.8 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 1.

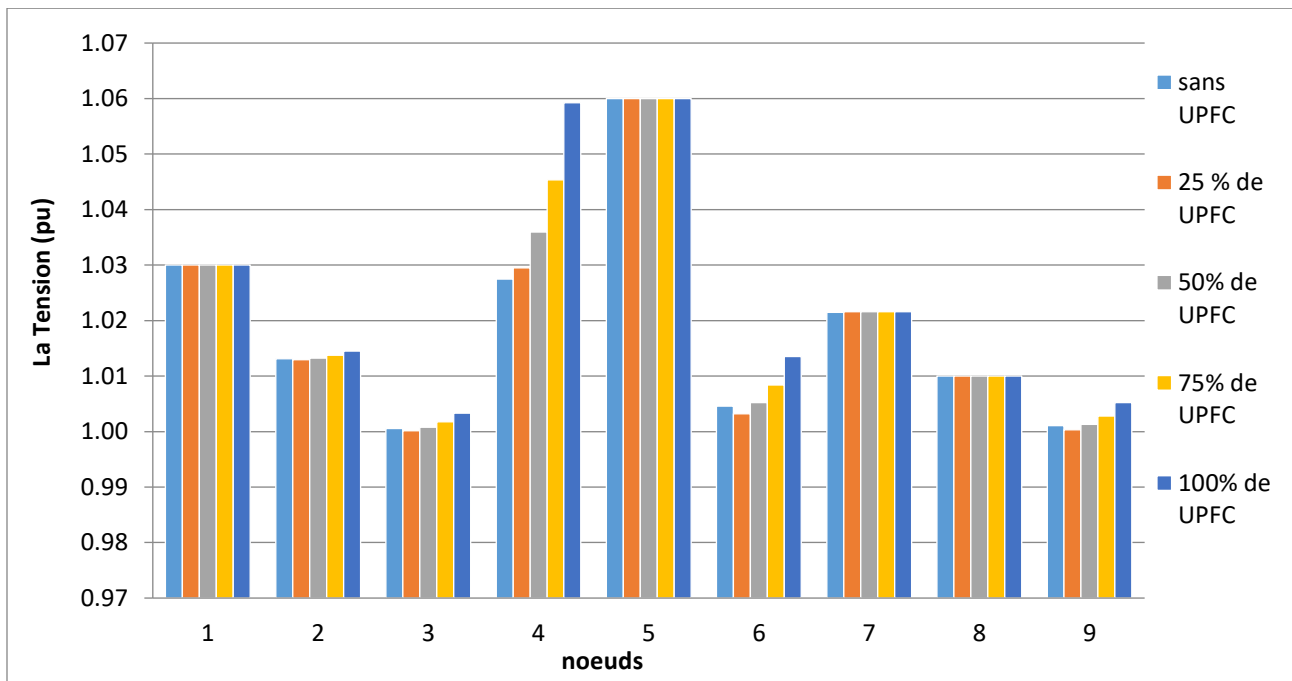


Figure III.9 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC.

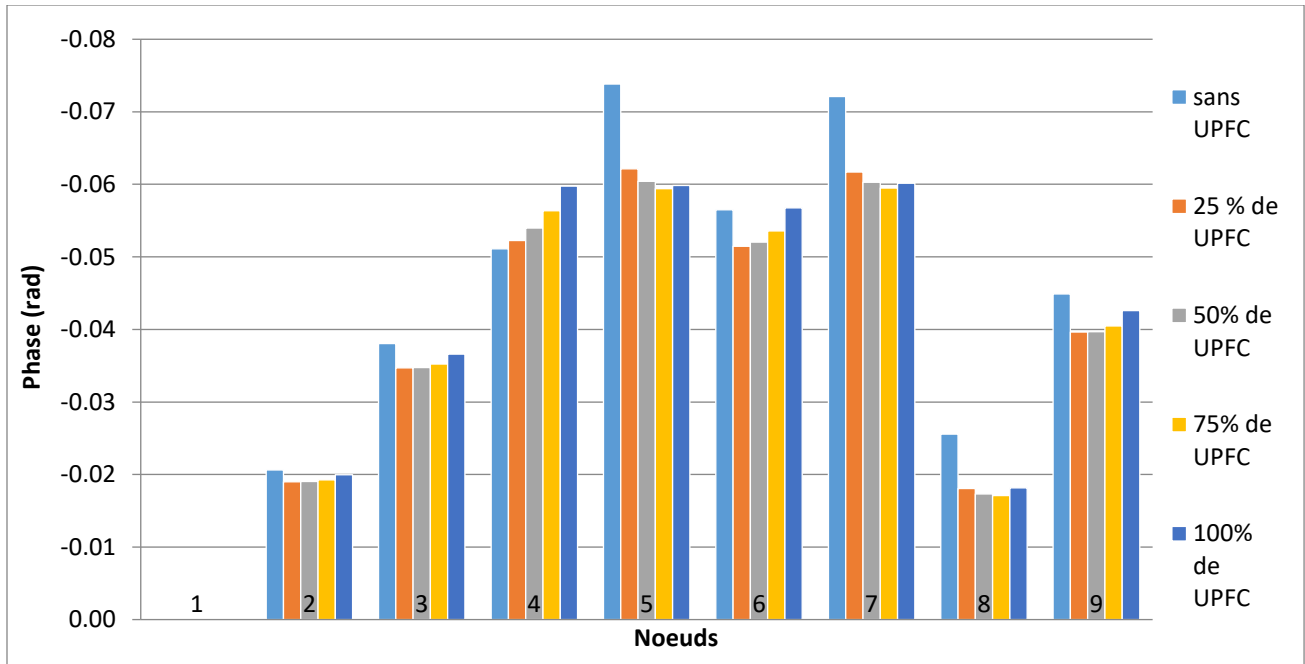


Figure III.10 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC.

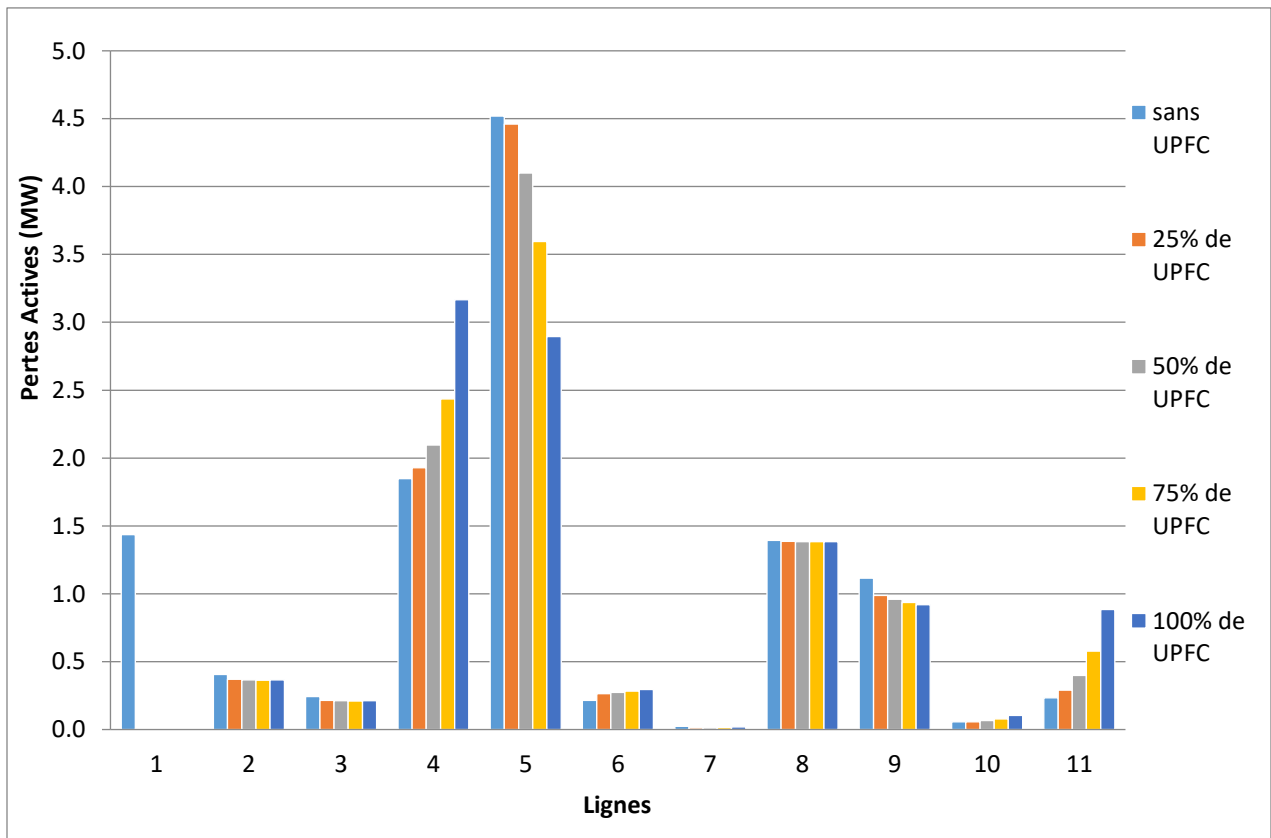
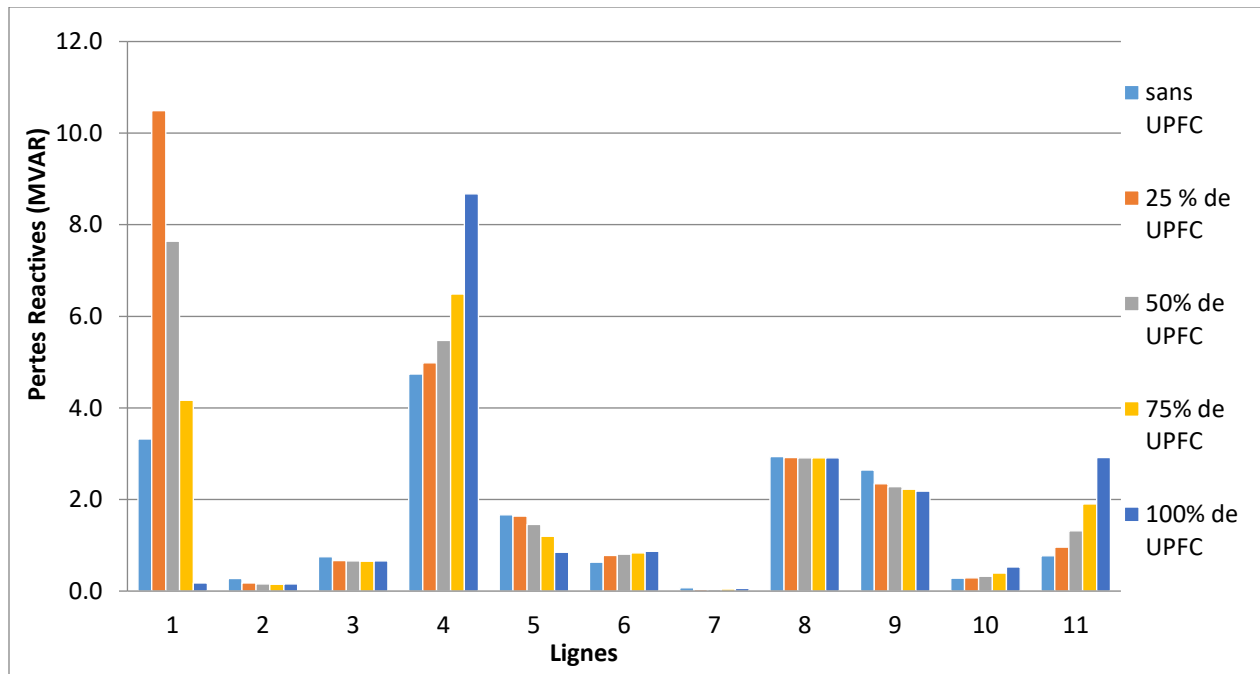


Figure III.11 : les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC.



**Figure III.12 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC.**

On peut voir que :

- Les tensions au niveau du nœud bilan et du générateur restent les mêmes avec ou sans l'UPFC.
- Il y a une variation de la tension à tous les nœuds, en particulier au niveau du nœud 4, auquel l'UPFC est connecté.
- La valeur de la phase au nœud bilan reste inchangée à zéro, tandis qu'elle augmente dans tous les autres nœuds, à l'exception du nœud 5 qui diminue.
- On peut observer une réduction des pertes actives sur la ligne 1, passant de 1,4356 MW à 0 MW, indépendamment du pourcentage d'injection de l'UPFC. De plus, il y a également une diminution des pertes actives sur les autres lignes, à l'exception des lignes 4 et 11 qui sont connectées au nœud 4.
- Il est remarquable que les injections de l'UPFC dans la ligne 1 entraînent une augmentation des pertes réactives. De plus, il est intéressant de noter que plus le pourcentage d'injection de l'UPFC n'est élevé, meilleures sont les performances en termes de réduction des pertes réactives. Cependant, pour les lignes 4 et 11, on observe une augmentation des pertes réactives sans amélioration significative. En ce qui concerne les autres lignes, on observe des changements dans leurs performances.

### Cas 3 : L'UPFC sur la ligne 7 (loin de nœud bilan et nœud générateur)

Après avoir ajouté l'UPFC entre le nœud 3 et le nœud 9 (ligne 7), comme indiqué dans la figure III.13, nous avons obtenu les histogrammes suivants lors de la simulation :

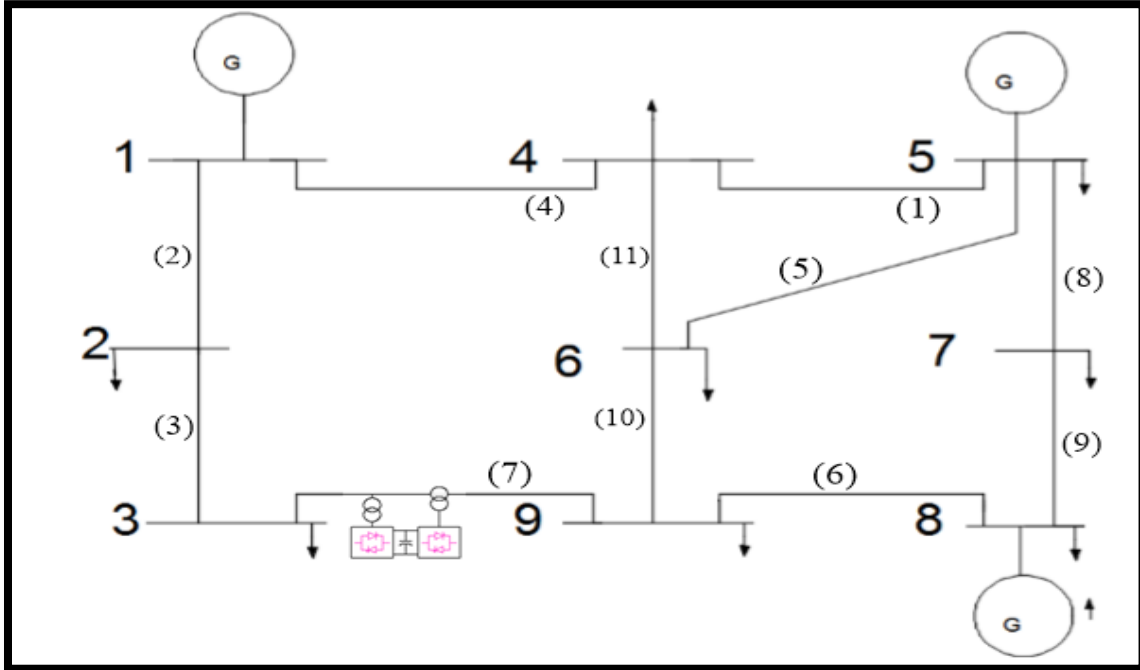


Figure III.13 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 7.

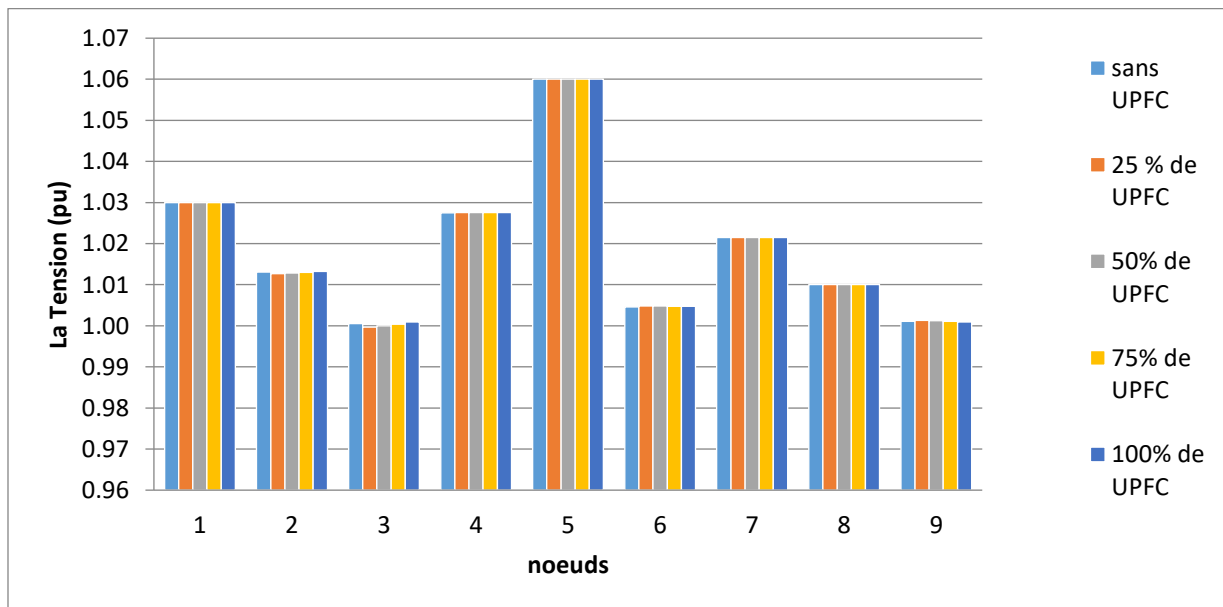


Figure III.14 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC.

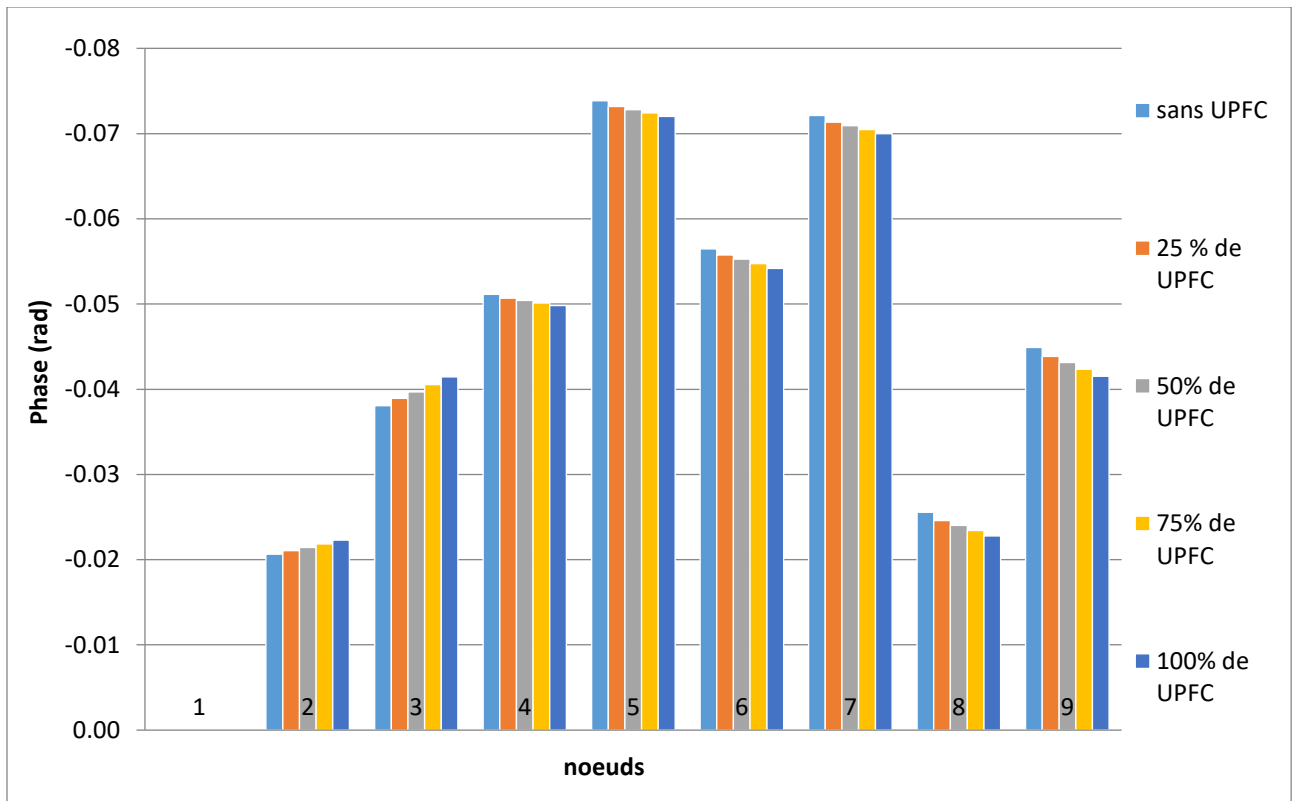


Figure III.15 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC.

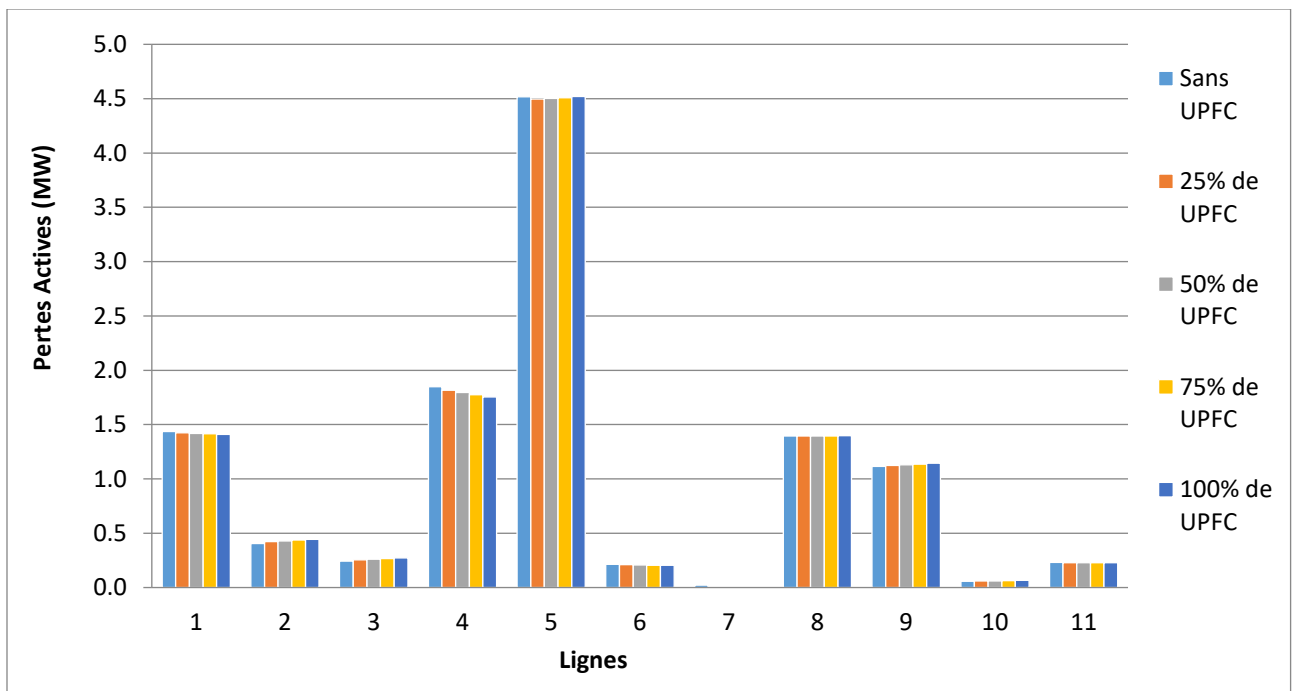
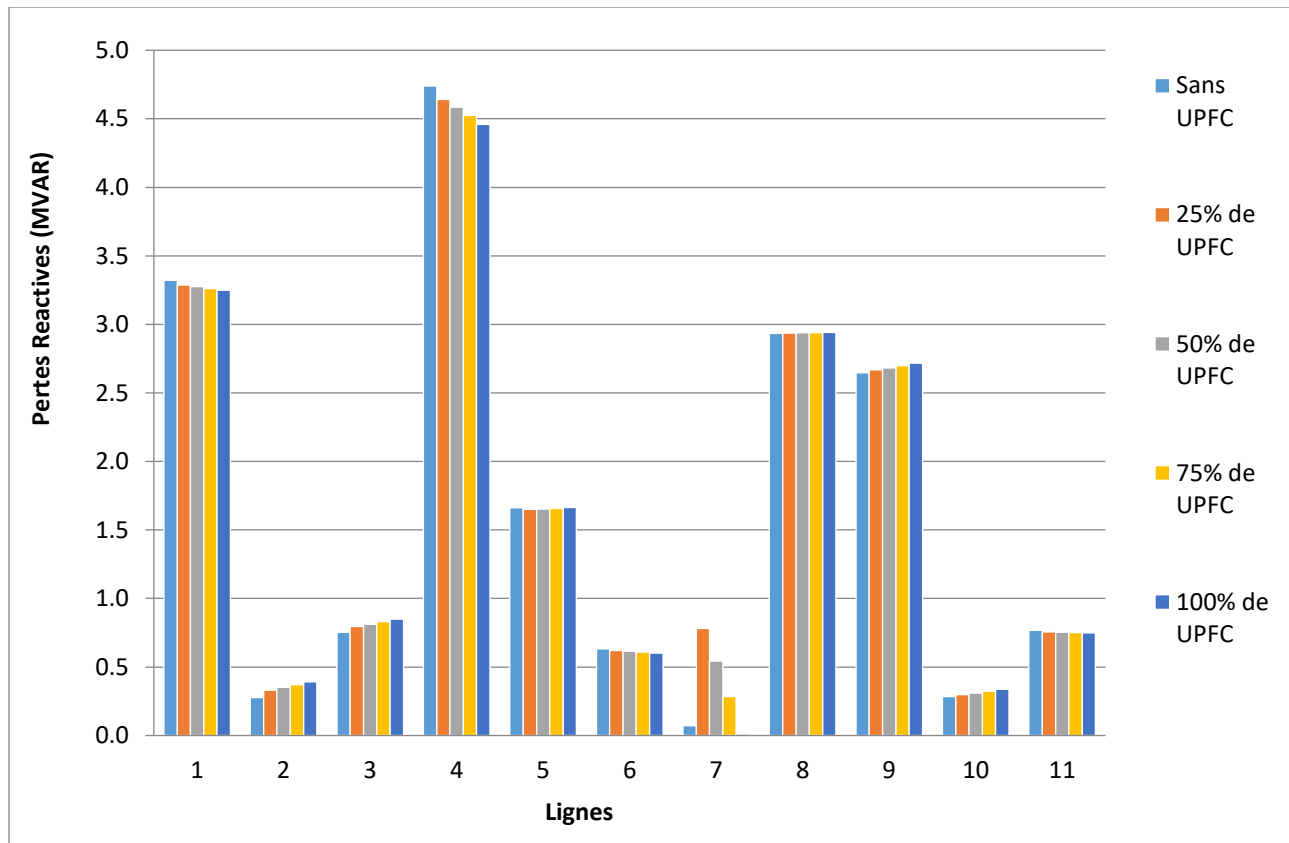


Figure III.16 : Les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC.



**Figure III.17 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC.**

On peut voir que :

- Les tensions au niveau du nœud bilan et du générateur restent les mêmes avec ou sans l'UPFC. Il y a une variation de la tension à tous les nœuds.
- La valeur de la phase au nœud bilan reste inchangée à zéro, tandis qu'elle augmente dans tous les autres nœuds, à l'exception du nœud 2 et du nœud 3 où elle diminue.
- On peut observer une réduction des pertes actives sur la ligne 7, passant de 0,0235 MW à 0 MW, indépendamment du pourcentage d'injection de l'UPFC. De plus, il y a également un changement des pertes actives sur les autres lignes.
- Il est remarquable que les injections de l'UPFC dans la ligne 7 entraînent une augmentation des pertes réactives. De plus, il est intéressant de noter que plus le pourcentage d'injection de l'UPFC n'est élevé, meilleures sont les performances en termes de réduction des pertes réactives. Cependant, pour les lignes 2 et 3, on observe une augmentation des pertes réactives sans amélioration significative. En ce qui concerne les autres lignes, on observe des changements dans leurs performances.

#### Cas 4 : L'utilisation de deux UPFC simultanément sur la ligne 1 et la ligne 7 (nœud générateur et nœud charge)

Après utilisation de deux UPFC simultanément sur la ligne 1 et la ligne 7, comme indiqué dans la figure III.18, nous avons obtenu les histogrammes suivants lors de la simulation :

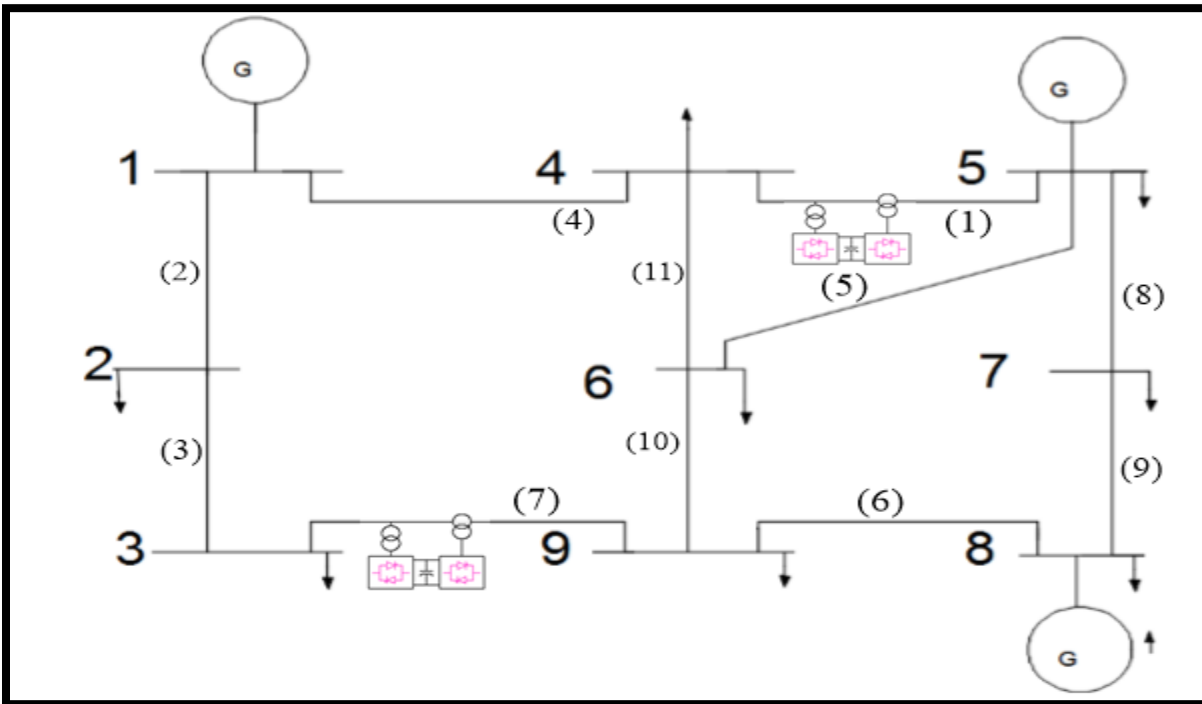


Figure III.18 : système 9 nœud avec l'UPFC sur la ligne 1 et 7 simultanément.

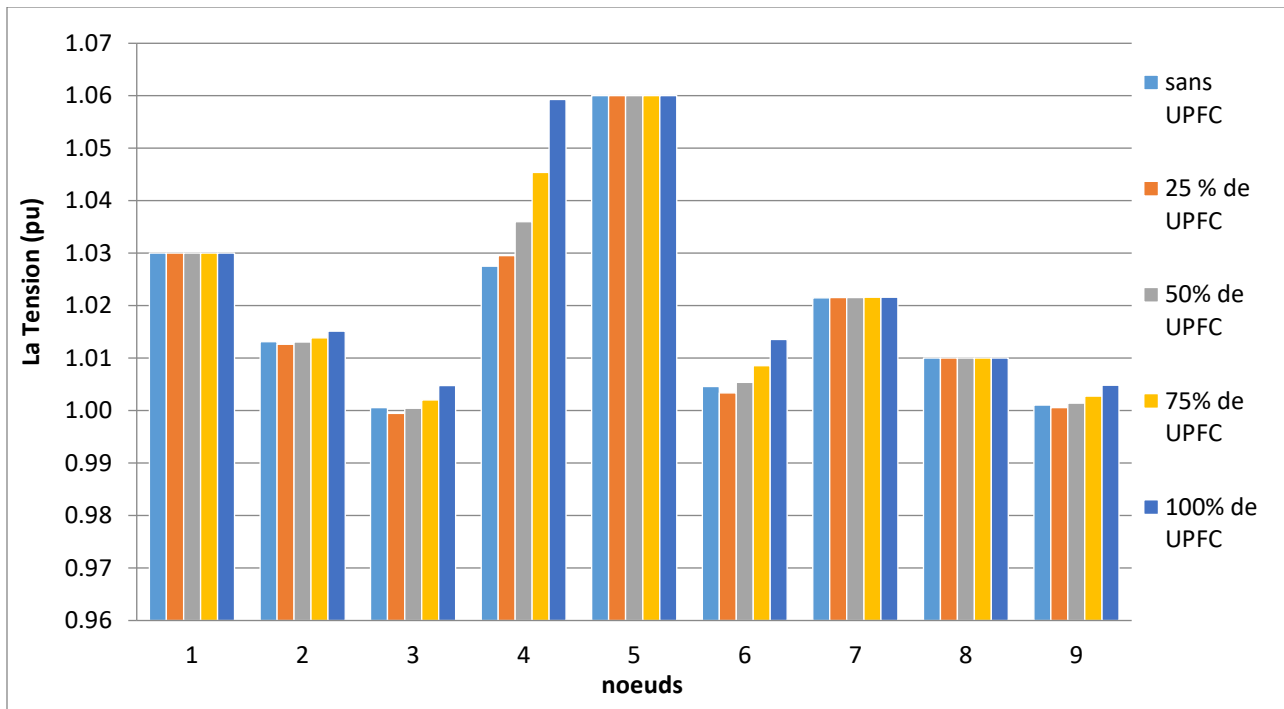


Figure III.19 : Les tensions des nœuds sans et avec l'UPFC.

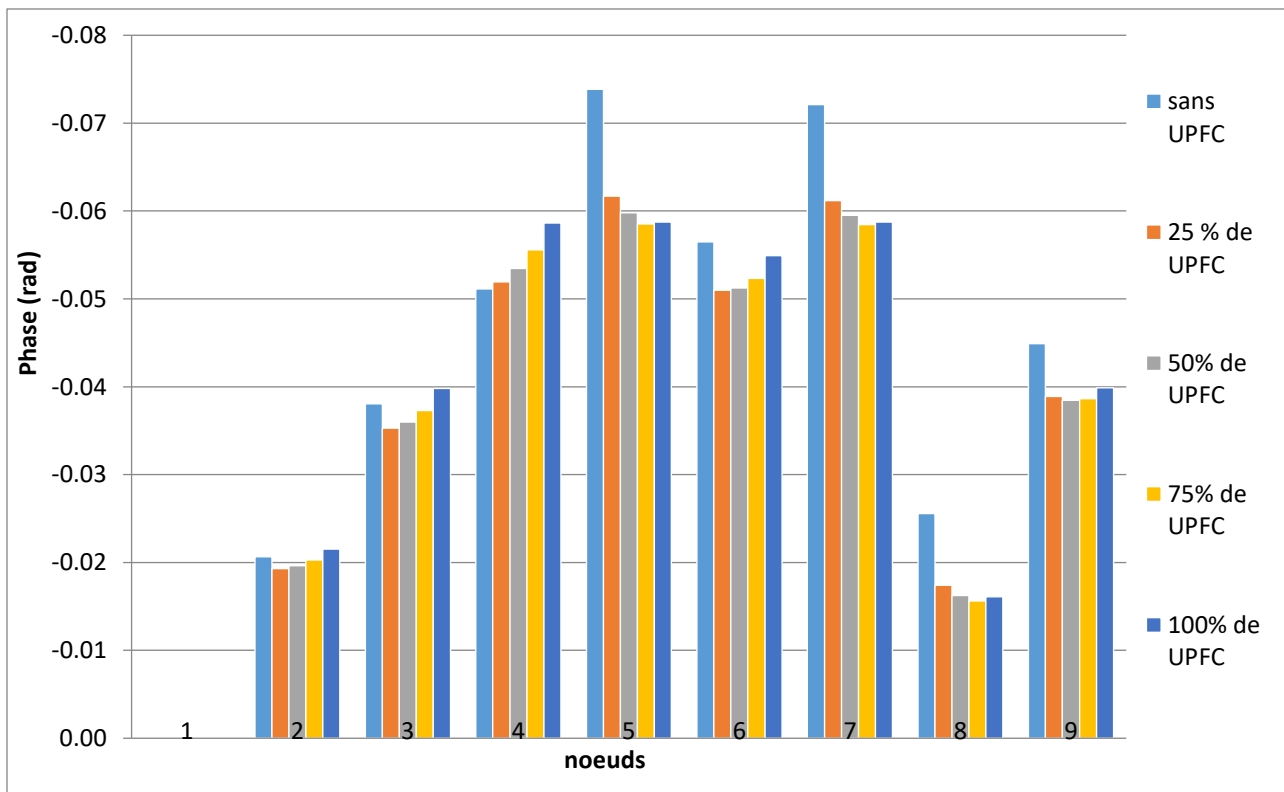


Figure III.20 : Les phases des nœuds sans et avec l'UPFC.

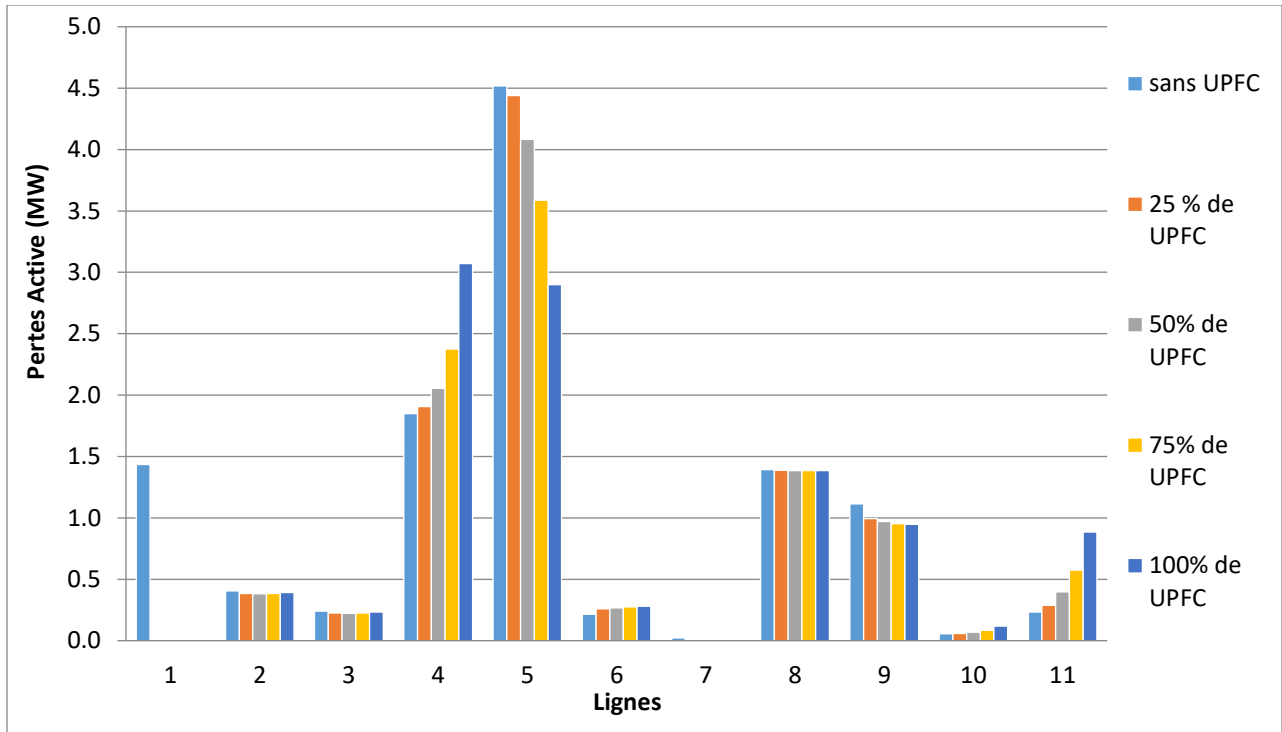


Figure III.21 : Les pertes actives des lignes sans et avec l'UPFC.

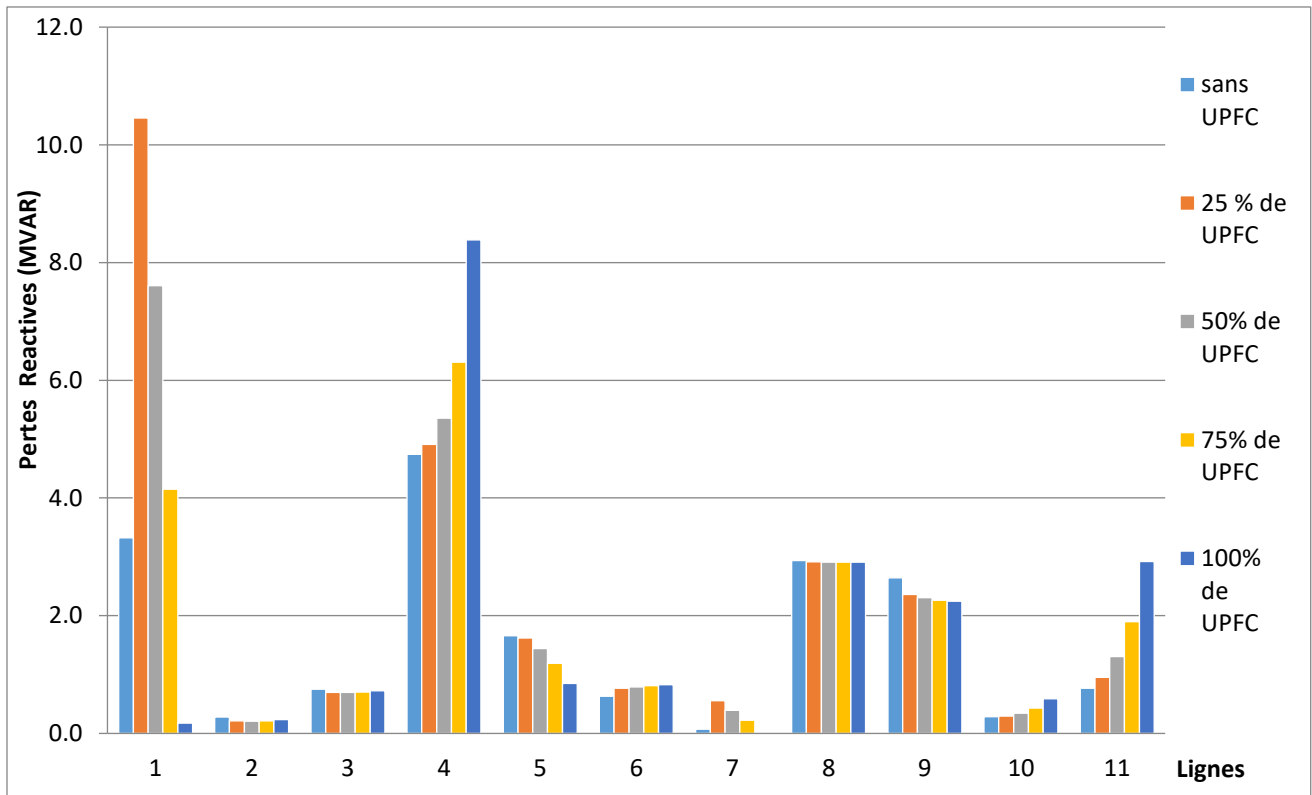


Figure III.22 : Les pertes réactives des lignes sans et avec l'UPFC.

On peut voir que :

- Les tensions au niveau du nœud bilan et du générateur restent les mêmes avec ou sans l'UPFC. Il y a une variation de la tension à tous les nœuds.
- La valeur de la phase au nœud bilan reste inchangée à zéro, tandis qu'elle augmente dans tous les autres nœuds, à l'exception du nœud 3 où elle diminue.
- On peut observer une réduction des pertes actives sur la ligne 1 et la ligne 7 sont égales à zéro avec UPFC, indépendamment du pourcentage d'injection de l'UPFC. De plus, il y a également un changement des pertes actives sur les autres lignes.
- Il est remarquable que les injections de l'UPFC dans la ligne 1 et 7 entraînent une augmentation des pertes réactives. De plus, il est intéressant de noter que plus le pourcentage d'injection de l'UPFC n'est élevé, meilleures sont les performances en termes de réduction des pertes réactives. En ce qui concerne les autres lignes, on observe des changements dans leurs performances.

### **Remarque en général :**

- Les tensions au niveau du nœud bilan et du générateur restent inchangées, que l'UPFC soit présent ou non. Cependant, on observe une variation de la tension à tous les autres nœuds. Ainsi, il y a un impact sur la tension dans les parties restantes du système.
- L'introduction de l'UPFC peut entraîner une évolution des pertes actives dans le réseau électrique. Dans la plupart des cas, ces pertes actives ont été réduites, ce qui est bénéfique. Cependant, il est important de noter que dans certains cas, ces pertes actives peuvent avoir des valeurs négatives, ce qui peut potentiellement affecter d'autres lignes du réseau.
- Après avoir analysé les résultats de la simulation, plusieurs observations importantes ont été faites. Dans certains cas, l'introduction de l'UPFC n'a pas conduit à une amélioration de la stabilité du réseau, mais a plutôt entraîné une augmentation des pertes réactives, ce qui a eu un impact négatif sur l'ensemble du réseau. De plus, il a été constaté que l'augmentation de l'injection de l'UPFC a entraîné une amélioration progressive, mais celle-ci n'a pas atteint le niveau souhaité.

### **III.5 Conclusion**

En conclusion, l'introduction de l'UPFC a des effets variés sur le système électrique. Bien qu'il puisse entraîner une variation des tensions à certains nœuds et réduire les pertes dans la plupart des cas, il est important de prendre en compte les cas où les pertes peuvent augmenter ou avoir des valeurs négatives, ce qui peut affecter d'autres parties du réseau.

De plus, il est crucial de noter que l'impact sur la stabilité du réseau peut être mitigé, et une augmentation de l'injection d'UPFC n'entraîne pas nécessairement une amélioration proportionnelle de la stabilité.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

En conclusion, l'introduction de l'UPFC a de multiples impacts sur le système électrique. Bien que dans la plupart des cas, cela puisse entraîner une modification de la tension à certains nœuds et réduire les pertes, il est important de prendre en compte les situations dans lesquelles les pertes peuvent augmenter ou avoir des valeurs négatives, ce qui peut affecter d'autres parties du réseau.

En outre, il convient de noter que l'impact sur la stabilité du réseau peut être mitigé et qu'une augmentation de l'injection UPFC n'entraîne pas nécessairement une augmentation correspondante de la stabilité.

Par conséquent, une analyse complète doit être effectuée pour chaque système électrique afin d'évaluer les avantages et les inconvénients potentiels de l'introduction de l'UPFC. Les décisions concernant l'utilisation de cette technologie doivent être fondées sur une compréhension approfondie de son impact sur les performances du réseau dans un environnement donné.

En fin de compte, l'amélioration de la stabilité et de l'efficacité du réseau reste un défi complexe qui nécessite une approche intégrée et équilibrée, prenant en compte divers facteurs tels que la topologie du réseau, les charges, la transmission et les objectifs spécifiques de l'opérateur de réseau.

On propose l'étude d'optimisation pour l'emplacement et la puissance de l'UPFC pour améliorer la stabilité des réseaux.

## Références bibliographiques

- [1] A. BARAR, A. LADJICI, "Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission". Projet de fin d'étude, Alger, Génie électrique, (2002, Juin).
- [2] Sota Mohamed Lamine, "Contribution à la modélisation et à la commande d'un UPFC dans le cadre de développement des réseaux Intelligent (SMART GRID) ", Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, ANNABA 2016/2017.
- [3] HERBADJI, O. "Contribution à l'optimisation des réseaux électriques en présence des Multi-FACTS par des méthodes métaheuristiques hybrides", SETIF, Département d'électrotechnique: DOCTORAT EN SCIENCES, (2019, 11 17).
- [4] HADJI Brahim, "Modélisation et Commande d'une ligne VSC-HVDC", Licence en Electrotechnique de l'ENSET -ORAN, (2010-2011).
- [5] BOT Youcef, "Influence des FACTS sur le calcul de l'écoulement des puissances en utilisant un IPFC", SUJET DE LA THESE, Soutenu le : 08/05/ 2011.
- [6] MEZAACHE Mohamed, "Analyse et Traitement de la Qualité d'Energie Electrique en Utilisant des Dispositifs de Contrôle des Réseaux Electriques à UPFC dans le Cas de la Stabilité de la Tension",Présenté Pour l'Obtention du Diplôme de Magister en Electrotechnique (24 / 11 / 2011).
- [7] FERAHTIA Saàd, "Calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques lors de l'intégration des fermes éoliennes et des dispositifs FACTS", DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE (2012 / 2013).
- [8] LOUNIS. A, MADI. A, "Développement d'une approche simple pour le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution", En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique (2015 / 2016).

[9] Yvon Besanger. "Etude des FACTS (Flexible AC Transmission System) et de leur comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion". Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996. Français.

[10] Fethi BOUSSADIA, "Optimisation de la sécurité des réseaux électriques de puissance par des systèmes de transmission flexible en courant alternatif FACTS", Doctorat en sciences en électrotechnique (2019).

[11] LOUAREM Sabah, "Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique connecté à un système éolien utilisant les systèmes FACTS", DOCTORAT EN SCIENCES, Soutenu le 29/06/2021.

[12] P. Petitclair, "Modélisation et commande de structures FACTS : Application au STATCOM", Thèse de doctorat de l'INPG, 16 Juillet 1997.

[13] J.C. Passelergue, "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.

[14] DELENDI LOUARDI, "CONTROLE DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE ACTIVE PAR SYSTEME FACTS" Magister en Electrotechnique Soutenu le, 25/06/ 2009.

[15] S. Boudab, "Application des réseaux de neurones dynamiques à l'optimisation de l'écoulement de puissance dans réseau électrique", Mémoire de Magister, Université Larbi BEN M'HIDI Oum El Bouaghi, 2011.

[16] A. Messaoudi, "Dispatching économique des réseaux électriques par les méthodes numériques".

[17] <http://www.scirp.org/journal/epe> <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2015.710048>.

- [18] L.Slimani , "optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode de colonie de fourmis", Université de Sétif mémoire de Magister, 2006.
- [19] K. Belacheheb, "Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport ", Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.
- [20] T. Allaoui "Réglage Robuste de l'UPFC Pour Optimiser l'Écoulement des Puissances Dans Un Réseau Electrique", Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Avril 2002.
- [21] Berrahal Khoukha, "Modélisation et simulation d'un système FACTS : UPFC", Pour obtenir le diplôme de Magistère en électrotechnique, Soutenu le: 29-01-2009.
- [22] John Wiley & Sons Ltd, l'Atrium, Porte sud, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, Angleterre, 2004.
- [23] M. Mezaache, K. Chikhi, et C. Fetha. "Contrôle des Transits de Puissance par l'Utilisation d'un UPFC Connecté à une Ligne de Transmission" Soutenu le: 05-06, 2013.
- [24] BENNOUNA. CH, HADJOU DJ. M. ISLAM, "Application de la logique floue pour la commande d'un contrôleur universel de l'écoulement de puissance (UPFC) ", MASTER ACADEMIQUE 2020/2021.
- [25] HAMADI.A. BENBOUYA. N, "Contrôle des flux de puissance dans un réseau électrique à l'aide d'un UPFC", Master en Électrotechnique, Juin 2014.
- [26] Es .GH. Shahraki, " Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques " thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy-I. 2003.

[27] Mme Rahmouni Naima, "Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique à l'aide d'un UPFC à base d'un onduleur à trois niveaux", Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister 2009.

[28] Ch.sudhakara Babu, "control of a unified power flow controller (UPFC)" Master of technology in electrical engineering; University of Calicut, 2002.

[29] Igor Papić, "UPFC Model for Stability Calculations with Decoupled Watt-Var Control System", 10th Meditemean Electrotechnical Conference, MEleCon 2000.

[30] HAMRANI. M, SAMET. L, "Contrôle des Flux de Puissance dans Un Réseau Électrique à l'aide d'Un UPFC" Mémoire présenté Pour l'obtention de diplôme Master 2019/2020

## ملخص

من المثير للاهتمام أن يتحكم مدير الشبكة في تدفقات الطاقة من أجل تشغيل الشبكة بشكل أكثر كفاءة. تعد تقنية أنظمة نقل التيار المتردد المرنة (FACTS) إحدى الطرق لتحقيق هذه الوظيفة. من خلال قدرتها على تغيير المعاوقة الظاهرة للخطوط ، يمكن استخدام أجهزة FACTS للطاقة النشطة بالإضافة إلى القدرة التفاعلية أو التحكم في الجهد. توجد عدة أنواع من الوقائع ويعتمد اختيار الجهاز المناسب على الأهداف المراد تحقيقها. تعد UPFC (وحدة التحكم في تدفق الطاقة الموحدة) من بين أنظمة FACTS الهجينة القائمة على كل من تعويض السلسلة والتعويض الموازي. يقدم هذا العمل نموذجًا رياضيًا لـ UPFC ، يسمى نموذج حقن الطاقة (PIM). تم دمج هذا النموذج في خوارزمية حساب تدفق الطاقة لدراسة التحكم في تدفق الطاقة في خطوط توزيع الطاقة التي يتم وضعها.

## *Résumé*

Il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de contrôler les transits de puissance afin d'exploiter le réseau de manière plus efficace. La technologie systèmes flexibles de transmission à courant alternatif (FACTS) est un moyen permettant de remplir cette fonction. Avec leur aptitude à modifier l'impédance apparente des lignes, les dispositifs FACTS peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active que pour celui de la puissance réactive ou de la tension. Plusieurs types de FACTS existent et le choix du dispositif approprié dépend des objectifs à atteindre. L'UPFC (Régulateur de débit d'alimentation unifié) est parmi les systèmes FACTS hybrides basé à la fois sur la compensation série et sur la compensation parallèle. Ce travail présente un modèle mathématique du l'UPFC, appelé en tant que modèle d'injection de puissance (MIP). Ce modèle est incorporé dans l'algorithme du calcul d'écoulement de puissance pour étudier le contrôle de flux de puissance dans les lignes électriques de distribution dans lequel est placé.

## *Summary*

It is of interest to the network manager to control power transits in order to operate the network more efficiently. Flexible AC Transmission Systems (FACTS) technology is a means of fulfilling this function. With their ability to modify apparent line impedance, FACTS devices can be used for both active power control and reactive power or voltage control. Several types of FACTS exist and the choice of the appropriate mechanism depends on the objectives to be achieved. The UPFC (Unified Power Flow Regulator) is among the hybrid FACTS systems based on both serial and parallel compensation. This work presents a mathematical model of the UPFC, called as a power injection model (MIP). This model is incorporated into the power flow calculation algorithm to study the control of power flow in the power lines in which it is placed.