

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Tasdawit n' Bgayet
Université de Béjaïa
جامعة بجاية

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Electrique

Spécialité : Electrotechnique

Option : Réseau Electrique

Thème :

*Intégration des D-FACTS aux réseaux
électriques de distribution*

Présenté par :

Mr.OUBELAID Hillal

Encadré par :

Mr.BOUTEBEL.M

Membres de jury :

Président : Mr.ZIANE KHOUDJA

Examinatrice : Mme. MEDJAHED

Promotion Juin 2014





REMERCIEMENT

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné la force, le courage et la patience afin de réaliser ce travail.

Mes plus vifs remerciements vont à :

Mr. BOUTEBEL.M, mon promoteur d'avoir bien voulu diriger ce travail, pour sa disponibilité, sa franchise, son aspect sérieux dans le travail, ces conseils et orientations.

Aux enseignants qui m'ont suivi tout au long de mon cursus universitaire.

A tous les membres du jury

Mr. ZIANE KHOUDJA

Mme. MEDJAHED

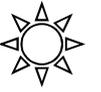
Pour avoir accepté de juger mon travail.

A **Mr. IMAOUCHENE Yacine**, enseignant poste graduation du département d'Electrotechnique à l'université de Bejaia pour son aide.

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

H.OUBELAID





DEDECACES

Je dédie ce modeste travail :

À la mémoire de mon père,

À ma mère,

À mes frères et sœurs,

À toutes ma famille,

À tous mes amis(es).

H.OUBELAID



Liste des abréviations

| | |
|-----------|--|
| AIS | Artificial Immune System |
| BT | Basse Tension |
| AC | Alternatif current |
| DC | Direct Current |
| D-FACTS | Distribution Flexible Alternatif Current Transmission System |
| D-STATCOM | Distribution Static Compensator |
| DVR | Dynamic Voltage Restorer |
| FACTS | Flexible Alternative current Transmission System |
| GTO | Gate Turn Off |
| IDVR | Interline Dynamic Voltage Restorer |
| EPRI | Electric Power Research Institute |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| JDB | Jeux De Barre |
| MAPI | Minimum Apparent Power Injection |
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsions |
| MT | Moyenne Tension |
| PCC | Point D'accouplement Commun |
| PI | Régulateur Proportionnel Intégral |
| PWM | Pulse With Modulation |
| RMS | Root Mean Square |
| STATCOM | Static Synchronous Compensator. |
| UPQC | Unified power quality compensator |
| VSC | Voltage Source Converter. |
| ZAPI | Zéro Active Power Injection |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Fig. I.1 : Structure d'un système électrique..... | 4 |
| Fig. I.2 : Structure d'un creux de tension. | 6 |
| Fig. I.3 : Exemple de cas de surtension transitoire | 7 |
| Fig. I.4: Exemple de déséquilibre de tension | 8 |
| Fig. I.5 : Représentations pour une durée de quelques secondes des types de fluctuation de tension... | 9 |
| Fig. I.6 : Représentation d'une ligne de transmission non compensée. | 9 |
| Fig. I.7: diagramme de phase de la ligne. | 11 |
| Fig. I.8: Diagramme de phase d'une ligne purement inductive. | 11 |
| Fig. I.9: Schéma de la compensation globale..... | 13 |
| Fig. I.10: Schéma de la compensation partielle | 14 |
| Fig. I.11: Schéma de la compensation individuelle | 15 |
| Fig. I.12: Schéma de raccordement série | 16 |
| Fig. I.13: Schéma de raccordement shunt | 16 |
| Fig. I.14: Schéma de raccordement série-shunt. | 17 |
| Fig. II.1 : Schéma de base d'un DVR | 21 |
| Fig. II.2 : Principales composants d'un DVR | 22 |
| Fig. II.3: Schéma de base d'un IDVR..... | 25 |
| Fig. II.4: Schéma de base d'un D-STATCOM | 27 |
| Fig. II.5 : Emplacement de D-STATCOM dans un réseau électrique de distribution..... | 28 |
| Fig. II.6 : Configuration d'UPQC | 30 |
| Fig.III.1: Schéma équivalent d'un DVR | 34 |
| Fig.III.2: Diagramme Vectorielle de DVR2 dans l'échange de puissance. | 39 |
| Fig.III.3: Diagramme vectorielle du mode de pré-chute de tension d'alimentation. | 41 |
| Fig.III.4 : Diagramme vectorielle de la stratégie de contrôle | 44 |
| Fig.III.5 : Emplacement d'un D-STATCOM dans un réseau de distribution électrique..... | 45 |
| Fig.III.6: Schéma unifilaire de deux JDB d'un système de distribution. | 49 |
| Fig.III.7: Modèle typique de l'UPQC | 50 |
| Fig.III.8: Diagramme de phase des tensions et courants du schéma unifilaire représenté dans la figure.III.6 | 50 |
| Fig.III.9 : Diagramme de phase des tensions et courants du l'UPQC représenté par figure.III.7..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Fig. III.10 : Diagramme des tensions et courants du système représenté sur la figure.III.7 lorsque I est en avance | 51 |
| Fig. III.11 : Schéma unifilaire de deux JDB d'un système de distribution en tenant compte de l'UPQC..... | 52 |
| Fig.III.12 : Diagramme de phase des tensions et courants du système représenté sur la figure.III.11. lorsque I série a un angle de retard..... | 53 |
| Fig.III.13. Diagramme de phase des tensions et courants du système représenté sur la figure.III.11. lorsque I est en avance d'angle | 53 |
| Fig. IV.1: Emplacement de D-FACTS dans le réseau électrique de distribution..... | 57 |
| Fig. IV.2: Puissance apparente injectée en fonction de la chute de tension pour les deux modes ZAPI et MAPI de DVR..... | 58 |
| Fig. IV.3: Puissance apparente injectée en fonction de la chute de tension pour les deux modes ZAPI et MAPI de D-STATCOM..... | 59 |
| Fig. IV.4 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur ZAPI-DVR..... | 61 |
| Fig. IV.5 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur MAPI-DVR..... | 61 |
| Fig. IV.6 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur ZAPI-D-STATCOM..... | 62 |
| Fig. IV.7 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur MAPI- D-STATCOM..... | 63 |
| Fig. IV.8 : Influence de la charge (SL) sur ZAPI-DVR..... | 64 |
| Fig. IV.9 : Influence de la charge (SL) sur MAPI-DVR..... | 64 |
| Fig. IV.10 : Influence de la charge (SL) sur ZAPI- D-STATCOM..... | 65 |
| Fig. IV.11: Influence de la charge (SL) sur MAPI- D-STATCOM..... | 66 |
| Fig. IV.12 : Influence du facteur de puissance (FP) sur ZAPI-DVR..... | 67 |
| Fig. IV.13 : Influence du facteur de puissance (FP) sur MAPI-DVR..... | 67 |
| Fig. IV.14 : Influence du facteur de puissance (FP) sur ZAPI- D-STATCOM..... | 68 |
| Fig. IV.15 : Influence du facteur de puissance (FP) sur MAPI- D-STATCOM..... | 69 |
| Fig. IV.16 : Influence de la longueur de la ligne sur ZAPI- DVR..... | 70 |
| Fig. IV.17 : Influence de la longueur de la ligne sur MAPI- DVR..... | 70 |
| Fig. IV.18 : Influence de la longueur de la ligne sur ZAPI-D-STATCOM..... | 71 |
| Fig. IV.19 : Influence de la longueur de la ligne sur MAPI-D-STATCOM..... | 72 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau. I.1.Conséquences des creux de tension | 6 |
| Tableau. I.2: Types de connexions et leurs applications..... | 17 |
| Tableau II.1: Quelques installations des DVR dans le monde..... | 24 |
| Tableau II.2: Quelques installations des D-STATCOM dans le monde..... | 29 |
| Tableau II.3: Application des D-FACTS pour la correction des problèmes de tension..... | 31 |
| Tableau IV.1:Différents facteurs d'influence sur le comportement de DVR et D-STATCOM | 73 |

Sommaire

| | |
|------------------------------------|---|
| Introduction générale | 1 |
|------------------------------------|---|

Chapitre I : Etat de l'art .Problèmes de tension, compensation d'énergie électrique

| | |
|--|----|
| I.1.Introduction | 3 |
| I.2.Le réseau électrique..... | 3 |
| I.3. Problèmes de tension survenant sur le réseau électrique de distribution | 5 |
| I.3.1.Creux de tension..... | 5 |
| I.3.2.Bosses de tension | 7 |
| I.3.3.Baisses de tension | 7 |
| I.3.4.Tension transitoire..... | 7 |
| I.3.5.Déséquilibre de tension | 7 |
| I.3.6.Les fluctuations de tension Flicker papillotement..... | 8 |
| I.4. Notion de la chute de tension | 9 |
| I.5. Notion de la puissance transmise dans une ligne électrique | 11 |
| I.6.Compensation d'énergie réactive et son objectif | 12 |
| I.6.1. Compensation conventionnelle | 13 |
| I.6.2.Compensation statique | 15 |
| I.6.3.Compensation avancée..... | 17 |
| I.7.Type de compensation et ses applications (comparaison)..... | 17 |
| I.8.Conclusion..... | 18 |

Chapitre II: Les compensateurs D-FACTS

| | |
|---|----|
| II.1.Introduction..... | 19 |
| II.2. La technologie FACTS | 19 |
| II.3.Avantages de la technologie FACTS | 20 |
| II.4.La compensation série avancée..... | 21 |
| II.4.1.Restaurateur Dynamique de Tension (DVR : Dynamic Voltage Restorer) | 21 |
| II.4.2. Le restaurateur dynamique de la tension entre ligne (IDVR : InterlineDynamic Voltage restorer) | 25 |
| II.5.La compensation shunt avancée..... | 27 |
| II.5.1. Compensateur synchrone statique de distribution (D-STATCOM : Distribution static compensator) 27 | |
| II.6.La compensation hybride avancée | 30 |
| II.6.1.Le compensateur unifié de la qualité de puissance (UPQC : Unified Power Quality Compensator) ... | 30 |
| II.7.Application des D-FACTS pour la correction des problèmes de tension | 32 |
| II.8.Conclusion | 32 |

Chapitre III: Fonctionnement et modélisation des D-FACTS

| | |
|--|----|
| III .1.Introduction | 33 |
| III.2.Fonctionnement et modélisation de DVR..... | 33 |
| III.2.1.Fonctionnement de DVR | 33 |
| III.2.2.Modélisation de DVR | 33 |
| III.2.3.Stratégie de commande et contrôle de DVR..... | 37 |
| III.3.Fonctionnement et modélisation d'IDVR..... | 38 |
| III.3.1.Fonctionnement d'IDVR | 38 |
| III .3.2.Modélisation d'IDVR | 39 |
| III .3.3.Stratégies de contrôle d'IDVR | 43 |
| III.4. Fonctionnement et modélisation de D-STATCOM..... | 44 |
| III.4.1.Fonctionnement de D-STATCOM | 44 |
| III.4.2.Modélisation de D-STATCOM | 44 |
| III.4.3.Stratégie de contrôle de D-STATCOM | 47 |
| III.5. Modélisation de l'UPQC | 48 |
| III.5.1.Modélisation d'UPQC en régime permanent | 48 |
| III.5.2.Modélisation d'UPQC dans son estimation maximum d'injection de puissance réactive..... | 55 |
| III.6.Conclusion..... | 56 |

Chapitre IV: Etude d'un cas pratique. Simulation de DVR et D-STATCOM

| | |
|---|-----------|
| IV.1.Introduction | 57 |
| IV.2. Topologie du réseau étudié avec DVR et D-STATCOM..... | 57 |
| IV.3. Données du réseau étudié avec DVR et D-STATCOM | 57 |
| IV.4. Résultats de simulation de DVR et D-STATCOM et interprétations. | 58 |
| IV.5.Etude de l'influence des différents paramètres du réseau sur le DVR et le D-STATCOM | 60 |
| IV.5.1.Influence de niveau de court-circuit sur le DVR et le D-STATCOM..... | 60 |
| IV.5.2.Influence de la charge (SL) sur le DVR et le D-STATCOM | 63 |
| IV.5.3.Influence de facteur de puissance (FP) sur le DVR et le D-STATCOM | 66 |
| IV.5.4.Influence de la longueur de la ligne sur le DVR et le D-STATCOM | 69 |
| IV.6. Tableau récapitulatif des différents paramètres d'influence sur les deux modes de fonctionnement de DVR et D-STATCOM | 73 |
| IV.7.Conclusion..... | 73 |
| Conclusion générale et perspectives | 75 |

Introduction générale

La consommation de l'énergie électrique est en augmentation régulière, causée par l'industrialisation et la croissance de la population, cette situation engendre la saturation des réseaux électriques et des problèmes de l'incapacité de satisfaire la demande de consommation et des problèmes liés à l'exploitation du réseau près de ces limites de sécurité. (Contrôle de flux de puissance, maintien du profil de tension acceptable, surveillance des reports de charge, défaillances des structures des réseaux, des Blackouts , etc.). La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, essentiellement pour les raisons suivantes :

- Des impératifs économiques : les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc.
- La généralisation des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées), on constate le développement et la généralisation des équipements d'électronique de puissance. Ces équipements ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de tension, et générateurs de perturbations.
- L'ouverture du marché de l'électricité : la libéralisation du marché de l'électricité fait que la qualité de l'énergie électrique est devenue un des critères de choix d'un fournisseur d'énergie plutôt qu'un autre de la part des consommateurs.

Les distributeurs et les utilisateurs de l'énergie électrique ont été toujours confrontés à un certain nombre de difficultés inhérentes à la continuité de service, au rendement de transmission de l'énergie, aux variations de l'amplitude de la tension et au maintien de son profile ; ainsi qu'à des autres phénomènes tels que les fluctuations rapides de tension et les déséquilibres de tension.

Devant ces problèmes, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique.

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc s'intéresser dans notre étude à la compensation et au maintien du profil de la tension (correction des chutes de tension) à l'aide des D-FACTS (FACTS destinés pour les réseaux électriques de distribution) dans le but d'amélioration de la qualité d'énergie électrique.

Le présent mémoire se compose en quatre chapitres :

Dans la premier partie du chapitre I, nous allons présenter le réseau électrique (système) en particulier le réseau électrique de distribution ainsi les problèmes de tension qui affectent ce dernier. Dans la deuxième partie, la notion de la puissance transmise et de la chute de tension dans une ligne électrique seront exposées. La troisième partie de ce chapitre est consacrée aux méthodes et moyens de compensation d'énergie réactive et la régulation de la tension à savoir la compensation conventionnelle a base des batteries de condensateurs ,statique (réseau de transport) et avancée(réseau de distribution) par les FACTS, on termine par une conclusion.

Le second chapitre est consacré pour une étude théorique de quatre compensateurs D-FACTS à savoir les compensateurs séries (DVR et IDVR), le compensateur shunt (D-STATCOM) et la combinaison shunt-série (UPQC). Nous allons donner une idée générale sur la technologie FACTS et en particulier le concept D-FACTS, puis les avantages de cette technologie serons exposés.

Une étude théorique est réservée pour le concept FACTS et D-FACTS et l'étude de quatre compensateurs D-FACTS à savoir les compensateurs série (DVR et IDVR), le compensateur shunt (D-STATCOM) et la combinaison shunt –série (UPQC). La modélisation des D-FACTS précédent et les différentes stratégies de contrôle élaborées par quelque auteurs seront discutés dans le chapitre trois.

Le quatrième chapitre (dernier) nous présenterons les résultats de simulation obtenus à partir d'un programme en langage MATLAB des modes de fonctionnement de DVR et D-STATCOM dans la correction de la chute de tension à savoir le mode ZAPI et le mode MAPI ainsi l'influence de quatre paramètres (niveau de court-circuit, la charge, le facteur de puissance et la longueur de la ligne) sur les deux modes de fonctionnement des deux dispositifs précédents.

I.1.Introduction :

L'accroissement énorme de la demande de l'énergie électrique et les contraintes économiques de construire de nouveaux ouvrages conduisent à l'exploitation des réseaux électriques près de leurs limites de stabilités et de sécurités. Les perturbations inévitables de tension telles que les chutes de tension, les surtensions, les creux de tension, peuvent affecter le réseau électrique à tout instant et l'amener en dehors de sa zone de stabilité ou hors service, en revanche devant des consommateurs exigeant une qualité d'énergie meilleure sans perturbations, les préoccupations des planificateurs et des exploitants du réseau électrique veille pour satisfaire ces exigences par diverses méthodes. L'un de ces Méthodes, la compensation d'énergie réactive et le contrôle de la tension.

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter le réseau électrique (système) et en particulier le réseau électrique de distribution ainsi les problèmes de tension qui affectent ce dernier. Dans la deuxième partie, les notions de la puissance transmise et la chute de tension dans une ligne électrique sont élucidées. La troisième partie du chapitre est consacrée aux méthodes et moyens de compensation d'énergie réactive et la régulation de la tension à savoir la compensation conventionnelle, statique et avancée.

I.2.Le réseau électrique

Un réseau électrique c'est un ensemble d'installations électriquement interconnectées permettant de conduire l'énergie électrique des centrales vers les consommateurs, cet ensemble comprend des transformateurs, des générateurs, des lignes de transmission, des moyens de mesures et de contrôles, des protections contre la foudre et les courts circuits par exemple.

Généralement il est composé de trois parties : réseau de transport et d'interconnexion, réseau de répartition et réseau de distribution. Les réseaux électriques plus les centrales de production (centrales thermique, nucléaire, hydraulique, solaires et éoliennes) forment un système électrique.

I.2.1.Réseau de transport et d'interconnexion

a. Réseau de transport : Les réseaux de transport permettent d'assurer l'alimentation sur l'ensemble du territoire, ils transportent l'énergie électrique sur des très longues distances (100Km à quelques centaines de km) et à haute tension (400kV, 225kV). Ce réseau est d'une structure maillée imposée par les grandes puissances transitées.

b. Réseau d'interconnexion : Les Réseaux d'interconnexions constituent des liaisons entre les réseaux de transport puissants, ils utilisent la même gamme de tension que les réseaux de transport. Ils assurent les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges d'énergie électrique au niveau international et généralement d'une structure maillée.

I.2.2. Réseau de répartition

Le réseau de répartition assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie épuisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations et aux clients industriels directement connectés à celui-ci. Les tensions dans ce réseau sont généralement comprises entre 63kV et 90kV.

I.2.3. Réseau distribution

Le réseau de distribution a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau, ces tensions sont comprises entre 400V-20kV, L'exploitation est gérée par un gestionnaire de réseau de distribution (GRD).

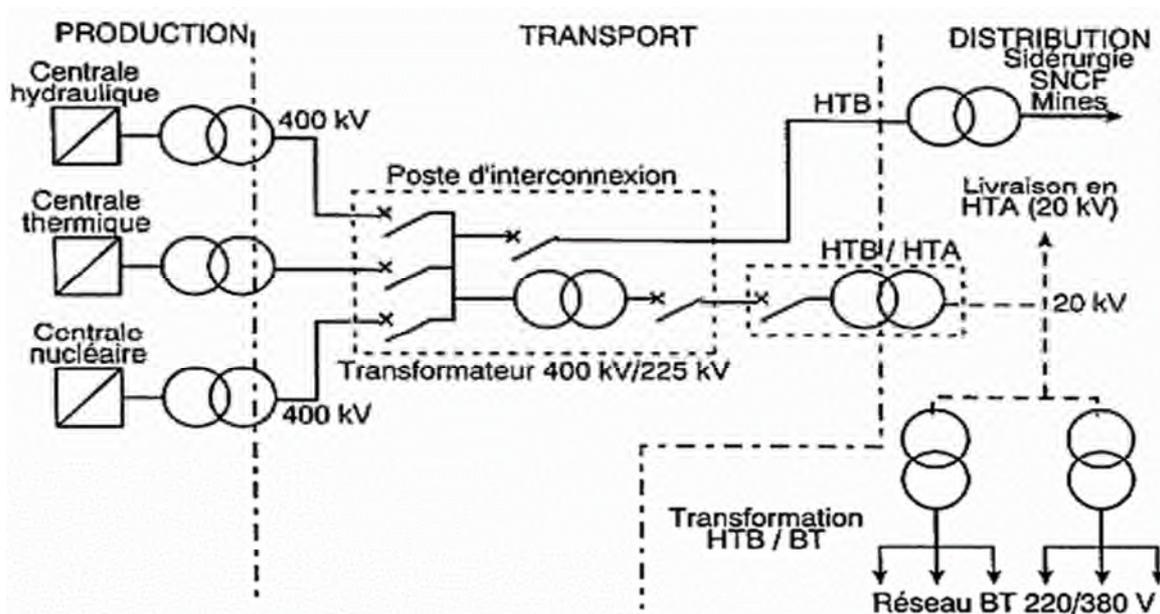


Fig. I.1 : Structure d'un système électrique

I.3. Problèmes de tension survenant sur le réseau électrique de distribution

La tension est l'un des facteurs qui détermine la qualité d'énergie électrique, exigée par les consommateurs, cependant les préoccupations des planificateurs et des exploitants du réseau électrique est de s'assurer que les tensions aux différents jeux de barres demeurent dans les limites prescrites ainsi son maintien à une valeur prédéfinie par le consommateur et d'autre part sans perturbations. Parmi les perturbations qui s'opposent aux exigences de ces consommateurs on trouve :

I.3.1. Creux de tension

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence, suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période et une minute. Il s'agit d'événements aléatoires imprévisibles Figure (I.1). Les creux de tensions sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées et leur amplitude est liée à la nature du défaut et à la puissance de court-circuit du réseau [1].

Les coupures sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90%. Elles sont caractérisées par un seul paramètre ΔT (la durée de coupure) selon lequel on distingue plusieurs types de coupures, soit :

- a. Coupures instantanées : $(T/2 < \Delta T < 30T)$
- b. Coupures momentanées : $(30T < \Delta T < 3 s)$
- c. Coupures temporaires : $(3s < \Delta T < 1 min)$
- d. Coupure maintenue et sous-tension $(\Delta T > 1min)$

Les creux et les coupures de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de nombreuses installations industrielles [1][2][3], en effet, ce type de perturbation est la cause la plus fréquente des problèmes de qualité d'énergie qui peut se traduire par des conséquences néfastes, allant de la dégradation de fonctionnement des équipements électriques jusqu'à leur destruction totale voir tableau (I.1).

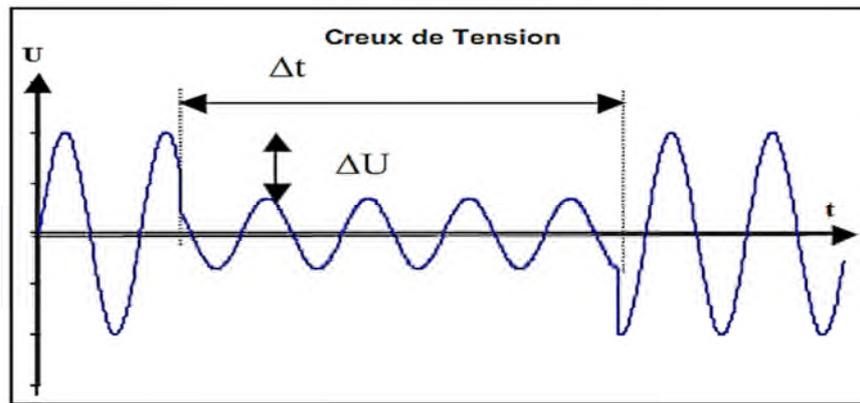


Fig. I.2 : Exemple d'un creux de tension

Le tableau suivant résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension

| Types d'équipement | Conséquences néfastes |
|---|--|
| Systèmes d'éclairage | Moins de luminosité, extinction et réallumage |
| Systèmes à base d'électronique de puissance | Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements. |
| Dispositifs de protection | Déclenchement et ouverture des contacteurs |
| Moteurs asynchrones | Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension |
| Moteurs synchrones | Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur. |
| Variateurs de vitesse pour un moteur à continu | En mode onduleur : destruction des protections continu. En mode redresseur : ralentissement de la machine. |
| Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone | Ralentissement, décrochage, surintensité Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur. |

Tableau. I.1 : Conséquences des creux de tension

I.3.2. Bosses de tension

La bosse de tension est une augmentation de la tension au-dessus de la tension nominale pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants [4].

I.3.3. Baisse de tension

Les baisses de tension (sags en anglais) sont des réductions de la tension d'une durée plus longue et sont dans la plupart du temps dues à une diminution volontaire de la tension par le fournisseur afin de réduire la puissance aux moments où la demande est maximale. Lorsque la puissance est anormalement faible par rapport à celle requise par la charge on parle également de la baisse de tension [5].

I.3.4. Tension transitoire

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure(I.3) sont des phénomènes brefs dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde. Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux tensions transitoires [6].

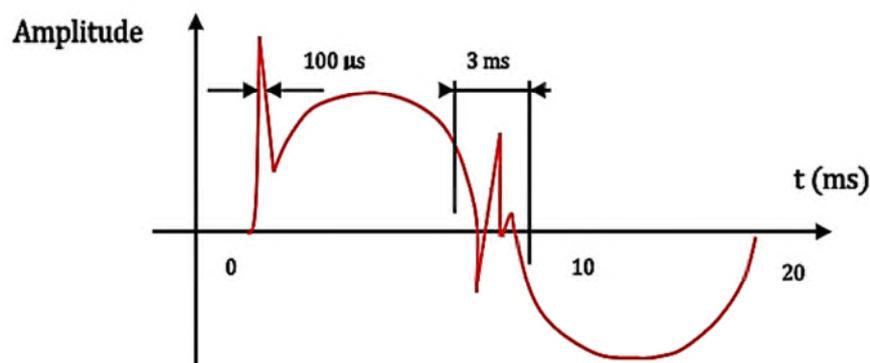


Fig. I.3 : Exemple d'une surtension transitoire

I.3.5. Déséquilibre de tension

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré Figure(I.4).

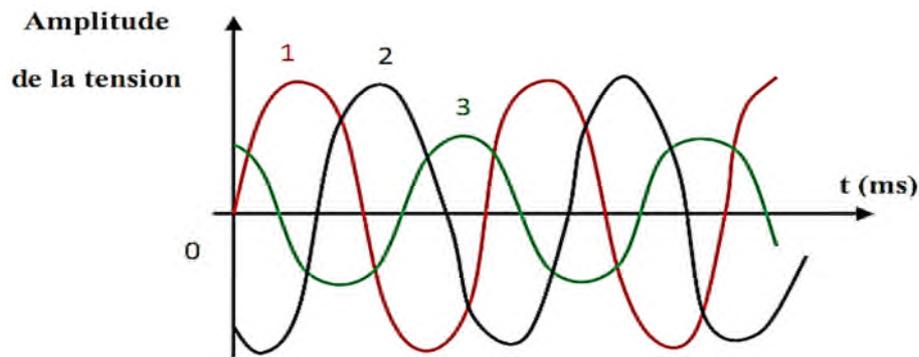


Fig.I.4 : Exemple de déséquilibre de tension

I.3.6. Les fluctuations de tension Flicker papillotement

Les fluctuations de tension [7] sont des variations cycliques de la valeur efficace de la tension, ces fluctuations se situent dans les limites de variation de la tension normale, c'est-à-dire, dans la tolérance de ($\pm 10\%$) autour de la tension nominale. Selon la norme CEI (61000-3-3) plusieurs types de fluctuations de tension classées par type : figure (I.2)

- **type a** : à-coups de tension rectangulaires et périodiques d'amplitude constante.
- **type b** : série d'à-coups de tension irréguliers, leurs amplitudes peuvent être identiques ou non, aussi bien en descendant qu'en montant.
- **type c** : variations de tension clairement séparées qui ne sont pas toutes des à-coups (par exemple : commutation de charges non résistives, démarrage des moteurs).
- **type d** : série de fluctuations aléatoires ou continues de tension (par exemple : charges variant cycliquement ou aléatoirement, fours à arc typiquement).

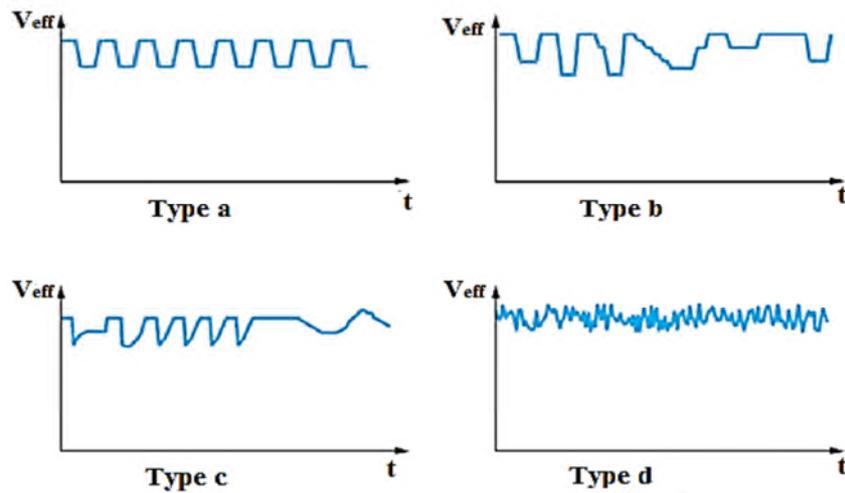


Fig. I.5 : Représentations pour une durée de quelques secondes des types de fluctuation de tension

I.4. Notion de la chute de tension

Une chute de tension est une diminution de la valeur effective de la tension à la fréquence du réseau pour une durée allant d'une demi-période jusqu'à 1 min. Une chute de tension de 10% signifie que la tension de la ligne a diminué de 10% de sa valeur nominale. Les valeurs typiques varient entre 0,1 et 0,9 pu.

On se basant sur le modèle de la Figure (I.6), considérant que la résistance de la ligne n'est pas négligeable et que la tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance : $\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2$.

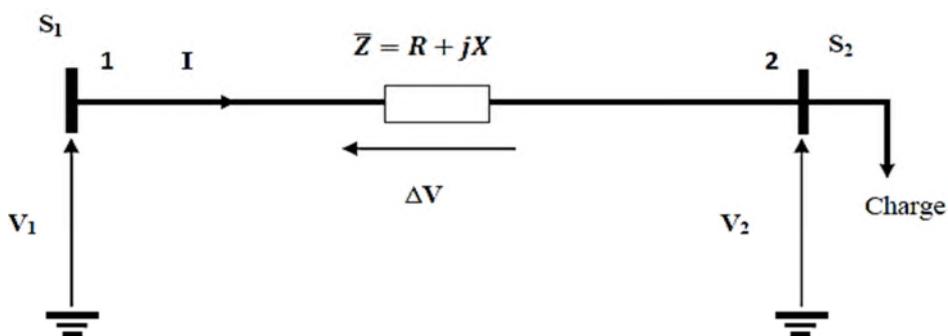


Fig. I.6 : Représentation d'une ligne de transmission non compensée.

Le diagramme de phase de la Figure (I.7) donne l'expression de la chute de tension sans négliger l'effet résistif de la ligne, comme suit : $\Delta \bar{V} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2 = (R + jX) \cdot \bar{I}$

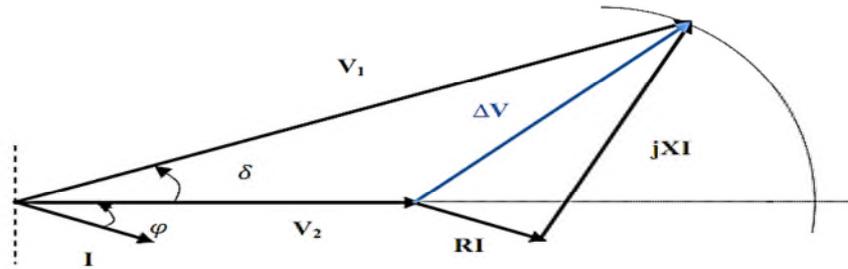


Fig. I.7 : diagramme de phase de la ligne

L'angle de transport δ étant petit (réseau peu chargé), si φ désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité réceptrice 2, on peut écrire, pour un réseau monophasé :

$$\Delta V \approx RI \cos \varphi + XI \sin \varphi$$

$$\text{Ou bien : } \Delta V \approx RI \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + XI \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi$$

$$\text{D'où : } \Delta V \approx \frac{RP_2 + XQ_2}{V_2}$$

$$\text{On montre de même que : } \sin \delta \approx \frac{XP_2 - RQ_2}{V_1 V_2}$$

L'hypothèse du réseau peu chargé permet d'écrire :

$$V_1 \approx V_2 \approx V$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP + XQ}{U^2}$$

$$\sin \delta \approx \frac{XP - RQ}{U^2}$$

On peut aussi noter que si, de plus, R est très faible devant X ($R \approx 0$), on peut écrire alors :

$$\Delta U = \frac{XQ}{U}$$

$$\sin \delta = \frac{XP}{U^2}$$

Les équations précédentes montrent que dans ces conditions, La chute de tension dépend :

- Principalement de la puissance réactive consommée par l'extrémité réceptrice.
- L'angle de transport dépend principalement de la puissance active transmise.

I.5. Notion de la puissance transmise dans une ligne électrique

Considérons le modèle simplifié de la ligne de transmission Figure (I.6) représenté par son impédance \bar{Z} , qui alimente une charge. Nous supposons, d'abord, que la résistance R de la ligne est négligeable (généralement très faible devant la réactance) et que la charge a un facteur de puissance φ en retard [8].

La puissance apparente aux extrémités de la ligne est donnée par :

$$\begin{cases} \bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 \\ \bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 \end{cases}$$

Le diagramme des phases d'une ligne purement inductive est illustré sur la Figure. I.8.

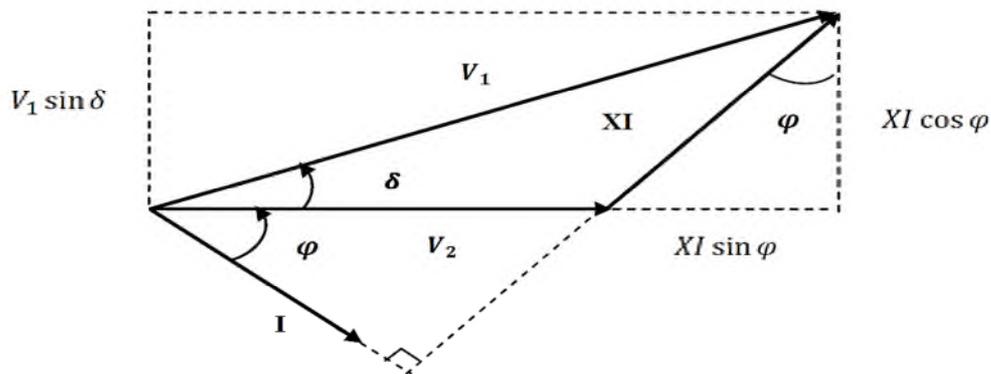


Fig. I.8 : Diagramme de phase d'une ligne purement inductive

D'après le diagramme de phase de la Fig. I.8 :

$$\bar{I} = I(\cos \varphi - j \sin \varphi) \tag{II.2}$$

Et

$$\begin{cases} V_1 \cos \delta = V_2 + XI \sin \varphi \\ V_1 \sin \delta = XI \cos \varphi \end{cases} \tag{II.3}$$

Avec :

δ : Angle de transport, qui est l'angle entre \bar{V}_1 et \bar{V}_2

La relation (II-3) nous donne :

$$\begin{cases} I \sin \varphi = \frac{V_1 \cos \delta - V_2}{X} \\ I \cos \varphi = \frac{V_1}{X} \sin \delta \end{cases} \tag{II.4}$$

À la réception :

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \bar{V}_2 \bar{I}^* \tag{II.5}$$

Remplaçant (II.2) et (II.4) dans (II.5) on aura :

$$P_2 + jQ_2 = \frac{V_2 V_1}{X} \sin \delta + jV_2 \frac{V_1 \cos \delta - V_2}{X}$$

D'où l'équation de la puissance active est :

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

Si les pertes de transmission sont négligeables alors on aura :

$$P = P_1 = P_2$$

L'équation de la puissance réactive à la réception :

$$Q_2 = V_2 \frac{V_1 \cos \delta - V_2}{X}$$

D'une manière similaire on retrouve l'expression de la puissance réactive à la source :

$$Q_1 = V_1 \frac{V_1 - V_2 \cos \delta}{X}$$

Pour une tension constante $V_1 = V_2$, et un angle de transport maximum $\delta = \frac{\pi}{2}$

$$P_{max} = \frac{V^2}{X}$$

Avec : P_{max} la Puissance maximale transmissible par la ligne.

I.6. Compensation d'énergie réactive et son objectif

La compensation d'énergie réactive consiste à produire de l'énergie réactive en utilisant les moyens de compensation existant (condensateurs, moteurs synchrone, batteries de condensateurs, FACTS....etc.). En d'autre terme la compensation réactive doit modifier l'impédance de charge en agissant sur la capacité et/ou l'inductance de la ligne pour obtenir une impédance de charge virtuelle s'adaptant aux valeurs de la puissance actuelle transportée par la ligne [9][10], dans le but de :

- maintenir le profil du plan de la tension pour les différents niveaux des puissances transportées.
- Pour améliorer la stabilité du système par augmentation de la puissance maximale transmissible.
- Et/ou pour couvrir le besoin en puissance réactive sur la majorité des plans économiques.

En général, l'écart de tension entre deux extrémités d'une ligne est lié au transit de la puissance réactive consommée par la charge. Pour obtenir une tension identique (ou proche) aux deux bouts de la ligne, il faut donc pouvoir produire localement de la puissance réactive pour éviter l'échauffement des câbles d'alimentation, les pertes supplémentaires et les chutes de tension importantes.

I.6.1. Compensation conventionnelle

La compensation conventionnelle consiste à la production d'énergie réactive en appel à des sources de génération d'énergie réactive (batteries de condensateurs), et selon le lieu d'implantation de la batterie de condensateur on distingue trois types [11].

a. compensation globale :

La batterie de condensateur est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation, la batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation, voir Figure (I.9). Ce type de la compensation est utilisée lorsque la charge est stable et continue pour :

- Supprime les facturations complémentaires d'une consommation excessive d'énergie réactive
Diminue la puissance apparente (ou appelée) en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation.
- Soulage le poste de transformation.

Son principal inconvénient est que le courant réactif est présent dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.

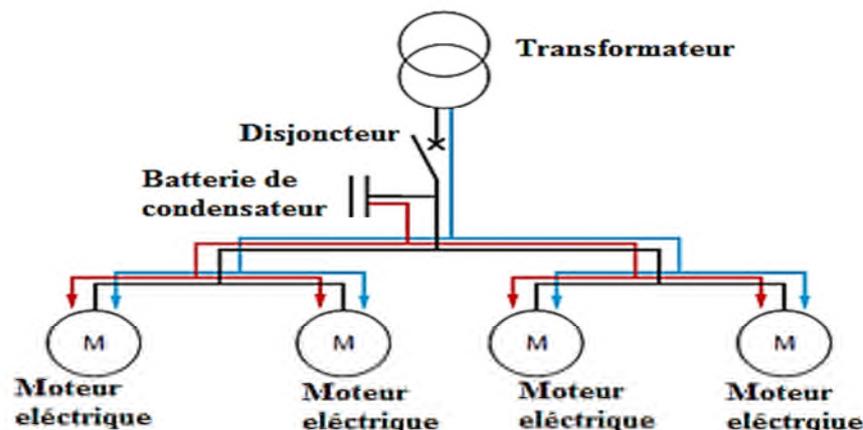


Fig. I.9 : Schéma de la compensation globale

b. Compensation partielle (par secteur)

Dans ce type de compensation la batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être réalisée (Figure I.10). Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment au niveau du dimensionnement des câbles d'arrivée ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée.

Une compensation partielle est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents, elle permet de :

- Réduire les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive.
- Réduire la puissance apparente d'utilisation.
- Soulager le transformateur d'alimentation, ce qui permet d'alimenter des charges supplémentaires si nécessaire.
- Réduire les pertes en ligne dans les câbles électriques.

Par contre ce type de compensation, favorise la circulation des courants réactifs dans les départs du tableau jusqu'aux charges. Elle n'améliore pas ni le dimensionnement, ni les pertes en ligne de ces départs et si de larges variations de charges se produisent, un risque de surcompensation et par conséquent, de surtension est toujours à considérer.

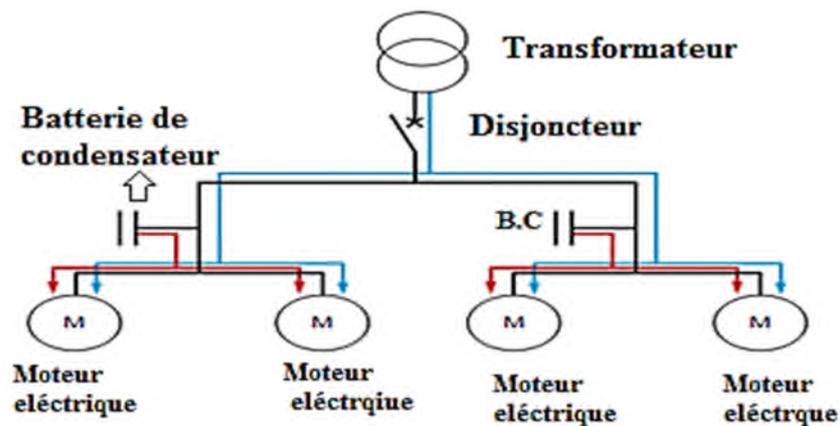


Fig. I.10 : Schéma de la compensation partielle

c. Compensation individuelle

La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement un moteur). La compensation individuelle est à considérer quand la puissance du récepteur est significative par rapport à la puissance souscrite de l'installation, utilisée pour réduire

- Les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive.
- La puissance apparente consommée.
- La section des câbles et les pertes en ligne.

Son seul inconvénient est la réduction ou l'élimination des courants réactifs dans l'installation.

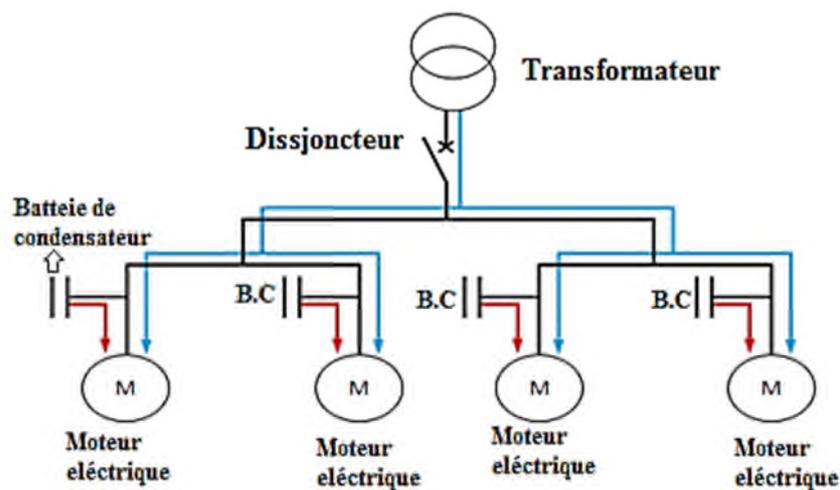


Fig. I.11 : Schéma de la compensation individuelle

I.6.2. Compensation statique

La compensation statique est une compensation qui utilise les compensateurs statiques (dispositifs FACTS -voire chapitre II) comme élément de compensation dans les réseaux de transport, ces compensateurs statiques sont constitués de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors montés en tête-bêche. Les compensateurs statiques peuvent être utilisés pour le réglage de la tension, et pour l'amélioration de la stabilité du réseau, ils sont de bonne performance dynamique (temps de réponse de quelques dixièmes de seconde) et sont capables d'atténuer les fluctuations de tension, en particulier dans les zones éloignées des centres de production. Elle regroupe trois modes de compensation selon l'implantation et la nature du compensateur statique [12] [13].

a. Compensation série

Cette compensation a pour principe d'insérer en série des compensateurs FACTS série qui sert de modifier l'impédance de la ligne (capacité ou inductance) toujours dans le but d'augmenter la puissance transmissible (agir sur l'impédance de la ligne).

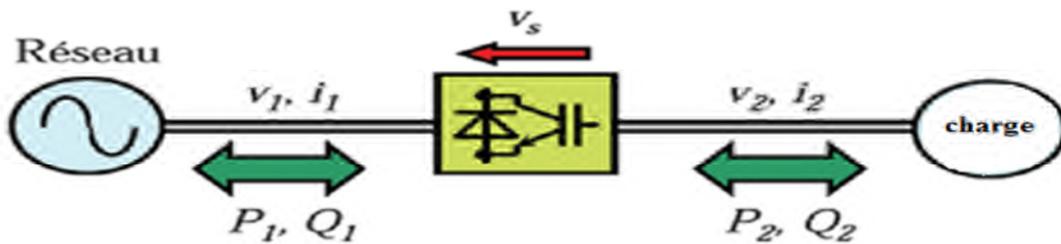


Fig. I.12 : Schéma de raccordement série

b. Compensation parallèle (shunt)

La compensation shunt consiste à l'insertion d'un compensateur d'énergie réactive au milieu de la ligne (en parallèle). Ce dispositif permet de maintenir la tension de sortie V_s à la tension d'entrée V_e en contrôlant le flux de puissance réactive par l'injection d'un courant au réseau via le point de raccordement (transformateur d'injection), ainsi les compensateurs shunts sont connectés entre phase et neutre.

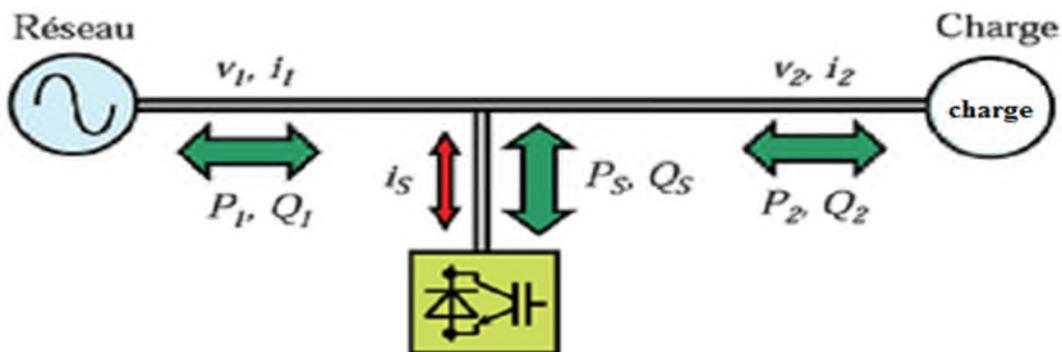


Fig. I.13 : Schéma de raccordement shunt

c. Compensation hybride (shunt-série)

C'est une compensation qui utilise les compensateurs hybrides FACTS qui sont une combinaison des dispositifs séries et shunts commandés d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

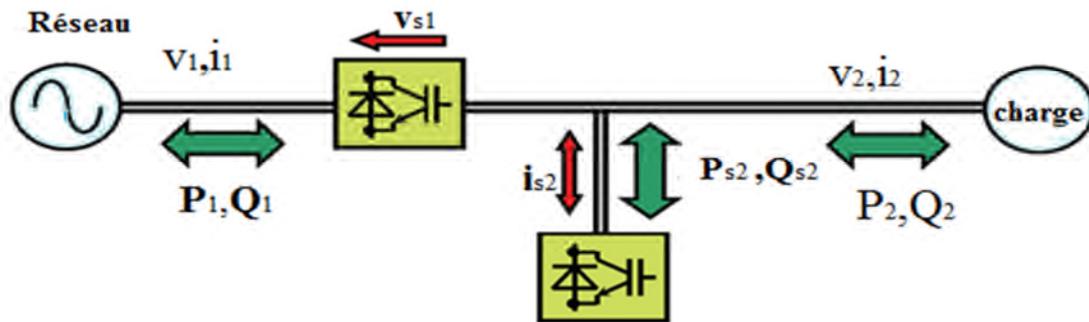


Fig. I.14 : Schéma de raccordement série-shunt.

I.6.3. Compensation avancée

La compensation avancée est une compensation moderne, consiste à l'utilisation des D-FACTS pour mieux contrôler le réseau de distribution électrique, cette compensation regroupe trois modes de compensation précité déjà (série, shunt, hybride), selon la nature et l'implantation du D-FACTS dans le réseau de distribution électrique [13].

- ✓ Compensation série avancée (DVR et IDVR).
- ✓ Compensation shunt (parallèle) avancée (D-STATCOM).
- ✓ Compensation hybride avancée (UPQC).

I.7. Type de compensation et ses applications (comparaison)

Le tableau suivant montre les différentes applications en fonction de type de connexion.

| Type de connexion des FACTS | Applications |
|-----------------------------|---|
| Série | Réduction des creux et déséquilibre de tension, compensation harmonique de tension, réglage d'impédance de la ligne et le flux de puissance |
| Shunt(Parallèle) | Réglage le plan de la tension, compensation réactif, soutien de réseau, réduction de l'effet de flicker, équilibrage des charges, filtrage actif de courant |
| Hybride (Série-Shunt) | Regroupe les deux applications des compensations série et shunt. |

Tableau. I.2 : Types de connexions et leurs applications

I.8. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a défini et présenté le réseau électrique ainsi ses composants puis les différents problèmes de tension survenant sur le réseau électrique de distribution sont définis, la deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la compensation d'énergie électrique à savoir la compensation conventionnelle à base des batteries de condensateurs, la compensation statique à base des FACTS destinées pour les réseaux électriques de transport et la compensation avancée à base des FACTS modernes pour les réseaux électriques de distribution en citant la classification de chaque type.

Dans le chapitre qui suit on s'intéresse à la compensation avancée série à base de DVR et IDVR, la compensation avancée shunt à base de D-STATCOM et la compensation avancée hybride à base de l'UPQC, ces dispositifs seront traités du côté théorique.

II.1.Introduction

Devant les problèmes de transit de puissances, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS qui est un projet à long terme, qui vise à rendre les réseaux plus "flexibles" au moyen de dispositifs à base d'électronique de puissance, et plus particulièrement de thyristors et thyristors GTO, afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique [14] [15] [16].

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux de transport et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant la stabilité des réseaux. Cette technologie a permis la résolution de la plupart des problèmes de la qualité d'énergie électrique mais à l'échelle des réseaux de transport et d'interconnexion, et pour s'opposer à ces problèmes au niveau des réseaux électrique de distribution, un autre concept D-FACST est apparu récemment remplis la même tâche que les FACTS .

Dans ce chapitre on va discuter la technologie FACTS et le concept D-FACTS, puis les avantages de cette technologie seront exposés. Une étude théorique est réservée pour quatre compensateurs avancés D-FACTS à savoir les compensateurs séries (DVR et IDVR), le compensateur shunt (D-STATCOM) et la combinaison shunt-série (UPQC).

II.2. La technologie FACTS

D'après IEEE, FACTS est l'abréviation de flexible AC Transmission Systems » est défini comme suit: Les systèmes de transmission en courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes [17] [18].

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes.

Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble paramètre du réseau : tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et flexibilité du transfert d'énergie. Flexibilité de transmission de l'énergie : C'est l'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisante marge de stabilité transitoire [17] [18] [19].

II.3. Avantages de la technologie FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales [16] [17]. Ces possibilités résultent par l'habilité des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équation (II.1) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne telle que les impédances séries, impédances shunts, tension et angle de phase.

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

Dans un système énergétique, les contrôleurs FACTS ou D-FACTS permettent de réaliser les bénéfices suivants:

- ✓ Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS, ce contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence.
- ✓ Contrôle des tensions dans les nœuds.
- ✓ Amélioration de la qualité de l'énergie.
- ✓ Amélioration de la stabilité dynamique : cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- ✓ Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière.
- ✓ Fournir des connexions sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones.

- ✓ Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettra ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.
- ✓ Contrôle de la boucle de l'écoulement de puissance.

II.4.La compensation série avancée

II.4.1.Restaurateur Dynamique de Tension (DVR : Dynamic Voltage Restorer)

II.4.1.1.Définition

Le DVR représenté dans la Figure(II.1) est un dispositif FACTS série destiné pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques de distribution ,employé pour protection des charges sensibles ,correction des chutes ,bosses et transitoire de tension en injectant des tensions d'amplitude, d'angle et de fréquence de phase contrôlables dans le conducteur de distribution via un transformateur d'injection série (modification de l'impédance de la ligne) [20][21]. Son action principale réside dans la modification de l'impédance de la ligne. Ainsi, sur des lignes fortement inductives, une compensation de la chute de tension peut être réalisée par un fonctionnement capacitif. [22] [23]. Il peut aussi reconstituer la qualité de la tension sur ses bornes du côté de la charge et ainsi, sur des lignes fortement inductives, une compensation de la chute de tension peut être réalisée par un fonctionnement capacitif [21].

Constitué principalement d'un circuit de commande pour contrôler et surveiller la tension au point d'accouplement commun (PCC), d'un système de stockage d'énergie ayant des capacités maximale pour injecter des tensions compensatrices à travers un transformateur d'injection qui relié ce dispositif en série avec le réseau [24].

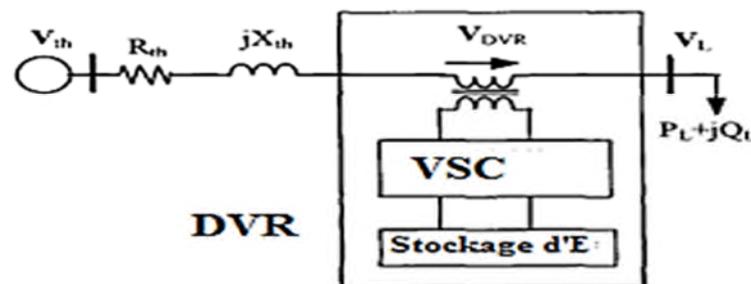


Fig.II.1 : Schéma de base d'un DVR

II.4.1.2 Structure d'un DVR

La Figure (II.2) représente les principaux éléments constituant un DVR. Il est composé d'un convertisseur de tension triphasé (VSC) et alimenté par une source de tension continue. Ce système est couplé au réseau via un transformateur de couplage(ou injection) dont le secondaire est inséré en série au réseau pour alimenter la charge électrique à protéger [21], un système de contrôle (commande), un circuit de stockage d'énergie et un filtre d'harmoniques.

a. Transformateur d'injection : Le transformateur d'injection connecte le DVR au réseau de distribution via les enroulements .Il transforme les tensions de compensations injectées et générées par le VSI à la tension d'alimentation d'entrée. Le côté haute tension du transformateur d'injection est connecté en série à la ligne, tandis que le côté basse tension est relié au circuit d'alimentation du DVR.

b. Filtre d'harmoniques : La tâche principale du filtre d'harmoniques est le maintien de la tension harmonique générée par le convertisseur de tension (VSC) au niveau admissible.

c. Convertisseur de source de tension (VSC : Voltage Source Converter) : Le convertisseur de source de tension est un dispositif d'électronique de puissance (onduleur de tension), génère une tension sinusoïdale d'amplitude, de la fréquence et l'angle de phase nécessaire. Les convertisseurs de source de tension sont largement utilisés dans les entraînements à vitesse variable, mais peut aussi être utilisés pour atténuer les creux de tension, le flicker et les harmoniques de tension.

d. DC Circuit de charge : Le circuit de charge à courant continu a deux missions principales : La première tâche est de charger le système de stockage d'énergie après un événement de compensation d'une chute de tension et la deuxième tâche est de maintenir la tension continue de liaison à la tension nominale.

e. Contrôle et protection : La stratégie de commutation de VSC la plus utilisée est basée sur la technique de la commande MLI qui offre une simplicité et une bonne réponse.

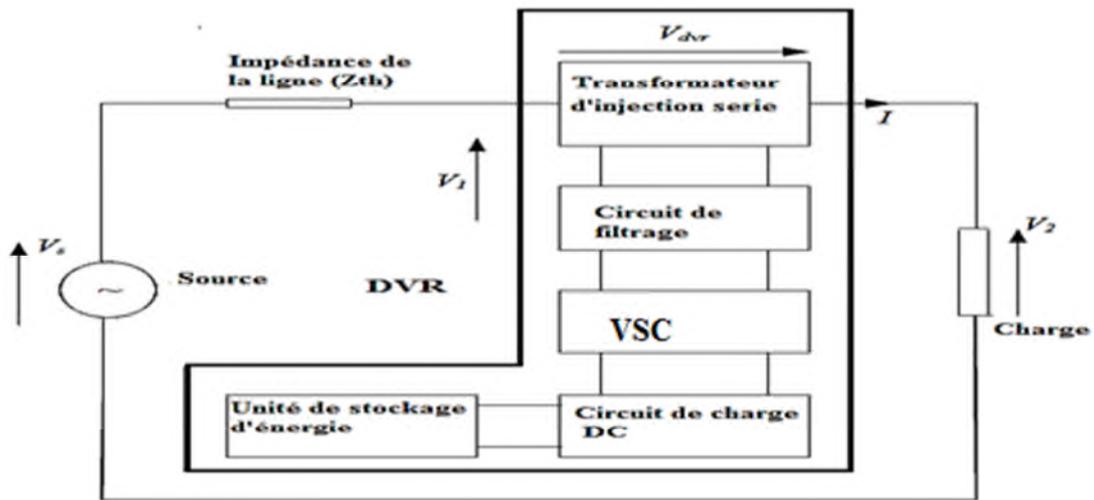


Fig. II.2 : Principales composantes d'un DVR

II.4.1.3 Avantages

Le DVR présente beaucoup d'avantages parmi ces avantages on trouve :

- ✓ Elimine les surtensions, les creux de tension, et protéger les charges critiques
- ✓ Atténuer les problèmes de la qualité de l'énergie électrique.
- ✓ La simplicité et bonne réponse à cause de l'utilisation du VSC et une commande MLI
- ✓ Excellente exécution dynamique et capable d'une protection critique d'une charge sensible contre les différentes perturbations de tension.
- ✓ Le maintien de la tension de charge équilibrée et constante à la valeur nominale.
- ✓ Plus petit et moins coûteux que le D-STATCOM.

II.4.1.4 Inconvénients

- Le DVR consomme certaine quantité d'énergie au moment de son intervention ce qui favorise l'augmentation de courant de source.
- Coût élevé
- Compense seulement les anomalies liées à la tension
- La charge et la décharge du condensateur (pour le cas où le système de stockage d'énergie de DVR est un condensateur) durant le fonctionnement réduit la durée de vie de ce dernier en plus de ces inconvénients le DVR a des limitations qui sont :

- **Limite de tension** : La conception du DVR est limitée dans les possibilités d'injection pour réduire le coût et pour réduire la chute de tension à travers le dispositif dans l'opération de réserve.
- **Limite courante** : Le DVR a une limitation dans des possibilités courantes de conduction pour réduire le coût.
- **Limite de puissance** : La puissance est stockée dans le lien à C.C, mais la puissance en bloc est souvent convertie de l'approvisionnement lui-même ou d'un plus grand stockage de C.C. Un convertisseur additionnel est employé souvent pour maintenir une tension constante de lien C.C.et l'estimation du convertisseur peut présenter une limite de puissance au DVR.
- **Limite d'énergie** : De l'énergie est employée pour maintenir la tension de charge constante et le stockage est normalement classé aussi bas que possible afin de réduire le coût. Quelques immersions épuiseront le stockage rapidement.

II.4.1.5 Domaines D'applications

Utilisé dans les réseaux de distributions électriques moyennes (MT) ou basse tension(BT) pour compenser les anomalies liées à la tension, telle que les chutes de tension, les creux de tension, réduction des coupures de tension et d'harmoniques de tension.

II.4.1.6 Quelques installations existantes des DVR dans le monde

Ce tableau représente quelques pays où des DVR sont intégrés dans les réseaux électriques de distribution pour la compensation des anomalies de tension.

| Emplacement | Pays | Année | Caractéristiques |
|---------------------------------|--------------|-------|------------------|
| Power Cor,BonlacFoods | Australie | 1997 | 22kV, 2MVAR |
| Florida Power corp | Etats-Unis | 1997 | 12.5 kV, 2MVAR |
| Scottish Power,CaledonianPaper | Royaume-Unis | 1997 | 11kV, 4MVAR |
| AsianElectronics Manufacturer | Inde | 1998 | 2MVAR |
| Salt River Project | Etats-Unis | 1998 | 12.5kV, 12MVAR |
| Fabrication de semi-conducteurs | Singapour | 1998 | 22kV, 4MVAR |
| QuiriatGat,Fabricant de chip | Israël | 2000 | 22kV, 22.5MVAR |
| Fabrication de semi-conducteurs | Etats-Unis | 2001 | 10MVAR |

Tableau II.1:Quelques installations des DVR dans le monde.

II.4.2. Le restaurateur dynamique de la tension entre ligne (IDVR : Interline Dynamic Voltage restorer)

II.4.2.1. Définition

Le restaurateur dynamique de la tension entre lignes ou (Interligne Dynamics Voltage Restore) (appellation en anglais) est l'un des D-FACTS série le plus avancé techniquement et économique pour l'atténuation des chutes de tension et la protection des éléments sensibles dans les installations électriques, fait sur commande, destiné pour les réseaux de distribution électrique moyenne ou basse tension. Dans le concept d'IDVR deux ou plusieurs DVR (ou des VSC), connectés a deux conducteurs /ou plus (un DVR pour un conducteur) via des transformateurs d'injection qui partagent un lien commun en C.C, et les conducteurs peuvent être de même ou différent niveau de tension [25]. (Voir Figure II.3.)

Un des DVR compense la chute de tension tandis que l'autre DVR maintient la tension de lien en C.C à un niveau spécifique en absorbant la puissance réactive du système à C.A [26]. Ses fonctions principales consiste dans :

- La détection de la chute de tension dans le système.
- Calcul de la tension de correction (tension compensatrice).

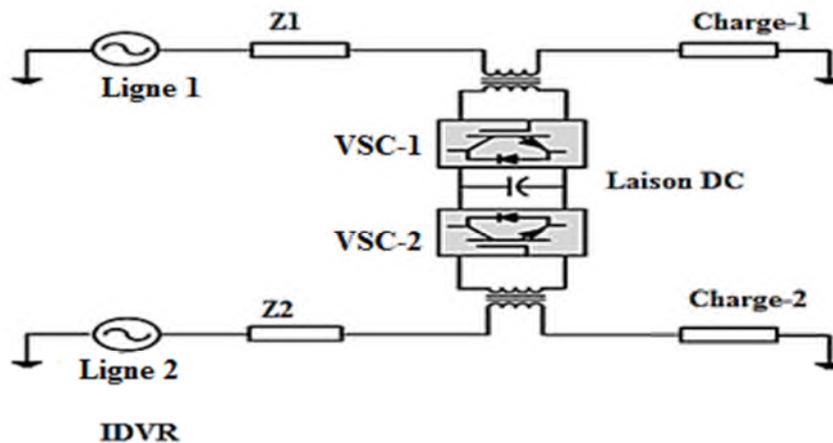


Fig. II.3 : Schéma de base d'un IDVR

II.4.2.2 Avantages

- ✓ Joue un rôle important, avec les exigences de réponse rapide face aux chutes de tension et des variations dans la charge connectée.

- ✓ Injecte la différence de tension entre la pré- faute et la tension de faute en série du transformateur connecté.
- ✓ Injecte la puissance active (l'énergie) de DVR au réseau de distribution.
- ✓ Fourniture ou/et absorption des deux composants de la puissance apparente.
- ✓ Corriger les petites fautes de système en utilisant seulement la puissance réactive produite intérieurement.
- ✓ Une fois que la faute a été corrigée et la provision fonctionne dans des conditions normales, le DVR recharge de nouveau l'énergie dépensée du système de stockage.
- ✓ Compense les chutes de tension des lignes résistives et la puissance réactive des lignes correspondant.
- ✓ Augmenter l'efficacité du système compensé pour la perturbation dynamique comme la stabilité.
- ✓ Possibilité de transfert de la puissance réactive entre les lignes, cette dernière qui sera indépendante et contrôlable dans chaque ligne.

II.4.2.3.Inconvénients

- Le IDVR consomme certaine quantité d'énergie au moment de son intervention ce qui favorise l'augmentation de courant de source.
- Coût élevé
- Compense seulement les anomalies liées à la tension.

II.4.2.4.Domains D'applications

Utilisé dans les réseaux de distributions électriques moyennes (MT) ou basse tension(BT) pour compenser les anomalies liées à la tension. Utilisé beaucoup plus quand l'alimentation en énergie est assurée par des sources différentes par exemple alimentation à travers deux postes différents ou à travers deux ou plusieurs centrales de production électrique de nature disparates.

II.5. La compensation shunt avancée

II.5.1. Compensateur synchrone statique de distribution (D-STATCOM : Distribution static compensator)

II.5.1.1. Définition

Le D-STATCOM est un dispositif shunt de la famille D-FACTS basé sur des convertisseurs de tension (généralement des IGBT) destiné pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques de distribution, il réalise les mêmes fonctions que le STATCOM mais avec plus de performances. Sous les conditions normales d'alimentation, le D-STATCOM fonctionne comme une source d'énergie réactive. Une fois une fluctuation de la tension apparue, le D-STATCOM réagit en injectant des courants d'une amplitude et d'une phase adéquates [27] [28], son schéma de base est représenté par la Figure. (II.4). Par conséquent, il remplace les installations conventionnelles (mesure de supprimer les fluctuations dans un espace de temps inférieur à celui des dispositifs conventionnels) destinées au réglage de la tension et de la puissance réactive [29] [30].

Il peut améliorer le profil de la tension le long de la ligne de l'alimentation et réduire les pertes, capable de supprimer les fluctuations de la puissance active par la présence d'un dispositif destiné à fournir de l'énergie emmagasinée. Mais aussi pour compenser indirectement des perturbations en tension comme le phénomène de flicker est également possible. Les principales tâches d'un D-STATCOM variaient en fonction de la présence ou l'absence d'un système de stockage d'énergie intégré.

a. Quand le D-STATCOM n'est pas équipé du stockage le système, ses fonctions principales sont fondamentalement [31] [32] :

- Commande de puissance réactive ainsi la régulation de tension.
- Compensation des courants harmoniques, la chute de tension et la réduction de clignotement. Equilibrage de la charge.

b. Quand le D-STATCOM est équipé du stockage

Le système, à les taches précédentes en plus d'autres fonction supplémentaires comme :

- Commande de puissance active et ainsi réglage de la fréquence.
- Service de conditionneur de qualité de puissance pour les charges sensibles.

- Service sans coupure d'alimentation (UPS) d'énergie pour charges essentielles.

À noter que configuration de D-STATCOM du côté composants est équivalente à celle de DVR avec un transformateur d'injection shunt.

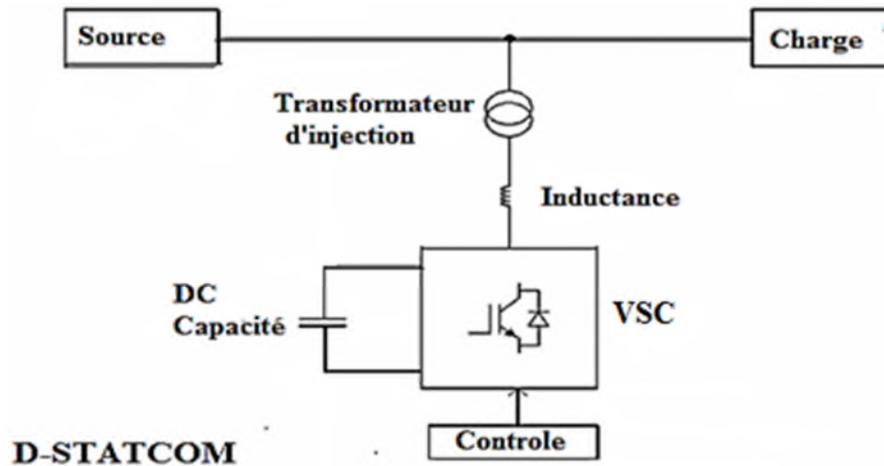


Fig. II.4 : Schéma de base d'un D-STATCOM

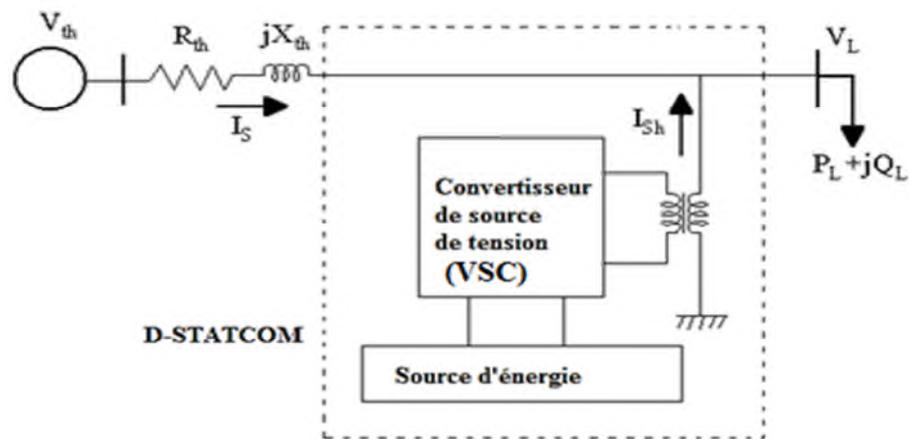


Fig. II.5 : Emplacement d'un D-STATCOM dans un réseau électrique de distribution

II.5.1.2. Avantages

- ✓ Commande de puissance réactive ainsi la régulation de tension.
- ✓ Compensation des courants harmoniques, des chutes de tension, réduction de Clignotement et l'équilibrage de la charge.
- ✓ Compensation des harmoniques de rangs supérieurs au 13^{ième}.
- ✓ Maintien d'un niveau de tension par échange de courant réactif avec le réseau.

- ✓ Bonne réponse dynamique: le système répond quasiment instantanément.
- ✓ Bonne réponse à faible tension.
- ✓ Suppression des fluctuations de la tension.
- ✓ le D-STATCOM ne contribue pas à l'apparition des phénomènes de résonance au réseau électrique.
- ✓ Possibilité d'être associé à d'autres systèmes de stockage d'énergie.

II.5.1.3. Inconvénients

- Il cause les vibrations et le bruit dans les machines et le défaut de fonctionnement de l'équipement sensible.
- Son coût est relativement élevé et l'absence du besoin de réunir toutes les fonctionnalités en un même compensateur.

II.5.1.4. Domaines d'applications

Il remplace les installations conventionnelles destinées au réglage de la tension et de la puissance réactive. Utilisé beaucoup plus dans les réseaux électriques de distribution contenant des charges sensibles, présentant divers problèmes de la qualité de l'énergie.

II.5.1.5. Quelques installations existantes des D-STATCOM dans le monde

Le tableau suivant représente quelques pays où des D-STATCOM sont intégrés dans les réseaux électriques de distribution pour la compensation des anomalies de tension.

| Emplacement | Pays | Année | Caractéristiques |
|------------------------|--------------|-------|----------------------|
| Inuyama station | Japon | 1991 | $\pm 80MVAR$ |
| Uddeholm | Suède | 1999 | $10.5Kv, \pm 22MVAR$ |
| Moselstahlwek | Finlande | 2000 | $20Kv, \pm 19MVAR$ |
| East Claydon Substion | Royaume-Unis | 2001 | $\pm 75MVAR$ |
| Saiko, compagnie TEPCO | Japon | 2000 | $\pm 1000kVAR$ |

Tableau II.2 : Quelques installations des D-STATCOM dans le monde.

II.6. La compensation hybride avancée

II.6.1. Le compensateur unifié de la qualité de puissance (UPQC : Unified Power Quality Compensator)

II.6.1.1. Définition

Plusieurs configurations existantes pour ce dispositif permettant de contrôler les différentes anomalies et perturbations au niveau des réseaux électriques à savoir la combinaison d'un filtre actif shunt et un filtre actif série, combinaison filtre actif shunt –DVR et la combinaison d'un D-STATCOM-DVR.

Dans ce qui suit, nous s'intéressons à la dernière combinaison.

Le compensateur unifié de la qualité de puissance est l'un des meilleurs dispositifs D-FACTS d'alimentation personnalisé utilisé dans les réseaux de distribution pour compenser à la fois la source et les problèmes du côté charge. Il se compose de deux convertisseurs shunt et série (STATCOM-DVR) connectés dos à dos par une liaison à courant continu commun. Le restaurateur dynamique de la tension (DVR) est D-FACTS connecté en série, utilisé pour compenser les problèmes de qualité d'énergie électrique tels que la chute de tension, déséquilibre de tension...etc. (voir aussi II.4.1.)

Le compensateur synchrone statique de distribution est D-FACTS shunt destiné pour les réseaux électriques de distribution, utilisés pour compenser certains problèmes de qualité d'énergie électrique tels que les charges déséquilibrées, les chutes de tension, des fluctuations de tension et le déséquilibre de tension. [33] [34]. Il assure les fonctions des deux dispositifs précédent en un seul dispositif et en mesure d'atténuer tous les problèmes de la qualité d'énergie en contrôlant les trois paramètres variant de la puissance transmise à savoir la tension, l'impédance et l'angle de transport [33]. (voir aussi II.5.1). En général l'UPQC assure les quatre tâches suivantes :

- Compensation des harmoniques de courant ou/et tension de la charge.
- Élimination des perturbations dues aux chutes/aux bosses sur le côté source et charge.
- Correction du facteur de puissance sur le côté source.

- Maintien de la qualité de puissance en dépit de légères variations de fréquence de la tension d'alimentation.

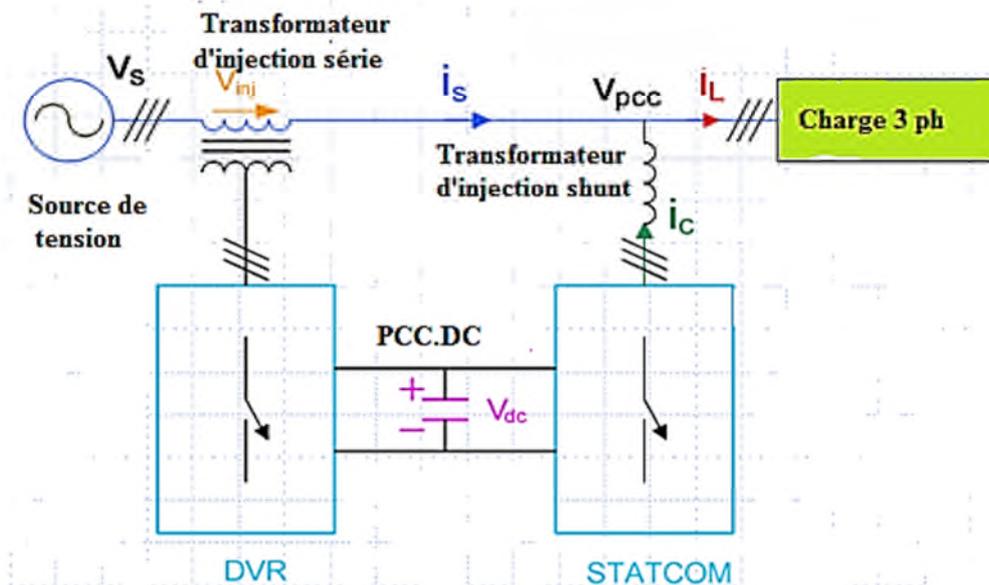


Fig. II.6 : Schéma de base d'un UPQC

II.6.1.2. Avantages

UPQC est beaucoup plus flexible que DSTATCOM et DVR séparément configurés. Il Permet de remplir les deux tâches de DVR et D-STATCOM (un seul dispositif), il n'exige aucun circuit de stockage de l'énergie [33].

II.6.1.3. Inconvénients

- Son coût est très élevé et son utilisation peut être limitée aux situations sensibles particulières avec des grandes exigences de la qualité d'énergie.
- Des recherches sont nécessaires pour étudier ses pleines possibilités d'utilisations.
- Difficulté dans ses stratégies de contrôle suite à une combinaison de deux dispositifs [34].

II.6.1.4. Domaines d'applications

Utilisé dans les réseaux électriques de distribution contenant des charges sensibles (matériels d'électronique de puissance), par exemple : hôpitaux, unités de production utilisant la technologie robotique.

II.7. Application des D-FACTS pour la correction des problèmes de tension

Ce tableau résume les applications de chaque dispositif pour les problèmes de tension

| D-FACTS Anomalies de tension | DVR | IDVR | D-STATCOM | UPQC |
|--------------------------------------|-----|------|-----------|------|
| Chute de tension | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Interruption | | | | ✓ |
| Augmentation de la valeur de tension | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Surtension transitoire | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Surtension | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Baisse de tension | | | ✓ | ✓ |
| Harmonique de tension | ✓ | | | ✓ |
| Fluctuation de tension | ✓ | | ✓ | ✓ |

Tableau II.3 : Application des D-FACTS pour la correction des problèmes de tension

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre on a défini la technologie FACTS et ses avantages puis une étude théorique sur les compensateurs D-FACTS de la qualité d'énergie à savoir le DVR et IDVR, D-STATCOM et l'UPQC en précisant leurs structures, avantages, inconvénients et leurs domaines d'applications dans les réseaux électriques de distribution.

Dans le chapitre qui suit le principe de fonctionnement et une modélisation de ces compensateurs seront exposés et discutés.

III .1.Introduction

Les réseaux de distribution électrique n'ont cessés d'évoluer, tant du point de vue des techniques utilisées, cette évolution est liée au progrès enregistrés dans l'électronique des semi-conducteurs, ces derniers qui ont permis l'apparition de nouveaux dispositifs et concepts de contrôle des différents paramètres pour bien maîtriser ces réseaux. Avec l'utilisation des D-FACTS dans les réseaux électriques de distribution, une interaction entre ce dernier et le dispositif D-FACTS peut rendre le contrôle de ces réseaux difficile, c'est pour cela que la maîtrise de ces dispositifs de côté fonctionnement et commande est une priorité pour atteindre cet objectif.

Dans ce chapitre nous allons faire une modélisation des quatre dispositifs déjà étudiés (DVR, IDVR, D-STATCOM et L'UPQC) pour le maintien de la tension par correction des chutes de tension, ainsi nous discutons les différentes stratégies de contrôles élaborées par différents auteurs.

III.2.Fonctionnement et modélisation de DVR

III.2.1.Fonctionnement de DVR

Durant son fonctionnement, le DVR permet d'injecter, en série au réseau, une tension fidèlement opposée à la perturbation enregistrée dans ce dernier. La détection, l'identification et la génération de cette tension est obtenue grâce à un dispositif de détection associé à une commande pilotant le convertisseur de source de tension (VSC) qui reproduit la perturbation à compenser.

Quand le DVR repère une déformation au niveau de la tension ,le système de contrôle fait une comparaison entre la tension nominale et la tension perturbée afin d'obtenir une tension appropriée à la tension perdue qui sera injectée par le DVR pour maintenir la stabilité de la tension de charge, cette différence de tension exige une certaine quantité de la puissance active et réactive de DVR.

III.2.2.Modélisation de DVR

Le DVR dispose de deux (02) modes de fonctionnement qui sont le mode d'injection zéro de la puissance active (ZAPI : zéro active power injection) et le mode d'injection minimum de la puissance apparente (MAPI : minimum apparent power injection) [35].

La Figure (III.1) représente le schéma équivalent de DVR

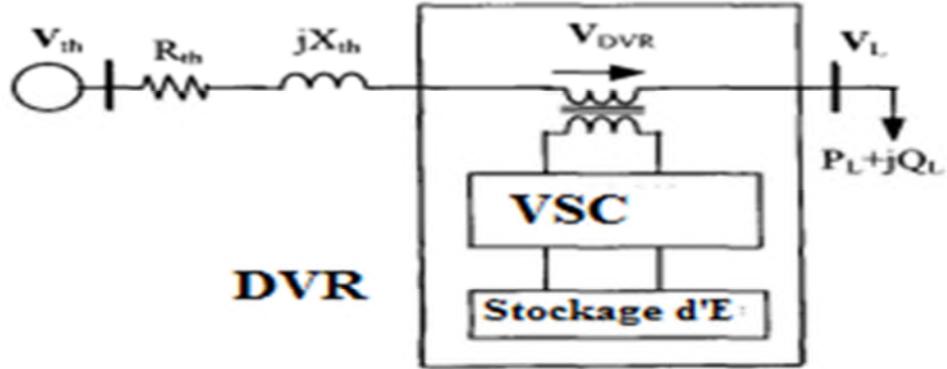


Fig.III.1 : Schéma équivalent d'un DVR

$Z_{th} = R_{th} + jX_{th}$: est l'impédance de système qui dépend de niveau de défaut de la liaison de charge. Quand des chutes de tension apparaissent dans le système (V_{th}), le DVR injecte une tension V_{dvr} en série via le transformateur d'injection de sorte que la grandeur désirée V_L de tension de charge doit être maintenue. (Figure. II.1). La tension injectée en série par DVR s'écrit :

$$V_{dvr} = V_L + Z_{th} I_L - V_{th} \quad (III.1)$$

I_L : désigne le courant de charge, est donné par :

$$I_L = \left[\frac{P_L + jQ_L}{V_L} \right]^* \quad (III.2)$$

Quand V_L est considéré comme référence, l'équation (III.1) devient :

$$V_{dvr} / \underline{\alpha} = V_L / \underline{0} + Z_{th} I_L / (\underline{\beta} - \underline{\theta}) - V_{th} / \underline{\delta} \quad (III.3)$$

α, β, δ : sont les angles de V_{dvr}, Z_{th} et V_{th} respectivement et θ l'angle de facteur de puissance de la charge. $\left(\theta = \tan^{-1}(Q_L/P_L) \right)$

L'injection de la puissance apparente complexe s'écrit :

$$S_{dvr} = V_{dvr} I_L^* \quad (III.4)$$

Quand la tension injectée V_{dvr} est maintenue en quadrature avec I_L , aucune injection de puissance réactive par le DVR destinée pour corriger la tension.

Notons que V_{dvr} peut être maintenu en quadrature avec I_L seulement jusqu'à une certaine valeur de la diminution de tension et au-delà de cette valeur, le rapport en quadrature ne peut pas être maintenu pour corriger la chute de tension.

La puissance active injectée doit être fournie par le système de stockage d'énergie de DVR et d'une part, quand l'importance de la tension injectée par DVR est réduite au minimum, la correction de la tension désirée peut être réalisée avec le minimum de puissance apparente injectée dans le système. Cet aspect de la correction de tension est également très important parce qu'elle réduit au minimum la taille du transformateur d'injection. La correction de tension par un DVR pour l'injection zéro de puissance active (ZAPI) et injection minimum de puissance apparente (MAPI) sont présentés ci-dessus.

III .2.2.1. Injection zéro de la puissance active :(ZAPI : Zéro active power injection)

Comme cité précédemment que, quand la différence d'angle de phase entre V_{dvr} et I_L est maintenue à $\left(\frac{\pi}{2}\right)$, aucune injection de puissance active dans le système n'est exigée pour corriger le fléchissement de tension, dans ce cas, l'angle α de la tension V_{dvr} injectée s'écrit :

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (III.5)$$

De l'équation (III.3), l'angle α est exprimé comme suit :

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{Z_{th} I_L \sin(\beta - \theta) - V_{th} \sin \delta}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta) - V_{th} \cos \delta} \right] \quad (III.6)$$

On remplace α de l'équation (III.5) dans (III.6) on obtient l'angle de phase δ et V_{th} qui peuvent s'exprimer par des équations suivantes :

$$\delta = \cos^{-1} \left(\frac{c_1 - c_2}{\sqrt{c_3^2 + c_4^2}} \right) - \gamma \quad (III.7)$$

Ou' : $C_1 = V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta)$

$C_2 = Z_{th} I_L \tan \theta \sin(\beta - \theta)$, $C_3 = V_{th}$ $C_4 = V_{th} \tan \theta$ et $\delta = \tan^{-1}(C_4/C_3)$.

Pour une valeur de δ suffisante la condition :

$$\frac{C_1 - C_2}{\sqrt{C_3^2 + C_4^2}} \leq 1 \quad (\text{III.8})$$

doit être vérifiée.

Après quelques manipulations mathématiques de l'équation (III.8), elle s'écrit comme suit :

$$V_{th} \geq (V_L \cos \theta + Z_{th} I_L \cos \beta) \quad (\text{III.9})$$

Le terme $(V_L \cos \theta + Z_{th} I_L \cos \beta)$ dépend du courant de charge (I_L) , de la tension de charge (V_L) et de l'impédance de la ligne (Z_{th}) .

Quand V_{th} est vérifiée (équation III.9), la régulation de la tension désirée est réalisée sans aucune injection de la puissance active dans le système.

Dans ce cas-ci, l'injection de V_{dvr}^* sera obtenu à partir de l'équation (III.3) avec une valeur de δ trouvée dans l'équation (III.7).

Une fois que la valeur de V_{dvr} est connue, l'injection de S_{dvr} sera déduite à partir de l'équation (III.4) et contient juste le composant réactif.

III .2.2.2. Injection minimale de puissance apparente (MAPI : Minimum Apparent Power Injection)

Pour un courant de charge donné, la puissance apparente injectée par le DVR dépend de la tension injectée. De l'équation (III.3), la tension injectée est :

$$V_{dvr}^2 = V_L^2 + V_{th}^2 + Z_{th}^2 I_L^2 + 2V_L Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta) - 2V_{th} Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta - \delta) - 2V_L V_{th} \cos \delta \quad (\text{III.10})$$

Ainsi pour une injection minimale de la puissance apparente, la condition :

$$\frac{\partial V_{dvr}^2}{\partial \delta} = 0 \quad (\text{III.11})$$

Doit être vérifiée et la résolution de l'équation (III.11) dépend de la valeur de δ

L'expression de δ est donnée par :

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{Z_{th} I_L \sin(\beta - \theta)}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta)} \right] \quad (\text{III.12})$$

Une fois que la valeur de δ est connue, la tension V_{dvr} et S_{dvr} peuvent être encore obtenues à partir des équations (III.3) et (III.4), respectivement.

III.2.3.Stratégie de commande et contrôle de DVR

La pluparts des stratégies de commande élaborées par différents auteurs s'appuient sur les méthodes d'identification des perturbations. La tension injectée au réseau par le DVR, piloté par une stratégie de compensation, dépendra de type de perturbation (2type : celles qui engendrent, seulement, une variation d'amplitude de tension et celles qui engendrent, en plus, un saut de phase de la tension, imposée par le réseau à l'entrée du DVR.

Ces méthodes [36] [37] utilisent comme entrée au système de commande la différence entre la tension de référence et la tension mesurée et ce, en passant par les transformations de Clark et/ou de Park, parmi ces différentes méthodes élaborées par différents auteurs on trouve :

a. Commande en courant avec une source d'énergie PDE

Elaboré par A. Ziane-khodja, M. Adli et R.Alkama [38], cette méthode consiste en commande en courant d'un convertisseur de tension (VSC) dans laquelle le courant de référence est déduit à partir de la tension souhaitée à la sortie de la PDE.

PDE est une source d'énergie photovoltaïque connectée au réseau à travers un onduleur et une ligne MT.

b. Compensation non équilibrée de tension utilisant technique de transformation d-q-o (Voltage unbalanced compensation using d-q-o transformation technique)

Rosli Omar et N.A.Rahim [39] discutent la conception et le développement de DVR pour la compensation du déséquilibre en utilisant la technique de transformation d-q-o, carle contrôleur dans des coordonnées de d-q-o à une meilleure exécution que les contrôleurs conventionnels. Les variables commandées dans ces coordonnées sont inversement transformées aux tensions originales qui ont produit des tensions de référence à un DVR.

c. Méthode de contrôle pré-chute / bosse de tension (Feed forward pre-sag/swell voltage control method)

Sanjay Deokar et autres [40] présente cette méthode basée sur la transformation du Park, pour régler la tension de rendement du convertisseur MLI d'une durée d'impulsion, le contrôleur proposé maintient une tension de charge constante sous le déséquilibre des perturbations dynamiques de PQ.

Ce système de contrôle mesure seulement la tension de RMS sur le côté source ou le côté de charge et aucun transit de puissance réactive n'est exigé, la méthode de contrôle de la boucle ouverte de chute tension vers l'avant/bosse d'alimentation pré est employée pour reconstituer la tension de charge, l'arrangement de cette méthode réside dans sa simplicité et son faible coût.

d. Contrôleur réitéré (répétitive) pour DVR (Répétitive Controller for DVR)

Sánchez et autres [41] présente un système de contrôle basé sur un contrôleur réitéré pour compenser les perturbations principales de l'énergie électrique à savoir les chutes de tension, harmoniques, et déséquilibres de tension en utilisant le DVR.

La structure de gestion est tout à fait simple mais très robuste ; elle contient une limite de réaction pour améliorer la réponse passagère et une limite de rétroaction pour permettre l'erreur de zéro dans l'équilibré, si la fréquence commutation est basse, le DVR peut être modélisé comme amplificateur linéaire avec un retard. L'arrangement de cette commande traite chacune des trois perturbations précédentes simultanément.

e. L'Arrangement de soutien de condensateur pour la commande de DVR (Dynamic control scheme for capacitor-supported single phase dynamic voltage restorer)

Carl N.M. Ho et Henry S.H. Chung [42] ont présentés un arrangement de commande dynamique rapide pour le restaurateur dynamique de tension soutenu par un condensateur. Le projet comporte deux boucles d'asservissement intérieures et extérieures, la boucle intérieure est employée pour détecter les signaux d'entrées pour les commutateurs dans le DVR et la boucle extérieure est une référence pour la première boucle employée pour produire de rendement de DVR.

III.3.Fonctionnement et modélisation d'IDVR

III.3.1.Fonctionnement d'IDVR

Une apparition d'une chute de tension dans le conducteur 1 aurait un impact sur le ligne 2 (Figure (II.3)), et si l'accouplement électrique est négligé, deux lignes peuvent être considérés en tant que deux sources isolées V_{s1} et V_{s2} avec leurs impédances Z_1 et Z_2 . Par conséquent, quand un défaut se produit dans une des lignes, le DVR dans cette ligne réagit pour compenser la chute de tension en utilisant la puissance réactive du lien commun C.C tandis que le compensateur dans

l'autre ligne injecte la puissance réactive au lien commun C.C de stockage de l'énergie pour maintenir la tension[43].

Afin d'établir l'échange de puissance entre les deux systèmes, on suppose que DVR1 atténue la chute de tension apparaissant dans cette ligne et DVR2 est commandé pour fournir la puissance réactive au lien commun C.C de stockage de l'énergie. Pendant que la ligne 2 fonctionne à son état normal, la tension de charge de la ligne 2 devrait être égale à la tension de, ainsi, l'inverseur de DVR2 devrait être commandé pour remplir cette condition tandis qu'il fournit la puissance réactive au lien commun C.C de stockage d'énergie C.C [44].

La puissance réactive qui devrait être assurée par DVR2 pour maintenir la tension du lien commun C.C est égale à la puissance réactive requise pour compenser la chute de tension dans la ligne 1 plus les pertes de puissance de système (les pertes de commutation de convertisseur sont incluses).

III .3.2.Modélisation d'IDVR

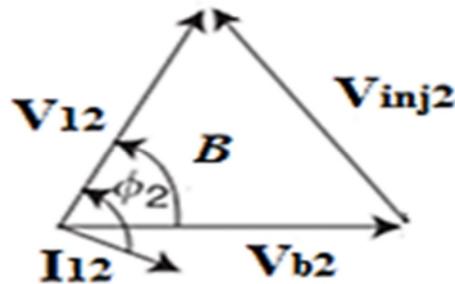


Fig.III.2 : Diagramme Vectorielle de DVR2 dans l'échange de puissance.

Le diagramme de phase montré dans la Fig.III.2 illustre l'importance et la direction de la tension injectée de l'inverseur 2 pour faire le transit de la puissance réactive à partir de la ligne 2 tout en gardant la tension de charge de la ligne 2 à une valeur spécifique. [45][46].

En fonctionnement normal $V_2 = V_{b2}$, par conséquent, il est nécessaire d'avancer l'angle de phase de la tension de charge V_2 convenablement chaque fois qu'il y a un besoin de puissance pour le lien commun C.C. de stockage d'énergie.

D'après la figure (III.2), on constate que la puissance active fournie au lien C.C dépend de l'angle β , et la puissance réelle échangée entre la ligne 2 et le lien C.C de stockage d'énergie, cet échange de puissance peut s'écrire de la façon suivante [45] [46].

$$P_{ex} = 3V_{b2}I_2 \cos(\varphi_2 - \beta) - V_2I_2 (\cos \varphi_2) \quad (\text{III.13})$$

Avec :

I_2 : Courant de charge,

V_{b2} : Tension de la ligne 2,

V_2 : Tension de charge de la ligne 2,

φ_2 : Angle de facteur de puissance de la ligne 2

β : Angle d'avance de la tension de charge de la ligne 2

Quand $V_2=V_{b2}$, l'équation (III.13) devient :

$$P_{ex} = S_2(\cos(\varphi_2 - \beta) - P_{F2}) \quad (\text{III.14})$$

On a : $S_2 = 3V_2I_2$: la puissance apparente de la ligne 2 et P_{F2} est le facteur de puissance de la ligne 2.

P_{ex} : S'écrit en terme P_{dvr} exigée par la ligne 1 et les pertes.

$$P_{ex} = P_{dvr} + \text{Pertes} \quad (\text{III.15})$$

De l'équation (III.14) et (III.15), l'angle β peut s'écrire :

$$\beta = \varphi_2 - \cos^{-1} \left[\frac{(P_{dvr} + \text{Pertes})}{S_2} + P_{F2} \right] \quad (\text{III.16})$$

Les paramètres V_2, I_2, S_2, φ_2 sont fixés à leurs valeurs spécifiques (equation.III.14).

Par conséquent, la seule variable dans l'équation (III.14) qui varie suite à la fourniture de la puissance pour le lien commun de stockage de l'énergie est l'angle φ_2 .

P_{exmax} Qui peut être fournis au liaison de stockage est donnée par l'équation (III.17)

Le transit de puissance de la ligne 2 vers le lien commun C.C de stockage sera limitée quand ($\beta_{max} = \varphi_2$).

$$P_{exmax} = S_2(1 - P_{F2}) \quad (III.17)$$

L'angle β dépend de la puissance exigée par DVR1 et selon la puissance exigée par le DVR1 on distingue deux modes de fonctionnement d'IDVR.

III.3.2.1. fonctionnement de DVR1 dans la Pré-chute technique d'augmentation de la tension d'alimentation (DVR1 Operating In Pre-sag supply voltage boosting technique)

En ce mode de compensation, la tension de charge est compensée à la pré-chute de tension d'alimentation suivant les indications de Figure (III.3).

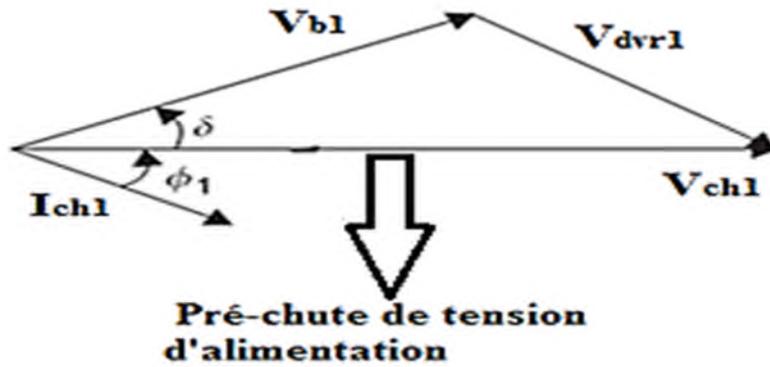


Fig.III.3 : Diagramme vectorielle du mode de pré-chute de tension d'alimentation.

La puissance active fournie par DVR1 pour la charge 1 s'écrit :

$$P_{dvr1_{pr}} = V_1 I_1 [3pF1 - M \cos(\varphi_1 + \theta)] \quad (III.18)$$

Avec : $S_1 = V_1 I_1$, $a_j = \frac{V_{S1j}}{V_1}$, $X = \sum_{j=1}^3 a_j \cos(\delta_j)$, $Y = \sum_{j=1}^3 a_j \sin(\delta_j)$, $M = \sqrt{X^2 + Y^2}$

$$\theta = \tan^{-1}[Y/X]$$

$V_{dvr1_{pr}}$ Est la tension injectée par DVR1, a_j est le facteur de fléchissement (chute), le δ_j est le saut d'angle de phase, φ_2 est l'angle de facteur de puissance de la ligne 1.

V_1 est la tension de charge de la ligne 1, et V_{s1} est la tension d'alimentation de la ligne 1.

Pour une tension équilibrée avec l'angle de saut δ , on remplace par l'équation (III.16) dans (III.17), on obtient (III.19)

On assure une chute de tension équilibrée avec la diminution de facteur a et un angle de saut de phase δ , l'équation de P_{dvr} peut être obtenue à partir des équations (III.16) et (III.19)

$$\beta = \varphi_2 - \cos^{-1} \left[\frac{S_1 [pF1 - a \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) + \text{pertes}]}{S_2} \right] + pF2 \quad (\text{III.19})$$

Ainsi, pour le transit maximum de puissance,

$$a = \frac{S_1 pF1 + \text{pertes} - S_2 (1 - pF2)}{S_1 \cos(\varphi_1 + \delta)} \quad (\text{III.20})$$

Ce qui concerne la puissance apparente de la charge de la ligne 2 (S₂), le facteur de fléchissement de la ligne 2 peut être soutenu en fournissant de la puissance active, cette puissance s'exprime par l'équation (III.21).

$$a = \frac{[2 \cdot pF - 0.97]}{\cos(\varphi_1 + \delta)} \quad (\text{III.21})$$

III .3.2.2.DVR1 opère dans la technique d'optimum d'énergie (DVR1operating in energy Optimum technique)

Dans cette technique l'angle de tension de charge est avancé progressivement par un angle α qui réduira au minimum la puissance active injectée au lien commun C.C de stockage d'énergie. La puissance active optimale compensée par le DVR1 (P_{dvr1_{opt}} > 0) est donnée par dans l'équation(III.22).

$$P_{dvr1_{opt}} = S_1 \left[pF1 - \frac{M}{3} \right] \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Ou : } \alpha_{opt} = \varphi_1 + \theta$$

Pour une chute de tension triphasée équilibrée avec le facteur de fléchissement et un saut de l'angle de phase, l'angle β est donnée par :

$$\beta = \varphi_2 - \cos^{-1} \left[\frac{(S_1 [pF1 - a] + \text{pertes})}{S_2} + pF2 \right] \quad (\text{III.23})$$

Ainsi pour un vrai transit de puissance :

$$a = \frac{S_1 pF1 + \text{pertes} - S_2 (1 - pF2)}{S_1} \quad (\text{III.24})$$

III .3.3.Stratégies de contrôle d'IDVR

Ce contrôle proposé par Seyedreza Aalin et Daryoush Nazarpour [45] ,basée sur la stratégie minimale d'énergie, le IDVR optimise le bilan énergétique entre deux conducteurs pour une charge donnée et une chute de tension équilibrée. Si l'angle de phase entre V_{dvr1} est perpendiculaire à l'angle de I_{L1} , puis l'injection de puissance active n'est pas exigée pour reconstituer la tension par DVR [46].

Le diagramme de phase pour cette stratégie de contrôle est montrée sur la figure (III.4)

Avec : δ et α sont les angles de V_{L1} et I_{L1} respectivement .

α est obtenue par l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \quad (III.25)$$

Et δ est calculée d'après l'équation 2

$$\delta = \varphi - \cos^{-1} \frac{V_{L1} \cos \varphi}{V_{s1}} \quad (III.26)$$

Si les paramètres de la tension d'alimentation remplissent la condition suivante, alors l'équation (III.26) reste vérifiée .

$$V_{L1} \cos \varphi \leq V_{s1} \quad (III.27)$$

Equation (III.27) signifie que le niveau de la chute de tension est minimal .

Par conséquent, la puissance active injectée par DVR est nulle et l'angle α optimum est obtenu à partir de l'équation (III.25).

Si l'équation(III.27) n'est pas vérifiée ,la chute de tension sera maximale et il y aura injection de puissance active [47].

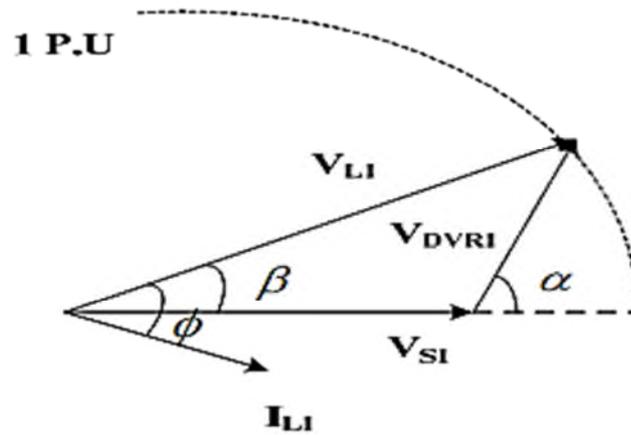


Fig.III.4 : Diagramme vectorielle de la stratégie de contrôle

III.4. Fonctionnement et modélisation d'un D-STATCOM

III.4.1.Fonctionnement d'un D-STATCOM

Un D-STATCOM « Distribution Static Synchronous Compensator » permet de réguler la tension de réseau de distribution en absorbant ou en générant de la puissance réactive, cet échange de puissance réactive est réalisé au travers de l'inductance de fuite du transformateur qui aide à lisser le courant. Une tension en phase avec les tensions primaires est imposée au secondaire du transformateur par la source de tension commandée.

Lorsque la tension au secondaire est plus basse que la tension du réseau, le D-STATCOM agit comme une inductance et lorsque la tension est plus élevée, il agit comme un condensateur et pour maintenir la charge du condensateur, le D-STATCOM absorbe de la puissance réactive et déphasant ses tensions, il est soutenu par l'énergie à court terme stockée dans un condensateur de C.C. Par conséquent le D-STATCOM peut être traité comme source tension-commandée soit comme source courante-commandée.

III.4.2.Modélisation d'un D-STATCOM

Le schéma d'emplacement d'un D-STATCOM monté sur un réseau de distribution électrique est illustré dans la Figure (III.5)

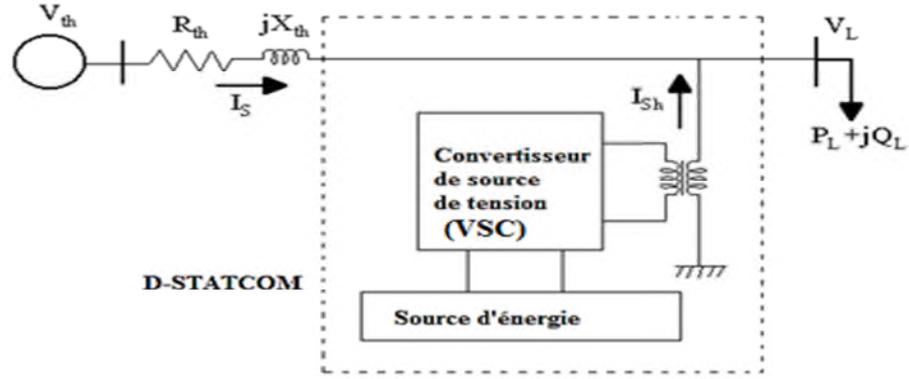


Fig.III.5 : Emplacement d'un D-STATCOM dans un réseau de distribution électrique

Le courant shunt injecté I_{sh} corrige la chute de tension en ajustant cette dernière à travers l'impédance de système Z_{th} et la valeur de I_{sh} peut être commandée près ajustement de la tension de rendement du convertisseur [45] [47].

Le courant injecté shunt peut s'écrire :

$$I_{sh} = (I_L - I_s) = I_L - \frac{V_{th} - V_L}{Z_{th}} \quad (III.28)$$

$$\text{Avec : } I_{sh}/\underline{\tau} = I_L/\underline{-\theta} - \frac{V_{th}}{Z_{th}}/\underline{(\delta - \beta)} + \frac{V_L}{Z_{th}}/\underline{-\beta}$$

La puissance apparente injectée par le D-STATCOM s'écrit :

$$S_{sh} = V_L I_{sh}^* \quad (III.29)$$

D'après l'équation (III.29) On constate que la correction de la chute de tension par le D-STATCOM dépend de la valeur de Z_{th} ou de niveau de court-circuit de la charge. Quand le courant shunt injecté est maintenu en quadrature avec V_L , la correction de la tension désirée peut être réalisée sans l'injection de la puissance réactive dans le système, d'une autre part, quand la valeur de I_{sh} est minimale, la correction de la tension peut être réalisée par un minimum de puissance apparente injectée dans le système.

Le D-STATCOM dispose de deux (02) modes de fonctionnement qui sont le mode d'injection zéro de la puissance active (ZAPI : zéro active power injection) et le mode d'injection minimum de la puissance apparente (MAPI : Minimum Apparent Power Injection).

III.4.2.1. Injection zéro de la puissance active (ZAPI : Zéro Active Power Injection)

Dans ce mode, le D-STATCOM n'injecte aucune puissance active dans le système. Ainsi la puissance active de la charge entière P_L doit être fournie par le circuit équivalent de thevenin de système. La puissance active transitée à travers l'impédance du circuit de thevenin est donnée par l'équation (III.30) en utilisant l'équation (III.7) (Modélisation DVR).

$$P_L = \frac{V_{th}V_L}{Z_{th}} \cos(\beta - \delta) - \frac{V_L^2}{Z_{th}} \cos \beta \quad (III.30)$$

A partir de l'équation (III.30) on peut établir l'équation de l'angle de déphasage, qui est donnée par :

$$\delta = \beta - \cos^{-1} \left[\frac{V_L}{V_{th}} \cos \beta + \frac{Z_{th}P_L}{V_{th}V_L} \right] \quad (III.31)$$

Pour une valeur de l'angle de déphasage δ faisable de, la condition :

$$\frac{V_L}{V_{th}} \cos \beta + \frac{Z_{th}P_L}{V_{th}V_L} \leq 1 \quad (III.32)$$

Doit être vérifiée et l'équation (III.32) devient :

$$V_{th} \geq \left(V_L \cos \beta + \frac{Z_{th}P_L}{V_L} \right) \quad (III.33)$$

Quand l'équation (III.33) est vérifiée, le D-STATCOM peut corriger la chute de tension sans injecter de la puissance active dans le système.

Pour un tel cas, la puissance apparente injectée par le D-STATCOM sera déduite à partir des équations (III.28) et (III.29) respectivement.

Notons que la puissance apparente injectée aura seulement le composant réactif.

III.4.2.2. Injection minimale de la puissance apparente (MAPI : Minimum Apparent Power Injection).

Comme on a cité précédemment que, quand le courant injecté est réduit au minimum, le D-STATCOM peut corriger la chute de tension avec l'injection minimum de puissance apparente dans le système.

Ainsi l'état d'injection minimum de puissance apparente est donné par l'équation (III.34) :

$$\frac{\partial I_{sh}}{\partial \delta} = 0 \quad (III.34)$$

Une expression analytique de I_{sh} peut être obtenue facilement à partir de l'équation (III.28), et la solution de l'équation (III.34).

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{Z_{th} I_L \sin(\beta - \theta)}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta)} \right] \quad (III.35)$$

Ainsi pour une charge donnée, la valeur de δ peut facilement trouvée à partir de l'équation (III.35), une fois que la valeur de δ est connue, l'injection de puissance apparente complexe et le courant complexe du D-STATCOM peut encore être obtenu à partir des équations (III.28) et (III.29), respectivement.

III.4.3.Stratégie de contrôle de D-STATCOM

a. La commande MLI basée sur la mesure de tension. (PWM based Control with only Voltage Measurement):

C'est une commande basée seulement sur la mesure de la tension et aucune mesure de la puissance réactive est exigée, utilise le principe de VSC à base de GTO, proposé par Hojat Hatami et autres [48], elle est simple, plus flexible et de bonne réponse.

b. Stratégie de commande adaptative pour DSTATCOM (Adaptive Control Strategy for DSTATCOM) :

Basée sur le système immunitaire artificiel (Artificial Immune System : AIS) présenté par Mitra et Venayagamoorthy [49]. Dans leur proposé, les paramètres optimaux du contrôleur sont obtenus d'abord avec l'utilisation de l'algorithme d'optimisation Swarm de particules (particle swarm optimization algorithm).

c. Méthode de control en tension ou en courant (D-STATCOM operation in voltage or current control mode):

Ledwich et Ghosh [50], a discuté la topologie et la commande d'un compensateur statique de distribution (D-STATCOM) qui peut être fonctionné avec souplesse dans les modes de commande.

- En mode de commande en tension, le D-STATCOM peut renforcer la tension dans le réseau de distribution et compense le déséquilibre.
- En mode de commande en courant, il peut résoudre la distorsion du courant causée par la charge ainsi le courant compensé par la charge devient sinusoïdal équilibré.

L'algorithme proposé fonctionne correctement indépendamment de déséquilibre et déformations harmoniques dans des courants de charge ou des tensions de source.

d. Le Tableau de consultation et l'énergie superbe de condensateur (the lookup table and super capacitor energy storage system based DSTATCOM controlling):

Ce contrôle est basé sur l'étude des systèmes de stockage de D-STATCOM proposé par Amin Nazarloo et autre [51], suite à cette méthode ils ont déduit que premièrement le D-STATCOM et le condensateur de stockage d'énergie sont intégrés. Et deuxièmement l'insertion de PI sert pour détecter le gain proportionnel approprié pour n'importe quel défaut spécifique. Vu ce fait que tous les types de défauts peuvent se produire dans le système de distribution, le contrôleur doit pouvoir atténuer n'importe quels types de chute de tension. L'intégration et la commande des systèmes de stockage de l'énergie, tels que le système de stockage de l'énergie de condensateur (SCESS) dans n D-STATCOM est développé pour atténuer de tels problèmes, augmenter le transit de puissance et améliore les systèmes de distribution.

d. Contrôle de D-STATCOM basé sur le système de batterie de stockage de l'énergie : (Battery energy storage system based D-STATCOM controlling) :

Le système de stockage d'énergie en batterie (BESS) : est une stratégie de contrôle pour les systèmes énergétique éolienne qui utilise un D-STATCOM pour le maintien du profil de la tension, présenté par Ch. Siva Koti Reddy et Dr.P.Linga Reddy [52].

III.5. Modélisation de l'UPQC

III.5.1. Modélisation d'UPQC en régime permanent

Le schéma unifilaire de deux JDB d'un système de distribution et son diagramme de phase sont représentés sur les figures Fig.III.6 et Fig.III.7 respectivement. En général, la tension au JDB (V_{0i}) est inférieure à 1pu et nous voulons que la tension de JDB (V_{0j}) soit égale à l'unité, et pour cela on utilise l'UPQC pour la compensée [53].

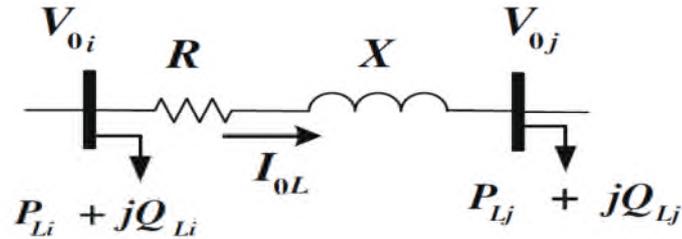


Fig.III.6 : Schéma unifilaire de deux JDB d'un système de distribution

A partir de la Fig.III.6 les relations entre tension et courant peuvent être exprimées par :

$$V_{0j}/\underline{\alpha}_0 = V_{0i}/\underline{\delta}_0 - (R + jX)I_{0L}/\underline{\theta}_0 \quad (\text{III.36})$$

Où $V_{0j}/\underline{\alpha}_0$ est la tension de JDB j avant compensation,

$V_{0i}/\underline{\delta}_0$ Est la tension de JDB i avant compensation,

$Z = R + jX$ Est l'impédance entre les JDB i et j, $(I_{0L}/\underline{\theta}_0)$: est le courant dans la ligne avant compensation.

$V_{0i}/\underline{\delta}_0$ et $V_{0j}/\underline{\alpha}_0$, $I_{0L}/\underline{\theta}_0$: Ces tensions et courant sont obtenus par dérivation du flux de charge, Aucune puissance active n'est échangée par les compensateurs série et shunt, en revanche le compensateur shunt injecte un courant et une puissance réactive et d'une autre part le compensateur série injecte une tension et une puissance réactive.

Le schéma de principe de l'UPQC installé entre les jeux de barres i et j pour la régulation de tension est représenté dans la Figure(III.7)

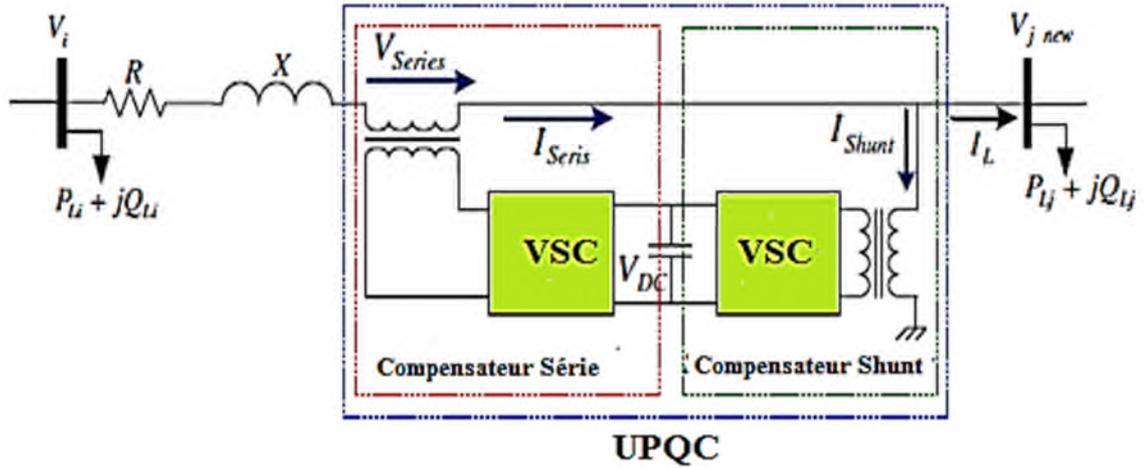


Fig.III.7 : Modèle typique de l'UPQC

Durant son fonctionnement la tension V_{serie} est en quadrature avec V_{jnew} . D'après la figure.III.7

$$V_{jnew}/\alpha_{new} = V_i/\delta - (R + jX)I_L/\theta - (R + jX)I_{shunt} / (\alpha_{new} + \frac{\pi}{2}) + \vec{V}_{series} \quad (III.37)$$

Où V_{jnew}/α_{new} est la tension aux jeux de barre j après compensation par UPQC.

I_L/θ : est le courant de la ligne après l'insertion de l'UPQC.

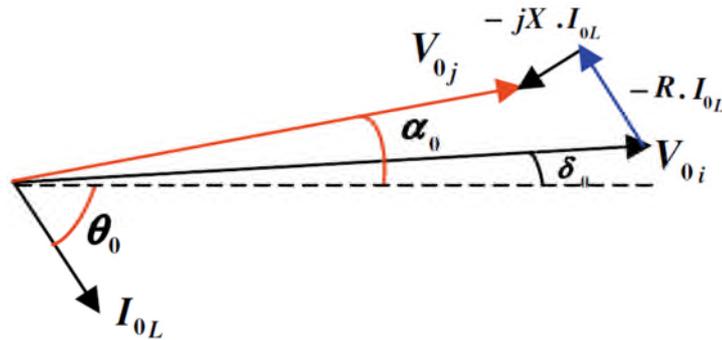


Fig.III.8 : Diagramme de phase des tensions et courants du schéma unifilaire représenté dans la fig.III.6.

Où V_{jnew}/α_{new} est la tension de jeux de barre j après compensation par UPQC,

I_L/θ : est le courant dans la ligne après l'installation d'UPQC,

$I_{shunt}/(\alpha_{new} + \frac{\pi}{2})$: est le courant injecté par compensateur shunt

\vec{V}_{series} : est la tension injectée par le compensateur série,

$$\vec{I}_{series} = \vec{I}_L + \vec{I}_{Shunt} \tag{III.38}$$

Avec :

$$\vec{I}_L = I_L / \underline{\theta}$$

$$\vec{I}_{Shunt} = I_{Shunt} / (\underline{\alpha}_{new} + \frac{\pi}{2})$$

$V_i / \delta E$ et $I_L / \underline{\theta}$ sont des dérivés des calculs de flux de charge, deux situations peuvent se produire pour \vec{I}_{series} .

- Si \vec{I}_{series} a un angle de retard, alors l'angle de \vec{V}_{series} s'exprime en équation (III.39).

$$\angle V_{series} = \angle I_{series} + \frac{\pi}{2} \quad \angle I_{series} \leq 0 \tag{III.39}$$

- si \vec{I}_{series} a un angle d'avance, alors l'angle de \vec{V}_{series} sera exprimé en équation (III.40).

$$\angle V_{series} = \angle I_{series} - \frac{\pi}{2} \quad \angle I_{series} > 0 \tag{III.40}$$

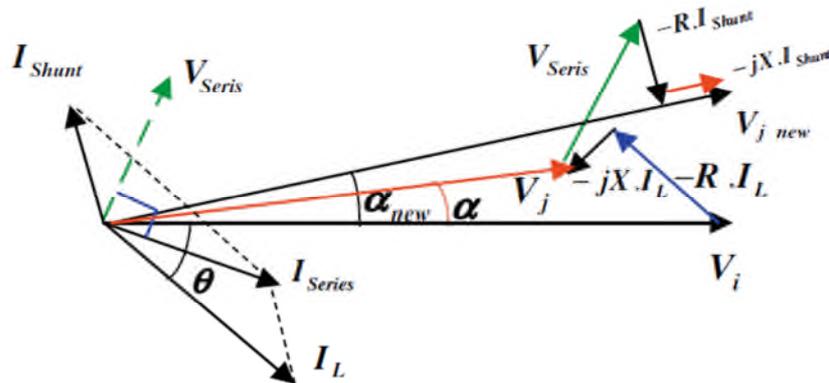


Fig.III.9 : Diagramme de phase des tensions et courants du l'UPQC représenté par Fig.III.7.

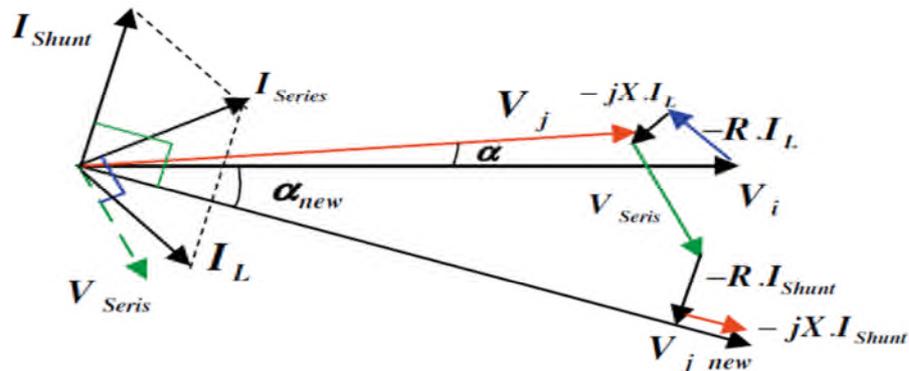


Fig. III.10 : Diagramme des tensions et courants du système représenté sur la Fig.III.7 lorsque I_{serie} est en avance

Séparant les parties réelles et imaginaires de l'équation. (III.37), nous obtenons deux équations à trois inconnues ($I_{shunt}, \alpha_{new}, V_{série}$), par conséquent, il y a une infinité de solutions pour les inconnues. Pour la modélisation de l'UPQC aux jeux de barre j , on suppose que l'estimation de la puissance réactive injectée par le compensateur shunt, c'est à dire Q_{shunt} , est considérée comme une valeur constante négative dans le modèle de charge dans le JDB j (Fig.III.11). Ensuite, le nouvel angle de phase de la tension dans le JDB j , c'est à dire α_{new} , et la tension série injectée par le compensateur sont déterminées.

Par conséquent, les Fig.III.8 et Figure (III.9) peuvent être exprimées par les Fig.III.10 et Fig.III.11, respectivement dans la méthode de diagramme de phase.

D'après la Figure (III.11)

$$V_{series}/\underline{\rho} = V_{jnew}/\underline{\alpha_{new}} + (R + jX)I'_L/\underline{\theta'} - V_i/\underline{\delta} \tag{III.41}$$

Où ρ est déterminée à partir de l'équation. (III.42) ou l'équation. (III.43) comme illustré ci-dessous :

$$\rho = \frac{\pi}{2} + \theta' , \theta' \leq 0 \tag{III.42}$$

$$\rho = -\frac{\pi}{2} + \theta' , \theta' > 0 \tag{III.43}$$

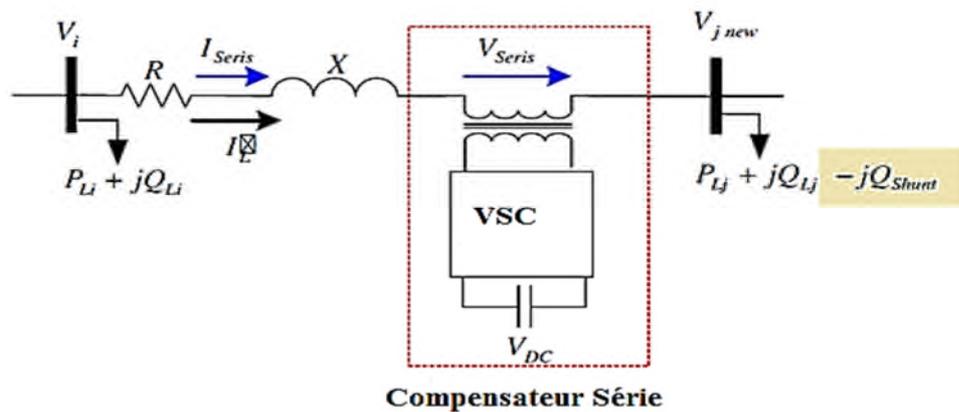


Fig. III.11 : Schéma unifilaire de deux JDB d'un système de distribution en tenant compte de l'UPQC.

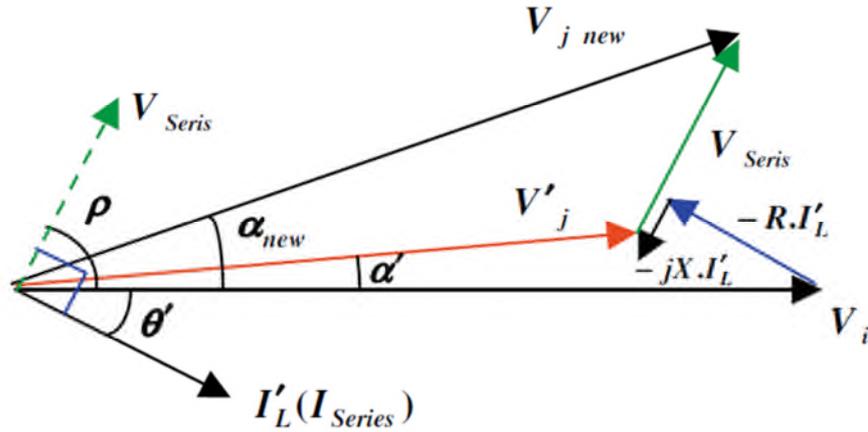


Fig.III.12 : Diagramme de phase des tensions et courants du système représenté sur la Fig.III.11.

Lorsque $I_{série}$ a un angle de retard.

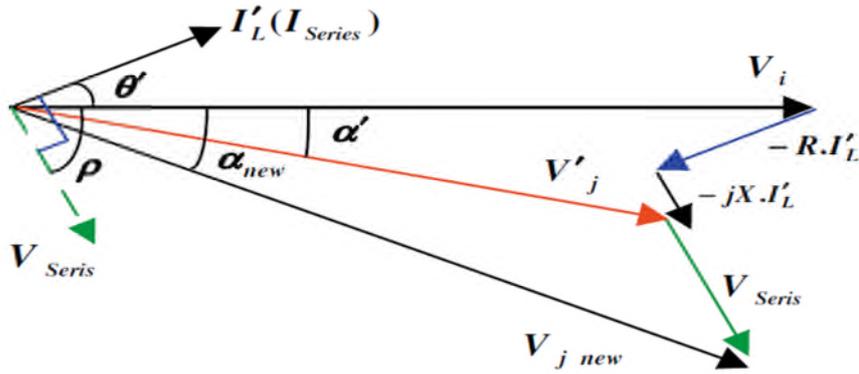


Fig.III.13. Diagramme de phase des tensions et courants du système représenté sur la Fig.III.11.

Lorsque $I_{série}$ est en avance d'angle (par rapport à V_i).

Séparant les parties réelles et imaginaires de l'équation. (III.41) qui est donnée par :

$$V_{series} \cos \rho = V_{jnew} \cos \alpha_{new} + \text{Real}(ZI'_L/\underline{\theta}') - \text{Real}(V_i/\underline{\delta}) \quad (\text{III.44})$$

$$\text{Et } V_{SSVR} \sin \rho = V_{jnew} \sin \alpha_{new} + \text{Imag}(ZI'_L/\underline{\theta}') - \text{Imag}(V_i/\underline{\delta}) \quad (\text{II.45})$$

Les équations. (III.46) et (III.47) sont obtenus à partir d'équations. (III.44) et (III.45) respectivement,

$$a_1 = \cos \rho, a_2 = \sin \rho, b = V_{jnew},$$

$$c_1 = \text{Real}(ZI'_L/\underline{\theta}') - \text{Real}(V_i/\underline{\delta}), c_2 = \text{Imag}(ZI'_L/\underline{\theta}') - \text{Imag}(V_i/\underline{\delta})$$

$$x_1 = V_{series}, x_2 = \alpha_{new},$$

$$a_1 x_1 = b \cos x_2 + c_1 \quad (\text{III.46})$$

$$a_2 x_2 = b \sin x_2 + c_2 \quad (\text{III.47})$$

Avec a_1, a_2, c_1 et c_2 sont des constantes et b est l'amplitude de la tension compensée.

x_1, x_2 sont des variables.

Avec la réorganisation des équations. (III.46) et (III.47) on obtient :

$$\cos x_2 = \frac{a_1 x - c_1}{b} \quad (\text{III.48})$$

$$\text{Et } \sin x_2 = \frac{a_2 x - c_2}{b} \quad (\text{III.49})$$

$$\text{On considère que } \left(\frac{a_1 x - c_1}{b}\right)^2 + \left(\frac{a_2 x - c_2}{b}\right)^2 = 1 \quad (\text{III.50})$$

On fait la résolution de l'équation (III.50) on obtient (III.51)

$$\frac{a_1^2 + a_2^2}{b^2} x_1^2 - 2 \frac{a_1 c_1 + a_2 c_2}{b^2} x_1 + \frac{c_1^2 + c_2^2}{b^2} = 1 \quad (\text{III.51})$$

Par conséquent :

$$\Delta = B^2 - 4AC$$

$$x_1 = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A} \quad (\text{III.52})$$

$$\text{Avec : } A = \frac{a_1^2 + a_2^2}{b^2}, \quad B = -2 \frac{a_1 c_1 + a_2 c_2}{b^2}, \quad C = \frac{c_1^2 + c_2^2}{b^2}$$

Deux solution pour $x_1 = V_{series}$ et ces racines sont examinées dans les conditions aux limites suivantes dans les résultats du flux de charge afin de choisir la solution entre ces deux racines.

$$b = V_{jnew} = V_{0j} x_1 = V_{series} = 0$$

Après avoir testé ces conditions sur les résultats du flux de charge, la bonne réponse pour x_1 est sélectionné comme :

$$x_1 = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A} \quad (\text{III.53})$$

Puis, en utilisant l'équation. (III.48), (III.49), $x_2 = \alpha_{new}$ peut être définie comme ci-dessous :

$$x_2 = \cos^{-1} \left(\frac{a_1 x - c_1}{b} \right) \quad (\text{III.54})$$

$$\text{Ou } :x_2 = \sin^{-1} \left(\frac{a_2 x - c_2}{b} \right) \quad (\text{III.55})$$

Enfin, la puissance réactive injectée par le compensateur série peut être s'exprimée par l'équation. (III.56)

$$j \cdot Q_{SSVR} = \vec{V}_{SSVR} \cdot \vec{I}_L^* \quad (\text{III.56})$$

$$\text{Avec } : \vec{V}_{series} = V_{series} / \underline{\rho} \quad , \vec{I}_L' = I_L' / \underline{\theta}'$$

où le symbole "*" désigne le conjugué complexe de la variable.

III.5.2. Modélisation d'UPQC dans son estimation maximum d'injection de puissance réactive

On suppose que l'amplitude de la tension dans le JDB j $V_{j_{new}}$, est compensée à la valeur spécifiée (par exemple 1 p.u) et ensuite l'angle de phase de tension dans le noeud j , la tension injectée et de la puissance réactive de compensateur série sont dérivés des equations (III.53), (III.54) et (III.56), respectivement. Toutefois, lorsque la puissance réactive calculée par (III.56) est supérieure à la valeur maximale de la puissance réactive de compensation série, l'amplitude maximale de la tension injectée en série par le compensateur série peut être exprimée comme:

$$V_{series \max} = \frac{Q_{series \max}}{I_L'} \quad (\text{III.57})$$

Sous cette condition, la valeur de la tension compensée ne peut pas être réglée dans la valeur spécifiée .

Par conséquent, la nouvelle amplitude de tension ($V_{j_{new}}'$) et l'angle de phase (α'_{new}) compensée au noeud j sont calculées en utilisant les equations (III.41) et (III.57) comme exprimé ci-dessous:

$$V_{j_{new}}' / \underline{\alpha}'_{new} = V_i / \underline{\delta} - (R + jX) I_L' / \underline{\theta}' + V_{series \max} / \underline{\rho} \quad (\text{III.58})$$

III.6.Conclusion

Ce chapitre expose le fonctionnement et la modélisation des quatre dispositifs déjà étudié pour le maintien du profil de la tension (par correction de la chute de tension), Concernant le DVR et le D-STATCOM, leurs fonctionnement se résume en deux modes, le mode zéro d'injection de la puissance active (injection du composant réactif de la puissance apparente) et le mode d'injection minimum de la puissance apparente.

Et pour l'IDVR, son fonctionnement dépend de fonctionnement de DVR de référence (DVR1), ce dernier qui opère dans deux modes, le mode de pré-chute technique d'augmentation de la tension d'alimentation et le mode de la technique d'optimum d'énergie. L'UPQC est modélisé en régime permanent et dans son estimation maximum d'injection de puissance réactive.

Une simulation d'un dispositif serie (DVR) et shunt (D-STATCOM) à partir d'un programme en langage MATLAB ainsi l'influence de quatre paramètres sur leurs comportement dans les deux modes de fonctionnement à fait l'objet du dernier chapitre.

IV.1.Introduction

Afin d'évaluer l'utilité et la capacité de DVR et D-STATCOM pour la correction de la chute de tension (Amélioration de la qualité d'énergie électrique) et les changements qu'ils apportent dans le réseau électrique de distribution ainsi l'influence de quelques paramètres sur leurs fonctionnement, Un programme en langage Matlab nous permet de faire cette étude par une simulation avec MATLAB®, à savoir leurs modes de fonctionnement ZAPI et MAPI. L'influence de quatre paramètres à savoir l'influence de niveau de court-circuit S_{CC} , de la charge (SL), du facteur de puissance et de la longueur de la ligne (l) sur ces D-FACTS seront discutés et interprétés.

IV.2. Topologie du réseau étudié avec DVR et D-STATCOM

Le système simple de figure(IV.1) représente le lieu d'insertion de DVR ou D-STATCOM dans le réseau électrique de distribution, utilisé pour montrer l'efficacité de DVR et D-STATCOM pour le maintien du profil de la tension en agissant sur la correction des chutes de tension.

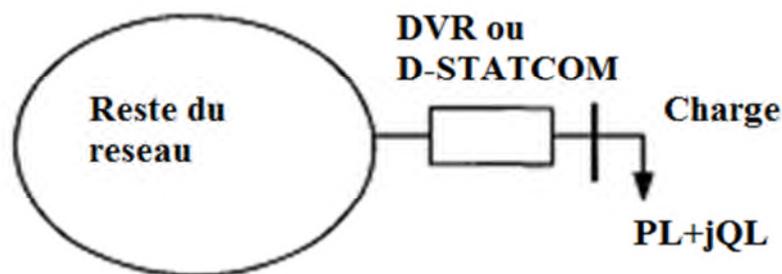


Fig.IV.1 : Emplacement de D-FACTS dans le réseau électrique de distribution.

IV.3. Données du réseau étudié avec DVR et D-STATCOM

On considère que l'impédance du système (Z_{th}) à 0.1 pu son facteur de puissance égale à 0.8, la puissance apparente de court-circuit S_{CC} coté de la charge est égale à 10 pu avec un rapport $(X/R)=2$. On suppose que la tension de la ligne coté récepteur sera maintenue à la valeur de la tension d'entrée (pu), et la tension de charge $V_L = 1$ pu

IV.4. Résultats de simulation de DVR et D-STATCOM et interprétations.

a. DVR

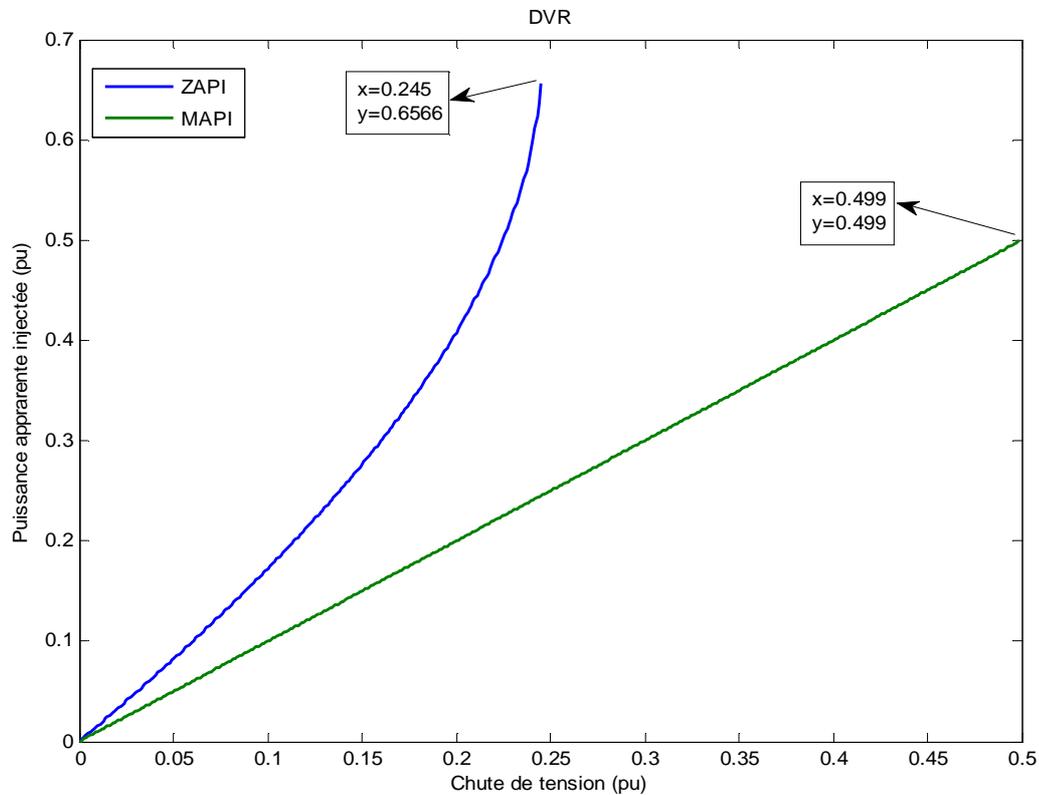


Fig.IV.2 : Puissance apparente injectée en fonction de la chute de tension pour les deux modes ZAPI et MAPI de DVR.

Interprétation des courbes

La figure (IV.2) représente les deux modes de fonctionnement du DVR (ZAPI et MAPI), elle décrit la variation de la puissance apparente injectée en fonction de la chute de tension.

Pour le mode MAPI, la puissance apparente injectée varie linéairement avec la variation de la chute de tension i.e. la puissance apparente injectée (S_{inj}) augmente avec l'augmentation de la chute de tension. Cependant pour le mode ZAPI, (S_{inj}) augmente rapidement avec l'augmentation de chute de tension.

On constate d'après la figure IV.2 que la chute de tension maximale qui peut être corrigée par le DVR (mode ZAPI) sans aucune injection de puissance active est égale à 0.245 pu (limite de compensation), ainsi pour des chutes de tension < 0.245 pu la régulation de tension est obtenue par

une injection plus importante de la puissance apparente (comparé au mode MAPI) en revanche pour des chutes de tension > 0.245 pu le DVR est limité (limite de compensation de la chute de tension). Pour ce mode (MAPI) la puissance apparente injectée dépend de la valeur de l'impédance de la ligne (Z_{th}). Pour une chute de tension donnée la puissance apparente injectée par DVR augmente avec l'augmentation de (Z_{th}).

b. D-STATCOM

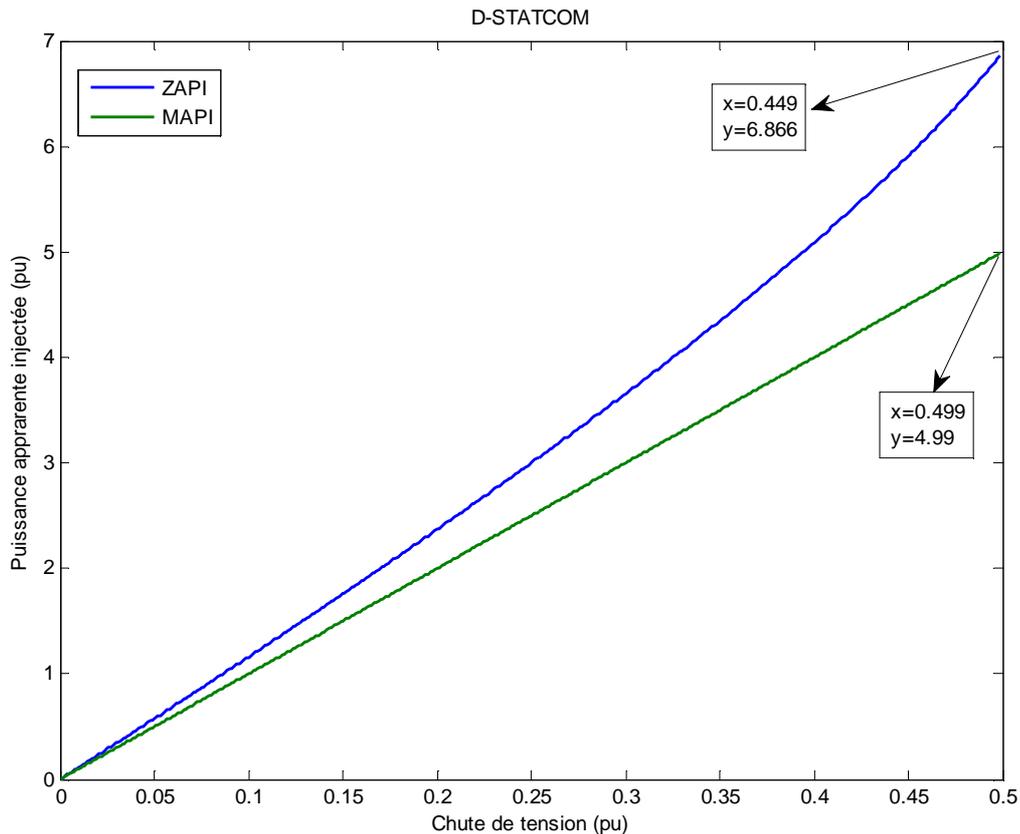


Fig.IV.3 : Puissance apparente injectée en fonction de la chute de tension pour les deux modes ZAPI et MAPI de D-STATCOM.

La Figure (VI.3) représente la variation de la puissance apparente injectée par D-STATCOM en fonction de la chute de tension dans les deux modes de son fonctionnement (ZAPI et MAPI).

Dans le mode MAPI, la puissance apparente injectée (S_{inj}) varie linéairement avec la variation de la chute de tension i.e. S_{inj} augmente avec l'augmentation de la chute de tension.

Pour le deuxième mode ZAPI, la variation est aussi linéaire mais avec un niveau de puissance apparente injectée légèrement plus grande i.e. pour une valeur donnée d'une chute de tension, l'injection de la puissance apparente de mode ZAPI est supérieure à celle de mode MAPI.

c. Comparaison entre le DVR et le D-STATCOM

On comparant avec les résultats obtenus précédemment (DVR-ZAPI) et ceux du D-STATCOM-ZAPI, on constate que le D-STATCOM peut corriger des chutes de tension plus grandes que le DVR (D-STATCOM corrige des chute de tension multiple de 2 que celle corrigé par DVR) et pour l'injection de la puissance apparente on constate que celle injectée par D-STATCOM-MAPI est très importante de celle injectée par DVR-MAPI.

IV.5. Etude de l'influence des différents paramètres du réseau sur le DVR et le D-STATCOM

IV.5.1. Données de réglage des variables du réseau pour l'étude de l'influence de quelques paramètres.

Dans notre étude de l'influence de quelques paramètres sur le DVR et D-STATCOM, nous allons fixer un seul paramètre et on va faire varier d'autres.

IV.5.1. Influence de niveau de court-circuit sur le DVR et D-STATCOM

Pour des valeurs de, $S_L = 1 pu$, $FP=0.8$ et $l=0$ (longueur de la ligne) on fait varier la puissance apparente de court-circuit de 5pu jusqu'à 20 pu avec un pas de 5pu et les résultats obtenus pour les deux modes de fonctionnement de DVR (ZAPI et MAPI) sont représentés dans les figures (IV.4, IV .5, IV.6 et IV.7) ainsi ,les résultats obtenus sont classés dans les annexes A1 et A2.

a. DVR

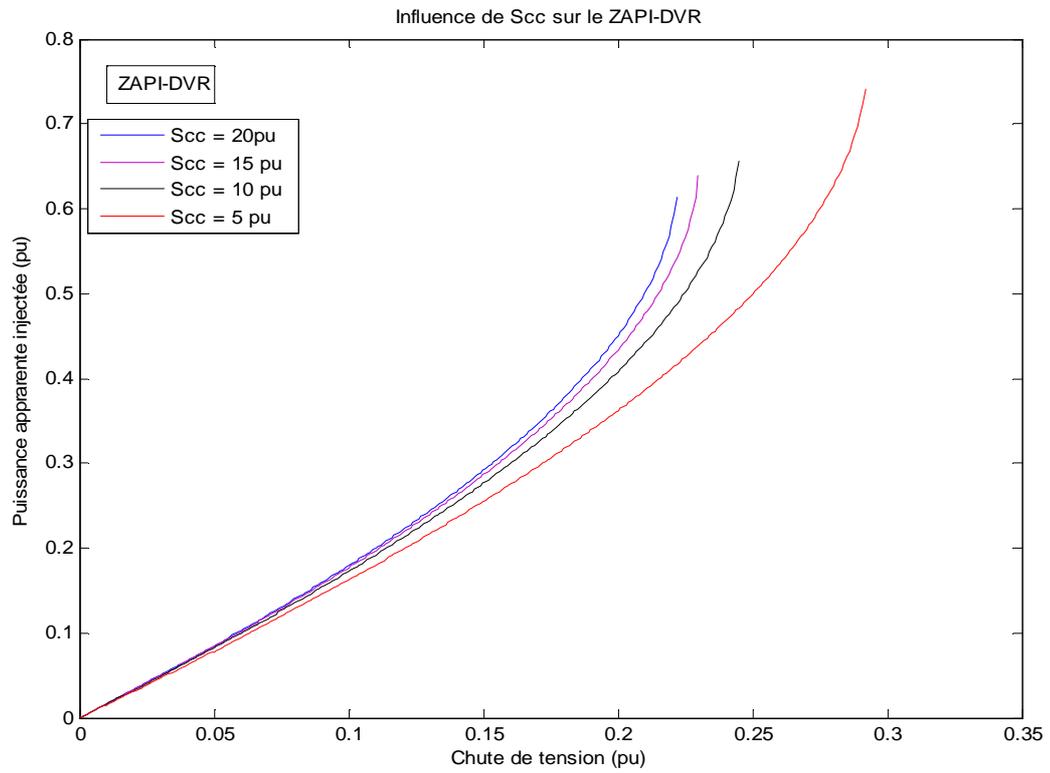


Fig. IV.4 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur ZAPI-DVR.

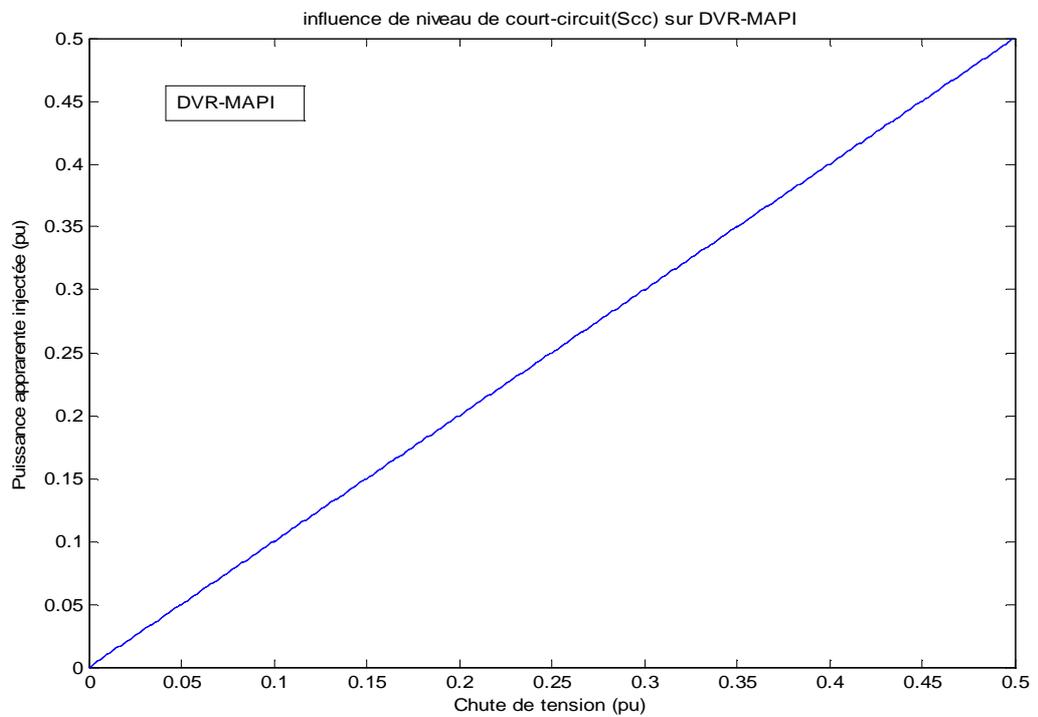


Fig. IV.5 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur MAPI-DVR.

Interprétation des courbes :

D'après la figure. (IV.4), on constate que la puissance apparente injectée par le DVR-ZAPI diminue avec l'augmentation de la chute de tension i.e. le mode ZAPI-DVR est efficace dans la correction de la chute de tension pour des niveaux de court-circuit minimaux.

Pour des chutes de tensions maximales, l'injection de la puissance apparente est maximale à condition que le niveau de court-circuit soit minimal.

Pour le mode MAPI, la courbe IV.5 de la variation de la puissance apparente injectée en fonction de la variation de la chute de tension est constante quel que soit le niveau de court-circuit i.e. le niveau de court-circuit (Scc) n'a pas d'influence sur le comportement de mode MAPI-DVR.

b. D-STATCOM

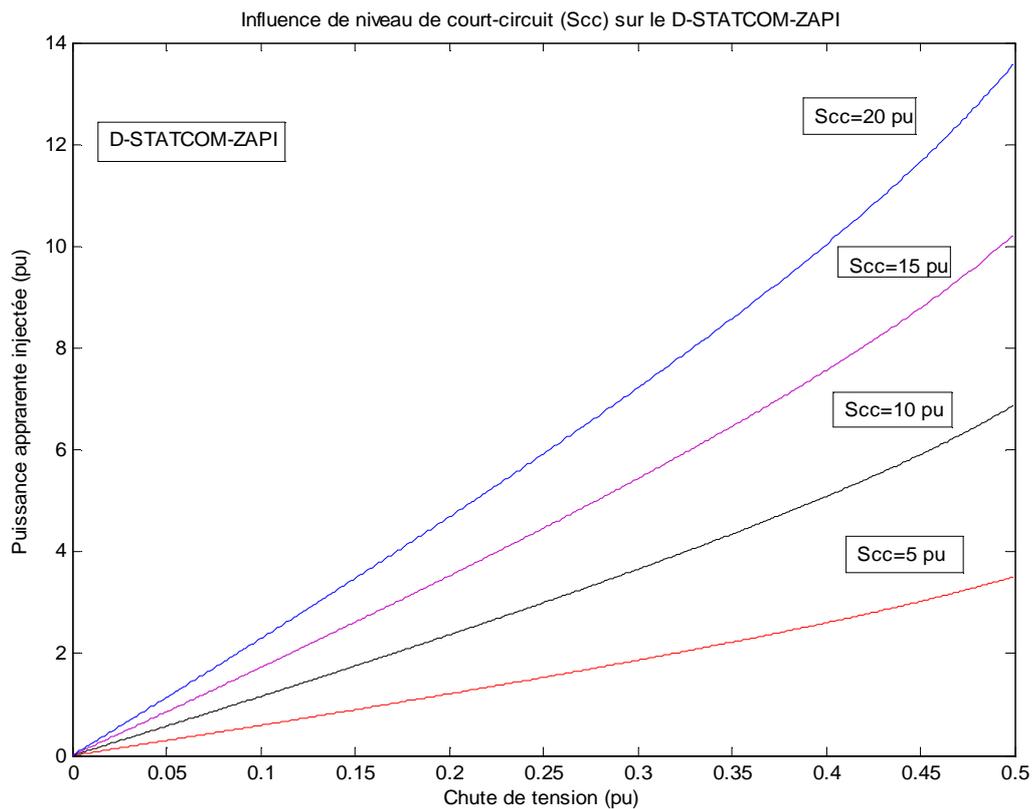


Fig. IV.6 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur ZAPI-D-STATCOM

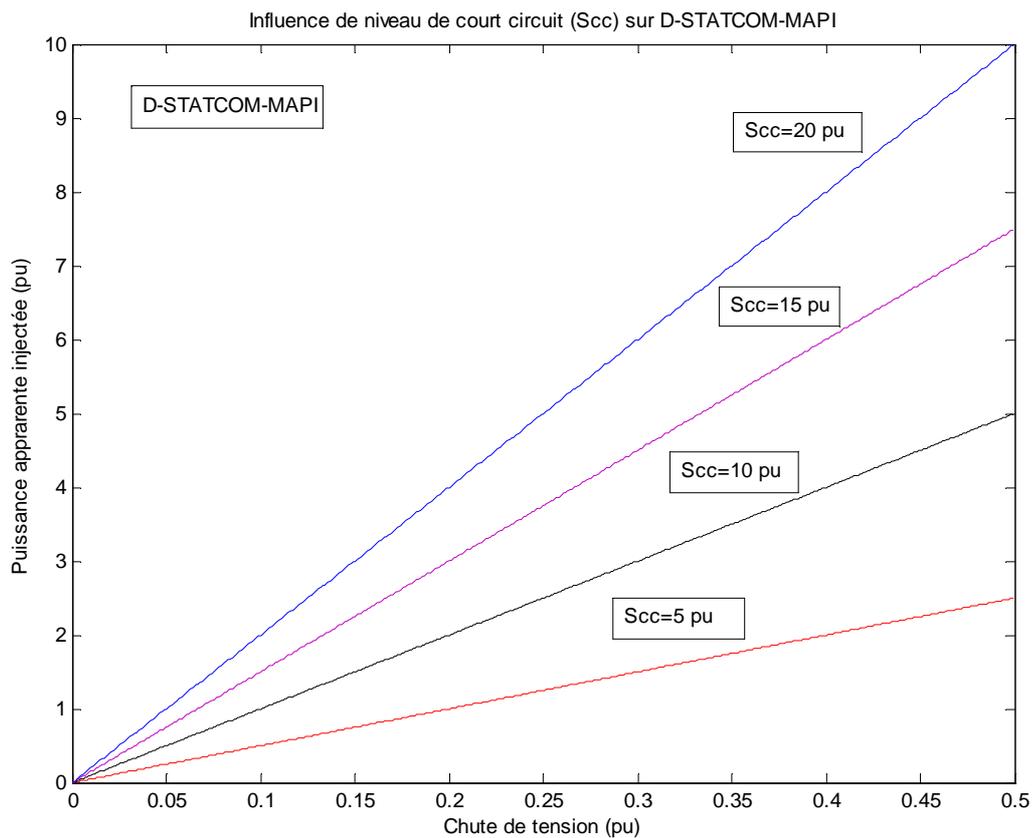


Fig.IV.7 : Influence de niveau de court-circuit(Scc) sur MAPI-D-STATCOM

Interprétation des courbes :

D'après les figures (IV.6) et (IV.7), on constate que la puissance apparente injectée par le D-STATCOM augmente avec l'augmentation du niveau de court-circuit, cette dernière (S_{inj}) est plus importante dans le mode ZAPI que dans le mode MAPI pour une chute de tension définie. Donc le D-STATCOM est efficace pour la correction des chutes de tension dans des réseaux électriques de distribution présentant des niveaux de courts circuits important.

IV.5.2. Influence de la charge (S_L) sur le DVR et D-STATCOM

Pour des valeurs de, $S_{cc} = 10$ pu , $FP=0.8$ et $l=0$ (longueur de la ligne), on fait varier la charge (S_L) de 0.7 pu jusqu'à l'unité (1pu) avec un pas de 0.1pu et les figures obtenues pour les deux modes de fonctionnement(ZAPI et MAPI) pour DVR et D-STATCOM sont représentées par (IV. 8, IV.9, IV.10 et IV.11) et les résultats sont regroupés dans les annexes A3et A4.

a. DVR

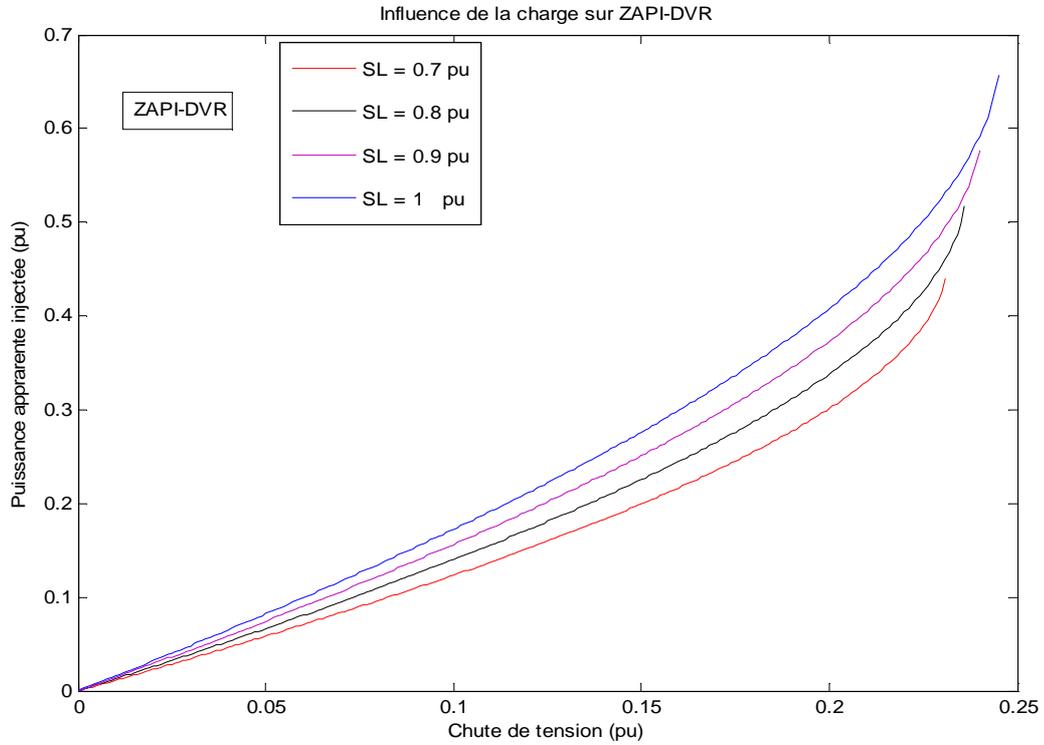


Fig. IV.8 : Influence de la charge (SL) sur ZAPI-DVR.

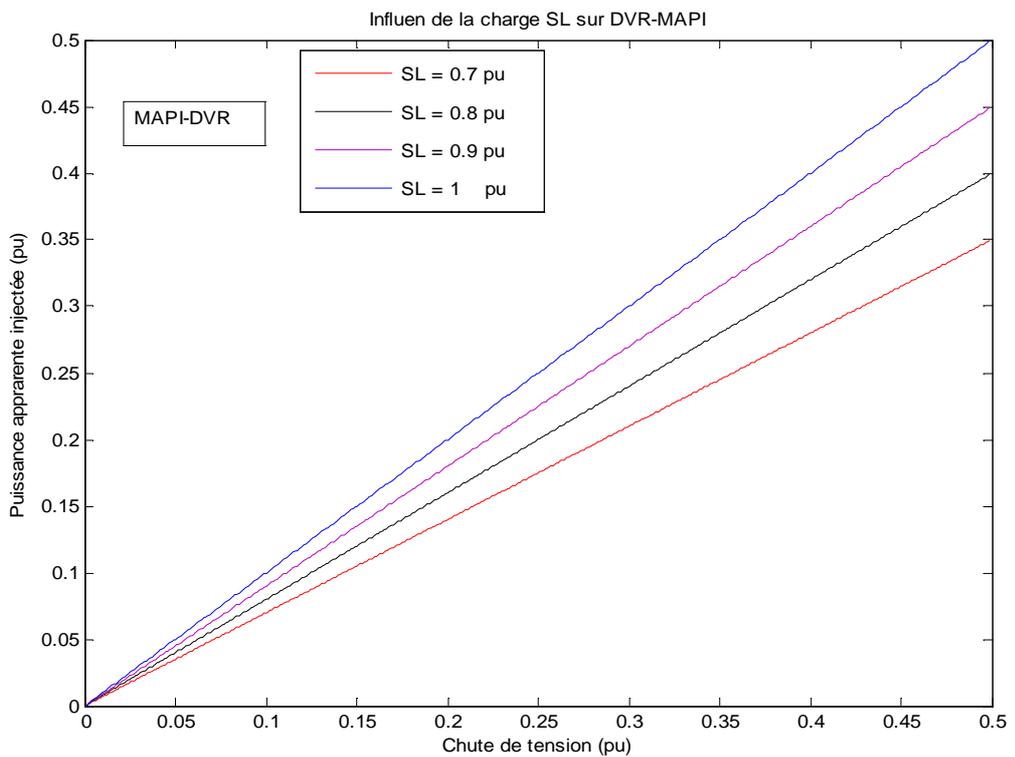


Fig. IV.9 : Influence de la charge (SL) sur MAPI-DVR.

Interprétation des courbes :

D'après les figures (IV. 8) et (IV.9), on constate que la puissance apparente injectée par le DVR augmente avec l'augmentation de la valeur de la charge autrement dit : Pour une valeur d'une chute de tension donnée, la puissance apparente injectée (S_{inj}) par le DVR augmente. La charge influe sur le comportement de DVR pour la correction de la chute de tension, cette remarque est valable pour les deux modes de fonctionnement de DVR.

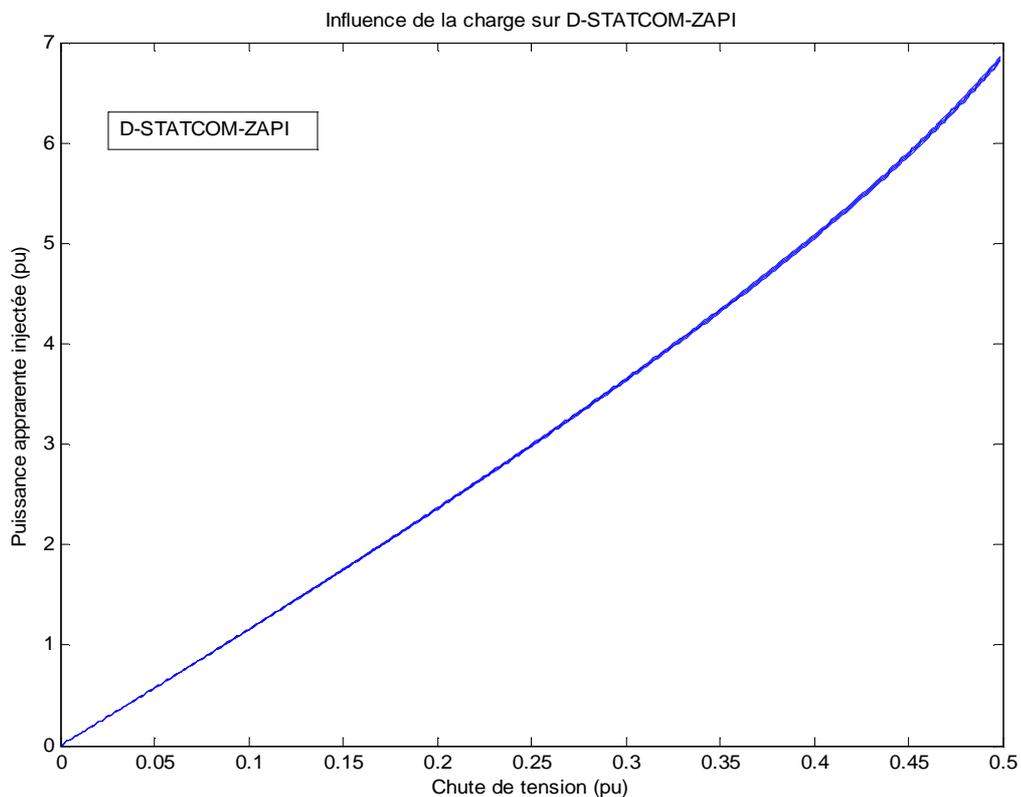
b. D-STATCOM

Fig.IV.10 : Influence de la charge (SL) sur ZAPI-D-STATCOM

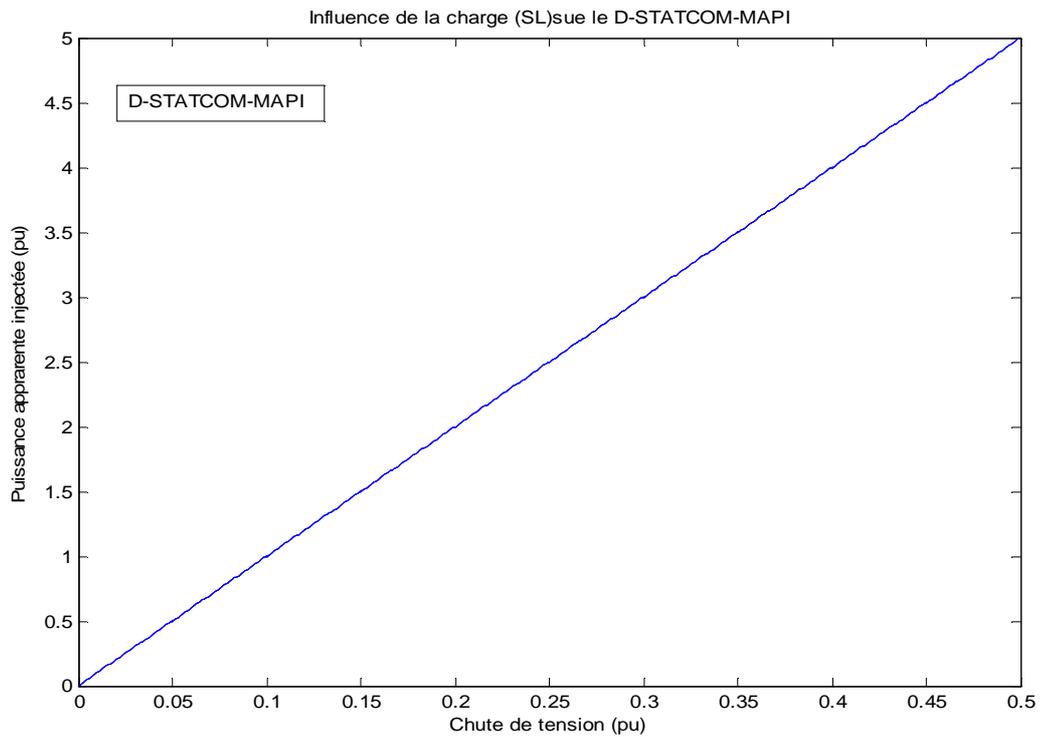


Fig. IV.11 : Influence de la charge (SL) sur MAPI-D-STATCOM

Interprétation des courbes :

Si on fait une comparaison des courbes (IV.10) et (IV.11) avec les courbes (IV.3) et (IV.4) déjà trouvées, on conclut que la charge S_L n'a pas d'influence sur les deux modes de fonctionnement de D-STATCOM à savoir le mode ZAPI et MAPI.

IV.5.3. Influence de facteur de puissance (FP) sur le DVR et D-STATCOM

Pour des valeurs de $S_{cc} = 10 \text{ pu}$, $S_L = 1 \text{ pu}$, $l=0$ (longueur de la ligne), on fait varier le facteur de puissance de 0.75 jusqu'à l'unité (1pu) avec un pas de 0.05 et les figures obtenues pour les deux modes de fonctionnement (ZAPI et MAPI) pour DVR et D-STATCOM sont représentées par les figures IV.12, IV.13, IV.4 et IV.15 et les résultats de calculs par Matlab sont regroupés dans les annexes A5 et A6.

a. DVR

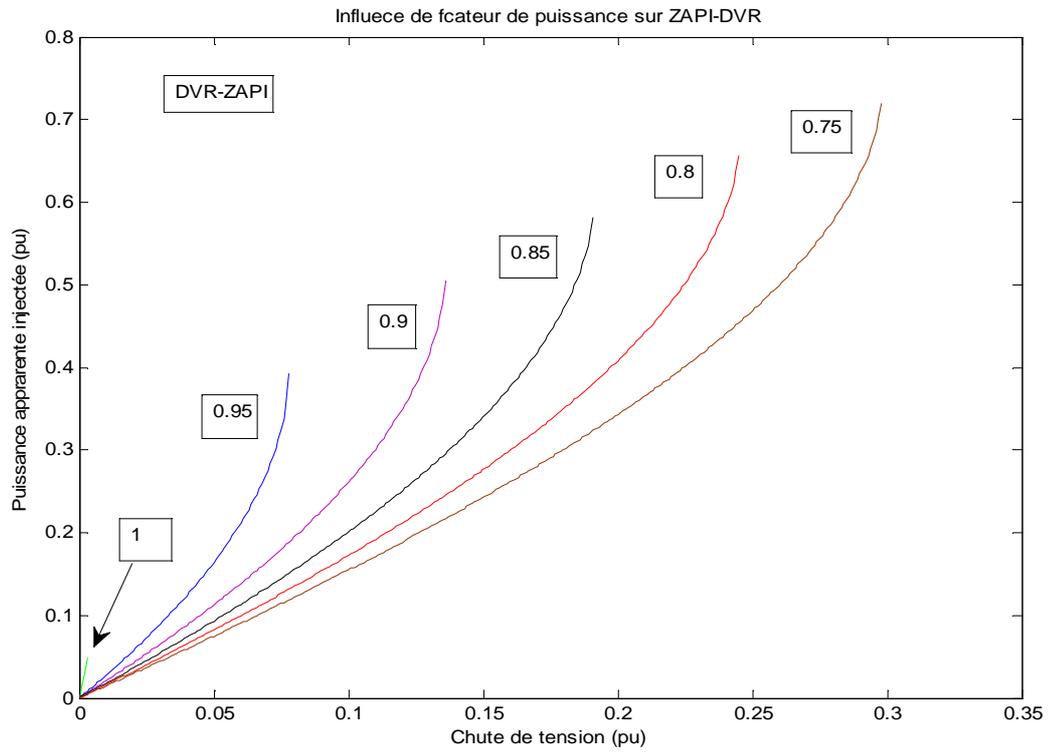


Fig.IV.12 : Influence du facteur de puissance (FP) sur ZAPI-DVR

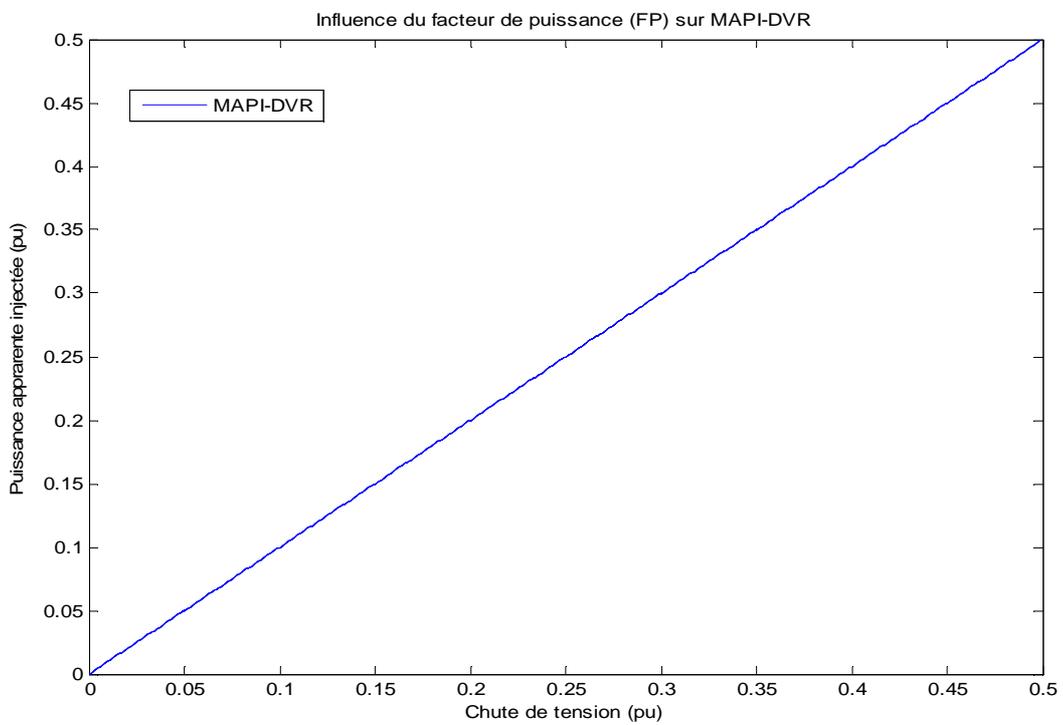


Fig. IV.13 : Influence du facteur de puissance (FP) sur MAPI-DVR.

Interprétation des courbes :

D'après les figures IV.12 et IV.13, on remarque que le comportement de DVR dans le mode MAPI est indépendant de la valeur du facteur de puissance par contre le mode MAPI est dépendant de la valeur du facteur de puissance i.e. pour un mauvais facteur de puissance la correction de la chute de tension par le mode ZAPI, le DVR injecte une puissance très importante .donc Le DVR est conseillé pour des réseaux électriques de distribution présentant des mauvais facteurs de puissance.

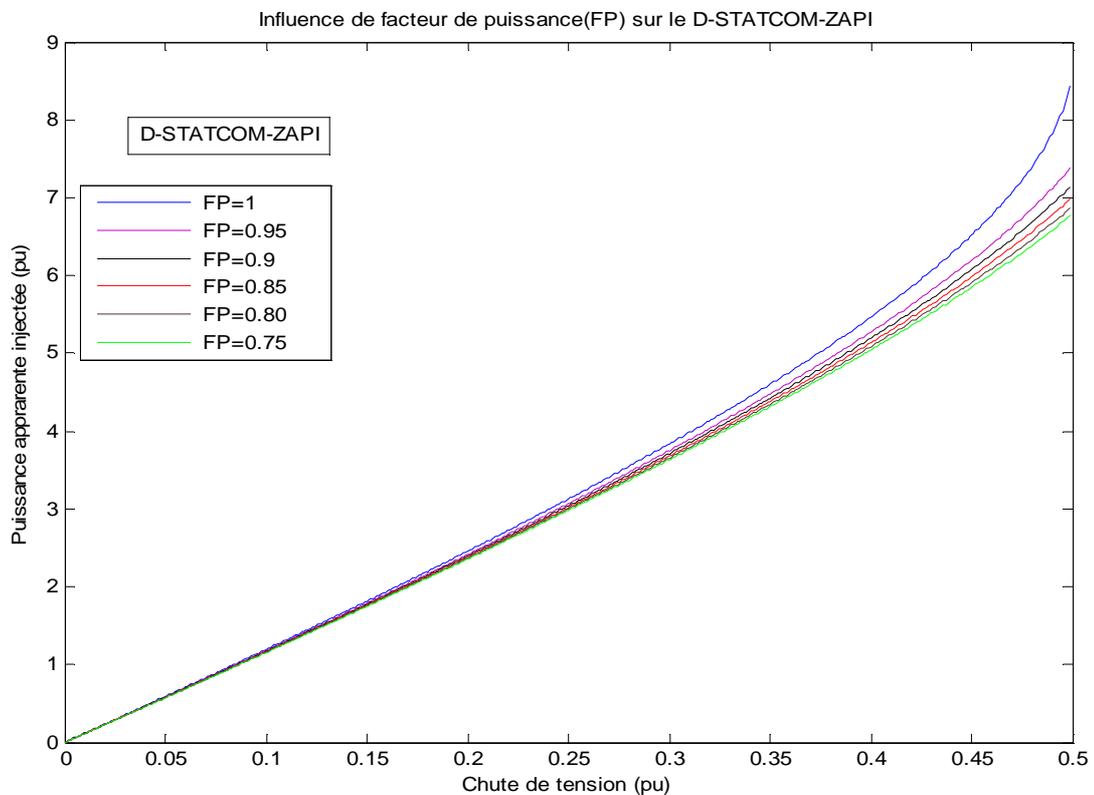
b. D-STATCOM

Fig. IV.14 : Influence du facteur de puissance (FP) sur ZAPI-D-STATCOM

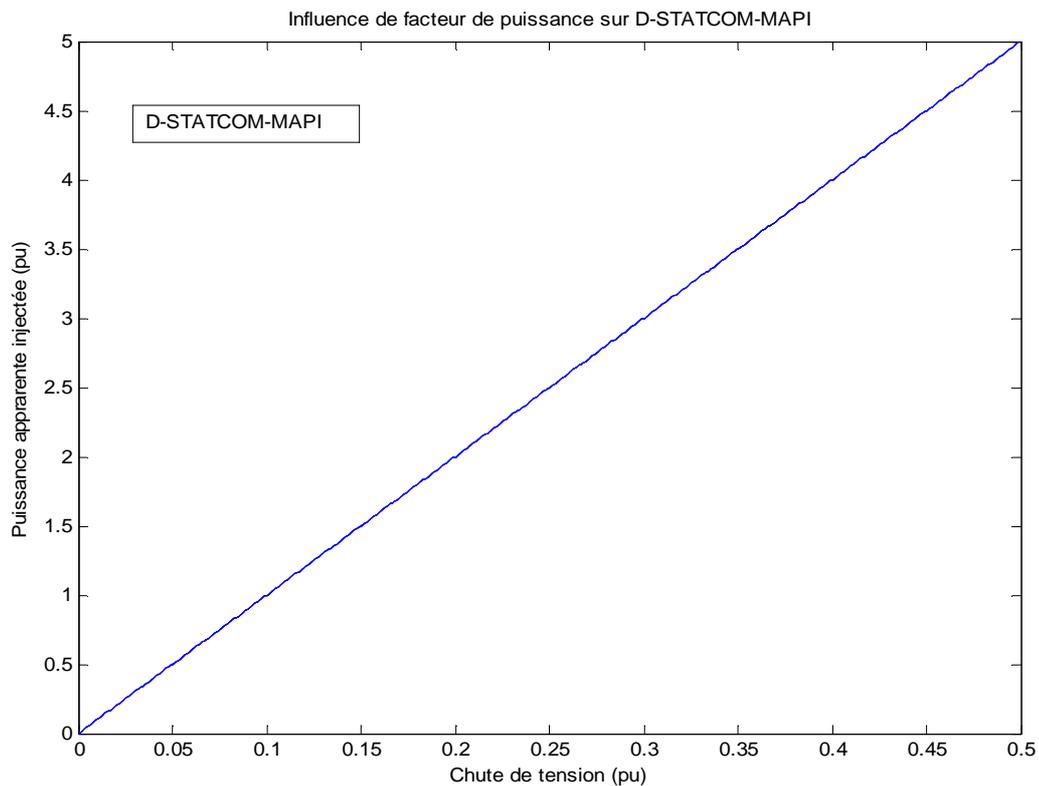


Fig. IV.15 : Influence du facteur de puissance (FP) sur MAPI-D-STATCOM

Interprétation des courbes :

D'après les courbes (IV.14) et (IV.5), on remarque que les courbes de variations de puissance injectée en fonction de la chute de tension pour des valeurs de facteur de puissance allant de 0.75 jusqu'à 1 pu, sont superposées l'une sur l'autre dans le mode ZAPI *i.e.* le comportement de D-STATCOM est indépendant de la variation du facteur de puissance, ainsi pour le mode MAPI, le facteur de puissance n'influe pas sur son comportement.

IV.5.4. Influence de la longueur de la ligne sur le DVR et D-STATCOM

Pour des valeurs de $S_{cc} = 10 \text{ pu}$, $S_L = 1 \text{ pu}$ et $FP=0.8$, on fait varier la longueur de la ligne de sorte que la valeur de la tension $V_{th} < 1.2 \text{ pu}$, un pas de 0.5 Km pour le DVR et un pas de 1 Km pour le D-STATCOM et les figures obtenues pour les deux modes de fonctionnement (ZAPI et MAPI) pour DVR et D-STATCOM sont représentés par les figures (IV.16, IV.17, IV.18 et IV.19). Ainsi les résultats de calculs par Matlab sont regroupés dans l'annexe (A7-A8).

a. DVR

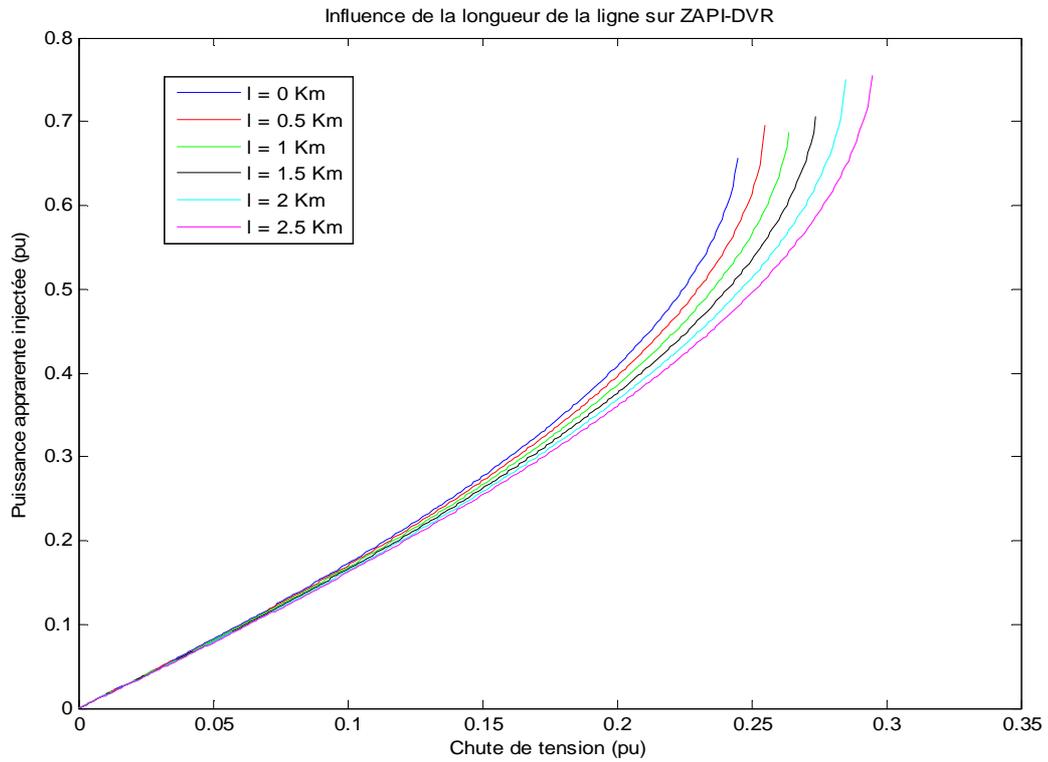


Fig. IV.16 : Influence de la longueur de la ligne sur ZAPI-DVR

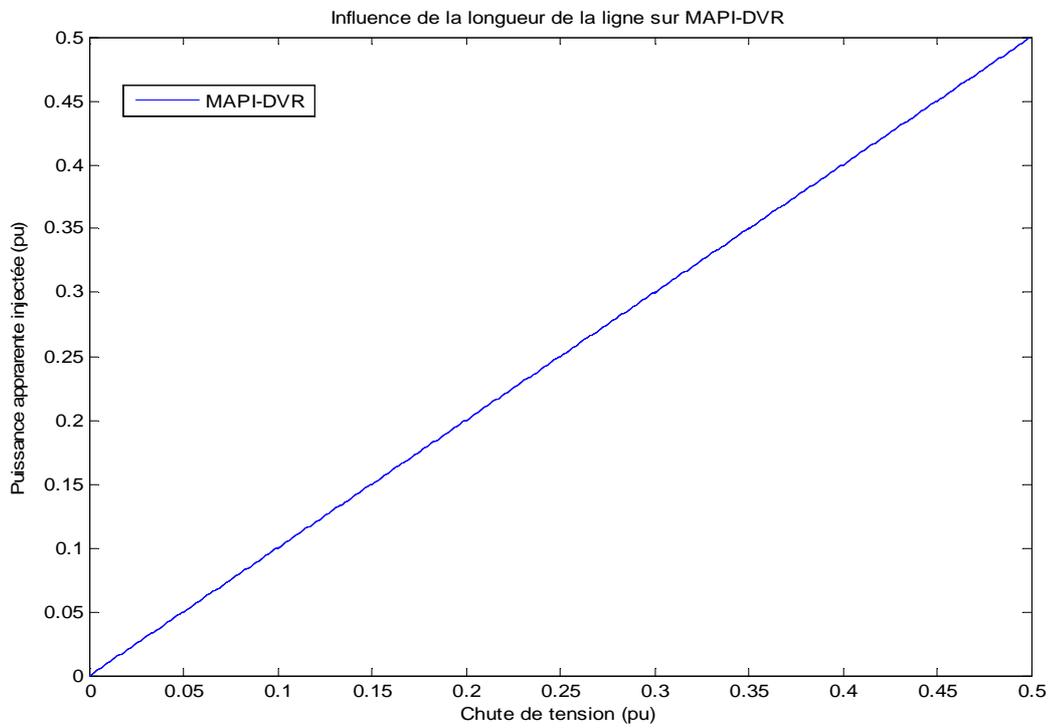


Fig. IV.17 : Influence de la longueur de la ligne sur MAPI-DVR

Interprétation des courbes

Pour le mode ZAPI on constate d'après la figure (IV.16) que la puissance apparente injectée par le DVR augmente légèrement avec l'augmentation de la valeur de ligne à partir des chutes de tension supérieures à 0.2 pu. Mais son exécution est limitée pour des lignes inférieures à 2.5 Km.

Pour le mode MAPI, on constate d'après la figure IV.17 que la longueur de ligne n'influe pas sur le comportement de DVR dans son deuxième mode de fonctionnement pour la correction de la chute de tension.

b. D-STATCOM

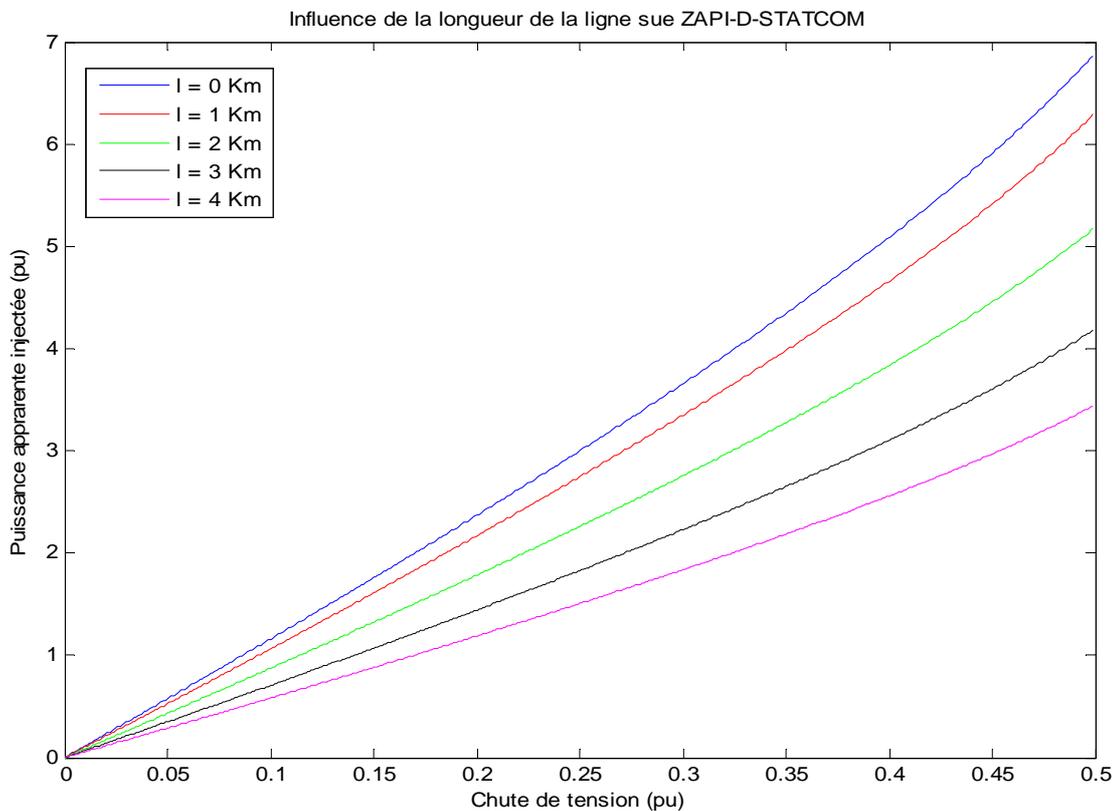


Fig. IV.18 : Influence de la longueur de la ligne sur ZAPI-D-STATCOM

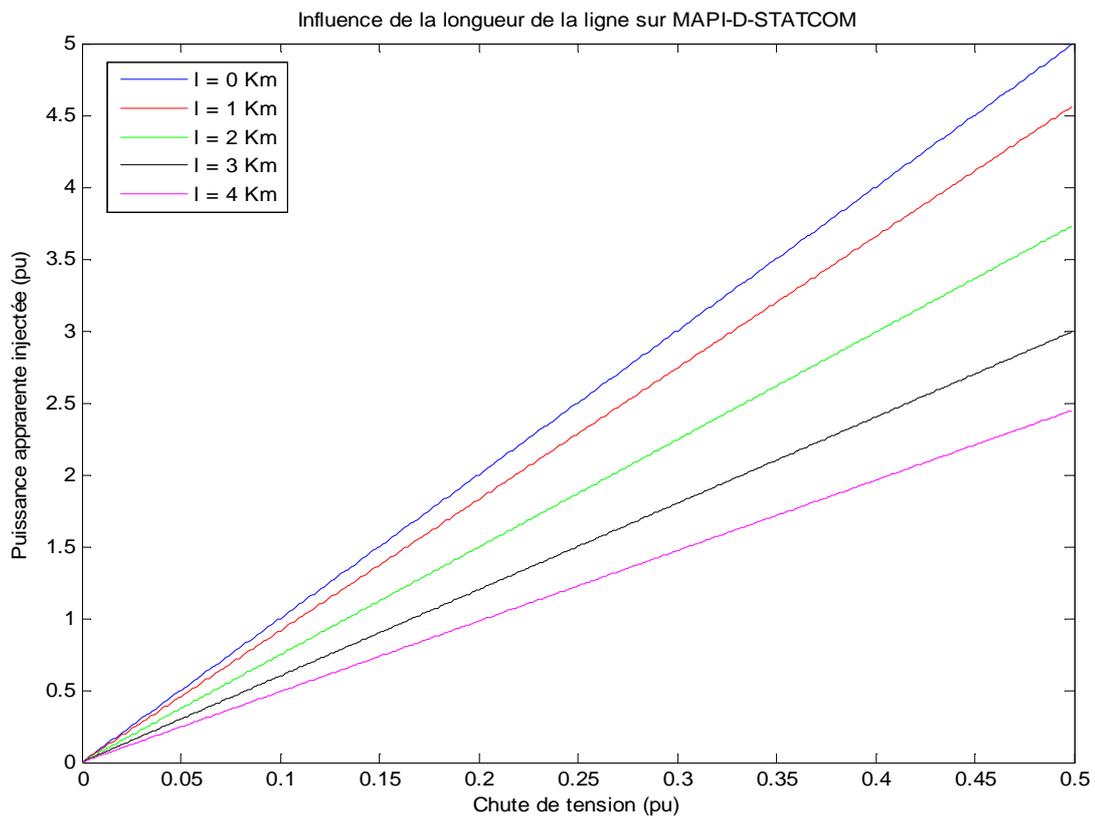


Fig. IV.19 : Influence de la longueur de la ligne sur MAPI-D-STATCOM

Interprétation des courbes :

On observe d'après les figures (IV.18) et (IV.19), que la puissance apparente injectée par le D-STATCOM diminue avec l'augmentation de la longueur de la ligne pour les deux modes de fonctionnement de D-STATCOM i.e. pour une longueur de la ligne donnée, la puissance injectée est plus importante dans le mode ZAPI que le mode MAPI.

Donc le D-STATCOM est conseillé dans la correction des chutes de tension pour des lignes longue.

IV.6. Tableau récapitulatif des différents paramètres d'influence sur les deux modes de fonctionnement de DVR et D-STATCOM

| Paramètres d'influence | D-FACTS | ZAPI | MAPI |
|-------------------------------|-----------|------|------|
| Niveau de court-circuit (Scc) | DVR | ✓ | X |
| | D-STATCOM | ✓ | ✓ |
| Niveau de la charge (SL) | DVR | X | X |
| | D-STATCOM | ✓ | X |
| Facteur de puissance (FP) | DVR | ✓ | X |
| | D-STATCOM | X | X |
| Longueur de la ligne (l) | DVR | ✓ | X |
| | D-STATCOM | ✓ | ✓ |

Tableau. IV.1 : Différents facteurs d'influence sur le comportement de DVR et D-STATCOM

IV.7. Conclusion

L'exécution équilibrée d'un DVR et d'un D-STATCOM pour la correction des chutes de tension d'alimentation est déterminé et comparé dans ce chapitre.

Les techniques de corriger les chutes tension avec l'injection zéro de puissance active comme l'injection minimum de puissance apparente sont également discutées. La simulation résulte sur un système simple a indiqué que la quantité d'injection de puissance apparente exigée par un D-STATCOM pour corriger une chute de tension donnée est beaucoup plus importante avec que celui d'un DVR.

La raison principale de celle-ci est que le DVR corrige des chutes de tension seulement du côté descendant, tandis qu'un D-STATCOM corrige la tension des deux côtés. On constate également qu'un D-STATCOM peut corriger des chutes de tensions plus élevés sans injecter n'importe quelle puissance active dans le système comparé à celui d'un DVR.

L'injection minimum de puissance apparente du D- STATCOM s'avère très peu sensible au niveau de charge et indépendante, de la valeur du facteur de puissance, mais sensible au niveau de défaut du système et de la longueur de la ligne.

Conclusion générale et perspectives

Ces dernières années l'introduction des compensateurs D-FACTS dans les réseaux de distribution électrique est devenu l'une des technologies et solutions modernes qui préoccupe les acteurs du domaine d'énergie électrique, cette technologie regroupe une famille des contrôleurs à base d'éléments d'électronique de puissance afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert (transit) des lignes en agissant sur les paramètres du réseau (tension, impédance, déphasage).

L'étude menée dans notre travail a abouti à la proposition d'un DVR et d'un D-STATCOM pour l'amélioration de la qualité d'énergie par la correction des chutes de tension dans les réseaux de distribution électrique.

Le DVR corrige des chutes de tension seulement du côté de la charge dans le réseau électrique de distribution et on a déduit qu'il est très peu sensible au niveau de défaut (court-circuit) mais sensible au niveau de charge du système, au niveau de la valeur de facteur de puissance et de la longueur de la ligne, Le DVR est conseillé pour la correction des chutes de tension dans les lignes électriques de distribution courtes présentant des mauvais facteurs de puissance.

D'une autre part le D-STATCOM corrige des chutes de tension multiple de 2 par rapport à celle corrigées par le DVR, la correction s'effectue pour les deux côtés de la charge et on a déduit que son comportement est dépendant de la variation du facteur de puissance et de la charge mais le niveau de court-circuit et de la longueur de la ligne influe sur son comportement dans la correction des chutes de tension. Le D-STATCOM est conseillé pour la correction des chutes de tension importantes dans les réseaux électriques de distribution présentant des courts circuits.

On a tout d'abord exposé, dans le 1er chapitre, les différentes parties du réseau électrique où l'on s'est intéressé au réseau électrique de distribution ainsi on a présenté les problèmes de tension survenant sur ce dernier, la notion de la chute de tension et la puissance transmise sont élucidées et on termine ce chapitre par les trois types de compensations (conventionnelle, statique et avancée).

La présentation de la technologie FACTS et ses avantages ainsi l'étude de quatre D-FACTS à savoir le DVR, le IDVR, le D-STATCOM et l'UPQC a fait l'objet du 2eme chapitre.

Dans le 3eme chapitre, on a abordé le fonctionnement (modélisation) ainsi les stratégies de contrôle proposées dans la littérature par différents auteurs des D-FACTS déjà étudiés.

Enfin, un ensemble de simulations numériques de fonctionnement de DVR, D-STATCOM et l'étude de l'influence de quatre paramètres (niveau de court-circuit, la charge, le facteur de puissance et la longueur de la ligne) sur leurs comportement dans la correction de la chute de tension.

Cependant, notre étude reste modeste et d'autres recherches doivent être explorées concernant la problématique étudiée. Il ressort donc de ce travail de nouvelles perspectives.

La première priorité concerne la simulation des deux autres dispositifs (IDVR et l'UPQC) pour l'amélioration de la qualité d'énergie électrique et leurs comportements envers les quatre paramètres déjà étudiés.

La deuxième priorité concerne l'étude des stratégies de contrôles des quatre D-FACTS précédents.

La troisième et dernière priorité s'intéresse au courant suit à l'insertion des quatre D-FACTS déjà étudiée.

Résultats obtenus de l'influence des différents paramètres sur le DVR et le D-STATCOM

Annexe A.1 : Influence de niveau de court-circuit (S_{cc}) sur le DVR

| S_{cc} (pu) | ΔV_{max} (pu) | | S_{dvr} (pu) | | V_{tho} (pu) |
|---------------|-----------------------|--------|----------------|--------|----------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 20 pu | 0.2220 | 0.5000 | 0.6133 | 0.5000 | 1.0450 |
| 15 pu | 0.2300 | 0.5000 | 0.6399 | 0.5000 | 1.0600 |
| 10 pu | 0.2450 | 0.5000 | 0.6566 | 0.5000 | 1.0904 |
| 5 pu | 0.2920 | 0.5000 | 0.7404 | 0.5000 | 1.1823 |

Annexe A.2 : Influence de niveau de court-circuit (S_{cc}) sur le D-STATCOM

| S_{cc} (pu) | ΔV_{max} (pu) | | S_{sh} (pu) | | V_{tho} (pu) |
|---------------|-----------------------|--------|---------------|--------|----------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 20 pu | 0.4990 | 0.4990 | 13.5600 | 9.9600 | 1.0450 |
| 15 pu | 0.4990 | 0.4990 | 10.2100 | 7.485 | 1.0600 |
| 10 pu | 0.4990 | 0.4990 | 6.8660 | 4.9900 | 1.0904 |
| 5 pu | 0.4990 | 0.4990 | 3.5060 | 2.4950 | 1.1823 |

Annexe IV.3 : Influence de la charge (SL) sur le DVR

| S_L (pu) | ΔV_{\max} (pu) | | S_{dvr} (pu) | | V_{tho} (pu) |
|------------|------------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 1 pu | 0.2450 | 0.4500 | 0.6566 | 0.4500 | 1.0904 |
| 0.9 pu | 0.2400 | 0.4990 | 0.5756 | 0.4491 | 1.0812 |
| 0.8 pu | 0.2350 | 0.4990 | 0.5219 | 0.3992 | 1.0722 |
| 0.7 pu | 0.2310 | 0.4990 | 0.4388 | 0.3486 | 1.0631 |

Annexe A.4 : Influence de la charge (SL) sur le D-STATCOM

| S_L (pu) | ΔV_{\max} (pu) | | S_{sh} (pu) | | V_{tho} (pu) |
|------------|------------------------|--------|----------------------|--------|-----------------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 1 pu | 0.4980 | 0.4980 | 6.8440 | 4.9800 | 1.0904 |
| 0.9 pu | 0.4980 | 0.4980 | 6.8440 | 4.9800 | 1.0812 |
| 0.8 pu | 0.4980 | 0.4980 | 6.8440 | 4.9800 | 1.0722 |
| 0.7 pu | 0.4980 | 0.4980 | 6.8440 | 4.9800 | 1.0631 |

Annexe A.5 : Influence du facteur de puissance(FP) sur le DVR

| FP | ΔV_{\max} (pu) | | S_{sh} (pu) | | V_{th0} (pu) |
|------|------------------------|--------|---------------|--------|----------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 1 | 0.0030 | 0.5000 | 0.0480 | 0.5000 | 1.0485 |
| 0.95 | 0.0780 | 0.5000 | 0.3922 | 0.5000 | 1.0728 |
| 0.90 | 0.1360 | 0.5000 | 0.5041 | 0.5000 | 1.0810 |
| 0.85 | 0.1910 | 0.5000 | 0.5814 | 0.5000 | 1.0864 |
| 0.80 | 0.2450 | 0.5000 | 0.6566 | 0.5000 | 1.0904 |
| 0.75 | 0.2980 | 0.5000 | 0.7194 | 0.5000 | 1.0933 |

Annexe A.6 : Influence du facteur de puissance(FP) sur le D-STATCOM

| FP | ΔV_{\max} (pu) | | S_{sh} (pu) | | V_{th0} (pu) |
|------|------------------------|--------|---------------|--------|----------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 1 | 0.4980 | 0.4980 | 8.4390 | 4.9800 | 1.0485 |
| 0.95 | 0.4980 | 0.4980 | 7.3800 | 4.9800 | 1.0728 |
| 0.90 | 0.4980 | 0.4980 | 7.1420 | 4.9800 | 1.0810 |
| 0.85 | 0.4980 | 0.4980 | 6.9620 | 4.9800 | 1.0864 |
| 0.80 | 0.4980 | 0.4980 | 6.8440 | 4.9800 | 1.0904 |
| 0.75 | 0.4980 | 0.4980 | 6.7680 | 4.9800 | 1.0933 |

Annexe A.7 : Influence de la longueur de la ligne (l) sur le DVR

| l(Km) | ΔV_{\max} (pu) | | S_{dvr} (pu) | | V_{tho} (pu) |
|-------|------------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 0 | 0.2450 | 0.4990 | 0.6566 | 0.4990 | 1.0904 |
| 0.5 | 0.2550 | 0.4990 | 0.6946 | 0.4990 | 1.1089 |
| 1 | 0.2640 | 0.4990 | 0.6870 | 0.4990 | 1.1280 |
| 1.5 | 0.2740 | 0.4990 | 0.7052 | 0.4990 | 1.1475 |
| 2 | 0.2850 | 0.4990 | 0.7501 | 0.4990 | 1.1673 |
| 2.5 | 0.2950 | 0.4990 | 0.7555 | 0.4990 | 1.1873 |

Annexe A.8 : Influence de la longueur de la ligne (l) sur le D-STATCOM

| l(Km) | ΔV_{\max} (pu) | | S_{sh} (pu) | | V_{tho} (pu) |
|-------|------------------------|--------|----------------------|--------|-----------------------|
| | ZAPI | MAPI | ZAPI | MAPI | |
| 0 | 0.4990 | 0.4990 | 6.8660 | 4.9900 | 1.0904 |
| 1 | 0.4990 | 0.4990 | 6.2880 | 4.5600 | 1.0990 |
| 2 | 0.4990 | 0.4990 | 5.1710 | 3.7300 | 1.1213 |
| 3 | 0.4990 | 0.4990 | 4.1800 | 2.9940 | 1.1515 |
| 4 | 0.4990 | 0.4990 | 3.4400 | 2.447 | 1.1859 |

- [1] Normes IEEE Std 519-1992, IEEE recommended practices and requirements for harmony control in electrical power systems, 12 April 1993, Page(s):15- 99.
- [2] D.O.Koval, M.B Hughes, Canadian National Power Quality Survey: Frequency of Industrial and Commercial Voltage Sags, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 33, No. 3, MAY/JUNE 1997,Page(s):622- 627.
- [3] M. J. Newman, D.G. Holmes, J.G. Nielsen, F. Blaabjerg, «A Dynamic Voltage Restorer (DVR) with Selective Harmony Compensation at Medium Voltage Level», IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 6, Nov/Dec. 2005, Page(s):1744- 1753.
- [4] Haimour Rachida, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2008-2009.
- [5] David Chapman, « variation de tension », european copper institute, juillet 2002.
- [6] O. MAMMERI, « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2011-2012.
- [7] Roger OTT, « Qualité de la tension - Fluctuations et flicker », Technique de l'ingénieur D4263, EDF Recherche et développement.
- [8] Pierre Bornard, Michel Pavard, "Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement", Technique de l'ingénieur traité génie électrique D 4090.
- [9] E.Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, «Power electronic control in electrical systems», Newnes 2002.
- [10] Manish Thakur, «Unified power flow controller development mathematical framework and design of transient model» Mémoire de Magistère, Université Manitoba-Canada, février.2003.
- [11] Schneider Electric - Chapitre L, «Compensation de l'énergie réactive et filtrage des harmoniques», guide de l'installation électrique 2010.
- [12] R.BENABID, « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Amar Telidji, Laghouat, 04/09/2007.

- [13] ADAMA D. DIARRA, « La répartition optimale de la puissance réactive pour le contrôle des tensions de la barre d'un réseau électrique par SIMPLEX LP », thèse de doctorat, Université du QUEBEC, septembre 1984.
- [14] Leonard L.Grigsoby, «Power Systems », electric Power engineering handbook second edition 2006 by Taylor & Francis Group.
- [15] Emmanuelle Gatz, « Evolution techniques du système de transport et de distribution d'électricité », Supélec 1999.France.
- [16] E.G. Shahraki, «Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques», thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.
- [17] A.ALIB, «Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS», mémoire de magister, université de Batna. 2009.
- [18] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles- Camacho, « FACTS Modelling and Simulation in Power Networks», John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [19] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, «Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control», Springer 2005.
- [20] L.Gyugyi, C.D.Schauder, C.W.Edwards, M.Sarkozi, «Apparatus and Method for Dynamic voltage Restoration of Utility Distribution Networks»,U.S.Patent,Issue 1,vol5,pp.329-342,1994.
- [21] B.ferdi, C.Benachaiba, S.Dib, R.Deihini, « Adaptative PI control of dynamic voltage restorer using Fuzzy logic», Journal of Electrical Engineering, Theory and application,Vol.1 2010/Iss.3,pp.165-173,2010.
- [22] M.F.Kangarlu, S.H.Hosseini, A.K.Sadigh, «Transformerless DVR topology based on multilevel inverter with reduced number of switches», 1st Power Electronic, Drive Systems et Technologies, conference, IEEE.pp.371-375, 2010.
- [23] S.V.RaviKumar,S.SivaNagaraju, «Simulation of D-STATCOM and DVR in power systems» , ARPN journal of Engineering and Applied Sciences,Vol.2.No.3,pp.7-13June2007.
- [24] M. N. Tandjaoui, C. Benachaiba, O. Abdelkhalek, «Compensation des perturbations en tension des réseaux de distribution à l'aide DVR multifonctions», Quatrième Conférence sur le Génie Electrique, Université de Bechar, Algérie, le 03-04 Novembre2010.
- [25] D.MahindaVilathgamuwa, H. M. Wijekoon, S.S. Choi, «Interline Dynamic Voltage Restorer: A Novel and Economical Approach for Multiline Power Quality Compensation», IEEE Transactions on industry applications, vol. 40, no. 6, Nov/Dec 2004.
- [26] EswarappaPramila, « Power Quality Improvement Using Interline Dynamic Voltage Restorer » ,International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, Issue 4, Vol.1 (January 2014) , ISSN 2249-6149.

- [27] D. Amhof, P. Dähler, H. Grüning, A. Kara, «Power Supply Quality Improvement with Dynamic Voltage Restorer (DVR) », IEEE APEC'98, Anaheim, USA, 15–19 February 1998.
- [28] Indumathi. R, Venkateshkumar. M, Raghavan. R, « Integration of D-Statcom based photovoltaic cell power in low voltage power distribution grid», Proc. Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on, 30-31 March 2012 Year pp. 460-465 .
- [29] J.Douglas, «Custom Power: Optimizing Distribution Services», EPRI Journal, May/June 1996.
- [30] S. W. Middlekauff, E. R. Collins, « System and Customer Impact: Considerations for Series Custom Power Devices», IEEE PES Summer Meeting, Berlin, Germany, 1997, paper PE-987 PWRD-0-04-1997.
- [31] Fan, R., and Sun, M, « Research and application of cascade D-STATCOM for impact load compensation» ,Proc. Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference on, 10-12 Aug. 2010 Year pp. 4204-4208 .
- [32] Math H.J. Bollen, « Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions». New York: IEEE Press, 2000.
- [33] Arindam Ghosh and Gerard Ledwich, «Power quality enhancement using custom power devices», Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [34] Iurie Axente, «Unified Power Quality Conditioner: protection and performance enhancement», thèse de doctorat, Dublin Institute of Technology, le 01-01-2008.
- [35] M.H. Haque, « Compensation of distribution system voltage sag by DVR and DSTATCOM», School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University Singapore, Paper accepted for presentation at PPT 2001.
- [36] M.Tumay, A.Teke, K.C.Bayindir, M.U.Cuma, « Simulation and modeling of a dynamic voltage restorer», Electrical et Electronics Engineering, pp.1-5, 2006.
- [37] M.A.Bhaskar, S.S.Dash, C.Subramani, M.J.Kumar, P.R.Giresh, M.VKumar, « Voltage quality improvement using DVR », International Conference on recent Trends in information, Telecommunication and Computing, pp.378-380, IEEE, 2010.
- [38] A. Ziane-khodja; M. Adli et R. Alkama, «Apport d'un DVR dans la production d'énergie distribuée», Laboratoire de Génie Electrique de Béjaia – Algerie.2012.
- [39] Rosli Omar, N.A.Rahim, « Voltage Disturbances Mitigation in Low Voltage Distribution System Using New configuration of Dynamic Voltage Restorer (DVR) », World Applied Sciences Journal, 10(12):1480-1489, 2010.
- [40] Sanjay A Deokar, Laxman M Waghmare, « DVR Control Strategy for Dynamic Power Quality Disturbance Mitigation», International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue11, November 2012.

- [41] Pedro Roncero-Sánchez, Enrique Acha, Jose Enrique Ortega-Calderon, Vicente Feliu and Aurelio García-Cerrada, « A Versatile Control Scheme for a Dynamic Voltage Restorer for Power-Quality Improvement», IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 24, NO. 1, JANUARY 2009.
- [42] Carl N.M. Ho and Henry S.H. Chung, « Fast Transient Control of Single-Phase Dynamic Voltage Restorer (DVR) Without External DC Source», IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea. June 18 - 22, 2006,
- [43] A.Elmitwally , M.S.Kandil , M.Elkateb, « A fuzzy controlled versatile system for harmonics ,unbalance and voltage sag compensation » Power engineering society sommer Meetins ,2000,IEEE,vol.3.pp.1439-1444,16-20 Jul. 2000.
- [44] Seyedreza Aalin et Daryoush Nazarpour, « Voltage Quality Improvement with Neural Network-Based Interline Dynamic Voltage Restorer », Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 6, No. 6, pp. 769-775, 2011 769.
- [45] J.R.Vazquez, P.R.Salmeron, « Three-phase Active Power Filter Control Using Neural Networks», Mediterranean Electrotechnical Conference,MEleCon,Vol.III, 2000, pp.9249927.
- [46] H.M.Wijekoon, D.M.Vilathgamuwa and S.S.Choi, « Interline dynamic voltage restorer: an economical way to improve interline power quality».
- [47] M. R. Banaei, S. H. Hosseini, G. B. Gharehpetian, « Inter-line dynamic voltage restorer control using a novel optimum energy consumption strategy», Simulation Modelling Practice and Theory 14,2006,
- [48] Hojat Hatami, FarhadShahnia, AfshinPashaei,S.H. Hosseini, « Investigation on D STATCOM and DVR Operation for Voltage Control in Distribution Networks with a New Control Strategy»”, Power Tech,2007 IEEE Lausanne, 1-5 July 2007.
- [49] Pinaki Mitra, and Ganesh K. Venayagamoorthy, « An Adaptive Control Strategy for DSTATCOM Applications in an Electric Ship Power System», Power Electronics, IEEE Transactions on Jan. 2010.
- [50] G. Ledwich and A. Ghosh, « A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode», IEE Proc.-Gener. Trunsm. Disrrib. Vol. 149, No. 2, March 2002
- [51] Amin Nazarloo, Seyed Hosseini, Ebrahim Babaei and Mohammad Bagher Bannae Sharifian, « Compensation of Voltage Sags with New Control Method for D-STATCOM used in 13 bus distribution network», The Computing Science And Technology International Journal, Vol. 2, No. 2, JUNE, 2012.
- [52] Ch. Siva Koti Reddy and Dr. P.Linga Reddy, « ADSTATCOM-Control Scheme for Power Quality Improvement of Grid Connected Wind Energy System for Balanced and Unbalanced Non linearLoads»”,International Journal of Modern Engineering Research(IJMER) Vol. 2, Issue.3, May-June 2012 pp-661-666.

- [53] M. Hosseinia, H.A. Shayanfara, M.Fotuhi-Firuzabad, « Modeling of unified power quality conditioner (UPQC) in distribution systems load flow», University of Science and Technology, Tehran, Iran, Elsevier Ltd, 2009.

Résumé

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant, souvent les distributeurs et les utilisateurs de l'énergie électrique ont été toujours confrontés à un certain nombre de difficultés inhérentes tel que le maintien du profil de la tension et à la variation de son amplitude, au rendement de transmission de l'énergie. Dans ce contexte nous allons donc s'intéresser dans notre étude à la compensation avancée par les D-FACTS à savoir le DVR, IDVR, D-STATCOM et l'UPQC, dans le but d'amélioration de la qualité d'énergie électrique.

Ce mémoire, inscrit dans le cadre de l'étude, la modélisation et simulation des D-FACTS précédents.

La simulation d'un compensateur série (DVR) et d'un compensateur shunt (D-STATCOM) et l'influence des différents paramètres du réseau sur leurs comportement nous a permis de conclure que :

Le DVR corrige des chutes de tension seulement du côté de la charge, d'une autre part le D-STATCOM corrige des chutes de tension multiple de deux par rapport à celle corrigées par le DVR et la correction s'effectue pour les deux côtés.

Mots clés: D-FACTS, DVR, IDVR, D-STATCOM, UPQC.