

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun Tiaret

Faculté des Sciences de la technologie et sciences de la matière

Mémoire

Présenté au Département de Génie Electrique
en vue de l'obtention du titre de

Magister

Ecole doctorale de Génie électrique
Option: Commande et Analyse des Systèmes Electriques

Par

Ouared Rahal

Ingénieur en Electrotechnique de l'Université Ibn Khaldoun –Tiaret-

Thème

**Contribution et apport à l'amélioration de la
compensation de l'énergie réactive
Application à une partie du réseau sud algérien**

Soutenu devant le jury composé de :

Président : Mr MIMOUNI.A Maître de Conférences à l'Université Ibn Khaldoun -Tiaret
Rapporteur: Mr. MESLEM.Y Maître de Conférences à l'Université Ibn Khaldoun -Tiaret
Examineurs : Mr ALLAOUI .T Maître de Conférences à l'Université Ibn Khaldoun - Tiaret
Mr MOUDJAHED.M Maître de Conférences à l'Université Ibn Khaldoun - Tiaret



REMERCIEMENTS

Qu'il me soit ici donné l'occasion d'exprimer ma gratitude envers Mr Meslem Youcef maître de conférence à l'université de TIARET pour la confiance qu'il m'a accordé en me proposant un sujet de thèse passionnant ainsi que pour la liberté qu'il m'a laissé pendant ce travail.

Je souhaite également remercier chaleureusement Mr ALLAOUI Tayeb Maître de conférence à l'université de TIARET pour ses conseils et toutes les discussions scientifiques qui ont précédé ce travail.

Je tiens encore à remercier les personnes suivantes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à rendre possible l'aboutissement de ce travail :

Mr MIMOUNI maître de conférence à l'université de Tiaret qui m'a fait le bonheur de présider mon jury de thèse.

Mr MOUDJAHED Mohamed maître de conférence à l'université de Tiaret pour avoir fait partie de mon jury et d'en être examinateur .Rigueur et efficacité sont des termes qui à mon sens qualifient bien sa manière de travailler.

Mr FARAH ould ali directeur de la centrale de production de Tiaret, il a su à la fois porter un regard critique sur mon travail et faire des suggestions enrichissantes.

Mr BOUAZA Abdellah directeur de la centrale de production D'Adrar qui sans sa précieuse aide ce travail n'aurait pas pu être mené aussi loin.

L'ensemble du personnel pédagogique, technique et administratif.

Il me reste encore à exprimer une pensée à mon défunt père, ma mère, ma famille proche et mes amis, et comme il se doit ma chère épouse et mes enfants pour m'avoir supporté pendant plus de trois ans, soutenu et encouragé quand il le fallait.

Et merci à toi, lecteur pour la valeur que tu donnes à ce travail en tenant ce mémoire dans tes mains en y puisant un savoir qui, je l'espère te sera source d'inspiration.

Liste des Symboles et Abréviations

FACTS	Flexible alternatif current transmission systems.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor
SPS	Static Phase Shifter
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
DVR	Dynamic Voltage Restorer
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Voltage Source Converter
MLI	Modulation par largeur d'impulsion
PI	Proportionnel Intégral (régulateur)
V_s	Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).
V_r	Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).
P_s	Puissance active fournie par la source
Q_s	Puissance réactive fournie par la source
P_r	Puissance active demandée par la charge
Q_r	Puissance réactive demandée par la charge
P_l	Puissance active transportée par la ligne
Q_l	Puissance réactive transportée par la ligne
δ	Angle de charge entre V _s et V _r
R	Résistance de la ligne de transport
X	réactance de la ligne de transport
θ	Déphasage du courant de la ligne
V_{sh}	Tension (shunt) injectée par le STATCOM
I_{sh}	Courant (shunt) injecté par le STATCOM
R_{sh}	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
X_{sh}	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
P_{sh}	Puissance active délivrée par le STATCOM
Q_{sh}	Puissance réactive délivrée par le STATCOM
V_{ref}	Onde sinusoïdale de la référence
V_p	Onde triangulaire de la porteuse
V_{dc}	Tension continue aux bornes du condensateur
I_{dc}	Courant dans le circuit continu
pu	(indice) la grandeur en unité relative (grandeur réduite)
m	Indice de modulation

D	Indice de modulation dans les axes de Park
F	fonction de commutation
V_{ABC}	source de tension triphasée
GTO	Gate turn off thyristor
SVC	Static var compensator
ASVC	Advanced static var compensator
V_{oa}	Amplitude du fondamentale de la tension de sortie de l'onduleur
V_{sa}	Amplitude du fondamentale de la tension du réseau
R_s	Résistance qui représente les pertes actives du transformateur et de l'onduleur
v_L	Tension efficace composée
ω	Pulsation de la source
d	(indice) la composante sur l'axe d du repère d-q
q	(indice) la composante sur l'axe q du repère d-q

Table des matières

Remerciement	
Liste des symboles	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Compensation de l'énergie réactive	
I. Introduction.....	5
I.2 Généralités sur la compensation d'énergie réactive.....	6
I.2.1 Définitions.....	6
I.2.2 Energie active, réactive, apparente.....	6
I.2.3 objectifs.....	7
I.2.4 Amélioration du facteur de puissance	3
I.3 LES DIFFERENTS TYPES DE COMPENSATION.....	8
I.3.1 - Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension.....	8
I.3.2 Condensateurs et inductances fixes.....	8
I.3.4 Compensateurs synchrones.....	9
I.4 CLASSIFICATION DES COMPENSATEURS.....	9
I.4.1 compensateur a éléments passifs	9
I.4.2 compensateur parallèle	9
I.4.3 compensateur série	9
I.4.4 Transformateur Régulateur	10
I.4.5 transformateur déphaseur	10
I.5 DIFFERENTES TYPES DE COMPENSATION	11
I.5.1 compensation globale	11
I.5.2 compensation partielle	11
I.5.3 compensation locale.....	11

I.6 CONCLUSION.....	11
Chapitre II : LES FACTS	
Les Systèmes de Transmission à Courant Alternatif Flexibles.....	12
II.1 Introduction	13
II.2 Les Techniques Avancées Des FACTS	14
II.3 Les différents types des systèmes FACTS.....	15
II.3.1 Compensateurs parallèles.....	15
II 3. 1 .1 Compensateurs parallèles à base de thyristors.	15
II.3.1.2 TCR (Thyristor Controlled Reactor), TSR (Thyristor Switched Reactor).....	16
II.3.1.3 SVC (<i>Static Var Compensator</i>)	16
II.3.1.4 TSC (Thyristor Switched Capacitor)	17
II.3.1.5 TCBR (<i>Thyristor Control Breaking Resistor</i>)	
II.3.2 Compensateur parallèle à base de GTO thyristors(STATCOM).....	18
II.4 Comparaison entre STATCOM et SVC	21
II.5 Compensateurs séries.....	22
II.5 .1 Compensateurs séries à base de thyristors	23
II.5.1.1 TCSC (<i>Thyristor controlled series capacitor</i>)	23
II.5.1.2 TSSC (<i>Thyristor Switched Series Capacitor</i>)	23
II.5.1.3 TCSR (<i>Thyristor Controlled Serie Reactor</i>)	23
II.5.1.4 TSSR (<i>Thyristor Switched Serie Reactor</i>)	24
II. 5. 2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors(SSSC).....	24
II.6 Compensateurs hybrides (série – parallèle)	26
II.6.1 UPFC (<i>Unified Power Flow Controller</i>)	26
II.7 Synthèse	27
II.8 Conclusion.....	28

CHAPITRE III :

Principe de fonctionnement et modélisation du STATCOM

III.1 OBJECTIFS	30
III .2 Principe de Fonctionnement du compensateur.....	34

III.2. 1 Rappel	34
III.2 .2 Circuit Principale du STATCOM.....	35
III.3 Modélisation du STATCOM.....	37
III.3.1 Modèle du compensateur sur les axes d-q.....	37
III.3.2 Modèle linéaire.....	39
III.4 -Synthèse des Réglages du STATCOM	
III.4.1 Réglage proportionnel Intégral (PI).....	40
III.4.2 Détermination des paramètres du régulateur PI.....	41
III .4 .3 Régulation de la Tension Continue.....	43
III.4.4 Modélisation de l'onduleur de tension.....	43
III.4.5 Modélisation du convertisseur MLI à deux niveaux.....	44
III.4.6 La commande MLI.....	46
III.5 Résultats de simulation	49
III.6 Conclusion	51

Chapitre IV

APPLICATION DU STATCOM AU RESEAU D'ADRAR

IV Présentation du réseau étudié.....	53
IV.1 Introduction	53
IV.1.1 Paramètres des réseaux au 31/12/2008.....	53
IV.2 Essai du réseau a l'état sain	57
IV.3 Essai avec défaut monophasé.....	66
IV. 4 Essai avec charge	70
IV. 5 Cas du défaut triphasé	75
IV.6 Caractéristiques du réseau avec l'apport du STATCOM	76
IV.6.1 Caractéristiques du STATCOM	79
IV.7Conclusion	81

Conclusion générale	82
Annexe.....	83
Annexe A : schéma du réseau d'ADRAR.....	84
Annexe B : Photo du STATCOM.....	86
Annexe C : bloc de calcul des puissances active et réactive	87
Annexe D : Schéma simulink du réseau d'ADRAR avec STATCOM	88
Bibliographie	89

Introduction

Dans les grands réseaux d'énergie électrique, la répartition efficace de la puissance réactive est utilisée pour maintenir la tension dans les limites acceptables de fonctionnement et contrôler les pertes de transmission. Le but principal de la planification de l'énergie réactive est la détermination du volume et la localisation des moyens de compensation à installer pour assurer un fonctionnement sûr et économique. Pour bâtir les réseaux énergétiques de demain, la chaîne qui relie producteurs et consommateurs doit relever quatre grands défis : capacité, fiabilité, efficacité et pérennité. Ce sont aussi les fils conducteurs de l'innovation en matière de réseaux. Or Les réseaux électriques sont de plus en plus sollicités, sous l'effet conjugué de l'augmentation de la consommation totale d'énergie, de l'ouverture des marchés à la concurrence et de la part croissante des énergies renouvelables. Il faut donc adapter le réseau électrique pour lui permettre d'accueillir ces nouveaux producteurs et de les exploiter à l'optimum Pour maintenir les performances du transport et de la distribution, il est impératif de maîtriser l'équilibre offre demande de puissance réactive dans le système électrique à défaut, une mauvaise gestion de cette variable risque de multiplier les pertes réseau, de surcharger les ouvrages et d'engendrer des contraintes électriques (niveaux de tension inacceptables et instables), quand ce ne sont pas des pannes . [1]

Mais Les consommateurs deviennent de plus en plus exigeants et en même temps ils sont plus vulnérables. Ils veulent plus d'énergie électrique, et de meilleure qualité. Pour assurer la qualité, des standards sont imposés et bien définies; les plus importants sont reliés à la tension et à la fréquence .Étant un système dynamique, le système électrique ne facilite pas le respect de ces standards. Différentes charges sont branchées et débranchées à différents moments, et cela introduit des différents niveaux de stress au réseau. De nombreuses charges industrielles sont non linéaires (donc, elles ont un comportement de génératrice des harmoniques). Tout cela nous amène à deux exigences principales: quantité et qualité [2],[3],[4] . Les paramètres caractéristiques du réseau sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Il ne suffit pas de produire l'énergie électrique. Son transfert entre la centrale où elle est produite et les consommateurs qui l'utilisent est également important. Il arrive souvent que des centrales de production soient très éloignées des endroits de consommation. La charge varie en fonction de la saison et de la partie de jour, et avec elle la tension varie aussi. Les longues lignes, chargées légèrement, ont un problème de

surtension, mais par contre, si elles sont surchargées la tension a tendance à baisser au-dessous de la limite acceptable. Donc, il faut contrôler la tension et la stabiliser. D'autre part, le comportement de la charge ne facilite pas cette tâche. La plupart des charges ont tendance à introduire le déphasage entre la tension et le courant, et ce déphasage empêche le transport de la puissance active qui est indispensable pour son fonctionnement. Pour remédier à ce problème il n'y a que deux solutions possibles: d'ajouter des nouvelles lignes de transport ou bien, augmenter l'utilisation de capacité déjà installée. Il coûte cher d'ajouter des nouvelles lignes et parfois c'est impossible. Par contre, il est faisable et moins coûteux d'augmenter l'utilisation de la capacité déjà existante. Cela demande l'installation de nouveaux équipements. La manière conventionnelle de faire face à ce problème est l'installation de compensateurs séries et de compensateurs shunts. Les premiers sont un banc de condensateurs installés en série avec la ligne de transport dont le rôle est de diminuer l'impédance totale de la ligne en permettant l'augmentation de sa capacité de transport de puissance active. Les deuxièmes sont, en général, des condensateurs et des Inductances connectés en parallèle avec le système de transport et ils contrôlent, soit l'échange de puissance réactive entre la charge et la source, soit la tension de la ligne. Leur désavantage principal est leur impossibilité à répondre rapidement aux changements. Le temps de réponse est habituellement quelques cycles de changement de la tension alternative, et de plus, ils sont connectés au réseau via les disjoncteurs qui introduisent leur propre bruit, Simplement, les compensateurs classiques ne sont pas capables de réagir rapidement et de répondre effectivement aux phénomènes transitoires dans le système électro-énergétique.

Une évolution d'interrupteurs à la base de semi-conducteur a permis un meilleur contrôle d'écoulement de la puissance et du système électrique entier. Depuis une trentaine d'années, de nombreux semi-conducteurs ont été développés, et grâce à eux l'électronique de puissance a pris du pouvoir. Les systèmes basés sur eux peuvent contrôler l'impédance en série, l'impédance shunt, la tension, le courant et l'angle de déphasage. De plus, ils peuvent répondre rapidement à tous les phénomènes transitoires. [5]

Ces convertisseurs à topologies multi niveaux suscitent présentement un grand intérêt chez les chercheurs, grâce à leurs propriétés fort attrayantes, ils atteignent des niveaux de tension élevés sans faire appel à des transformateurs ou autres appareils magnétique, ils contribuent peu d'harmoniques, tirant profit des faibles fréquences de commutation[6] [7] . Dans cette thèse, le convertisseur multi niveau servira comme module principal dans la réalisation de contrôleurs (dans notre cas LE STATCOM). Des systèmes flexibles de transport à courant alternatif

(FACTS) à haute tension et à grande puissance. Nous étudions plusieurs variantes tributaires d'une configuration de modules de convertisseurs multi niveaux formant des liens redresseur/onduleur, Ces configurations sont au cœur des contrôleurs FACTS.

Le contrôleur proposé recèle plusieurs innovations techniques importantes. Ce convertisseur électronique de puissance satisfait aux impératifs de performances dynamiques et est capable de débiter un courant totalement réactif, même durant les creux de tension : c'est la solution parfaite pour le réseau d'ADRAR, et assurer une compensation de puissance réactive au démarrage des moteurs ainsi qu'un réglage dynamique de la tension dans ce réseau de transport fragile.

Ce STATCOM est raccordé au secondaire du transformateur 220 kV/30 kV dont il stabilise la tension locale en créant une chute de tension aux bornes du transformateur.

Ce mémoire représente une contribution modeste dans cette direction. Le mémoire est divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre les besoins et les bénéfices de la compensation shunt de la puissance réactive sont expliqués. Une revue brève des différentes techniques traditionnelles de la compensation shunt est donnée.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des différentes structures de FACTS existant (parallèle, série et hybride) basées sur les thyristors et les GTO/IGBT, leurs principes de fonctionnement et leurs domaines d'application. A la fin de ce chapitre, le fonctionnement d'un compensateur statique, basé entièrement sur un convertisseur source de tension, est expliqué en détail.

Les particularités d'implantation d'un onduleur à deux niveaux sont données dans le troisième chapitre. Une explication en détail du principe de fonctionnement du STATCOM est donnée ainsi que la modélisation et le type de commande.

Au dernier chapitre et afin de valider le modèle proposé, une simulation structurée est exécutée dans l'environnement Matlab -Simulink sur un réseau réel de la SONEGAS dans la wilaya d'ADRAR qui connaît de grande perturbations pour essayer de substituer les solutions classiques proposées par la compagnie algérienne par notre nouveau procédé et voir L'impact de l'introduction de ce nouveau contrôleur (STATCOM) dans le réseau d'ADRAR .plusieurs courbes de simulation sont présentées et interprétées.

A la fin de ce travail des conclusions sont tirées et des recommandations sont proposées.

Chapitre I

Compensation de l'Energie Réactive

I - Introduction

Un réseau est défini comme un ensemble d'appareils destinés à la production, au transport, à la distribution à partir de la centrale de génération jusqu'aux centrales industrielles et résidentielles.

Le transport de cette énergie se fait sur les conducteurs tels que les lignes aériennes et les câbles souterrains [8].

Afin que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau électrique doit satisfaire les exigences suivantes:

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations ne dépassent pas $\pm 12 \%$ de la tension nominale
- Fournir une fréquence stable dont les variations ne dépassent pas $\pm 0.5 \%$
- Fournir l'énergie à un prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité.

Pour un réseau électrique, la présence de récepteurs inductifs impose dans les lignes un facteur de puissance inférieur à 1. Ceci se traduit par une augmentation de la valeur efficace des courants pour une même puissance active transportée. De plus, l'augmentation des courants de ligne impose un dimensionnement des conducteurs et ne permet donc pas d'exploiter la ligne au maximum en terme de puissance active.

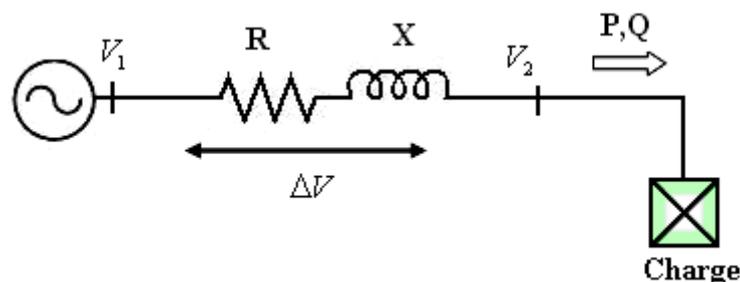


Figure I.1. Détermination de la chute de tension sur une ligne

Cette augmentation de courant a pour conséquence de générer des chutes de tension dans les lignes, qui se répercutent sur tous les circuits connectés de ce réseau. Cette chute de tension est liée à la puissance active P et réactive Q et à l'impédance du réseau R et X par la formule :

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{RP + XQ}{V_2^2} \quad (1)$$

Toutefois, et dans les réseaux la réactance est très importante par rapport à la résistance $X \gg R$, on remarque alors que la puissance réactive va avoir une grande influence sur la tension.

Le transit de cette puissance à travers les éléments du réseau produit non seulement des chutes de tension mais aussi des pertes actives et réactive par effets joules.

$$\Delta P = I^2 R = \frac{S^2}{V_2^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{V_2^2} R = \frac{P^2}{V_2^2} R + \frac{Q^2}{V_2^2} R \quad (2)$$

Le maintien d'une tension correcte nécessite de la part du dispatcher, des ajustements de la production d'énergie réactive par un dialogue avec les centrales. Dans ces conditions, la coordination des divers moyens de réglage est délicate. Il en résulte des variations de tension importantes entre les heures creuses et les heures pleines.

Ces variations peuvent être gênantes et un risque d'auto dégradation du plan de tension peut conduire à un effondrement partiel ou total du réseau.

On peut réduire ces perturbations de tension ainsi que les réactions dues aux charges asymétriques et les harmoniques, en évitant le transport de la puissance réactive et la produire autant que possible là où elle est consommée et cela est possible en installant des dispositifs appelés les compensateurs réactifs. [2] [3] [9].

I.2 - Généralités sur la compensation d'énergie réactive

I.2.1 Définitions

I.2.2 Energie active, réactive, apparente

Toute machine électrique utilisant le courant alternatif (moteur, transformateur) met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

L'énergie active consommée (KWh) résulte de la puissance active P (KW) des récepteurs elle se transforme intégralement en puissance mécanique, travail) et en chaleur (Perte).

L'énergie réactive (Kvarh) sert à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive Q (Kvarh) des récepteurs.

L'énergie apparente (Kvarh) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente S (KVA) des récepteurs somme vectorielle de P (KW) et Q (Kvarh). [10]

I.2.3 Objectifs

La circulation des puissances active et réactive provoque des pertes actives et des chutes de tension dans les conducteurs. Les pertes actives réduisent le rendement global des réseaux et les chutes de tension sont néfastes au maintien d'une bonne tension que doit le distributeur à ces clients. Ainsi est il donc préférable sur le plan technique de les produire le plus près possible des lieux de consommation.

- Pour la puissance active on montre qu'il est plus économique de la produire d'une manière centralisée et de la distribuer ensuite aux clients, le coût de transport est moins élevé que le surcoût d'une production réalisée localement.

- En revanche pour la puissance réactive, il est économiquement plus intéressant de la produire localement par des générateurs d'énergie réactive. Cette pratique est appelée compensation.

- Point de vue client :

Comme pour le distributeur, le transport de la puissance réactive sur le réseau intérieur du client entraîne les inconvénients suivants :

- Surcharge ou surdimensionnement des installations (transformateurs, câbles etc...)
- Pertes actives plus importantes dans ces ouvrages.
- Augmentation de la facture. [3]

I.2.4 Amélioration du facteur de puissance :

Un facteur de puissance proche de l'unité indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation. Une trop grande consommation d'énergie réactive pour une installation électrique va augmenter considérablement ses courants en ligne bien que sa puissance active n'est pas changée. Pour limiter les courants en ligne et donc l'énergie réactive absorbée par l'installation, on doit donc installer des compensatrices sources d'énergie réactive en parallèle (batteries de condensateurs).

On appelle cette technique « **compensation de l'énergie réactive** ». Cette compensation permet d'améliorer le facteur de puissance ($\cos \varphi$). Cette amélioration présente de nombreux avantages :

- Diminution de la facture d'électricité en évitant les pénalités due à la consommation d'énergie réactive au delà de la franchise allouée par la SONELGAZ.
- Diminution de la section des câbles

- Diminution des pertes en lignes
- Réduction de la chute de tension en ligne
- Augmentation de la puissance active disponible du transformateur [11] [12] [13].

I.3 LES DIFFERENTS TYPES DE COMPENSATION

I.3.1 - Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension

En général, les moyens de compensation et de réglage à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations périodiques liées à l'évolution journalière des transits de puissance mais aussi aux variations brusques liées aux incidents sur le réseau. Les dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de réglage de la tension sont:

- des condensateurs et inductances fixes.
- des compensateurs synchrones.
- des compensateurs statiques (SVC, STATCOM....).
- des transformateurs à prises variables (en charge ou à vide).

En distribution, la compensation du réactif se fait au niveau des consommateurs par la tarification qui pénalise un mauvais $\cos\phi$, l'ajustement de la tension se réalisant par les prises en charge des transformateurs au niveau des postes [11].

I.3.2 Condensateurs et inductances fixes

Les bancs de condensateurs installés en dérivation peuvent atteindre quelques Mvar fractionnables par gradins de 2 à 4 Mvar, voir 10 Mvar. Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance au niveau de charges inductives. Parmi leurs inconvénients :

- la puissance réactive produite diminue lorsque la tension diminue ($Q = \omega CV^2$) alors qu'elle devrait augmenter ;
- surtensions et surintensités à l'enclenchement. Des bancs de condensateurs peuvent être insérés en série avec les conducteurs d'une ligne afin de diminuer sa réactance. On diminue aussi la chute de tension entre la source et la charge. ce type de compensation diminue l'angle de transport θ et agit donc aussi sur le transit de puissance active et augmente la limite de puissance transmissible et la stabilité du réseau [12], [13].

Les inductances sont utilisées pour absorber la puissance réactive produite par des lignes longues à très haute tension à faible charge ou des réseaux de câbles. Elles sont généralement raccordées au tertiaire de transformateurs et leur puissance peut aller de 50 Mvar (via un

transformateur à trois enroulements) à 400 Mvar en raccordement direct sur des lignes de très haute tension [12].

I.3.3 Compensateurs synchrones

Un compensateur synchrone est une machine synchrone sans charge, spécifiquement conçue pour la production ou l'absorption de puissance réactive en ajustant l'excitation. Les limites sont les mêmes que pour les groupes de centrales. Des valeurs typiques vont de 20 à 60 Mvar en fourniture et de 10 à 30 Mvar en absorption. Le grand avantage par rapport aux condensateurs ou inductances passives est leur grande flexibilité sous toutes conditions de charge (réglage continu), par contre leur coût est élevé tant en investissement qu'en maintenance [3],[4].

Les groupes de production sont les sources de tension du réseau et peuvent produire ou consommer de l'énergie réactive : une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur. En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance. Vu l'éloignement électrique entre centres de production et de consommation, les groupes ne compensent pas les charges mais peuvent faire face aux besoins en réactif du réseau.

La fourniture de puissance réactive en surexcitation est limitée par le courant rotorique maximum et en absorption par la stabilité de la machine synchrone. Cette limite peut varier avec des régulateurs de tension.

I.4 Classification des compensateurs

I.4.1 compensateur a éléments passifs :

Les principaux éléments passifs sont les inductances et les transformateurs .les éléments peuvent être branchés en parallèle ou shunt, mais aussi en série selon le genre de grandeurs à influencer.

I.4.2 compensateur parallèle :

L'Elément est placé sur la ligne en parallèle. Il peut être alternativement connecté ou déconnecté selon la puissance demandée.

I.4.3 compensateur série :

L'élément est inséré dans la ligne. Dans ce cas, il peut être court-circuité au cas où son utilisation n'est pas nécessaire.

I.4.4 Transformateur Régulateur :

Le principe consiste à insérer dans la ligne une autre source de tension. Mais le réglage est mécanique. Le transformateur régulateur permet de corriger les tensions de ligne avec une

tension additionnelle $\pm \Delta V$. cette tension additionnelle est en phase avec la tension de ligne et par suite la tension effective est égale à $V \pm \Delta V$.

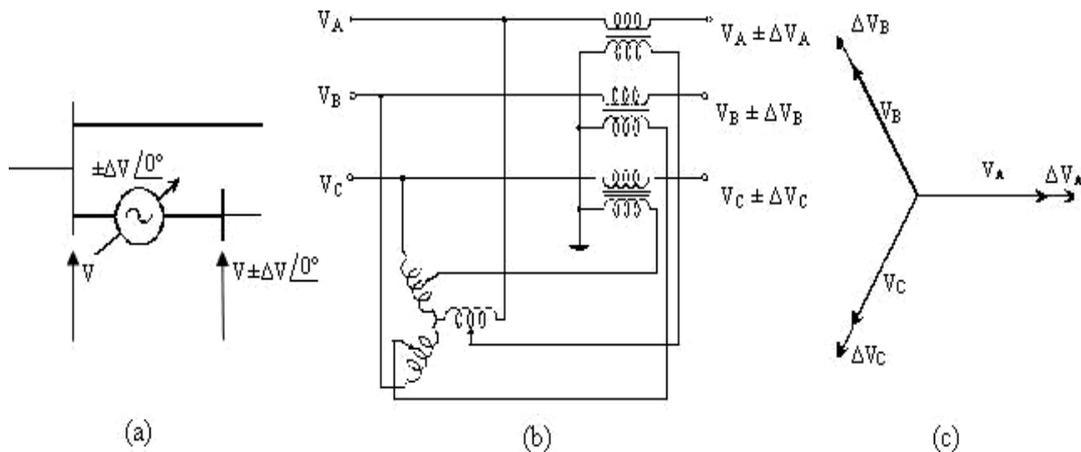


Fig. I.2 Transformateur à gradins: (a) Emplacement dans la ligne
(b) Schéma de branchement – (c) Diagramme vectoriel

I.4.5 transformateur déphaseur

Le transformateur agit toujours comme une source de tension insérée dans la ligne. La tension additionnelle $\pm \Delta V$ est d'abord déphasée de 90° par rapport à la tension de ligne .il permet aussi de corriger l'angle δ Des tensions avec une variation de $+\sigma$, ainsi le contrôle de la puissance active est possible. [13].

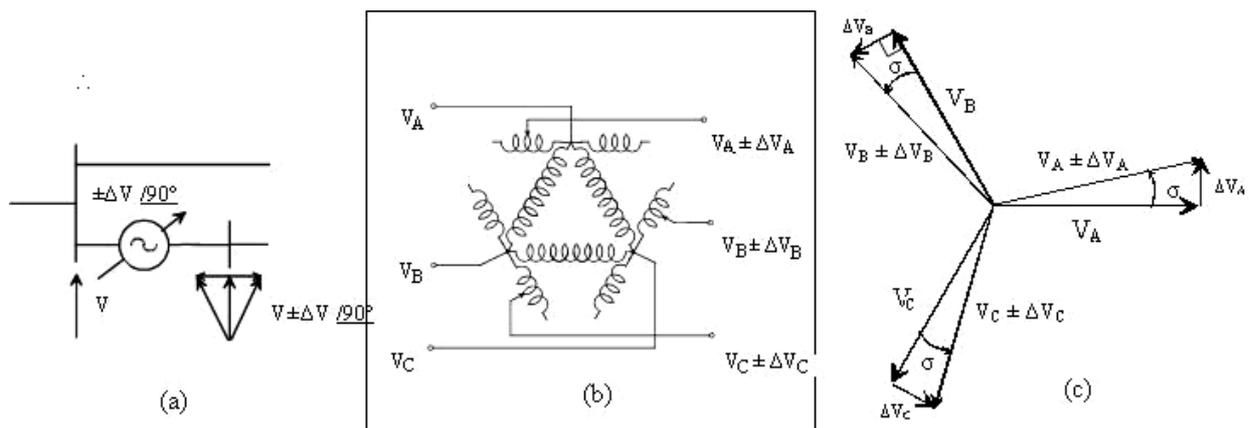


Fig. I.3 Transformateur Déphaseur : (a) Emplacement dans la ligne
(b) Schéma de montage – (c) Diagramme vectoriel

I.5 LES DIFFERENTS TYPES DE COMPENSATION

Les condensateurs peuvent être installés à différents niveaux de l'installation.

I.5.1 compensation globale :

La batterie de condensateur est installée au départ de l'installation. Ce type de compensation convient pour une installation simple de moyenne puissance, elle permet de supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive, de soulager le poste de transformation toutefois ce mode de compensation ne soulage pas les installations en aval car la totalité du courant réactif est présente dans les câbles jusqu'au récepteurs. [3]

I.5.2 compensation partielle :

Les condensateurs sont installés aux départs de chaque atelier. Cette compensation est conseillée lorsque la puissance est importante ou lorsque les ateliers fonctionnent à des régimes différents. Ce type de compensation en plus des avantages de la compensation globale permet de soulager les câbles alimentant les différents ateliers. La totalité du courant réactif n'est plus présente que dans les câbles allant de l'armoire de distribution de l'atelier aux récepteurs.

I.5.3 compensation locale

La batterie de condensateur est raccordée directement à l'appareil ; cette compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance souscrite ce type de compensation est techniquement idéal puisqu'il introduit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée.

I.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique en commençant par l'acheminement de puissance à travers ces réseaux. On a vu brièvement les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport et la chute de tension provoquée par le transit de puissance réactive.

L'analyse de l'écoulement de puissance pour les études et l'exploitation des réseaux Électriques a été également discutée. Enfin on a présenté les différents moyens classiques de compensation d'énergie réactive.

Chapitre III

LES FACTS

Les Systèmes de Transmission à Courant Alternatif Flexibles

LES FACTS

Les Systèmes de Transmission à Courant Alternatif Flexibles

II.1 Introduction :

Les gigantesques pannes électriques survenues récemment dans le monde ont fait prendre conscience de la nécessité de sécuriser et de fiabiliser l'approvisionnement en électricité des zones résidentielles, des bâtiments publics et des sites industriels. À l'évidence, un grand nombre de réseaux électriques souffre de sous investissements, situation exacerbée par les incertitudes sur le partage des rôles et sur les nouvelles règles du jeu imposées au marché concurrentiel. Ainsi, depuis la séparation entre activités de production et activités de transport, les gestionnaires de réseaux électriques ne peuvent plus compter sur les générateurs pour disposer de puissance réactive ; ils doivent désormais la fournir eux-mêmes. Injecter rapidement une quantité satisfaisante de puissance réactive dans les réseaux urbains pour stabiliser leur tension est une obligation d'autant plus contraignante qu'un pourcentage élevé de récepteurs inductifs (moteurs asynchrones des climatiseurs, par exemple) est raccordé au réseau ou que ce dernier est en défaut. De nouveaux dispositifs remplissent parfaitement cette délicate mission, ils ont été classé sous le nom de « FACTS » (flexible alternatif current transmissible system) [3] [9].

En 1988 Hingorani présente lors d'une conférence d'IEEE, un nouveau concept (les systèmes de transmission à courant alternatif flexibles) qui met en relief les nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande et le contrôle du transport de l'énergie électrique en courant alternatif. Selon IEEE le terme FACTS désigne les systèmes de transport et de distribution d'énergie en courant alternatif qui font appel à l'électronique de puissance pour améliorer la flexibilité d'exploitation et leur capacité de transport [8] [14].

Le terme flexible fait référence à la capacité du réseau de s'ajuster automatiquement en fonction des conditions d'exploitation pour garder une bonne marge de sécurité statique et dynamique. Les FACTS sont constitués de dispositifs statiques de l'électronique de puissance combinés à des dispositifs de commande et de réglage. Ils sont destinés à contrôler les transits de puissance dans les réseaux. Leur branchement sur les lignes se fait soit en parallèle, soit en série, selon le type de compensation souhaité. Mais avant l'apparition des FACTS les compensateurs avec des éléments passifs, tel que les condensateurs les inductances et les transformateurs à gradin ont fait preuve de leur utilité. Cependant, les exigences en terme de performances, de

rapidité, et de précision pour un si grand nombre de réseaux interconnectés, obligent à développer d'autres nouvelles techniques pour un meilleur contrôle des réseaux [15].

II.2 Les Techniques Avancées Des FACTS :

La plus part des dispositifs de commande actuels de ces compensateurs, hormis les compensateurs statiques sont mécaniques ou électromécaniques. leur inconvénient majeur est leur faible vitesse de réaction ,ainsi que leur faible fréquence de manœuvre pouvant être initiées sans risque de vieillissement accéléré, l'idée des FACTS vient pour combler cette lacune ,le principal obstacle qui a limité l'application de ces éléments à base de semi conducteurs dans les réseaux à grande puissance a été toujours leur faible puissance de coupure (V_{\max}, I_{\max}).l'historique des semi conducteurs commence avec la diode et le transistor en faible puissance et évolue avec le thyristor en grande puissance . En même temps que le thyristor évolue apparaît le GTO (gate turn off) et l'IGBT (insulated gate bipolar transistor).pour pouvoir disposer librement des instants d'allumage et d'extinction des thyristors. Le GTO et l'IGBT présentent encore des limitations sur les pertes au moment de l'extinction (GTO) ou de l'allumage(IGBT), de même que leur fréquence de coupure limitée. Le MCT (métal oxyde semi conductor controlled thyristor) semble plus prometteur que le GTO surtout dans le sens de réduire le courant nécessaire à son extinction, sa fréquence de coupure plus élevée et sa plus grande flexibilité. Par contre il présente encore une plus faible puissance de coupure [16].

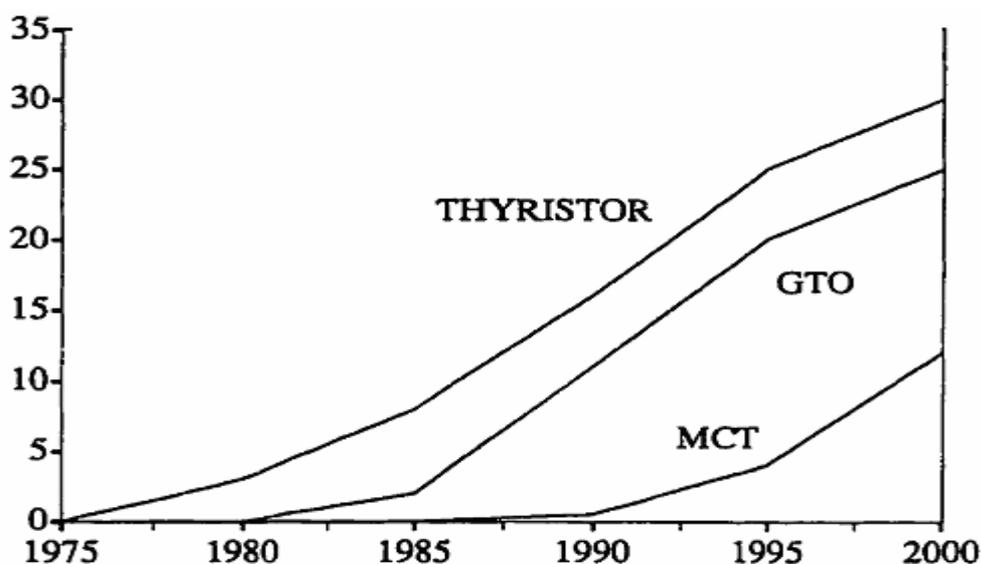


Figure II .1 Evolution des Dispositifs Electroniques de Coupure en MVA au Cours des Années [16]

II.3 Les différents types des systèmes FACTS

Les systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique.

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse beaucoup plus que celle des systèmes électromécaniques classiques, l'intérêt de ces systèmes et non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant voir en améliorant la stabilité des réseaux électriques [14], [17].

Les systèmes 'FACTS' peuvent être classés en trois catégories.

- Les compensateurs parallèles.
- Les compensateurs séries.
- Les compensateurs hybrides (série – parallèle).

II.3.1 Compensateurs parallèles

Selon la demande des consommateurs, les lignes électriques doivent transporter des puissances actives et aussi des puissances réactives. Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d'interconnexion. L'apparition d'équipements utilisant l'électronique de puissance revient vers la fin des années soixante 60 [18]. L'avantage de ces dispositifs permet d'éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction assez lente, et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur, le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif [19] [20].

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau à travers les points de raccordement. La connexion d'une impédance variable en parallèle sur le réseau Électrique résulte en une consommation ou une injection d'un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne [6].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

II 3. 1 .1 Compensateurs parallèles à base de thyristors : Il s'agit de :

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

Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la figure (II.2), la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [20].

Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé, et la tension à ses bornes est positive, il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule.

Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance réactive dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive. Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance [21].

II.3.1.2 TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Le circuit TSC est composé d'une réactance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la figure (II.3), pour un TSC les thyristors fonctionnent en pleine conduction [8], [10].

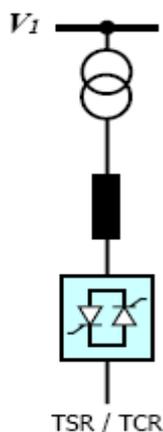


Figure. : II .2 Schéma du TCR

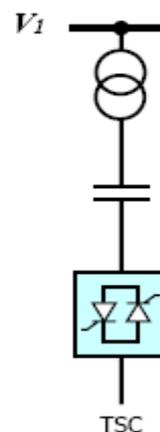


Figure. : II .3 Schéma du TSC

II.3.1.3 SVC (Static Var Compensator)

Le SVC est une association des dispositifs TCR, TSC, banc de capacités fixes et des filtres d'harmoniques. Ces dispositifs constituent le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) [17].

Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut [15].

Le courant traversant la réactance est contrôlé par les valves à thyristors. Il peut donc varier entre zéro et sa valeur maximale grâce au réglage de l'angle d'amorçage des thyristors. Le système de contrôle qui génère les impulsions de gâchette des thyristors mesure soit la tension au point de connexion soit la puissance réactive dans la charge associée et calcule l'instant auquel il faut amorcer les valves [12].

Le compensateur statique d'énergie réactive (SVC) Figure II.4 a été installé pour la première fois en 1979 en Afrique du sud [21]. La caractéristique statique est donnée sur la figure (II.5), trois zones de fonctionnement sont distinctes [20] :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison de TCR et de TSC.
- Une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés.

TSR / TCR TSC

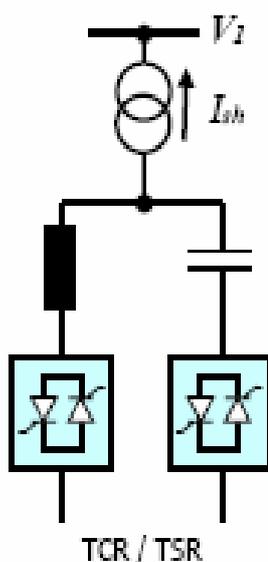


Figure. II.4 Schéma d'un SVC

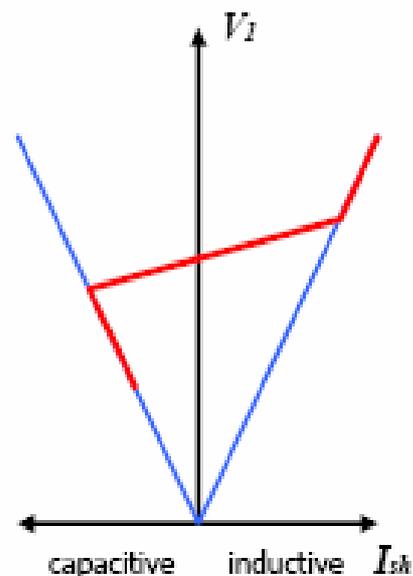


Fig. II.5 caractéristique statique d'un SVC

II.3.1.4 TCBR (*Thyristor Control Breaking Resistor*)

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [16]. La figure (II.6) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique.

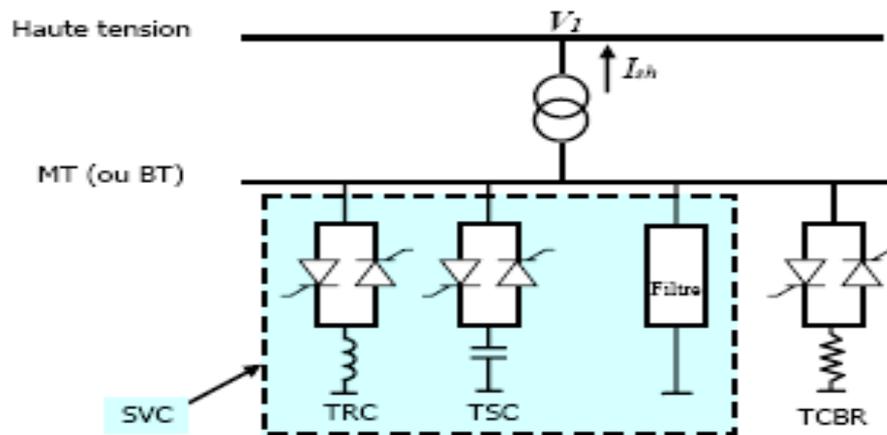


Figure II.6 Schéma d'un TCBR avec un SVC

II.3.2 Compensateur parallèle à base de GTO thyristors

Le STATCOM (STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR) fut le premier FACTS utilisant le VSC (onduleur à source de tension) à être introduit dans les réseaux électriques [22]. Un STATCOM est un convertisseur statique à source de tension connecté en parallèle à un réseau alternatif en général par le biais d'un transformateur abaisseur. En réglant le déphasage du VSC égal à celui de la tension alternative au point de connexion, le flux de courant dans l'impédance de réseau est parfaitement réactif. Le STATCOM, a connu jusqu'à présent différentes appellations [23] :

- **ASVC** (Advanced Static Var Compensator)
- **STATCON** (STATic CONDenser)
- **SVG** (Static Var Generator)
- **SVC light**
- **SVC plus**

Ce type de compensateur est connu de puis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur à connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs, GTO de forte puissance [13]. Le STATCOM à une fonction comparable à celle des SVC avec des performances dynamiques plus importantes.

La figure (II.7) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle.

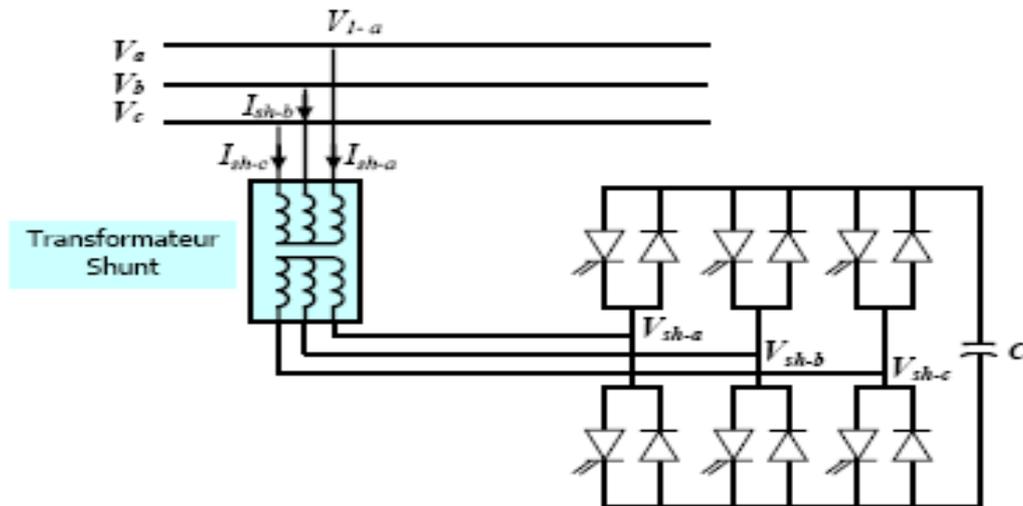


Figure II.7 : Schéma de Base d'un STATCOM

Le rôle de STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [14].

Le STATCOM présente plusieurs avantages [11], [23] à savoir :

- L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'un SVC classique.
- Les performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique.
- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.
- Il ne présente pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des Éléments Inductifs du réseau.
- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les Perturbations du système.
- Une flexibilité opérationnelle maximale est obtenue par la disponibilité de cabines relocalisables.
- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissance.

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de l'onduleur V_{sh} , qui est en phase avec la tension du jeu de barre là où le STATCOM est connecté.

L'écoulement des puissances active et réactive, entre ces deux sources de tension est donné par :

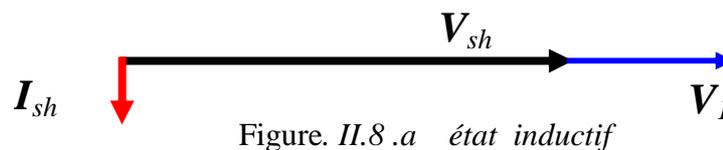
$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X_{sh}} \sin \delta \quad (\text{II.1}) \quad Q = \frac{V_1}{X_{sh}} (V_1 - V_{sh} \cos \delta) \quad (\text{II.2})$$

A partir des équations (II.1) et (II.2), on peut constater que lorsque les deux tensions sont en phase ($\delta = 0$), il n'y a qu'un écoulement de puissance réactive, la valeur de la puissance échangée ne dépendant que de l'amplitude des deux tensions V_1 et V_{sh} .

On peut envisager trois cas possibles en considérant toujours ($\delta = 0$) :

- Si $V_1 = V_{sh}$: pas de génération ni d'absorption de puissance réactive.
- Si $V_1 > V_{sh}$: un courant inductif I_{sh} s'établit entre les deux sources de tension à travers la réactance X_{sh} , ce courant est en retard de 90 degrés par rapport à V_1 , (Fig II.8 a)

Le STATCOM absorbe de la puissance réactive du nœud de connexion par conséquent la tension du nœud 1 V diminue.



- Si $V_1 < V_{sh}$: le courant capacitif I_{sh} qui circule à travers la réactance est en avance de 90 degrés par rapport à la tension du nœud, figure (II.8-b), le STATCOM génère de la puissance réactive au nœud de connexion, c'est-à-dire la tension de ce dernier augmente.

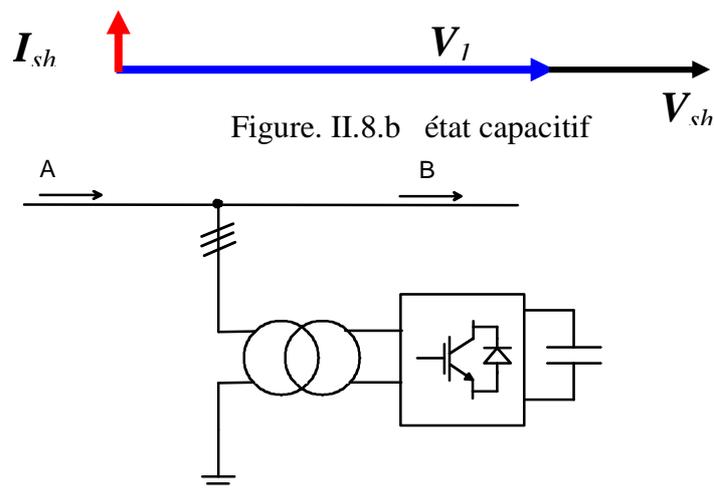


Fig II.9 Compensateur statique synchrone STATCOM

II.4 Comparaison entre STATCOM et SVC Le SVC et le STATCOM peuvent ainsi produire de la puissance réactive, c'est le comportement capacitif. Ils peuvent aussi consommer de la puissance réactive, c'est le comportement inductif.

La Figure II.10 représente les caractéristiques V(I), tension au point de connexion du compensateur en fonction du courant débité par les montages SVC et STATCOM avec les différents comportements [22][32].

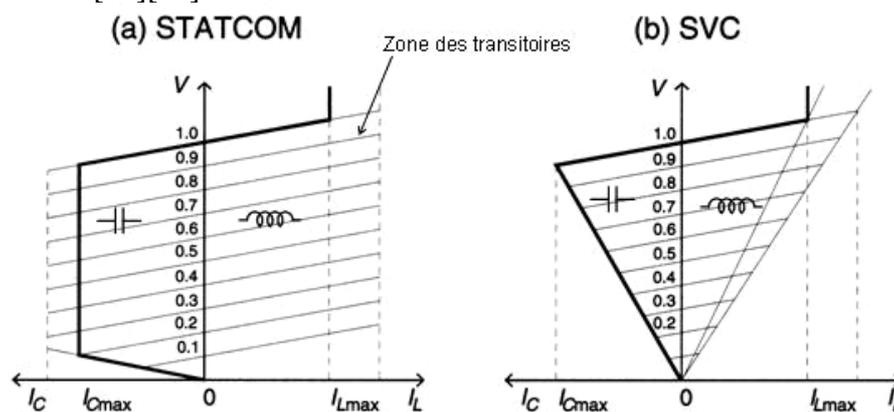


Figure. II.10 Caractéristiques de la tension V (I) - (a) STATCOM - (b) SVC

La zone des transitoires doit être inférieure à 1 seconde quelque soient les semi-conducteurs utilisés. La Figure II.11 illustre les différentes courbes de puissance active en fonction de l'angle de transport δ , pour un montage STATCOM et SVC. Dans la Figure II.9 la tension V_A en début de ligne correspond à V_s (sending voltage) et la tension V_B à V_r (receiving voltage). Dans cette représentation les compensateurs sont insérés au milieu des lignes pour une commodité de calculs et de représentation des courbes. Mais on peut bien les brancher au début ou en bout des lignes [8][22] [23].

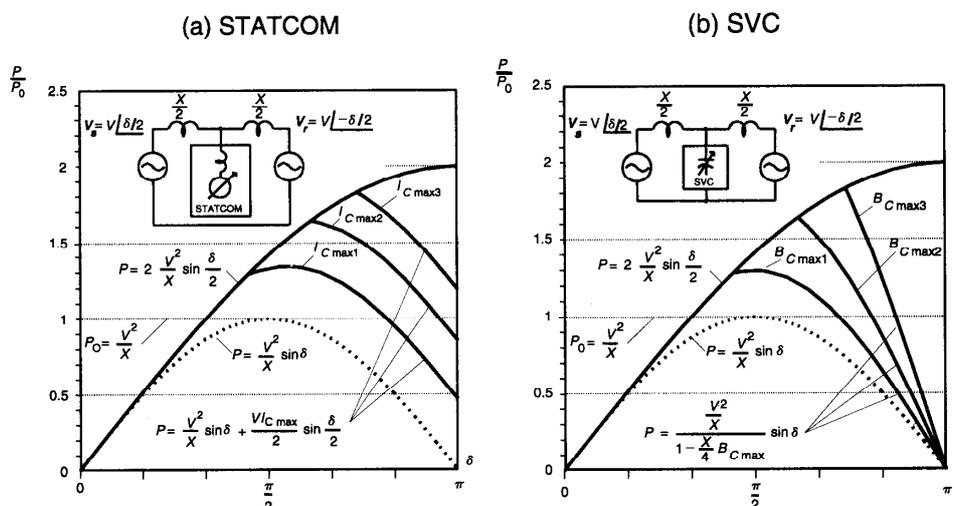


Figure. II.11 Caractéristiques de la puissance échangée P (δ) - (a) STATCOM - (b) SVC[4].

Le STATCOM est une source indépendante qui débite un certain courant dont dépend l'expression de la puissance. La courbe de puissance change suivant le courant maximal que peut débiter le montage. Pour le SVC, il est connecté à une ligne et devient une branche additive au circuit. Les impédances et les réactances changent suivant le comportement du SVC. Ainsi l'expression de la puissance P dépend de la susceptance B_C du montage. Pour les deux montages, la courbe de puissance P_0 correspond au montage sans compensateur

II.5 Compensateurs séries

La puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison dont le comportement est essentiellement inductif. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction en série avec la ligne d'un banc de condensateurs d'impédance X_c . Artificiellement l'impédance de la ligne est donc réduite de X_l à $(X_l - X_c)$ et le transit de puissance est augmenté. De plus, comme le montre le Diagramme de Fresnel représenté par la figure (II.13), le profil de tension est amélioré tout au long de la ligne ($V_s - V_R$ plus petit) et l'angle de transport est réduit d'où une amélioration de la stabilité dynamique du système de transport [24].

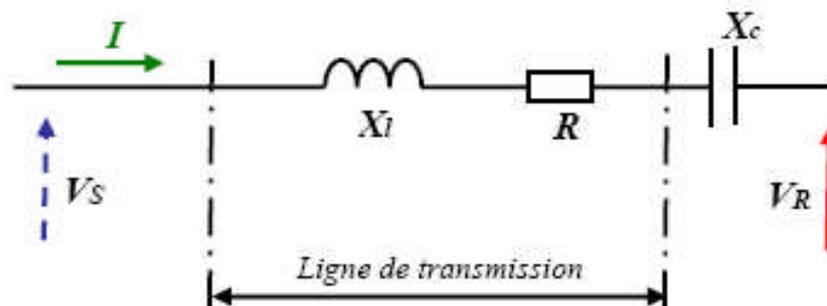


Figure. II.12 Ligne de Transmission avec Système de Compensation Série

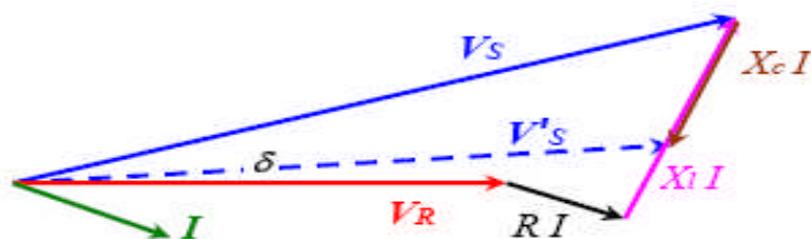


Figure. II.13 Diagramme de FRESNEL

II.5 .1 Compensateurs séries à base de thyristors

Les compensateurs série à base de thyristors les plus connus sont :

II.5.1.1 TCSC (*Thyristor controlled series capacitor*)

Un module de TCSC est composé d'un banc de condensateur en parallèle avec une inductance commandée par thyristors, l'impédance totale vue par la ligne est une combinaison parallèle de capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'allumage des thyristors figure (II.14). On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser [25].

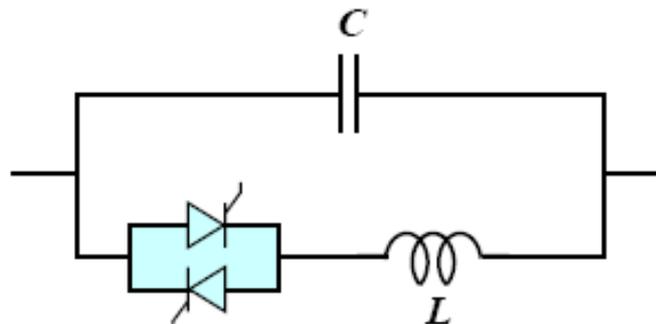


Fig. II.14 Structure d'un TCSC

II.5.1.2 TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés [7].

II.5.1.3 TCSR (*Thyristor Controlled Series Reactor*)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable [3]. Lorsque l'angle d'amorçage de réactance contrôlée est égal à 120 degrés, le thyristor cesse de conduire, et la réactance non contrôlée X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison des deux réactances en parallèle [3].

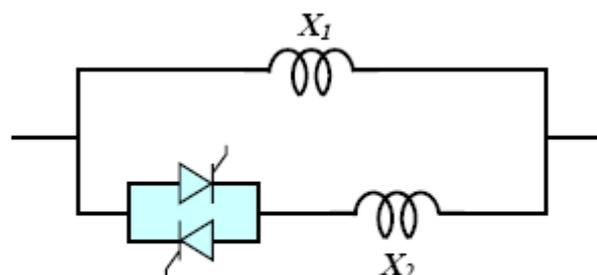


Fig. II. 15 Structure d'un TCSR

II.5.1.4 TSSR (Thyristor Switched Serie Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage peut être soit de 90 degrés soit de 180 degrés [3].

II. 5. 2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors

Le compensateur série à base de GTO thyristors le plus connu est le : *SSSC* (*Static Synchronous Series Compensator*). C'est un convertisseur à source tension placé en série avec la ligne de transport d'énergie électrique à travers un transformateur, ce type de compensateur est le dispositif plus important de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne [26]. La figure (II.17) montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport.

Un SSSC est capable d'échanger de la puissance réactive et de la puissance active

(En insérant un système de stockage d'énergie), avec le réseau. Si on ne désire que la compensation réactive, la source d'énergie peut être sous dimensionnée.

La tension injectée à la fréquence du réseau peut être commandée en amplitude et en phase, quand il s'agit de la compensation purement réactive, seule l'amplitude de la tension est contrôlable, car le vecteur de tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne, dans ce cas la tension injectée en série peut faire avancer ou retarder le courant de la ligne de 90 degrés. Cela signifie que le SSSC peut être commandé en douceur par une valeur de courant quelconque en avance ou en retard de phase à l'intérieure de la plage de fonctionnement [27]. La caractéristique statique d'un SSSC (compensateur synchrone statique série) est donnée par la figure (II.16) :

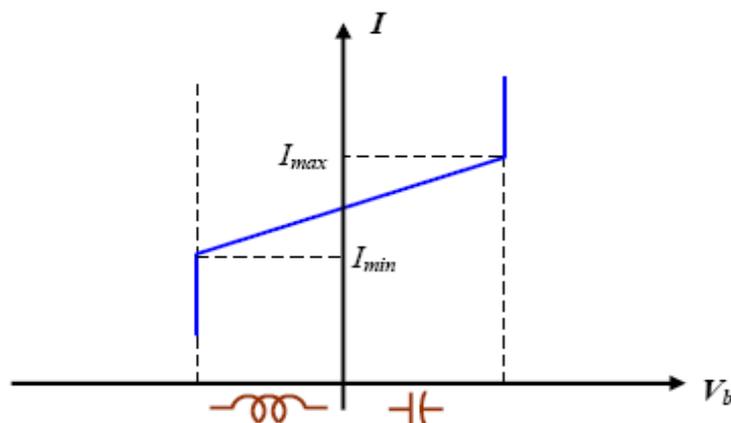


Fig. II.16 Caractéristique Statique du SSSC

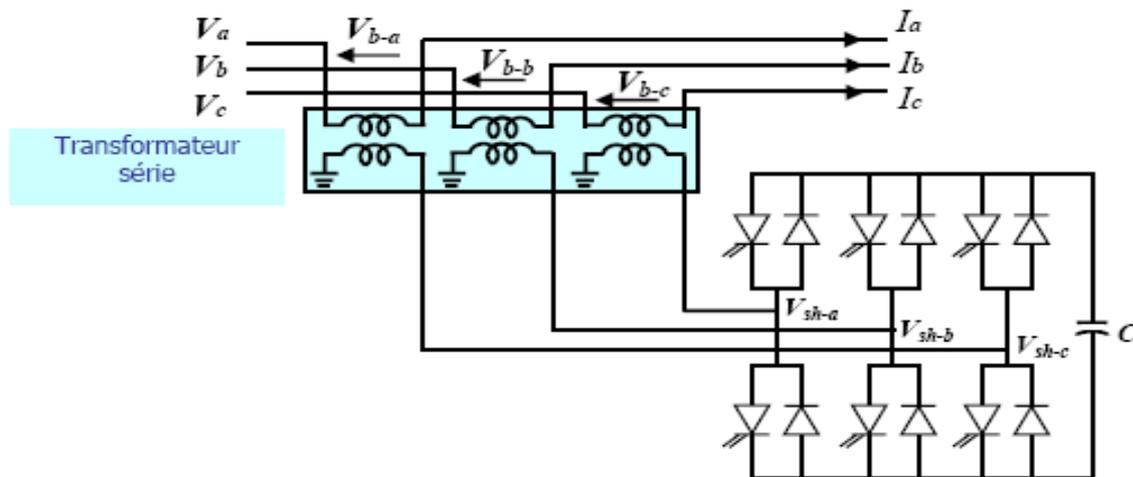


Figure II.17 : Schéma de Base du SSSC

Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension injectée n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de la ligne [3]. Le SSSC est appliqué pour la commande dynamique du flux de puissance et de la tension ainsi que pour la stabilité de l'angle de transport. Le fait que le SSSC puisse produire autant de tensions capacitatives qu'inductives sur une ligne ceci élargit le domaine d'application de ce dispositif. Lors de la commande du flux de puissance, un SSSC peut être utilisé pour augmenter ou réduire ce flux [9].

II.6 Compensateurs hybrides (série – parallèle)

II.6.1 UPFC (*Unified Power Flow Controller*)

Ce dispositif est l'union de deux compensateurs l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle, le concept de ce dispositif a été présenté en 1990 par L. Gyugyi [28]. Il possède à la fois la fonctionnalité de trois compensateurs (série, parallèle et déphaseur). Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne. Son schéma de base est donné par la figure (II.18).

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur [16].

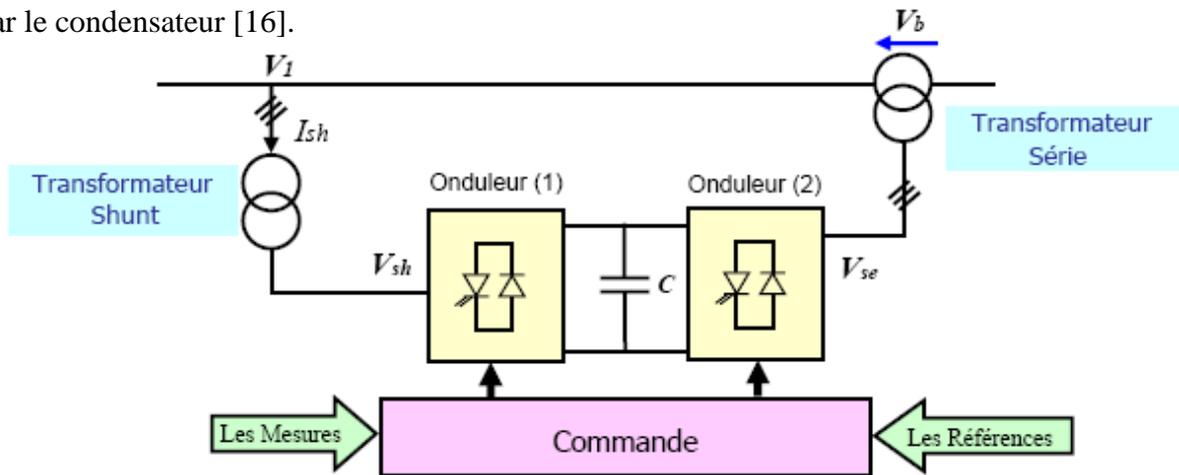


Figure II.18 : Schéma de Base d'un UPFC

L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne, il est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

Dans la figure (II.18) l'onduleur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur (2). Il réalise aussi la fonction de compensation réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. L'onduleur (2) injecte la tension V_b et fournit les puissances actives et réactives nécessaires à la compensation série.

L'UPFC offre une flexibilité énorme qui permet le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne par un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'un à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions [25].

II.7 Synthèse

Les différents dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des considérations économiques entreront également dans le choix du type d'installation à utiliser. Le tableau (II.1) synthétise les Principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS. Le nombre « + » est proportionnel à l'efficacité du dispositif. [24].

Contrôle du Transit de Puissance	Contrôle de la Tension	Stabilité Transitoire	Stabilité Statique	Dispositif
+	+++	+	++	SVC
+	+++	++	++	STATCOM
++	+	+++	++	TCSC/GCSC
++	+	+++	++	SSSC
+++	+	++	++	TCPST
+++	+++	+++	+++	UPFC
+++	+	+++	++	IPFC

Le signe(+) montre le degré d'efficacité du dispositif

II.8 Conclusion

L'expansion continue des réseaux de transport d'énergie électrique montre les limites des capacités de transit des systèmes existants. Les gestionnaires de réseau sont entrainés d'exploiter le système de transport aux près de ses limites thermiques et dynamiques, alors que les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et à la continuité de service. Les équipements à base d'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème. Grâce aux avancées récentes dans la technologie GTO / IGBT, le temps de réaction des dispositifs FACTS a diminué à quelques millisecondes.

Les systèmes FACTS ont la capacité d'augmenter la puissance transmissible dans la ligne en utilisant des commandes appropriées. Ses systèmes peuvent également améliorer la stabilité transitoire du réseau de transport.

Dans ce présent chapitre nous avons présenté les systèmes FACTS en général. Nous avons choisi d'étudier le STATCOM pour la compensation de l'énergie réactive.

L'influence de la compensation shunt de la puissance réactive sur le système électrique a été discutée dans ce chapitre. Les bénéfices de la compensation sont démontrés et différents types de compensateurs avec leurs principes de fonctionnement sont décrits. Les avantages d'un tel compensateur par rapport aux autres types de compensateurs sont énumérés.

Chapitre III

Modélisation et commande du STATCOM

III.1 OBJECTIFS :

Une source à base de semi-conducteurs est capable de fournir ou d'absorber des **VAR**. Cette source **peut** être de type source de tension ou source de courant. Ce mémoire ne considère que la source de tension. Branchée en parallèle avec le système de transmission ou le système de distribution. Cette similarité réside dans le fait qu'une source à semi-conducteurs produit la tension de fréquence synchrone, triphasée, avec l'angle de déphasage et l'amplitude contrôlable. Ses avantages sur le compensateur synchrone sont nombreux; le temps de réponse est presque instantané, il n'y a pas d'inertie, le coût d'entretien est minimal. [13], [30].

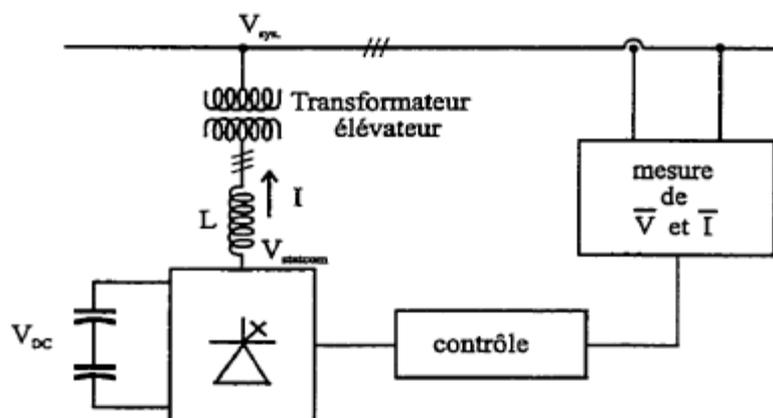


Fig. III.1 Diagramme Bloc d'un ASVC

Un STATCOM est branché au système via un transformateur élévateur (figure III.1)

La composante principale d'un STATCOM est un convertisseur de tension (figure III.2) qui produit une tension triphasée en créneaux. En réalité une telle tension contient trop d'harmoniques. Afin d'atténuer ce problème, plusieurs onduleurs peuvent être mis en cascade. L'échange de puissance réactive entre l'onduleur et le système CA est contrôlé par l'amplitude de la tension produite à la sortie d'onduleur [13], [16],[31]. Il y a trois possibilités. Si l'amplitude de la tension produite par l'onduleur est plus élevée que celle du système CA, le courant réactif sera injecté dans le système et l'onduleur se comportera comme une source de puissance réactive. Si elle est égale à l'amplitude de la tension du système CA, il n'y aura pas d'échange de puissance réactive, et finalement, si elle est inférieure à celle du système CA, le courant réactif sera absorbé par l'onduleur. Le contrôle d'écoulement de la puissance active s'effectue avec l'angle de déphasage entre la tension de l'onduleur et la tension du système CA. S'il n'y a pas de déphasage entre ces deux tensions, il n'y aura pas d'écoulement de la puissance active. Les

diagrammes vectoriels pour les trois possibilités, avec l'angle de déphasage zéro entre les deux tensions (cas de compensateur idéal), sont présentés aux figures III.3a , III.3b et III.3c

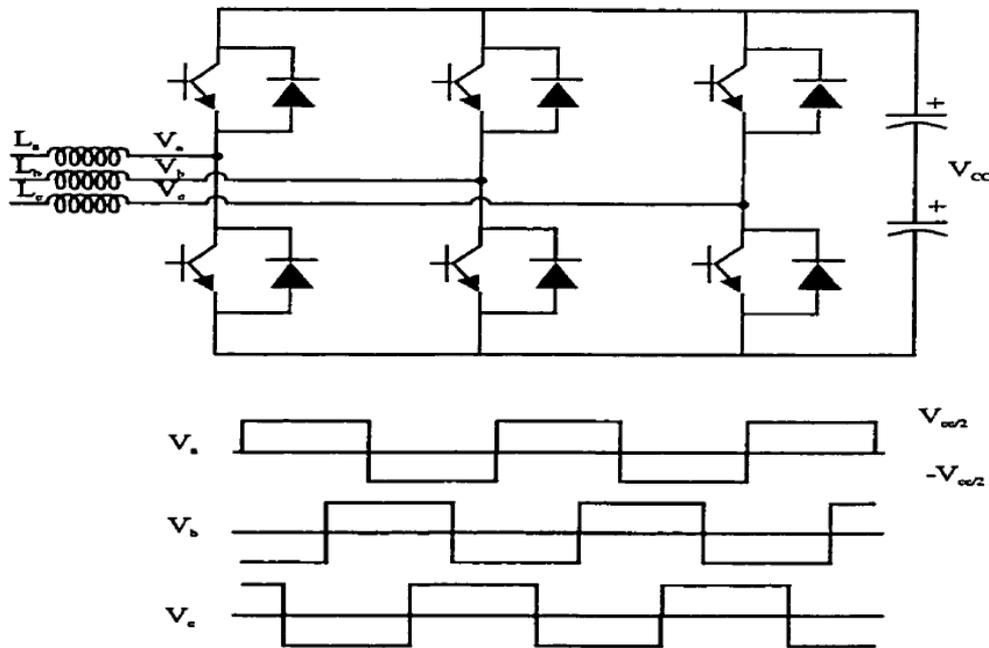


Fig. III. 2 Structure générale d'un onduleur triphasé

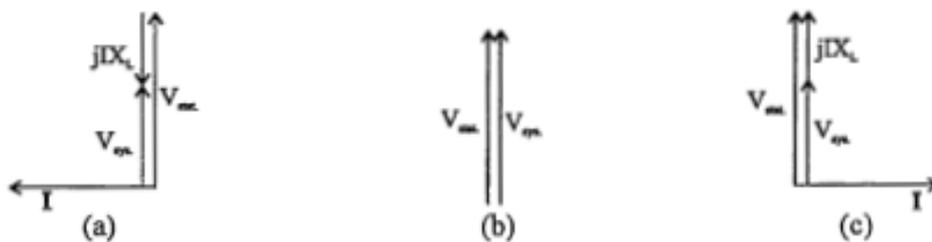


Fig. III.3 Diagramme vectoriels de fonctionnement d'un ASVC idéal

(a) en mode capacitif (b) neutre (c) inductif

En réalité, il faut fournir également une certaine quantité minimale de la puissance active. Cette puissance active est indispensable pour couvrir les pertes des interrupteurs et des condensateurs cote CC de l'onduleur. Il faut aussi charger ou décharger les condensateurs pendant les phénomènes transitoires afin de fournir la réponse rapide. Si la tension de l'onduleur est décalée en arrière par rapport à la tension du système CA, la puissance active sera absorbée par l'onduleur couvrant ainsi ses pertes. Si l'angle de déphasage entre ces deux tensions est plus élevé que nécessaire pour compenser les pertes, les condensateurs à côté CC se chargeront et la

tension à ses bornes commencera à croître. Si la tension d'onduleur est en avant par rapport à la tension de système AC les condensateurs commenceront à décharger et la tension diminuera. Les diagrammes vectoriels pour le cas réel de production de courant capacitif et de courant inductif est donné par les figures III.4-a et III.4-b.



Fig.III.4 Diagrammes vectoriels de fonctionnement d'un ASVC réel
(a) en mode capacitif (b) en mode inductif .

Physiquement, le fonctionnement d'un STATCOM peut être expliqué de la façon suivante: la différence dans l'amplitude et dans la valeur efficace entre la tension produite par l'onduleur et la tension du réseau provoque la circulation du courant. La tension alternative produite par l'onduleur étant synchronisée avec celle du réseau (déphasage zéro en régime permanent) empêche l'échange net de l'énergie entre le réseau et l'onduleur en régime permanent, mais quand même, l'échange de la puissance instantanée prend la place. La tension et le courant de chaque phase de l'onduleur sont décalés de 90 degrés l'un par rapport à l'autre. Dans un système triphasé et équilibré la puissance instantanée est constante et elle dépend seulement de l'angle de déphasage entre la tension et le courant. Étant donné que cet angle est de 90 degrés, on peut dire que la puissance instantanée qui circule du réseau vers les condensateurs du côté CC de l'onduleur par une phase est égale à celle qui circule des condensateurs du côté CC vers le réseau par deux autres phases et vice versa. Donc, l'onduleur interconnecte les phases d'un système triphasé de façon à permettre l'échange de la puissance réactive entre elles. [13], [30]. Les condensateurs du côté CC de l'onduleur ne jouent pas le rôle du partenaire qui effectue l'échange de l'énergie avec le réseau et, il n'y a nul besoin pour d'éléments de très grande dimension capables d'emmagasiner l'énergie (condensateur et inductance) comme dans un SVC. Le rôle des condensateurs du côté CC de l'onduleur est de garder la tension CC constante dans le régime permanent ou, autrement dit, ils sont la source de la tension continue qui est, par l'intermédiaire des interrupteurs, convertie en tension alternative qui apparaît de l'autre côté de

l'onduleur. Il faut mentionner qu'une ondulation de la tension aux bornes des condensateurs du côté CC existe parce que la tension alternative produite par l'onduleur n'est pas sinusoïdale, mais plutôt rectangulaire et, l'égalité de la puissance instantanée des deux côtés de l'onduleur est imposée par la loi de la conservation d'énergie. La compensation de la puissance réactive en monophasée est possible, mais dans ce cas il n'y aura pas d'échange de la puissance instantanée entre les phases du système et, les condensateurs du côté CC du convertisseur absorbent et restituent la puissance instantanée ce qui résulte en un changement périodique de la tension du côté CC (ondulation de tension). Donc la capacité du condensateur du côté CC doit être assez élevée afin de permettre cet échange d'énergie et de diminuer l'ondulation dans la tension.

Les différents types de commandes d'un onduleur appliqué comme source de puissance réactive sont possibles, tout dépendant d'objectif d'application. Nous proposons la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI). La MLI a pour avantage une meilleure forme d'ondes et la variation du fondamental est possible sans charger ou décharger les condensateurs qui forment CC. Il suffit de changer la valeur du signal de contrôle. Mais cette méthode a aussi un inconvénient important en ce que les pertes des interrupteurs à base de semi-conducteur montent avec la fréquence d'interruption (pertes de commutation). Afin de diminuer le contenu des harmoniques et d'éviter le spectre de fréquences auditives pour le contrôle de type MLI, la vitesse de commutation est extrêmement élevée (suggéré plus que 15 kHz). Tout cela implique que les pertes introduites avec ce type de commande seraient inacceptables pour la tenue en courant et en tension rencontrée dans le système de transmission et de distribution de l'énergie électrique.

Un onduleur de type tension peut être contrôlé par le courant (contrôle par hystérésis). Ça veut dire que le courant imposé par le contrôle peut être produit à la sortie de l'onduleur. Cette technique de contrôle utilise Akagi et al. [13] dans son concept de compensateur. Ils introduisent la puissance réactive instantanée comme le produit vectoriel des composantes appropriées des tensions et des courants instantanés en référence α, β . Dans sa méthode la composante réactive des courants est calculée et annulée par le fonctionnement des interrupteurs. Un tel contrôle permet l'annulation des harmoniques et le compensateur est nommé "filtre actif".

Les interrupteurs de choix dans le domaine de la haute tension sont GTO (Gate Turn Off). Sa tenue en tension s'approche de celle du thyristor et les GTO de 36 MVA (6000V, 6000A) sont accessibles au marché. Souvent, ce n'est pas suffisant, surtout dans la compensation de la

puissance réactive. Afin de mitiger ce problème plusieurs interrupteurs peuvent être mis en série pour former une cellule de commutation, augmenter la tenue en tension et l'approcher de celle du système AC [13][22][23]. La figure III.5 montre la caractéristique statique d'un ASVC. En le comparant avec celui d'un SVC (figure II.10b), on peut constater la supériorité d'un ASVC par rapport à un SVC à la limite du fonctionnement. Autrement dit, un ASVC peut donner le courant nominal et supporter le système de transmission dans le cas de chute de tension extrême, mais par contre, le courant d'un SVC diminuera si la tension diminue au dessous d'une certaine valeur. Les autres avantages d'un ASVC par rapport à un SVC [22] sont une plus grande flexibilité de contrôle, la réponse plus rapide et, surtout le fait qu'un ASVC n'a pas besoin de gros condensateurs pour le stockage d'énergie ce qui résulte en diminution de ses dimensions et, de plus, en même temps, la possibilité de résonance avec le réseau est minimisée. [31].

Présentement, il y a quelques prototypes de STATCOM qui sont installés [30] en combinaison avec SC (switched capacitors) pour le support de la tension. Le rôle de STATCOM est d'effectuer la régulation de la tension et de répondre aux phénomènes transitoires.

III .2 Principe de Fonctionnement du compensateur

III.2. 1 Rappel

Nous introduisons le concept du compensateur statique d'énergie réactive de type avancé qui est basé sur la technique de l'équivalence exacte avec le compensateur synchrone tournant conventionnel, ce type de compensateur utilise un onduleur à source de tension transformant du continu en alternatif avec un condensateur dans la partie continue utilisé comme un élément de stockage d'énergie.

Dans cette partie, la modélisation du compensateur statique d'énergie réactive de type avancé STATCOM est présentée. Nous commençons la modélisation par la présentation et la simplification des équations mathématiques afin d'aborder le contrôle de notre système dans le repère triphasé ABC et dans le repère de Park d-q.

III.2 .2 Circuit Principale du STATCOM

Le STATCOM proposé est un convertisseur à MLI (Modélisation de Largeur d'Impulsion) continu alternatif donné par la figure III.5, Son circuit principal est constitué par un onduleur à

source de tension relié au réseau électrique par l'intermédiaire d'une réactance relativement faible X_s (qui est habituellement constituée par l'inductance de fuite par phase du transformateur de couplage), la partie continue est connectée à un condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie.

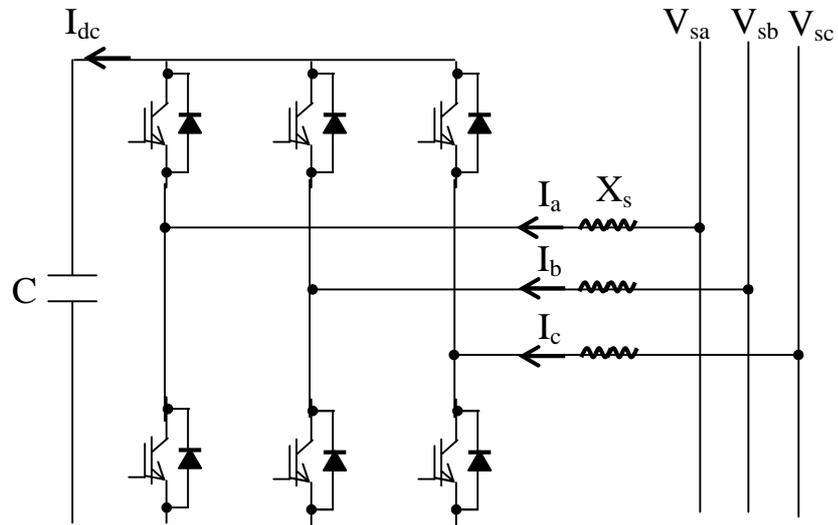


Figure III.5 Circuit de puissance de l'ASVC

L'onduleur, qui est la pièce maîtresse du STATCOM, est constitué par six commutateurs à semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture. Chaque commutateur est shunté par une diode branchée en antiparallèle.

La figure III.6 représente le schéma du circuit équivalent du STATCOM. Dans cette représentation L_s est l'inductance de fuite par phase du transformateur reliant le STATCOM au réseau, R_s représente les pertes actives du transformateur et de l'onduleur. Dans la partie continue C représente la capacité du condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie. V_{oa} et V_{sa} sont les amplitudes des fondamentales des tensions de sortie de l'onduleur et celle du réseau respectivement. [32]

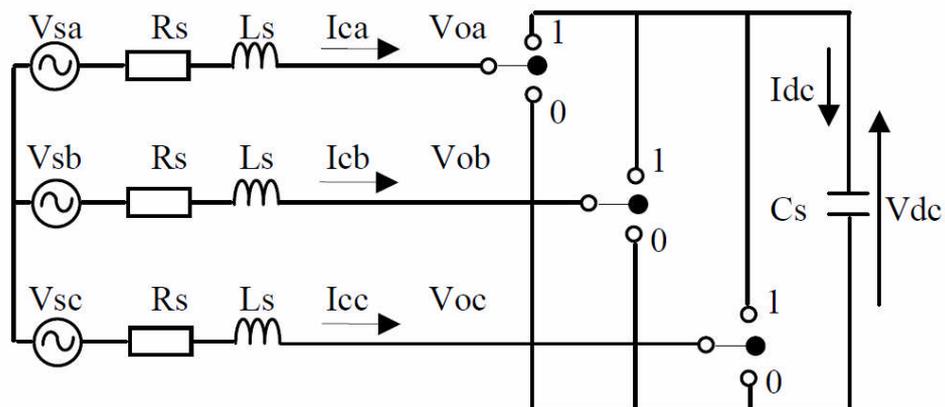


Figure III.6 schéma détaillé du circuit du STATCOM

Le principe de fonctionnement du STATCOM peut être monté en se basant sur son circuit monophasé équivalent donné par la figure III.7.

En régime permanent le STATCOM va générer un courant capacitif si la tension de sortie de l'onduleur est supérieure à celle du réseau, et il absorbe un courant inductif si sa tension de sortie est inférieure à celle du réseau, ainsi en faisant varier l'amplitude des tensions de sortie produites par l'onduleur, l'échange d'énergie réactive entre le STATCOM et le réseau peut être aisément réglé.

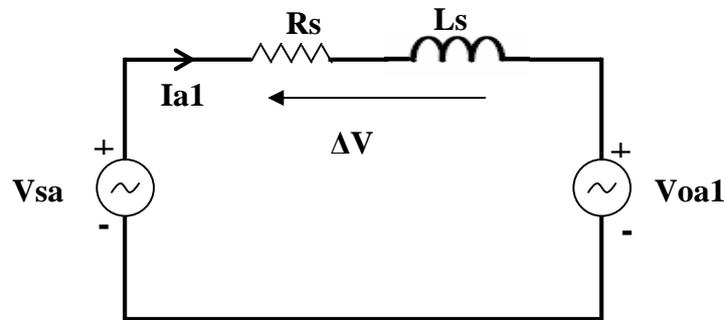


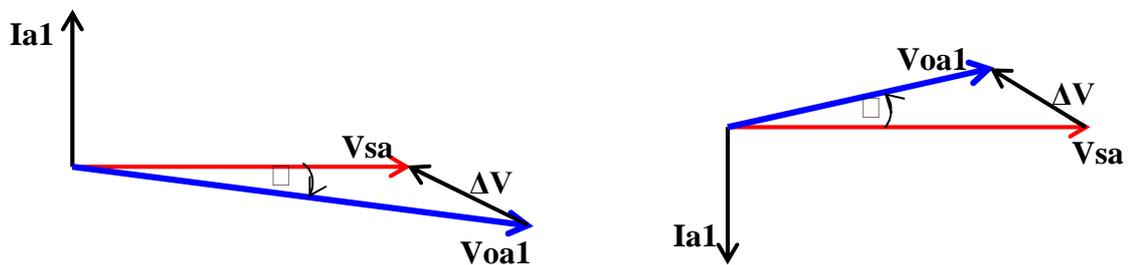
Figure III.7 Circuit monophasé équivalent du STATCOM

Avec :

V_{sa} : Tension simple du réseau.

V_{oa1} : Composante fondamentale de la tension de sortie du STATCOM.

I_{a1} : Composante fondamentale du courant du STATCOM.



III.3 Modélisation du STATCOM

Figure III.8 Diagramme de phase pour le mode capacitif et inductif
En se référant à la figure III.7 on peut établir le modèle mathématique du STATCOM

comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{oa} \\ v_{sb} - v_{ob} \\ v_{sc} - v_{oc} \end{bmatrix} \tag{III.1}$$

Les tensions générées par l'onduleur sont données par (2.2)

$$\begin{bmatrix} v_{oa} \\ v_{ob} \\ v_{oc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

Le modèle matriciel du coté continu est donné par :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} \quad (III.3)$$

Le modèle du compensateur à base de l'onduleur est complètement défini par les équations (III.1), (III.2) et (III.3).

III.3.1 Modèle du compensateur sur les axes d-q.

Nous allons procéder à la transformation des axes abc vers les axes d-q du modèle établi au paragraphe précédent. Cette transformation va se faire en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ Les GTO sont considérés comme des interrupteurs idéaux.
- ✓ La source est équilibrée.
- ✓ Les harmoniques générées par les GTO sont négligées.

La source de tension triphasée V_{ABC} et la matrice de transformation de park P sont respectivement définies comme suit :

$$V_{ABC} = \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_L \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ \sin(\omega t + \alpha) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.5)$$

Avec : ω Pulsation de la source. V_L : Tension efficace composée.

La tension délivrée par l'onduleur en absence d'harmonique est représentée par :

$$V_{OABC} = \begin{bmatrix} V_{OA} \\ V_{OB} \\ V_{OC} \end{bmatrix} = F \cdot V_{dc} \quad (III.6)$$

Avec F fonction de commutation définie par la relation (III.7).

$$F = \sqrt{\frac{2}{3}} D \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

Et

$$IM = \sqrt{\frac{2}{3}} D \quad (III.8)$$

avec D : Indice de modulation dans les axes de Park

L'Inverse de la matrice P est égale à sa transposée.

$$P^{-1} = P^T \quad (III.9)$$

L'équation de la source devient :

$$V_{qd0} = P \cdot V_{ABC} = V_L \cdot \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

Et celle de l'onduleur devient :

$$V_{oqd0} = P \cdot V_{OABC} = \begin{bmatrix} 0 \\ D \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{dc} \quad (III.11)$$

La relation (III.1) transformée sur les axes d-q donne la relation (III.12).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_s} & -\omega \\ \omega & \frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} v_q - v_{oq} \\ v_d - v_{od} \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Remplaçons (III.10) et (III.11) dans (III.12) on obtient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{D}{L_s} \\ 0 & \frac{D}{C} & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ v_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} -V_L \sin \alpha \\ V_L \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

D'après (III.13) on constate que le paramètre de contrôle α se présente sous la forme de Sin α et Cos α . On est donc en présence d'un système non linéaire.

III.3.2 Modèle linéaire.

Nous linéarisons le système d'équation d'état (III.13) autour d'un point de fonctionnement, en prenant en considération les hypothèses suivantes.

- ✓ La variation de α autour de zéro.
- ✓ La variation $\Delta \alpha$ petite ($|\Delta \alpha| < 5^\circ$).
- ✓ Les termes de perturbation du second ordre négligés.

La notation Δ est introduite pour indiquer une valeur perturbée.

Les relations de (III.14) à (III.18) sont introduites dans le système (III.13).

$$i_q = i_{qo} + \Delta i_q \quad (III.14)$$

$$i_d = i_{do} + \Delta i_d \quad (III.15)$$

$$v_{dc} = v_{dco} + \Delta v_{dc} \quad (III.16)$$

$$\alpha = \alpha_o + \Delta \alpha \quad (III.17)$$

$$Q = Q_o + \Delta Q \quad (III.18)$$

Le système d'état linéarisé est donné par la relation (III.19)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{qo} \\ \Delta i_{do} \\ \Delta v_{dco} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{D}{L_s} \\ 0 & \frac{D}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_{qo} \\ \Delta i_{do} \\ \Delta v_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} -V_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta \alpha \quad (III.19)$$

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} -V_L & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_{qo} \\ \Delta i_{do} \\ \Delta v_{dco} \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

III.4 -Synthèse des Réglages du STATCOM

III.4.1 Réglage proportionnel-Intégral (PI)

A partir du système d'équations d'état (III.19) et (III.20) nous déterminons la fonction de transfert du système qui lie la puissance réactive ΔQ à l'angle de commande $\Delta\alpha$, en utilisant la transformée de Laplace on aura :

$$G(s) = \frac{\Delta Q_c(s)}{\Delta\alpha(s)} = \frac{A(s)}{B(s)} \quad (III.21)$$

$$\text{Avec: } A(s) = \frac{V_L^2}{L} \left[s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{D^2}{LC} \right]$$

$$\text{et } B(s) = s^3 + \frac{R}{L}s^2 + \left\{ \left[\frac{R}{L} \right]^2 + \frac{D^2}{LC} + \omega^2 \right\} s + \frac{D^2 R}{L^2 C}$$

La figure (III.9) représente la réponse en boucle ouverte de $G(s)$, en prenant comme paramètres du système ceux donnés par le tableau (III.1). On constate que la réponse est lente, il faut au moins 250 ms (15 cycles) pour atteindre le régime établi.

Tableau (III.1) Paramètres du circuit

Signification	Symbole	Valeur
Fréquence réseau	f	50 [Hz]
Tension composée efficace du réseau	V_L	220[Kv]
Résistance représentant les pertes Totale	R_s	1 [Ω]
Inductance de liaison	L	5 [mH]
Capacité	C	500 [μ F]
Indice de Modulation	$\sqrt{\frac{2}{3}} D$	1.2

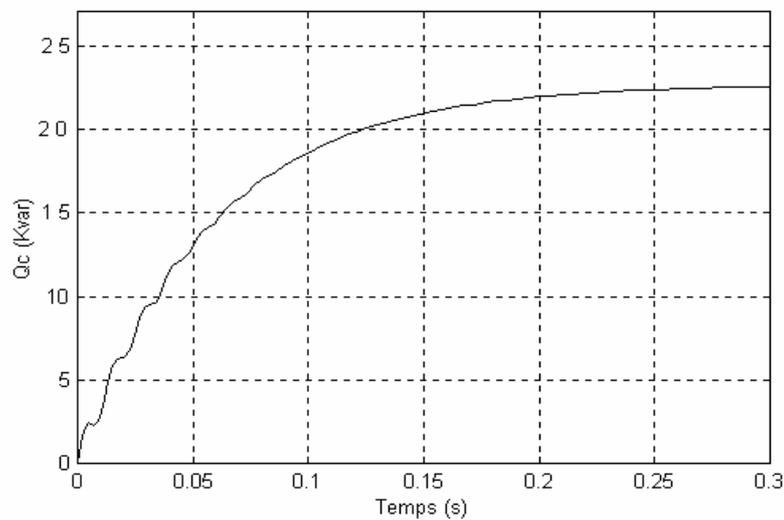


Fig : III.9 réponse en boucle ouverte de G(s)

III.4.2 Détermination des paramètres du régulateur PI

La fonction de transfert du régulateur PI est : $F_{PI}(s) = K(1 + \frac{1}{T_i s})$

La fonction de transfert en boucle fermée du régulateur PI associé à la fonction de transfert

$G(s)$ est donnée par :

$$[F_{PI}.G]_{BF}(s) = \frac{F_{PI}.G}{1 + F_{PI}.G} \quad (III.22)$$

En prenant $T_i = 0.05$, la valeur de K qui donne une réponse en boucle fermée avec un amortissement $\zeta = 0.707$ est :

$$K = 0.2588$$

Ainsi les paramètres du régulateur PI sont :

$$K_p = K = 0.2588$$

$$K_i = \frac{K}{T_i} = 31.79$$

La réponse du système en boucle fermée est illustrée par la figure (III.10).

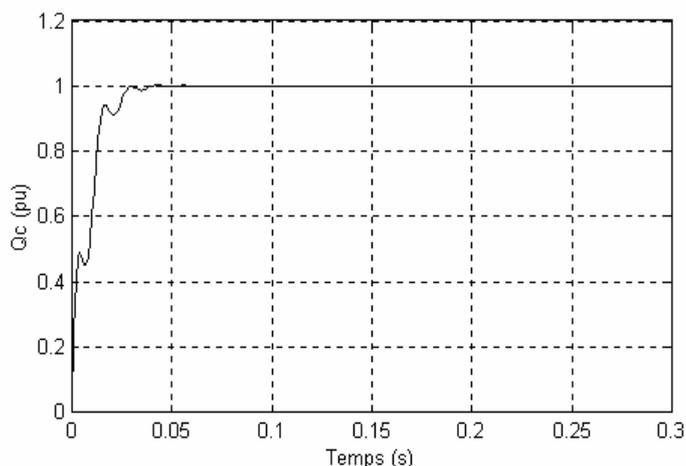


Fig.III.10 Réponse en boucle fermée

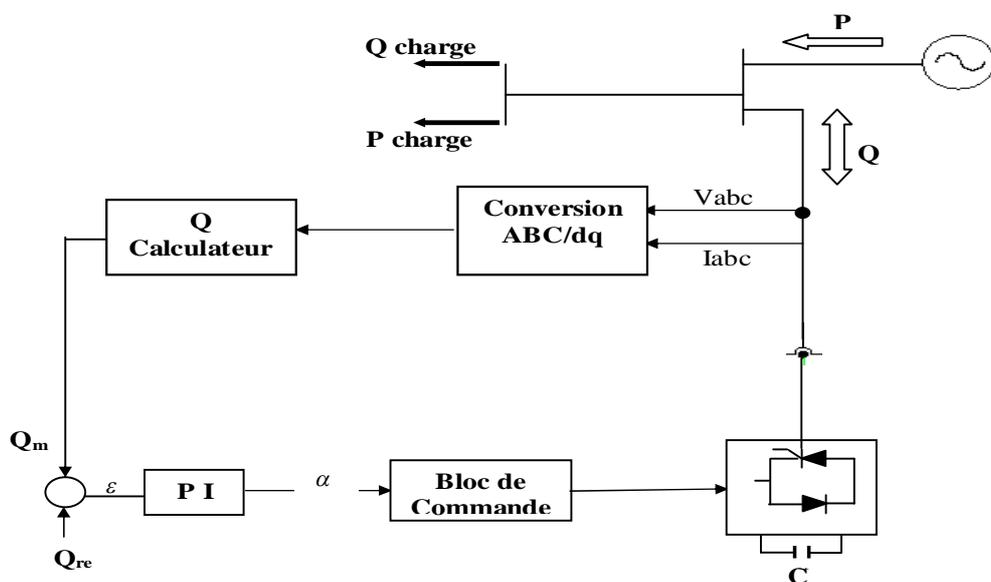


Fig : III.11 schéma de régulation de la puissance réactive

III.4.4 Modélisation de l'onduleur de tension

La fig III.12 donne le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé, il est placé entre une source de tension triphasée parfaite, donc de tension constante et une charge triphasée équilibrée parcouru par des courants, formant un système triphasé Sinusoïdal équilibré.

L'onduleur est un assemblage de trois ponts monophasés formés chacun de deux Interrupteurs en série (k1 et k1', k2 et k2', k3 et k3'). Les interrupteurs d'un même demi-pont doivent être complémentaires pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit. Pour que les six interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quels que soient les courants i_a, i_b, i_c , il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et fermeture commandées [3].

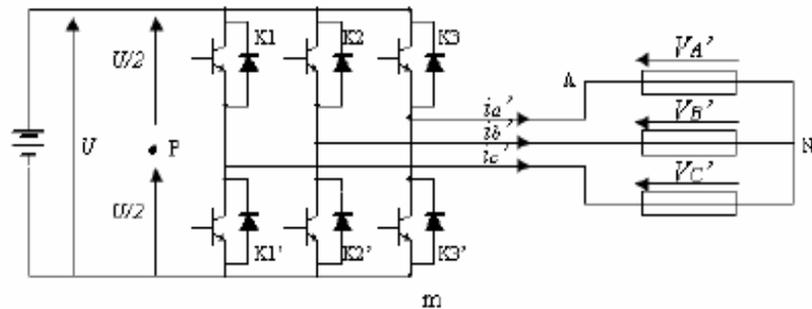


Fig III.12 Onduleur de Tension

III.4.5 Modélisation du convertisseur MLI à deux niveaux

On définit les tensions triphasées et les variables de commande par les vecteurs suivants :

$$\begin{aligned}
 [V_{nabc}] &= \begin{bmatrix} V_{na} \\ V_{nb} \\ V_{nc} \end{bmatrix} & [V_{mabc}] &= \begin{bmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{bmatrix} & [V_{pabc}] &= \begin{bmatrix} V_{pa} \\ V_{pb} \\ V_{pc} \end{bmatrix} \\
 [C_{abc}] &= \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} & [C_{1abc}] &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Les tensions simples à la sortie de l'onduleur prise par rapport au point « p » sont :

$V_{pa} = E/2$ si k1 est fermé

$V_{pa} = -E/2$ si k1 est ouvert

$V_{pb} = E/2$ si k2 est fermé

$V_{pb} = -E/2$ si k2 est ouvert

$V_{pc}=E/2$ si k_3 est fermé

$V_{pc}=-E/2$ si K_3 est ouvert.

Suivant l'état des interrupteurs « caractérisé par la commande c_i » on peut écrire :

$$V_{pi} = (c_i - 1/2) \cdot E \quad (III.23)$$

Les tensions simples prises par rapport au point « m » sont donné par :

$$V_{mi} = c_i \cdot E \quad (III.24)$$

$$[V_{pabc}] = ([c_{abc}] - 1/2 [c_{1abc}]) E \quad (III.25)$$

$$[V_{mabc}] = [c_{abc}] \cdot E \quad (III.26)$$

On peut observer que les tensions composées vérifient :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{pa} - V_{pb} \\ V_{pb} - V_{pc} \\ V_{pc} - V_{pa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ma} - V_{mb} \\ V_{mb} - V_{mc} \\ V_{mc} - V_{ma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{na} - V_{nb} \\ V_{nb} - V_{nc} \\ V_{nc} - V_{na} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_a - C_b \\ C_b - C_c \\ C_c - C_a \end{bmatrix}$$

A la présence d'une charge équilibrée, nous avons :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \Rightarrow V_a + V_b + V_c = 0$$

$$3V_a = V_a - V_b - (V_c - V_a) = V_{ab} - V_{ca}$$

$$V_a = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \quad (III.26)$$

$$V_a = \frac{1}{3}(2V_{ma} - V_{mb} - V_{mc})$$

On peut obtenir

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{bmatrix} \quad (III.27)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} \quad (III.28)$$

Modélisation relative aux courants : Le courant continu alimentant l'onduleur est obtenu par :

$$I_d = C_a I_a + C_b I_b + C_c I_c = [C_{abc}]^T \cdot [I_{abc}] \quad (III.29)$$

La puissance instantanée de la charge est donnée par :

$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = [V_{abc}]^T \cdot [I_{abc}]$$

$$P = \left\{ E \cdot \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} \right\}^T \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Soit :

$$P = E \cdot [C_a \quad C_b \quad C_c] \cdot \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (III.30)$$

$$\begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = [I_{abc}]$$

$$P = [C_{abc}]^T \cdot [I_{abc}] = (C_a I_a + C_b I_b + C_c I_c) \cdot E \quad (III.31)$$

Soit :

$$I_d = C_a I_a + C_b I_b + C_c I_c$$

La puissance est conservée, si l'onduleur est supposé idéal.

$$P = E \cdot I_d \quad (III.32)$$

III.4.6 La commande MLI

Cette forme de commande est appelée modulation de largeur d'impulsions « MLI », remarque que l'aire de chaque impulsion correspond à peu près à l'aire sous l'onde sinusoïdale désirée entre les milieux de deux intervalles successifs d'ouverture. Le résidu harmonique d'ordre inférieur de l'onde MLI est nettement plus faible que celui de toute autre forme d'onde.

Pour déterminer les instants d'amorçage nécessaire à la synthèse correcte de l'onde MLI, On génère dans les circuits de commande une onde sinusoïdale de référence à la fréquence désirée et on compare à l'onde triangulaire décalée. Les points d'intersection des deux ondes déterminent les instants d'amorçage des interrupteurs [4].

- $V_r(t)$: signal de référence.
- $V_p(t)$: signal triangulaire « porteuse »
- Si $V_r(t) > V_p(t) \rightarrow k1$ fermé et $k2$ ouvert.
- Si $V_r(t) < V_p(t) \rightarrow k1$ ouvert et $k2$ fermé.

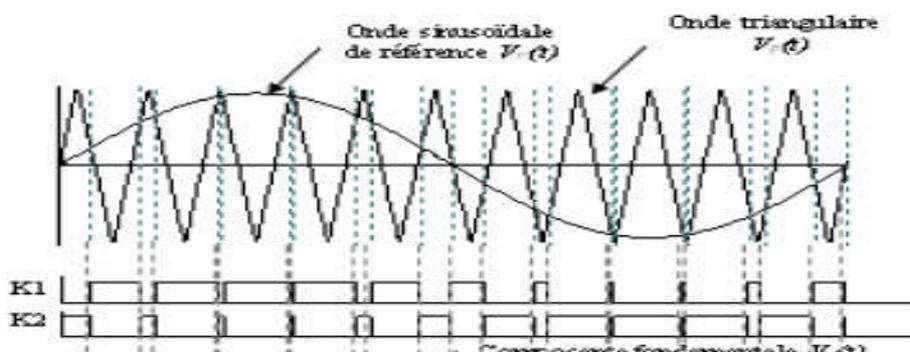
Au triphasé il faut faire un décalage dans les instants de commutation.

- Les instants de commutation de $k2$ décalés de $2\pi/3$ par rapport à $k1$.
- Les instants de commutation de $k3$ décalés de $4\pi/3$ par rapport à $k1$.

On module l'onde triangulaire de haute fréquence par l'onde sinusoïdale de référence, l'onde triangulaire n'étant pas décalée. Le grand nombre de commutations par période des formes d'ondes en créneaux et MLI entraîne de grandes pertes par commutation dans les interrupteurs de l'onduleur. Pour choisir un onduleur à onde quasi carré ou un onduleur à MLI considéré le coût supplémentaire de l'électronique de commande et les pertes par commutation d'une part, et le reliquat d'harmonique d'ordres inférieurs en sorties d'autre part.

La technique de commande à MLI permet un réglage de la fréquence de la valeur efficace de la tension de sortie par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation ($m = f_p/f_r$) qui influe principalement sur le contenu d'harmonique de l'onde de sortie.
- Le rapport de réglage ($r = V_r / V_p$) ; V_r et V_p étant respectivement les valeurs des crête de la référence et de la porteuse.



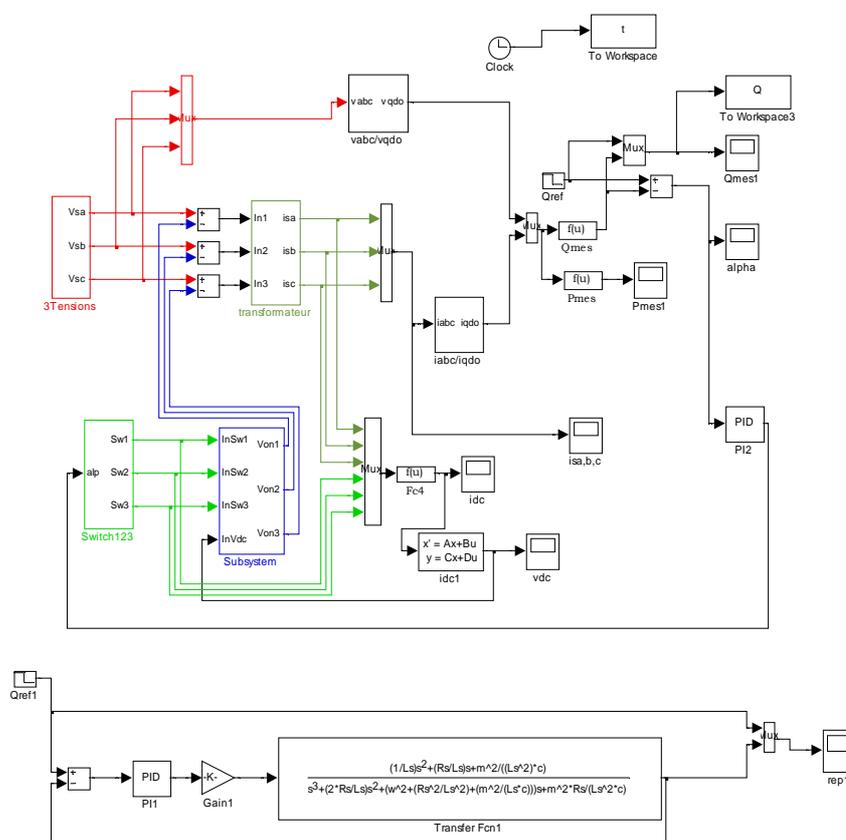


Figure III.14 Schéma du STATCOM à base d'un onduleur deux niveaux à commande MLI

Les figures III.15 et III.16 du schéma développé du STATCOM sont données dans l'annexe E.

III.5 Résultats de simulation

La Figure III.16 montre le réglage de l'énergie réactive en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors qui forment les cellules de l'onduleur de tension qui délivrent à son tour les trois tensions à sa sortie. L'efficacité d'utilisation du régulateur PI est bien illustrée. en effet les résultats obtenus sont très satisfaisants On voit bien que le STATCOM régule bien l'énergie réactive et la consigne est bien suivie.

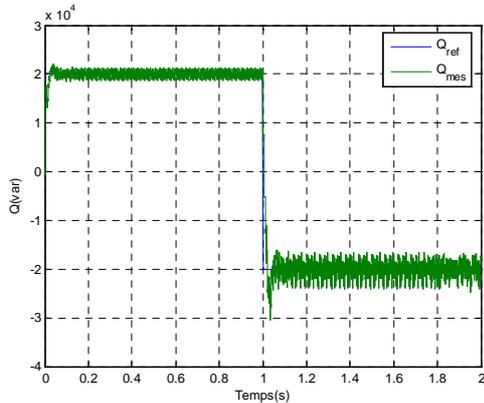


Fig.III. 17 : régulation de l'énergie réactive

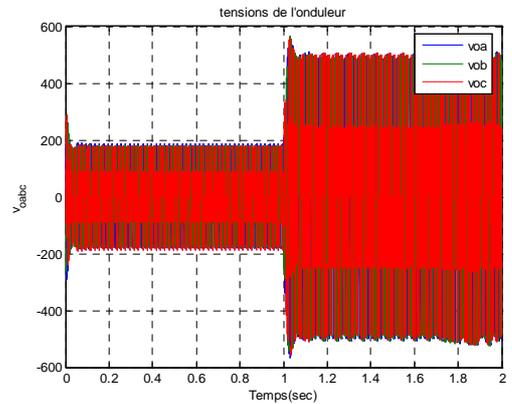


Fig III. 18 Tensions de l'onduleur

La Figure III.18 illustre la sortie de l'onduleur, les tensions changent de valeur selon le mode ou se trouve l'onduleur .A t=1s on passe du mode inductif au mode capacitif.

Le STATCOM génère un courant capacitif si la tension de sortie de l'onduleur est supérieure à celle du réseau, et il absorbe un courant inductif si sa tension de sortie est inférieure à celle du réseau, ainsi en faisant varier l'amplitude des tensions de sortie produites par l'onduleur, l'échange d'énergie réactive entre le STATCOM et le réseau peut être aisément réglé. (le changement de mode se fait à l'instant t=1s)

La Figure III.19 illustre bien le déphasage entre tension et courant (voir le zoom).le passage du mode inductif au mode capacitif à l'instant t=1s est bien visible.

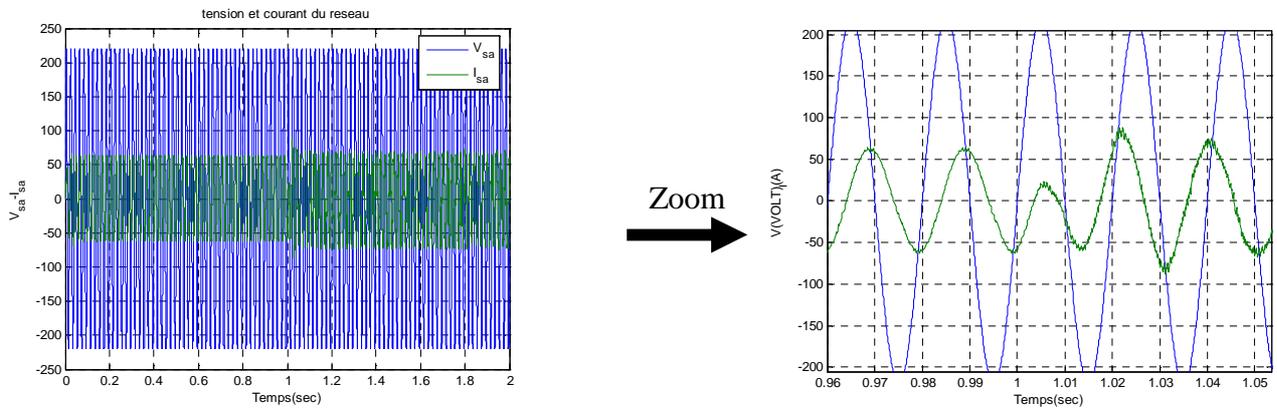


Figure III .19 déphasage entre tension et courant dans le réseau

Le zoom des figures donnant les courbes de courant et tensions des trois phases montrent le déphasage lors du passage du mode inductif au mode capacitif dans le point de changement de consigne (1sec)

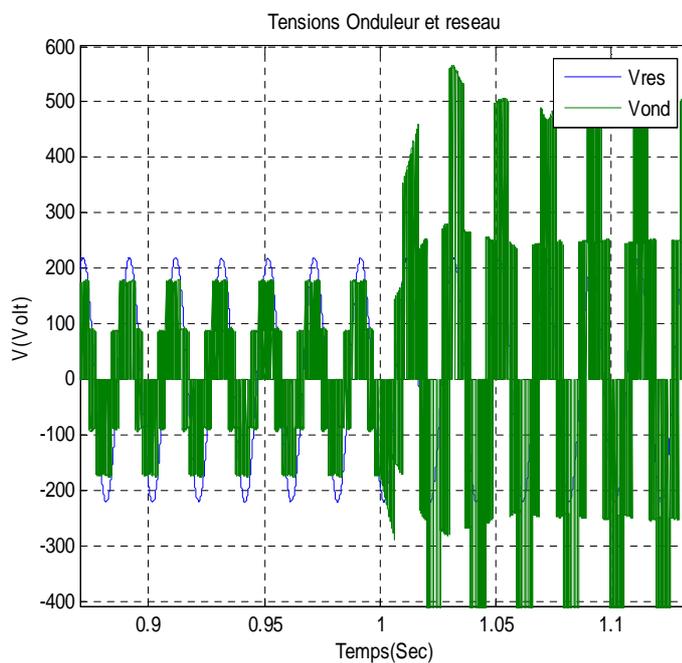


Fig III.20 Tension onduleur avec Tension du réseau

La figure III.20 montre les courbes des tensions de l'onduleur avec la tension d'une phase du réseau. Au mode inductif on voit bien que la tension du réseau est supérieure à la tension de l'onduleur, au passage au mode capacitif, la tension de l'onduleur devient supérieure à celle du réseau.

III.6 Conclusion

Le compensateur statique d'énergie réactive de type avancé (ASVC) est basé sur la technique de l'équivalence exacte avec le compensateur synchrone tournant conventionnel, ce type de compensateur utilise un onduleur à source de tension transformant du continu en alternatif avec un condensateur dans la partie continue utilisé comme un élément de stockage d'énergie. La modélisation dans le repère triphasé ABC et dans le repère de Park d-q nous a permis de contrôler facilement notre système.

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du contrôleur FACTS (STATCOM), on a présenté un modèle simple pour lequel on a identifié les références. Les régulateurs PI utilisés ont donné entière satisfaction. On a montré comment on peut régler l'énergie réactive en jouant sur les sorties de l'onduleur. On a effectué des essais de simulation et observé le comportement du STATCOM dans les deux cas inductifs et capacitifs, notre contrôleur est enfin prêt pour être injecter dans le réseau d'essai.

Chapitre IV

Application du STATCOM au réseau d'ADRAR

IV Présentation du réseau étudié

IV.1 Introduction

Le réseau de la Direction de Distribution d'ADRAR couvre l'ensemble du territoire de la Wilaya d'ADRAR, qui s'étend sur une superficie de 328 659 Km², soit un rayon d'action de 390Km, administrativement composée de 7 daïra et 21 communes, Il est connu pour sa mauvaise tenue en tension. Ce réseau nous sert seulement de base d'étude. Nous y avons apporté quelques modifications au niveau des différentes charges. Au 31/12/2008, la direction régionale d'ADRAR gère :

- **3143,036** Km de réseaux MT et 1416,044 Km de réseaux BT
- **1837** postes MT/BT de toute nature confondue
- **89034** abonnés BT
- **746** abonnés MT

De ce qui précède, il est extrêmement important de souligner les particularités saillantes, qui font la singularité de la structure des réseaux gérée par la Direction régionale d'ADRAR, qui se résume essentiellement dans :

- l'immense étendue du territoire et la dispersion des lieux à alimenter.
- Un taux d'évolution réseaux fort appréciable des 07 dernières années (> 20%)
- Longueurs importantes des réseaux
- Des départs trop longs

Extensions remarquables des zones urbaines en quelques années seulement, évolution importante de charge (notamment après l'application de la nouvelle tarification Sud), réseau complètement isolé non connecté au reste du réseau algérien. Donc doit s'assister soit même en cas de panne ou de défaut majeur. [29]

IV.1.1 Paramètres des réseaux au 31/12/2008 [29]

Paramètre	2006	2007	2008
Incidents au 100Km (%)	8,23	6,68	12,82
TEC (travaux d'entretien)	6,89	5,95	13,99
Avarie transformateur (%)	1,49	0,8	3,47
Ouverture disjoncteur	20,90	38,07	57,30

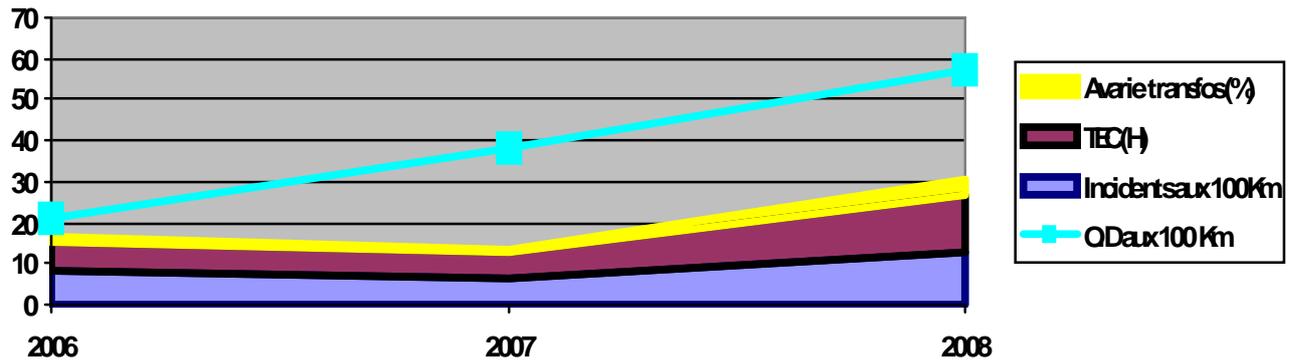


Fig. IV.3 : Histogramme des Paramètres du Réseau [29]

Trois paramètres de la qualité de service ont connu une diminution en 2007. L'augmentation du nombre d'incidents et d'ouvertures disjoncteurs en 2008 est due aux intempéries qu'a connues la région d'Adrar. Les avaries de transformateurs sont causées par la surcharge (Application de la nouvelle tarification Sud à partir de janvier 2008). [29]

OD : ouverture disjoncteur ; TEC travaux d'entretien courants

Les Hypothèses de l'étude sont :

- Tensions nominales de service : 30kV
- Puissances: pointe été (2008)
- Chutes de tension admissible Aérien : 10 % (état sain) et 12% (état Incident)
- Cartes schématique arrêtées au : 30/06/2008
- Facteur de puissance $\cos \varphi = 0,85$.
- Le taux d'évolution de la charge est calculé sur la base de l'historique de charge des 06 dernières années (2003-2008).
 - Dorsale en 93,3 mm² Almélec
 - Dérivation en 34,4 mm² Almélec [29]

Centrale SPE d'ADRAR [29]

La puissance installée de la centrale SPE d'ADRAR est de 240 MW

- Pointe été 2007 (18/09/2007 à 14h30) : 73,400 MW
- Pointe été 2008 (14/09/2008 à 13h30) : 84,600 MW

Année	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Charge (kW)	25500	25900	27100	29000	32200	48800	57700	64400	73400	84600

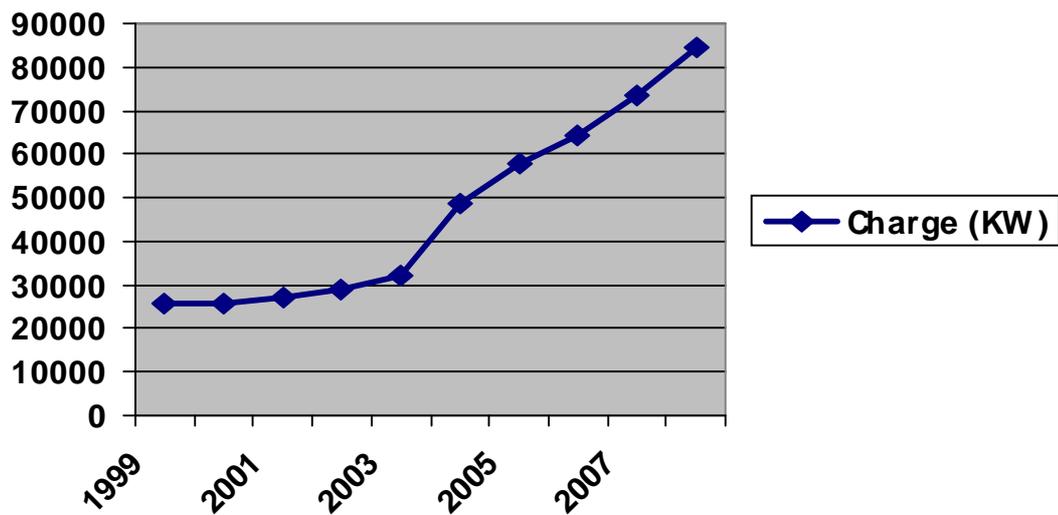


Fig. IV.4 : Augmentation de la Charge au fil des Années [29]

Le réseau étudié est celui décrit par la FIG IV.5. structuré en différents tronçons de longueurs différentes avec des foyers de charges différentes. (annexe2)

Les paramètres du réseau sont donnés dans les tableaux IV.1 et IV.2 [29]

Tableau IV.1 [29]

centrale	groupe	Puissance nominale Pn(MW)	Tension de consigne (KV)	
			minimum	maximum
ADRAR	1	46.84	9.35	13.75
	2	46.84	9.35	13.75
	3	46.84	9.35	13.75
	4	46.84	9.35	13.75

Tableau IV.2 [29]

Statisme %	4	4	4	4
TAA (s)	/	/	/	/
Tsqo (s)	0.072	0.072	0.072	0.072
Tsdo (s)	0.037	0.037	0.037	0.037
Tpgo (s)	0.8	0.8	0.8	0.8
Tpdo (s)	4.71	4.71	4.71	4.71
	XLMS			
XI (pu)	159,2%	159,2%	159,2%	159,2%
	XLS:			
	188,4%	188,4%	188,4%	188,4%
Xsq (pu)	18.4	18.4	18.4	18.4
Xsd (pu)	17±15	17±15	17±15	17±15
Xpg (pu)	32	32	32	32
Xpd (pu)	23.7±15	23.7±15	23.7±15	23.7±15
Xq (pu)	174.5	174.5	174.5	174.5
Xd (pu)	188.3±15	188.3±15	188.3±15	188.3±15
H(s)	1.75	1.75	1.75	1.75
Vnom (kv)	11	11	11	11
Qmin (pu)	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40
Qmax (Mvar)	21	21	21	21
Qmin (Mvar)	-10	-10	-10	-10
Pmax (MW)	51	51	51	51
Pmin (MW)	/	/	/	/
Pnom (MW)	46.84	46.84	46.84	46.84
cosPhi	0.8	0.8	0.8	0.8
Beta (figure)	/	/	/	/
Anom (Mva)	58.8	58.8	58.8	58.8
GROUPE	1	2	3	4
CENTRALE	ADRAR			

IV.2 Essai du réseau à l'état sain :

Le schéma de la fig. IV.5 montre le réseau d'ADRAR à l'état sain, avec les différentes charges, un réseau complètement isolé non connecté au reste du réseau algérien. Donc doit s'assister soit même en cas de panne ou de défaut majeur.

la simulation a été faite sous l'univers MATLAB SIMULINK, la configuration des paramètres nous a causé beaucoup d'ennuis vu que les constructeurs ne donnent pas en détail les paramètres des machines, des transformateurs ainsi que des lignes. La méthode de calcul influe sur la convergence et la rapidité du traitement, nous avons choisi le type « variable step » et la méthode « ode 15S stiff/ndf » pour simuler le réseau. Voici les résultats de simulations des différentes caractéristiques du réseau à l'état sain: courant, tension Vitesse des générateurs, angle de charge.

Nous avons remarqué que les quatre générateurs se comportent de la même manière, mais nous avons insisté à éviter de reproduire ce qui a été fait par les auteurs [2][7][9],[11] qui ont travaillé sur un réseau qui ressemble à notre réseau du point de vue architectural sauf que le notre est réel et gère la wilaya d'ADRAR. les auteurs ont assimilé les quatre générateurs en parallèle en un seul avec quatre fois la puissance apparente et les quatre transformateurs en parallèle aussi en un seul avec quatre fois la puissance apparente. dans notre cas on a préféré suivre le comportement de chaque générateur séparément durant toute la durée de simulation de peur qu'on perde un des générateurs sans le savoir. nous tenons à préciser aussi que le réseau d'Adrar est complètement isolé et n'est pas interconnecté avec le reste de l'Algérie donc il est quasiment impossible de l'assister par l'extérieur.

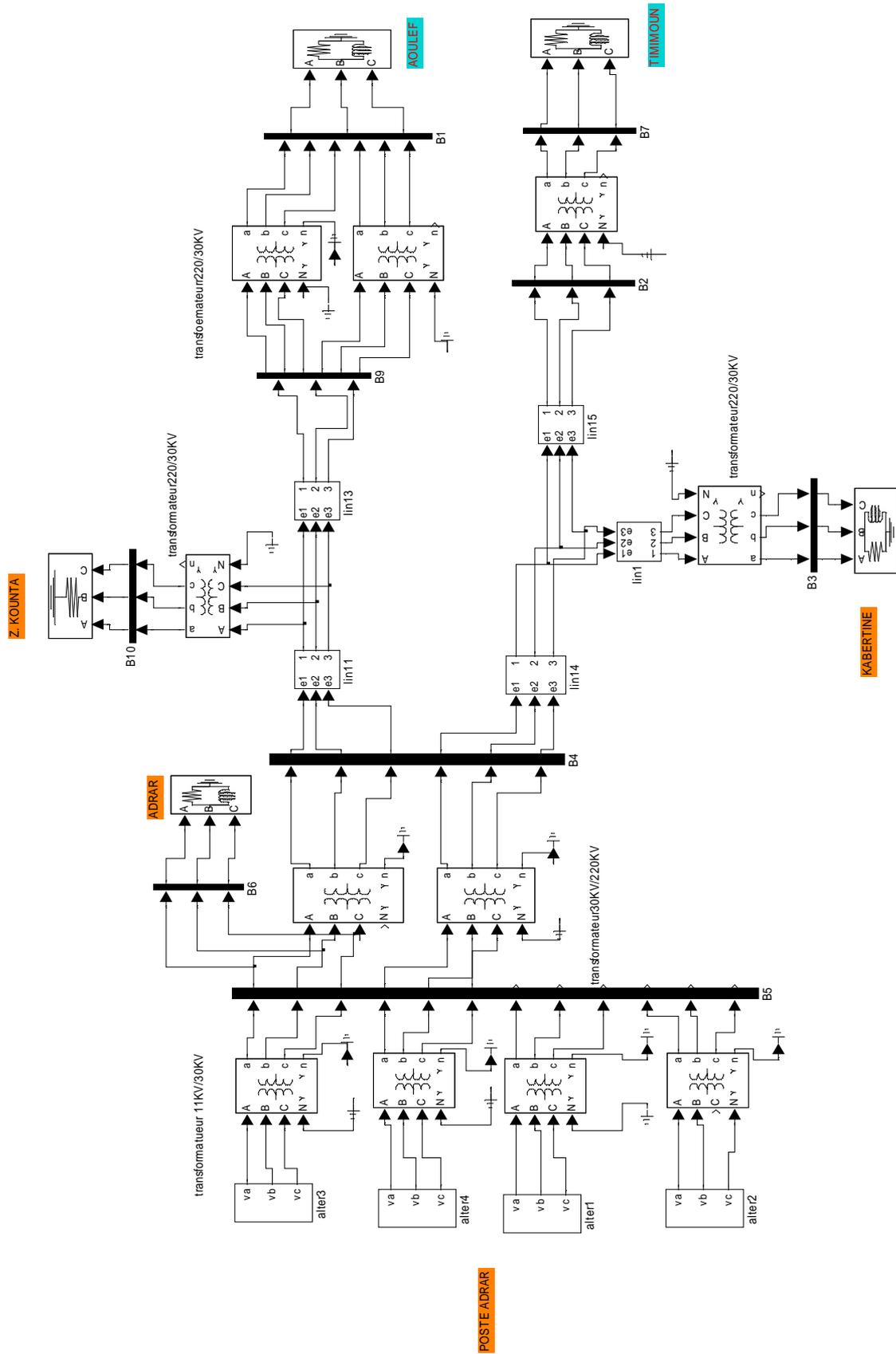
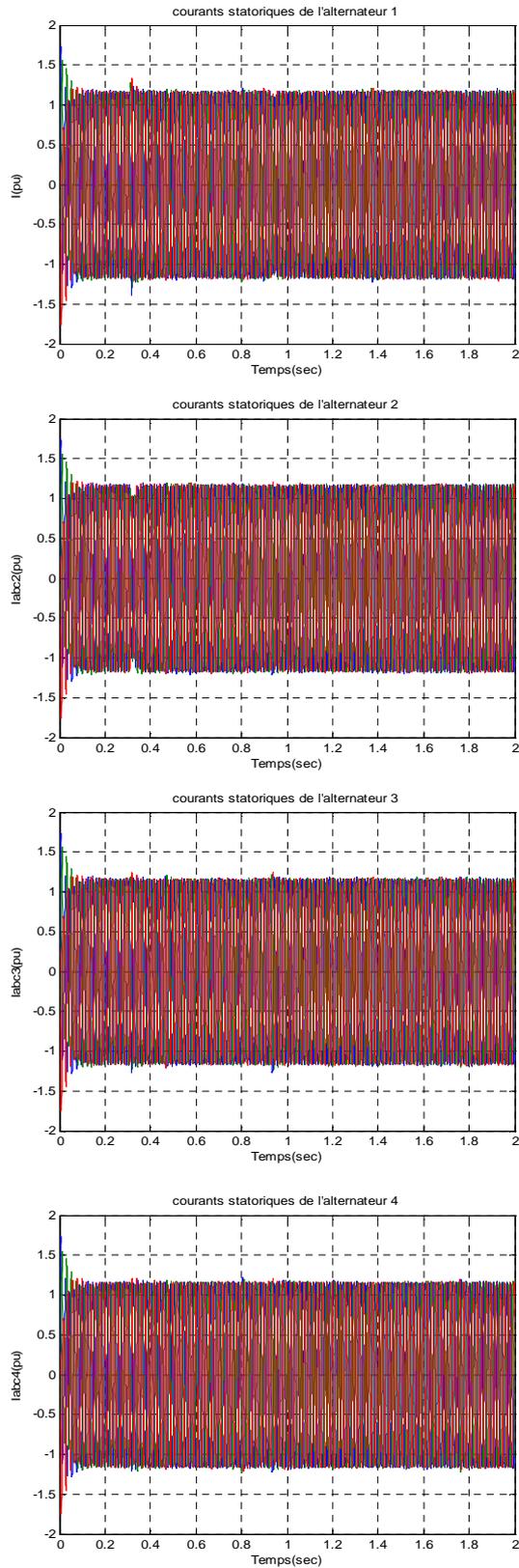


Fig.IV.5: Schéma simulink du réseau d'Adrar

Courants des alternateurs



Vitesses des alternateurs

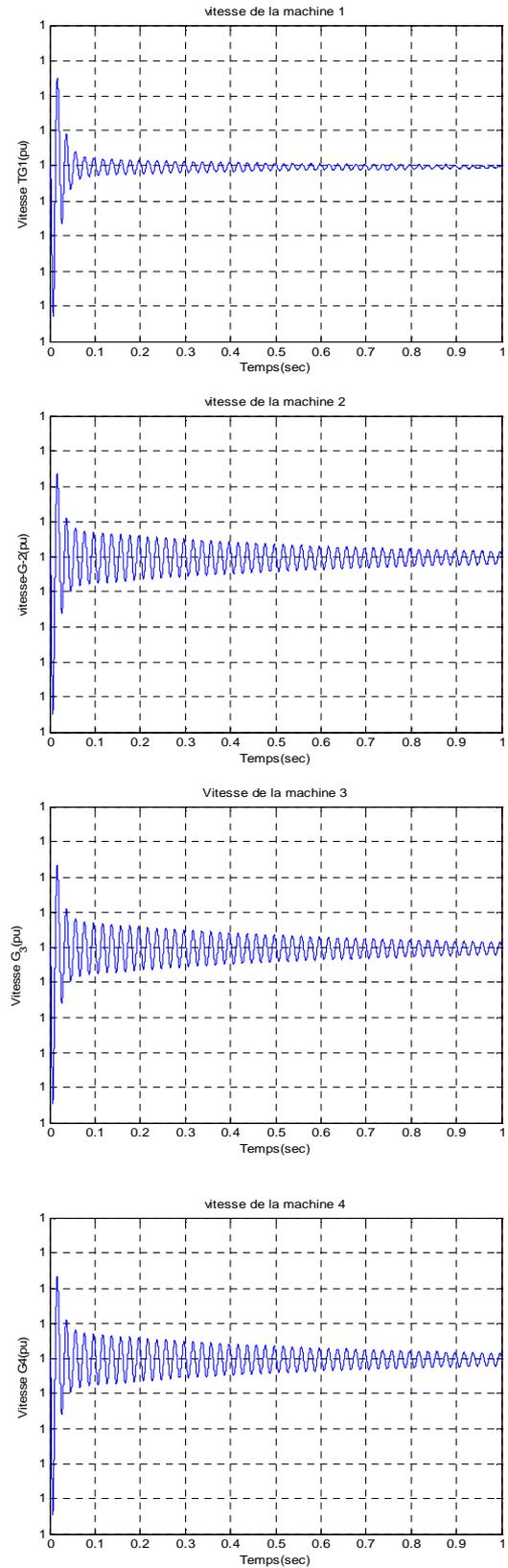


Fig. IV.6 : Courant et Vitesse des Alternateurs à l'état Sain

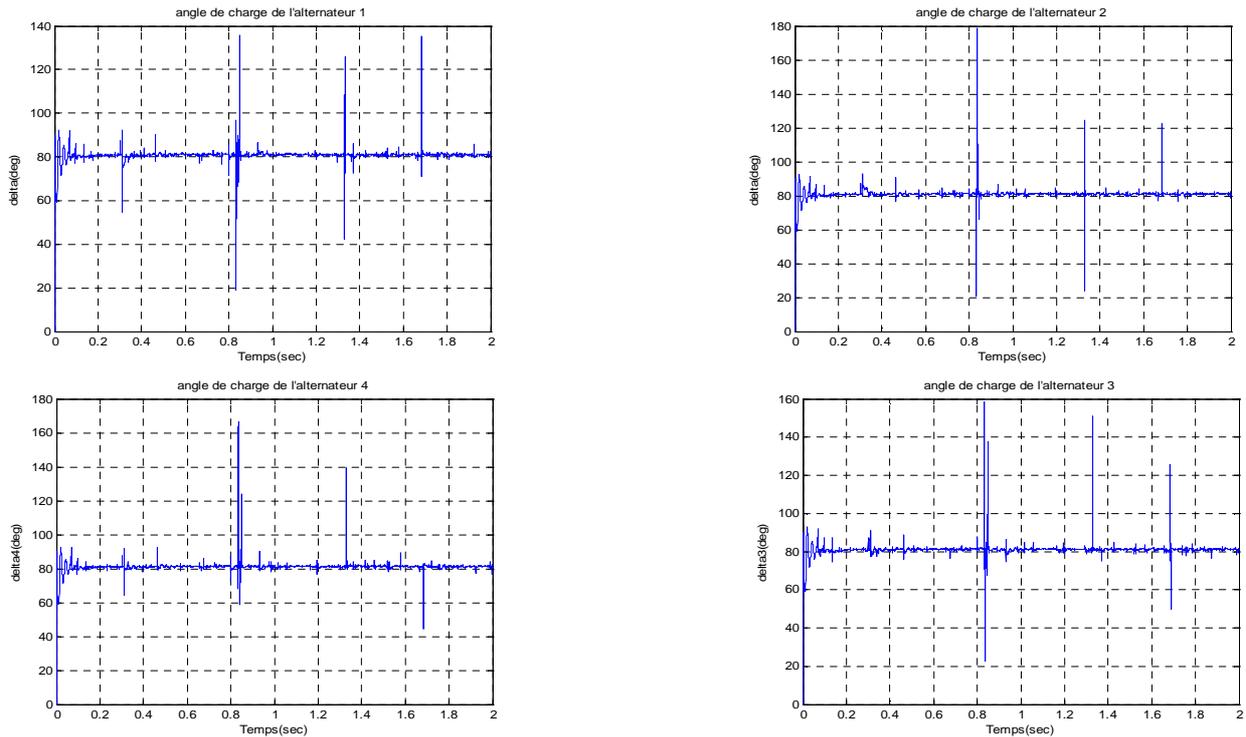


Fig. IV.7 : Angle de charge des Alternateurs à l'état Sain

La machine synchrone utilisée est une machine à pôle lisse et non pas à pôles saillants, chose que nous trouvons rarement en industrie vu la fragilité de cette dernière. Le dimensionnement des lignes a été fait selon la longueur réelle du réseau étudié. La base du système en grandeur réduite est donnée comme suit $S_{base}=240 \text{ MVA}$ et $V_{base}=220 \text{ KV}$. Les deux autres bases du système sont calculées à partir des équations suivantes :

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot U_{base}} \quad \text{et} \quad Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}}$$

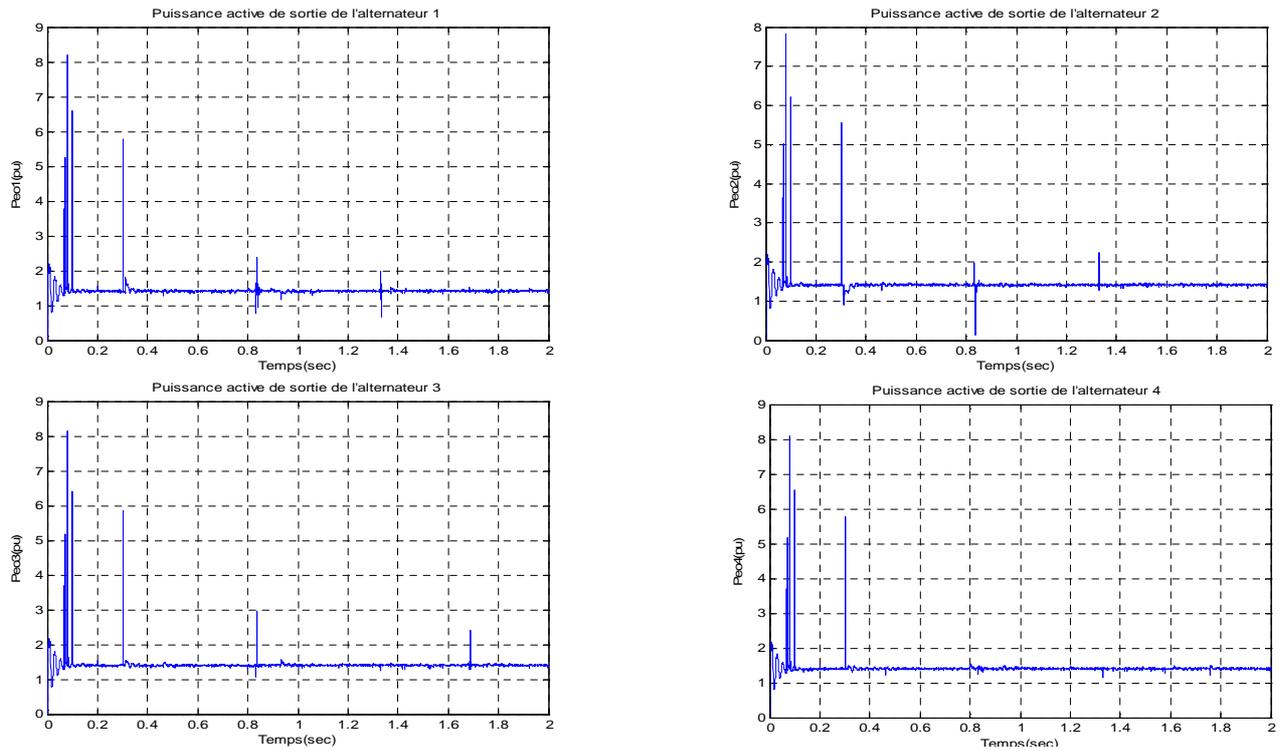


Fig. IV.8 : Puissance active délivrée par les alternateurs

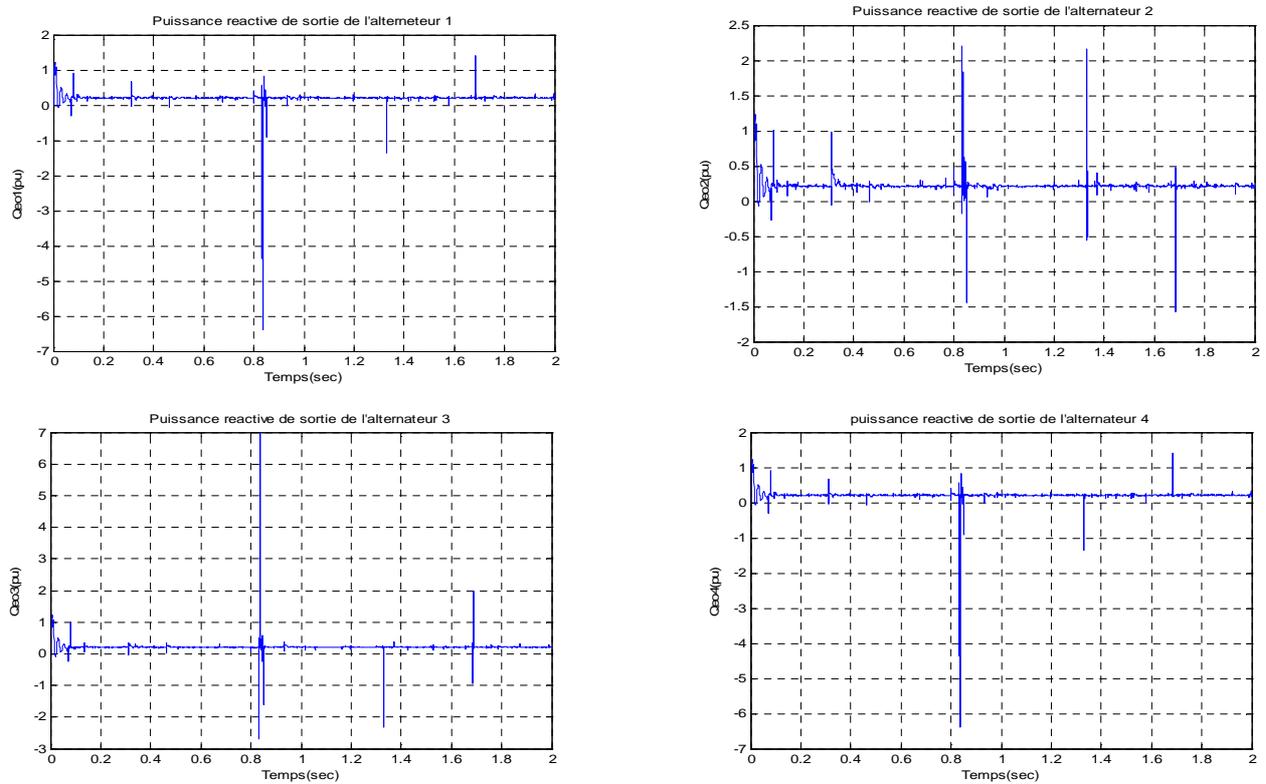


Fig. IV.9 : Puissance réactive à la sortie des alternateurs

Les figures IV.8 et IV.9 montrent que les quatre générateurs délivrent la même puissance active et réactive

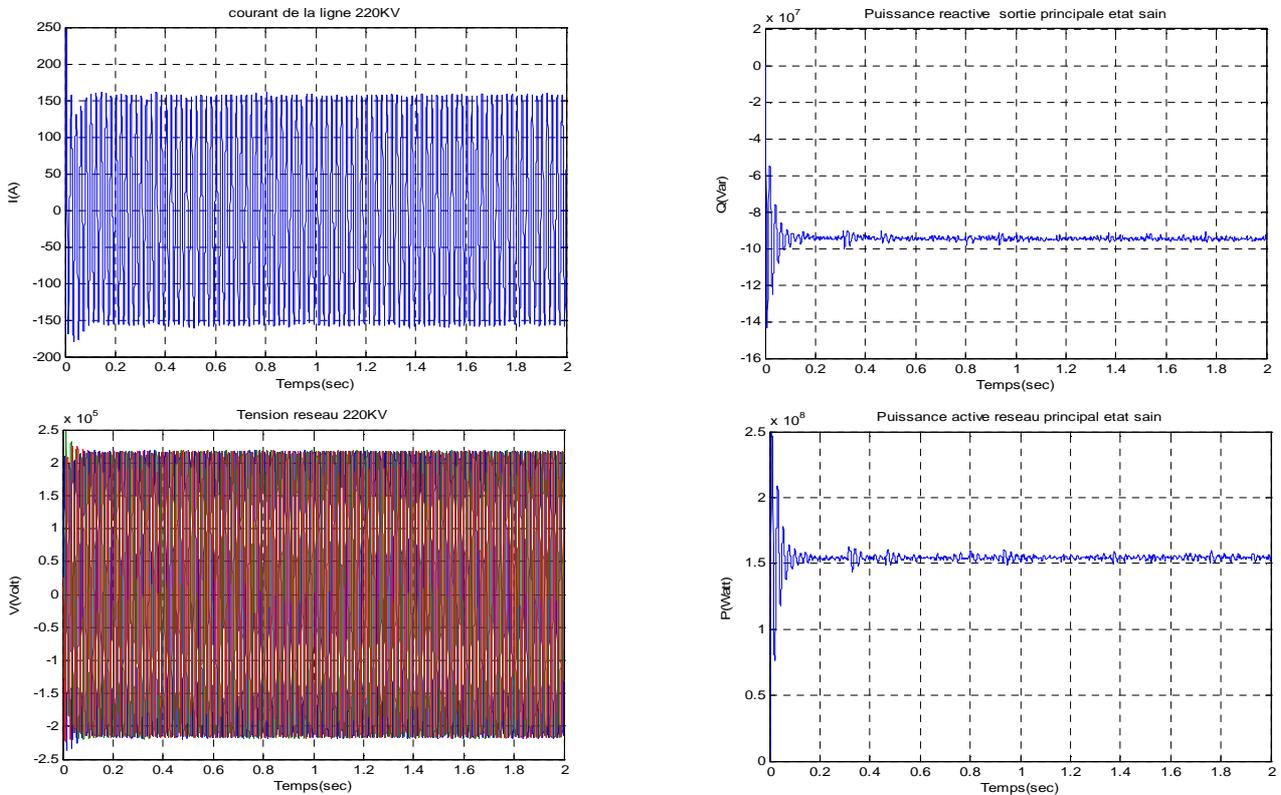


Fig. IV.10 : Caractéristiques de la ligne 220KV

La Figure .IV.10 montre les principales caractéristiques de la ligne 220KV à l'état sain a savoir tension, courant puissance active et réactive ,cette dernière est d'une valeur négative qui signifie qu'une quantité est mise en circulation sur la ligne 220KV.cette ligne principale dessert en plus de la région d'Adrar ,quatre régions (Kabertine,Zaouiet Kounta,Timimoun et Aoulef) par le biais de transformateurs abaisseurs 220KV/30KV .voici les différentes caractéristiques de chaque localité séparément :

Localité d'Adrar

La figure IV.11 montre que la ville d'Adrar est alimentée par une tension de 30KV avec une puissance active de 42 MW et une puissance réactive de 11 Mvar.

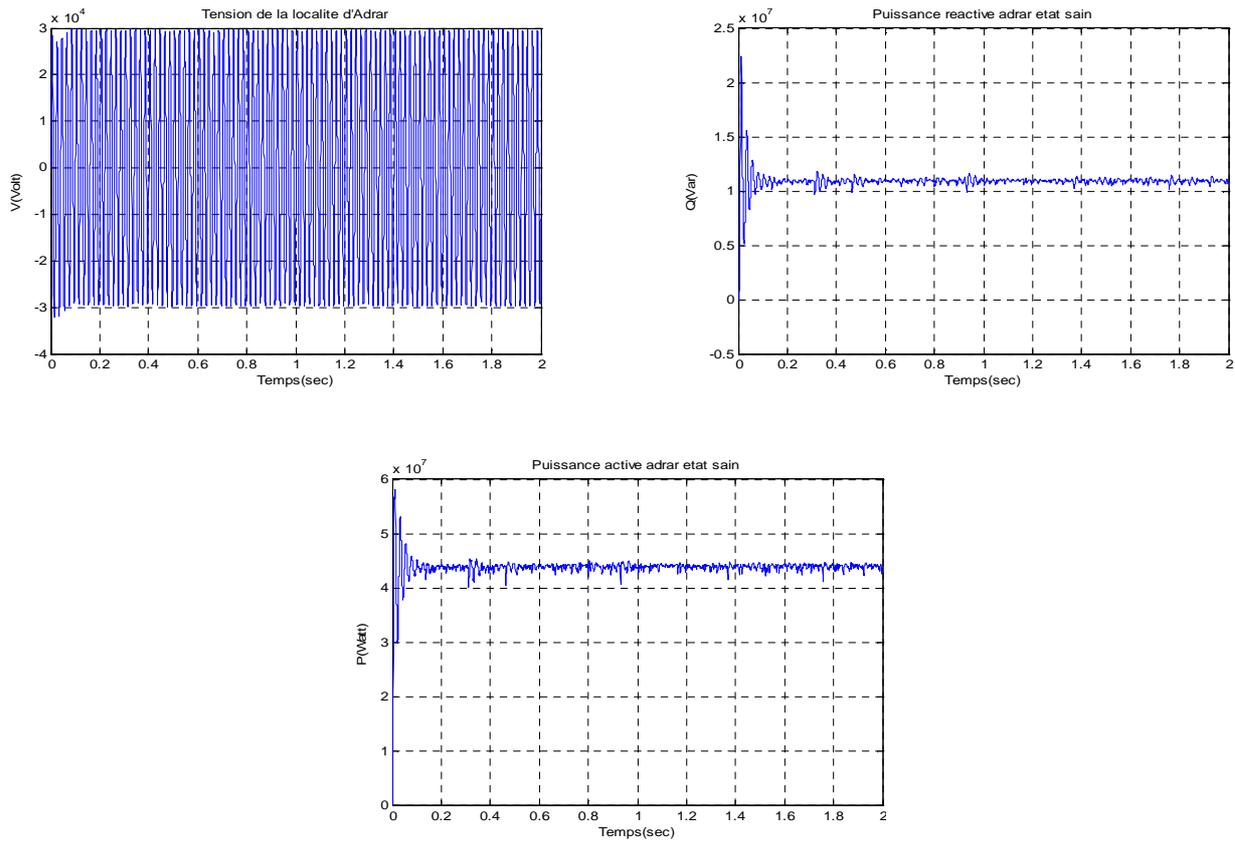


Fig. IV.11 : Localité d'Adrar à l'état Sain

Localité de Kabertine : à l'état sain la région de kabertine est alimentée par une tension de 30KV.

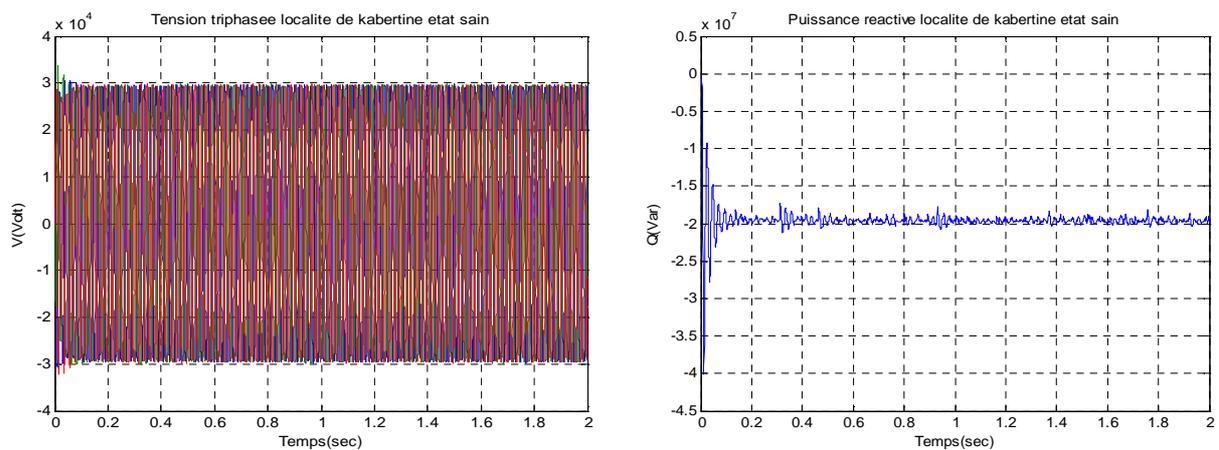


Fig. IV.12 – a : Localité de kabertine à l'état Sain

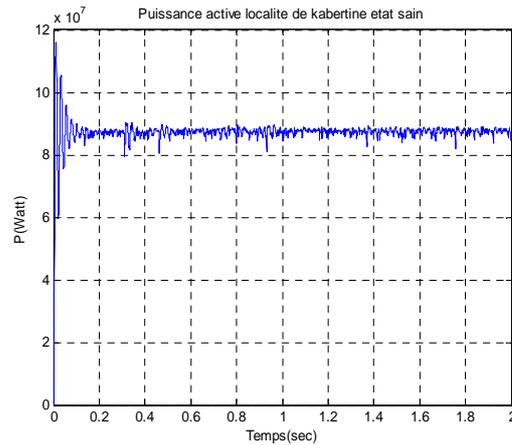


Fig. IV.12 –b : Localité de kabertine à l'état Sain

Localité de Z.Kounta : la figure IV.13 montre que cette région est alimentée par une tension de 30KV ,les courants de ligne atteignent 330A et la puissance active de l'ordre de 22MW ,la puissance réactive est nulle.

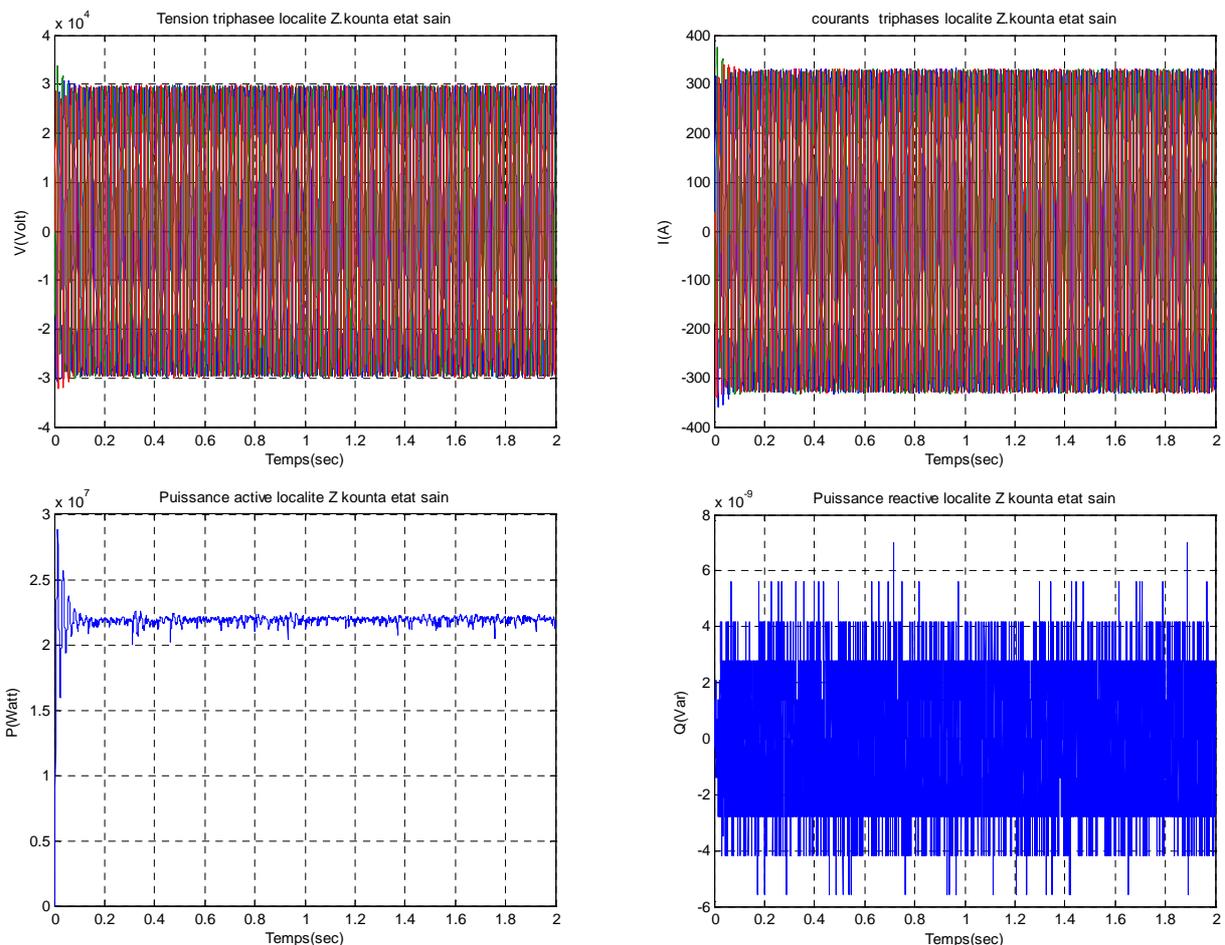


Fig. IV.13 : Localité Z-kounta à l'état Sain

Localité d'Aoulef : Cette région est alimentée par une tension de l'ordre de 30KV comme le montre la figure IV.14 .la puissance réactive est nulle, la puissance active est de l'ordre de 17 MW

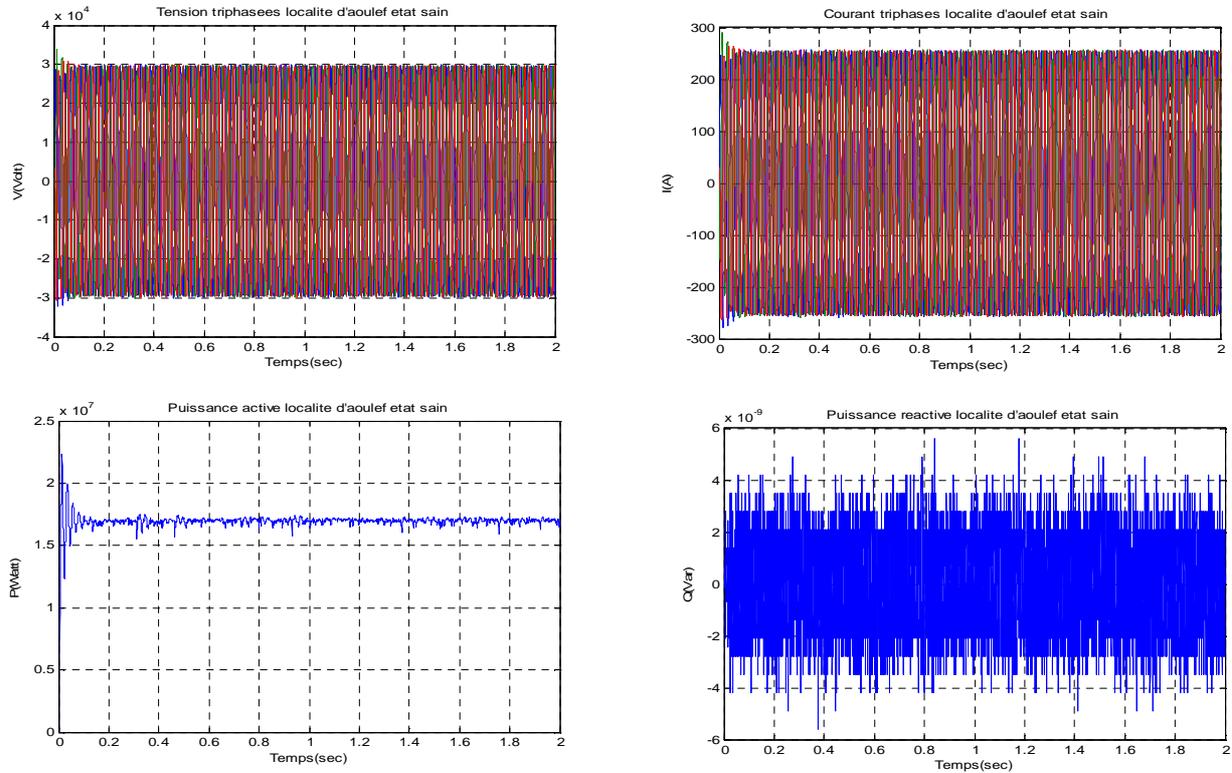


Fig. IV.14 : Localité Aoulef à l'état Sain

Localité de Timimoun : les figures IV.15 a et b montrent une tension d'alimentation de 30KV ,une puissance active de 23MW et une puissance réactive nulle. Le courant de ligne est de l'ordre de 270A

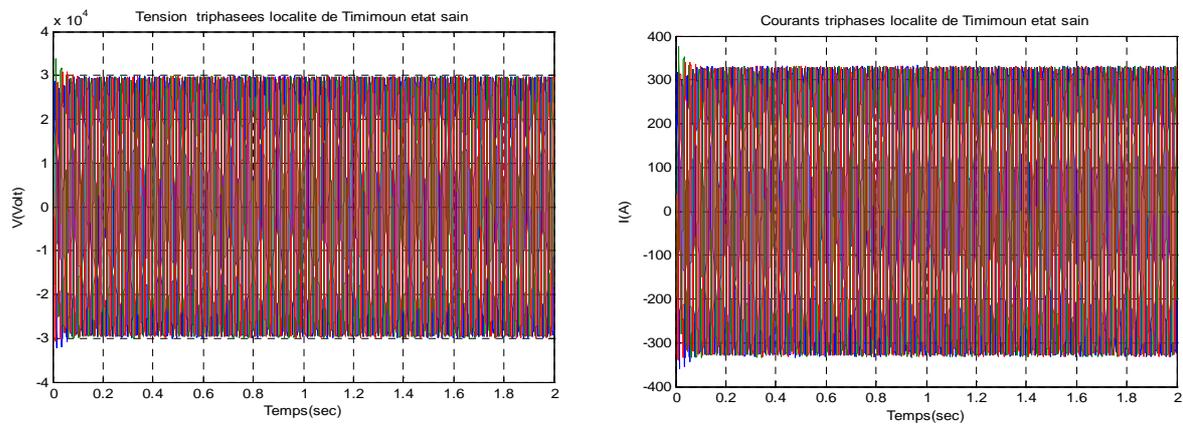


Fig. IV.15-a : Localité de Timimoun à l'état Sain

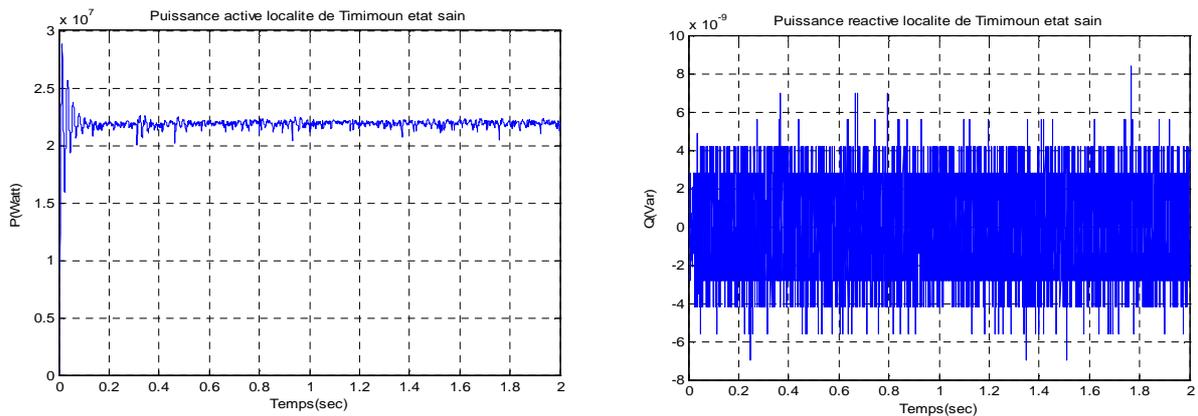


Fig. IV.15-b : Localité de Timimoun à l'état Sain

La puissance réactive dans les localités de Timimoun et Z Kounta est nulle s'explique par le fait que la charge est de nature active seulement .aucune charge inductive n'a été introduite pendant la simulation .par contre dans les autres régions, il y'a présence de charges réactives inductives.

IV.3 Essai avec défaut monophasé

Nous allons procéder à des simulations en appliquant un défaut monophasé pendant 200ms plus précisément entre les instants 0.1s et 0.3s.

Comme le montre la figure IV.16, les caractéristiques du réseau sont toutes touchées par le défaut et reprennent leurs valeurs initiales après élimination du défaut. La phase touchée par le défaut est la plus vulnérable aux variations. On remarque une augmentation de la puissance réactive pendant la durée du défaut alors que la valeur moyenne de la puissance active reste stable.

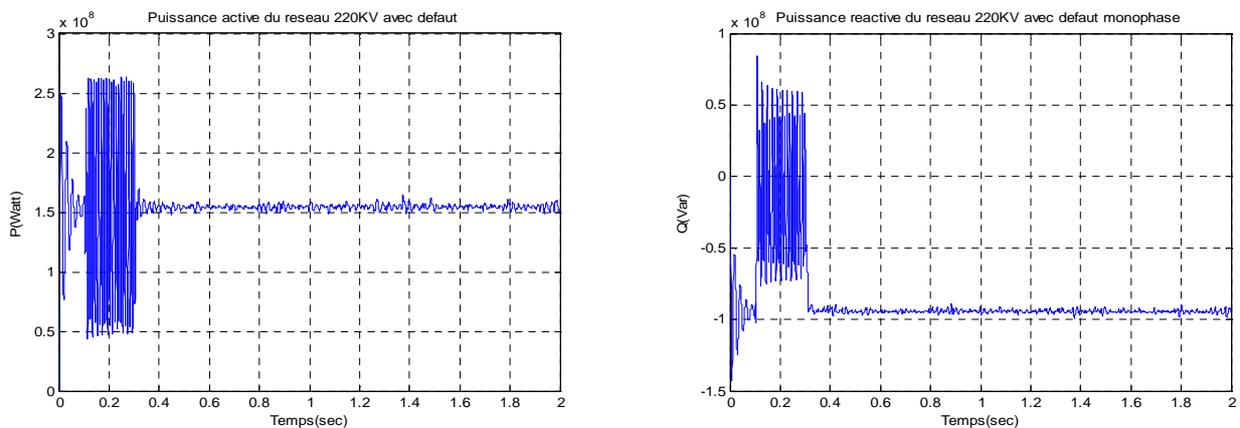


Fig. IV.16 : Caractéristiques de la ligne 220KV avec défaut monophasé

Comportement des alternateurs pendant la durée du défaut :

La figure IV .17 montre une augmentation des courants statoriques pendant la durée du défaut et retour à l'état normal après l'élimination du défaut .le module de la tension varie seulement pendant la période du défaut et retrouve sa valeur par la suite.

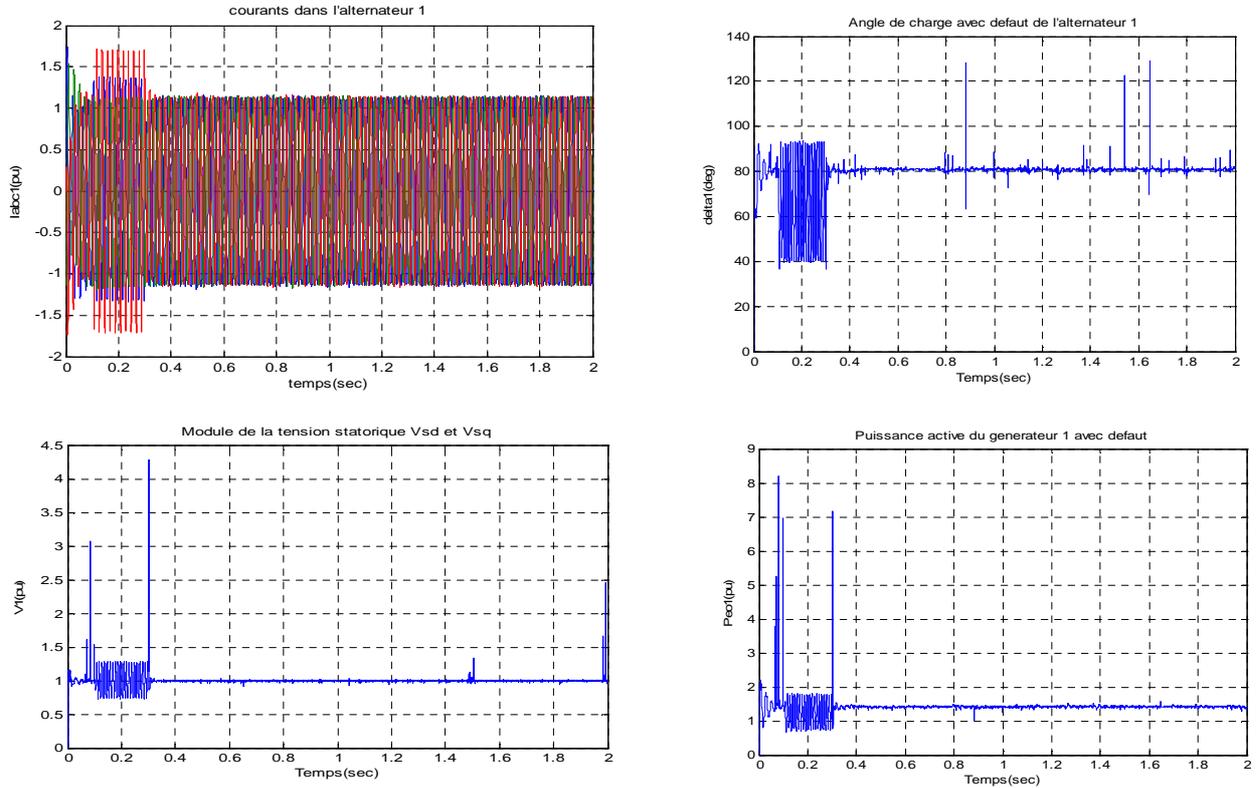


Fig. IV.17 : caractéristiques des Alternateurs avec défaut monophasé

Les résultats des autres alternateurs sont pratiquement similaires au 1^{er} alternateur, on a évité de les refaire. Nous nous sommes contentés de reproduire les résultats d'un seul alternateur.

Localité d'Adrar :

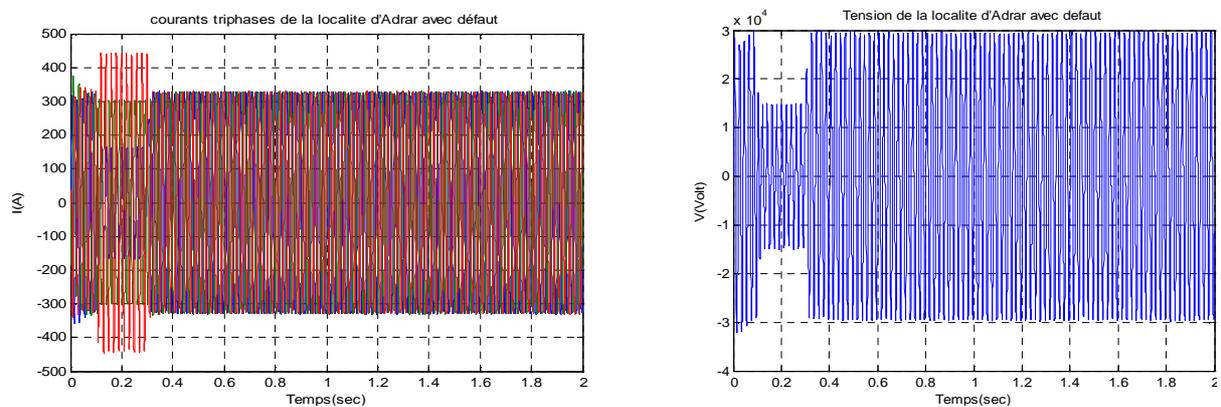


Fig IV.18-a- caractéristiques de la localité d'Adrar avec défaut

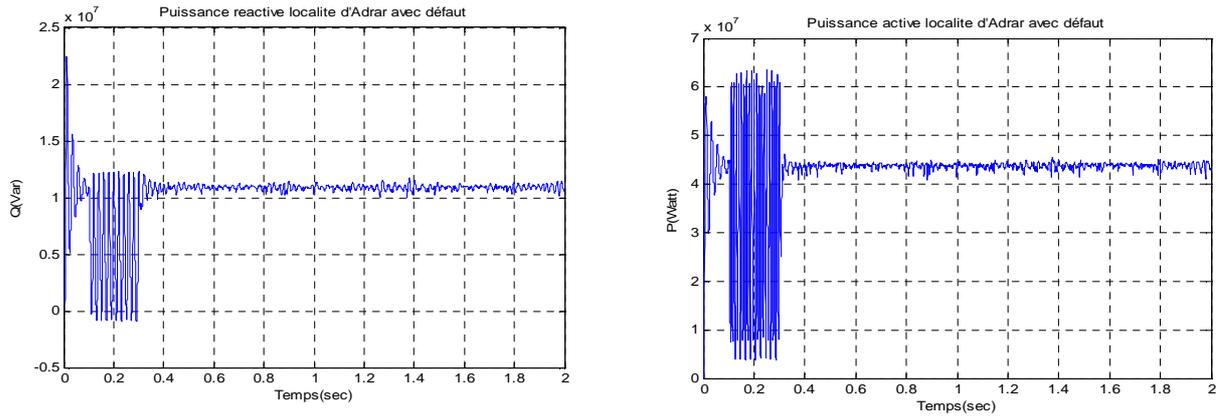


Fig IV.18 –b- caractéristiques de la localité d'Adrar avec défaut

Les figures IV.18-a et b montrent une augmentation du courant de ligne pendant le défaut et une chute de tension de la phase touchée par le défaut ainsi qu'une diminution de la puissance réactive et variation légère de la puissance active sans effet notable.

Localité de Timimoun

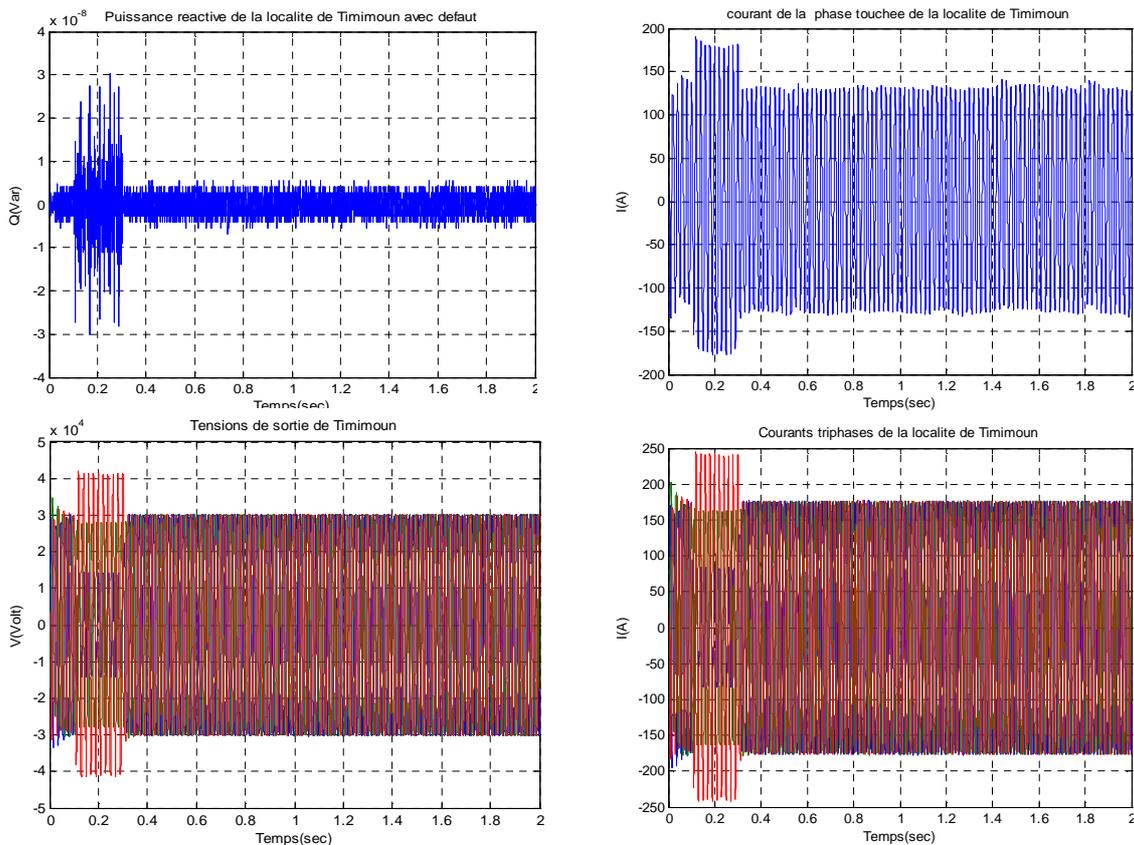


Fig. IV.19 : caractéristiques de la Localité Timimoun avec défaut

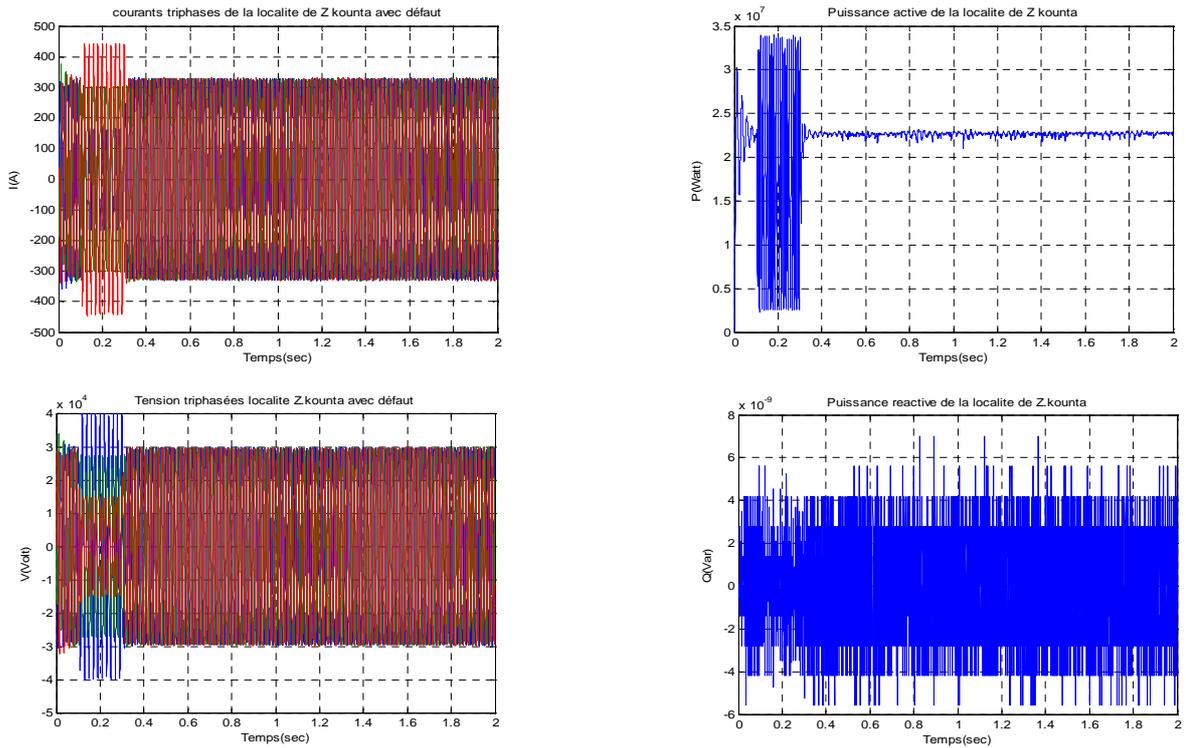


Fig. IV.20 : caractéristiques de la Localité Timimoun avec défaut

La figure IV.20 montre une chute de tension de la phase touchée par le défaut, une augmentation du courant, une variation de l'énergie active et une puissance réactive Z qui reste nulle.

Localité de Kabertine

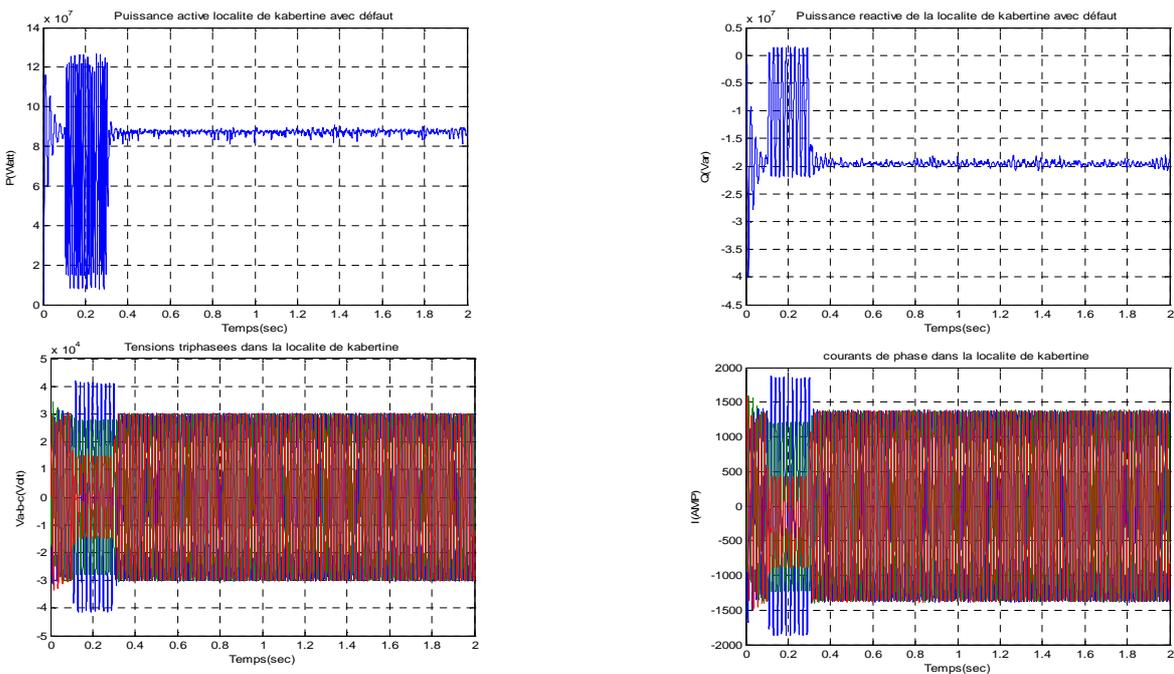


Fig. IV.21 : Caractéristiques de la localité de kabertine avec défaut

Localité d'Aoulef

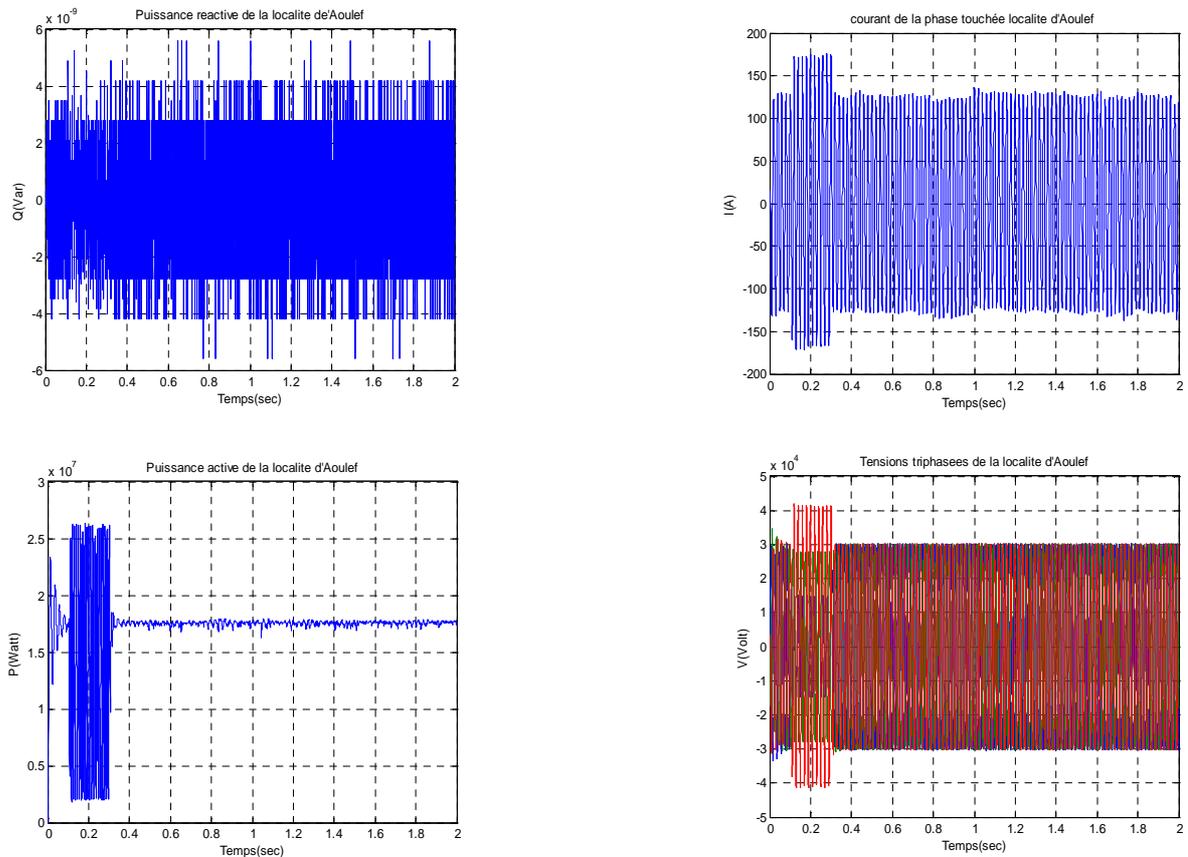


Fig. IV.22 : Caractéristiques de la localité d'Aoulef avec défaut monophasé

Les figures IV.21 et IV.22 montrent que les régions de kabertine et d'Aoulef se comportent de la même manière et réagissent de la même façon lors du défaut monophasé .c'est a dire une chute de tension de la phase concernée par le défaut et augmentation du courant de la ligne touchée par le défaut.

Nous avons simulé le réseau en appliquant un défaut biphasé , nous avons constaté les mêmes caractéristiques pour toutes les localités et le réseau arrivait à reprendre son état initial après élimination du défaut.

IV. 4 Essai avec charge

L'application de la nouvelle tarification Sud à partir de janvier 2008 a extrêmement contribué dans la consommation de l'énergie électrique d'où une augmentation considérable de la charge. Le réseau est le plus vulnérable à la variation brusque de la charge c'est pourquoi nous procédons à des simulations en plaçant une charge de nature active de l'ordre de 50MW et une

charge inductive de l'ordre de 3Mvar au niveau de la localité d'ADRAR entre les instants 0.2s et 0.4s et suivre les différentes caractéristiques de notre réseau et les comparer à l'état sain.

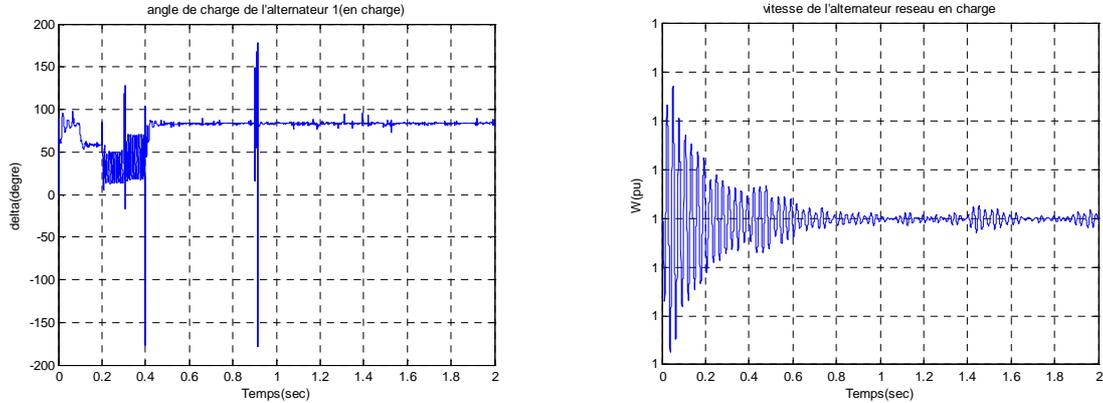


Fig. IV.23 angle de charge et vitesse de l'alternateur avec Charge

La figure IV.23 montre la vitesse ainsi que l'angle de charge de l'alternateur .nous constatons une variation de la tension et du courant lors de l'application de la charge .après sa déconnection le réseau retrouve son état d'origine.

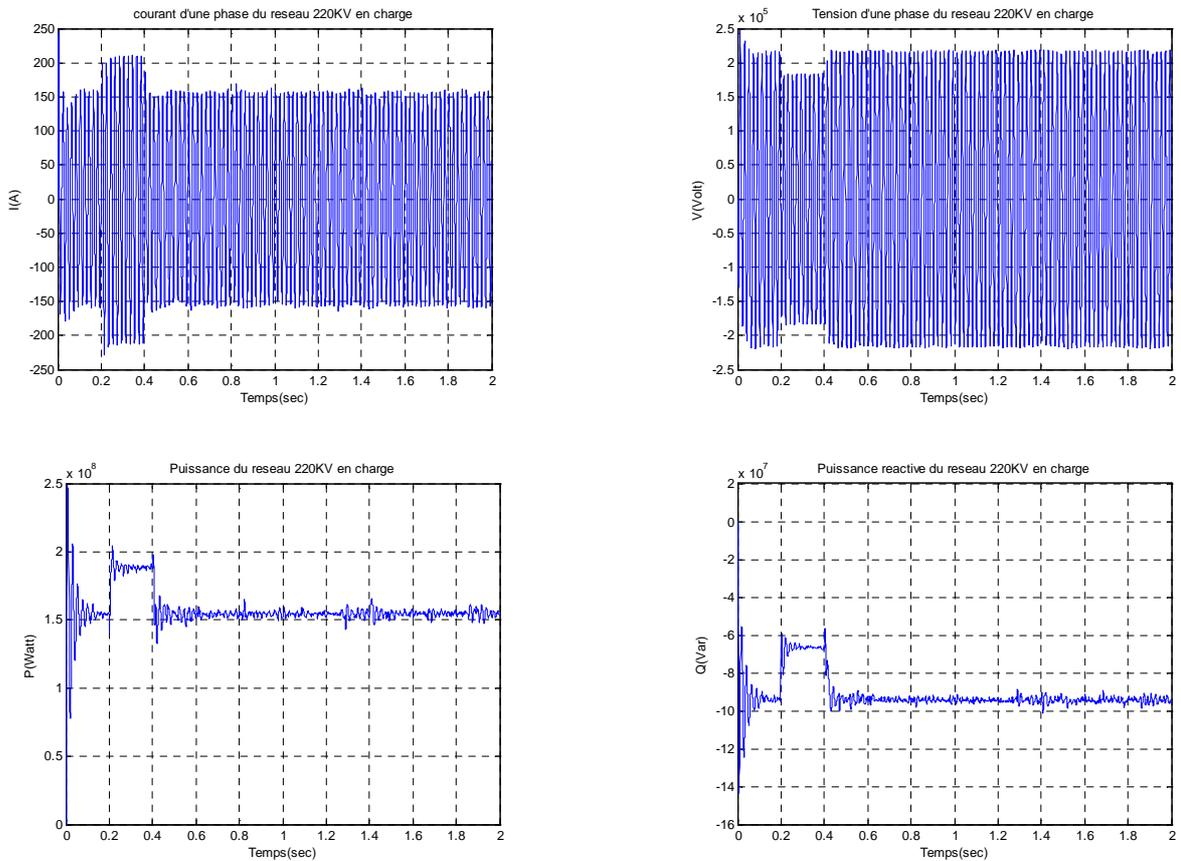


Fig. IV.27 : Caractéristiques de la ligne 220KV en Charge

La figure IV.27 montre la chute de tension et augmentation du courant de ligne ainsi que la variation des puissances actives et réactives et ceci pendant ou la charge est connectée.

Localité d'Adrar

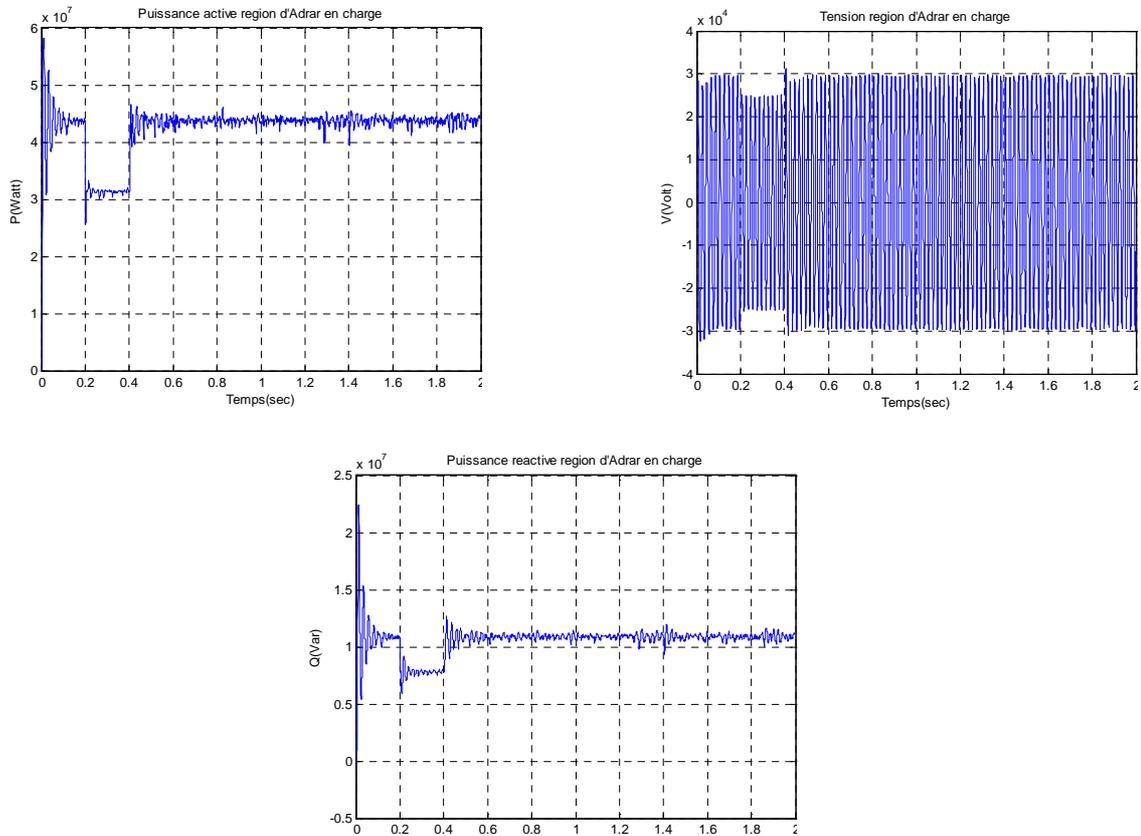
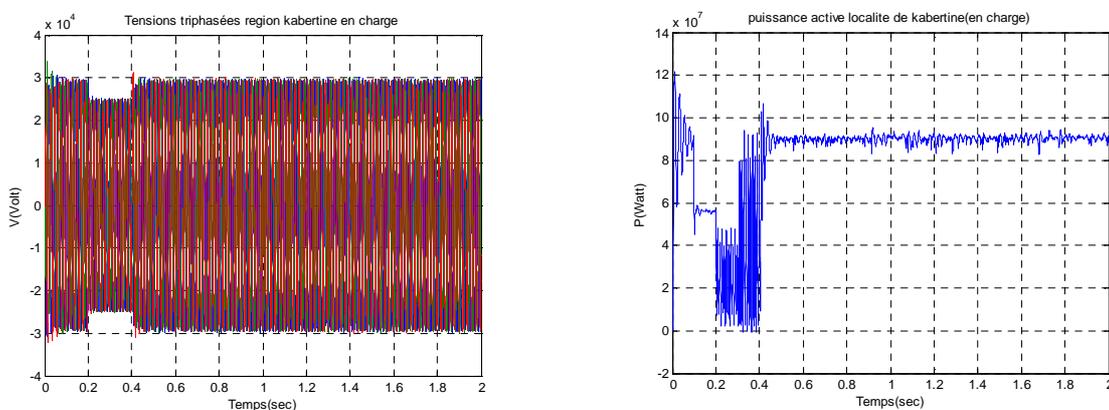


Fig. IV.28 : Caractéristiques de la Localité d'Adrar en Charge

La figure IV.28 montre une chute de tension et diminution des puissances active et réactive et ceci pendant la connection de la charge.

Localité de kabertine



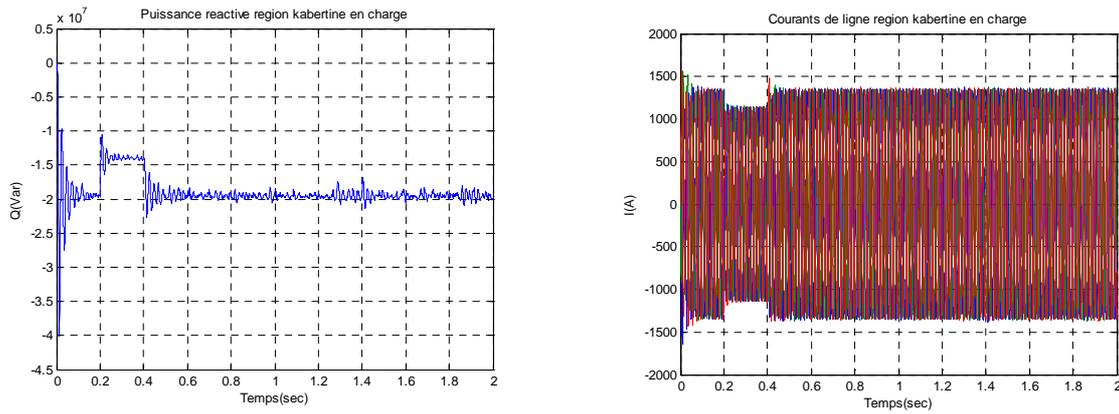


Fig. IV.29 : Caractéristiques de la Localité de kabertine en Charge

La figure IV.29 montre une chute de tension, ainsi qu'une diminution du courant.

Localité de Z. kounta

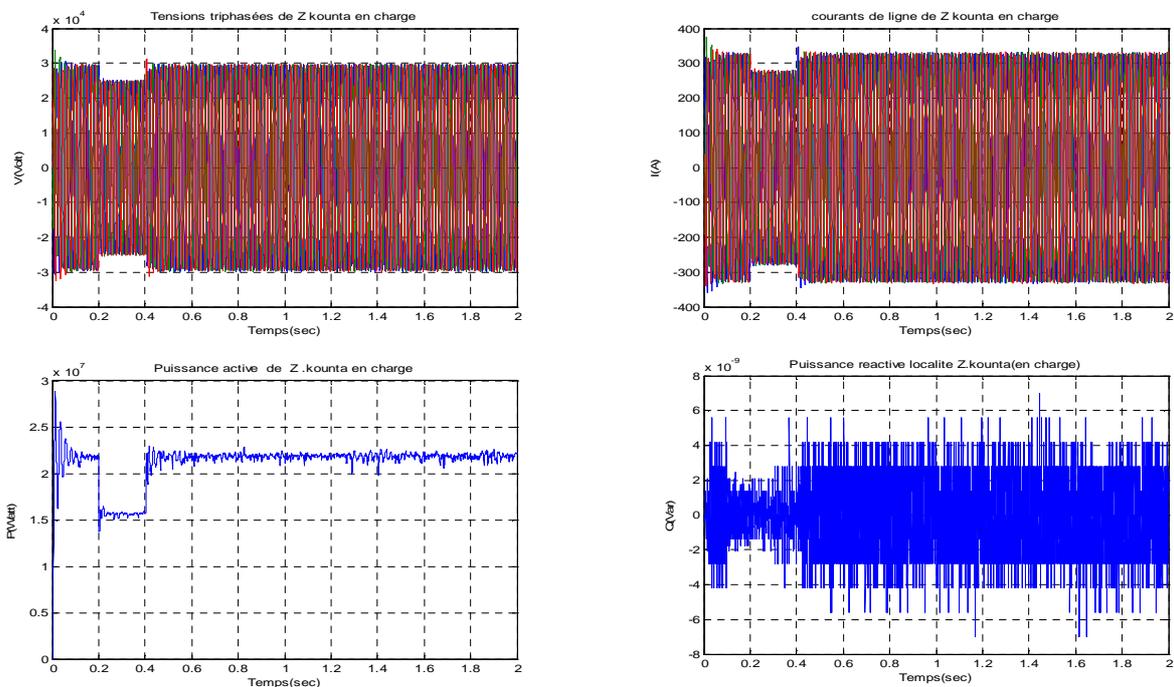
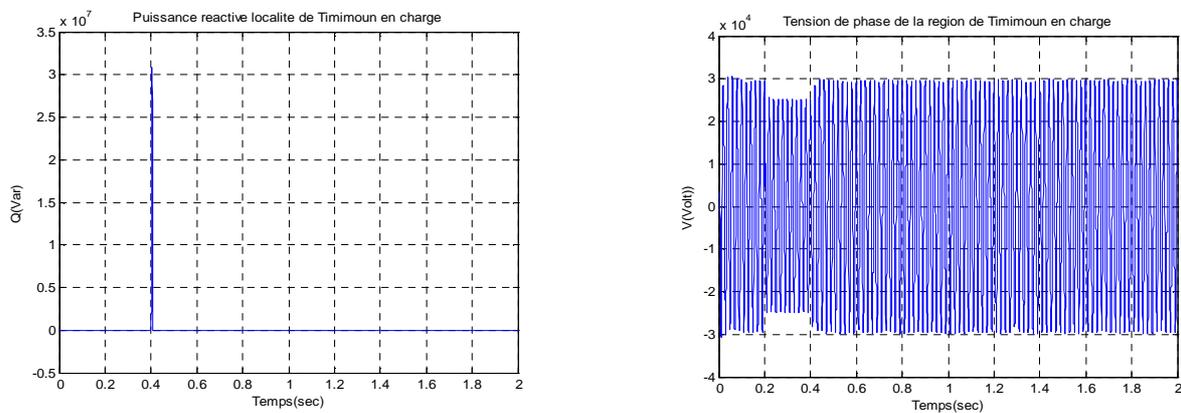


Fig. IV.30 : Caractéristiques de la Localité Z .kounta en Charge

Localité de Timimoun



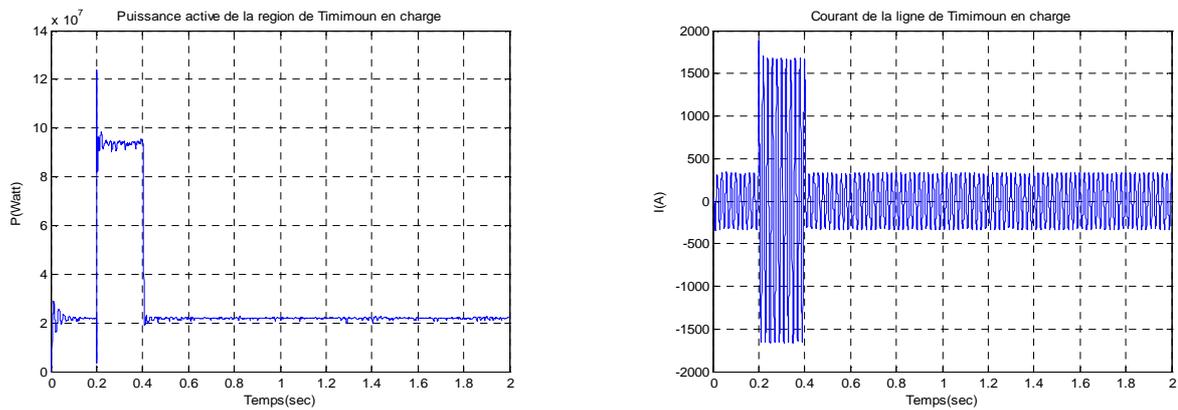


Fig. IV.31 : Caractéristiques de la Localité de Timimoun en charge

Localité de d'Aoulef

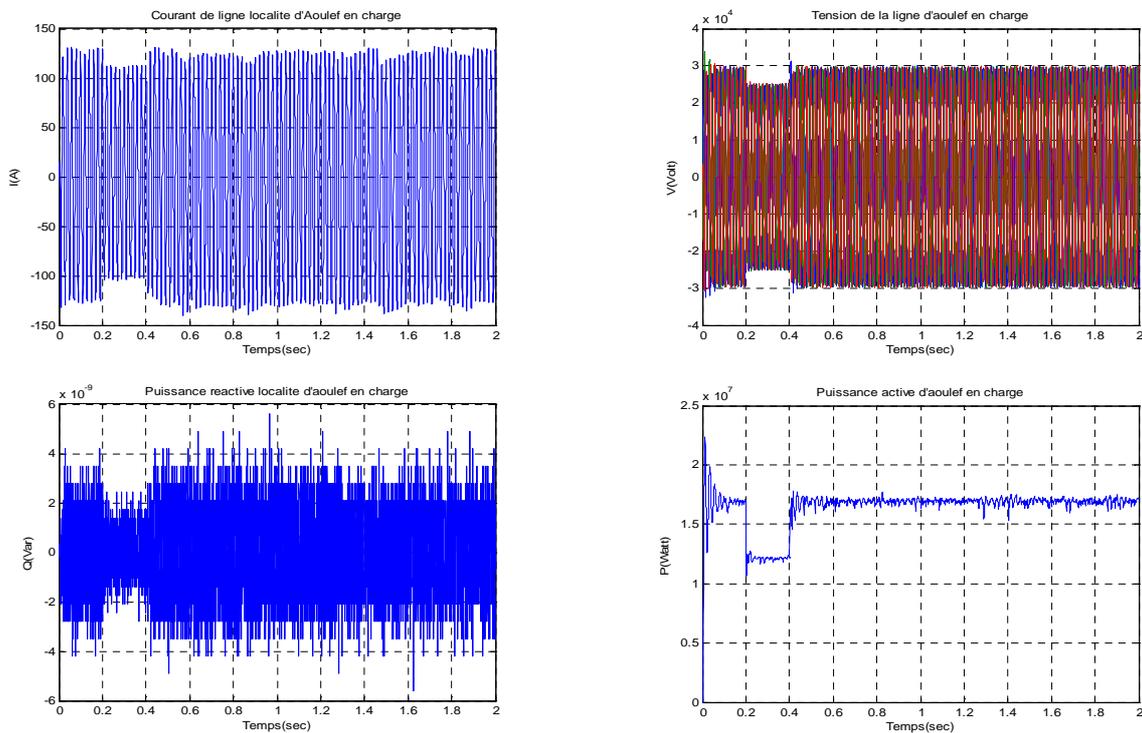


Fig. IV.32 : Caractéristiques de la Localité d'Aoulef en charge

Les résultats obtenus pour les différentes localités montrent que toutes les régions sont touchées par une chute de tension, les localités de 30KV ont une chute de 19.33% et les régions de 220KV une chute de tension de l'ordre de 19.27 %, les courants sont déséquilibrés la puissance réactive augmente dans certaines localités et diminue en d'autres points, cela s'explique par le fait que la demande en énergie réactive est nulle dans ces endroits (pas d'industrie ni travaux d'agriculture).

IV. 5 Cas du défaut triphasé

Nous avons simulé Un défaut triphasé entre les instants 0.1s et 0.15s dans la ligne 220KV puis, nous avons changé la position du défaut dans la région de 30KV, nous avons constaté le même résultat.

Dans les deux cas, le réseau divergeait et ne parvenait pas à se stabiliser .ce qui montre que le défaut triphasé dans le réseau d'ADRAR est très néfaste même en raccourcissant le temps du défaut. On aboutit aux mêmes résultats.

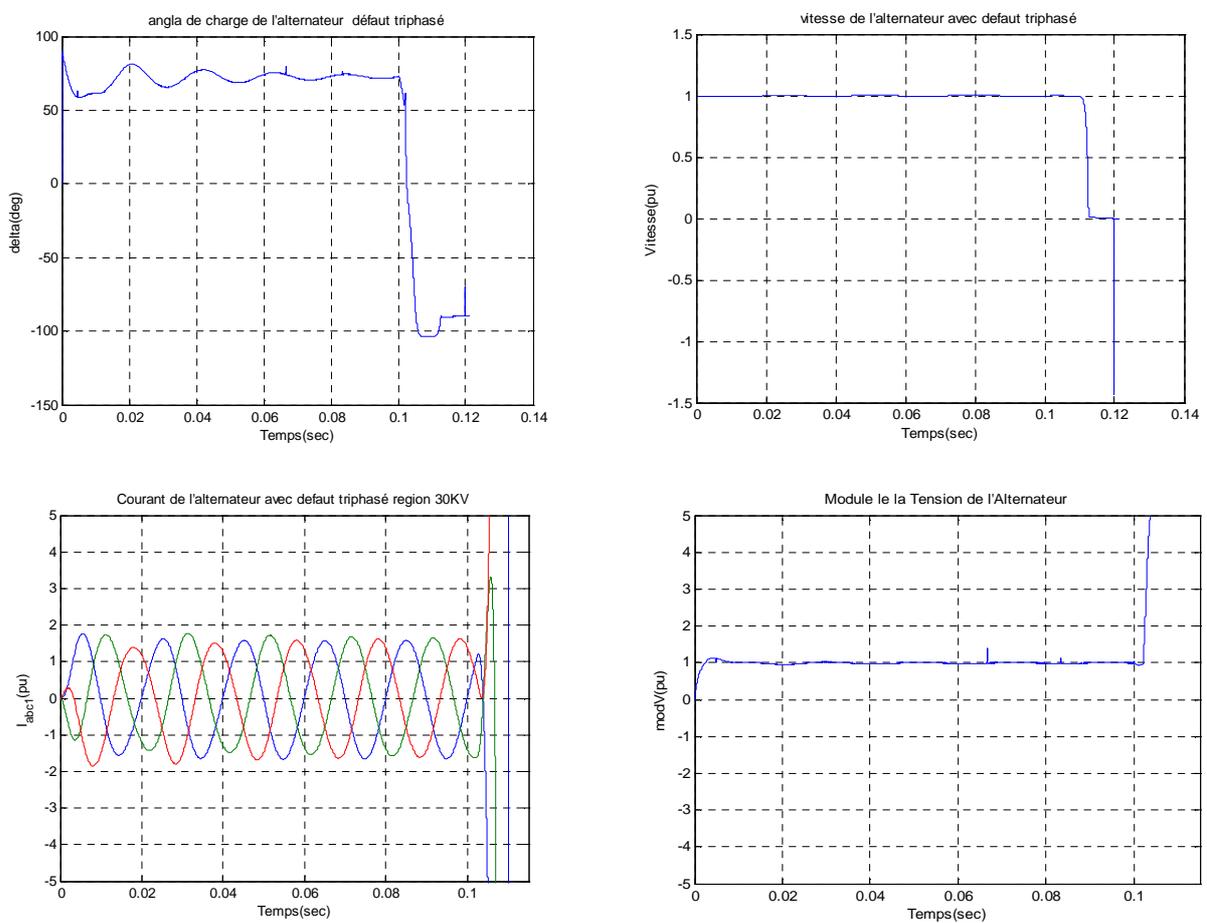
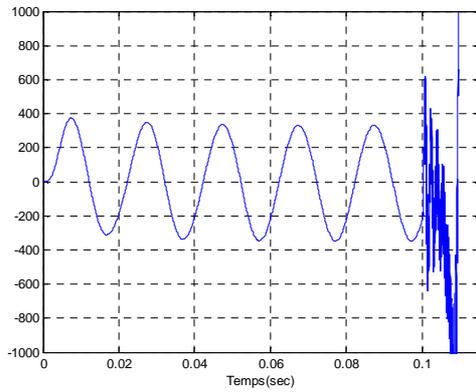
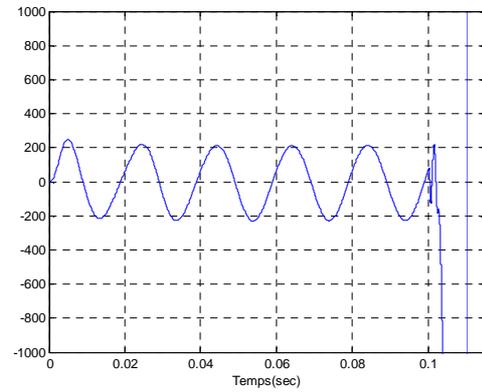


Fig.IV.36 –a-: Caractéristiques de l'Alternateur, Cas Défaut Triphasé



Courant d'une phase zone 30KV



Courant d'une phase zone 220KV

Fig.IV.36-b-: Caractéristiques des lignes, Cas Défaut Triphasé

IV.6 Caractéristiques du réseau avec l'apport du STATCOM

Le schéma de la fig. IV.37 montre le calcul du module de la tension du réseau mesurée, ensuite on le compare à une valeur de référence désirée. à travers un régulateur PI on obtient la puissance réactive de référence qui à son tour est comparée à une valeur calculée à travers des mesures des courants et des tensions du réseau. Le deuxième régulateur PI permet le contrôle de la MLI de l'onduleur qui génère les tensions à sa sortie et injectées au réseau à travers le transformateur shunt.

Après avoir vu le comportement du réseau d'ADRAR pour différents défauts, on procède maintenant à mettre en ligne notre STATCOM et voir son apport dans le bon fonctionnement du réseau. on a simulé le cas du défaut triphasé avec l'apport du statcom.

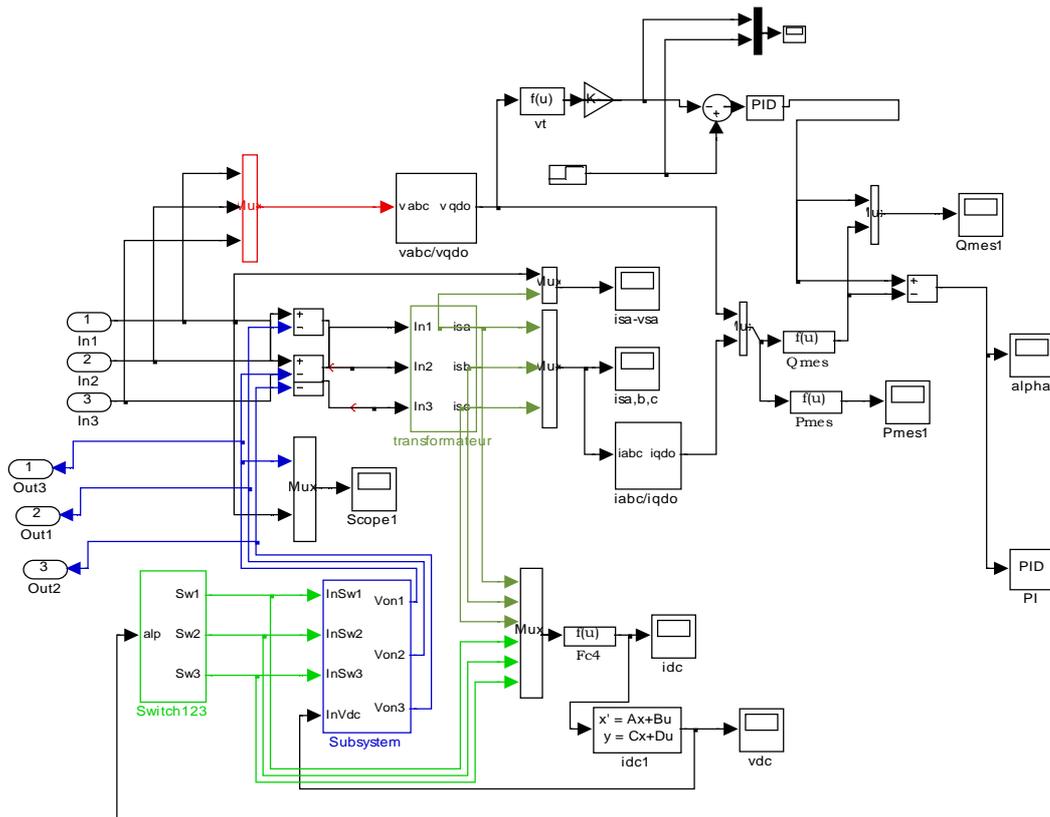


Fig.IV.37 : Schéma Simulink de commande du STATCOM

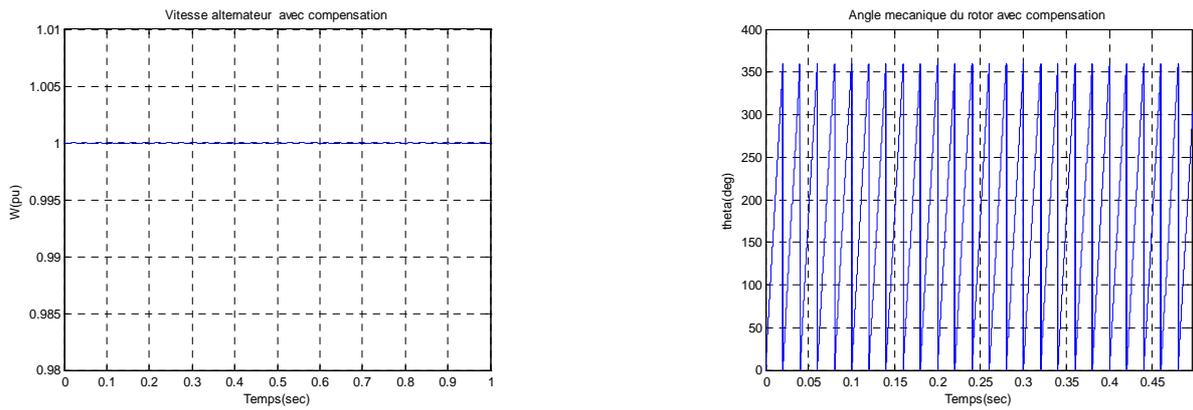


Fig.IV.39 –a-: Caractéristiques de l'Alternateur avec Apport du STATCOM

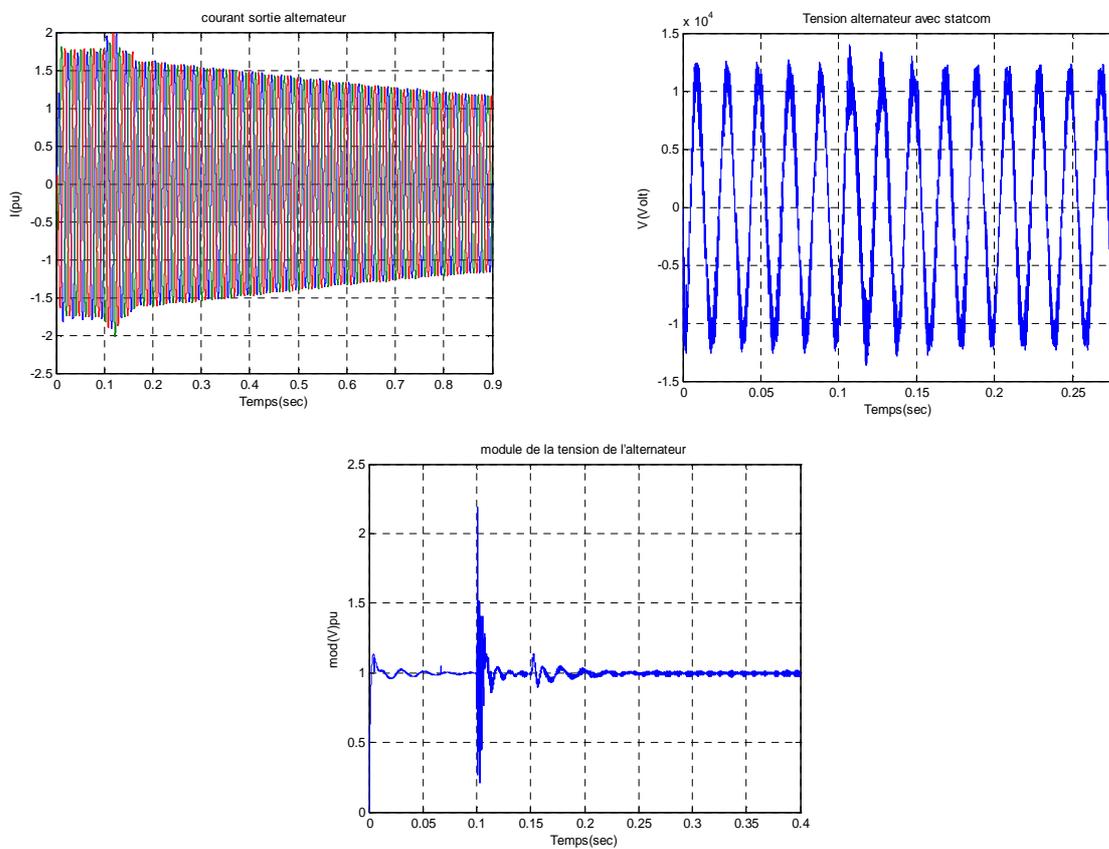


Fig.IV.39-b- : Caractéristiques de l'Alternateur avec Apport du STATCOM

Caractéristiques de la Ligne 220KV

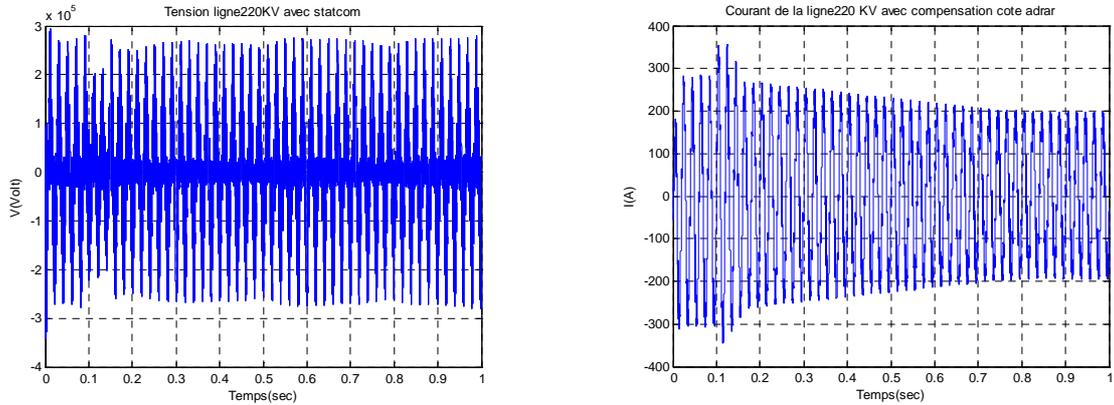


Fig.IV.40 : Tension et Courant de la ligne 220KV

Régions alimentées en 30KV

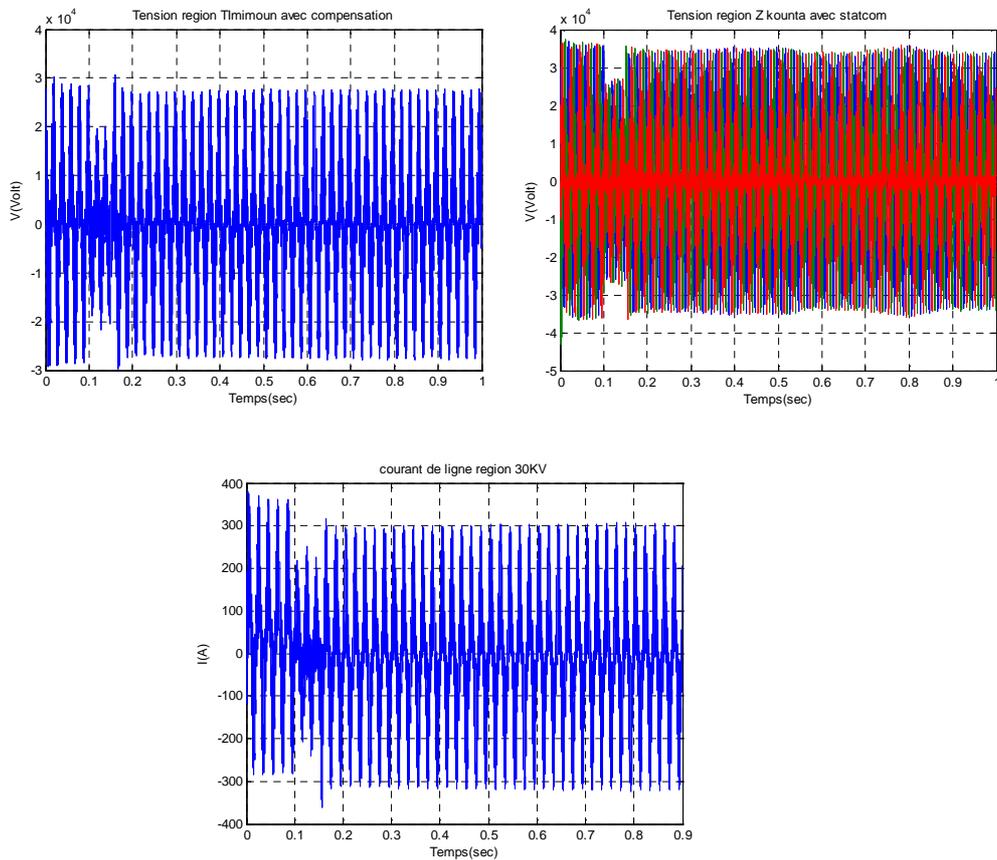


Fig.IV.41 : Tension et Courant régions alimentées en 30KV

Les figures IV.40 et IV.41 montrent que pour les deux régions 220KV ou bien 30KV le réseau se comporte de la même manière, il arrive à dépasser la période du défaut triphasé avec une baisse de tension notable, le réseau arrive à reprendre son état d'équilibre.

IV.6.1 Caractéristiques du STATCOM

La figure IV.42 montre la consigne fixée à 220KV, entre l'instant $t=0.1$ et $t=0.15$ s un défaut triphasé est appliqué, la tension de la ligne 220KV chute et retrouve sa valeur initiale avec un temps de réponse acceptable.

On a procédé à un élargissement du temps de défaut triphasé entre $t=0.2$ s et $t=0.3$ s on constate le même temps de réponse et les mêmes résultats ce qui signifie que le STATCOM peut élargir la marge de stabilité.

La Figure IV.43 illustre bien l'injection de la puissance réactive nécessaire pendant le temps de défaut car il est indispensable de stopper ou de diminuer la perte de vitesse aussi vite que possible, car plus on intervient tôt, plus il est facile de réaccélérer le système suite à l'élimination du défaut.

En d'autres termes, en raccourcissant le temps de réponse du STATCOM, on diminue les besoins de puissance réactive. Il est pratiquement impossible de réaccélérer le système après l'élimination du défaut si le STATCOM n'est pas opérationnel pendant le défaut. Au moment précis où le défaut disparaît, la tension bondit d'un coup et le courant réactif fourni augmente instantanément (voir figure IV.44).

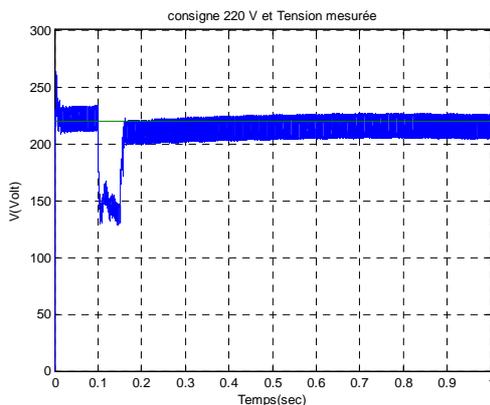


Figure IV. 42

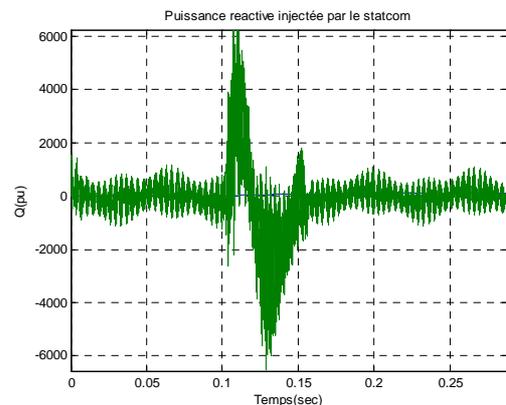


Figure IV. 43

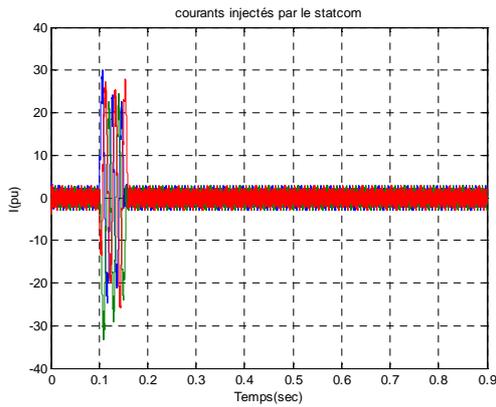


Figure IV. 44

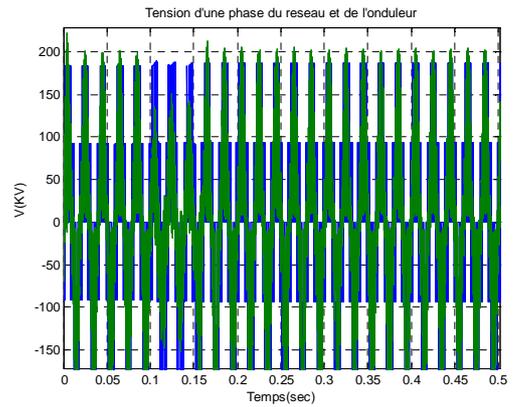


Figure IV. 45

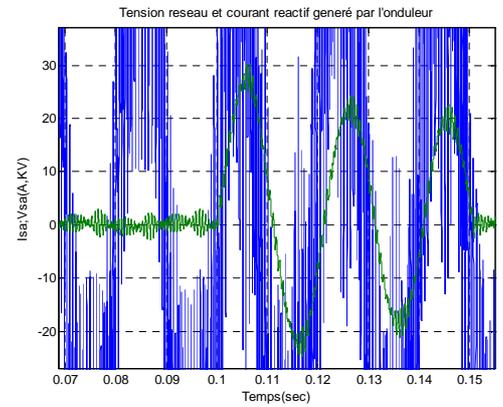
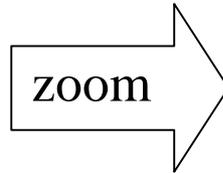
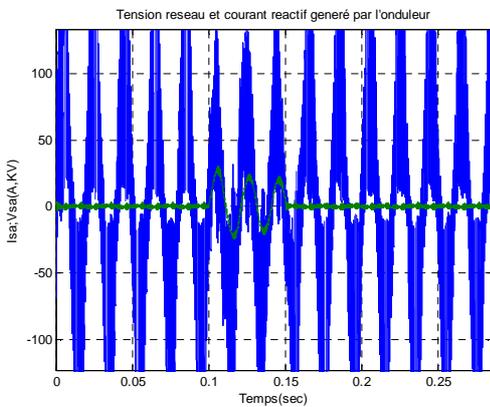


Figure IV. 46

La fig. IV .46 montre que pendant le défaut le STATCOM génère un courant réactif. (entre $t=0.1s$ et $t=0.15s$).

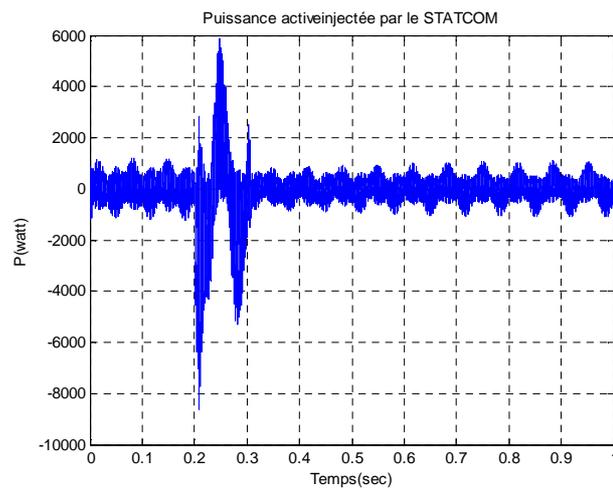


Fig IV.47 .Puissance active injectée par le STATCOM

Par ailleurs, la puissance active du STATCOM augmente pour compenser les pertes dans les interrupteurs (Figure IV.47).

IV.7 Conclusion

Plusieurs enseignements majeurs peuvent être tirés du projet d'Adrar Les problèmes de compensation de l'énergie réactive et d'écroulement de tension sont typiques des réseaux électriques qui se caractérisent par l'immensité du territoire et de la longueur des lignes qui deviennent très capacitives en charge et qui alimentent de gros récepteurs inductifs (moteurs asynchrones de climatiseurs, par ex.)

- Les STATCOM assurent un soutien efficace de la tension directe pendant les défauts, permettant de maintenir la rotation des moteurs asynchrones à des vitesses satisfaisantes.
- Les STATCOM doivent fonctionner à capacité élevée pendant les défauts. Plus le STATCOM réagit vite, moins sa puissance doit être élevée. Des STATCOM de très grande puissance ne sont obligatoires que s'il faut intervenir après l'élimination d'un défaut.
- Une compensation de courte durée est suffisante (quelques secondes).
- Les STATCOM sont robustes et peuvent fonctionner pendant les défauts et après leur élimination.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution au problème de contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique (isolé). L'approche proposée s'est concentrée en particulier sur la présentation des systèmes exploités sur les réseaux afin de compenser rapidement et du mieux que possible les perturbations, et ne favorisant pas un bon contrôle de puissance réactive transmise sur les réseaux à base des dispositifs d'électronique de puissance (FACTS).

Dans ce contexte, plusieurs types de dispositifs FACTS ont été présentés tel que le compensateur statique de puissance réactive, le compensateur statique synchrone, le compensateur série à thyristors, les régulateurs de tensions et le contrôleur de puissance unifié ainsi que d'autres dispositifs FACTS. Parmi ces outils de contrôle on a choisi un compensateur statique de puissance réactive (STATCOM) relié à un transformateur en parallèle avec le réseau ce choix est dû à sa simplicité de contrôle et ces composants regroupés dans un seul équipement. Puis nous avons analysé sur MATLAB/SIMULINK un cas de réseau où nous avons recensé ses problèmes. La gestion efficace de la puissance réactive dans un système électrique est indispensable pour son exploitation. Les moyens traditionnels de compensation ne peuvent plus répondre adéquatement aux besoins d'un système électrique moderne, comme l'introduction des harmoniques, impossibilité d'ajustement exact de la quantité de puissance réactive échangée avec le réseau ou, simplement, la rapidité de réponse du compensateur n'est pas suffisamment élevée. Les développements récents dans l'électronique de puissance permettent l'application de convertisseur à base de semi-conducteur en rôle de compensateur. De plus, un tel compensateur dépasse certains désavantages des compensateurs classiques. Une autre solution est d'utiliser une topologie de convertisseur à niveaux multiples qui est plus complexe. En même temps, l'utilisation d'un convertisseur à niveaux multiples mitige le problème d'introduction des harmoniques dans le système électrique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par plusieurs étapes:

D'abord nous avons commencé par une brève étude des lois de transport de l'énergie électrique en exposant la problématique de limite de puissance transportable en fonction des paramètres des réseaux ainsi que la chute de tension produite par le déséquilibre des charges. Nous avons aussi discuté rapidement les définitions et principes de fonctionnements des principaux dispositifs FACTS au deuxième chapitre.

Comme toute étude structurée, le troisième chapitre a fait l'objet d'une étude plus détaillée sur le compensateur shunt STATCOM, sa structure, son principe de fonctionnement et son action compensative sur un réseau de transport électrique. Il a été consacré à l'implémentation des modèles mathématiques dans les deux repères, ABC et synchrone d-q de ce dispositif, objets de cette étude, afin de mieux analyser et observer le comportement de ce dernier. Pour valider cette étude théorique, dans le dernier chapitre, nous avons effectué plusieurs essais de simulations sur un STATCOM inséré dans une ligne de transmission dans l'environnement Matlab-Simulink, visualiser ainsi que commenter les résultats obtenus.

Les régulateurs Proportionnel Intégral utilisés pour la régulation des grandeurs de ces dispositifs nous ont apportés des résultats très satisfaisant en matière de temps de réponse et l'amortissement des dépassements.

Les résultats de simulation démontrent que le taux d'harmoniques de la tension des phases et des tensions des lignes à la sortie d'onduleur est encore trop élevé pour répondre aux normes imposées par les standards. Ce problème peut être mitigé de deux manières: d'ajouter des filtres passifs à la sortie d'onduleur, ou bien d'augmenter le nombre de niveaux dans l'onduleur.

En perspective, nous dirons que beaucoup de travaux restent à effectuer comme connection du réseau d'ADRAR à AIN SALAH ainsi que le raccordement d'une centrale éolienne qui peut contribuer dans la compensation de l'énergie réactive. L'optimisation de l'emplacement d'autre FACTS est aussi à envisager. Sur la base de cette étude, nous proposons une réalisation pratique d'un prototype de laboratoire pour valider les résultats de simulation obtenus et en espérant que ce modeste travail servira de base de départ pour une mise en oeuvre en temps réel cette étude.

Annexe

ANNEXE A

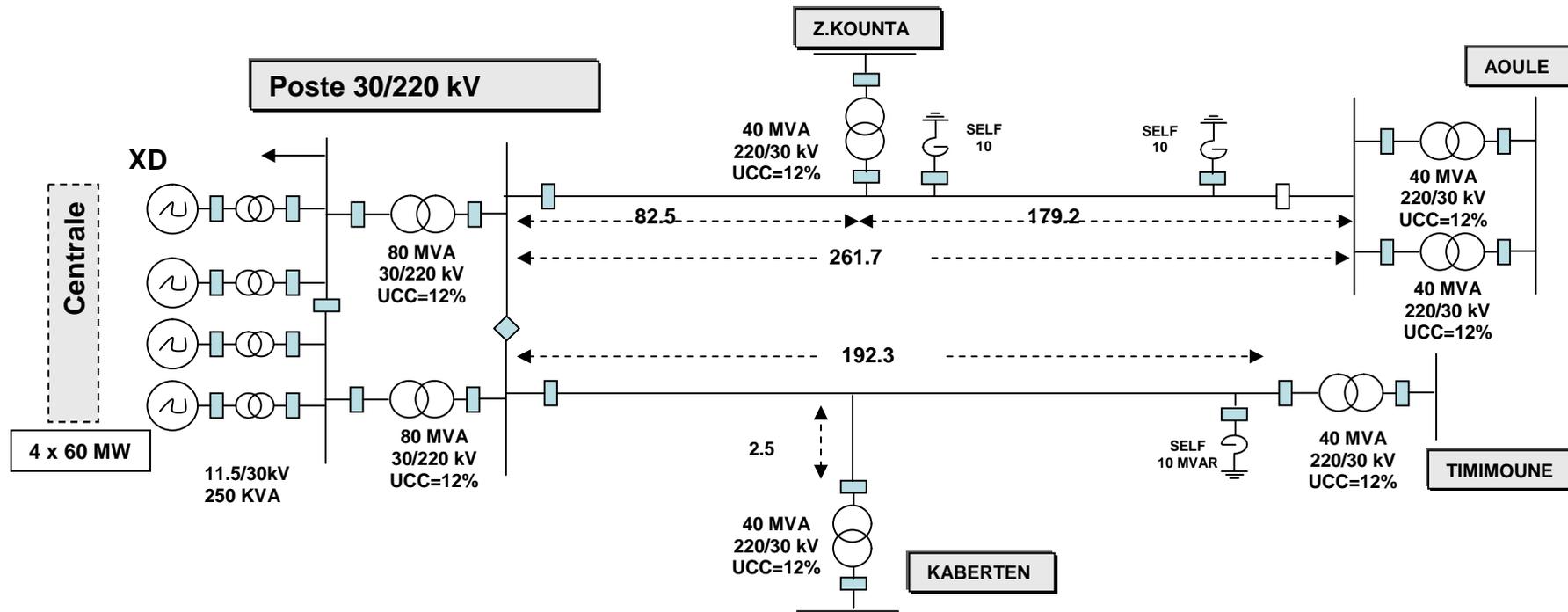


Fig. N° IV 1 Schéma Réseau ADRAR [32]

ANNEXE B

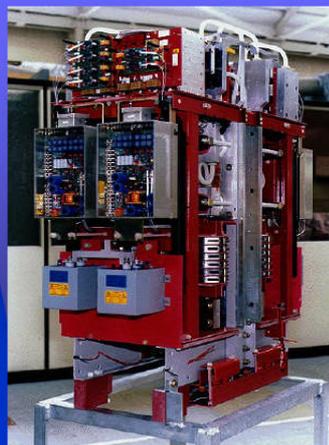
Une valve de STATCOM (une phase)



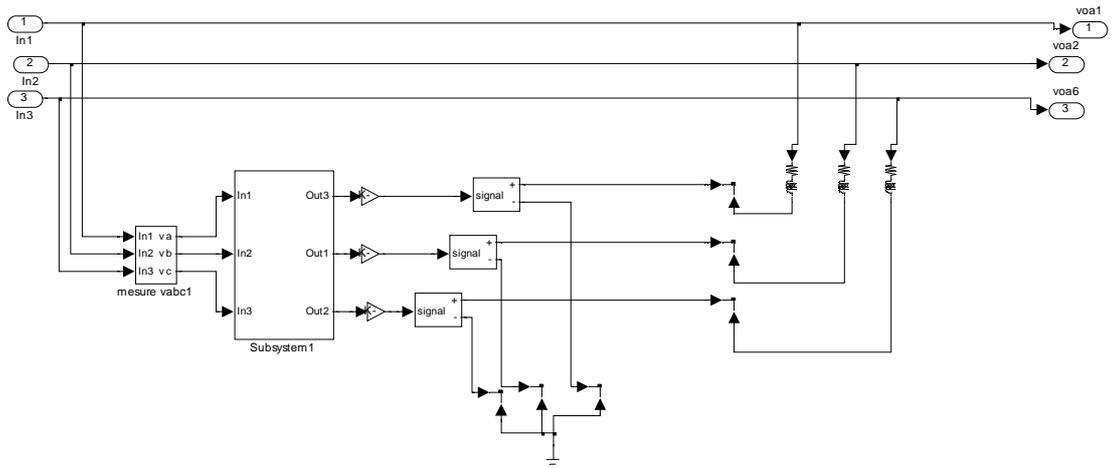
Déplacement d'une Cabine de STATCOM



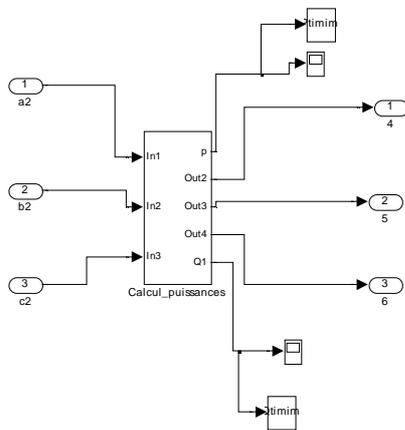
Une Cellule de STATCOM ...



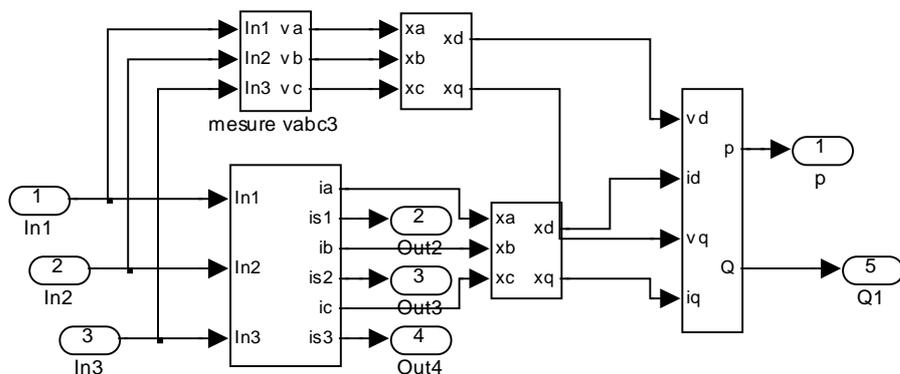
ANNEXE C



Implantation du STATCOM dans le réseau



Bloc de calcul des puissances active et réactive



Subsystem du bloc calcul des puissances active et réactive

ANNEXE D

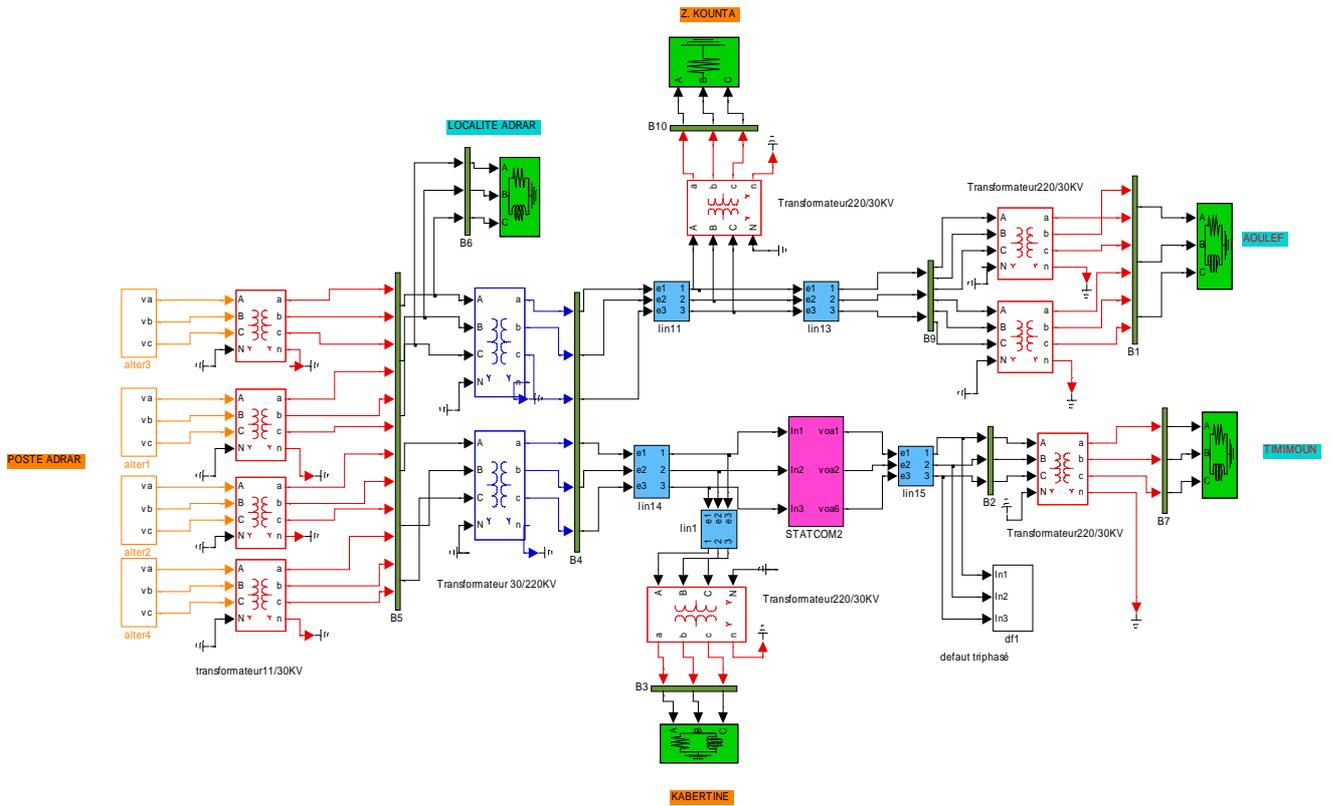


Schéma simulink du réseau d'ADRAR avec STATCOM

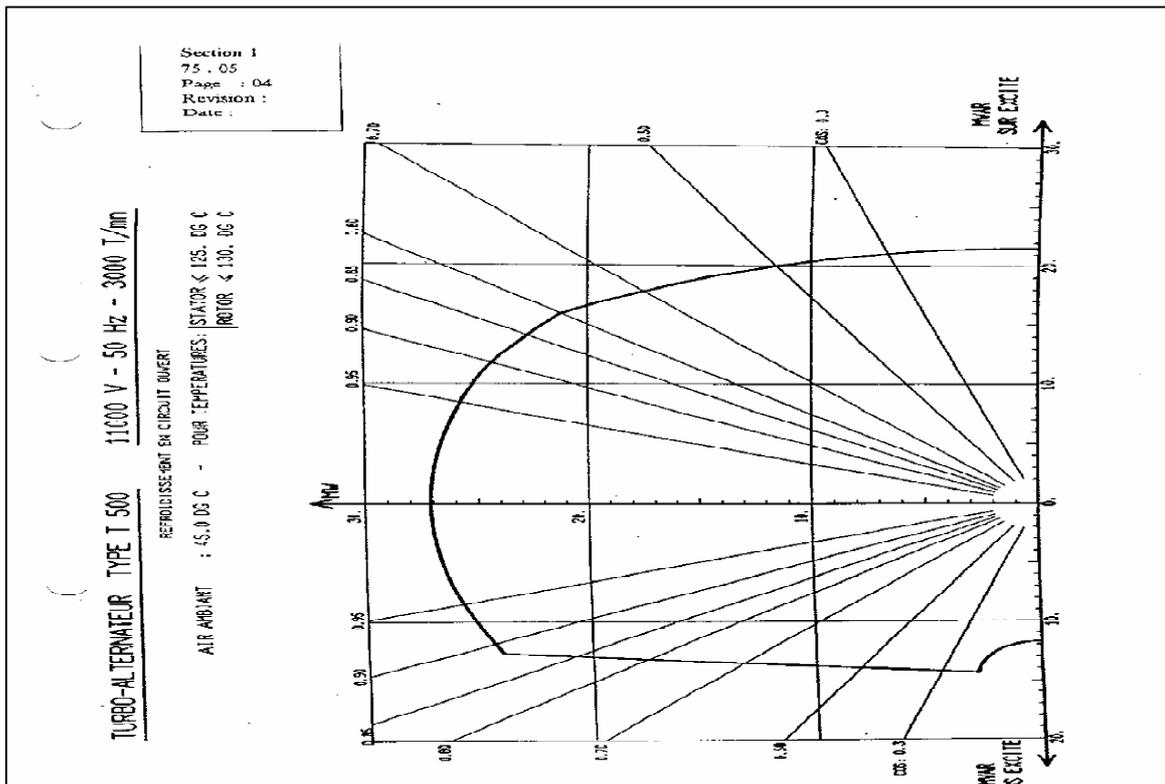


Fig. IV.5 : Courbe Puissance Réactive de l'Alternateur

ANNEXE E

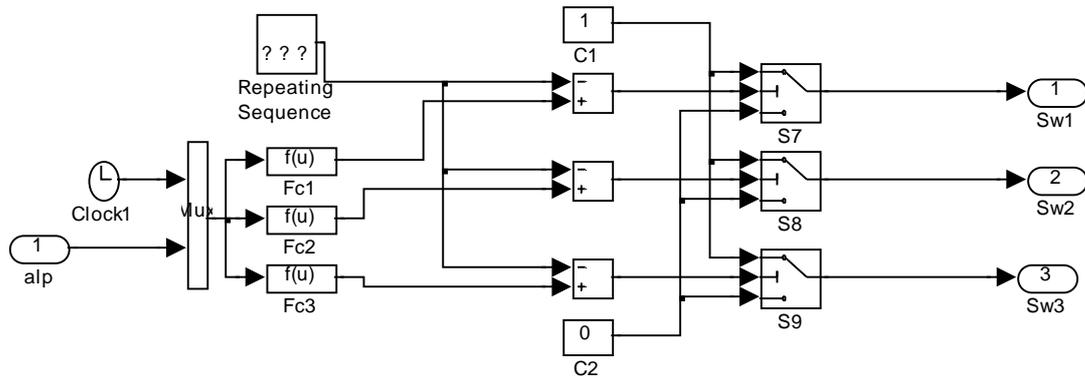


Figure III.15 Subsystem du switch 123

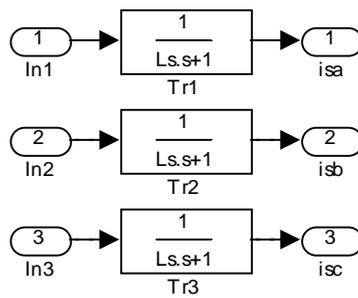


Figure III.16 Subsystem du transformateur calculant les courants

ANNEXE F

%%%%%%%%%% Paramètres de l'alternateur %%%%%%%%%%

```
sn=60e6;
vn=11e3;
fn=50;
vb=220e3;
sb=240e6;
zb=vb^2/sb;
p=1;
xd=188;
xpd=237;
xsd=17;
xq=174;
xsq=184;
xpq=32;
ra=0.00951;
J=10e5;
tpd=4.71;
tsd=0.037;
tpq=0.8;
tsq=0.072;
wsm=2*pi*50;
wc=(1/2)*J*(wsm^2);
H=1.75
ib=sn/sqrt(3/2)*vb
Vf=193;
```

%%%%%%%%%% Paramètres des lignes %%%%%%%%%%

```
R1=3.2/2.5;L1=(103.5e-3)/2.5;CL=(1.1e-6)/2.5;
R13=3.2/179;L13=(103.5e-3)/179;CL=(1.1e-6)/179;
R14=3.2/82.5;L14=(103.5e-3)/82.5;CL=(1.1e-6)/82.5;
R11=3.2/82.5;L11=(103.5e-3)/82.5;CL=(1.1e-6)/82.5;
R15=3.2/109.8;L15=(103.5e-3)/179;CL=(1.1e-6)/179;
```

%%%%%%%%%% Paramètres des transformateurs %%%%%%%%%%

```
Rt1=0.739e-3;Rt2=0.48;Lt1=0.0502e-3;Lt2=32.6e-3;
s1=250e3;s2=80e6;s3=40e6;s4=40e6
```

%%%%%%%%%% paramètres du statcom %%%%%%%%%%

```
Vs=220%*sqrt(2/3);
m=1.12/sqrt(3);
fc=1600
w=314
Ls=0.005
Rs=1
c=500e-3
```

Bibliographie

- [1] ABB revue actualité technologique du groupe ABB 1/10 ROLF GRÜNBAUM, PETER LUNDBERG, BJÖRN THORVALDSSON www.abb.com/abbreview ISSN : 1013-3119.
- [2] Abdelaàli alibi « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) ». Thèse de magistère Université de Batna, juin 2009.
- [3] T. Allaoui « Réglage Robuste de l'UPFC Pour Optimiser l'Écoulement des Puissances Dans Un Réseau Electrique», Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Avril 2002.
- [4] Boudiaf. Mohamed « Réglage intelligent de l'UPFC pour améliorer l'écoulement des puissances dans un réseau électrique». Mémoire de fin d'études 2004, Université IBN KHALDOUN – Tiaret.
- [5] Délendi louardi « contribution de l'écoulement de puissance active par les systèmes FACTS » Thèse de magister ' Université de Batna, juin 2009.
- [6] M.A.E. ALALI, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat de l'université de LOUIS PASTEUR (STRASBOURG) et HENRI POINCARÉ (NANCY I), 12, septembre 2002.
- [7] E. GH. Sahraki « Apport de l'UPFC à l'Amélioration de La Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques», Thèse de Doctorat Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.
- [8] N.G.Hingorani, "FACTS - Flexible AC Transmission System », EPRI Workshop on Flexible AC Transmission Systems (FACTS) - The Future in Hi&-Voltage Transmission, Cincinnati-Ohio, 1990.
- [9] B. Azeddine, L. Ahmed Amine'' Introduction Aux Systèmes Flexibles de Transmission En Courant Alternatif FACTS'', Projet de Fin d'Etudes, Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique. El-Harrach. Alger.
- [10] Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques, Schneider Electric Industries SA, <http://www.schneiderelectric.com>
- [11] Laib Hichem « Contribution A L'étude du Contrôle du Flux de Puissance » thèse de magister, Université de Batna, juin 2009.
- [12] T.J.E. Miller, «reactive Power Control in Electric Systems",livre John Wiley & Sons, New York, 1982 .
- [13] Slaven. Kincic "Onduleur a Niveaux Multiples et Son Application en Compensation de La Puissance Réactive'',Thèse de magister Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec, Mai 2000.

- [14] Zhang. Rehtanz. Pal "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control" livre, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [15] K. Belacheheb, "Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport ", Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.
- [16] Jerome Ndayizamba « contribution à l'analyse de la compensation série avancée des réseaux de transport d'énergie électrique ». Thèse de doctorat décembre 1996 de l'université de Montréal CANADA.
- [17] G. Narain, Hangorani, L. Gyugyi "Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems" 2001.
- [18] Kannan Sreenivasachar "unified power flow controller ,modelling,stability analysis,control strategy and control system design" thèse de doctorat waterloo,Ontario,Canada,2001.
- [19] J.C. Passelergue,"Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.
- [20] K-Clark, B .Farannesh, " Thyristor controlled series compensation application study-control interaction considerations," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.2, April 1995, pp. 1031-1036.
- [21] E. Acha, R. Claudio, F. Esquivel, H. Ambriz-Prez and C. Angeles- camacho "FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks" livre, Wiley 2004.
- [22] Edvina. Uzunovic "EMTP, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of SVC Based FACTS Controllers", These de Doctorate, University de Waterloo, Ontario, Canada, 2001.
- [23] Mathur R.M (Ed)"Static Compensators for Reactive Power Control", Canadian Electric Association, 1984.
- [24] P.Kundur, " Power system stability and control", EPRI, Power system Engineering series. 1994.
- [25] I. Papic "Basic Control of Unified Power Flow Controller", IEEE Transaction on Power Systems, vol 12, no4, Nov 1997.
- [26] C. Canizares, E. Uzunovic, J. Reeve" Transient Stability and Power Flow Models of the Unified Power Flow Controller for Various Control Strategies", Technical Report 2004-2009, University of Wanterloo.
- [27] R. TOUNSI, "Développement d'un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges Industrielles", Thèse de doctorat de l'INPT 11 Janvier 1999.

- [28] L-Gyugyi, "Unified power-flow concept for flexible ac transmission systems", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No.4, July 1992, pp. 323-331.
- [29] Schéma Directeur des Réseaux d'Adrar, sonelgaz distribution ouest, direction de la distribution d'ADRAR division des techniques électriques période 2008-2018.
- [30] L. Gyugyi, C.D. Schauder, K. K. Sen "Static Synchronous Series Compensator: a Solid-State Approach to the Series compensation of Transmission Lines", Power Engineering Review, IEEE, Vol: 17, January 1997.
- [31] Mathur R.M (Ed)"Static Compensators for Reactive Power Control", Canadian Electric Association, 1984.
- [32] « Contrôle par Retour d'Etat d'un Compensateur Statique d'Energie Réactive Avancé » Mansour Benyamina, B. Mazari * , A. Tahri * Département d'Electronique, Faculté des Sciences et Sciences de l'ingénieur, Université de Mostaganem, Algérie. * Département d'Electrotechnique, Faculté de Génie Electrique USTOran, Algérie. Email : mansour_benyamina@yahoo.fr , mazari_dz@yahoo.fr, tahriali@hotmail.com