

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA-



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTE : Sciences de l'ingénierat

DEPARTEMENT : Electrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Thème

Contribution du STATCOM dans l'amélioration du comportement du réseau électrique

Préparé par

Mme ABAIDIA FATMA ZOHRA

Encadreur:

MR. ADJABI Med

Jury de soutenance

- | | | |
|------------------------------|-----|--------------------|
| • Président : Mr AZZAG. EB | MCA | UNIVERSITE -ANNABA |
| • Rapporteur : Mr ADJABI. M | PR | UNIVERSITE -ANNABA |
| • Examineur : Mme TOURAB. W | MCB | UNIVERSITE -ANNABA |
| • Examineur : Mr KSENTINI. A | MCB | UNIVERSITE -ANNABA |

Promotion: juin 2018



REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'électrotechnique de l'université BADJI Mokhtar – Annaba -.

Mes remerciements vont tout premièrement à ALLAH tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces longues années.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Mr Med ADJABI pour avoir d'abord proposé ce thème et pour suivi continuel tout le long de la réalisation de cette thèse.

Mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Je tiens à remercier vivement mon deuxième encadreur Mr Med KHERROUF et mon collaborateur Mr Ramzi KHELFAOUI. et mon consultant Mr Med AMAROUAYACHE pour leur aide à élaborer et réaliser ce travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à ma formation.

Enfin je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.

DEDICACE

Je tiens à dédier ce modeste travail :

*A la mémoire de mon cher père Mr Nouar, quoique aucune dédicace
au monde ne saurait exprimer mon amour éternel et mon respect
et dévouement à son égard.*

*Je le dédie à ma chère Mère pour ses sacrifices et son soutien tout au
long de mon parcours ainsi que mes sœurs.*

*A mes enfants Alla, Walla et Diala et surtout mon époux qui, grâce
à son appui, sa compréhension et son encouragement, ce travail
n'aurait pas vu le jour.*

A toutes mes chères amies qui sont aussi mes sœurs de cœur

Et à ceux qui croiront toujours en moi.

A vous tous un grand merci.

Table des matières

Introduction générale:.....	1
Chapitre I Plan du développement du réseau Algérien	
I.1. Introduction:.....	3
I.2. Evolution de la puissance du réseau national :.....	3
I.3. Evolution des moyens de production :.....	5
I.3.1. Parc de Production National :.....	6
I.4. Evolution des moyens de transport :.....	7
I.4.1. Réseau de transport 400KV région EST:	9
Chapitre II Moyens de compensation	
II.1. Introduction :.....	14
II.2. Compensation Traditionnelle	15
II.2.1 .Compensation traditionnelle shunt	15
II.2.2. Compensation traditionnelle série	17
II.3. Définition des FACTS :	18
II.4. Classification des dispositifs FACTS :	19
II.5. Rôle et fonctionnement des dispositifs FACTS :.....	21
II.6. Différents types des dispositifs FACTS :.....	23
II.6.1. Compensateurs shunts (parallèles) :	24
II.6.2. Compensateurs Séries :.....	27
II.6.3. Compensateur série parallèle (hybride) :.....	29
II.7. Conclusion :	32
Chapitre III Modélisation du STATCOM	
III.1. Introduction.....	33

III.2. Principe de fonctionnement.....	33
III.3. Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique:.....	37
III.4. Modélisation du STATCOM.....	39
III.4.1. Modèle Mathématique Simplifié :.....	39
III.4.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC :	42
III.5. Contrôle du STATCOM.....	44
III.5.1. Détermination des Références:	44
III.5.2. Méthode Watt-Var découplée :.....	45
III.5.3. Régulateur PI avec compensation de pôles:	48
III.5.4. Régulation de la tension continue Udc:	49
III.6. Conclusion :	50

Chapitre IV SIMULATION

IV.1. Introduction :	51
IV.2. Structure du réseau simulé:	52
IV.3. Données du réseau de l'Est algérien (400KV):.....	52
IV.3.1. Résultats et interprétations :	53
IV.4. Données des nœuds du réseau du plan 2017-2027 sans STATCOM.....	55
IV.4.1. Résultats et interprétations :	56
IV.5. Données des nœuds du réseau plan 2017-2027 avec STATCOM	58
IV.5.1. Résultats et interprétations :	59

CONCLUSION

Conclusion générale	61
---------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE

bibliographie.....	62
--------------------	----

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I-1 Evolution mensuelle de la PMA entre 2015 et 2016.....	4
Figure I-2 Puissance installée par producteur	5
Figure I-3 Puissance installée par type d'équipement.....	6
Figure I-4 Evolution du réseau du transport entre 2013 et 2017.....	8
Figure I-5 Carte du réseau du transport électrique.....	9
Figure I-6 Carte du réseau 400KV région Annaba	10

Chapitre II

FigureII-1 Représentation d'une ligne HT	16
FigureII-2 Schéma unifilaire d'un circuit sans compensation	16
FigureII-3 Schéma unifilaire d'un circuit avec compensation	16
FigureII-4 Schéma d'alimentation d'un réseau avec compensateur synchrone.....	17
Figure II-5 Principe de la compensation série.....	18
Figure II-6 Schéma d'alimentation d'un réseau électrique avec une compensation série	18
Figure II-7 Représentation du TCR.....	25
FigureII-8 Représentation du SVC.....	25
Figure II-9 STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.....	26
Figure II-10 TCSC, (a) structure de base, (b) Schéma équivalent	28
FigureII-11 SSSC, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.	29

Figure II-12 schéma de base d'un UPFC	30
Figure II-13 SVC.....	31
Figure II-14 STATCOM	31
FigureII-15 TCSC	31

Chapitre III

Figure III-1 Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.	33
Figure III-2 Commande d'un STATCOM.	34
Figure III-3 Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.....	34
FigureIII-4 Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.....	36
Figure III-5 Courbes simulées courant et tension en mode inductif.	36
FigureIII-6 Q_s en fonction de P_s pour différentes valeurs de V_{sh}	38
Figure III-7 P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}	39
Figure III-8 Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau	40
Figure III-9 Passage du repère (α, β) vers le repère (d, q)	41
Figure III-10 Schéma équivalent du STATCOM avec Circuit DC.....	43
Figure III-11 Identification des Courants de Référence.....	45
Figure III-12 Transfert du I_{shd} en fonction de $X1$	46
Figure III-13 Transfert I_{shq} en fonction de $X2$	47
Figure III-14 Régulation et découplage de I_{shd}	47
Figure III-15 Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplée).....	48
FigureIII-16 Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM.....	48

FigureIII-17 Régulation de la tension continue U_{dc}	50
---	----

Chapitre IV

Figure IV-1 Réseau 400 kV Annaba (10/04/2018 à 10h 30mn)	51
Figure IV-2 Réseau: des charges actuelles.....	53
Figure IV-3 Résultats des tensions par nœud actuelle	54
Figure IV-4 Réseau des charges plan 2017-2027.....	56
Figure IV-5 Résultats des tensions par nœud plan 2017-2027 sans STATCOM.....	57
Figure IV-6 Réseau des charges plan 2017-2027 avec STATCOM	58
Figure IV-7 Résultats des tensions par nœud plan 2017-2027 avec STATCOM.....	60

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I-1 Evolution de la PMA entre 2008 et 2017	3
Tableau I-2 Evolution de la production électrique entre 2013 et 2016.....	7
Tableau I-3 Caractéristique des postes d'interconnexion 400KV EST.....	11
Tableau I-4 Caractéristiques des lignes du réseau 400KV de la région extrême est du pays (Zone d'Annaba).....	13

Chapitre II

Tableau II-1 Principaux dispositifs des FACTS	20
Tableau II-2 Différentes des niveaux ascendants de contribution entre les FACTS	22
Tableau II-3 Le rôle des différents dispositifs FACTS	23

Chapitre IV

Tableau IV-1 Données des nœuds du réseau actuel.....	52
Tableau IV-2 Données des Branches du réseau.....	52
Tableau IV-3 Résultats des tensions et des puissances par nœud.....	53
Tableau IV-4 Résultat des puissances totales	54
Tableau IV-5 Résultat des pertes	54
Tableau IV-6 Données des nœuds du réseau plan 2017-2027 sans STATCOM.....	55
Tableau IV-7 Résultats des tensions et des puissances par nœud.....	56
Tableau IV-8 Résultat des puissances totales	57
Tableau IV-9 Résultat des pertes	57

Tableau IV-10 Résultat des Surcharges	58
Tableau IV-11 Résultats des tensions et des puissances par nœud.....	59
Tableau IV-12 Résultat des puissances totales	60
Tableau IV-13 Résultat des pertes	60

Liste des abbreviations

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems.
GTO	Gate Turn Off.
HT	Haute Tension.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors.
IPFC	Interline Power Flow Controller.
MT	Moyenne Tension.
PI	Proportionnel Intégral (régulateur).
STATCOM	Static Synchronous Compensator.
SSSC	Static Synchronous Series Compensator.
SVC	Static Var Compensator.
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.
TCR	Thyristor Controlled Reactor.
TSC	Thyristor Switched Capacitor.
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor.
THT	Trés Haute Tension.
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor.
UPFC	Unified Power Flow Controller.
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsion.
SKD	Shariket kahraba Koudiet Draouch
SKS 1	Shariket kahraba skikda 1
SKS 2	Shariket kahraba skikda 2
CHEFI	Cheffia
RADJA	Ramdane Djamel
FKIRI	F'kirina
OATHM	Oued Athmania
SPTE	Système de production et transport électrique

Liste des symboles

d (<i>indice</i>)	La composante sur l'axe d du repère (d-q).
q (<i>indice</i>)	La composante sur l'axe q du repère (d-q).
$p.u$ (<i>indice</i>)	La grandeur en unité relative (grandeur réduite).
X_L	Réactance inductive.
X_c	Réactance capacitive.
α	L'angle d'allumage.
σ	L'angle de conduction.
V_r	Tension au jeu de barre de réception.
I_{sh}	Courant (shunt) injecté par le STATCOM.
V_{sh}	Tension (shunt) injectée par le STATCOM.
P_{sh}	Puissance active délivrée par le STATCOM.
P_{sh_ref}	Puissance active de référence délivrée par le STATCOM.
Q_{sh}	Puissance réactive délivrée par le STATCOM.
P_{sh_ref}	Puissance réactive de référence délivrée par le STATCOM.
θ	Déphasage du courant de la ligne.
L_{sh}	L'inductance du transformateur de couplage.
R_{sh}	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.
I_{sh_d}	La composante directe du courant fournit par le STATCOM.
I_{shd_ref}	La composante directe de référence du courant fournit par le STATCOM.
I_{sh_q}	La composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.
I_{shq_ref}	La composante quadrature de référence du courant fournit par le STATCOM.
V_{sh_d}	La composante directe de la tension générée par le STATCOM.
V_{sh_q}	La composante quadrature de la tension générée par le STATCOM.
I_{DC}	Courant dans le circuit continu.
U_{DC}	Tension continu aux bornes du condensateur.
K_p	Constante proportionnel.
K_i	Constante intégrale.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale:

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Plus le réseau est grand, plus il devient complexe et difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités d'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats subit plusieurs problèmes tels que : le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau etc... par conséquent le potentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploitable.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement, malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs).

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS : Flexible Alternatif Current Transmission Systems.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandés en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces systèmes selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que : STATCOM, TCSC, UPFC.

L'objectif de ce modeste travail est la contribution du STATCOM à l'amélioration du comportement du réseau par la compensation de la puissance réactive et du maintien de la tension des lignes de transport électriques. Cette étude est organisée en quatre chapitres :

Chapitre I : Plan du développement des réseaux Algériens

Chapitre II : Moyens de compensation

Chapitre III : Etude et Modélisation d'un STATCOM

Chapitre IV : Etude du comportement du STATCOM en régime perturbé.

Chapitre I

PLAN DU
DEVELOPPEMENT
DU RESEAU
ALGERIEN

I. Chapitre I Plan du développement du réseau Algérien

I.1. Introduction:

Le développement du réseau de transport de l'électricité est l'une des missions principales de l'état algérien, Ces dernières années, la demande en électricité a connu une évolution importante et particulièrement en périodes estivale, atteignant des pics de consommation importants. Cette forte augmentation de la demande est une conséquence directe du changement des habitudes du consommateur et l'amélioration de sa qualité de vie, ainsi que la pulsion donnée au secteur économique et industriel.

I.2. Evolution de la puissance du réseau national :

La demande en énergie électrique, durant ces dernières années a connu une croissance importante, atteignant en termes de Puissance Maximale Appelée (PMA), des valeurs record soit par exemple l'opérateur du système électrique a enregistré, mardi 11 Juillet 2017, un record en termes de PMA sur le réseau national de 13 227 MW à 15h30, cet appel de puissance dépasse de 330 MW la demande maximale de l'été 2016 enregistrée le 1er Août de la même année, correspondant à une hausse de plus de 2,5%.

Une autre pointe de 12 981 MW a été également enregistrée le soir du 11 juillet 2017 à 22h15. Cette demande appelée est en hausse de 5,1% comparée à la demande maximale enregistrée la soirée du 31 juillet 2016.

Durant les dix dernières années, la puissance maximale appelée du réseau national interconnecté est passée de 6 925 MW en 2008 à 13 227 MW en 2017, soit une évolution d'un peu plus de 200%, soit une évolution moyenne de 7,57% par année. [1]

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
PMA enregistrée	6925	7280	7718	8606	8850	10329	10927	12400	12897	13227
Taux d'évolution par rapport à l'année précédente	8.0%	5.1%	6.0%	11.5%	2.8%	16.7%	5.7%	13.4%	4.0%	2.5%

Tableau I-1 Evolution de la PMA entre 2008 et 2017

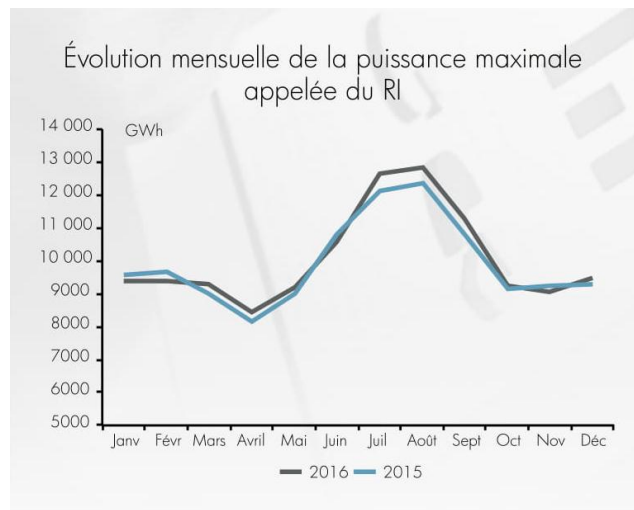


Figure I-1 Evolution mensuelle de la PMA entre 2015 et 2016

L'amélioration de la qualité de service et la forte croissance de la consommation de l'électricité, notamment pour les besoins de la climatisation, et tissu industriel expliquent cette hausse de la demande qui s'est exprimée de manière intense durant ces dernières années.

Cette tendance induit des réaménagements importants dans la manière de conduire le système électrique, car les conditions de fonctionnement durant la journée sont plus sévères pour les équipements et installations constituant ledit système. Aussi, le niveau et le volume des investissements doivent être adaptés de sorte à assurer la réserve nécessaire et ainsi faire face aux incidents.

La puissance maximale appelée est atteinte au moment où les niveaux élevés de températures influent négativement sur les ouvrages électriques. L'effet température se traduit par la diminution du rendement des moyens de production d'électricité, la réduction des capacités de transit des lignes électriques et l'augmentation de la consommation du réactif par les climatiseurs entraînant la dégradation du plan de tension. Tous ces effets montrent les difficultés que doivent surmonter les sociétés de production, de transport et de distribution de l'électricité afin de couvrir la demande et, pour l'Opérateur Système, de maintenir en permanence l'équilibre entre l'offre et la demande quelles que soient les contraintes. Ceci étant, en dépit de cette forte croissance et des difficultés liées notamment à la gestion des incidents en période de forte demande, les sociétés du Groupe SONELGAZ ont réussi à assurer l'alimentation des clients dans de bonnes conditions de qualité et de continuité, hormis la survenue de quelques coupures localisées et à courte durée provoquées par des incidents exceptionnels sur le système électrique.[2]

I.3. Evolution des moyens de production :

Pour répondre à ce besoin en électricité croissant, un programme ambitieux a été engagé pour l'augmentation des capacités de production conventionnelle au cours des quinze dernières années. La stratégie d'exécution de ce programme de production consiste en la mise en œuvre d'une série de projets industriels en partenariat basés sur la valorisation des ressources locales et des avantages comparatifs dont jouit notre pays. Il s'agit avant tout de développer une industrie nationale chargée d'assurer la fourniture des équipements destinés au secteur de l'énergie électrique (comme le cas du partenariat avec GENERAL ELECTRIC usine de Batna pour la fabrication des turbines).

Beaucoup d'efforts ont été fournis par le groupe SONELGAZ et ses sociétés filiales pour le renforcement des capacités de production, qui a connu ces dernières années une évolution conséquente de la puissance de production d'électricité installée, celle-ci est passée de 10 332 MW en 2010 à 19 006 MW en 2016, soit près de 8 700 MW additionnelle mise en service en six ans.

La répartition de la puissance installée par producteur pour l'année 2016 est illustrée dans les graphiques ci-après : [3]

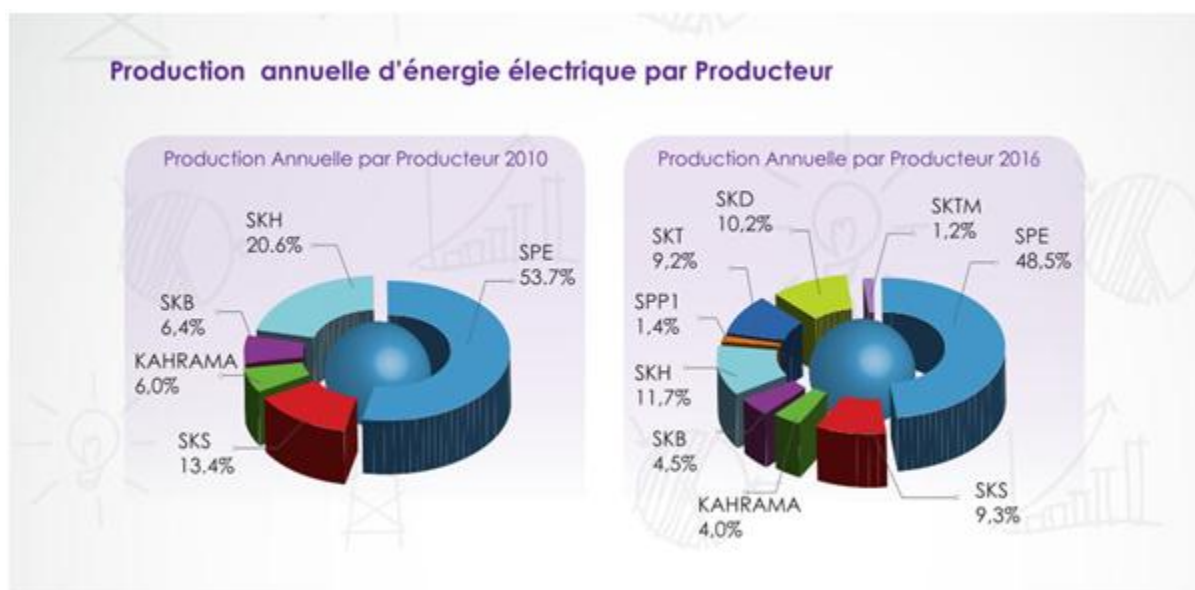


Figure I-2 Puissance installée par producteur

- Kahrama Arzew mise en service en 2005 ;
- Shariket Kahraba Skikda « SKS » mise en service en 2006 ;
- Shariket Kahraba Berrouagua « SKB » (Médéa) mise en service en 2007
- Shariket Kahraba Hadjret Ennousse « SKH » mise en service en 2008

- Shariket Kahraba Terga « SKT » mise en service en 2012
- Shariket Kahraba Draouche « SKD » mise en service en 2013

I.3.1. Parc de Production National :

Les impératifs de préservation de l'environnement imposent l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, par rapport aux autres énergies fossiles jugées polluantes, sachant que la ressource du gaz est largement disponible en Algérie. Mais la préoccupation environnementale exige aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants au sud du pays. Les perspectives de relance de l'économie se traduiront également par un impact certain sur le plan socio-économique et par conséquent, une augmentation notable de la consommation d'électricité, notamment en saison estivale.

La répartition de la puissance installée par moyen de production pour l'année 2016 est illustrée dans les graphiques ci-après : [3]

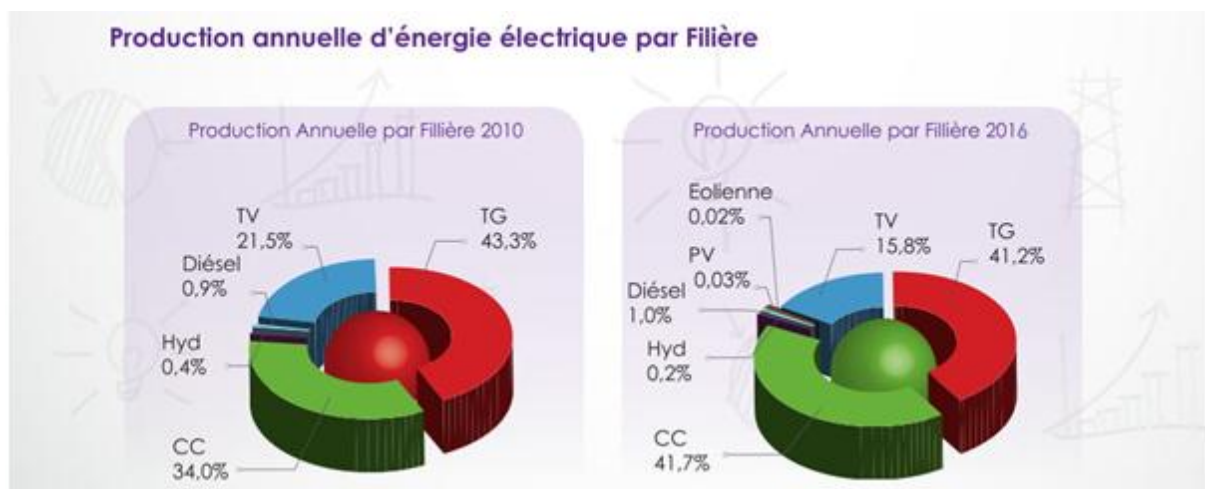


Figure I-3 Puissance installée par type d'équipement

Chiffres clés des réalisations du SPTE année 2016

BILAN ÉNERGÉTIQUE	Réalisation				Taux d'évolution %			Structure %			
	2013	2014	2015	2016	2014/2013	2015/2014	2016/2015	2013	2014	2015	2016
PRODUCTION SPE RI	22 154	24 425	30 319	29 281	10,3	24,1	-3,4				
PRODUCTION SPE GLOBALE	23 069	25 379	31 359	30 352	10,0	23,6	-3,2	41,1	41,9	48,5	45,8
PRODUCTION KAHRAMA	2 571	2 549	2 607	2 635	-0,9	2,3	1,1	4,6	4,2	4,0	4,0
PRODUCTION SKS	6 078	6 471	5 998	5 593	6,5	-7,3	-6,8	10,8	10,7	9,3	8,4
PRODUCTION SKB	1 172	2 264	2 905	2 493	93,1	28,3	-14,2	2,1	3,7	4,5	3,8
PRODUCTION SKH	10 390	8 815	7 583	9 760	-15,2	-14,0	28,7	18,5	14,6	11,7	14,7
PRODUCTION SPP1	1 155	1 181	889	806	2,2	-24,7	-9,3	2,1	2,0	1,4	1,2
PRODUCTION SKT	6 774	6 399	5 942	6 472	-5,5	-7,1	8,9	12,1	10,6	9,2	9,8
PRODUCTION SKD	4 443	6 759	6 599	7 074	52	-2	7,2	7,9	11,2	10,2	10,7
PRODUCTION SKTM	497	683	780	1 049		14,2	34,5	0,9	1,1	1,2	1,6
Injection CEVITAL (échange involontaire)	15	6	46	30	-60	688	-35,5	0	0	0	0
PRODUCTION GLOBALE	56 163	60 505	64 709	66 263	7,7	6,9	2,4				
PRODUCTION DU RÉ- SEAU INTERCONNECTÉ	54 752	58 868	62 890	64 227	7,5	6,8	2,1	97,5	97,3	97,2	96,9
PRODUCTION DU PÔLE D'ADRAR	742	873	976	1 086	17,7	11,9	11,2	1,3	1,4	1,5	1,6
PRODUCTION DU RÉSEAU ISOLÉ SUD	670	764	842	950	14,1	10,3	12,8	1,2	1,3	1,3	1,4
PRODUCTION PAR FILIÈRE											
TURBINES VAPEUR	9 582	10 221	10 227	11 511	6,7	0,1	12,6	17,1	16,9	15,8	17,4
TURBINES GAZ	17 415	20 633	26 670	24 470	18,5	29,3	-8,2	31,0	34,1	41,2	36,9
CYCLES COMBINÉS	27 012	27 012	27 012	29 704	0,0	0,0	10,0	48,1	44,6	41,7	44,8
HYDRAULIQUES	193	145	145	72	-24,5	0,0	-50,4	0,3	0,2	0,2	0,1
DIESEL	571	622	622	281	9,0	0,0	-54,8	1,0	1,0	1,0	0,4
ÉOLIEN	1	19	19,2	19,4		0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,03
PHOTOVOLTAIQUE	0,9	13,7	13,7	204,7				1388,6	0,0	0,0	0,0

Tableau I-2 Evolution de la production électrique entre 2013 et 2016

NB : La capacité supplémentaire nationale de production d'électricité au cours de la période **2017-2027** sera de **21 307 MW**, dont **20 994 MW** ont déjà été décidés et **313 MW** sont en projets.

I.4. Evolution des moyens de transport :

Pour accompagner le développement du parc de production nationale et en vue de répondre à une demande croissante et incessante en énergie électrique, les pouvoirs publics en concertation avec les sociétés du Groupe SONELGAZ, ont décidé un programme de développement du réseau de transport de l'électricité sur la période 2008-2012 (premier programme quinquennal) et 2013-2017 (Deuxième programme quinquennal), par la mise en service de près de 40 000 km de lignes.

La longueur totale du réseau national de transport de l'électricité, tous niveaux de tensions confondus (60 à 400 kV), dont la gestion est confiée au Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité (**GRTE**) est estimée à fin 2012 à environ 25 000 km, soit un accroissement de 22 % par rapport à 2008.

Durant le dernier semestre 2017, GRTE a vu la réalisation et la mise en service de nombreux ouvrages, qui sont venus renforcer la capacité du réseau ainsi qu'améliorer la qualité du service.

Au total Douze (12) nouveaux ouvrages ont été mis en service sur tout le territoire National durant cette période, avec six (06) ouvrages postes, deux (02) cabines mobiles et quatre (04) ouvrages lignes haute tension, atteignant une longueur d'environ 45 000 KM soit une augmentation de 80% par rapport à 2012.

Ce qui reflète les efforts colossaux que l'état Algérien a fourni afin de suivre l'évolution de la production.

Évolution du Réseau de transport de l'Électricité durant la période 2013 - 2017

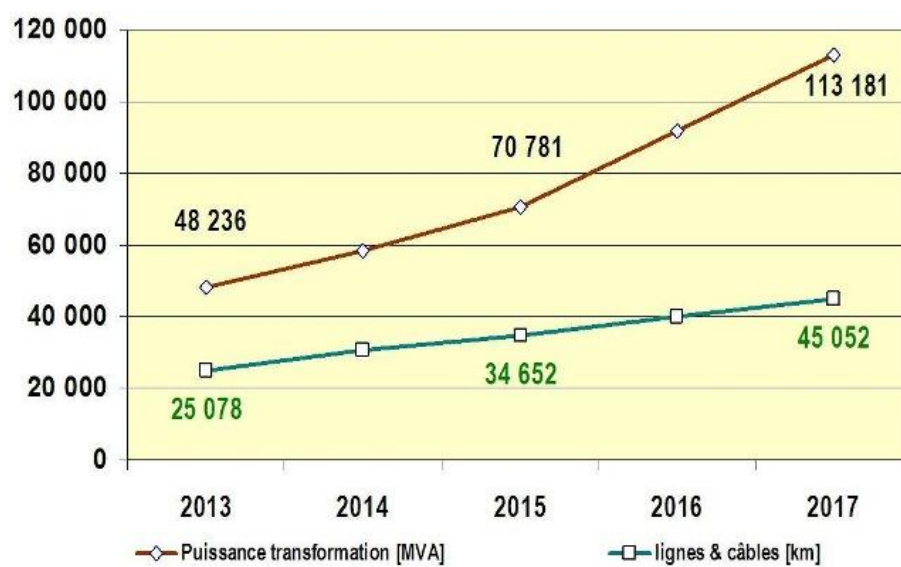


Figure I-4 Evolution du réseau du transport entre 2013 et 2017

La structure du réseau électrique nationale se décompose en trois systèmes : [2]

Le Réseau Interconnecté National (RIN) : s'étalant sur le nord du pays et couvrant les régions de Béchar, Hassi Messaoud, Hassi R'Mel et Ghardaia, est alimenté par une quarantaine de centrales de

production d'électricité, reliées entre elles à travers un réseau de transport en 220 kV et 400 kV, permettant le transfert d'énergie des sites de production vers les centres de consommation.

Le pôle In Salah – Adrar – Timimoune : Ce pôle est alimenté par les centrales Turbines à Gaz d'Adrar et d'In Salah, interconnectées à travers un réseau 220 kV s'étalant d'In Salah à Timimoune via Aoulef et Adrar.

Les Réseaux Isolés du Sud : Il s'agit de 26 sites du grand sud, alimentées par des réseaux locaux à travers des groupes diesels ou des TG compte tenu des distances mises en jeu et des niveaux de consommation relativement faibles.

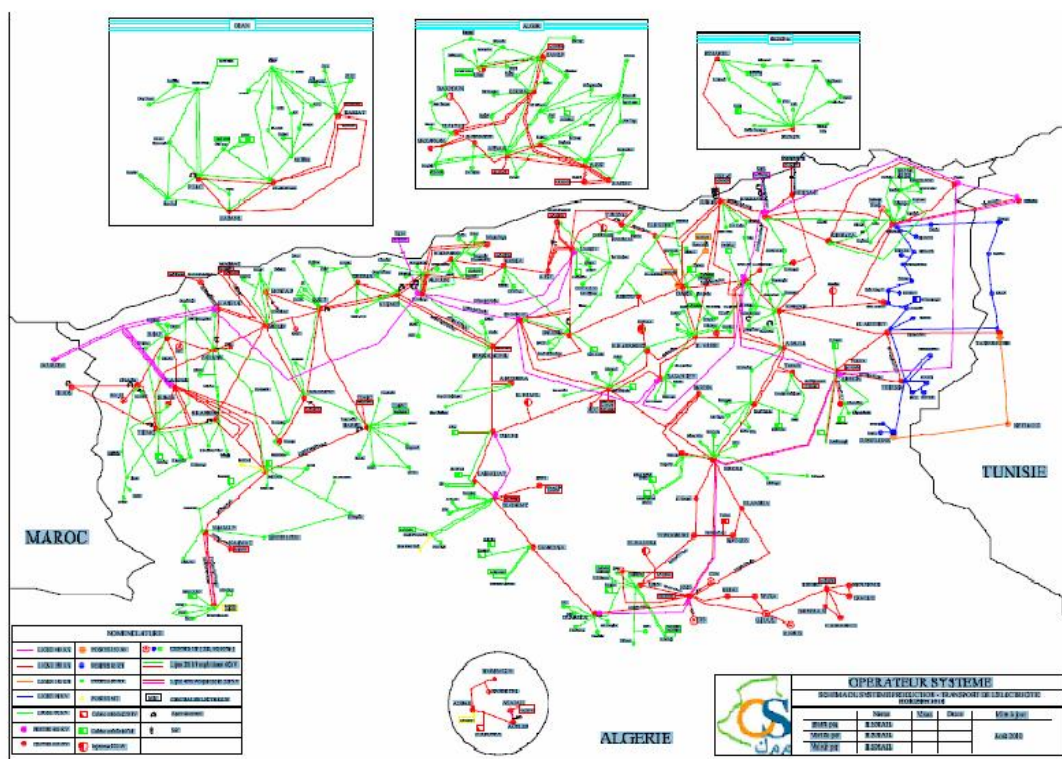


Figure I-5 Carte du réseau de transport électrique

I.4.1. Réseau de transport 400KV région EST:

Le réseau électrique national a été renforcé par une dorsale électrique THT 400 kV allant de l'Est jusqu'à l'Ouest du pays avec une interconnexion avec le Maroc à Bourdim qui a été achevée et mise en service en 2010, et une autre interconnexion avec la Tunisie à Djendouba, mise en service en 2013.

Le réseau électrique 400KV à l'extrême est Algérien a été mis en service après l'achèvement des travaux de la centrale de Koudiet Draouche (SKD) et s'étale sur une longueur d'environ 833,46 KM

interconnecté en boucle fermée via les trois poste Cheffia – Fkirina – Ramdane Jamel comme l’indique la figure I-6 ci-après. [4]

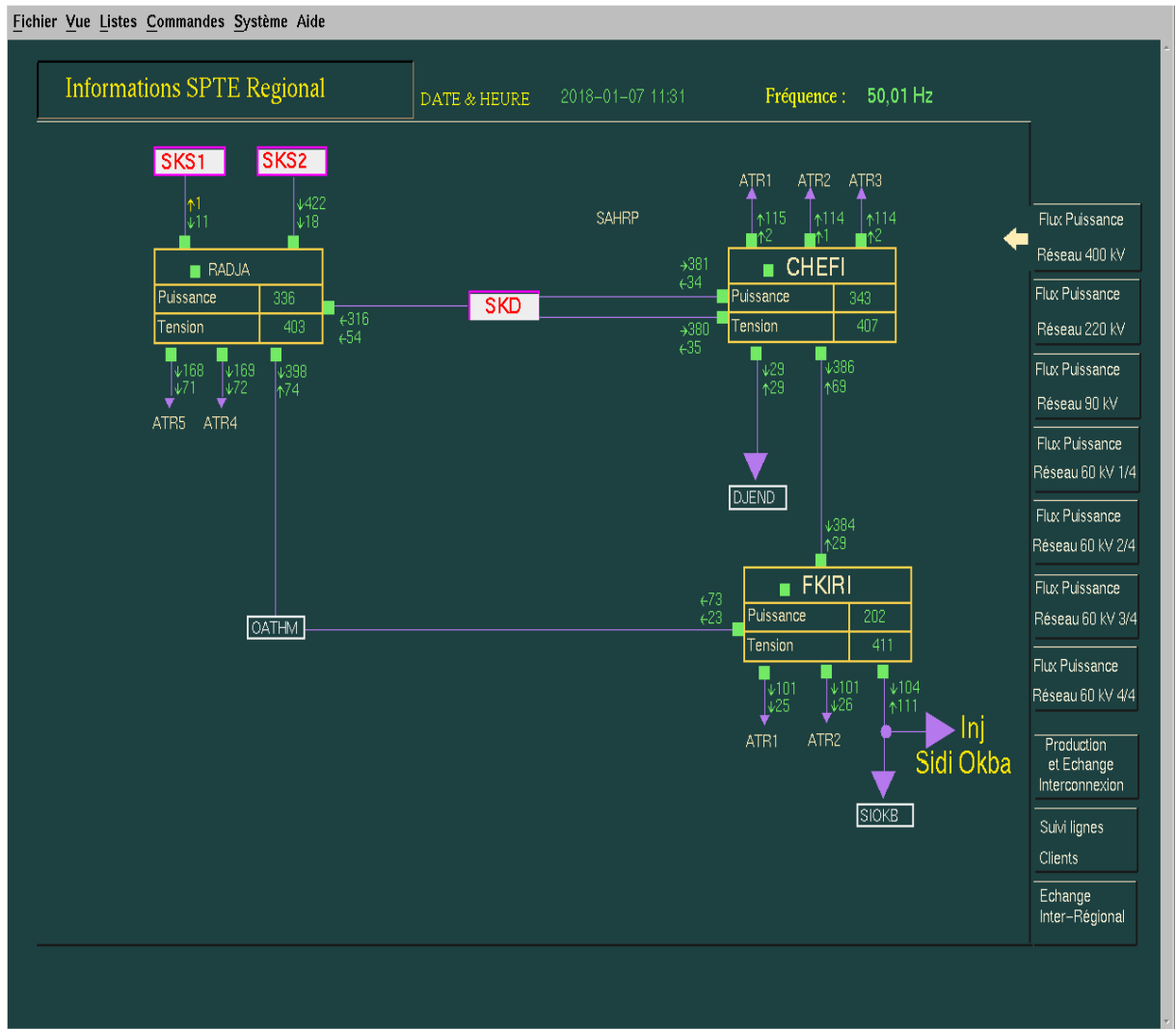


Figure I-6 Carte du réseau 400KV région Annaba

Les caractéristiques des postes d’interconnexion et les lignes sont indiquées dans les tableaux I-3 et I-4 ci-dessous :[5]

POSTE	U(kV)	ETAGE (kV)	TRAVEE	TYPE DE DISJ	DISJ	TRS	P(MVA)	MARQUE
CHEFI	400/220	400	ATR N° 1	A GAZ SF6	1	1	300	EFFACEC
CHEFI	400/220	400	ATR N° 2	A GAZ SF6	1	1	300	EFFACEC
CHEFI	400/220	400	ATR N° 3	A GAZ SF6	1	1	300	EFFACEC
RADJA	400/220/60	400	ATR N° 5	A GAZ SF6	1	1	500	VATECH
RADJA	400/220/60	400	ATR N° 4	A GAZ SF6	1	1	500	VATECH
FKIRI	400/220	400	ATR1	NON EQUIPE	0	1	100	ALTOTRANSF ORMATEURS
FKIRI	400/220	400	ATR 2	A GAZ SF6	1	1	100	ALTOTRANSF ORMATEURS

Tableau I-3 Caractéristique des postes d'interconnexion 400KV EST

N°	Lignes	Tension (kv)	Longueur (km)	Résistance (Ω /km)	Réactance (h/km)	Susceptance	Type de conducteur	Section (mm ²)	Date mise en service	Observations
1	Ramdane Djamel - Koudiet Draouch (SKD)	400	136.72	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	AA Alim	2X583 2X570	23/04/2012	
2	Cheffia - Koudiet Draouch 1 (SKD1)	400	32.93	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	Alim	2X570	26/04/2012	
3	Cheffia - Koudiet Draouch 2 (SKD2)	400	32.93	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	Alim	2X570	26/06/2013	
4	Cheffia – F'kirina	400	144.19	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	Alim	2X570	09/04/2012	
5	Ramdane Djamel - SKS1	400	19.38	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	Alim	2X570	19/06/2005	
6	Ramdane Djamel - SKS2	400	19.38	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	Alim	2X570	20/09/2005	
7	Ramdane Djamel - Oued Athmania	400	77.72	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	Alim	2X570	13/10/2005	
	Ramdane Djamel - Djendouba (Tronçon RAD-EHD)	400	77.72	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	Alim	2X570	17/06/2006	On la pas comptabilise car ce tronçon est comptabilise dans la longueur de la nouvelle ligne 400 Kv RAD/CHAF

N°	Lignes	Tension (kv)	Longueur (km)	Résistance (Ω/km)	Réactance (h/km)	Susceptance	Type de conducteur	Section (mm ²)	Date mise en service	Observations
	<i>Ramdane Djamel - Djendouba (Tronçon EHD - frontiere Tunisiene)</i>	400	68.4	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	AA	2X570	17/06/2006	<i>Actuellement hors service mais réceptionnée</i>
8	<i>Cheffia - Djendouba</i>	400	27.40	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	<i>Alim</i>	2X570	26/12/2013	<i>Dépotée au pylône N° 19 a partir de la frontière Algero-Tunisienne</i>
		400	15.02	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	<i>Alim</i>	2X570	10/06/2014	<i>Nouveau tronçon</i>
9	<i>F'kirina - Sidi Okba</i>	400	209.79	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	<i>Alim</i>	2X570	15/01/2016	
10	<i>F'kirina - Oued Athmania</i>	400	118.00	0,03188	0,00101741	1,0134E-08	<i>Alim</i>	2X570	31/12/2011	
<i>TOTAL 400 KV</i>			833.46							

Tableau I-4 Caractéristiques des lignes du réseau 400KV de la région extrême est du pays (Zone d'Annaba).

Chapitre II

Moyens de compensation

II. Chapitre II Moyens de compensation

II.1. Introduction :

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux. Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes. [07]

Les systèmes de transmission en courant alternatif sont considérés comme non- flexibles. L'écoulement de puissances ne peut pas être contrôlé le long de son chemin désiré. Les réseaux électriques souffrent des chemins parallèles et des boucles de puissance. Par conséquent, quelques lignes de transmission sont surchargées. Pour les longues lignes, le problème de la stabilité transitoire après un défaut majeur, est fréquemment un facteur de limitation.

On parle actuellement avec instance sur la libéralisation du marché de l'énergie électrique et son ouverture à la concurrence. Une nouvelle conception de l'exploitation et de la planification s'impose inévitablement. Parmi les solutions récentes, adaptées à un tel changement, c'est l'utilisation de la nouvelle technologie à base d'électronique de puissance FACTS (Flexible AC Transmission system). Les systèmes FACTS sont des moyens de contrôle rapides et flexibles capables de faciliter l'écoulement de puissance, d'augmenter la capacité de transfert de l'énergie électrique, de réduire les coûts de génération et d'améliorer la sécurité et la stabilité du réseau.

Contrairement, à ce que nous avons connu, en termes de compensateurs classiques et des stabilisateurs statiques du réseau électrique, le but est de réaliser un contrôle à grande vitesse des

paramètres électriques du système de transmission comprenant la tension, l'impédance et l'angle de phase. La commande à grande vitesse d'un ou deux de ces paramètres est possible par l'utilisation des dispositifs FACTS. [8]

Aujourd'hui cette technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie

L'intérêt de ces systèmes est non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux, mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tous en maintenant, voir en améliorant la stabilité des réseaux.

Les différents systèmes FACTS existant peuvent être classés en trois catégories ; [9]

- Les compensateurs parallèles.
- Les compensateurs série ou compensateurs d'impédance.
- Les compensateurs déphaseurs.

Les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes. Ces FACTS ont l'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire. [6]

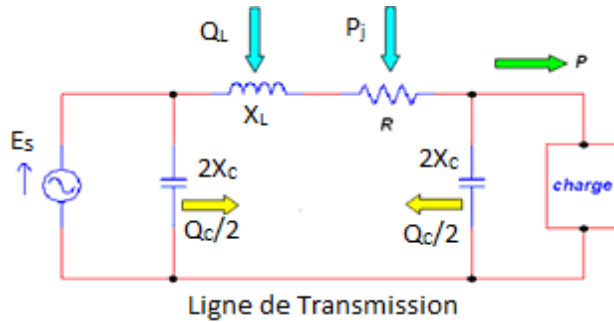
La répartition des puissances et le maintien de la stabilité des systèmes électriques s'appuient sur des dispositifs classiques comme les régulateurs automatiques de tension, les stabilisateurs de systèmes électriques, les transformateurs et, enfin, les dispositifs de transport flexible en courant alternatif FACTS qui doivent être pris en compte dans les algorithmes de régulation.

II.2. Compensation Traditionnelle

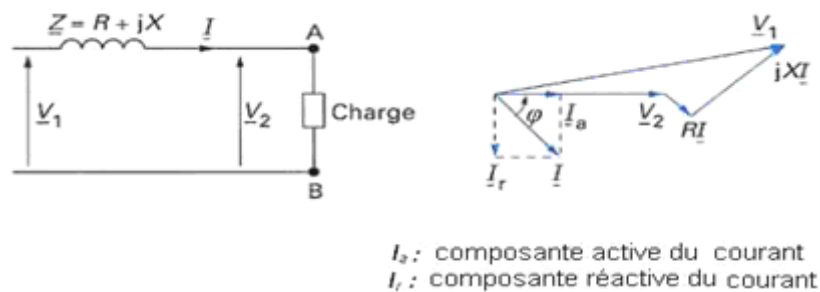
II.2.1. Compensation traditionnelle shunt

La compensation parallèle (*shunt*) consiste à enclencher des condensateurs shunt et/ou des disjoncteurs à différents endroits sur le réseau pour -modifier l'impédance des lignes, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau. Ces éléments permettent de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites contractuelles. Cette technique de compensation est dite passive car elle fonctionne en tout ou rien. C'est-à-dire qu'elle est soit en service, par exemple lorsqu'une inductance shunt est enclenchée, soit complètement hors

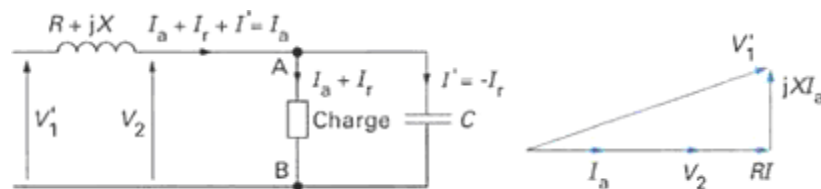
service lorsque l'inductance est retirée. Lorsqu'elle est en service, aucune modification des inductances ou des condensateurs n'est effectuée pour essayer de contrôler la tension ou l'écoulement de puissance.



FigureII-1 Représentation d'une ligne HT



FigureII-2 Schéma unifilaire d'un circuit sans compensation



FigureII-3 Schéma unifilaire d'un circuit avec compensation

Dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau [15].

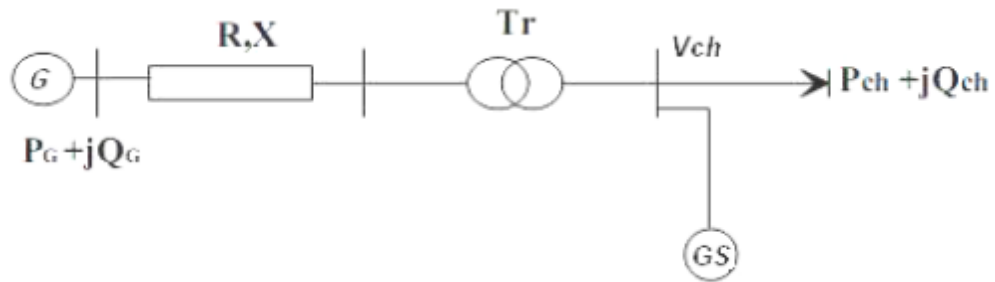
Parmi les moyens de compensations traditionnelle shunt de l'énergie réactive on a :

1. Compensateur synchrone.
2. Inductance.
3. Batterie de condensateur.

Il existe deux régimes de fonctionnement pour le compensateur synchrone :

- Consommation de la puissance active et fourniture de la puissance réactive au réseau, un tel régime est appelé régime de surexcitation donc le compensateur synchrone injecte de la puissance réactive dans le réseau.

- Consommation de la puissance active et réactive, un tel régime est appelé un sous excitation donc le compensateur consomme de la puissance réactive.



FigureII-4 Schéma d'alimentation d'un réseau avec compensateur synchrone

Les inductances sont utilisées pour compenser la puissance réactive fournie par les lignes (THT) et les réseaux de câbles souterrains en heures creuses et lors de manœuvre de mise sous tension. Elles sont branchées soit directement, soit au secondaire d'un transformateur et permettant une limitation des surtensions.

Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive. Les batteries de condensateurs peuvent être implantées en trois modes différents. [16]

II.2.2. Compensation traditionnelle série

La puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction d'un banc de condensateurs d'impédance XC en série avec la ligne.

Les condensateurs sont placés en série sur une ligne dont ils compensent partiellement la réactance, et ils diminuent la longueur électrique de la ligne. La compensation série est utilisée sur certaines lignes à haute tension à la fois très chargées et très longues.

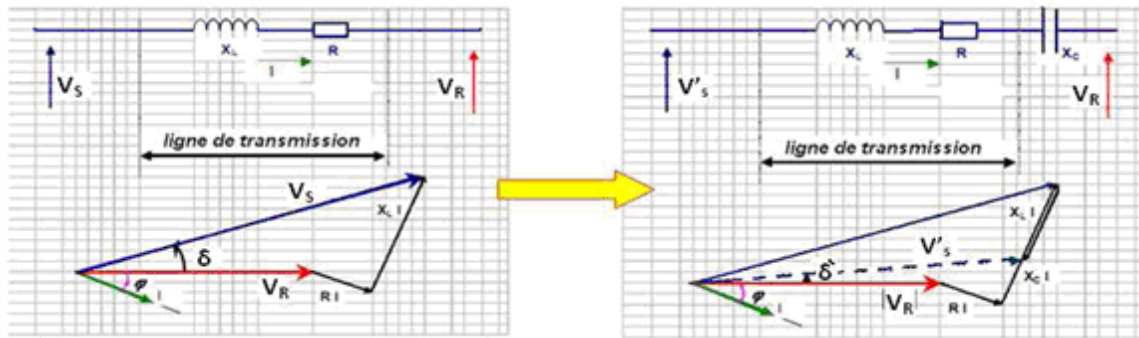


Figure II-5 Principe de la compensation série.

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 la montre le diagramme de Fresnel illustré sur la figure II .5, l'angle de transport δ est réduit.

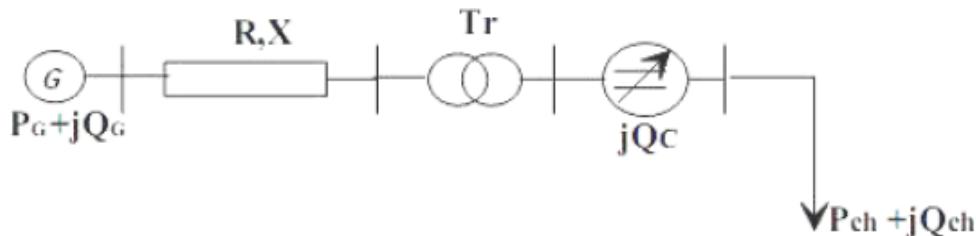


Figure II-6 Schéma d'alimentation d'un réseau électrique avec une compensation série

La technique de compensation shunt consiste en un groupe de condensateurs en parallèle avec les inductances shunt équivalentes de la ligne de transport, qui permet d'injecter la puissance réactive demandée pour le système au point de raccordement du banc des condensateurs. Le but de cette compensation est de maintenir la tension constante au bout de la ligne indépendamment des variations de la charge. [14]

II.3. Définition des FACTS :

“FACTS” est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....), Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

Ces équipements contrôlent dynamiquement ensemble ou séparément les différents paramètres du réseau : tension, impédance, la phase du réseau....

Ils sont utilisés pour améliorer, d'une façon générale les performances d'un réseau (stabilité, capacité de transport...) Les FACTS (abréviation anglaise de Flexible AC Transmission Systems), sont définis comme suit :

Ceux sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance. Ils peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

Il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettant un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau, ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions. [13]

II.4. Classification des dispositifs FACTS :

Le tableau de la figure II.4 représente te les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques ; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base RLC et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

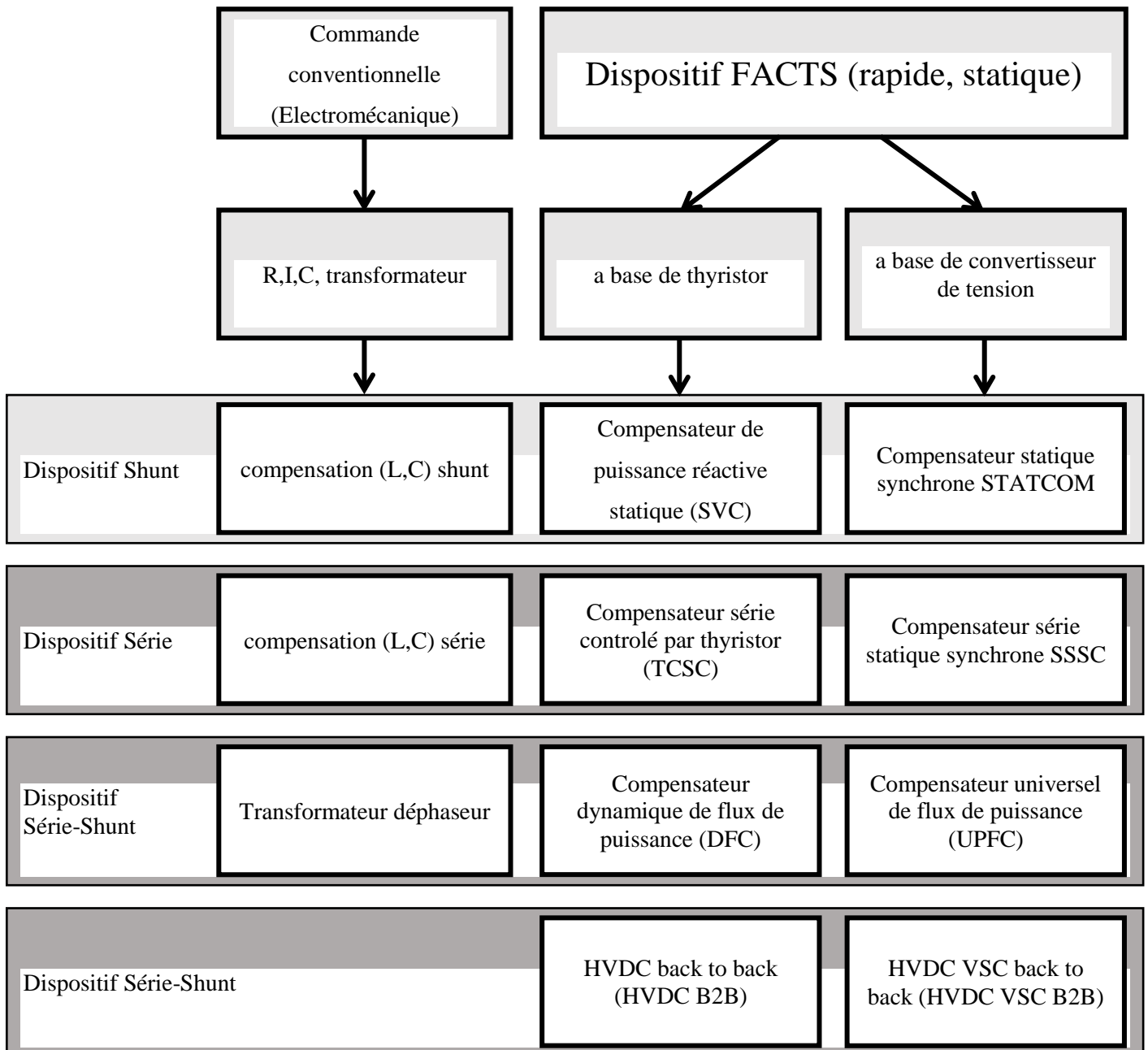


Tableau II-1 Principaux dispositifs des FACTS

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement

contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs. [6]

Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau. En général les FACTS sont devisés en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries** : ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission.

-**Compensateurs shunts** : Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquence contrôler de tension des noeuds.

- **Compensateurs hybrides série-shunt** : c'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. [10]

II.5. Rôle et fonctionnement des dispositifs FACTS :

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tel que le thyristor et le thyristor GTO. Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée ;
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimer, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique. Ils permettent en particulier : [11]

- D'accroître la réserve de stabilité transitoire ;
- D'amortir les oscillations de puissance ;
- De supporter de manière dynamique la tension

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive (courant réactive) sur le réseau. Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximal transmissible.

L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelque MVA à quelques centaines de MVA. Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux :

- **Réseau de transport :** Pour améliorer le contrôle, augmenter la capacité des puissances transmises et assister à la récupération du réseau suite à un défaut.
- **Réseaux Industriels :** Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuations de charge, compensation du FLICKER pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission.

Les tableaux (II 2) (II.3) résument le rôle de chacun de ces dispositifs, ainsi que leur capacité de contribution pour différentes applications dans les réseaux électriques [7]

	Contrôle d'écoulement de puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire	Stabilité dynamique
SVC	*	***	*	**
STATCOM	*	***	**	**
TCSC	**	*	***	**
UPFC	***	***	**	**

Tableau II-2 Différentes des niveaux ascendants de contribution entre les FACTS

	Problème	Action à mener	Solutions conventionnel	Dispositifs FACTS
Limite de la tension	Chut ou sur tension	Fourniture ou absorption de l'énergie réactive	Condensateurs séries et shunts	SVC STATCOM
Limites thermiques	Surcharge de lignes	Réduction de charges	Ajouter de nouvelles lignes	TCSC UPFC SVC
Courants de boucles	Répartition de la puissance transférée	Réajustement de la réactance de ligne	Ajouter de Condensateurs en séries	TCSC UPFC SVC
Niveaux des courts-circuits	Courant de court-circuit très élevé	Limitation de courant de court-circuit	Ajouter de Condensateurs en séries	TCSC UPFC
Résonances subsynchrones	Emballement des générateurs	Atténuation des oscillations	Compensation en série	TCSC

Tableau II-3 Le rôle des différents dispositifs FACTS

II.6. Différents types des dispositifs FACTS :

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés.

- **Génération I** : Basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
- **Génération II** : Dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commander à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'absorber ou d'injecter des courants (tensions) contrôlables dans le réseau.
- **Génération III** : FACTS utilisant des composants hybrides et qui sont adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilisent pas des dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

II.6.1. Compensateurs shunts (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. 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.

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 [12].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

II.6.1.1 Réacteur contrôlé par thyristor (TCR)

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

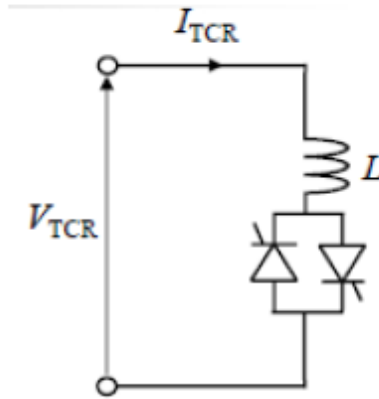


Figure II-7 Représentation du TCR

II.6.1.2 Compensateur statique de puissance réactive (SVC) :

Le SVC (Static Var Compensator) est défini comme un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive, shunt selon IEEE, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds. Le compensateur statique de puissance réactive SVC est le premier dispositif FACTS qui apparaît dans les années 1970 pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles les laminoirs et les fours à arc. Les SVC sont des FACTS de première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage.

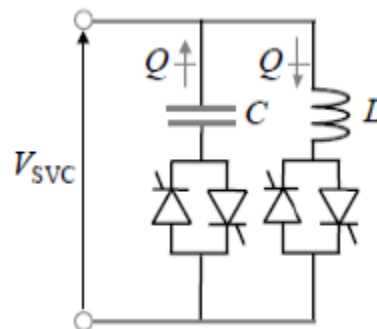


Figure II-8 Représentation du SVC

II.6.1.3 Compensateur statique synchrone (STATCOM) :

IEEE définit le STATCOM (Static Synchronous Compensator) comme un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de la tension du réseau.

Le compensateur statique synchrone STATCOM, autrefois appelé compensateur statique de puissance réactive avancé fait partie de la deuxième génération des FACTS. Il correspond à l'équivalent statique exact de la machine synchrone classique fonctionnant en compensateur, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue de tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance.

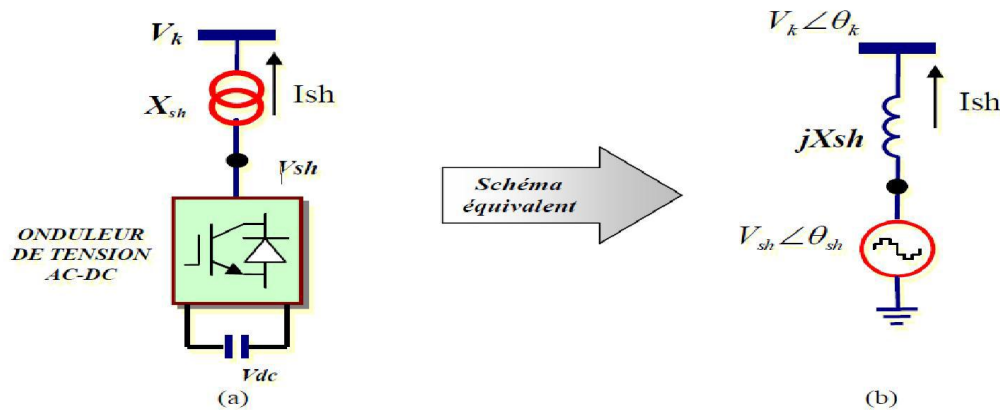


Figure II-9 STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension au jeu de barres (nœud de connexion) est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation (II.1) décrit le transfert de puissance réactive dans le réseau électrique. [6] [17]

Si $|V_k| > |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne positive et le STATCOM absorbe la puissance réactive.

Si $|V_k| < |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne négative et le STATCOM fournit la puissance réactive.

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

II.6.1.4 Avantages du STATCOM :

- Bonne réponse à faible tension : Il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément, l'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique. Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système. Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

II.6.2. Compensateurs Séries :

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif dans les longues lignes. Pour remédier à ce problème, la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne. Les dispositifs FACTS de compensation série sont des évolutions des condensateurs série fixes. Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser la chute de tension inductive.

II.6.2.1 Compensateur série commuté par thyristor (TSSC) :

IEEE définit le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) comme un compensateur capacitif qui se compose de plusieurs condensateurs en série. Chaque condensateur commandé par un commutateur de thyristor qui assure une compensation par palier.

Le Compensateur série commuté par thyristor TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor), est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. Il est constitué de plusieurs capacités montées en série, chacun étant shunté par une valve à thyristors montée en dérivation.

II.6.2.2 Compensateur série commandé par thyristor (TCSC) :

IEEE définit le TCSC comme étant un compensateur à réactance capacitif qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive.

L'ensemble monté en parallèle avec une capacité comme montre la figure (II.10) et connecté en série avec le réseau pour contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance $X_{TCSC}(\alpha)$ qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné par l'équation (II.2). Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80. [18]

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - LC\omega^2} \quad (\text{II.2})$$

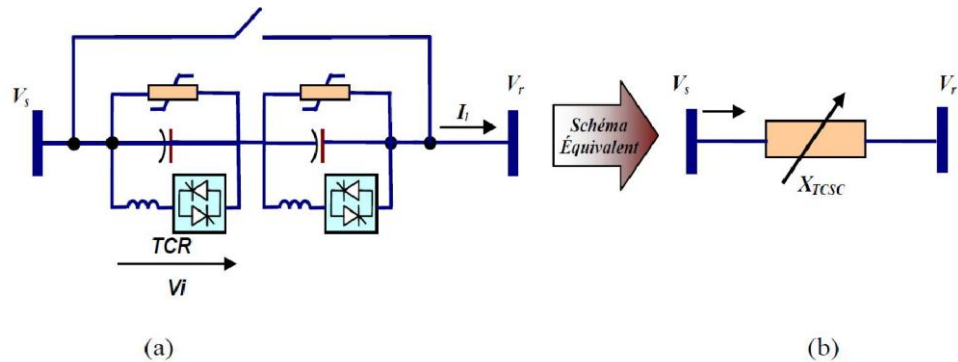


Figure II-10 TCSC, (a) structure de base, (b) Schéma équivalent

II.6.2.3 Compensateur série synchrone (SSSC) :

IEEE définit le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) comme étant un générateur synchrone statique fonctionnant sans source d'énergie électrique extérieure comme les compensateurs série, dont la tension de sortie est contrôlable indépendamment du courant de ligne afin d'augmenter ou de diminuer la chute de tension globale, et ainsi de contrôler la puissance électrique transmise.

Le compensateur série synchrone SSSC est un dispositif FACTS de deuxième génération. Il est formé d'un convertisseur de tension inséré en série dans la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur. Le SSSC agit sur le courant de la ligne en insérant une tension en quadrature avec ce dernier, la tension pouvant être capacitive ou inductive. Un SSSC est capable d'augmenter ou de diminuer le flux de puissance dans une ligne. Le comportement d'un SSSC peut être assimilé à celui d'un condensateur ou d'une inductance série réglable. La différence principale réside dans le fait que la tension injectée n'est pas en relation avec le courant de ligne. De ce fait, le SSSC présente l'avantage de pouvoir maintenir la valeur de tension insérée constante, indépendamment du courant. Il est donc efficace tant pour des petites charges (faibles courants) que pour des grandes charges. Un autre avantage du SSSC réside dans le fait que ce type de compensateur n'insère pas de condensateur en série avec la ligne de transport. De ce fait, il ne peut pas provoquer de résonance hypo synchrone. De plus sa taille est réduite en comparaison au celle du TCSC.

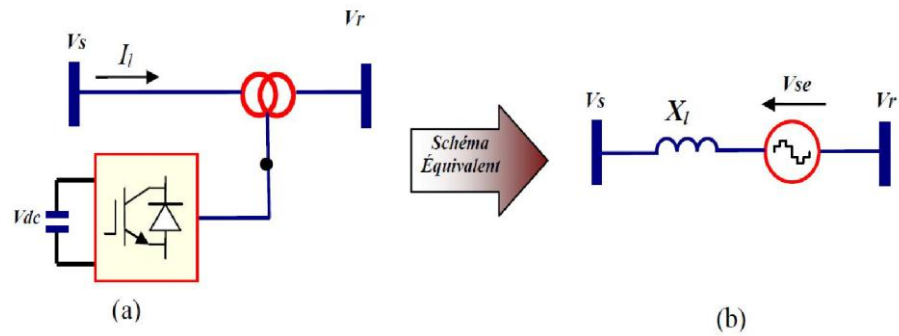


Figure II-11 SSSC, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.

II.6.3. Compensateur série parallèle (hybride) :

Les compensateurs FACTS cités précédemment (série ou parallèle), permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs, il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées.

II.6.3.1 Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC) :

IEEE définit l'UPFC comme étant une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplé via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM. L'UPFC permet le contrôle de la tension, de l'impédance, et de l'angle ou d'écoulement de la puissance active et réactive de la ligne. L'UPFC est capable de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS. Il peut être utilisé particulièrement pour :

- Réglage de la tension ;
- Contrôle de flux de puissance active et réactive ;
- Amélioration de la stabilité ;
- Limitation des courants de court-circuit ;
- Amortissement des oscillations de puissance.

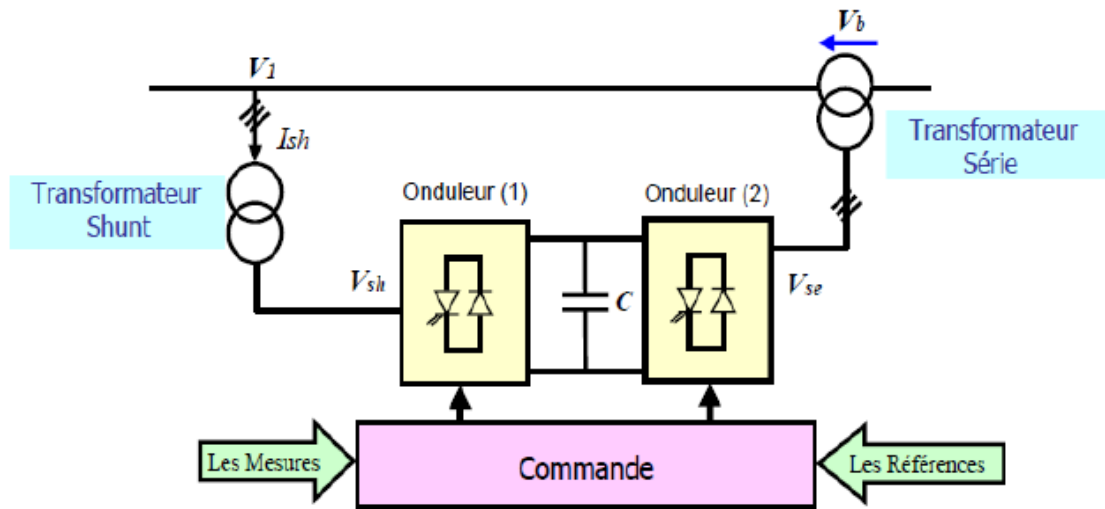


Figure II-12 schéma de base d'un UPFC

II.6.3.2 Transformateur déphaseur commandé par thyristor (TCPST) :

IEEE définit le TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) comme étant un transformateur déphaseur ajusté par thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable. Transformateur déphaseur commandé par **thyristor** TCPST, est le premier équipement FACTS combiné.

II.6.3.3 Régulateur d'angle de phase commandé par thyristor (TCPAR) :

IEEE définit le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator), comme étant un transformateur déphaseur qui permet le contrôle du déphasage entre ses tensions terminales tout en gardant leurs amplitudes invariables.

Le régulateur d'angle de phase commandé par thyristor TCPAR, contrairement au TCPST, est capable de fournir (ou d'absorber) l'énergie réactive au réseau.

II.6.3.4 Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR) :

IEEE définit le TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator) comme étant un transformateur contrôlé par thyristor qui permet la commande de la phase de tension d'une manière continue.

Le régulateur de tension commandé par thyristor TCVR, est un autre membre de la famille des FACTS combinés. Leur prix relativement réduit, leur confère un avantage certain dans le contrôle de l'écoulement d'énergie réactive.



Figure II-13 SVC



Figure II-14 STATCOM



Figure II-15 TCSC

II.7. Conclusion :

La technologie de la compensation par des FACTS s'est avéré une solution fiable et rentable aux problèmes de qualité de l'onde reliés à la puissance réactive et active. Ainsi, de nombreux travaux de recherche publiés dans ce domaine, publiés dans ce domaine.

Les gestionnaires de réseau sont en train 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 de quelques millisecondes.

Dans ce chapitre nous avons présenté les types de compensation shunt, série et hybride appliquées au contrôle des réseaux électriques.

Chapitre III

Modélisation du

STATCOM

III. Chapitre III Modélisation du STATCOM

III.1.Introduction

Un STATCOM, plus récent et plus élaboré, est une source de tension variable contrôlée en amplitude et en phase. Ce dispositif est très différent du point de vue construction, commande, et fonctionnement, mais leur fonction, et leur apport au réseau électrique est sensiblement le même que le dispositif SVC.

Dans ce travail, nous adopterons la convention suivante : l'injection de la puissance réactive au nœud correspond à l'injection de la puissance réactive capacitive alors que l'absorption concerne l'injection de puissance réactive inductive. Aussi, nous parlerons de courant capacitif positif et de courant inductif négatif.

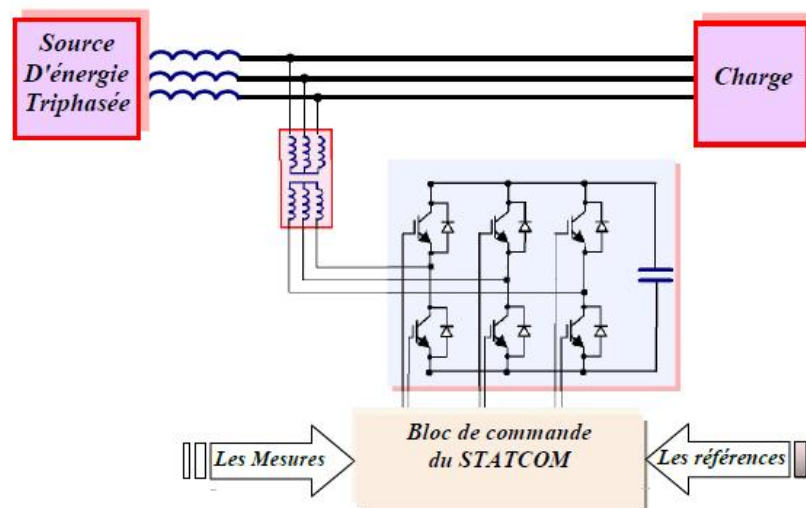


Figure III-1 Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

III.2.Principe de fonctionnement

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés.

Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.

En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne, dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM comme le résume la figure (III.2). [19]

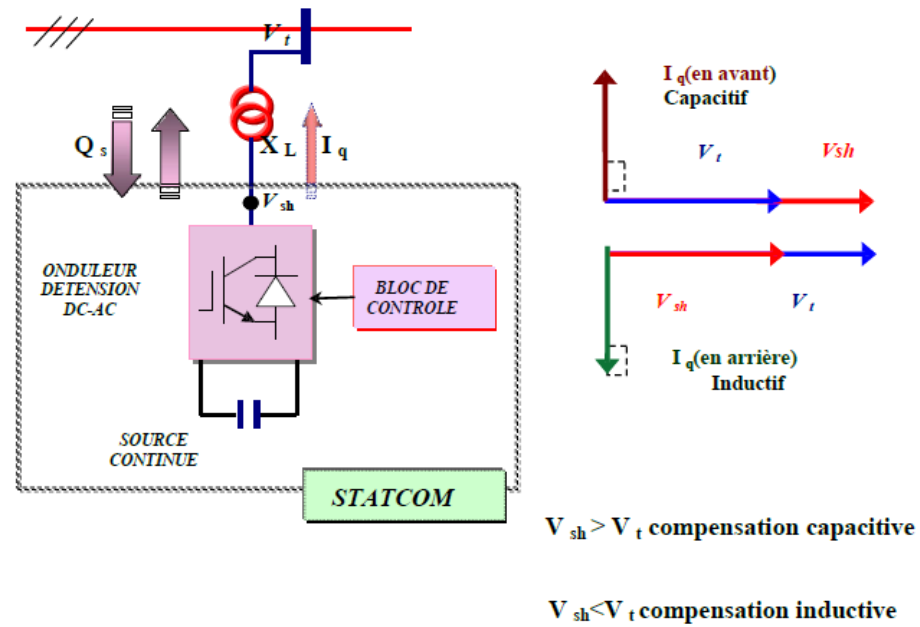


Figure III-2 Commande d'un STATCOM.

Considérant le STATCOM de la figure (III.1), le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source, ligne et charge) est donné par la figure (III.3).

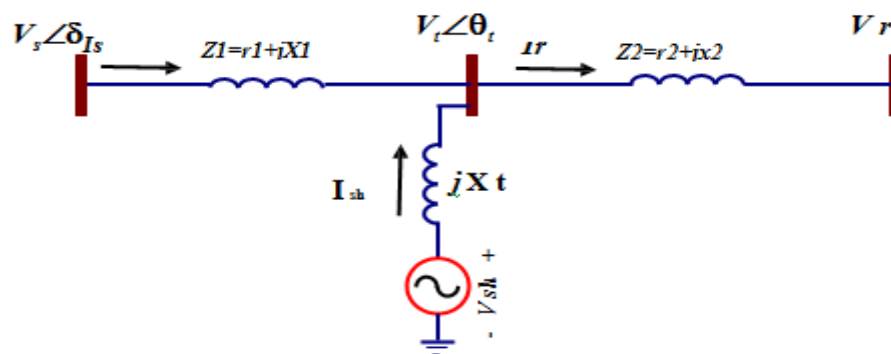


Figure III-3 Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique

Le courant injecté par le STATCOM est donné par :

$$\vec{I}_{sh} = \frac{\vec{V}_{sh} - \vec{V}_t}{jX_t} \tag{III.1}$$

La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par l'équation (III.2).

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{V}_t^2}{-jX_t} \quad (\text{III.2})$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre " t " exprimées par les formules (III.3.a) (III.3.b).

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad (\text{III.3.a})$$

$$Q_{sh} = V_t (V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad (\text{III.3.b})$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau. Donc

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0 \quad (\text{III.4})$$

D'où la condition :

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \Rightarrow \theta_t = \theta_{sh} \quad (\text{III.5})$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement. [19][20]

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constant.

Comme les tensions V_{sh} et V_t sont en phase, le courant I_{sh} du STATCOM en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations (III.6) (III.7).

En admettant que la tension V_{sh} est sur l'axe d (comme référence des phases)

$$V_{shd} = V_{sh} \quad V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (\text{III.6})$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_1} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \tag{III.7}$$

A partir de l'équation (III.1), il parait clair que si le module de la tension du STATCOM V_{sh} égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué

Si $V_{sh} > V_t$, donc $Q_{sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau comme montre la figure (III.4), et si $V_{sh} < V_t$ alors $Q_{sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif, voir figure (III.5). [6]

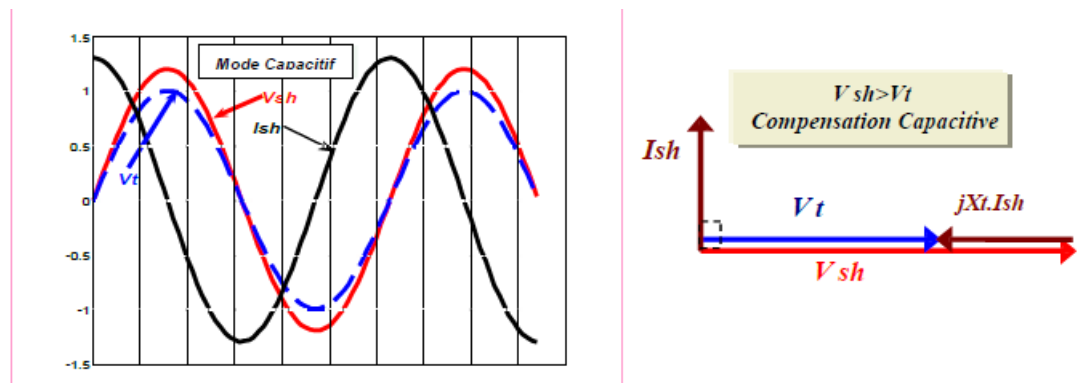


Figure III-4 Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.

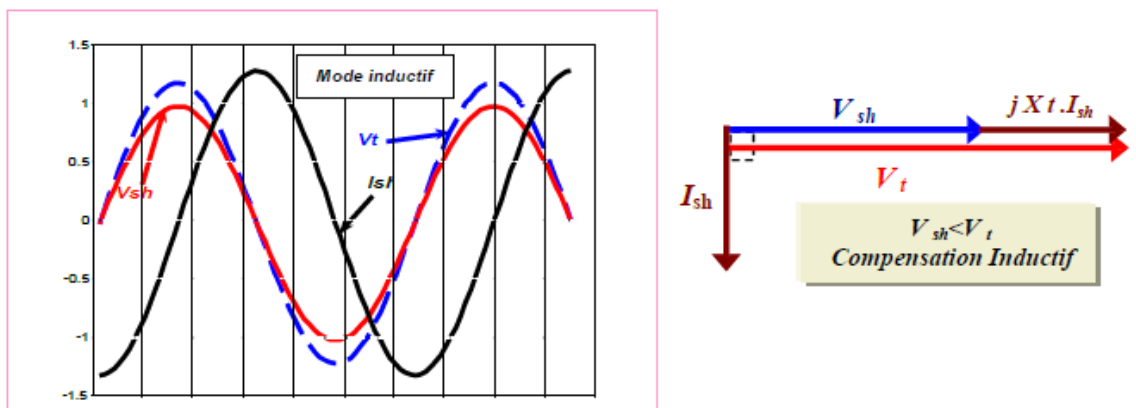


Figure III-5 Courbes simulées courant et tension en mode inductif.

NB: La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif.

III.3.Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique:

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la figure (III.3) qui représente le schéma unifilaire d'un STATCOM couplé au nœud d'un réseau électrique. Les équations des courants I_s , I_{sh} et I_r sont données par les équations (III.8), (III.9) et (III.10) respectivement.

$$\bar{I}_s = \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.8)$$

$$\bar{I}_{sh} = \frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.9)$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t + \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + jX_t) \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.10)$$

Les puissances injectées par la source V_s peuvent être calculée à partir des équations (III.11) et (III.12) : [6]

$$P_s = R_s (\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = R_s \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.11)$$

$$Q_s = Im(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = Im \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.12)$$

En visualisant sur la courbe de la figure (III.6) la variation des puissances actives (P_s) et réactives (Q_s) délivrées par la source pour différentes valeurs de la tension V_{sh} injectée par le STATCOM, on voit que la puissance réactive Q_s diminue (compensée) ce qui explique l'augmentation du réactive injectée par le compensateur shunt dans le réseau. [7][20]

Par exemple, sur la même courbe de la figure (III.6), afin de transmettre une

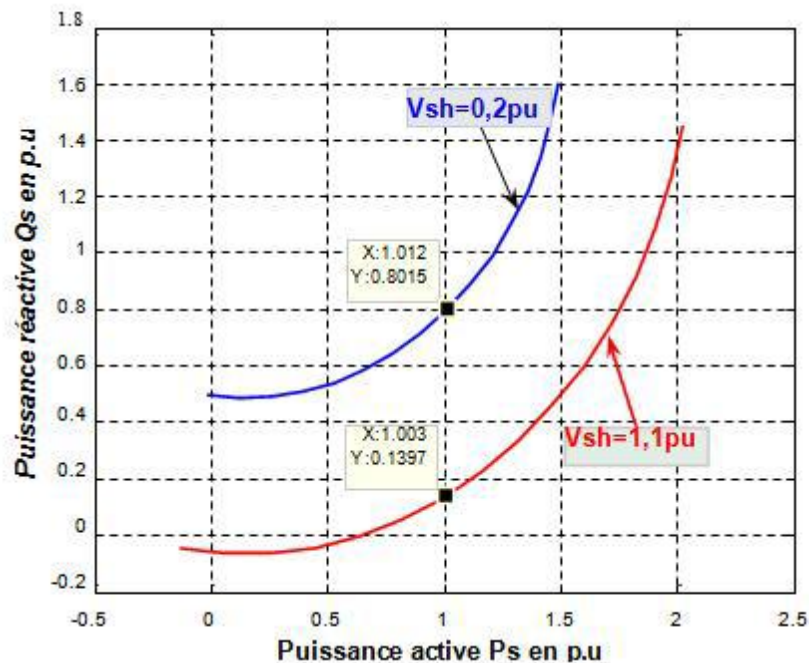
Puissance active P_s égale à 1.0 p.u, la puissance réactive Q_s transmise dans la même ligne doit être égale à 0.8 p.u si la tension à la sortie de l'onduleur V_{sh} est égale à 0.2 p.u.

Par contre Q_s diminue jusqu'à 0.13 p.u si la tension injectée $V_{sh} = 1.1$ p.u pour transmettre la même quantité de la puissance active P_s .

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations (III.13) et (III.14) sont présentées sur la figure (III.6).

(P_s, Q_s) : Puissances active et réactive en p.u produite par la source ;

(P_{sh}, Q_{sh}) : Puissances active et réactive en p.u générées par le dispositif STATCOM.



FigureIII-6 Q_s en fonction de P_s pour différentes valeurs de V_{sh}

$$P_{sh} = R_e \left(\overline{V}_{sh} \cdot \overline{I}_{sh}^* \right) = R_s \left[\overline{V}_{sh} \times \left(\frac{-\overline{Z}_2 \cdot \overline{V}_s \cdot (\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2) \cdot \overline{V}_{sh} - \overline{Z}_1 \cdot \overline{V}_r}{\overline{Z}_1 \cdot \overline{Z}_2 + jX_t (\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.13)$$

$$Q_{sh} = Im \left(\overline{V}_{sh} \cdot \overline{I}_{sh}^* \right) = Im \left[\overline{V}_{sh} \times \left(\frac{-\overline{Z}_2 \cdot \overline{V}_s \cdot (\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2) \cdot \overline{V}_{sh} - \overline{Z}_1 \cdot \overline{V}_r}{\overline{Z}_1 \cdot \overline{Z}_2 + jX_t (\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.14)$$

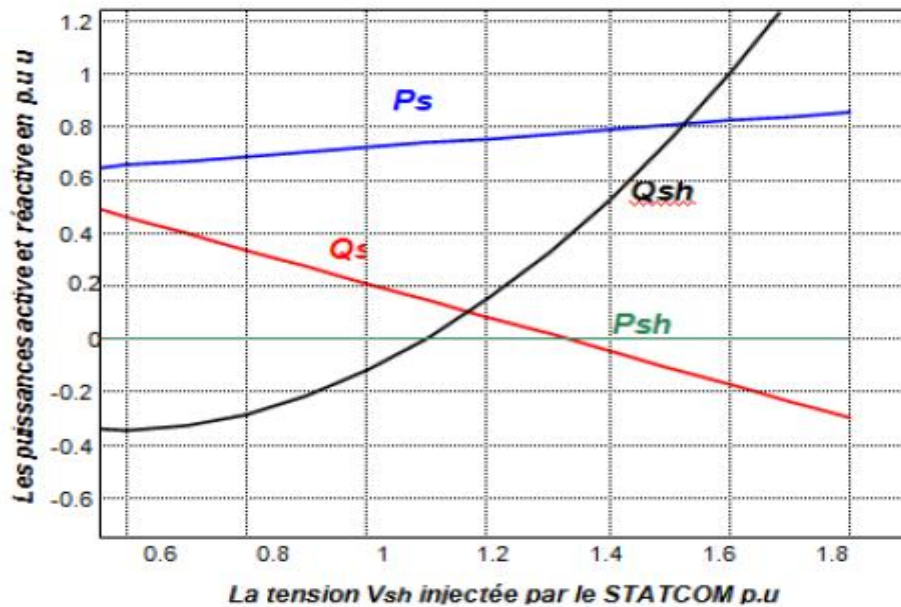


Figure III-7 P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}

Sur les caractéristiques de la figure (III.7) qui représentent la variation des puissances active et réactive P_s et Q_s transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive injectées par le STATCOM P_{sh} et Q_{sh} , en fonction des variations de l'amplitude de la tension V_{sh} il paraît clair que l'influence de cette tension sur la puissance réactive Q_s est plus grande que sur la puissance active P_s . Et on voit qu'en augmentant la tension V_{sh} la puissance réactive injectée par le STATCOM augmente, et par conséquent la puissance réactive injectée au réseau par le générateur diminue.

Nous pouvons constater aussi que la capacité de transit de la puissance active est améliorée. Celle-ci était occupée par la puissance réactive. [7][19]

Donc, pour améliorer le transfert de puissance à travers des lignes importantes, il faut disposer de compensateur shunt installé de façon appropriée. Cependant, généralement les compensateurs shunts ne sont pas utilisés pour cette fonction qui est plutôt mieux satisfaite par les compensateurs série qui produisent le même résultat pour un coût meilleur.

III.4. Modélisation du STATCOM

III.4.1. Modèle Mathématique Simplifié :

Le STATCOM comme il était déjà décrit précédemment, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure (III.1) en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecté ce dispositif :

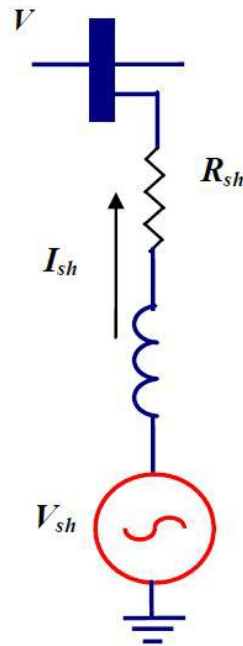


Figure III-8 Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau

Pour le modèle simplifié du STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif est donc une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance L_{sh} figure (III.8) à travers un transformateur de couplage. Le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur. [21] [22]

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on a :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (\text{III.15})$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe (α, β) en multipliant l'équation (III.15) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha,\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, en multipliant tous les grandeurs par le phaseur $e^{-j\gamma}$ avec $d_\gamma/d_t = \omega$, la pulsation des grandeurs en question voir la figure (III.9).

Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad (\text{III.18})$$

Et inversement

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} \quad (\text{III.19})$$

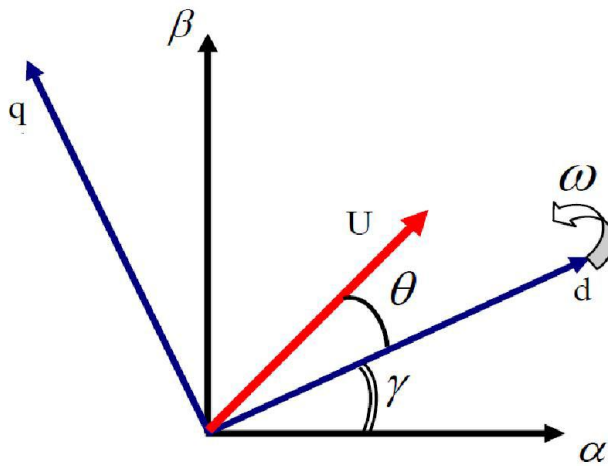


Figure III-9 Passage du repère (α , β) vers le repère (d, q)

En appliquant cette écriture sur l'équation (III.15) on aura :

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} = R_{sh} \bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \frac{d}{dt} (\bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}) \quad (\text{III.20})$$

Après simplification de calcul on aboutit aux équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d, q) suivante :

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (\text{III.21})$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (\text{III.22})$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande du système.

III.4.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petits échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC.

Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite, le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu. [21] [23]

Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continu donner par la figure (III.10) [22] [24]. On suppose que :

$$V_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + j V_{shq} = v \cos \theta + j v \sin \theta \quad (\text{III.24})$$

v : étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et peut être exprimé par:

$$v = m \times U_{dc} \quad (\text{III.25})$$

m : l'indice de modulation, il ne dépend que du type de l'onduleur.

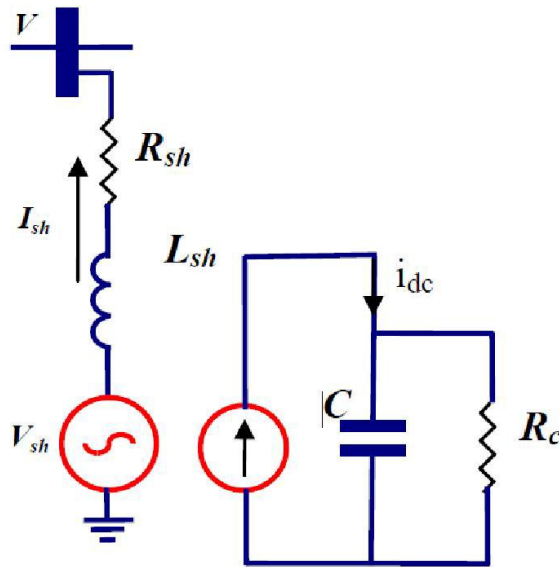


Figure III-10 Schéma équivalent du STATCOM avec Circuit DC

En substituant les équations (III.24) et (III.25) dans les équations (III.21) et (III.22) on abouti aux équations :

$$V_d - m U_{dc} \cos \theta = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (III.26)$$

$$V_q - m U_{dc} \sin \theta = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (III.27)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (III.28) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (III.29):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (III.28)$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (III.29)$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif " I_c " et le courant résistif " I_{rc} " dans la branche de la résistance R_{dc} .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (III.30)$$

De ces équations (III.24), (III.25), (III.29) et (III.30) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos \theta - I_{shq} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (\text{III.31})$$

Les équations (III.26) (III.27) (III.31) forme le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2C} \cos \theta & -\frac{3m}{2C} \sin \theta & -\frac{1}{R_{dc} C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment. Ce système qu'on doit le ramener linéaire autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante [21] [22] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2C} \cos \theta & -\frac{3m}{2C} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_{dc} C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ \frac{2m}{3C} (I_{shd} \sin \theta + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

Le courant réactif est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue U_{dc} constante. [21] [25]

III.5. Contrôle du STATCOM

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquent maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant I^*_{sh} qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants (I^*_{shd}, I^*_{shq}) sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.

III.5.1. Détermination des Références:

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q^*_{shq} calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active $P^*_{sh} \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur. [7] [26]

Ces puissances qui sont les images des courants (I_{shd}^* , I_{shq}^*) active et réactive qu'on détermine depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au Synchronisme (d , q) :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{shd}^* \\ Q_{shq}^* \end{bmatrix} \tag{III.34}$$

Où les tensions V_d et V_q sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure (III.11).

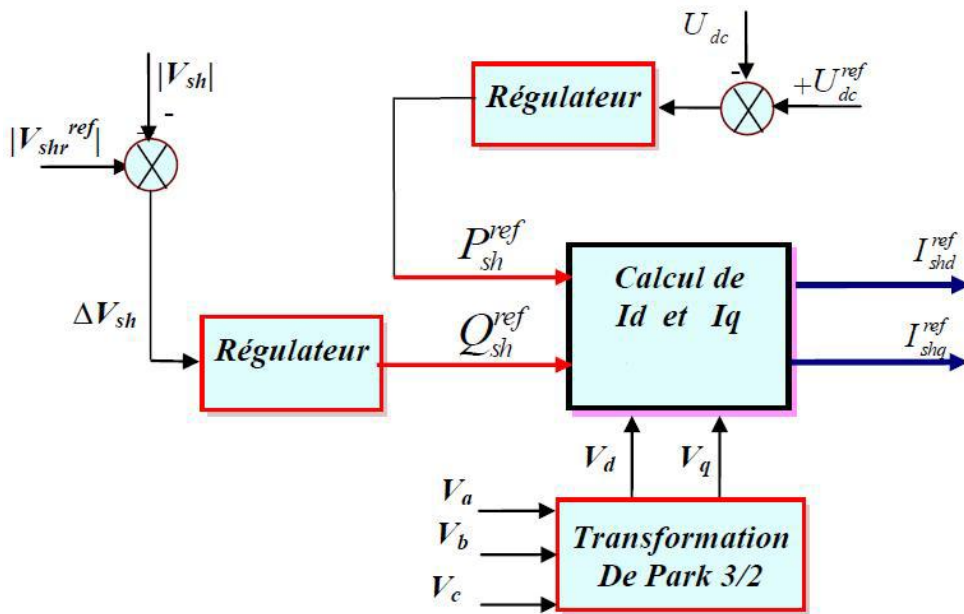


Figure III-11 Identification des Courants de Référence.

III.5.2. Méthode Watt-Var découplée :

Considérant le modelé simplifié représenté par le système d'équation (III.23) précédent :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix}$$

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \tag{III.35}$$

Avec ;

$$X_1 = \frac{1}{L_{sh}}(V_d - V_{shd}) \quad \text{et} \quad X_2 = \frac{1}{L_{sh}}(V_q - V_{shq})$$

sont les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système (III.23) on aura :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}}I_{shd} + \omega \cdot I_{shq} + X_1 \quad (\text{III.36})$$

En appliquant la transformation de Laplace sur cette équation on obtient :

$$\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right)I_{shd} = \omega \cdot I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad (\text{III.37})$$

D'où on arrive au transfert I_{shd} en fonction de \tilde{X}_1 suivant :

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (\text{III.38})$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = \omega \cdot I_{shq} + X_1$, on doit ajouter donc le terme $\omega \cdot I_{shq}$ pour retrouver \tilde{X}_1 à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure (III.12) suivante:

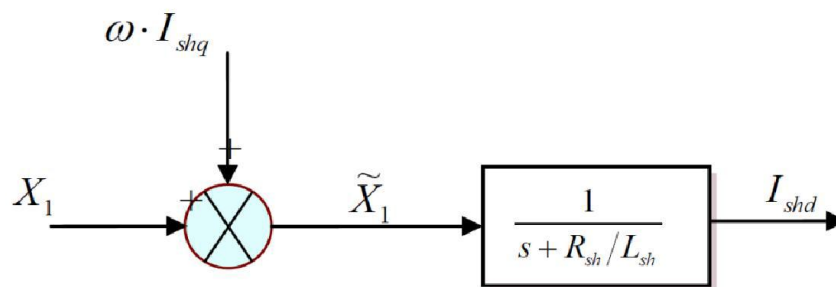


Figure III-12 Transfert du I_{shd} en fonction de X_1 .

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert I_{shq} en fonction de \tilde{X}_2 qui suit:

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \tag{III.39}$$

Avec ;

$$\tilde{X}_2 = \omega I_{shd} + X_2$$

Le schéma suivant résume ce transfert :

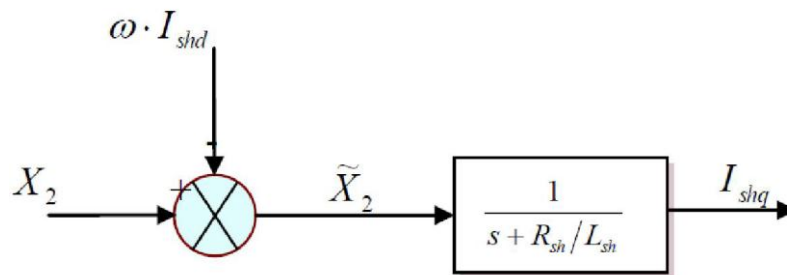


Figure III-13 Transfert Ishq en fonction de X2.

De ce qu'on vient de voir on constate qu'il y a un couplage naturel dans les transferts des Courants I_{shd} et I_{shq} . Pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et les faire suivre leurs consignes I_{shd}^* et I_{shq}^* comme le représente le schéma bloc de la figure (III.14).

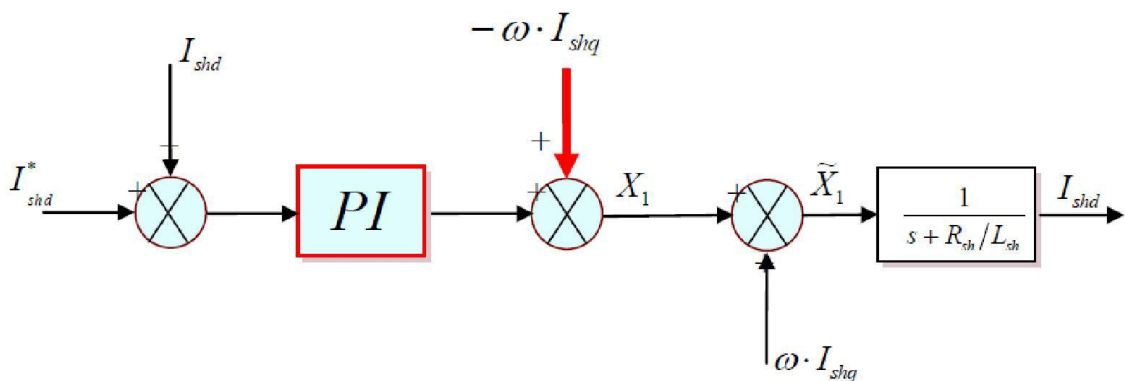


Figure III-14 Régulation et découplage de Ishd

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante $\omega \cdot I_{shd}$ et finalement arrivé au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la figure (III.15).

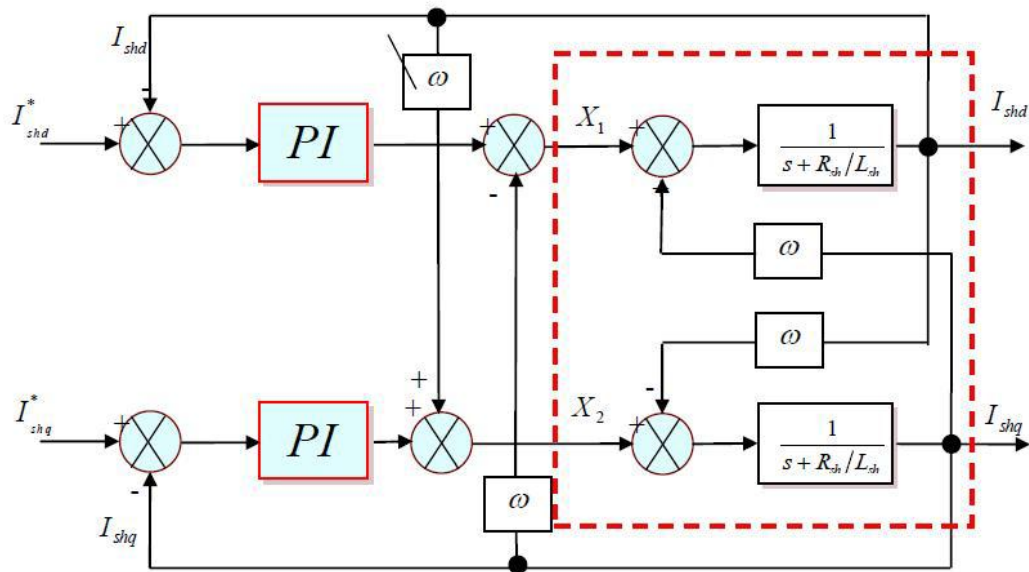


Figure III-15 Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplée).

III.5.3. Régulateur PI avec compensation de pôles:

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure (III.16) :

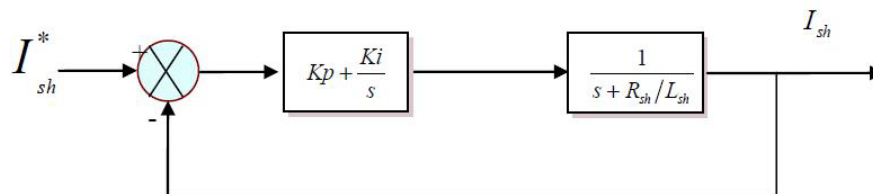


Figure III-16 Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM.

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte FTBO est:

$$G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \tag{III.40}$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \tag{III.41}$$

Et $G(s)$ devient:

$$G(s) = K_p (1/s)$$

T_{BO} : Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} = \frac{1}{T_{BF}(s)+1} \quad (\text{III.42})$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p}$$

Avec T_{BF} est la constante de temps de la régulation en boucle fermée.

En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (III.41) (III.42) les gains du contrôleur PI.

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BF} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{et} \quad K_i = K_p \times \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (\text{III.43})$$

III.5.4. Régulation de la tension continue Udc:

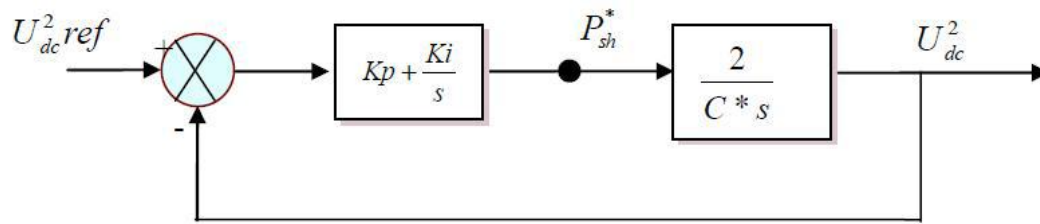
La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation (III.44). [7] [22] [26]

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 \cdot P_{sh}}{C} \quad (\text{III.44})$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C \cdot s} \quad (\text{III.45})$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique.



FigureIII-17 Régulation de la tension continue U_{dc} .

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est :

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc\ ref}^2} = \frac{\frac{2 \cdot K_p}{C} s + \frac{2 \cdot K_i}{C}}{s^2 + \frac{2 \cdot K_p}{C} s + \frac{2 \cdot K_p}{C}} \quad (\text{III.46})$$

Avec

$$\omega_n^2 = \frac{2 \cdot K_i}{C},$$

$$\xi = K_p \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot C \cdot K_i}} \quad (\text{III.47})$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons

Choisi $\xi = 0.7$. Et à fin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va

Choisir $\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot 300}{10}$ rad/sec et finalement on détermine à partir des équations (III.47) les valeurs des gains K_p et K_i .

III.6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de STATCOM dans certaines fonctions pour contrôler et réguler la tension par la compensation de l'énergie réactive.

Les résultats de la simulation de fonctionnement de STATCOM coupler dans un réseau électrique seront traités en détail dans le chapitre IV.

Chapitre IV

SIMULATION

IV. Chapitre IV SIMULATION

IV.1.Introduction :

Les charges électriques à la fois consomment et produisent de la puissance réactive. L'énergie transportée variant considérablement d'une heure à l'autre, l'équilibre de la puissance réactive dans un réseau varie également. Le résultat peut être des variations inacceptables de l'amplitude de la tension ou une chute de tension.

Un compensateur statique de puissance réactive (STATCOM) peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique.

L'installation d'un compensateur statique de puissance réactive en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique de puissance réactive peut atténuer les oscillations de puissance réactive par modulation des amplitudes de tension.

Dans ce chapitre, nous présentons une simulation qui a été réalisée sous l'environnement du logiciel NEPLAN, nous mettrons en évidence l'influence du compensateur statique de l'énergie réactive (STATCOM) sur le comportement du réseau à étudier : Réseau **Est Algérien (400KV)**

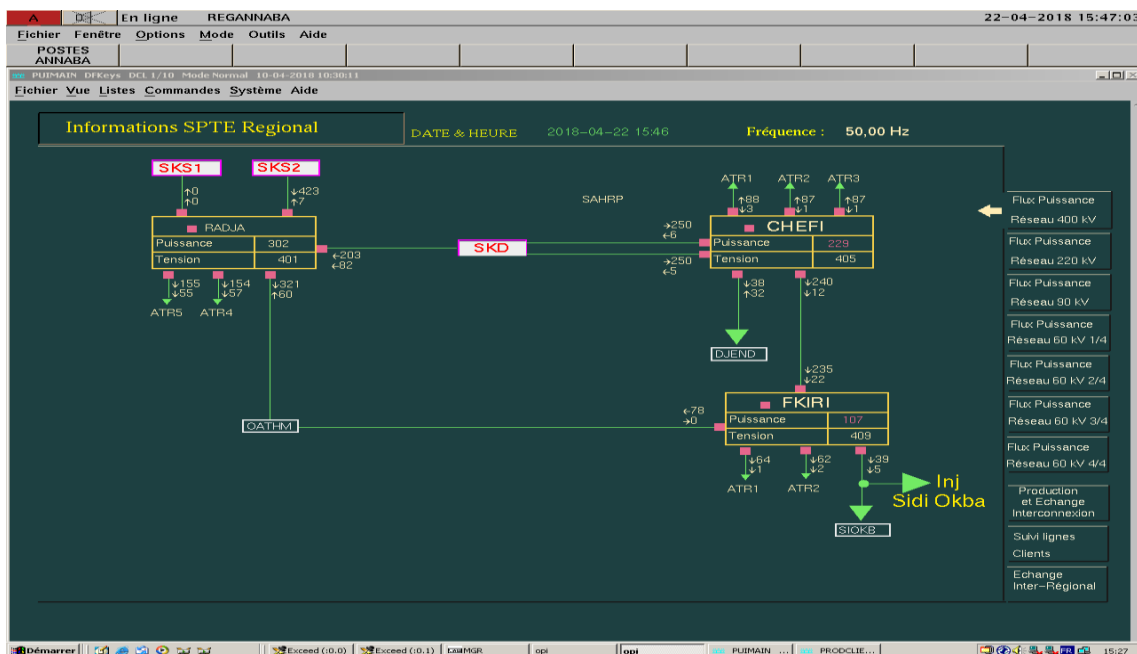


Figure IV-1 Réseau 400 kV Annaba (10/04/2018 à 10h 30mn)

IV.2. Structure du réseau simulé:

Une application sur le réseau de l'Est algérien qui se compose de 03 générateurs (SKS1, SKS2, SKD) et 04 nœuds.

Dans un premier temps, nous présentons les résultats des tensions dans chaque nœud, avec les charges actuelles, ensuite nous présenterons les résultats des tensions dans chaque nœud après une estimation d'une croissance de la demande de la charge dans les dix années à suivre suivant le plan de développement 2017-2027, sans et avec insertion du dispositif STATCOM dans le réseau.

IV.3. Données du réseau de l'Est algérien (400KV):

Ce réseau est constitué de 04 nœuds, parmi eux 03 générateurs (aux jeux de barres RADJA, CHEFI). La tension de base pour chaque jeu de barres est de 400 kV.

Les valeurs planifiées des tensions, des puissances générées et consommées ainsi Les caractéristiques du réseau sont représentées dans les tableaux (IV.1), (IV.2).

Nom du Nœud	Type	U (kV)	P charge (MW)	Q charge (MVar)
SKD	SL	400	-	-
SKS 1	PQ	0	-	-
SKS 2	PQ	400	-	7
CHEFI	PQ	400	300	32
RADJA	PQ	400	315,6	112
FKIRI	PQ	400	167	22
OATHM	PQ	400	111,68	-
220Kv	PQ	220	259,088	125,798

Tableau IV-1 Données des nœuds du réseau actuel

Résistance (Ω /km)	Réactance (h/km)	Susceptance	Type de conducteur	Observations
0,03188	0,00101741	1,0134E-08	AA Alim	Toutes les lignes sont identiques

Tableau IV-2 Données des Branches du réseau

Le schéma du réseau simulé sous le Logiciel Neplan est donné sur la figure suivante

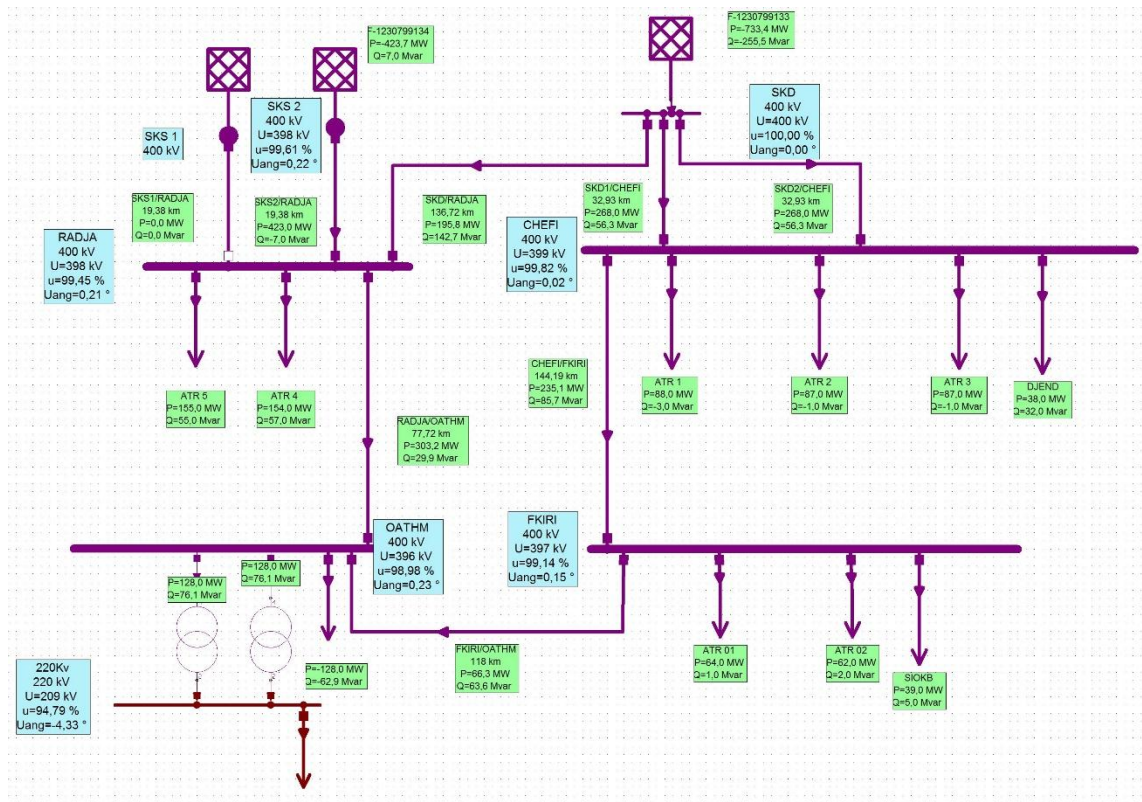


Figure IV-2 Réseau: des charges actuelles

IV.3.1. Résultats et interprétations :

Après l’application de la simulation sur notre réseau on a abouti aux résultats suivants :

Nom du nœud	U kV	U %	Angle U °	P charges MW	Q charges MVar	P gén MW	Q gén MVar
SKD	400	100	0	-	-	733,427	255,459
SKS 1	0	0	0	-	-	-	-
SKS 2	398,459	99,61	0,2	0	7	423,7	-
CHEFI	399,292	99,82	0	300	32	0	5
RADJA	397,802	99,45	0,2	315,6	112	0	6,2
FKIRI	396,555	99,14	0,1	167	22	0	0
OATHM	395,908	98,98	0,2	111,68	0	0	58,779
220Kv	208,543	94,79	-4,3	256,088	125,798	0	0

Tableau IV-3 Résultats des tensions et des puissances par nœud

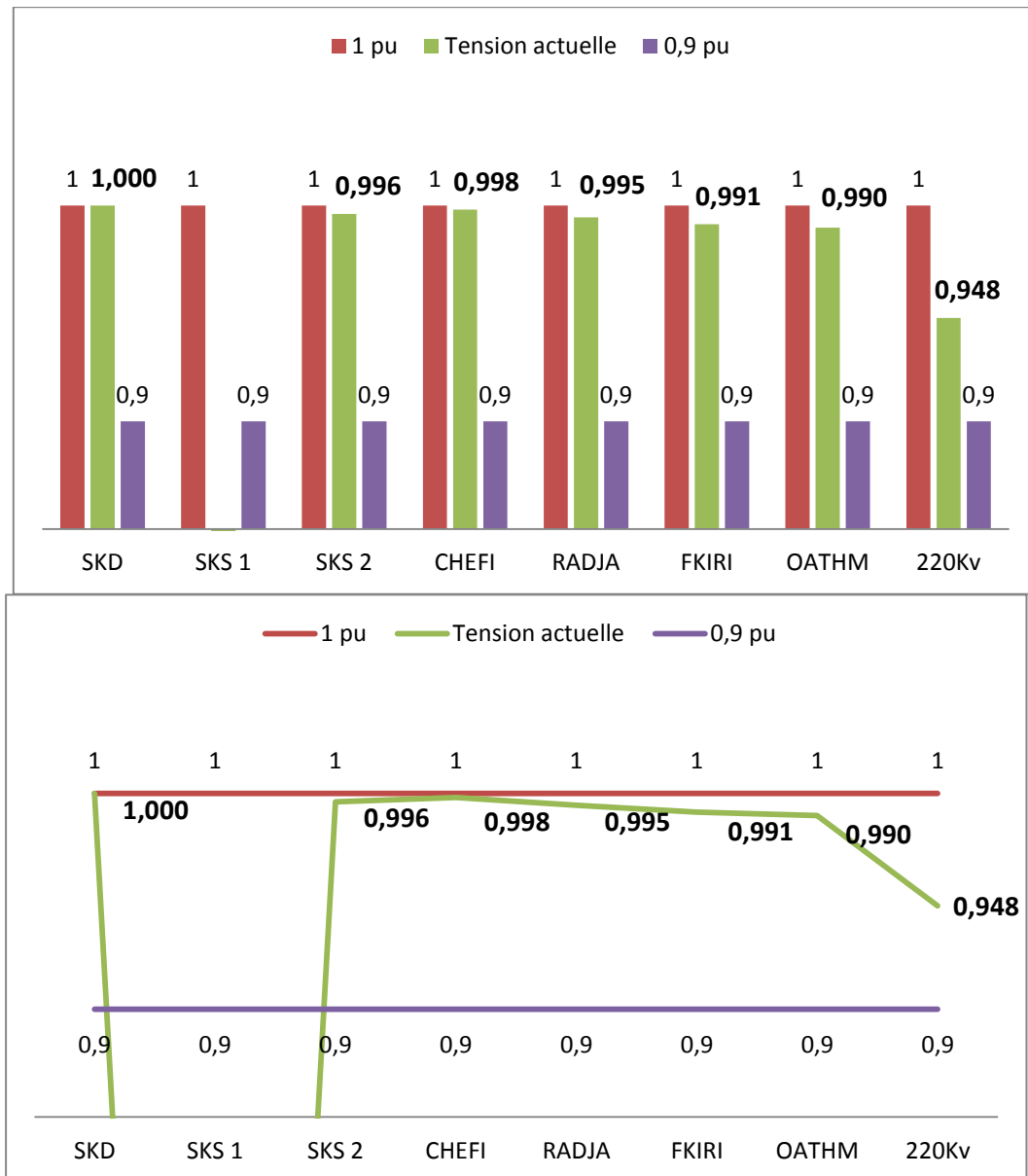


Figure IV-3 Résultats des tensions par nœud actuelle

U kV	P gén MW	Q gén MVar	P charges MW	Q charges MVar
Réseau 400Kv	1187,127	248,459	1150,368	221,819

Tableau IV-4 Résultat des puissances totales

Un	P perte ligne	Q perte ligne	P perte transformateur	Q perte transformateur
kV	MW	MVar	MW	MVar
400	6,759	0,216	0	26,424

Tableau IV-5 Résultat des pertes

On remarque que dans tous les nœuds types PQ l'amplitude des tensions est autour de 1 pu, avec une chute de tension acceptable.

IV.4. Données des nœuds du réseau du plan 2017-2027 sans STATCOM

Suivant le planning de développement défini par le groupe SONELGAZ qui s'étale sur deux plan quinquennaux 2017-2021 et 2022-2027 dont l'objectif est d'assurer une bonne stabilité du réseau après l'augmentation des charges prévues dont les valeurs planifiées des tensions et puissances sont présentées dans le tableau IV.6

Nom du nœud	Type	U (kV)	P charge (MW)	Q charge (MVar)
CHEFI	PQ	400	631	67
RADJA	PQ	400	655,6	234
FKIRI	PQ	400	349	30
OATHM	PQ	400	239,729	0
220Kv	PQ	220	456,57	266,332
Total charge			2331,899	627,332

Tableau IV-6 Données des nœuds du réseau plan 2017-2027 sans STATCOM

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{IV.1})$$

$$S = \sqrt{2331,899^2 + 627,332^2} \quad (\text{IV.2})$$

$$S = 2414,81 \text{ MVA}$$

$$\text{SKD} = 1200 \text{ MVA}$$

$$\text{SKS1} = 400 \text{ MVA}$$

$$\text{SKS2} = 400 \text{ MVA}$$

$$S > (\text{SKD} + \text{SKS1} + \text{SKS2})$$

D'où la nécessité de prévoir une augmentation de la capacité de production.

Le schéma du réseau simulé sous le Logiciel Neplan est donné sur la figure IV.3 :

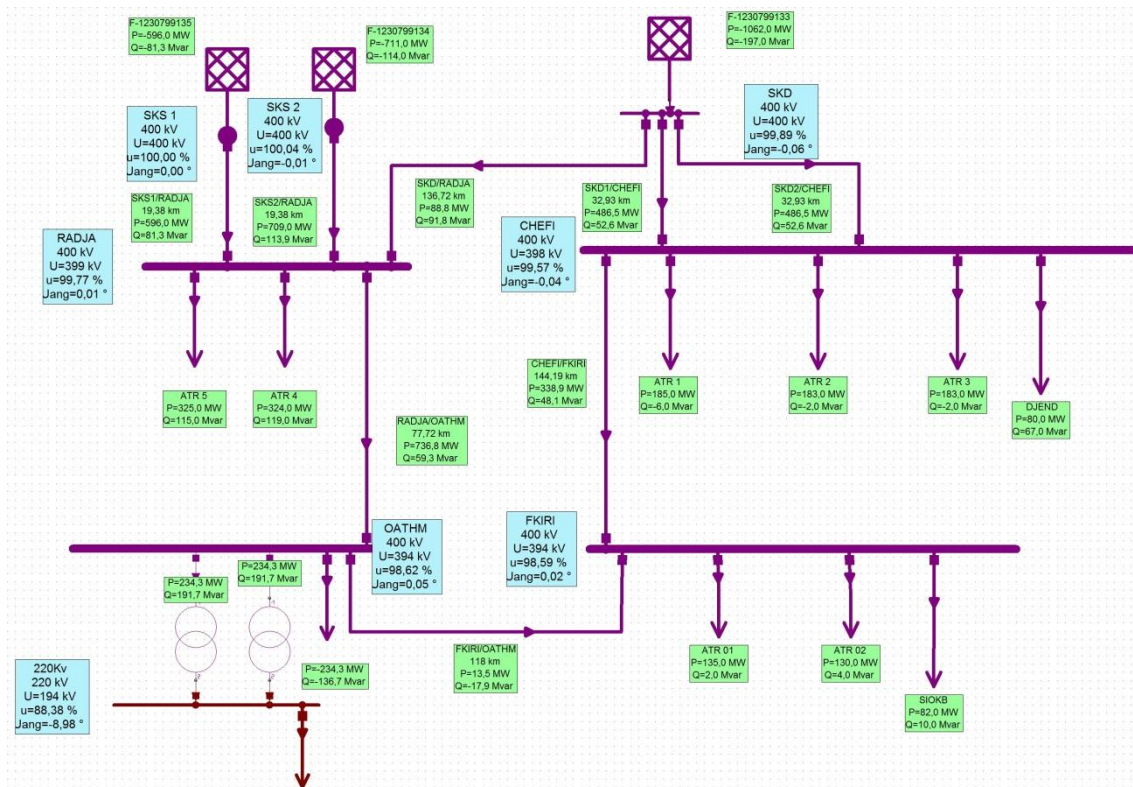


Figure IV-4 Réseau des charges plan 2017-2027

IV.4.1. Résultats et interprétations :

Après l'application de la simulation sur notre réseau on a abouti aux résultats suivants :

Nom du nœud	U kV	U %	Angle U °	P charges MW	Q charges MVar	P gén MW	Q gén MVar
SKD	399,576	99,89	-0,1	-	-	1062	197
SKS 2	400,179	100,04	0	-	-	711	114
SKS 1	400	100	0	-	-	596,014	81,324
CHEFI	398,294	99,57	0	631	67	-	10
FKIRI	394,366	98,59	0	349	30	-	-
RADJA	399,075	99,77	0	655,6	234	-	6,2
OATHM	394,489	98,62	0	246,077	-	-	306,38
220Kv	194,436	88,38	-9	468,66	273,385	-	-

Tableau IV-7 Résultats des tensions et des puissances par nœud



Figure IV-5 Résultats des tensions par nœud plan 2017-2027 sans STATCOM

	P gén	Q gén	P charge	Q charge
Région/Zone	MW	MVar	MW	MVar
Réseau	2369,014	392,324	2350,337	281,805

Tableau IV-8 Résultat des puissances totales

Un	P perte ligne	Q perte ligne	P perte transformateur	Q perte transformateur
kV	MW	MVar	MW	MVar
400	18,676	0,596	0	109,924

Tableau IV-9 Résultat des pertes

Surcharges Nœuds (inférieure)	%
220Kv	88,38

Tableau IV-10 Résultat des Surcharges

Après tous ces résultats on remarque que dans tous les nœuds types PQ l'amplitude des tensions est autour de 1 pu, avec une chute de tension acceptable sauf pour le nœud OATHM.

IV.5. Données des nœuds du réseau plan 2017-2027 avec STATCOM

Pour stabiliser la tension dans le nœud OATHM au jeu de barre 220KV qui a subi une considérable chute de tension on a opter pour l'emplacement du STATCOM à ce nœud et le schéma du réseau simulé sous le Logiciel Neplan est donné sur la figure IV.4 :

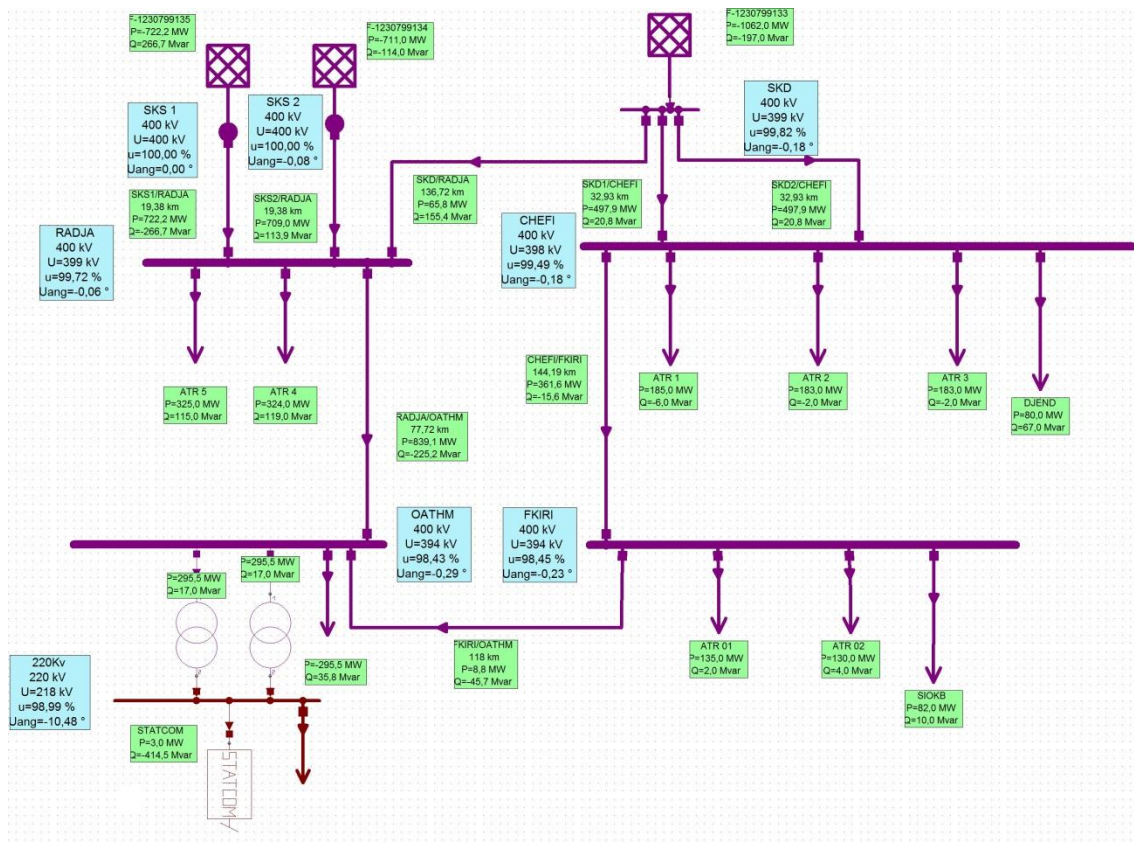


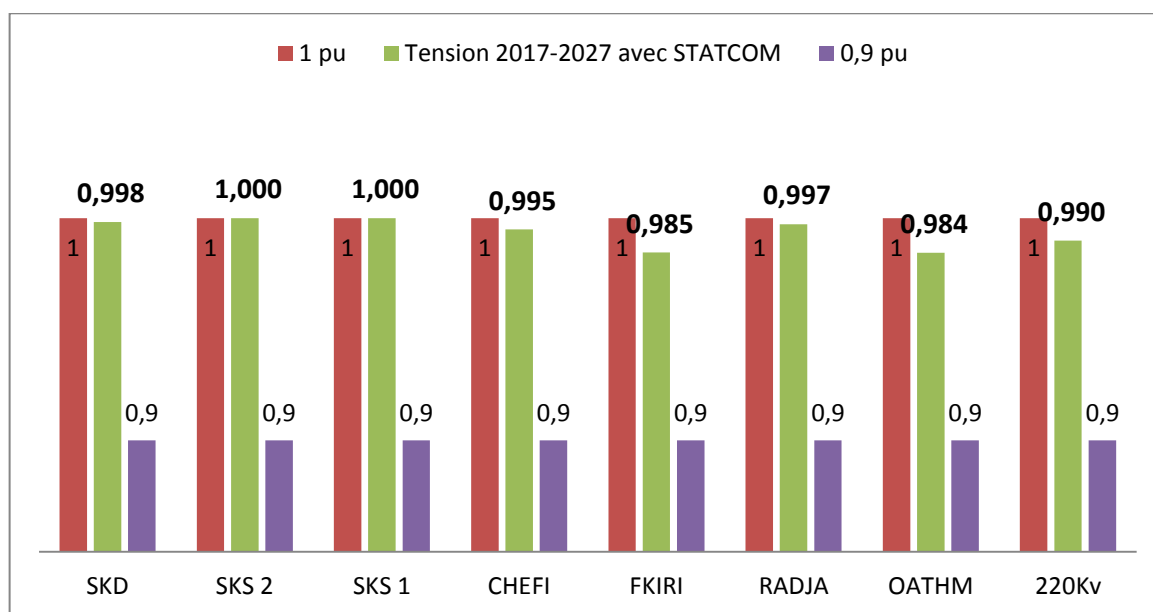
Figure IV-6 Réseau des charges plan 2017-2027 avec STATCOM

IV.5.1. Résultats et interprétations :

Après l'application de la simulation sur notre réseau on a abouti aux résultats suivants :

Nom du nœud	U kV	U %	Angle U °	P charges MW	Q charges MVar	P gén MW	Q gén MVar	Shunt Q MVar
SKD	399,285	99,82	-0,2	0	-	1062	197	-
SKS 2	400,002	100	-0,1	0	-	711	114	-
SKS 1	400	100	0	0	266,73	722,225	-	-
CHEFI	397,974	99,49	-0,2	631	67	-	10	-
FKIRI	393,803	98,45	-0,2	349	30	-	-	-
RADJA	398,898	99,72	-0,1	655,6	234	-	6,2	-
OATHM	393,734	98,43	-0,3	245,135	-	-	305,208	-
220Kv	217,776	98,99	-10,5	587,93	342,959	-	-	-414,497

Tableau IV-11 Résultats des tensions et des puissances par nœud



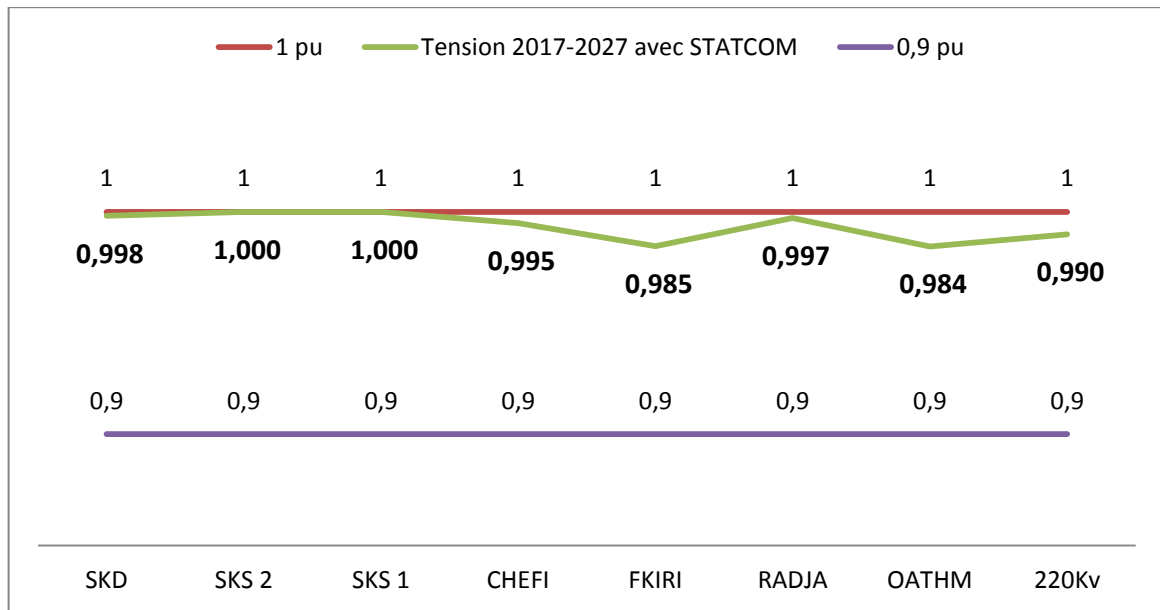


Figure IV-7 Résultats des tensions par nœud plan 2017-2027 avec STATCOM

	P gén	Q gén	P charge	Q charge	Qc shunt
Région/Zone	MW	MVar	MW	MVar	MVar
Réseau 400 Kv	2495,225	44,27	2468,666	0	352,551

Tableau IV-12 Résultat des puissances totales

U	P perte ligne	Q perte ligne	P perte transformateur	Q perte transformateur
kV	MW	MVar	MW	MVar
400	23,559	0,752	0	105,464

Tableau IV-13 Résultat des pertes

Après tous ces résultats on remarque que dans tous les nœuds types PQ l'amplitude des tensions est autour de 1 pu, avec une chute de tension acceptable même dans le nœud OATHM au jeu de barre 220KV qui a subi une considérable amélioration de tension après l'emplacement du STATCOM.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION

Conclusion générale

La Croissance d'appel de charge constatée sur le réseau de SONELGAZ est de 8% par année, les systèmes de transmission en courant alternatif sont considérés comme non- flexibles. L'écoulement de puissances et le niveau de tension ne peuvent pas être contrôlés le long de leurs chemins désirés.

Dans le réseau actuel nous avons constaté une très faible surcharge du réseau 400 kV ce qui laisse l'utilisation du système de régulation actuel suffisant pour exploiter le réseau SPTE national.

Dans le plan de développement du réseau THT et HT SONELGAZ a prévu pour la période du 2017 au 2027, une augmentation de charge sur le réseau 400 kV qui peut arriver jusqu'à 119% de la charge actuelle, les moyens classiques de contrôle des réseaux (Transformateur à prises réglables en charge, compensateurs statiques série ou parallèle commutés par des disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau ou schémas spéciaux et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, c'est pour cela que la SONELGAZ a opté dans l'avenir de compléter son action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux, spécialement lorsque on apprend de source officielle de SONELGAZ qu'un nouveau système de téléconduite du réseau SPTE (SCADA) est en cours d'étude.

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour SONELGAZ pour une exploitation plus efficace de son réseau par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre le transit vers les limites thermiques des lignes.

Après la réhabilitation de ses équipements postes HT et THT, la numérisation du son système de protection et d'asservissement, la mise à niveau de son système de reprise suite à une situation de crise ou d'incident important, la révision de son système de sauvegarde ou plan de défense, SONELGAZ étale ses horizons de développement vers un SMART GRID par l'étude d'une compensation statique (Les FACTS et les Synchro Coupleurs), comme celle présentée dans ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

bibliographie

- [01] www.energy.gov.dz
- [02] www.Sonelgaz.dz
- [03] Chiffres clés Sonelgaz 2016
- [04] Operateur du système électrique Région Annaba
- [05] GRTE région Annaba
- [06] Abdelaàli Alibi, “Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systemes)”, Mémoire de Magister Soutenu au département d’électrotechnique Université de Batna, 2009.
- [07] Eskandar Gholipour Shahraki, “Apport de l’UPFC à l’amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ”, thèse de doctorat Université Henri Poincaré, Nancy-I octobre 2003.
- [08] Daiboun Sahel Salah Sabry, “Renforcement de la stabilité transitoire par l’utilisation des FACTS (UPFC) ”, Mémoire de Magister Soutenu au département d’électrotechnique Université de Skikda, 2005.
- [09] H. Azzi et K. Alyène, “Analyse de stabilité d’un réseau électrique contenant un contrôleur universel (UPFC) ”, PFE ingénieur d’état soutenu en juin 2005.
- [10] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, “Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control”, Springer 2005.
- [11] Rabah Benabid, “Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques”, Mémoire de Magister Soutenu au département d’électrotechnique Université de Jijel 2007.
- [12] Delendi Louardi, “Contrôle de l’écoulement de puissance active par système FACTS”, Mémoire de Magister Soutenu au département d’électrotechnique Université de Batna 2009.
- [13] M.Karim Sebaa, “Commande intelligente pour l’amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d’énergie électrique ”, thèse de doctorat en Electrotechnique Université des Sciences & des Technologies Houari Boumediene , USTHB, 2008.
- [14] Bousahla Djamel, “ Utilisation de la compensation série avancée dans les réseaux électriques”, PFE ingénieur d’état soutenu à l’université de Sidi Bel Abbes 2008.

-
- [15] Charle hantouche, "Condensateur de puissance", Technique d'ingénieur D 4710.
- [16] Théodor Wildi, "Électrotechnique 4^{ème} édition", Chapitre 46, Transport de l'énergie électrique.
- [17] BELGUIDOUM Hocine, "Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandés" mémoire de magistère université Setif ,2012
- [18] Nabil MANCER, (Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)) mémoire de magistère ; université de biskra 2013.
- [19] :NOROUZI Amir. , (" Flexible AC Transmission Systems: Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC", mémoire de magister université de New Brunswick, 2003.)
- [20] XIA Jiang, "Operating Modes and Their Regulations of Voltage-sourced Converters Based FACTS Controllers", thèse de Doctorat de L'institut Polytechnique Troy New York, mars 2007.
- [21] I. Papiê, "Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part1: mathematical models", electric power systems research, Elsevier science 56 (2000) 139-148.
- [22] VORAPHONPIPUT Nitus et CHATRATANA Somchai, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.
- [23] Pranesh Rao, M.L.Crow, "STATCOM control for power system voltage control application", IEEE Transaction on power system, vol 15,no 4, October 2000.
- [24] Kalyan K. Sen, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Application", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998
- [25] ALLAOUI Tayeb, "réglage robuste de L'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissance dans un réseau électrique", mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran – 04/2002.
- [26] Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Jian Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller", publication IEEE 2005.