

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN TIARET FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES



DÉPARTEMENT DE GÉNIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Spécialité : Électrotechnique

Option : Réseaux Électriques

THÈME

**Contribution d'un FACTS à la stabilisation d'une
station de transfert d'énergie.**

Préparé par :

ROUTAL Abdelkader Anis

Encadré par :

BELHACEL Kheira

Devant le Jury composé de :

Nom et prénoms

Grade

Qualité

CHALAAL.M

MAA

Président

BEKKI.I

MAA

Examinateur

BEDOUI.M

MCB

Examinatrice

BELHCEL.K

MAA

Encadrante

2021 / 2022

Remerciements

Je remercie ALLAH tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser notre mémoire.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements À madame Belhacel kheira d'avoir accepté de mon encadré dans ce travail.

Mon remerciement s'adresse A monsieur ALLAOUI Tayeb et madame SEDDIKI.Z pour ses aides pratique et ses soutiens moraux- et ses encouragements.

Je remercie également, tous les membres du jury de bien vouloir juger ce Travail.

Ainsi que tous nos enseignants du Département Génie électrique. On n'exclut pas de ces remerciements, la promotion 2022 de Génie Électrique.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de nos longues années d'études.

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :

Ma très chère grand-mère

Ma très chère mère.

Mon cher père

À mes très chers frères

À mes chères sœurs

Toute ma famille

À tous mes camarades de groupe

À tous mes amis que j'ai connus dans ma vie

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction général.....1

Chapitre I : Généralités sur les réseaux de transport d'énergie électrique.

I. Introduction..... 4

I.1. Le réseau de transport d'énergie électrique 4

I.2. Description des réseaux électriques 5

I.2.1. Le réseau de transport THT..... 5

I.2.2. Le réseau de répartition HT 5

I.2.3. Le réseau de distribution MT..... 5

I.2.4. Le réseau de livraison basse tension BT 5

I.2.4.1. Le réseau BT permet de distribuer aux consommateurs 6

I.3. L'évolution du réseau électrique 6

I.4. Les tensions normalisées selon la CEI..... 7

I.5. Classification des lignes 9

I.5.1. Ligne courte 9

I.5.2. Ligne moyenne 10

I.5.3. Ligne longue..... 10

I.6. Les lignes aériennes 11

I.7. Les lignes souterraines 12

I.8. Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains 12

I.9. Conclusion..... 12

Chapitre II: Profils de la tension sur le réseau et techniques d'amélioration de la stabilité.

II. Introduction 14

II.1. La puissance réactive dans les circuits électriques 14

II.2. Qualité d'énergie 14

II.3. Types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de la tension 15

II.3.1. Classification des différents types de perturbations 15

II.4. Solutions pour améliorer la QEE 16

II.5. Définition de la stabilité des réseaux 17

II.6. Classification de la stabilité des réseaux électrique 17

SOMMAIRE

<i>II.6.1. Stabilité de l'angle du rotor (angulaire)</i>	18
<i>II.6.1.1. Stabilité statique</i>	18
<i>II.6.1.2. Stabilité dynamique</i>	18
<i>II.6.1.3. Stabilité transitoire</i>	19
<i>II.6.1.3.1. Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire</i>	19
<i>II.6.2. Stabilité de fréquence</i>	20
<i>II.6.3. Stabilité de tension</i>	20
<i>II.6.3.1. . Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations</i>	20
<i>II.6.3.2. Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations</i>	20
<i>II.6.3.3. Instabilité de la tension:</i>	21
<i>II.7. Les méthodes d'amélioration de la stabilité</i>	21
<i>II.8. Moyens d'amélioration de la stabilité</i>	22
<i>II.8.1. Compensation</i>	22
<i>II.8.1.1. Compensateurs synchrones</i>	22
<i>II.8.1.2. Batteries de condensateurs</i>	22
<i>II.8.1.2.1. Batteries de condensateurs HT</i>	22
<i>II.8.1.2.2. Batteries de condensateurs MT</i>	22
<i>II.8.1.3. Les inductances</i>	22
<i>II.8.1.4. Les PSS (Power System Stabiliser)</i>	22
<i>II.8.1.4.1. Les régulateurs de tension (AVR)</i>	23
<i>II.8.2. Les dispositifs FACTS</i>	23
<i>II.8.2.1. Classification des dispositifs FACTS</i>	23
<i>II.8.2.1.1. Classification selon la génération</i>	23
<i>II.8.2.1.2. Classification selon la catégorie</i>	24
<i>II.8.2.2. Compensateurs parallèles</i>	24
<i>II.8.2.2.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors</i>	24
<i>II.8.2.2.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors</i>	26
<i>II.8.2.3. Compensateurs séries</i>	28
<i>II.8.2.3.1. Compensateur série contrôlé par thyristor</i>	28
<i>II.8.2.3.2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors</i>	29
<i>II.8.2.4. Compensateurs hybrides série - parallèle</i>	30
<i>II.8.2.4.1. Compensateurs hybrides à base de thyristors</i>	30
<i>II.8.2.4.2. Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors</i>	31
<i>II.8.3. Principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS</i>	34
<i>II.9. Conclusion</i>	34

Chapitre III: Modélisation du réseau.

<i>III. Introduction</i>	36
<i>III.1. Modélisation des éléments d'un réseau électrique</i>	36
<i>III.1.1. Equation mécanique</i>	36

SOMMAIRE

<i>III.1.2. Modèles de la ligne, du transformateur et de la charge</i>	37
<i>III.1.2.1. Ligne</i>	38
<i>III.1.2.2. Transformateur</i>	38
<i>III.1.2.3. Charge</i>	39
<i>III.2. Modélisation du SVC</i>	39
<i>III.2.1. Modélisation du SVC par une admittance shunt</i>	39
<i>III.2.2. SVC installé dans un nœud du réseau</i>	40
<i>III.3. Modélisation du STATCOM</i>	41
<i>III.3.1. Modèle Mathématique Simplifié:</i>	41
<i>III.4. Conclusion</i>	42

Chapitre IV: Simulation et résultats.

<i>IV. Introduction</i>	44
<i>IV.1. Description du système étudié</i>	44
<i>IV.2. Les résultats Compensations classiques (PSS / AVR)</i>	46
<i>IV.2.1. Premier cas réseau sain</i>	46
<i>IV.2.1.1. Réseau sans régulation classique AVR et PSS</i>	46
<i>IV.2.1.2. Réseau avec régulateur de tension AVR:</i>	47
<i>IV.2.1.3. Réseau avec AVR et PSS</i>	48
<i>IV.2.1.4. Deuxième cas réseau avec défaut</i>	49
<i>IV.2.1.5. Réseau avec régulation classique AVR et PSS</i>	49
<i>IV.3. Les résultats Les dispositifs FACTS</i>	51
<i>IV.3.1. Réseau avec défaut</i>	51
<i>IV.3.1.1. Réseau avec SVC</i>	51
<i>IV.3.1.2. Réseau avec STATCOM</i>	52
<i>IV.4. CONCLUSION</i>	53
<i>Conclusion général</i>	54

Bibliographie

Liste des figures

Chapitre I

FIGURE.I-1: SCHEMA D'UN RESEAU ELECTRIQUE.	6
FIGURE.I-2: ARCHITECTURE VERTICALE DU RESEAU.	6
FIGURE.I-3: ARCHITECTURE HORIZONTALE DU RESEAU.....	7
FIGURE.I-4: NIVEAUX DE TENSION NORMALISES.	8
FIGURE.I-6: ORGANISATION DES DIFFERENTS NIVEAUX DE TENSION DU SYSTEME ELECTRIQUE.	9
FIGURE.I-7: CIRCUIT EQUIVALENT MONOPHASE D'UNE LIGNE COURTE.	10
FIGURE.I-8: CIRCUIT EQUIVALENT MONOFILAIRE D'UNE LIGNE DE LONGUEUR MOYENNE.	10
FIGURE.I-9: CIRCUIT EQUIVALENT EN Π D'UNE LIGNE LONGUE.....	11
FIGURE.I-10: LES LIGNES AERIENNES.	11

Chapitre II

FIGURE.II-1: PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES.	16
FIGURE.II-2: CLASSIFICATION DE LA STABILITE DE RESEAU ELECTRIQUE.	18
FIGURE.II-3: TRACE DE L'ANGLE ROTORIQUE EN FONCTION DU TEMPS.	19
FIGURE.II-4: LES METHODES D'AMELIORATION DE LA STABILITE.....	21
FIGURE.II-5: SCHEMA FONCTIONNEL DE SYSTEME DE STABILISATION DE PUISSANCE PSS TYPE IEEE.	23
FIGURE.II-6: SCHEMA FONCTIONNEL DE LA REGULATION DE TENSION AVR TYPE IEEE.....	23
FIGURE.II-7: CARACTERISTIQUE D'UN SVC.	25
FIGURE.II-8: SCHEMA DU SVC ET TCBR.....	26
FIGURE.II-9: SCHEMA DE BASE DU « STATCOM ».	27
FIGURE.II-10: (A); (B) ; (C) : DIAGRAMMES VECTORIELS DU « STATCOM ».	27
FIGURE.II-11: CARACTERISTIQUE V-I (A) ET V-Q (B) D'UN « STATCOM ».	28
FIGURE.II-12: UNE PHASE D'UNE LIGNE TRIPHASEE AVEC COMPENSATION SERIE TCSC.....	28
FIGURE.II-13: STRUCTURE DU TSSC.....	29
FIGURE.II-14: SCHEMA DE PRINCIPE DU TCSR.....	29
FIGURE.II-15: SCHEMA DE BASE DU SSSC.	30
FIGURE.II-16: CARACTERISTIQUE STATIQUE DU SSSC.....	30
FIGURE.II-17: SCHEMA DU TCPAR.....	31
FIGURE.II-18: SCHEMA DE BASE DE L'IPFC.	31
FIGURE.II-19: SCHEMA DE BASE DE L'UPFC.....	32
FIGURE.II-20: L'INFLUENCE DE DIFFERENTS SYSTEMES FACTS SUR LA PUISSANCE ACTIVE....	33
FIGURE.II-21: CLASSIFICATION DES DISPOSITIFS FACTS.....	33

Chapitre III

FIGURE.III-1: REPRESENTATION DES COUPLES MECANIQUE ET ELECTRIQUE.	37
FIGURE.III-2: SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE LIGNE.....	38
FIGURE.III-3: MODELE DU TRANSFORMATEUR.....	38
FIGURE.III-4: MODELISATION DU SVC.	40
FIGURE.III-5: SVC PLACE DANS UN NŒUD.	41
FIGURE.III-6: SCHEMA EQUIVALENT D'UN STATCOM CONNECTE AU RESEAU.	41

Chapitre IV

LISTE DES FIGURES

FIGURE.IV-1: SCHEMA BLOC DE RESEAU SELECTIONNE.	44
FIGURE.IV-2: SCHEMA BLOC DE RESEAU SELECTIONNE AVEC SVC.....	45
FIGURE.IV-3: SCHEMA BLOC DE RESEAU SELECTIONNE AVEC STATCOM.	45
FIGURE.IV-4: LES COURBES DE LA PUISSANCE ACTIVE AVEC LA TENSION.....	46
FIGURE.IV-5: LES COURBES DE L'ANGLE, PUISSANCE, TENSION ET VITESSE DES MACHINES. ...	46
FIGURE.IV-6: LES COURBES DE LA PUISSANCE ACTIVE AVEC LA TENSION.....	47
FIGURE.IV-7: LES COURBES DE L'ANGLE, PUISSANCE, TENSION ET VITESSE DES MACHINES. ...	47
FIGURE.IV-8: LES COURBES DE LA PUISSANCE ACTIVE AVEC LA TENSION.....	48
FIGURE.IV-9: LES COURBES DE L'ANGLE, PUISSANCE, TENSION ET VITESSE DES MACHINES. ...	48
FIGURE.IV-10: LES COURBES DE LA PUISSANCE ACTIVE AVEC LA TENSION.....	49
FIGURE.IV-11: LES COURBES DE L'ANGLE, PUISSANCE, TENSION ET VITESSE DES MACHINES. .	49
FIGURE.IV-12: LES COURBES DE LA PUISSANCE ACTIVE AVEC LA TENSION.....	51
FIGURE.IV-13: LES COURBES DE L'ANGLE, PUISSANCE, TENSION ET VITESSE DES MACHINES. .	51
FIGURE.IV-14: LES COURBES DE LA PUISSANCE ACTIVE AVEC LA TENSION.....	52
FIGURE.IV-15: LES COURBES DE L'ANGLE, PUISSANCE, TENSION ET VITESSE DES MACHINES. .	52

Liste des tableaux

Chapitre I

TABLEAU I - 1 :LES DIFFERENTS PALIERS DE NORMALISATION.....	7
TABLEAU I - 2 : CLASSIFICATION DES TENSIONS EN ALGERIE ET EN EUROPE.	8
TABLEAU I - 3 : COMPARAISON ENTRE LIGNES AERIENNES ET CABLES SOUTERRAINS.....	12

Chapitre II

TABLEAU II - 1 :BENEFICES TECHNIQUES DES DISPOSITIFS FACTS.....	34
--	----

Liste des abréviations

FACTS	<i>Système de transmission CA flexible</i>
IEEE	<i>Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens</i>
QEE	<i>Qualité d'énergie électrique</i>
SEE	<i>Systèmes Electro Energétiques</i>
DC	<i>Courant continu</i>
AC	<i>Courant alternatif</i>
THT	<i>Très Haute Tension</i>
HT	<i>Haute tension</i>
MT	<i>Moyenne tension</i>
BT	<i>Basse Tension</i>
GTO	<i>Gateturn-Off Thyristor</i>
IGBT	<i>Transistor bipolaire à grille insulaire</i>
MLI	<i>Modulation de largeur d'impulsion</i>
ST	<i>Stabilité Transitoire</i>
AVR	<i>Régulateur de tension automatique</i>
PSS	<i>Stabilisateur de systèmes d'alimentation</i>
STATCOM	<i>Compensateur synchrone statique</i>
STATCON	<i>Condenseur Statique</i>
SVC	<i>Compensateur Var statique</i>
SVG	<i>Générateur de Var statique</i>
ASVC	<i>Compensateur Var statique avancé</i>
TCR	<i>Réacteurs contrôlés par thyristor</i>
TSC	<i>Condensateurs commutés à thyristors</i>
TCBR	<i>Résistance de rupture de commande de thyristor</i>
TCSC	<i>Condensateur série contrôlé par thyristor</i>
TSSC	<i>Condensateur à thyristors série commutée</i>
TCSR	<i>Inductance série contrôlée par thyristor</i>
TSSR	<i>Inductance série commutée à thyristors</i>
SSSC	<i>Compensateur série synchrone statique</i>
TCPAR	<i>Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor</i>
IPFC	<i>Contrôleur de flux de puissance interligne</i>
UPFC	<i>Contrôleur de flux de puissance unifié</i>
PCC	<i>Point de couplage commun</i>

Introduction générale

L'évolution rapide industrielle et démographique sans cesse croissante entraîne une augmentation rapide de la demande d'électricité. De ce fait, les réseaux électriques sont appelés à satisfaire cette demande en fonctionnant proches de leurs limites de sécurité. Dans cette situation ; le contrôle de la tension et du transit de la puissance devient très complexe, en plus des risques d'occurrence d'effondrement total du réseau. Comme c'était le cas en Algérie le 03 février 2003.

Pour faire face à ce phénomène néfaste, le régulateur de tension AVR et les stabilisateurs de puissance PSS (Power System Stabilizers) implantés depuis les années 60, ne peuvent assurer seuls l'amortissement de ces oscillations. Des nouveaux dispositifs appelés FACTS (Flexible AC Transmission Systems), sont placés dans le réseau, qui ont bénéficié de l'évolution de la technologie de l'électronique de puissance. Ces dispositifs sont insérés dans un réseau électrique pour satisfaire plusieurs besoins, tels que la répartition des puissances, la compensation de la puissance réactive, et le renforcement de la stabilité des réseaux électriques. Le but de ce travail est d'améliorer la stabilité transitoire d'une station de transfert d'énergie en assurant un amortissement des oscillations et le réglage de la tension à un niveau admissible. Pour atteindre cet objectif, nous proposons une coordination de réglage optimal d'un dispositif FACTS shunt. Ceci permet d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations rotoriques et de garantir la stabilité transitoire du système.

Le sujet de ce mémoire basé sur les moyens d'amélioration de la stabilité transitoire d'un réseau de transport d'énergie électrique à travers l'insertion d'un des dispositifs FACTS tel que, le SVC (Static Var Compensator) et STATCOM (STATic COMPensator) ; ce mémoire est organisé en quatre chapitres: Après l'introduction générale, Dans le premier chapitre, nous avons décrit brièvement les réseaux de transport d'énergie électrique et nous avons exposé le domaine de la tension et leur catégorie. Nous avons présenté également les classifications des lignes. Dans le deuxième chapitre, nous avons défini le réseau électrique, la qualité d'énergie et les types de perturbations. On retrouve dans ce chapitre un état de l'art sur la stabilité en différents régimes de fonctionnement ainsi les différentes perturbations (légères et grandes) qui ont gêné leur fonctionnement et une présentation générale du concept FACTS. Le troisième chapitre, est consacré à la modélisation des différents éléments constituant le réseau.

Le quatrième chapitre est focalisé sur l'étude de l'impact de deux dispositifs FACTS de type shunts sur un réseau de test ; il s'agira du SVC et du STATCOM. La simulation des dif-

Introduction générale

férents cas de fonctionnements sera étudiée. L'étude sera faite par le moyen de simulation sous Matlab Simpower.

Enfin, on terminera ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les réseaux de transport d'énergie électrique.

I.Introduction

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques[1]. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Il doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble [2]

I.1.Le réseau de transport d'énergie électrique

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu [2] :

- ✓ Pour convertir d'une façon continue l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.
- ✓ Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.
- ✓ Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.

En Algérie, ce service est assuré par la SONELGAZ qu'est une société nationalisée à cet effet, SONELGAZ à une triple mission [1]:

- ✓ Produire l'énergie dans des centrales thermiques.
- ✓ Transporter cette énergie par des lignes à haute tension HT ou à très haute tension THT.
- ✓ Distribuer cette énergie aux usagers.

Pour les consommateurs, idéalement, l'endroit d'où le réseau tire son énergie doit être considéré comme une source parfaite de tension alternative : c'est-à-dire que sa fréquence et son amplitude sont constantes quelle que soit la charge connectée. Par conséquent, afin de répondre aux besoins des clients, les compagnies d'électricité doivent s'efforcer de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension constante (nominale). Par conséquent, il est très important de maintenir le niveau de tension proche de sa valeur nominale aux différents nœuds du réseau.

La grande majorité des lignes de transport d'électricité sont en courant alternatif, fonctionnant à plusieurs valeurs de tension (10 kV à 800 kV), Les réseaux de distribution fonctionnent généralement au-dessous de 100 KV, tandis que la puissance est transportée à des

tensions très élevées. Les lignes fonctionnant à différentes tensions sont connectées par des transformateurs qui fonctionnent au rendement élevé[3] [2].

I.2.Description des réseaux électriques

I.2.1.Le réseau de transport THT

C'est souvent le réseau qui permet de transférer l'énergie des centres de production éloignés vers les centres de consommation. Les grandes centrales (> 300 MW) sont en principe connectées au réseau THT (> 300 MW)[4], qui est généralement constitué de lignes aériennes. La protection de ces réseaux doit être très efficace. Quant à leur exploitation, un centre de contrôle (dispatching) assure en permanence le suivi et la gestion de l'énergie électrique au niveau national.

I.2.2.Le réseau de répartition HT

L'objectif du réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du système de transport vers les principaux centres de consommation que sont :

- ✓ Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution moyen tension (MT).
- ✓ Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation.

La structure de ces réseaux est généralement aérienne (parfois souterraine à proximité des sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux.[5]

I.2.3.Le réseau de distribution MT

Les utilisateurs peuvent être regroupés de manière très dense, comme dans les villes, ou séparés par des distances plus ou moins grandes les uns des autres, comme dans les zones rurales. Ils sont desservis par un réseau de distribution fourni par des sous-stations (répartition) qui reçoivent l'énergie de centrales éloignées via un réseau de transport[4]. Les lignes de distribution moyenne tension (MT) proviennent de sous-stations de distribution et d'alimentation réparties à divers endroits de la zone desservie.

Ces sous-stations de transformation abaissent la tension à une valeur appropriée pour alimenter en électricité le réseau public de distribution auquel les utilisateurs sont raccordés par des raccordements.

I.2.4.Le réseau de livraison basse tension BT

C'est le réseau que nous connaissons en principe, puisque c'est une tension de 400V/230V, et en Algérie c'est 380V/220V.

Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles. Le réseau peut desservir un grand nombre de consommateurs correspondant au secteur domestique. Sa structure, qu'elle soit aérienne ou souterraine, est constamment influencée par son environnement. Ces réseaux sont généralement exploités manuellement. [1]

I.2.4.1. Le réseau BT permet de distribuer aux consommateurs

- Le 230 V (1 phase + neutre) - 2 fils
- Le 400V (3 phases + neutre) - 4 fils

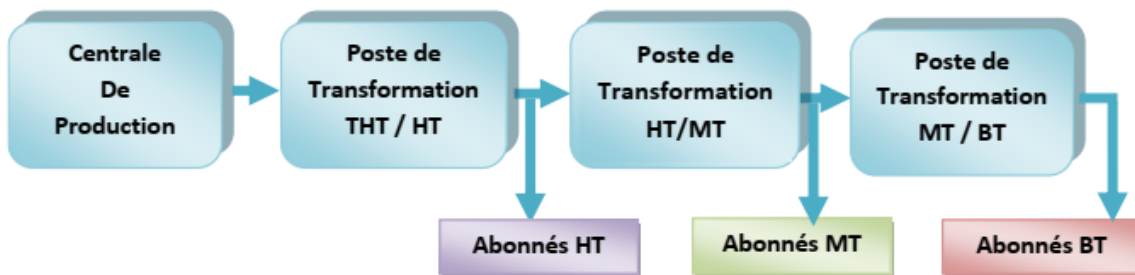


Figure.I-1: Schéma d'un réseau électrique.

I.3.L'évolution du réseau électrique

Le réseau électrique a évolué de façon désorganisée à partir de petits réseaux formés dans la première moitié du XXème siècle jusqu'aux grands réseaux continentaux d'aujourd'hui. Afin de réaliser des économies d'échelle, il a évolué vers une structure « verticalement intégrée » voir figure.I-2.

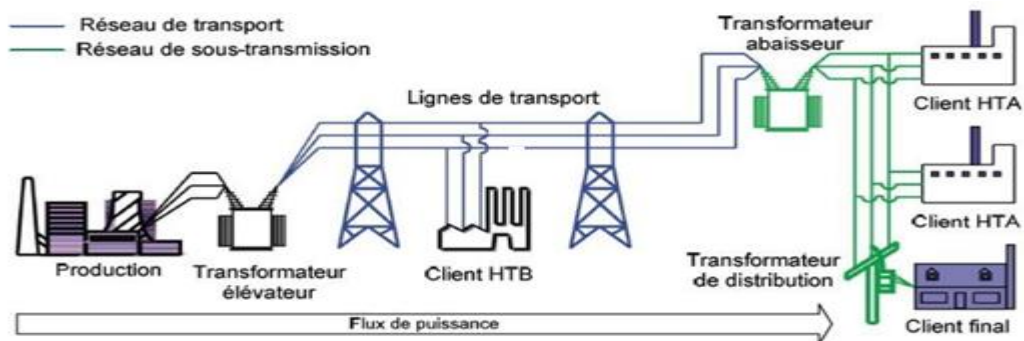


Figure.I-2: Architecture verticale du réseau.

C'est-à-dire que la puissance est produite par des grandes centrales électriques potentiellement très éloignée des centres de consommation. Une telle structure « verticalement intégrée » du système d'alimentation apporte des avantages, tels que la réduction du coût d'exploitation, la mutualisation des marges de réserve des générateurs, une meilleure efficacité énergétique des grands générateurs, une réduction du risque de défaillances.[6]

Les nouvelles politiques énergétiques et environnementales, qui ont prévalu au cours des dernières années, ont encouragé l'interconnexion de nouvelles sources de production d'énergie électrique non conventionnelles et décentralisées dans le réseau.

L'insertion de la production décentralisée conduit à une transition vers une nouvelle structure plus « éclatée » voir la (Figure.I-3) ci-dessous. Dans cette structure, les petites et moyennes unités de production sont souvent reliées au réseau de distribution.[6]

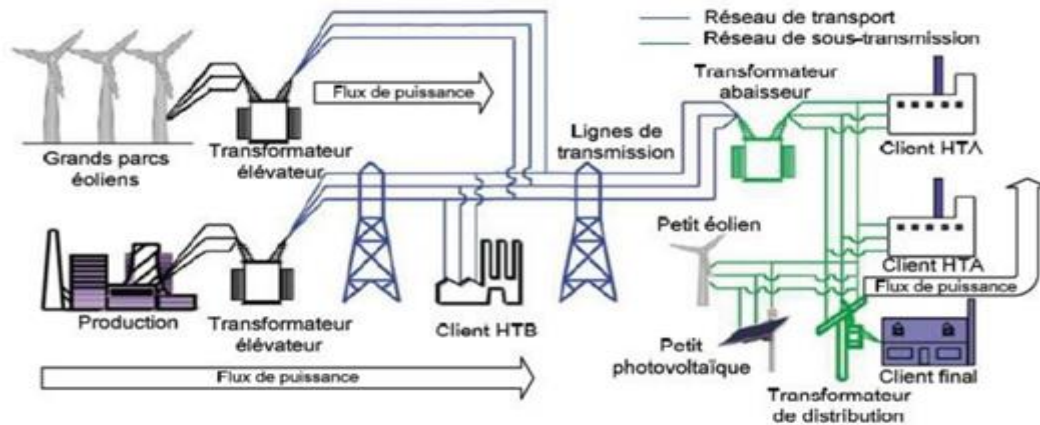
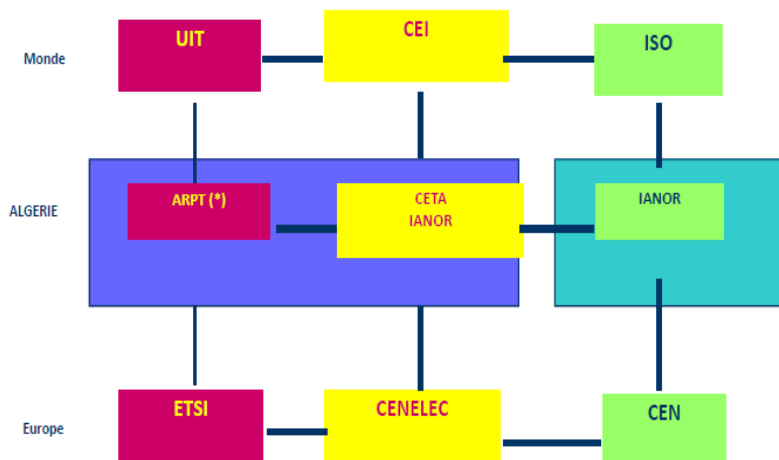


Figure.I-3: Architecture horizontale du réseau.

I.4. Les tensions normalisées selon la CEI

Le MARS 2008, la commission d'électrotechnique international CEI a accepté la demande d'adhésion de l'Algérie en qualité de membre de plein droit de la CEI sans aucune opposition de ses membres.

Tableau I - 1 : les différents paliers de normalisation.



La nouvelle norme CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative comme suit[7] (Figures I-4)[8] :

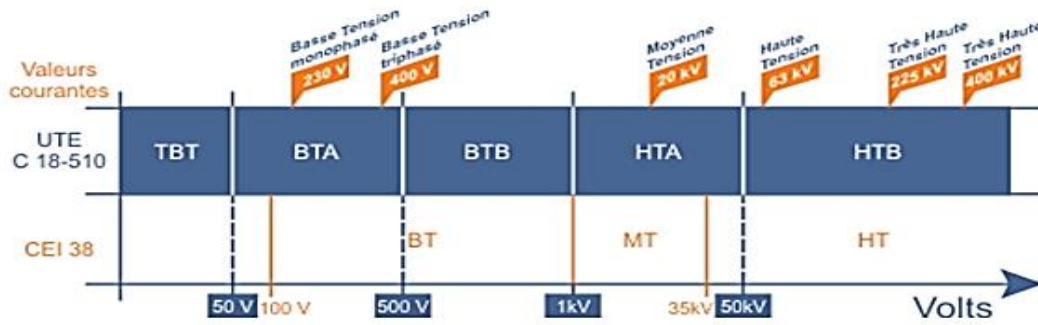







Figure.I-4:Niveaux de tension normalisés.

Nous prendrons par convention dans ce qui suit [8] :

- ✓ **HTB** désignera la Haute Tension **HT**.
- ✓ **HTA** désignera la Moyenne Tension **MT**.
- ✓ **BTB** et **BTA** désignerons le domaine de la Basse Tension **BT**.

Tableau I - 2: Classification des tensions en Algérie et en Europe[8].

	Usage	Tensions Normalisées	Noms (standard Européen)	Aspect visuel des lignes
H T B	Grand transport national et inter-connexion			
		220Kv / 400Kv (THT)	HTB (50Kv à 400Kv) HTB 3 : 400Kv HTB 2 : 225Kv HTB 1 : 90 et 63Kv	
H T A	Lignes inter-régionales, Répartition régionales	30Kv / 10Kv (MT)	HTA (1Kv à 50Kv)	
B T	Répartition Locale, Distribution et Consommation	400V / 230V Mono (BT)	BT < 1Kv	

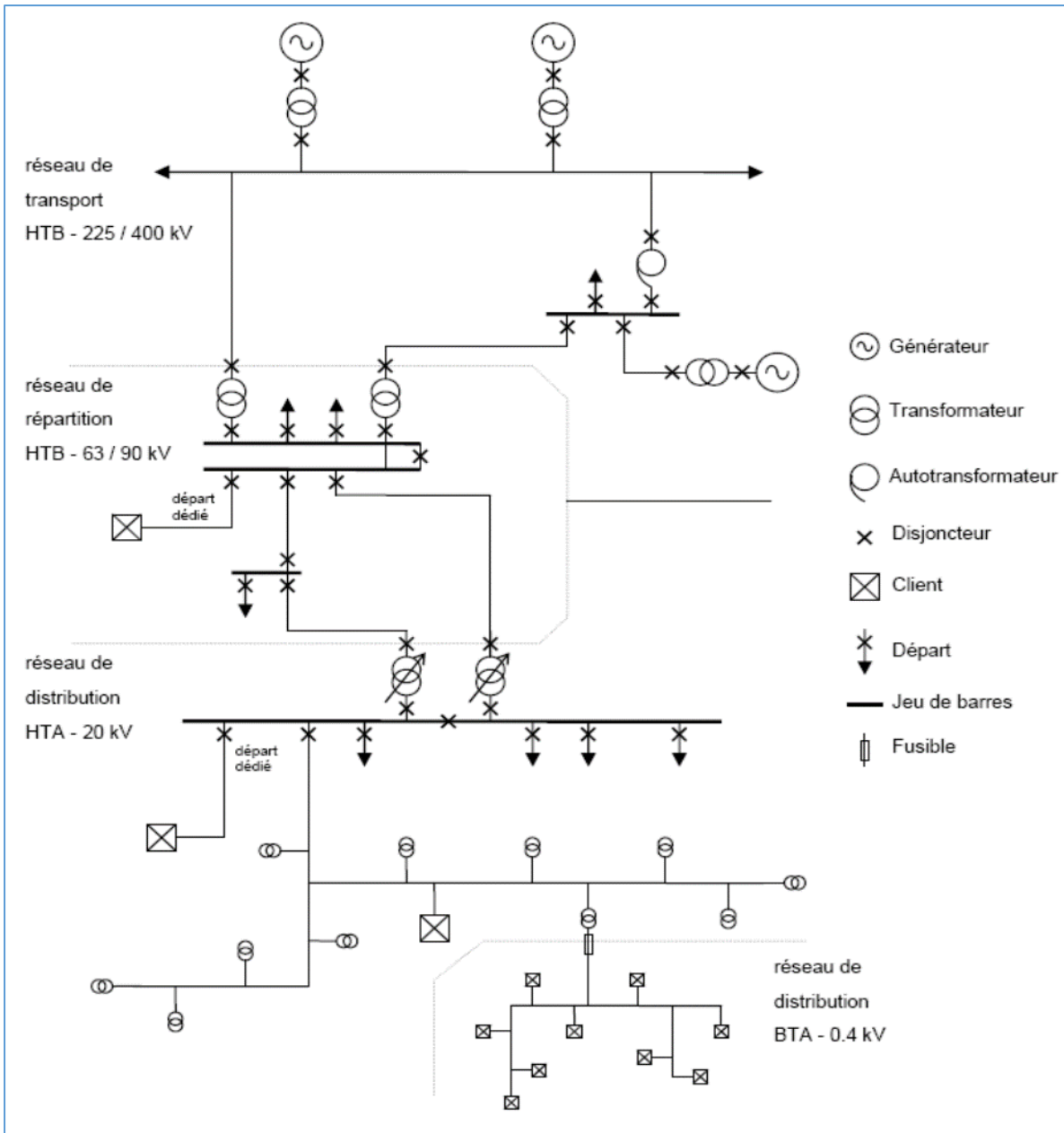


Figure.I-5: Organisation des différents niveaux de tension du système électrique.

I.5. Classification des lignes [9] [10] [8]

I.5.1. Ligne courte

Pour les lignes plus courtes ($l < 80$ km), l'effet capacitif de la ligne est négligeable [8]. Cependant, nous devons tenir compte de l'effet inductif de la ligne, qui dans notre modèle sera représenté par l'inductance et la résistance des conducteurs de ligne.[11]

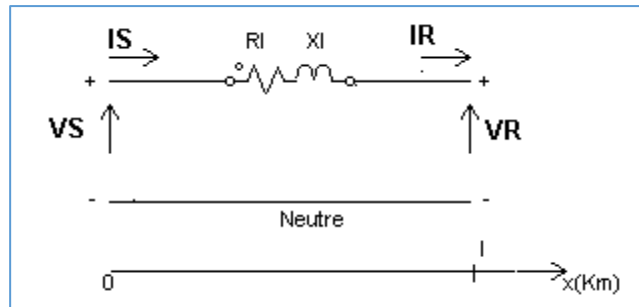


Figure.I-6: Circuit équivalent monophasé d'une ligne courte.

Les paramètres du circuit monophasé de la figure I.6 sont définis comme suit :

- R = résistance d'un conducteur, exprimée en ohm par kilomètre
- XL = réactance inductive d'un conducteur, exprimée en ohm par kilomètre

I.5.2. Ligne moyenne

Contrairement à la ligne courte, l'effet capacitif d'une ligne de longueur moyenne ($80 \text{ km} < L < 250 \text{ km}$) n'est plus négligeable et nous devons en tenir compte dans notre modèle. L'effet capacitif de cette ligne sera représenté dans notre modèle par deux condensateurs identiques, placés respectivement à l'entrée et à la sortie de la ligne.

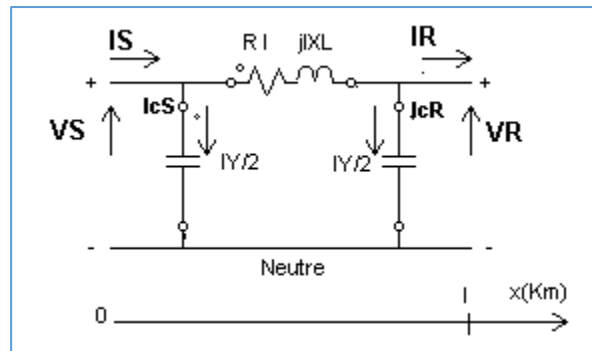


Figure.I-7: Circuit équivalent monofilaire d'une ligne de longueur moyenne.

Les paramètres du circuit monophasé de la figure I.7 sont définis comme suit :

- R = résistance d'un conducteur.
- XL = réactance inductive d'un conducteur.
- Y = admittance de la ligne.

I.5.3. Ligne longue

Une ligne longue ($l \geq 250 \text{ km}$) peut être représentée par le circuit de la figure I.8 :

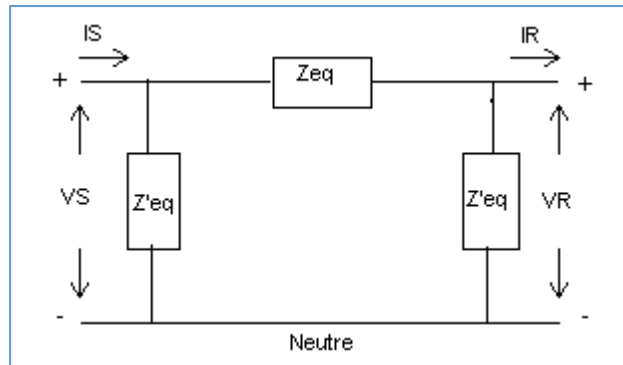


Figure.I-8: Circuit équivalent en Π d'une ligne longue.

I.6. Les lignes aériennes

Une ligne aérienne est composée de pylônes, de câbles conducteurs, de câbles de garde et d'isolateurs.



Figure.I-9: Les lignes aériennes.

I.7. Les lignes souterraines

Elles sont constituées de câbles protégés par un fourreau enfoui dans le sol. Il est techniquement très complexe et très coûteux d'enfouir les lignes 400 000 volts. L'enfouissement entraîne une déperdition de l'énergie transportée. Pour y remédier, il faudrait construire tous les 15 à 20 kilomètres des postes compensant cette perte d'énergie, qui couvriraient chacun une superficie de plusieurs hectares. [12]

I.8. Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains [12]

Tableau I - 3: Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains.

	Points forts	Points faibles
Aériennes	<ul style="list-style-type: none"> - Défaut facilement décelable - Construction économique - Réparation rapide 	<ul style="list-style-type: none"> - Défigure parfois le paysage - Sensible aux intempéries - Pannes plus fréquentes
Souterrains	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuer à la qualité du cadre de vie - Utilisable en milieu urbain - Insensible aux intempéries 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de pose élevé - Travaux de renouvellement coûteux - Réparation longue

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude générale sur les réseaux électriques et les différents composants nécessaire à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie électrique.

La transmission de puissance à haute tension crée des problèmes particuliers, nécessitant l'installation d'énormes dispositifs de compensation pour maintenir une tension constante et pour garantir la stabilité du réseau électrique.

Chapitre II

*Profils de la tension sur le réseau et techniques
d'amélioration de la stabilité.*

II.Introduction

La transmission de puissance à haute tension crée des problèmes particuliers, nécessitant l'installation d'énormes dispositifs de compensation pour maintenir une tension constante et pour garantir la stabilité du réseau électrique. La situation dans les pays à forte consommation accroît encore le risque d'instabilité. Dans ce chapitre nous allons présenter les méthode et les moyens d'amélioration de la stabilité de tension.[13] [14]

II.1.La puissance réactive dans les circuits électriques

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active. A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, et pour l'amélioration de la marge de stabilité.

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.[15]

II.2.Qualité d'énergie

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie. [16]

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$.

Le maintien de ce niveau de qualité relève de la responsabilité partagée de tous les gestionnaires de réseau concernés (zones de contrôle) qui doivent être impliqués dans les réglages des fréquences primaires et secondaires. L'administrateur du réseau doit maintenir l'amplitude de la tension à $\pm 10 \%$ de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension.[16] [17]

II.3.Types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de la tension:[18] [19]

- **Les creux de tension et coupures brèves:** Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle.
- **Interruption courte:** L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycle jusqu'à 3s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 pu
- **.Chutes de tension:** Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension.
- **Tension et/ou courant transitoire:** Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde.
- **Déséquilibre de tension:** Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau.
- **Perturbations harmoniques:** Les harmoniques sont des composantes dont les fréquences un multiple de la fréquence fondamentale, qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc, etc.

II.3.1.Classification des différents types de perturbations

La figure (II-1) présente une classification possible des différents types de perturbations. Il faut noter, également, que l'impact à long terme de ces différents types de perturbations sur la durée de vie des appareils électriques reste aujourd'hui assez méconnu.[20]

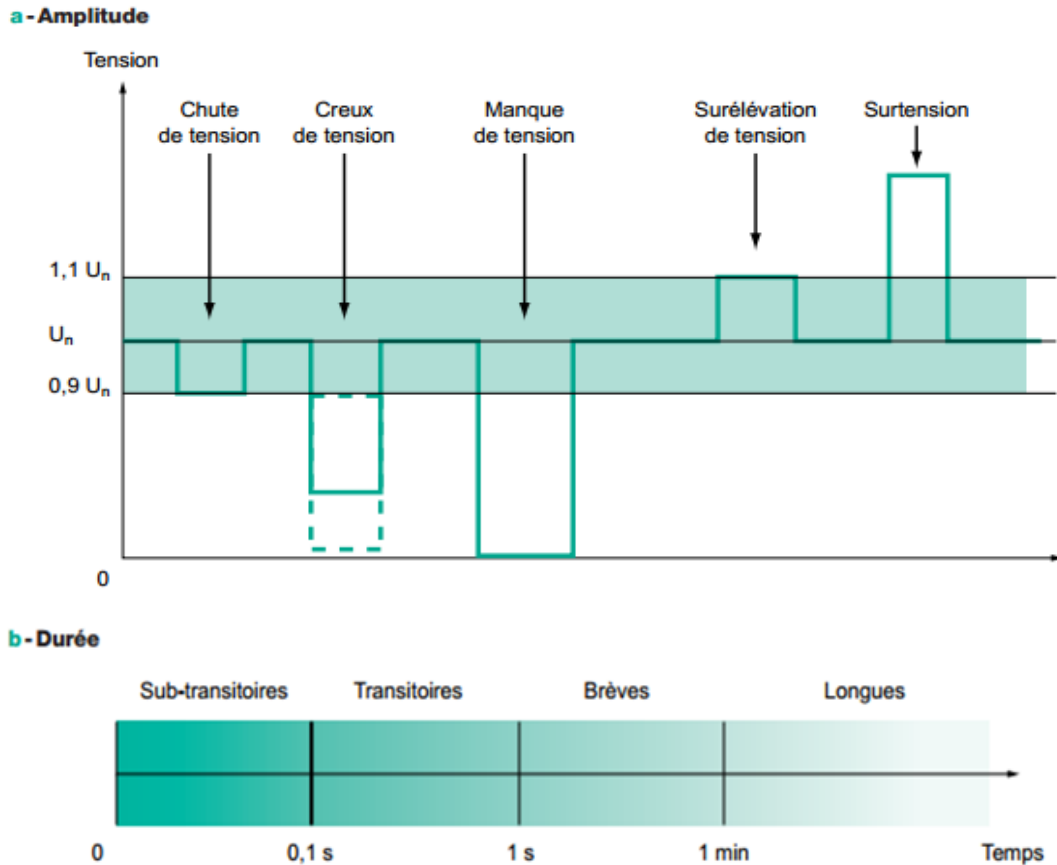


Figure.II-1: Perturbations des réseaux électriques.

II.4. Solutions pour améliorer la QEE[21]

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

Ces solutions peuvent être mise en œuvre pour :

- ✓ corriger un dysfonctionnement dans une installation,
- ✓ agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes,
- ✓ mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie,
- ✓ réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en kVA, réduction de la consommation).[21]

II.5.Définition de la stabilité des réseaux

La stabilité des réseaux électriques est généralement définie comme leurs propriétés de maintenir un état de fonctionnement d'équilibre dans les conditions de fonctionnement normales ou de rétablir un état d'équilibre acceptable après avoir subi une perturbation, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact.[22]

II.6.Classification de la stabilité des réseaux électrique

La classification de la stabilité facilite grandement l'analyse de la stabilité, y compris l'identification des principaux contributeurs à l'instabilité. Par conséquent, la classification est cruciale pour une analyse pratique significative et la résolution des problèmes de stabilité du système électrique. [23]

La classification de la stabilité proposée ici est basée sur la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude des perturbations. On peut donc classer les types de la stabilité comme suit [24]:

On distingue trois types de stabilité [25] [26]:

- ✓ La stabilité de l'angle de rotor.
- ✓ La stabilité de tension.
- ✓ La stabilité de fréquence.

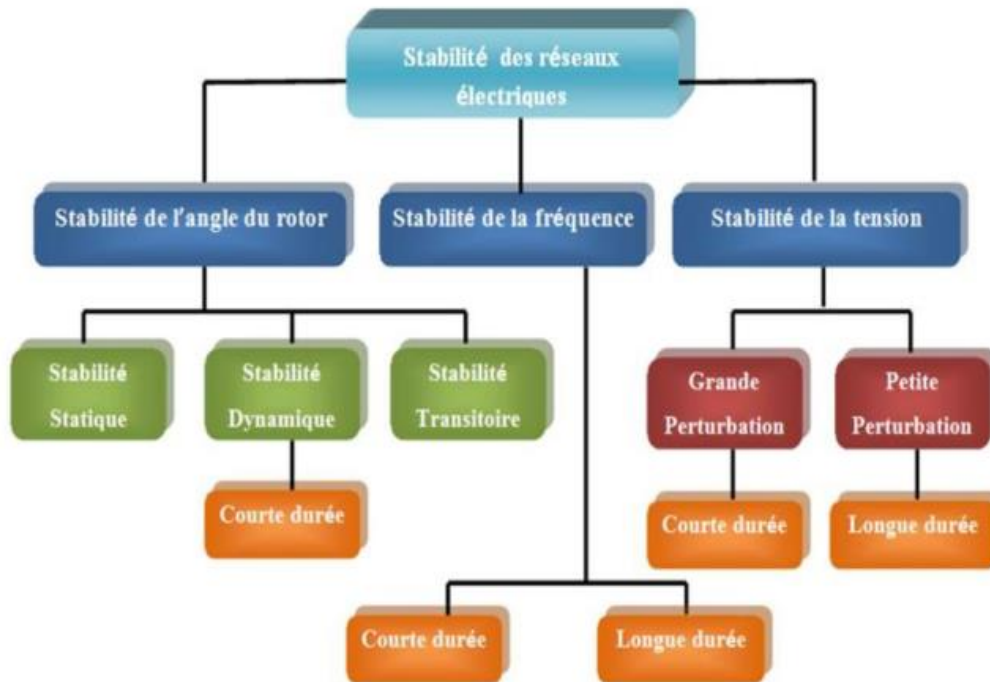


Figure.II-2: Classification de la stabilité de réseau électrique.

II.6.1. Stabilité de l'angle du rotor (angulaire)

Dans un système électrique, la stabilité angulaire du rotor est définie comme la capacité d'un groupe de générateurs synchrones interconnectés à maintenir la synchronisation dans des conditions normales de fonctionnement ou après des perturbations. Le système est instable si la différence entre les angles du rotor du générateur augmente à l'infini ou si les oscillations transitoires causées par des perturbations ne sont pas suffisamment amorties dans le temps d'évaluation.[20]

II.6.1.1. Stabilité statique

Après le régime transitoire dû à la perturbation, le système entre dans le régime permanent. Dans ce cas, pour étudier le système, il faut évaluer la stabilité statique du réseau. Le système n'est pas stable si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé: l'état instable ou l'état d'urgence .[20]

II.6.1.2. Stabilité dynamique

Si une perturbation mineure est effectuée sur le réseau, à partir d'un régime permanent stable, et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal en régime permanent, le réseau est dit dynamiquement stable. Pour un réseau d'énergie électrique, on entend par perturbation mineure des manœuvres ou des opérations nor-

males sur le réseau, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou des variations mineures de la charge. [26]

II.6.1.3. Stabilité transitoire

Lorsqu'il y a une perturbation majeure sur le réseau et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal après la perturbation, alors le réseau est dit transitoirement stable. Les perturbations majeures sont les courts-circuits, les pertes de lignes, les bris d'équipements majeurs comme les transformateurs de puissance et les alternateurs peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement total du réseau. Le phénomène de la stabilité transitoire concerne les grandes perturbations telles que :

- ✓ Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines ;
- ✓ La perte d'un ouvrage ;
- ✓ La perte d'un groupe de production [20].

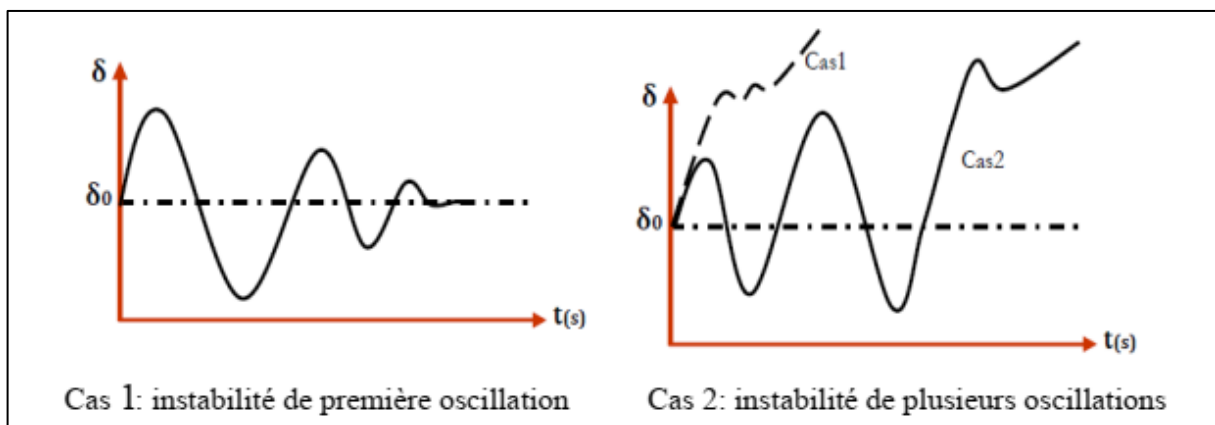


Figure.II-3: Tracé de l'angle rotorique en fonction du temps.

Les conséquences de ces défauts seconde qui suit l'élimination du défaut, elle est appelée instabilité de première oscillation (en anglais First Swing Instability), (cas 1, figure II-3). Elle peut résulter d'une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi oscillations), (cas 2, figure II.3).

II.6.1.3.1. Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire

L'amélioration de la stabilité transitoire reste un défi majeur pour les ingénieurs pour éviter tous événement qui peut conduire vers un black-out. Les solutions envisageables se basent sur [27]:

- ✓ Augmentation de la constante d'inertie des générateurs ;
- ✓ Augmentation de la puissance active ;
- ✓ Installation des protections et des appareils de coupure rapides ;
- ✓ Implantation des valves rapides des turbines à gaz ;
- ✓ Installation des résistances d'amortissement ;
- ✓ Utilisation des PSS ;
- ✓ Contrôle rapide et flexible de l'écoulement de puissance ;

II.6.2.Stabilité de fréquence

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée. Le maintien de la fréquence à une valeur nominale dans un système de puissance est lié à l'équilibre global entre les puissances actives produites et consommées (y compris les pertes).[28]

II.6.3.Stabilité de tension

La stabilité de tension implique une échelle de temps plus longue que la stabilité angulaire. Cette catégorie de stabilité représente la capacité d'un réseau électrique de maintenir la tension de fonctionnement normal dans les limites admissibles à tous les jeux de barres, suite à des perturbations. La stabilité de tension peut être classée en deux catégories ; la stabilité de tension aux grandes perturbations et aux petites perturbations. [29] [30]

II.6.3.1.. Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production,...etc.[31]

II.6.3.2. Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations

Elle est définie comme étant la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit,...etc.[31]

II.6.3.3. Instabilité de la tension:

L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable de la tension, aboutissant en un effondrement généralisé de la tension. [32] [33]

II.7. Les méthodes d'amélioration de la stabilité

Le transport de la puissance réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, de la compensation de puissance réactive, série ou shunt selon les cas, est utilisée pour limiter ce transport de puissance réactive. [26]

La compensation est une technique de la gestion d'énergie réactive afin d'améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif. Elle peut se réaliser de plusieurs manières, ayant pour buts : [34]

- ✓ La correction du facteur de puissance
- ✓ Amélioration de la régulation de la tension
- ✓ Equilibre des charges
- ✓ L'aide au retour à la stabilité en cas de perturbation.

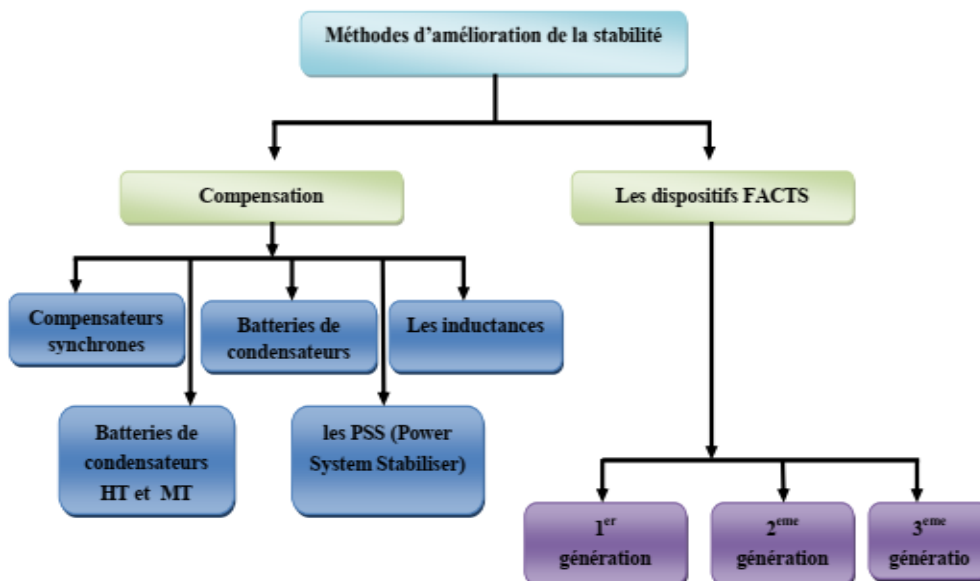


Figure.II-4: Les méthodes d'amélioration de la stabilité.

II.8.Moyens d'amélioration de la stabilité

II.8.1.Compensation[34]

II.8.1.1.Compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes branchées sur le tertiaire du transformateur THT/HT qui peut fournir ou absorber de l'énergie réactive sans mettre en jeu de puissance active. La fourniture de la puissance réactive est limitée par l'échauffement des enroulements et l'absorption par des problèmes de stabilité statique.

II.8.1.2.Batteries de condensateurs

Elles ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive fixe consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels :

II.8.1.2.1. Batteries de condensateurs HT

Ces batteries raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT compensent les pertes réactives sur les réseaux HT et THT et les charge. Leur puissance est de 20 à 30 MVAR.

II.8.1.2.2. Batteries de condensateurs MT

Raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT et THT/MT, elles compensent l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport.

II.8.1.3.Les inductances

Elles sont utilisées pour compenser la puissance réactive fournie par les lignes et les réseaux de câbles souterrains en heures creuses. Elles sont raccordées soit directement au réseau, soit branchées sur les tertiaires des autotransformateurs. Toutefois, ces inductances engendrent des harmoniques importants dont le filtrage nécessite des installations importantes où les pertes peuvent ne pas être négligeables. Compte tenu de ces problèmes, elles sont en cours de déclassement.

II.8.1.4.Les PSS (Power System Stabiliser)

Le problème d'oscillations électromécaniques est résolu en ajoutant au générateur un contrôleur spécifique appelé : (Power System Stabilizer (PSS)) (Stabilisateur de système de puissance). Ce contrôleur détecte les variations de vitesse de rotor ou de puissance électrique du générateur et applique un signal, adapté, à l'entrée du régulateur de tension (AVR). Le générateur peut ainsi produire un couple d'amortissement additionnel qui compense l'effet négatif du système d'excitation sur les oscillations.[29]

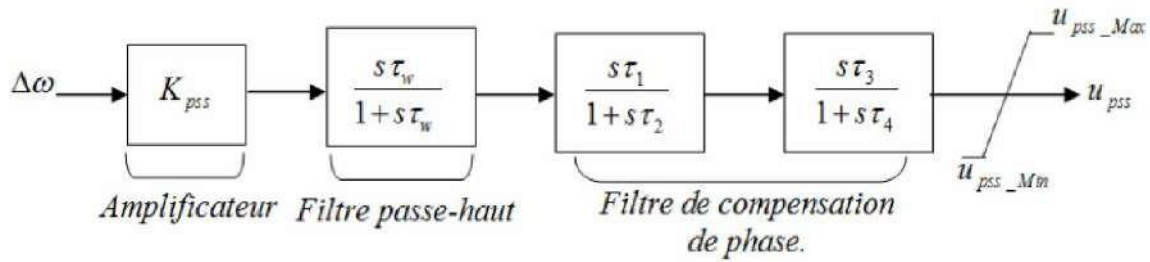


Figure.II-5:Schéma fonctionnel de système de stabilisation de puissance PSS type IEEE.

II.8.1.4.1.Les régulateurs de tension (AVR)

Le principe est en général d'agir sur la puissance réactive échangée avec le réseau. Si la tension au point de raccordement de la machine tend à diminuer, le système d'excitation réagit en fournissant plus de puissance réactive. Si la tension au point de raccordement de la machine tend à augmenter, le système d'excitation réagit en absorbant de la puissance réactive. Ce régulateur est souvent utilisé pour les grands générateurs synchrones qui fonctionnent en mode « support de la tension ».[23]

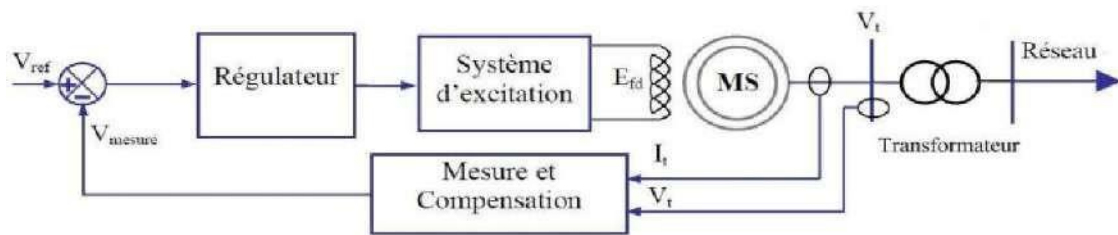


Figure.II-6:Schéma fonctionnel de la régulation de tension AVR type IEEE.

II.8.2.Les dispositifs FACTS[35] [36] [28]

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante: Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant.[34] [37] [38]

II.8.2.1.Classification des dispositifs FACTS[20]

II.8.2.1.1. Classification selon la génération

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.8.2.1.2. Classification selon la catégorie

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories :

- ✓ Les compensateurs parallèles
- ✓ Les compensateurs séries
- ✓ Les compensateurs hybrides (série - parallèle)

II.8.2.2. Compensateurs parallèles [35]

Les équipements utilisant l'électronique de puissance ont l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court.

Les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement.

Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme ou injecte un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne[38]. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

II.8.2.2.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors

Il s'agit de :

- ***TCR (Thyristor Controlled Reactor)***

Dans le TCR (ou RCT : Réactances Commandées par Thyristors), la valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [39].

➤ **TSC (Thyristor Switched Capacitor)**

Dans le TSC (ou CCT : Condensateurs Commandés par Thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction [39].

➤ **SVC (Static Var Compensator)**

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du Sud. La caractéristique statique est donnée sur la figure II-7.

Trois zones sont distinctes [40] :

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

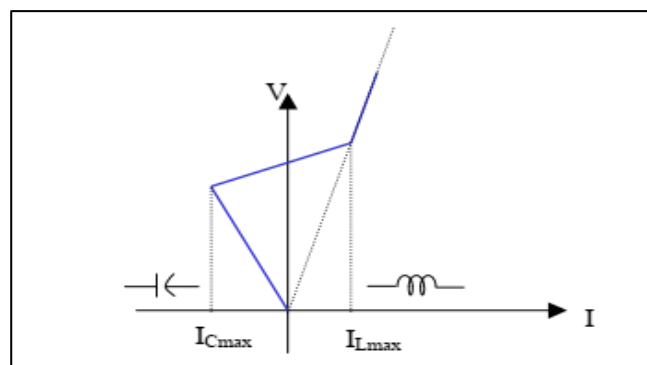


Figure.II-7:Caractéristique d'un SVC.

Tous sont utilisés pour contrôler la tension (la puissance réactive).

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

Ce type de compensateur connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations.

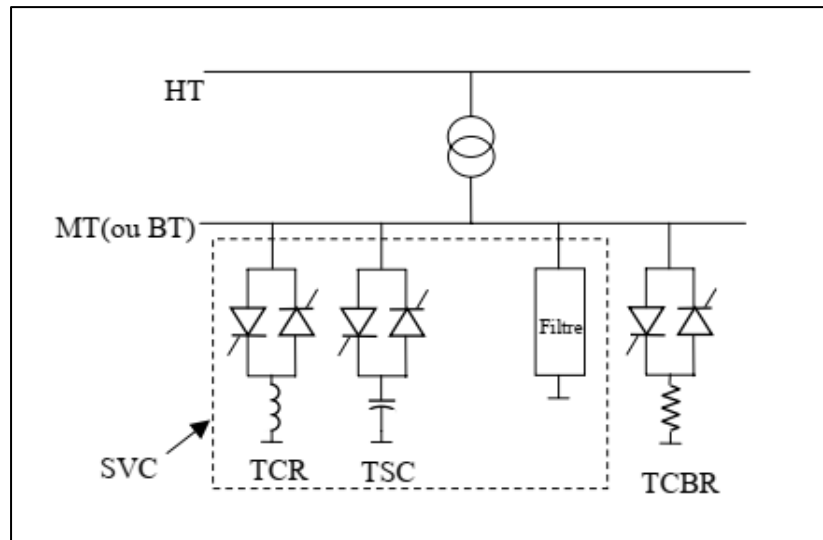


Figure.II-8:Schéma du SVC et TCBR.

II.8.2.2.2.Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

Il s'agit du STATCOM (STATic COMPensator) qui a connu jusqu'à présent différentes appellations:

- *ASVC (Advanced Static Var Compensator)*
- *STATCON (STATic CONDenser)*
- *SVG (Static Var Generator)*
- *SVClight*
- *SVCplus*

L'échange de l'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau V . Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :[41]

- Si $V_s = V$ (Fig II-10-a), le courant I_s est nul donc la compensation est nulle.
- Si V_s est inférieure à V , un courant I_s circulant dans la réactance « x » (inductance de fuite du transformateur de couplage) est déphasé de $(-\pi/2)$ par rapport à V . Sa valeur est donnée par :[42]

$$I_s = (V - V_s)/x \quad \text{(II-1)}$$

Ce courant sera inductif (Figure II-10-b) donc le compensateur se comporte comme une grosse inductance.

- Si V_s est supérieure à V , le courant I_s sera $\pi/2$ en avance sur V (Figure (II-10-c)) sa valeur est donnée par l'équation (II.1) sauf que I_s est négatif. Par conséquent, le convertisseur fournit de la puissance réactive à la ligne de transport.[42]

La grandeur de la tension V_s dépend du potentiel V_{cc} aux bornes du condensateur de stockage.[43]

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau.[41]

La (Figure (II-11)) représente les caractéristiques (V-I) ; (V-Q) d'un STATCOM.[44]

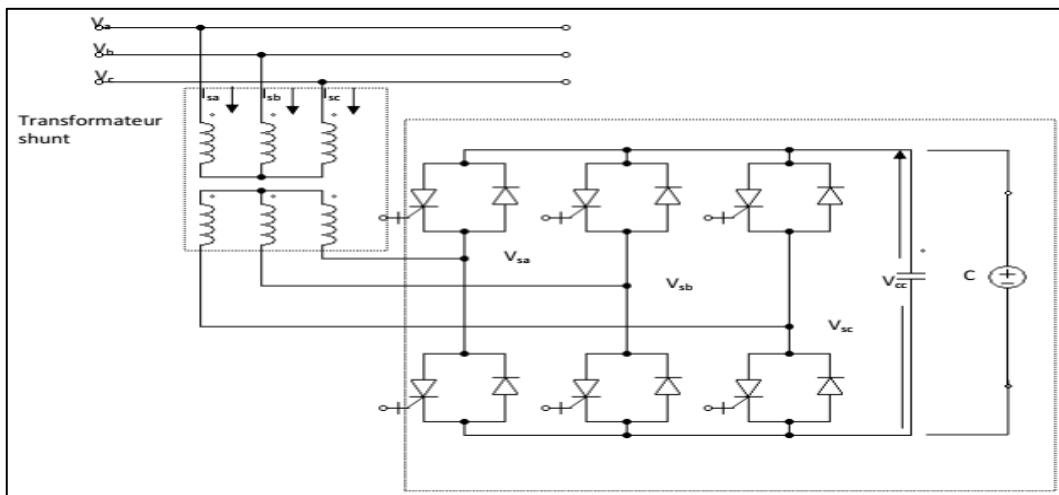


Figure.II-9: Schéma de base du « STATCOM ».

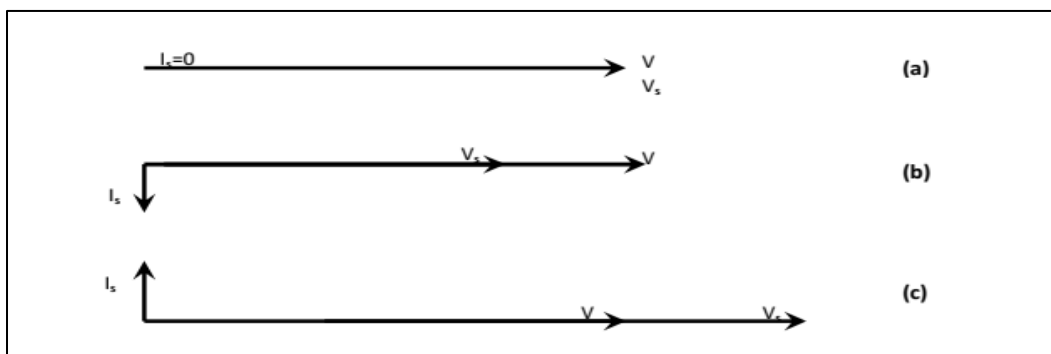


Figure.II-10:(a); (b) ; (c) : Diagrammes vectoriels du « STATCOM ».

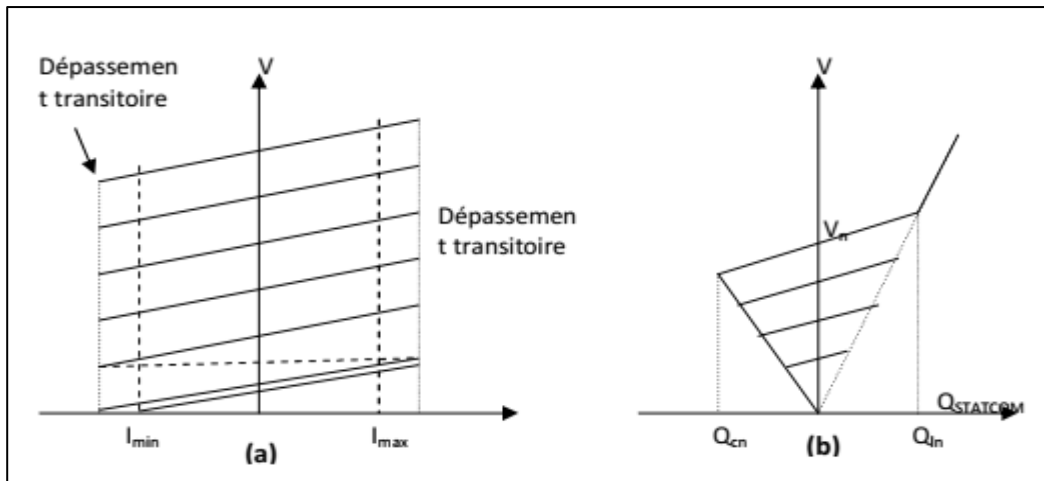


Figure.II-11: Caractéristique V-I (a) et V-Q (b) d'un « STATCOM ».

II.8.2.3. Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.[23]

II.8.2.3.1. Compensateur série contrôlé par thyristor

➤ Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Il est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur [45] (Fig.II-12). Ces dispositifs auront pour effet de réduire la réactance inductive de la ligne donc augmenté la capacité de transport de cette dernière.

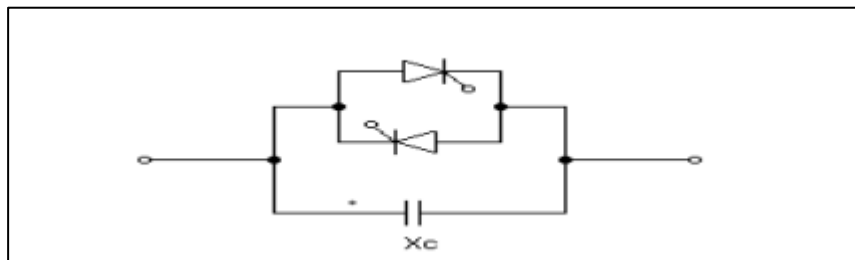


Figure.II-12: Une phase d'une ligne triphasée avec compensation série TCSC.

➤ Le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° . [45] voir (Fig.II-13)

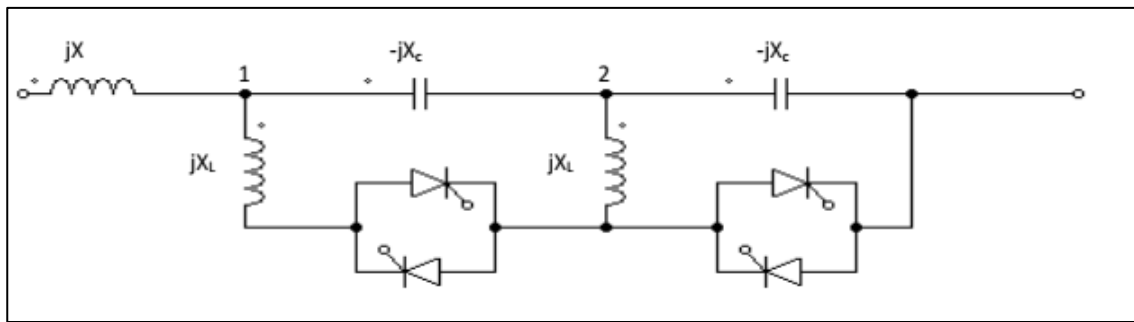


Figure.II-13: Structure du TSSC.

➤ **Le TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)**

C'est un compensateur qui est commandé pour fournir une réactance inductive variable (Fig.II-14).

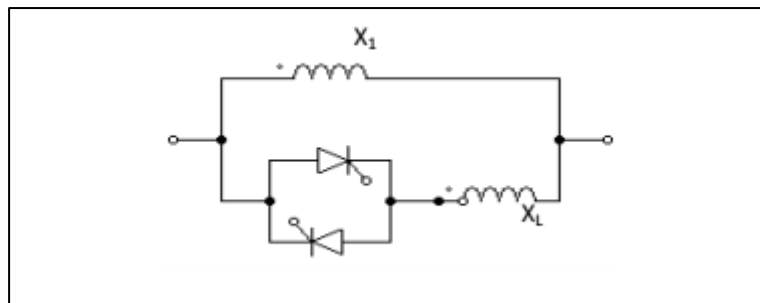


Figure.II-14: Schéma de principe du TCSR.

➤ **Le TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)**

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° . [45]

II.8.2.3.2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors [35]

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

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Figure.II-15).

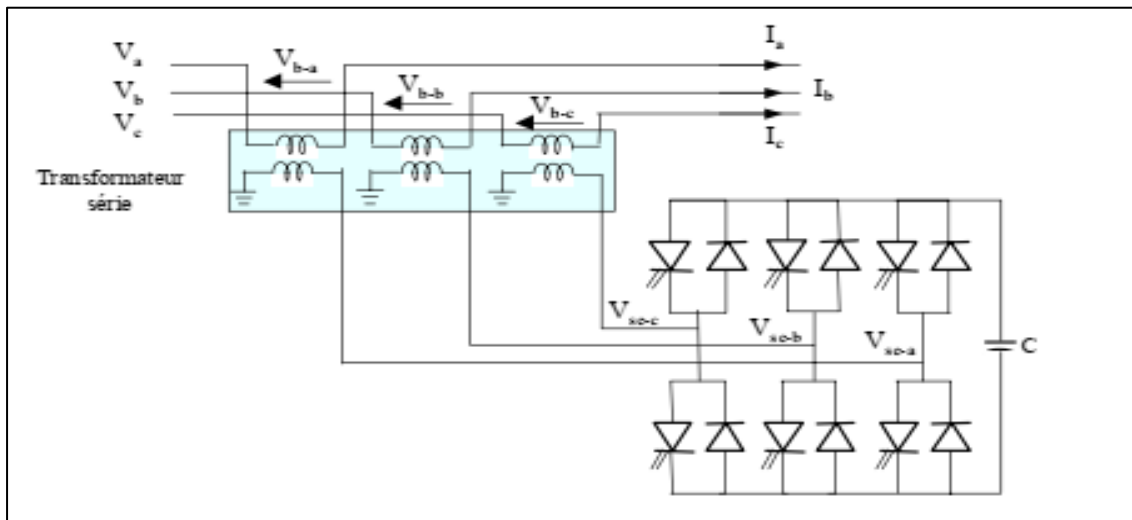


Figure.II-15:Schéma de base du SSSC.

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure suivante :

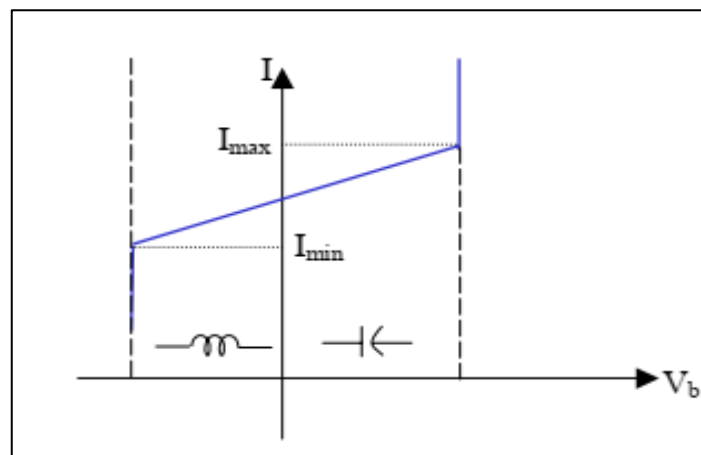


Figure.II-16:Caractéristique statique du SSSC.

Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment-là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension V_b n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de ligne.[35]

II.8.2.4.Compensateurs hybrides série - parallèle

II.8.2.4.1.Compensateurs hybrides à base de thyristors

- *TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)*[28]

Le TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à réglage en charge (LTC: Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement.[46]

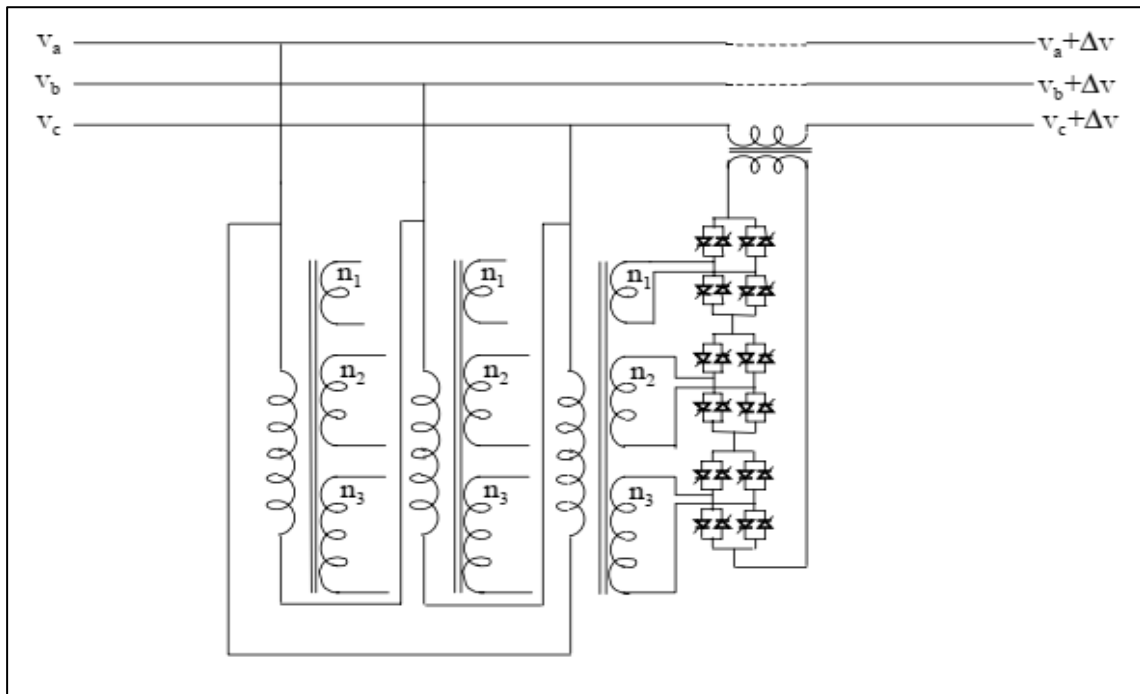


Figure.II-17:Schéma du TCPAR.

II.8.2.4.2.Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors[35]

➤ IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC (Figure.II-18)[39]

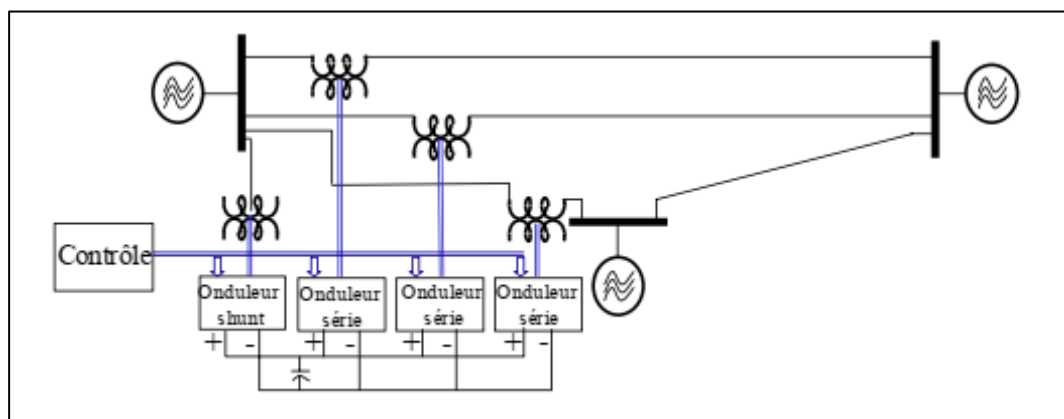


Figure.II-18:Schéma de base de l'IPFC.

Nous pouvons l'utiliser afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau.

➤ **UPFC**

L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique :

- la tension,
- l'impédance de la ligne,
- le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

En effet, l'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de ligne (Fig.II-19).

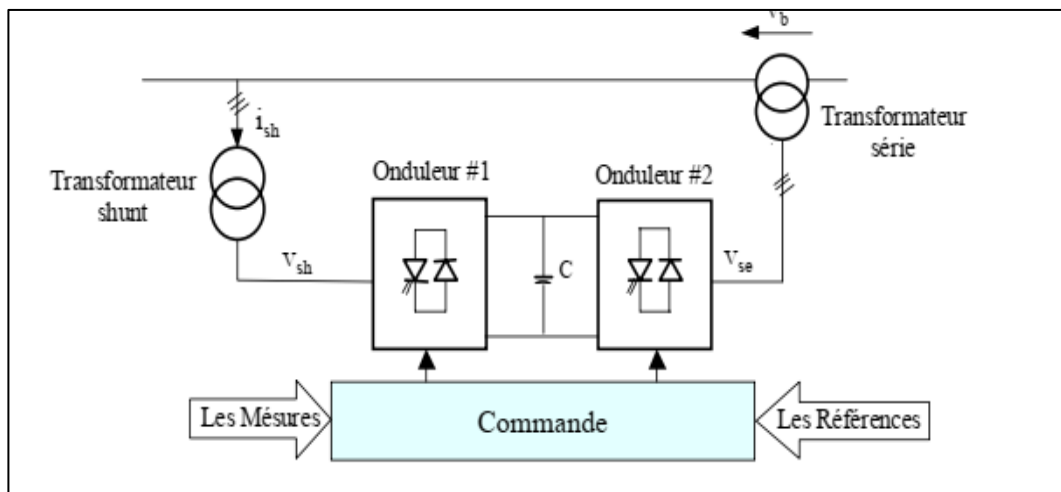


Figure.II-19: Schéma de base de l'UPFC.

Il pourra alterner différentes fonctions : par exemple, la fonction shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que la partie série pourra être utilisée afin d'amortir les oscillations de puissances.[40]

La figure II-20 montre l'influence des différents systèmes FACTS (à base de GTO) sur la courbe de puissance active transitée dans la ligne de transmission. Cette dernière est un facteur important pour l'amélioration de la stabilité transitoire.

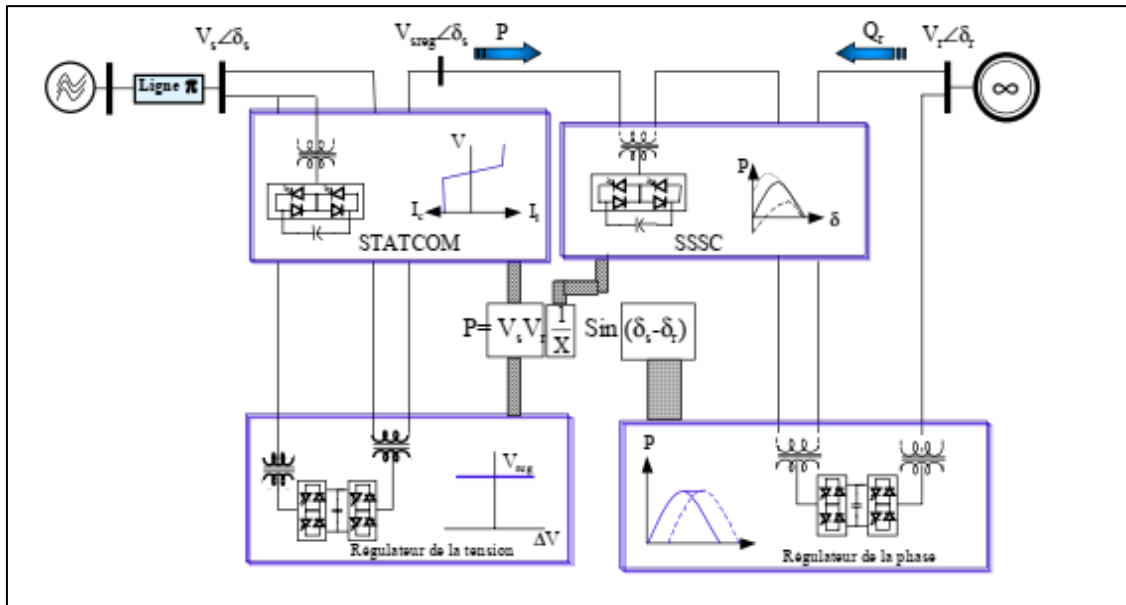


Figure.II-20:L'influence de différents systèmes FACTS sur la puissance active.

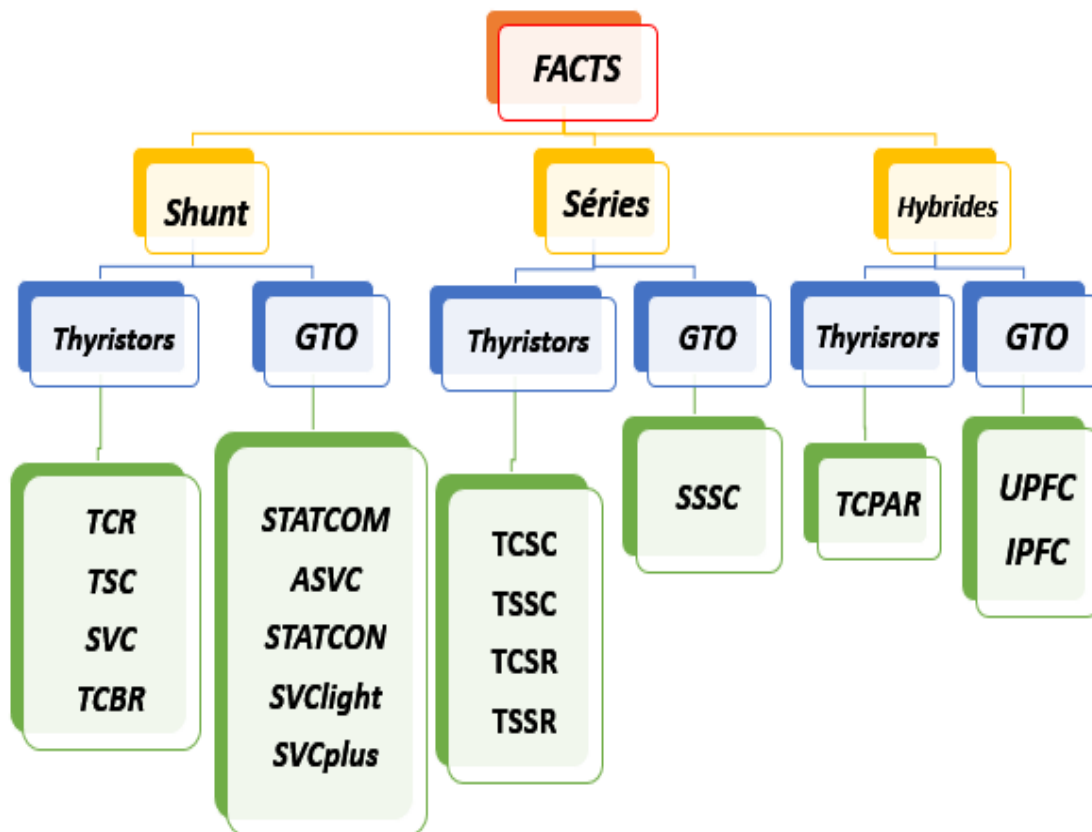


Figure.II-21:Classification des dispositifs FACTS.

II.8.3.Principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS

Les différents dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques, tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des considérations économiques entreront également dans le choix du type d'installation à utiliser. Le tableau (II-1) [47] synthétise les principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS. Le "+" est proportionnel à l'efficacité du dispositif.[28]

Tableau II - 1: Bénéfices techniques des dispositifs FACTS. [47]

<i>Dispositif</i>	<i>Contrôle du transit de puissance</i>	<i>Contrôle de la tension</i>	<i>Stabilité transitoire</i>	<i>Stabilité statique</i>
<i>SVC</i>	+	+++	+	++
<i>STATCOM</i>	+	+++	++	++
<i>TCSC/GCSC</i>	++	+	+++	++
<i>SSSC</i>	++	+	+++	++
<i>UPFC</i>	+++	+++	+++	+++
<i>IPFC</i>	+++	+	+++	++

II.9.Conclusion

Ce chapitre a traité les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de la tension, ainsi on a présenté dans ce chapitre la stabilité d'un réseau électrique et les systèmes FACTS en général. Cependant, l'utilisation simultanée de la compensation série et de la compensation shunt est très importante pour avoir une qualité d'énergie transportée le long de la ligne.

Nous avons présenté aussi les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), ainsi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le STATCOM, SVC, TCSC, SSSC, UPFC, IPFC. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique. Les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux.

Chapitre III

Modélisation du réseau.

III.Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier la stabilité d'un réseau électrique nous avons besoin d'un modèle mathématique assez représentatif, pour établir un modèle de réseau électrique pour les études dynamiques.

III.1.Modélisation des éléments d'un réseau électrique

III.1.1.Equation mécanique

Usuellement la puissance fournie par l'ensemble des machines compense exactement la totalité des puissances demandées et les pertes dans le réseau. Tant qu'aucune perturbation n'affecte le système, les écarts entre les angles internes des différents alternateurs demeurent constants.

L'apparition d'un défaut provoque une rupture entre la production et la consommation. Deux cas se présentent :

- ✓ La perturbation est de faible amplitude et lente. Les organes de régulation se chargent de rétablir l'équilibre.
- ✓ La perturbation est de grande amplitude. Le déséquilibre entre la production et la consommation est responsable de l'évolution des angles internes. Les automates de protection interviennent alors en éliminant l'organe affecté. Un régime transitoire va s'instaurer conduisant à un nouveau régime d'équilibre ou à une désynchronisation des machines.

Comme la durée du régime sub-transitoire est petite en comparaison avec la période d'oscillation du rotor, nous négligeons son effet dans notre étude. Nous pouvons ainsi utiliser le modèle classique du générateur.

Reprenons l'équation de la dynamique :

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_d = P_{acc} \quad (III-1)$$

On note :

- $M = \frac{J\omega}{s_n}$
- J le moment d'inertie.

- S_n la puissance apparente nominale du générateur.
- P_m la puissance mécanique réduite.
- $P_d = D \frac{d\delta}{dt}$ La puissance de l'amortisseur du générateur.
- D coefficient de l'amortissement du générateur.
- P_{acc} la puissance d'accélération du générateur.

La puissance électrique réduite (P_e) est représentée par :

$$P_e = P_{E'}(\delta)|_{x'_d \cong x'_q} \cong \frac{E'V_s}{x'_d} \sin(\delta) \quad (III-2)$$

Où :

- V_s est la tension à la sortie du générateur.
- E' est la fem du générateur durant le régime transitoire.
- x'_d est la réactance entre E' et V_s durant le régime transitoire.

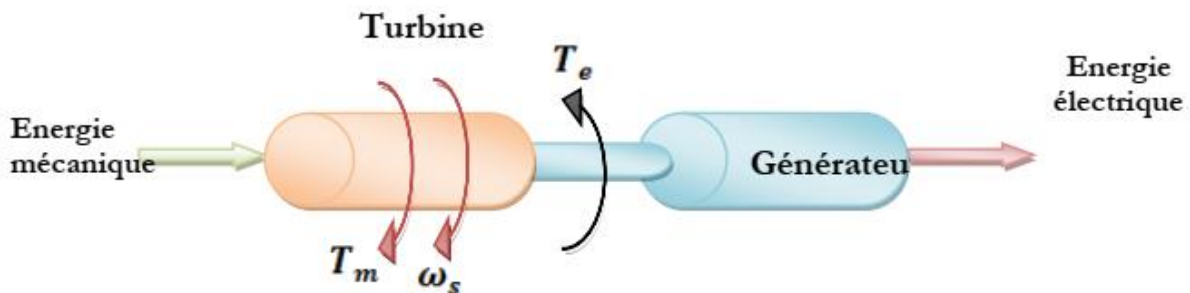


Figure.III-1: Représentation des couples mécanique et électrique.

III.1.2. Modèles de la ligne, du transformateur et de la charge

Les modèles de lignes, de transformateurs et de la charge peuvent être obtenus en admettant les hypothèses suivantes :

- La fréquence reste constante, ce qui permet de conserver la notion de réactance des éléments du réseau.
- Le comportement du réseau triphasé est équilibré. Il est donc possible d'utiliser la représentation monophasée du réseau.

III.1.2.1.Ligne

La ligne de transport entre les deux nœuds « k » et « m » est représentée par le modèle en π , présenté à la figure (III-2) :

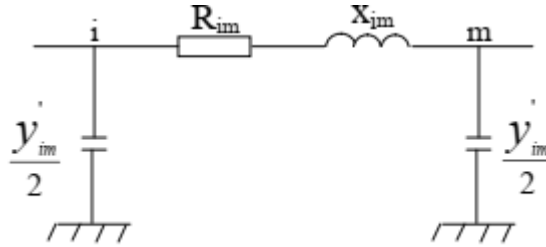


Figure.III-2:schéma simplifié d'une ligne.

L'expression de l'admittance série de la ligne :

$$Y_{im} = 1/(r_{im} + jx_{im})_m + j b_{im} \quad (III-3)$$

Où:

r_{im} : résistance de la ligne

x_{im} : réactance de la ligne

$y'_{im}/2$: admittance shunt de la ligne.

III.1.2.2.Transformateur

Le transformateur est représenté par un modèle en π figure (III-3).

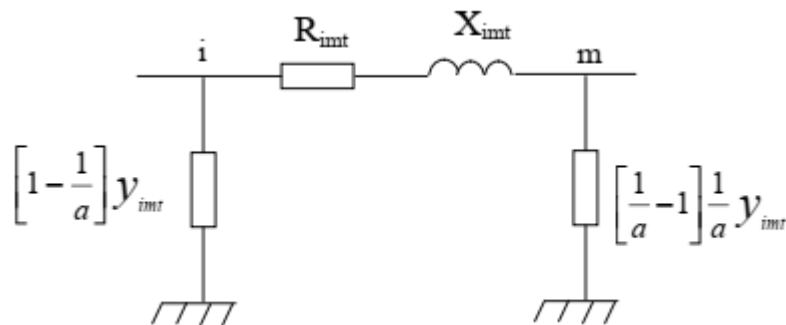


Figure.III-3:modèle du transformateur.

$$y_{imt} = \frac{1}{r_{imt} + jx_{imt}} = y_{mit} \quad (III-4)$$

L'admittance de transformateur est exprimée par :

α : rapport de transformation.

r_{imt} : résistance du transformateur placé entre les i et m.

x_{imt} : réactance du transformateur placé entre les nœuds i et m.

En négligeant les pertes, le transformateur peut être représenté par la réactance x_{imt} .

III.1.2.3.Charge

Les charges du réseau sont représentées par des admittances (ou impédances) passives reliées à la terre. Elles sont obtenues à partir de la relation suivante :

$$y_{ck} = \frac{P_{dk} - jQ_{ck}}{|V_k|^2} \quad (III-5)$$

Où :

Y_{ck} : admittance de la charge au nœud i.

P_{ck} : puissance active injectée au nœud i.

Q_{ck} : puissance réactive injectée au nœud i.

V_{ck} : module de la tension au nœud i.

Les valeurs P_{ck} , Q_{ck} et V_{ci} sont obtenues par l'étude de la répartition de puissance en régime permanent.

III.2.Modélisation du SVC

III.2.1.Modélisation du SVC par une admittance shunt

Le dispositif SVC peut être modélisé par une admittance shunt variable (figure III-4). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire (le compensateur est considéré comme étant idéal) [24]:

$$y_{svc} = jB_{svc} \quad (III-6)$$

La susceptance peut être de nature capacitive ou inductive afin respectivement de fournir ou d'absorber, de la puissance réactive.

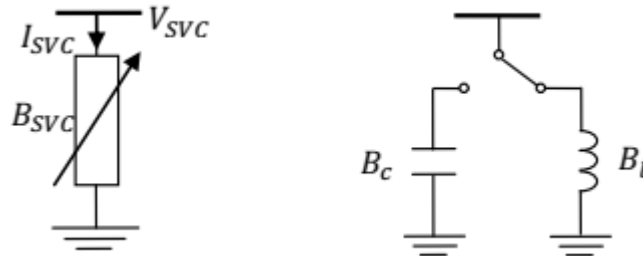


Figure.III-4:Modélisation du SVC.

Les paramètres des SVC sont exprimés sous forme de puissance réactive absorbée à la tension nominale. La correspondance avec la susceptance est donnée par la relation :

$$Q_{SVC} = -V_N^2 \cdot B_{SVC} \quad (III-7)$$

Le signe « moins » indique que le SVC fournit de la puissance réactive au système lorsqu'il est capacitif alors qu'il en consomme lorsqu'il est inductif.

III.2.2.SVC installé dans un nœud du réseau

Lorsqu'ils sont connectés aux nœuds du réseau, les SVC sont généralement placés aux endroits où se trouvent des charges importantes ou varient fortement. Ils peuvent également être positionnés à des nœuds où le générateur n'arrive pas à fournir ou absorber suffisamment de puissance réactive pour maintenir le niveau de tension désiré.

Lorsqu'un SVC est présent au nœud, seul l'élément de la matrice admittance nodale est modifié, l'admittance du SVC lui étant additionnée [48]:

$$Y'_{ii} = Y_{ii} + y_{SVC} \quad (III-8)$$

La figure III-5 illustre le cas d'un SVC placé en un nœud constituant une des extrémités d'une ligne.

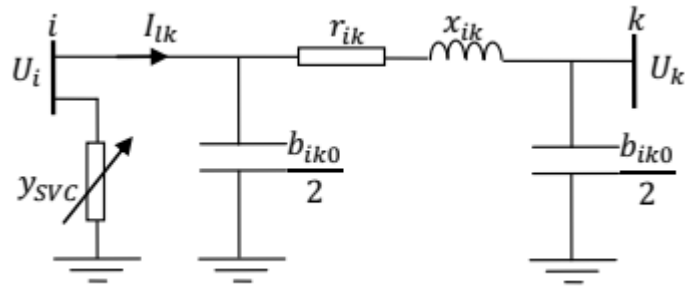


Figure.III-5:SVC placé dans un nœud.

III.3.Modélisation du STATCOM

III.3.1.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-6) en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecte ce dispositif:

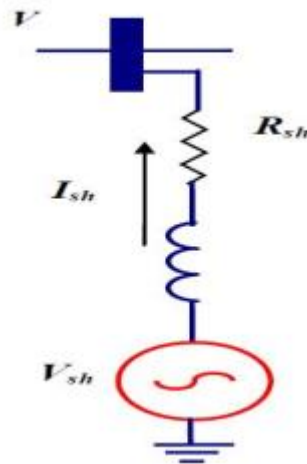


Figure.III-6:Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau.

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-6) 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.[49] [50]

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 :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (III-9)$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bach} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{shh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bhh} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (III-10)$$

En appliquant cette écriture sur l'équation (III-9) on aura:

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{jy} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} e^{jy} = R_{sh} \bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{jy} + L_{sh} \frac{d}{dt} (\bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{jy}) \quad (III-11)$$

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

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (III-12)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (III-13)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III-14)$$

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

III.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des éléments d'un réseau électrique, un SVC et un STATCOM dans certaines fonctions pour contrôler et régler la tension par la compensation de l'énergie réactive. Les résultats de la simulation de fonctionnement de SVC et STATCOM couplé dans un réseau électrique seront traités en détail dans le chapitre prochain.

Chapitre IV

Simulation et résultats.

IV.Introduction

Le réseau électrique est exposé aux différentes perturbations telles que : l'augmentation de la charge, augmentation ou diminution de la tension,... Les « STATCOM et SVC » sont utilisés pour rendre l'équilibre de tension au réseau, ou compenser la puissance réactive. Dans ce chapitre, nous allons étudier le comportement dynamique du « STATCOM et SVC » vis à vis des perturbations de tension et de puissance réactive. Le comportement du « STATCOM et SVC » sera vérifié par des simulations en utilisant le réseau de Kundur 4 machines 11 neuds sur MATLAB/Simpower.

IV.1.Description du système étudié

Le réseau de Kundur 4 machines 11 neuds est présenté sur le schéma bloc de la figure IV.1

- Il comprend deux zones chacune est équipée de deux générateurs ;
- Dans la zone 1, deux générateurs synchrones ;
- Dans la zone 2, deux générateurs synchrones.

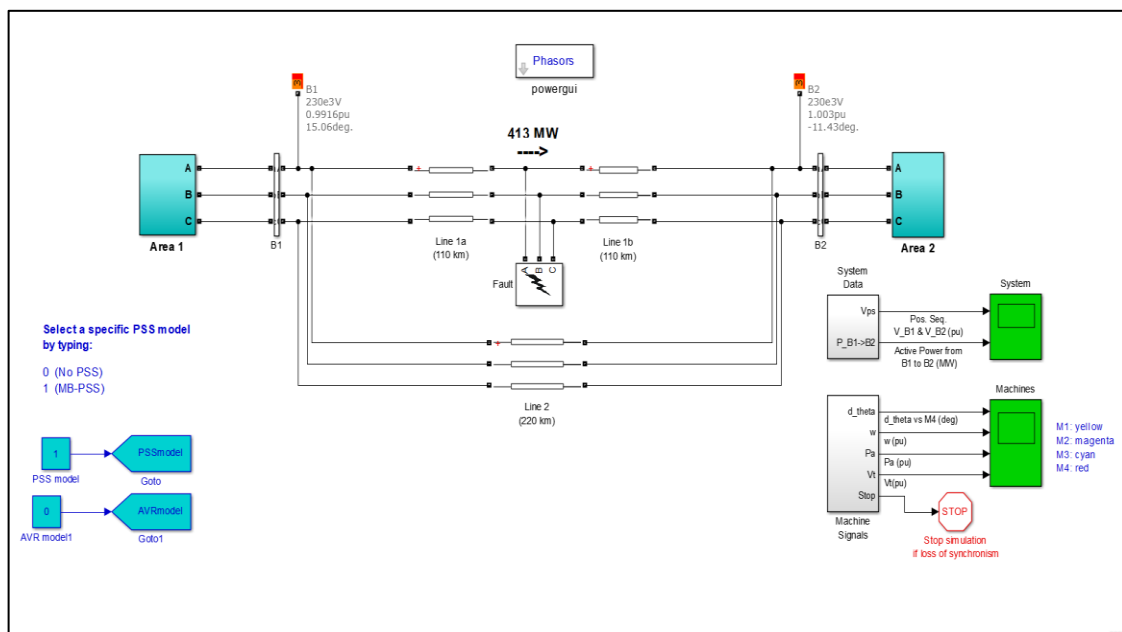


Figure.IV-1:Schéma bloc du réseau.

IV.2. Les résultats Compensations classiques (PSS / AVR)

IV.2.1. Premier cas réseau sain

IV.2.1.1. Réseau sans régulation classique AVR et PSS

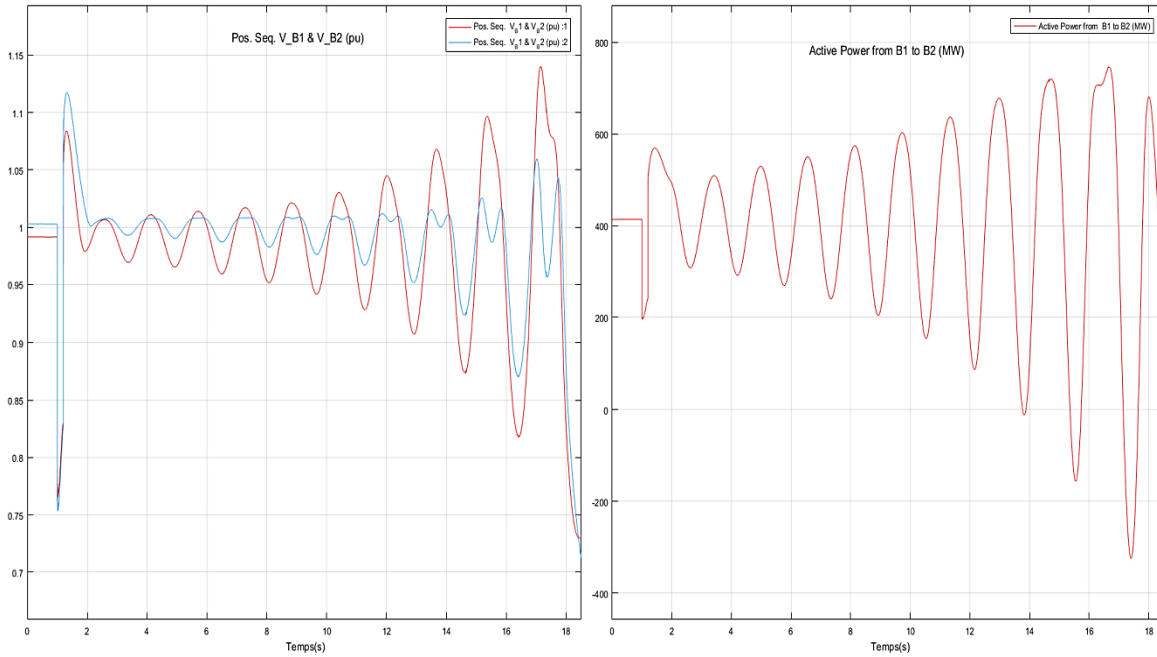


Figure.IV-4: les courbes de la puissance active avec la tension.

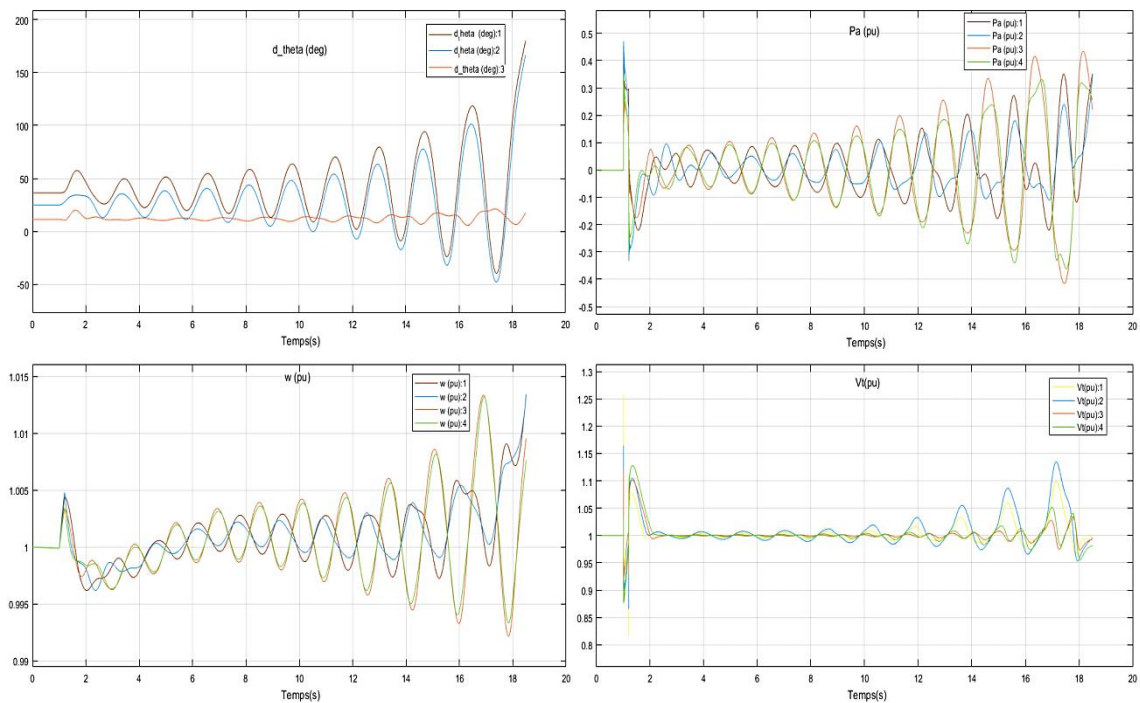


Figure.IV-5: les courbes de l'angle, Puissance, tension et vitesse des machines.

➤ **Interprétation des résultats**

Comme il est montré ci-dessus le réseau étudié perd sa stabilité sans régulation. Donc ce réseau nécessite une régulation de tension dans une plage acceptable (généralement de 0,9 à 1,1 pu)

IV.2.1.2. Réseau avec régulateur de tension AVR:

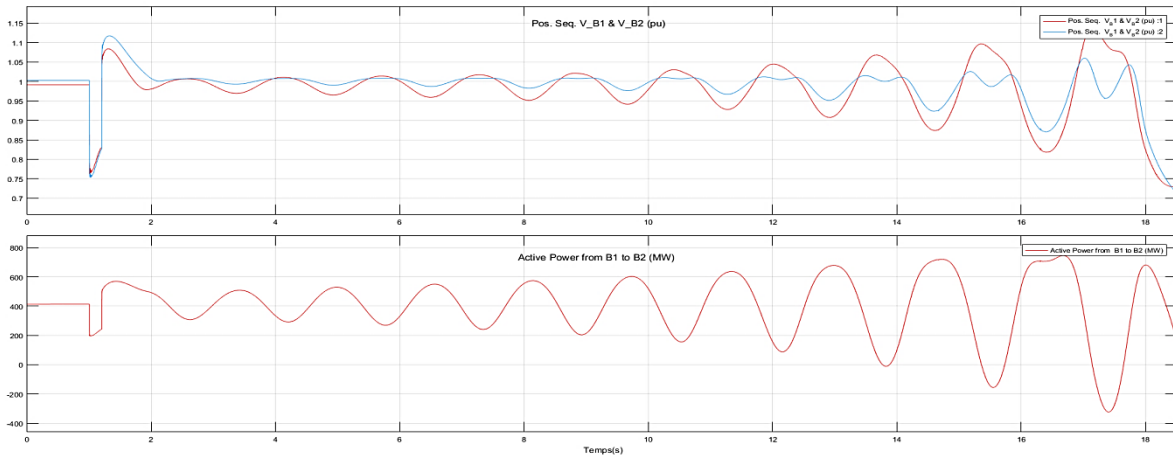


Figure.IV-6: les courbes de la puissance active avec la tension.

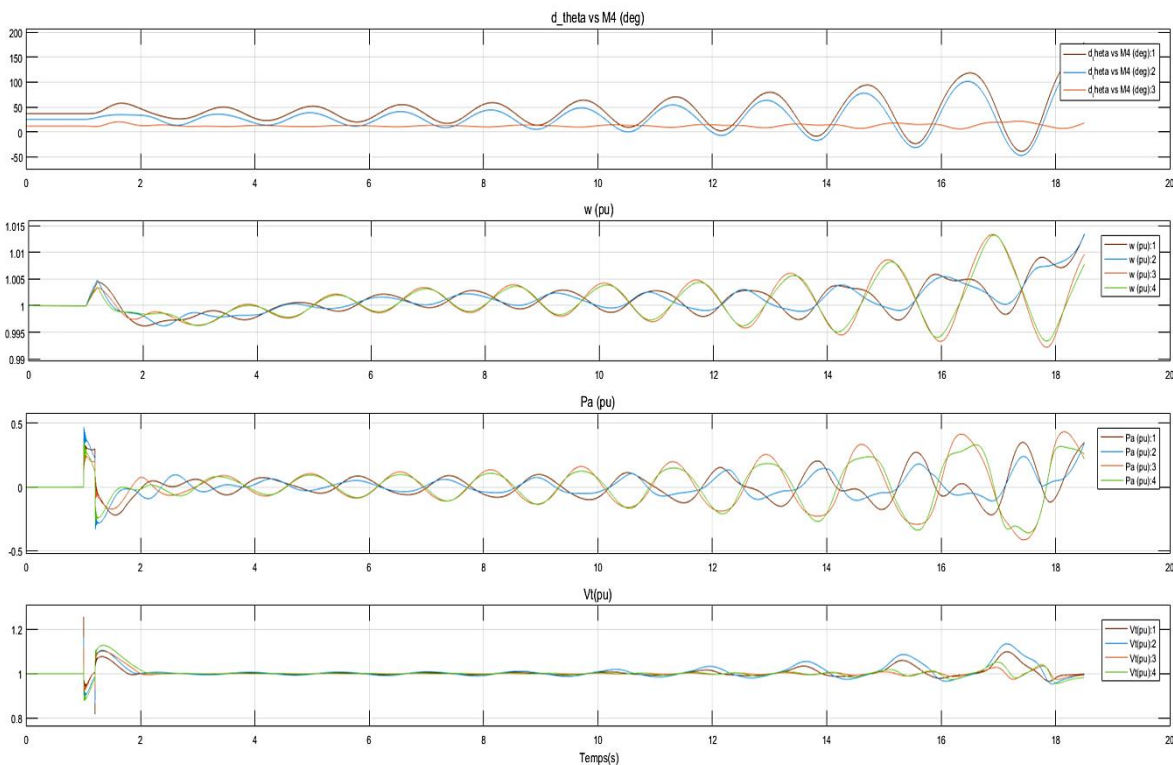


Figure.IV-7: les courbes de l'angle, Puissance, tension et vitesse des machines.

➤ **Interprétation des résultats**

Dans une situation non régulée, le système devient instable. Après l'apparition du défaut ; Par conséquent, nous vérifierons que le système maintient sa stabilité en ajoutant un régulateur de tension. Nous simulons une panne qui dure plus longtemps qu'un temps critique. La régulation de tension est de type IEEE. Les Figure IV-6 et figure IV-7 ci-dessus montrent que l'introduction du régulateur de tension améliore la stabilité du réseau. Le système d'excitation réagit en fournissant plus de puissance réactive. Si la tension au point de raccordement de la machine tend à augmenter, le système d'excitation en absorbant de la puissance réactive.

IV.2.1.3.Réseau avec AVR et PSS

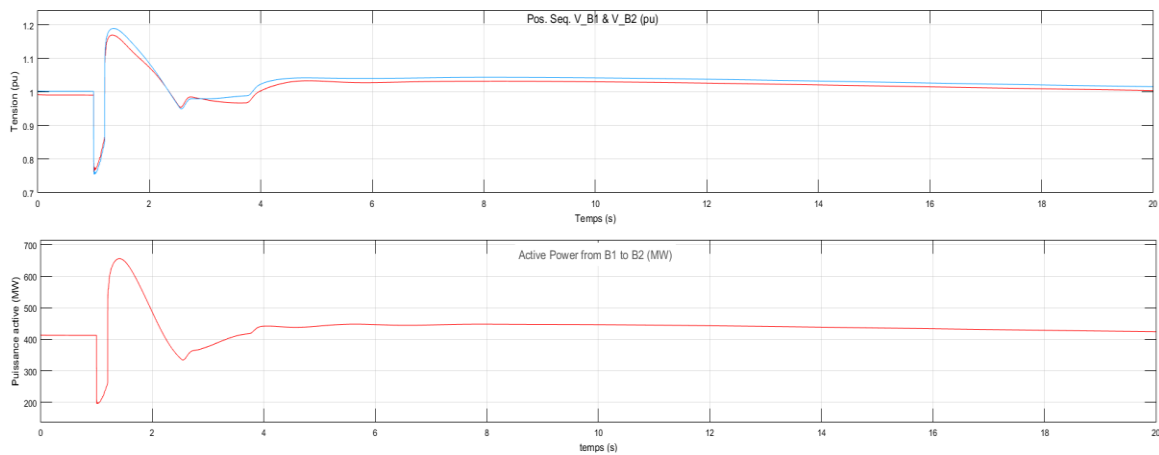


Figure.IV-8: les courbes de la puissance active avec la tension.

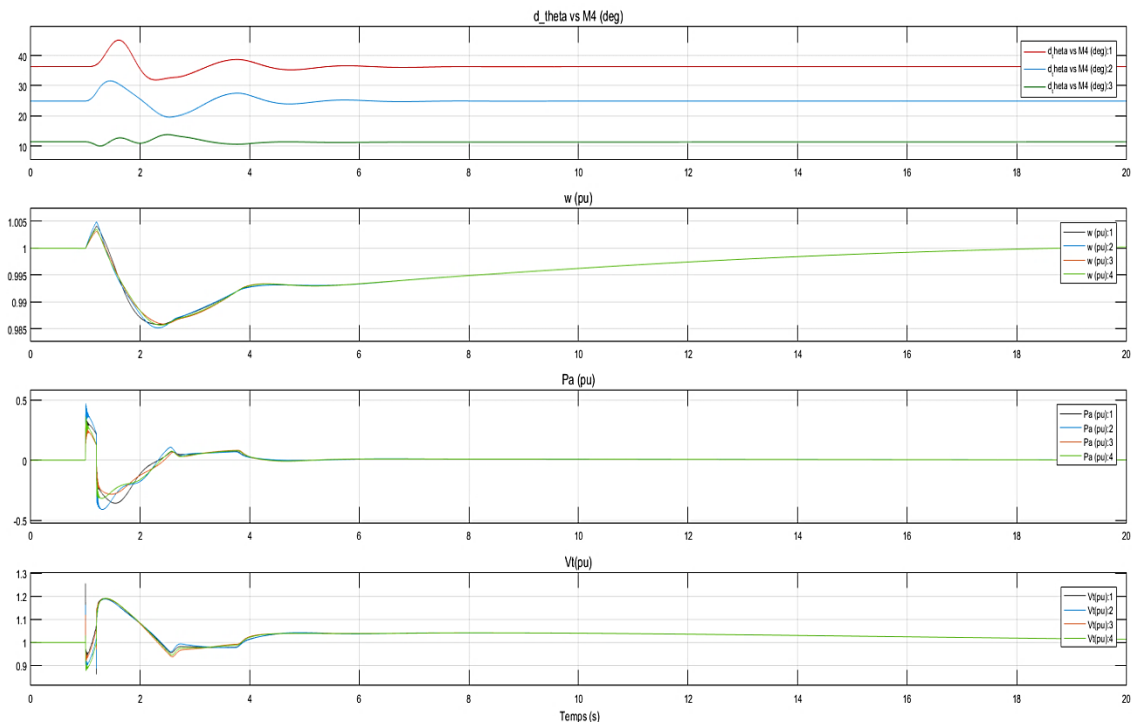


Figure.IV-9: les courbes de l'angle, Puissance, tension et vitesse des machines.

➤ *Interprétation des résultats*

Le problème d'oscillations qui apparait dans le réseau voir figures IV-8 et IV-9 est résolu en ajoutant au générateur un contrôleur spécifique appelé : (Power System Stabilizer (PSS)) (Stabilisateur de système de puissance). Ce contrôleur détecte les variations de vitesse de rotor ou de puissance électrique du générateur et applique un signal, adapté, à l'entrée du régulateur de tension (AVR). Le générateur peut ainsi produire un couple d'amortissement additionnel qui compense l'effet négatif du système d'excitation sur les oscillations. La régulation de tension combinée au PSS est plus performante que la régulation de tension seule.

IV.2.1.4. Deuxième cas réseau avec défaut

IV.2.1.5. Réseau avec régulation classique AVR et PSS

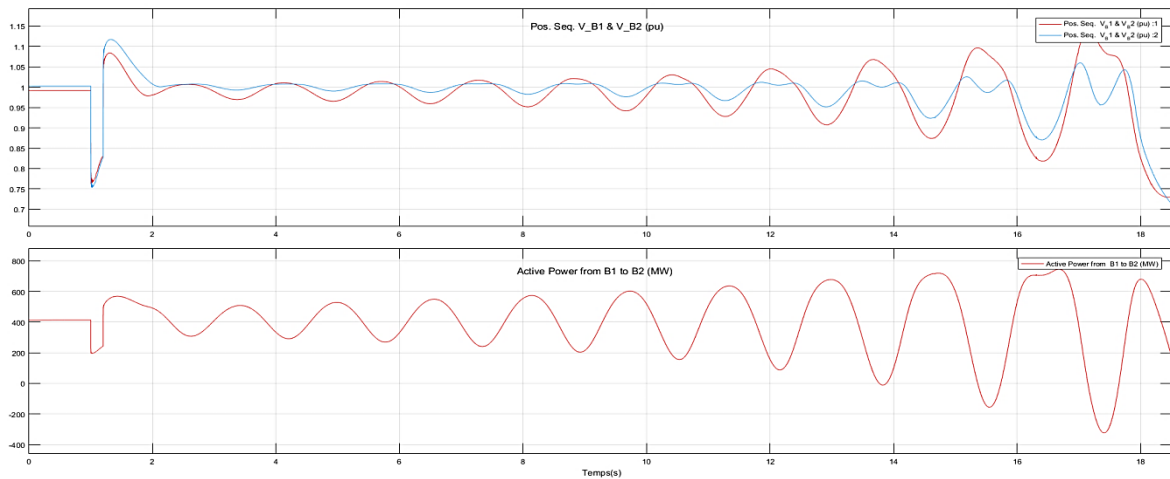


Figure.IV-10: les courbes de la puissance active avec la tension.

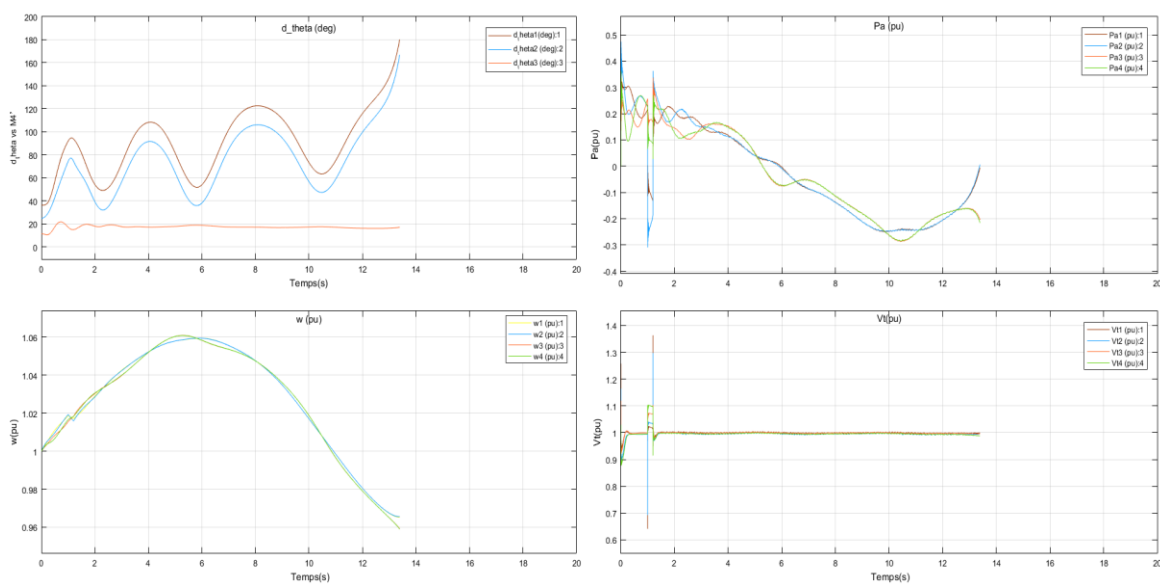


Figure.IV-11: les courbes de l'angle, Puissance, tension et vitesse des machines.

➤ *Interprétation des résultats*

Dans cette partie de travail nous avons considéré un défaut de type court-circuit. Si le générateur garde sa stabilité après un défaut triphasé, il sera toujours stable pour tout autre défaut, alors il est évident que le cas le plus défavorable est le défaut de court -circuit triphasé, car la puissance du générateur sera nulle.

Nous avons augmenté la durée du court-circuit de 100 ms à 200 ms. À partir d'un certain temps le système perd sa stabilité malgré la présence des régulateurs AVR et PSS.

On constate que même avec une régulation AVR et PSS, les perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension.

On remarque qu'à partir de la douzième seconde de la simulation, le système de contrôle combiné AVR et PSS ne peut plus maintenir la stabilité du système. L'ajout d'un FACTS s'est avéré nécessaire.

IV.3. Les résultats Les dispositifs FACTS

IV.3.1. Réseau avec défaut

IV.3.1.1. Réseau avec SVC

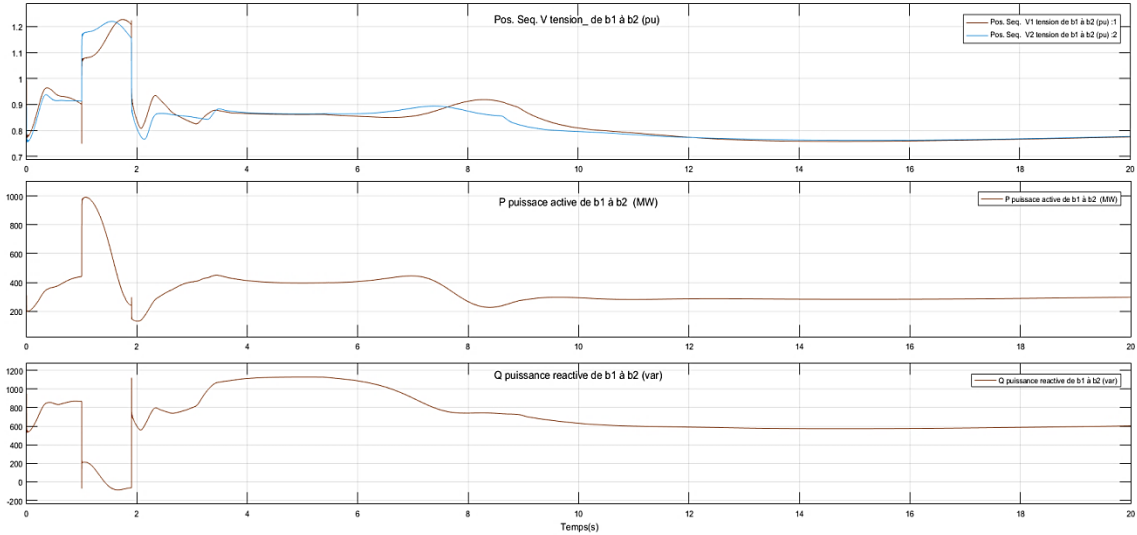


Figure.IV-12: les courbes de la puissance active avec la tension.

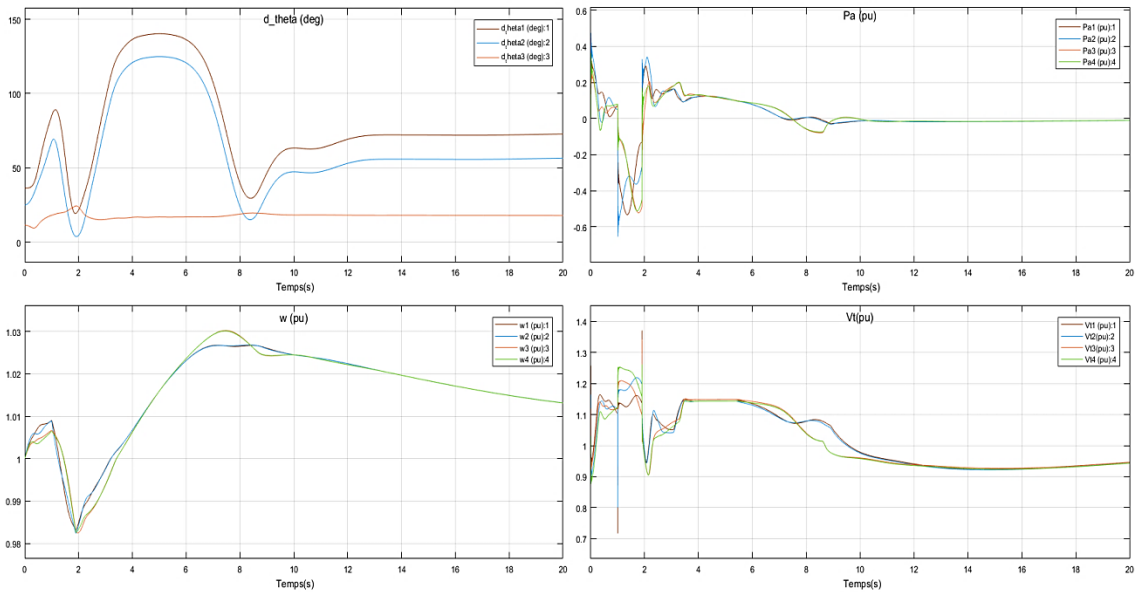


Figure.IV-13: les courbes de l'angle, Puissance, tension et vitesse des machines.

IV.3.1.2. Réseau avec STATCOM

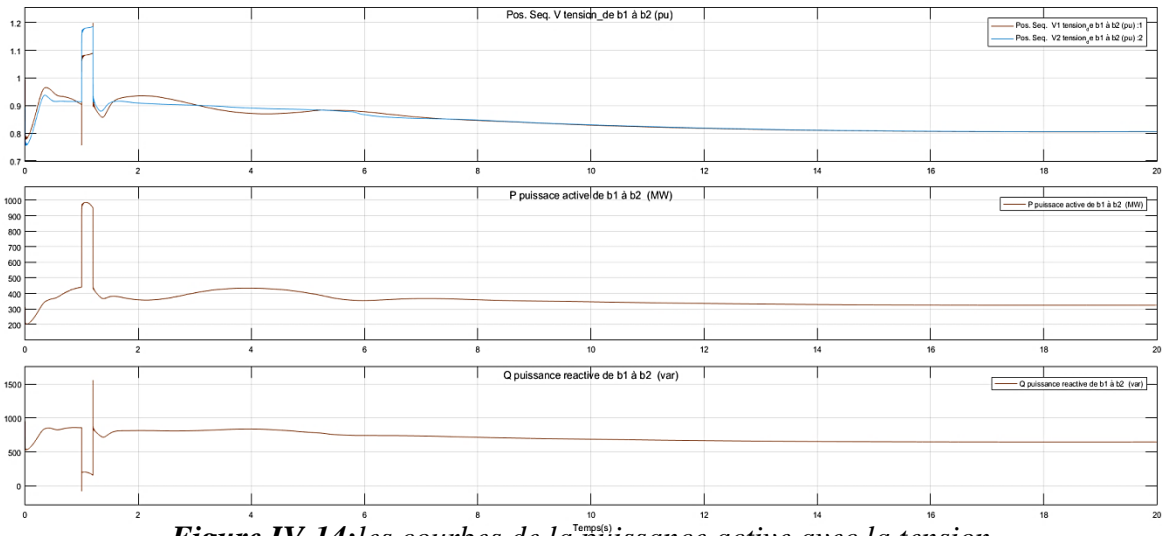


Figure.IV-14: les courbes de la puissance active avec la tension.

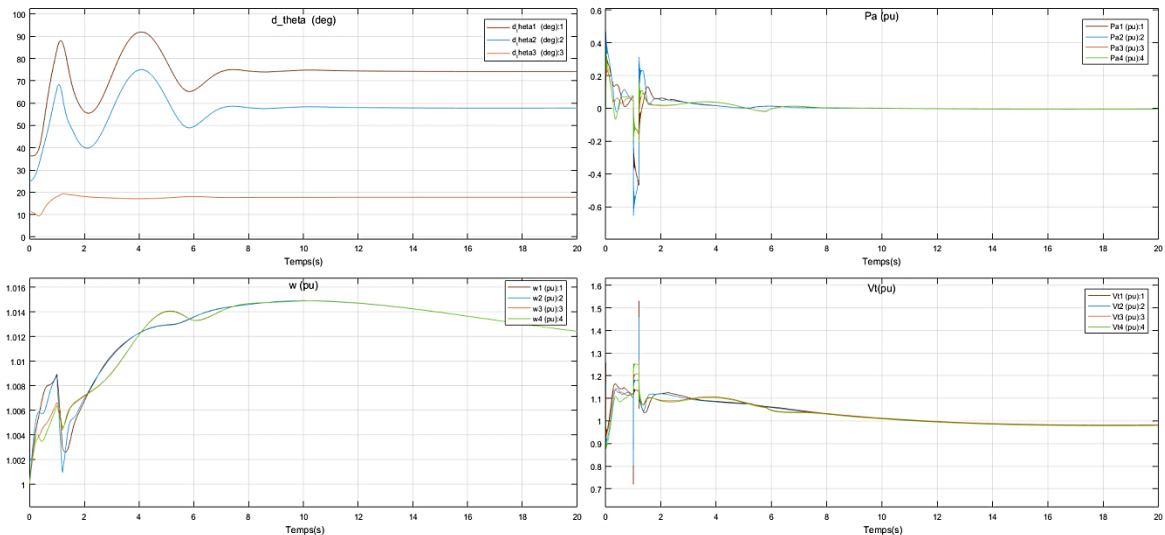


Figure.IV-15: les courbes de l'angle, Puissance, tension et vitesse des machines.

➤ **Interprétation générale**

En régime permanent, il existe un équilibre entre la puissance mécanique d'entrée et la puissance électrique de sortie de chaque générateur synchrone dans un système interconnecté qui conduit à un fonctionnement à vitesse constante. Lorsque le système est perturbé, Par exemple en cas de court-circuit, cet équilibre est rompu, entraînant une accélération ou une décélération des rotors des machines. Si la machine connectée au Bus 1 tourne plus rapidement que l'autre connectée au Bus 2, Lorsque le déphasage augmente au-delà d'une certaine limite, le transfert de puissance diminue, ce qui conduire à un fonctionnement instable. Les dispositifs FACTS peuvent résoudre le problème de stabilité en contrôlant en temps réel l'amplitude de la tension et/ou le déphasage. Contrôle rapides et robustes.

Dans les conditions normales d'exploitation du réseau (niveau de charge moyen), les différences de comportement entre le SVC et le STATCOM sont peu significatives. Par contre, lorsque l'on approche de l'écroulement du réseau, ou que celui-ci fait face à une contingence majeure, l'action du STATCOM est alors nettement plus efficace que celle du SVC car le réseau est beaucoup plus performant en qualité de stabilité de tension, lorsqu'il est mené d'un STATCOM.

IV.4.CONCLUSION

Nous avons vérifié le rôle des dispositifs FACTS comme le SVC et le STATCOM dans l'amélioration de la stabilité, l'amortissement des oscillations de puissance et la régulation de la tension. En fournissant une énergie réactive afin de stabiliser la tension après l'apparition d'un défaut, sont considérés comme des facteurs d'amélioration d'importance capitale.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous sommes attachés à montrer l'intérêt que peut susciter un système flexible de transport à courant alternatif (FACTS) tels que SVC et STATCOM, et l'impact positif qu'ils peuvent avoir sur la stabilité d'un réseau électrique perturbé.

La première étape, de ce travail est consacrée à la description générale sur les réseaux de transport d'énergie électrique.

La deuxième étape, nous avons commencé par des définitions sur réseau électrique, puissance réactive, qualité d'énergie et Classification des différents types de perturbations. Ensuite l'étude de la stabilité des réseaux électriques constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux et nous avons fini par une étude des compensateurs classiques et modernes ainsi quelques dispositifs FACTS.

La troisième étape, de modélisation, nous avons présenté le modèle mathématique d'un SVC, STATCOM et chaque élément du réseau.

La quatrième étape, nous avons montré l'apport d'un SVC et un STATCOM. Sur le réseau de Kundur,

Les résultats de la simulation sur l'environnement matlab /simpower obtenus se résument comme suit.

Le principe est en général d'agir sur la puissance réactive échangée avec le réseau. Si la tension au point de raccordement de la machine tend à diminuer, le FACTS réagit en fournissant plus de puissance réactive. Si la tension au point de raccordement de la machine tend à augmenter, le FACTS réagit en absorbant de la puissance réactive.

Perspective

- Les résultats illustrent que l'installation d'un dispositif FACTS dans le réseau ne pouvait pas conduire à une meilleure sécurité du système et que multi-type de FACTS doivent être placés dans les réseaux électriques pour améliorer la stabilité et réduire les pertes dans le réseau. Cette situation devrait être une étude économique et unecombinaison de FACTS (hybride) par exemple le BTB STATCOM.

Bibliographie

- [1] Dr. AMIR MERAHI, « Analyse des réseaux de transport et de distribution.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: https://elearning.esgee-oran.dz/pluginfile.php/6468/mod_resource/content/1/Cours%20complet%20ARTD%20MERAH%20Amir.pdf
- [2] Benhasna Mekkia et Fahem Mama, « ETUDE DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SECURITAIRE D'UN RESEAU DE TRANSPORT ELECTRIQUE ». [En ligne]. Disponible sur: <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/6957/M%C3%A9moire-E-P-s%C3%A9curitaire-5.3%20%281%29.pdf?sequence=1/>
- [3] BENFICHOUH IMENE et BENDANI SOUAD, « CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE COMPORTEMENT D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT ÉLECTRIQUE EN CAS DE SEISME.pdf », 2018.
- [4] « Generalites Sur Les Reseaux Electriques | PDF ». <https://www.scribd.com/doc/4597291/Generalites-sur-les-reseaux-electriques#download> (consulté le 13 mars 2022).
- [5] Sihem Bouri, « Memoire Online - Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis ». https://www.memoireonline.com/05/08/1081/m_optimisation-production-structure-energie-electrique-colonies-fourmis2.html (consulté le 13 mars 2022).
- [6] nadji morad, « ETUDE D'IMPACT DE L'INTEGRATION DES SOURCES PV DANS LES RESEaux DE DISTRIBUTION D'ENERGIE ELECTRIQUE », USTHB, 2015.
- [7] « Generalites sur les reseaux electriques – Apprendre en ligne ». <https://www.clicours.com/generalites-sur-les-reseaux-electriques/> (consulté le 5 mai 2022).
- [8] Mr LABED Djamel, « Option : Réseaux Electriques », p. 173.
- [9] Brian B Weedy, « Electric Power Systems », p. 514.
- [10] Alejandro ivan aguilar Garcia, « Elements of power system analysis 4th ed by william d stevenson jr », Consulté le: 5 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.academia.edu/35807460/Elements_of_power_system_analysis_4th_ed_by_william_d_stevenson_jr
- [11] « Chapitre 3. Modélisation des lignes électriques - PDF Free Download ». <https://docplayer.fr/amp/202772056-Chapitre-3-modelisation-des-lignes-electriques.html> (consulté le 5 mai 2022).
- [12] Académie de poitiers, « Cours_Transport_et_distribution_Prof.doc », 2011. https://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/doc/Cours_Transport_et_distribution_Prof.doc
- [13] Henri Persoz, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet, et Gérard Santucci, *La planification des réseaux électriques*. france, 1984. [En ligne]. Disponible sur: <https://b-ok.africa/book/16346665/0cc709>
- [14] LEMDANI SOUFIANE, « IMPORTANCE ET NECISSITE DE L'ETUDE DE LA COMPENSATION ET DE SA CONTRIBUTION A LA GESTION DE L'EXPLOITATION DES LONGUES LIGNES DE TRANSPORT A EXTRA HAUT TENSION », UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE MOHAMED BOUD-HIAF, oran, 2010. [En ligne]. Disponible sur: http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=774
- [15] Nabil MANCER, « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) », Université Mohamed Khider – Biskra, ALGERIE, 2012.
- [16] Michel Crappe, *Commande et régulation des réseaux électriques*. 2003.
- [17] Hanene Kouara, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », université de batna, 2006.
- [18] Belguidoum Hocine, « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandés », UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE), SETIF ALGERIE, 2012. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/document/224406699/Belguidoum-Hocine>

Bibliographie

- [19] Laib Hichem et Chaghi Abdelaziz, « Contribution par une nouvelle approche modulaire au filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution », Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2, batna ALGERIE, 2009.
- [20] OUDAYA Mohamed Bachir et DRISSI Mohamed El Hadi, « Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositifs FACTS », Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Saïda ALGERIE, 2017.
- [21] Philippe FERRACCI, " *La qualité de l'énergie électrique " Cahier technique n° 199 Schneider Electric, p 6*, CT 199e. 2001. Consulté le: 15 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.surprises.ch/HT/annexes/CT-199.pdf>
- [22] BAYADI Abdelhafid et FERGANE Manel, « Les Méthodes D'amélioration De La Stabilité Dynamique Dans Les Réseaux Electriques », UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE), SETIF ALGERIE, 2014.
- [23] HAMLAOUI Yahia et BENNAI Mohammed ali, « Moyens d'amélioration de la stabilité transitoire d'un réseau de transport d'énergie électrique », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, OUARGLA ALGERIE, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/19821/1/BENNAI%20-%20HAMLAOUI-ilovepdf-compressed.pdf>
- [24] HAMADOU Zakaria, « Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique », UNIVERSITE de SETIF 1, SETIF ALGERIE, 2012. [En ligne]. Disponible sur: <https://mmagister.univ-setif.dz/images/facultes/TEC/2012/hamadouzakaria.pdf>
- [25] Prabha Kundur *et al.*, « IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, « Definition and Classification of Power System Stability », IEEE Trans. On Power Systems », p. 1387-1401, sept. 2004.
- [26] BAZA HAMMOUMr. Dahbi Hassene et KASMI ABDELMALEK, « Contribution à la stabilisation d'un réseau électrique.pdf », UNIVERSITE d'ADRAR, ADRAR ALGERIE, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/4793/1/Contribution%20%C3%A0%20la%20stabilisation%20d%E2%80%99un%20r%C3%A9seau%20%C3%A9lectrique.pdf>
- [27] Boukadoum Aziz, « CONTRIBUTION À L'ANALYSE ET LA REDUCTION DE LA POLLUTION HARMONIQUE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, ANNABA ALGERIE, 2007. [En ligne]. Disponible sur: <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/05/These-Magister-Aziz-Boukadoum.pdf>
- [28] ZITOUNI Fares, « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS », UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE), SETIF ALGERIE, 2010. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/2376/1/Memoire.pdf>
- [29] BENDECHECHE Nora, « Influence combinée des UPFC et des PSS sur la stabilité transitoire des réseaux électriques », UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF, SETIF ALGERIE, 2011. Consulté le: 9 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/1192/1/Memoire.Magister.Nora.Bendecheche2011fin.pdf>
- [30] FERGANE Manel, « Les Méthodes D'amélioration De La Stabilité Dynamique Dans Les Réseaux Electriques », UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF, SETIF ALGERIE, 2014.
- [31] Rabah Benabid et Mohamed Boudour, *Amélioration de la stabilité de tension dans les réseaux électrique*, Editions universitaires europeennes EUE. 2014.
- [32] CHOK' BEN SALAH BELHAD J AHMED, « CONTRIBUTION À L'ANALYSE DE LA STABILITÉ STATIQUE DE LA TENSION », de montréal, 1996. [En ligne]. Disponible sur: https://publications.polymtl.ca/6938/1/1996_BelhadjAhmed.pdf
- [33] Sami Repo, « On-line Voltage Stability Assessment of Power System — An Approach of Black-box Modelling », *undefined*, oct. 2001, Consulté le: 9 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur:

- <https://www.semanticscholar.org/paper/On-line-Voltage-Stability-Assessment-of-Power-%E2%80%94-An-Repo/54379509b359bddaa679d5a1dc40f62090ceb983>
- [34] BOUTABA Samia, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC », Université Hassiba Ben Bouali Chlef, CHLEF ALGERIE, 2009. [En ligne]. Disponible sur: http://bu.univ-chlef.dz/doc_num.php?explnum_id=414
- [35] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003. [En ligne]. Disponible sur: http://docnum.univ-lorraine.fr/prive/SCD_T_2003_0106_GHOLIPOUR_SHAHRAKI.pdf
- [36] AMIAR Adel, « Apport du STATCOM et du SSSC (Static Synchronous Series Compensator) à l'amélioration du comportement des réseaux électriques », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA, ANNABA ALGERIE, 2016.
- [37] Michel Mathey, « « Les systèmes de réglage des turbines à vapeur de grandes puissances Alsthon », Revue générale d'électricité, 12/85, pp.949-959 », 1995.
- [38] K.R. Padiyar et H.V. SaiKumar, « Investigations on Strong Resonance in Multimachine Power Systems With STATCOM Supplementary Modulation Controller », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, n° 2, p. 754-762, mai 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873405.
- [39] Narain .G. Hingorani et Laszlo Gyugyi, « "Understanding FACTS", IEEE Press.NewYork », p. 448, 2000.
- [40] J.C. Passelergue, « "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'INPG », nov. 1998.
- [41] Sevnghwon AN et Thomas X GERDA, « UPFC ided transformer model Schod of electrical and computer Engineering Oklahoma state university », novembre1998..
- [42] *electrotechnique théodore wildi .pdf*, 3^{ème}. 1987.
- [43] « Opérateur du système électrique Algérien : Schéma prévisionnel du système de production-transport d'électricité national à l'horizon 2014 mise à jour », janv. 2014.
- [44] M.H. Haque, « Damping improvement by FACTS devices: A comparison between STATCOM and SSSC », *coek.info*, M.H. Haque. <https://coek.info/pdf-damping-improvement-by-facts-devices-a-comparison-between-statcom-and-sssc-.html> (consulté le 16 mai 2022).
- [45] C- Angeles, « CAMACHO (Univ of GLASGOW) – CR – FUERTE – ESQUIVEL (Univ of MICHOCAN) - A three phase UPFC model for power control in unbalanced transmission network », janv. 2000.
- [46] Brogan W.L., « Control Systems, The Electric Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton ».
- [47] Gerbex Stéphane, « Métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique , Thèse De Doctorat. », Université de Lausanne, EPLF, 2003. [En ligne]. Disponible sur: <https://infoscience.epfl.ch/record/33218?ln=fr#record-files-collapse-header>
- [48] R. HAIMOUR, « Mémoire de Magistère« Contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique » », Département de génie électrique, Ecole Normale Supérieure de l'enseignement technologique d'ORAN, ALGERIE, 2009.
- [49] S. Fares, B. Houari, et B. Boubekour, « Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif », p. 75.
- [50] VORAPHONPIPUT Nitus et CHATRATANA Somchai, « "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition », 2005.

ملخص:

توازن الشبكة الكهربائية هو فكرة إضافة أحد أنظمة نقل الطاقة المرنة FACTS لضمان التوازن. بأفضل تكلفة لسلوكيات وأفعال جميع المستخدمين المرتبطين بالمستهلك المنتج وكذلك أولئك الذين هم في نفس الوقت. الهدف هو التأكد من أن النظام الكهربائي مستدام ومربح مع خسائر منخفضة ومستويات عالية من الأمن والموثوقية وجودة التوريد. المساهمة الرئيسية لهذه الأطروحة هي تأثير نظامي SVC: FACTS (المعوض المتغير الثابت) و/STATCOM (المعوض المتزامن الثابت).

كلمات مفتاحية: توازن الشبكة الكهربائية، أنظمة النقل المرنة، النظام الكهربائي، SVC، STATCOM

Résumé :

La balance du réseau électrique est l'idée d'ajouter d'un des systèmes de transmission d'énergie flexible FACTS pour assurer l'équilibre La stabilité étant admise, Il serait intéressant à étudier le problème de la répartition des charges entre les alternateurs et d'intégrer aux meilleurs couts les comportements et les actions de tous les utilisateurs qui y sont reliés producteur consommateur ainsi que ceux qui sont les deux à la fois. L'objectif est d'assurer au système électrique d'être durable et rentable avec des pertes faibles et avec des niveaux élevés de sécurité de fiabilité et de qualité de fourniture. La contribution principale de ce mémoire est l'impact de deux systèmes FACTS : le SVC (*Static Var Compensator*) et le STATCOM (*Compensateur Statique Synchrone*).

Mots clés: La balance du réseau, FACTS, SVC, STATCOM, La stabilité, système électrique.

Abstract :

The balance of the electrical network is the idea of adding one of the flexible energy transmission systems FACTS to ensure the balance The stability being admitted, it would be interesting to study the problem of the distribution of the loads between the alternators and to integrate at the best cost the behaviors and actions of all the users who are connected to it producer consumer as well as those who are both at the same time. The objective is to ensure that the electrical system is sustainable and profitable with low losses and with high levels of security, reliability and quality of supply. The main contribution of this thesis is the impact of two FACTS systems: the SVC (*Static Var Compensator*) and the STATCOM (*Static Synchronous Compensator*).

Key words : The balance of the electrical network, FACTS, SVC, STATCOM, the electrical system.