

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux électriques et haute tension

THÈME

**Contribution d'un STATCOM à la
stabilisation des réseaux électriques**

**Préparé par : Meme
Bachiri Nassria
Bouchenafa Zohra**

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | Grade | Qualité |
|-------------------------|--------------|----------------|
| Mr : M.Moudjahed | Pr | Président |
| Mr : M.Chaalal | MAA | Examineur 1 |
| Mme : M.bedoui | MAA | Examineur 2 |
| Mme : K.belahcel | MAA | Encadreur |

**PROMOTION
2017 /2018**

R remerciement

Allah le bénéfique soit loué et qu'il nous guide sur la bonne voie

Ainsi nous remercions notre Encadreur Mme Belhacel Kheira pour tous ses conseils et ses orientations pour la réalisation de ce travail.

Nos remerciements et parfaite gratitude à Monsieur M.Moudjahed pour le grand honneur d'avoir accepté d'être président du jurys.

Nos vifs remerciements Vont également à monsieur M.Chaalal et Mme M. Bedoui d'avoir accepté d'examiner notre travail .Ainsi que tous nos enseignants du département de génie électrique

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux corps professionnel et administratif de la faculté des sciences appliquées pour la qualité et richesse de leurs enseignements et qui déploient le grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisées.

A tous ceux qui ont aidé de près ou de loin.



Dédicaces

Au meilleur des pères

A ma très chère maman

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté

A qui je dois tout

A ma sœur et ses filles

Amina et Meriem

Sans oublier Hamza

A mes très chers frères

A toute ma famille

A ma binôme Zohra et toutes mes amies Sara, Ikram, Sara, Hajira, Asma, Fatima, Amra

Et pour tous ceux qui me connaissent ; sans oublier la promo du réseau électrique

A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A tous ceux qui me sont chers

(Nina)



Dédicaces

Avant tout à la mémoire de ma chère mère Allah yerahamha.

C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été une source D'inspiration et de volonté ;

A mon père pour leurs encouragements et conseils et leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour m on éducation, mon instruction et pour me voire atteindre ce but ;

Je le dédie à mes très chers frères Djilali et Hadj et mes soeurs Halima, Lalia, Naima et ses maris et leurs enfants, sans oublier Fatiha et Reguia

A toute ma grande famille BOUCHENAFa et tous mes chers cousins et cousines ;

Une dédicace à ma binôme Nassria et tous mes amis : Djihad, Mima, Samah , karima , Mimouna, Houda ,Lalia, Nadia ,souad ,Gania et fatima....,Et pour tous ceux qui me connaissent; sans oublier tous la promo du réseaux électriques.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à Tous ceux que j'aime et je respecte.

ZOUZOU

Table des matières

Chapitre I :

| | |
|---|-----------|
| I.1. Introduction | 1 |
| I.2. Définition de la stabilité | 1 |
| I.3. Classification de la stabilité | 1 |
| I.3.1. Stabilité de tension | 2 |
| I.3.1.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations | 3 |
| I.3.1.2. Stabilité de tension aux petites perturbations | 3 |
| I.3.2. Stabilité de fréquence | 3 |
| I.3.3. Stabilité angulaire | 4 |
| I.3.3.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations | 4 |
| a. Stabilité en régime statique | 4 |
| b. Stabilité en régime dynamique | 4 |
| I.3.3.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire) | 5 |
| I.4. Relation entre la stabilité et la compensation d'énergie réactive | 6 |
| I.5. Différents moyens d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique | 7 |
| I.5.1. Moyens classique | 7 |
| I.5.1.1. Compensation traditionnelles | 7 |
| a. Compensateurs synchrones | 7 |
| b. Batteries de condensateurs | 8 |
| Batteries de condensateurs HT | 8 |
| Batteries de condensateurs MT | 8 |
| I.5.1.2. Les inductances | 8 |
| I.5.1.3. Les PSS (Power System Stabiliser) | 8 |
| I.5.1.4. Les AVR (Automatic Voltage Regulator) | 9 |
| I.6. Moyens modernes (FACTS) | 10 |
| I.7. Conclusion | 11 |

Chapitre II :

| | |
|---|-----------|
| II.1. Introduction..... | 12 |
| II.2. Types des FACTS..... | 12 |
| II.2.1. Compensateurs séries | 13 |
| II.2.2. Compensateurs shunts | 13 |
| II.2.3. Compensateurs hybrides série-shunt | 13 |
| II.3. Applications pratiques des dispositifs FACTS | 14 |
| II.3.1. FACTS et traction ferroviaire | 16 |
| II.3.2. Amélioration du transit de puissance..... | 16 |
| II.4. Fonctionnement des FACTS | 17 |
| II.5. Intégration du stockage et des FACTS | 17 |
| II.6. Contexte Algérien..... | 18 |
| II.7. Avantages et Inconvénients de la Technologie FACTS | 19 |
| II.7.1. Avantages..... | 19 |
| II.7.2. Inconvénients | 19 |
| II.8. Description d'un STATCOM | 20 |
| II.9. Principe de Fonctionnement | 21 |
| II.10. Avantages et Inconvénients du STATCOM | 22 |
| II.10.1. Avantages..... | 22 |
| II.10.2. Inconvénients | 22 |
| II.11. Conclusion | 22 |

Chapitre III :

| | |
|---|-----------|
| III.1. Introduction..... | 23 |
| III.2. Les énergies renouvelables..... | 23 |
| III.2.1. L'énergie hydraulique | 24 |
| III.2.2. L'énergie biomasse | 24 |
| III.2.3. L'énergie solaire..... | 24 |
| III.2.4. L'énergie géothermique | 25 |
| III.2.5. Énergies marines..... | 26 |
| III.3. Historique de l'exploitation de l'énergie éolienne..... | 26 |
| III.4. Énergie éolienne | 28 |
| III.5. Différents types d'éoliennes | 28 |
| III.5.1.Éoliennes à axe vertical | 28 |
| III.5.2. Éolienne à axe horizontal | 29 |
| A / Amont | 29 |
| B / Aval | 29 |
| III.6. Avantages et inconvénients | 30 |
| III.6.1. Avantages..... | 30 |
| III.6.2. Inconvénients..... | 31 |
| III.7. Les Systèmes Hybrides | 31 |
| III.7.1. Classification des systèmes..... | 31 |
| III.7.2. Les composantes d'un système hybride | 31 |
| III.7.3. La structure du système hybride | 32 |
| III.7.4. Les avantages et les inconvénients de SEH..... | 32 |
| A - Avantages | 32 |
| B - Inconvénients | 33 |
| III.8. Conclusion | 33 |

Chapitre IV :

| | |
|--|-----------|
| IV.1. Introduction | 34 |
| IV.2. Architecture du micro-grid..... | 34 |
| IV.3. Le Diesel..... | 35 |
| IV.4. L'éolienne | 36 |
| IV.5. Le STATCOM | 36 |
| IV.6. Principe de fonctionnement du système hybride | 36 |
| IV.7. Scénarios opérationnels..... | 38 |
| IV.7.1. Première Scénario (système sans défaut) | 38 |
| IV.7.2. Deuxième Scénario (système avec défaut sans statcom) | 40 |
| IV.7.3. Troisième Scénario (système avec défaut avec statcom) | 42 |
| IV.8. Résultats de Simulation en detail | 44 |
| IV.8.1. Cas d'un défaut biphasé..... | 44 |
| IV.8.1.1. Fonctionnement sans STATCOM | 44 |
| IV.8.1.2. Fonctionnement avec STATCOM | 46 |
| IV.8.2. Cas d'un défaut triphasé..... | 48 |
| IV.8.2.1. Fonctionnement sans STATCOM | 48 |
| IV.8.2.2. Fonctionnement avec STATCOM | 50 |
| IV.9. Conclusion | 53 |

Liste Des Abreviations

| | |
|----------------|--|
| SVC | Static Var Compensator |
| H.T | Haute Tension |
| B.T | Base Tension |
| THT | Très Haute Tension |
| MT | Moyen Tension |
| PSS | Power System Stabiliser |
| AVR | Automatic Voltage Regulator |
| FACTS | Flexible Alternatif Curant Transmission System |
| IEEE | Institut des Ingénieurs en Electricité et en Electronique. |
| SVC | Static Var Compensator |
| STATCOM | Static Synchronous Compensator |
| TCSC | Thyristor Controlled Series Capacitor Compensator |
| SSSC | Static Synchronous Series Compensator |
| DVR | Dynamic Voltage Restorer. |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistors |
| IGCT | Insulated Gate Commutated Thyristors |
| UPFC | Unified Power Flow Controller |
| IPFC | Inte-line Power Flow Controller |
| BESS | Système de stockage d'énergie Sur batteries |
| HVDC | Hight Voltage Direct Curent |
| MLI | Modulation de largeur d'impulsion |
| TCPAR | Thyristor Controlled Phase Angle Regulator. |
| EP | Electronique de Puissance. |
| WAMs | Wide Area Measurement System. |
| SCADA | Supervisory Control and Data Acquisition Systems. |
| V2G | Vehicle to Grid. |
| EPRI | Electric Power Research Institute |
| SER | Sources d'Energie Renouvelables |
| PHE | Centrale Hydraulique |
| GWEC | Global Wind Energy Council |
| VAWT | Vertical Axis Wind Turbine |
| HAWT | Horizontal Axis Wind Turbine |
| SEH | Système d'Energie Hybride |

Listes des figures

Chapitre I

| | |
|--|----|
| Figure. I.1.Classification de la stabilité des réseaux électriques | 2 |
| Figure. I.2.Classification de la stabilité des réseaux électriques | 6 |
| Figure. I.3.Modèle considéré | 6 |
| Figure. I.4.Moyens d'amélioration de la stabilité | 7 |
| Figure. I.5.Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système..... | 9 |
| Figure. I.6.structure générale d'un système d'excitation statique avec AVR | 10 |

Chapitre II

| | |
|---|----|
| Figure. II.1.Principaux dispositifs FACTS | 14 |
| Figure. II.2.Diagramme schématique des dispositifs FACTS dans les réseaux | 16 |
| Figure. II.3.Puissance transitée entre deux réseaux | 17 |
| Figure. II.4.Réseaux intelligents les solutions d'ABB | 18 |
| Figure. II.5.un dispositifs SVC à la sous station de Naama et deux à Béchar | 19 |
| Figure. II.6.présentation d'un STATCOM..... | 20 |
| Figure. II.7.Structure d'un STATCOM et schéma équivalent | 20 |
| Figure. II.8.structure de base d'un STATCOM couplé au réseau électrique | 21 |
| Figure. II.9.schéma globale d'un STATCOM..... | 22 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| Figure. III.1.Les énergies renouvelables | 23 |
| Figure. III.2.L'énergie solaire thermique | 25 |
| Figure. III.3.L'énergie solaire photovoltaïque | 25 |
| Figure. III.4.Parts des différents SER | 26 |
| Figure. III.5.présente un moulin à vent | 27 |
| Figure. III.6. présentation du Principe de la conversion d'énergie..... | 28 |
| Figure. III.7.Éolienne à axe vertical | 28 |
| Figure. III.8.Voilure bipale | 29 |
| Figure. III.9. Voilure tripale | 29 |
| Figure. III.10. Éolienne à axe horizontal amont | 29 |
| Figure. III.1. Éolienne à axe horizontal aval. | 30 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Figure. IV.1. Structure du micro grid..... | 34 |
| Figure. IV.2. Configuration d'un générateur diesel. | 35 |
| Figure. IV.3. Schema bloc du diesel avec Simulink. | 35 |
| Figure. IV.4. Structure de la ferme éolienne. | 36 |
| Figure. IV.5 .Caractéristiques de l'éolienne..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figure. IV.6. Vitesse de générateur Diesel..... | 38 |
| Figure. IV.7. Puissance mécanique de générateur Diesel..... | 38 |
| Figure. IV.8. La puissance active au jeu de barre B25..... | 39 |
| Figure. IV.9. La puissance réactive au jeu de barre B25..... | 39 |
| Figure. IV.10. La tension V_{abc} au jeu de barre B25..... | 39 |
| Figure. IV.11. La puissance réactive des éoliennes..... | 40 |
| Figure. IV.12. Vitesse de générateur Diesel..... | 40 |
| Figure. IV.13. Puissance mécanique de générateur Diesel..... | 40 |
| Figure. IV.14. La puissance active au jeu de barre B25..... | 41 |
| Figure. IV.15. La puissance réactive au jeu de barre B25..... | 41 |
| Figure. IV.16. La tension V_{abc} au jeu de barre B25..... | 41 |
| Figure. IV.17. La puissance réactive des éoliennes..... | 42 |
| Figure. IV.18. Vitesse de générateur Diesel..... | 42 |
| Figure. IV.19. Puissance mécanique de générateur Diesel..... | 42 |
| Figure. IV.20. La puissance active au jeu de barre B25..... | 43 |
| Figure. IV.21. La puissance réactive au jeu de barre B25..... | 43 |
| Figure. IV.22. La tension V_{abc} au jeu de barre B25..... | 43 |
| Figure. IV.23. La puissance réactive des éoliennes..... | 44 |
| Figure. IV.24. La tension V_{abc} au jeu de barre B25..... | 44 |
| Figure. IV.25. La puissance active et réactive au jeu de barre..... | 45 |
| Figure. IV.26. La puissance active et réactive des éoliennes..... | 45 |
| Figure. IV.27. La vitesse du vent en m/s et la vitesse rotorique des turbines..... | 45 |
| Figure. IV.28. L'angle d'inclinaison de la turbine..... | 46 |
| Figure. IV.29. La tension et La puissance réactive du STATCOM..... | 46 |
| Figure. IV.30. La tension V_{abc} au jeu de barre B25..... | 46 |
| Figure. IV.31. La puissance active et réactive au jeu de barre..... | 47 |
| Figure. IV.32. La puissance active et réactive des éoliennes..... | 47 |

| | |
|--|----|
| Figure. IV.33. La vitesse rotorique des turbines et La vitesse du vent en m/s..... | 47 |
| Figure. IV.34. L'angle d'inclinaison de la turbine..... | 48 |
| Figure. IV.35. La tension et la puissance réactive du STATCOM. | 48 |
| Figure. IV.36. La puissance active et réactive au jeu de barre..... | 48 |
| Figure. IV.37. La tension V_{abc} au jeu de barre B25..... | 49 |
| Figure. IV.38. La puissance active et réactive des éoliennes. | 49 |
| Figure. IV.39. La vitesse rotorique des turbines et La vitesse du vent en m/s..... | 50 |
| Figure. IV.40. L'angle d'inclinaison de la turbine..... | 50 |
| Figure. IV.41. La puissance active et réactive au jeu de barre..... | 50 |
| Figure. IV.42. La tension V_{abc} au jeu de barre. | 50 |
| Figure. IV.43. La puissance active et réactive des éoliennes. | 51 |
| Figure. IV.44. La vitesse rotorique des turbines et La vitesse du vent en m/s..... | 51 |
| Figure. IV.45. L'angle d'inclinaison de la turbine. | 51 |
| Figure. IV.46. La puissance réactive et la tension du STATCOM. | 52 |
| Figure. IV.47. Puissance mécanique de générateur Diesel..... | 52 |
| Figure. IV.48. Vitesse de générateur Diesel. | 52 |

Introduction générale

Introduction

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. A l'avenir il est envisageable que tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles sur un recours accru aux énergies renouvelables.

En outre, l'intégration énergétique des sources renouvelables dans le réseau électrique peut affecter la stabilité du système en raison de leur emplacement non optimal.

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 telles que l'insertion des sources renouvelables. Il faudra donc compléter leur action en mettant en oeuvre des dispositifs électroniques de puissance ayant des temps de réponse courts, connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) pour le contrôle des réseaux [1, 2]. Le développement des dispositifs FACTS a ouvert de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux électriques par action continue et rapide sur les différents paramètres (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux régulées, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Le but de ce travail est d'améliorer la stabilité transitoire des systèmes de puissance en assurant un amortissement des oscillations. Pour atteindre cet objectif, nous proposons une coordination de réglage optimal d'un dispositif FACTS shunt STATCOM. Ceci permet d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations rotoriques et de garantir la stabilité de tension du système

Ce travail s'articule autour de plusieurs axes de préoccupation à savoir :

Un rappel sur la stabilité des réseaux électriques est abordé au premier chapitre. Les différents types de la stabilité ont été cités un aperçu sur les différentes méthodes d'améliorations de la stabilité a été présenté en fin de chapitre.

Le deuxième chapitre présente des concepts de base sur les dispositifs FACTS, leurs nécessités d'application dans les réseaux électriques et leurs différents types, puis on présente

quelques ouvrages comprenant des dispositifs FACTS autour du monde, et on discute l'avantage apporté par ces dispositifs au réseau électrique.

Dans le troisième chapitre, on présente les différentes sources d'énergies renouvelables, en général et l'énergie éolienne en particulier et leurs types puis on présente les systèmes hybrides

Dans le dernier chapitre, des simulations d'un système hybride éolienne-diesel sera élaboré sous l'environnement Matlab/Simulink pour bien démontrer les Performances du système étudié.

Enfin les principaux résultats de ce travail et les perspectives seront données dans une conclusion générale.

Chapitre I

I.1. Introduction

L'accroissement énorme de la demande de l'énergie électrique et les contraintes économiques de construire de nouveaux ouvrages conduisent à l'exploitation des réseaux électriques près de leurs limites de stabilité et de sécurité. En effet, l'instabilité des réseaux électriques présente un problème majeur dans le bon fonctionnement de ces derniers autour du monde. Les perturbations inévitables telles que les courts circuits, les indisponibilités momentanées des lignes de transmission, des générateurs, les transformateurs ainsi que les pertes dans les lignes peuvent affecter le réseau électrique à tout instant et l'amener en dehors de sa zone de stabilité.

I.2. Définition de la stabilité

La stabilité est définie comme la propriété d'un système à retrouver son point de fonctionnement (ou point d'équilibre) après avoir subi une ou plusieurs perturbations .un réseau électrique a en général une stabilité globale qui se manifeste par l'équilibre production consommation.

Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées.[1]

I.3. Classification de la stabilité

Les diverses formes de l'instabilité résultantes ne peuvent pas être correctement compris et efficacement traitées en même temps. En raison de la dimensionnalité élevée et la complexité des problèmes de la stabilité, la classification aide à produire une simplification des conditions, pour analyser des types spécifiques, en employant un degré approprié de détail pour la représentation du système et des techniques analytiques. 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 : [2]

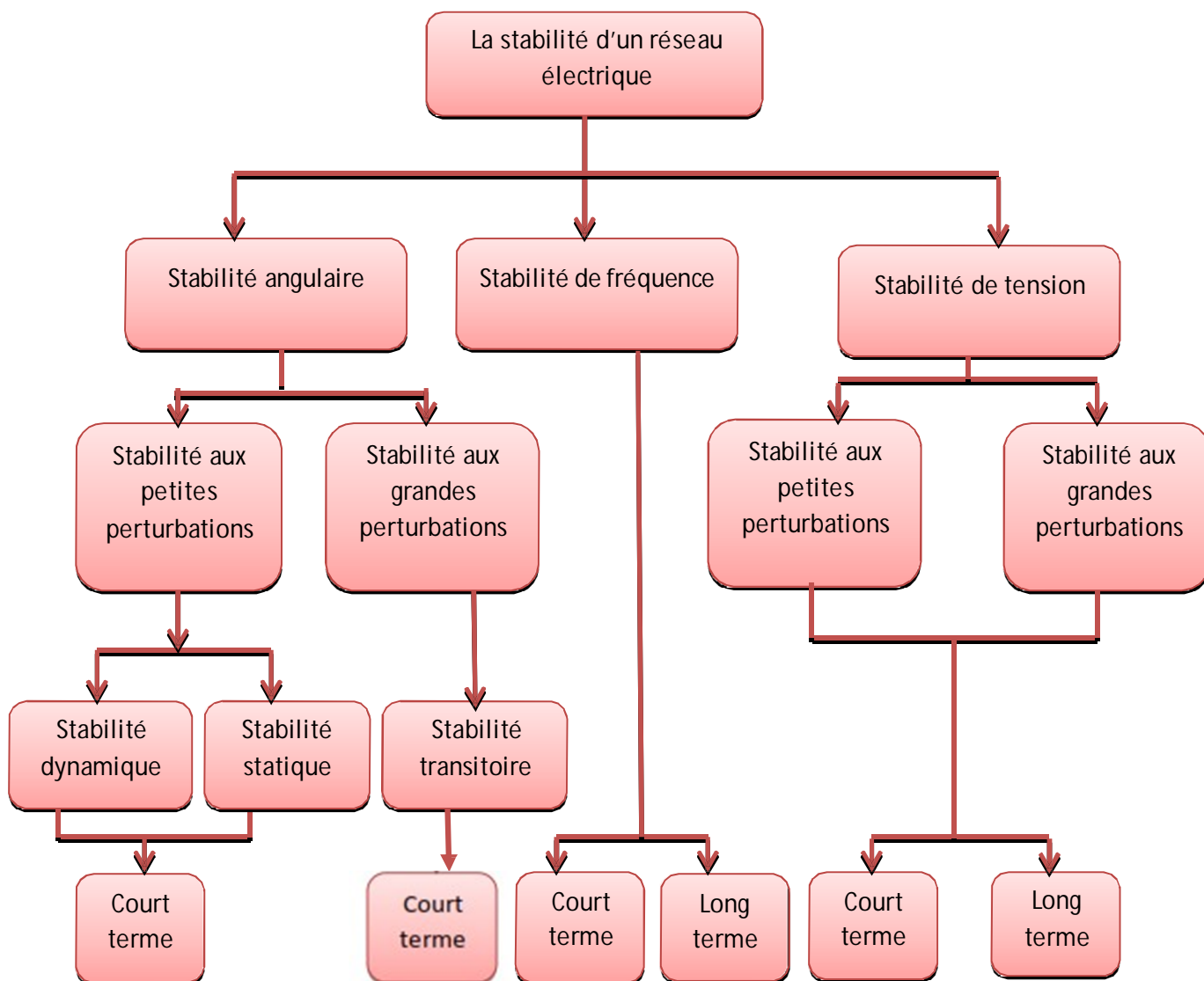


Figure I.1. Classification de la stabilité des réseaux électriques.

I.3.1. Stabilité de tension

La stabilité de tension est la capacité d'un réseau électrique de maintenir la tension de fonctionnement normal dans les limites admissibles à tous les jeux de barres, après avoir été soumis à une perturbation, pour une condition de fonctionnement initiale donnée. Le facteur principal qui cause l'instabilité est l'inaptitude du système électrique de satisfaire la demande de la puissance réactive.

Il est démontré que la majorité des blackouts sont causés par l'instabilité de tension plusieurs changements dans le système de puissance peuvent contribuer à l'instabilité de tension, ce sont par exemple :

- Une augmentation de charge
- Une perte d'une source de puissance réactive (condensateurs, machines synchrones,...).
- Une panne de générateur, une perte d'une charge ou un déclenchement de ligne
- Des générateurs, des condensateurs synchrones, ou des SVCs qui atteignent les limites de puissance réactive

La plupart de ces changements ont des effets significatifs sur la production, la consommation et la transmission de puissance réactive, ainsi sur la stabilité de tension. Par conséquent, des mesures peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité de tension, tels que:

- Un contrôle automatique des condensateurs shunts ;
- Un blocage des régulateurs en charge automatique ;
- Une nouvelle répartition de la génération ;
- Une replanification du fonctionnement des générateurs et des nœuds de commande ;
- Une régulation de tension secondaire ;
- Un plan de délestage.

Il est important de noter que l'instabilité de tension ne se produit pas toujours toute seule. Souvent, l'instabilité de tension et l'instabilité de l'angle de rotor se produisent ensemble, l'une pouvant entraîner l'autre. [3]

Enfin, la stabilité de tension peut être classée en deux catégories : La stabilité de tension aux grandes perturbations et aux petites perturbations :

I.3.1.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations

Le souci dans ce cas est de maintenir des tensions normales aux nœuds de réseau électrique après une grande perturbation. La stabilité est déterminée ici par les caractéristiques du système et de charge, et par les interactions entre les différents dispositifs de commande de tension dans le système.

I.3.1.2. Stabilité de tension aux petites perturbations

Dans ce cas, les caractéristiques de la charge et des dispositifs de commande déterminent la capacité du système à maintenir les tensions équilibrées. [4]

I.3.2. 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 un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée. [5] L'instabilité résultante se produit sous forme d'oscillations de la fréquence soutenue, menant au déclenchement des unités de production et/ou des charges pendant les variations de la fréquence. Le temps qui caractérise les processus et les dispositifs actifs, s'étend de la fraction de secondes à plusieurs minutes. Par conséquent, la stabilité de la fréquence peut être un phénomène à court ou à long terme. [6]

I.3.3. Stabilité angulaire

La stabilité angulaire est définie comme la capacité des générateurs synchrones d'un réseau à maintenir le synchronisme après avoir été soumis à une ou des perturbations.

L'instabilité se traduit par des oscillations angulaires de certains générateurs menant à la perte de leur synchronisme avec les autres générateurs.

La stabilité angulaire est classifiée dans deux catégories : la stabilité des angles de rotor aux petites perturbations et la stabilité des angles de rotor aux grande perturbations, encore appelée stabilité transitoire. [7]

I.3.3.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc. L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor. Pour des petites perturbations, la variation de puissance reste approximativement proportionnelle à la variation de l'angle. Des exemples typiques des petites perturbations peuvent être donnés par des variations de niveau de 10 % de la puissance mécanique appliquée à une machine du système ou sur sa charge,... L'analyse d'un tel système peut être accomplie par la linéarisation du système d'équations différentielles non linéaires. La stabilité du système peut être évaluée par l'analyse des valeurs propres de la matrice d'état du système. [3]

a. Stabilité en régime statique

Le réseau a un Comportement stable, c'est-à-dire que, soumis à de petites perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial ceci avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.

b. Stabilité en régime dynamique

Le réseau est apte à éviter tout régime oscillatoire divergent et à revenir à un état stable acceptable. Ceci inclut l'intervention éventuelle des protections et automatismes divers fonction des perturbations envisagées.

Les études de stabilité dynamique consistent à :

envisager les principaux scénarios critiques tels que court-circuit, perte d'énergie mécanique, perte de source électrique, variation de charge, contraintes de process, prédire le comportement du réseau face à ces perturbations, préconiser les mesures à prendre en exploitation, telles que type de protection, réglage de relais, délestages, configurations... pour éviter les modes de fonctionnement indésirables.

Ces études permettent donc la maîtrise du comportement du réseau considéré, qu'il soit public ou privé, H.T. ou B.T.[8]

I.3.3.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire)

La stabilité transitoire d'un réseau électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer :

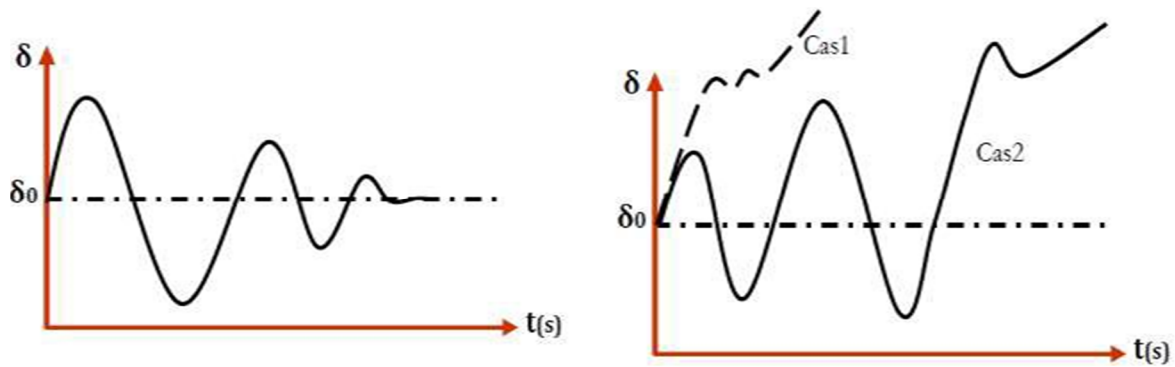
- Les court-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines.
- La perte d'ouvrages.
- La perte de groupes de production, etc.

La stabilité transitoire dépend :

- du type de perturbation.
- de la durée de perturbation.
- du lieu de perturbation.
- de la performance des systèmes protection (relais, ré-enclenchement).

du point de fonctionnement avant défaut. [9]

Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées.



a- Stable

b- instable

Cas1 instable de première oscillation

Cas2 instable de plusieurs oscillations

Figure I.2. Classification de la stabilité des réseaux électriques.

I.4. Relation entre la stabilité et la compensation d'énergie réactive

La puissance réactive Q liée par le déphasage φ entre le courant et la tension :

$$S = P + jQ = VI (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

Seule la puissance active reçue par la charge peut être transformée en énergie mécanique, thermique et électrique.

Quant à la puissance réactive, elle sert à l'aimantation des circuits magnétiques des machines électriques (transformateurs, moteurs) et de certains dispositifs tels que les lampes fluorescentes.

On considère deux nœuds connectés par une impédance Z ($X \gg R$), l'un comme générateur d'une tension V_s et un angle de phase δ et l'autre comme un nœud de puissance infinie d'une tension V_R et un angle de phase fixé à 0°

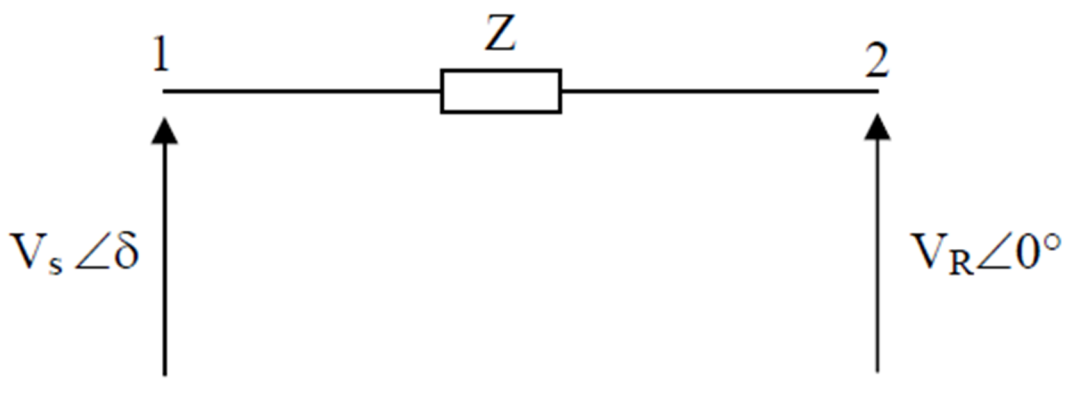


Figure I.3. Modèle considéré.

I.5. Différents moyens d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique

La stabilité peut être améliorée en utilisant des systèmes de contrôle adaptés. Au fil des années, un effort de recherche important était effectué pour une meilleure conception de tels contrôleurs.

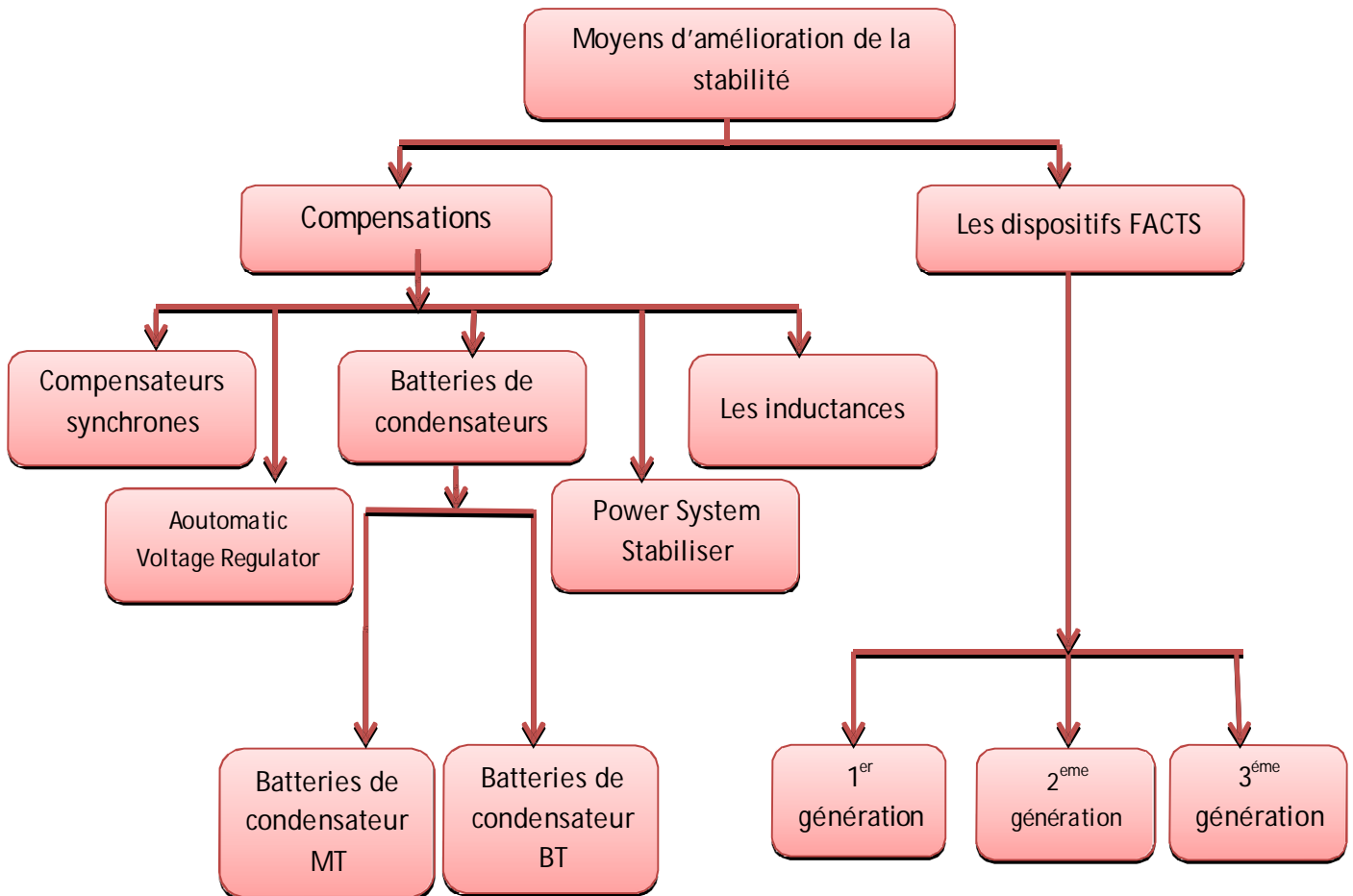


Figure I.4. Moyens d'amélioration de la stabilité.

I.5.1. Moyens classique

I.5.1.1. Compensation traditionnelles

a. 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.

Ces machines qui sont constituées de 20 à 60 MVAR posent des problèmes de maintenance et leur installation nécessite des ouvrages de génie civil important et le coût est élevé tant en investissement qu'en exploitation. Leur emploi est de plus en plus abandonné principalement à cause de leur entretien trop onéreux.

b. 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 :

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.

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. Ces batteries sont fractionnées en gradins de 2.4 ou 3 MVAR (selon la puissance du transformateur HT/MT). Chaque gradin commandé séparément est dimensionné pour limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barre MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

I.5.1.2. 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.

I.5.1.3. Les PSS (Power System Stabiliser)

La structure du stabilisateur de puissance est une structure classique qui consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. Ces stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique. Un choix adéquat des paramètres des PSS engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système. [10]

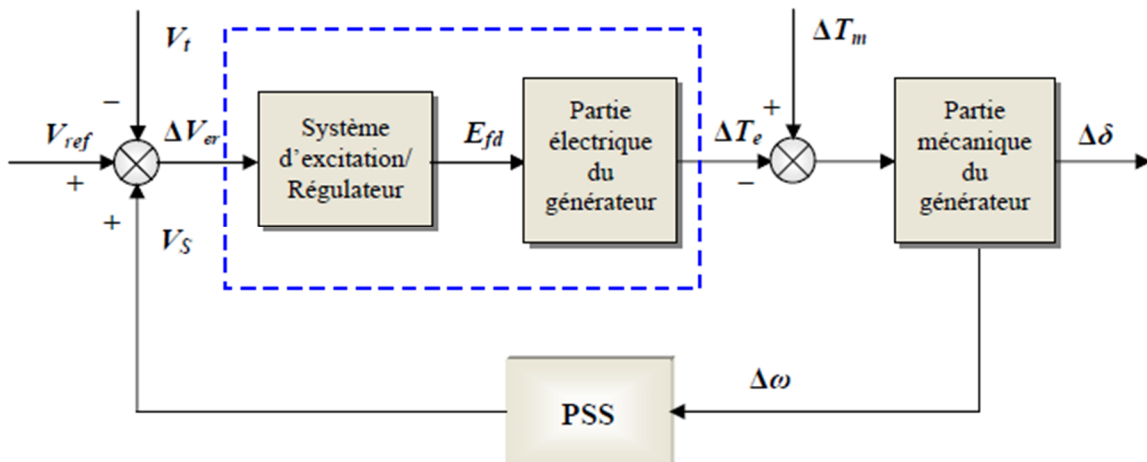


Figure I.5. Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.

I.5.1.4. Les AVR (Automatic Voltage Regulator)

Ces derniers sont très importants pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie ou absorbée selon les besoins des charges. En outre ces contrôleurs représentent un moyen très important pour assurer la stabilité transitoire du système de puissance. Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine et "ramener" la tension de sortie de la machine aux valeurs souhaitées. Une caractéristique très importante d'un régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation. [11]

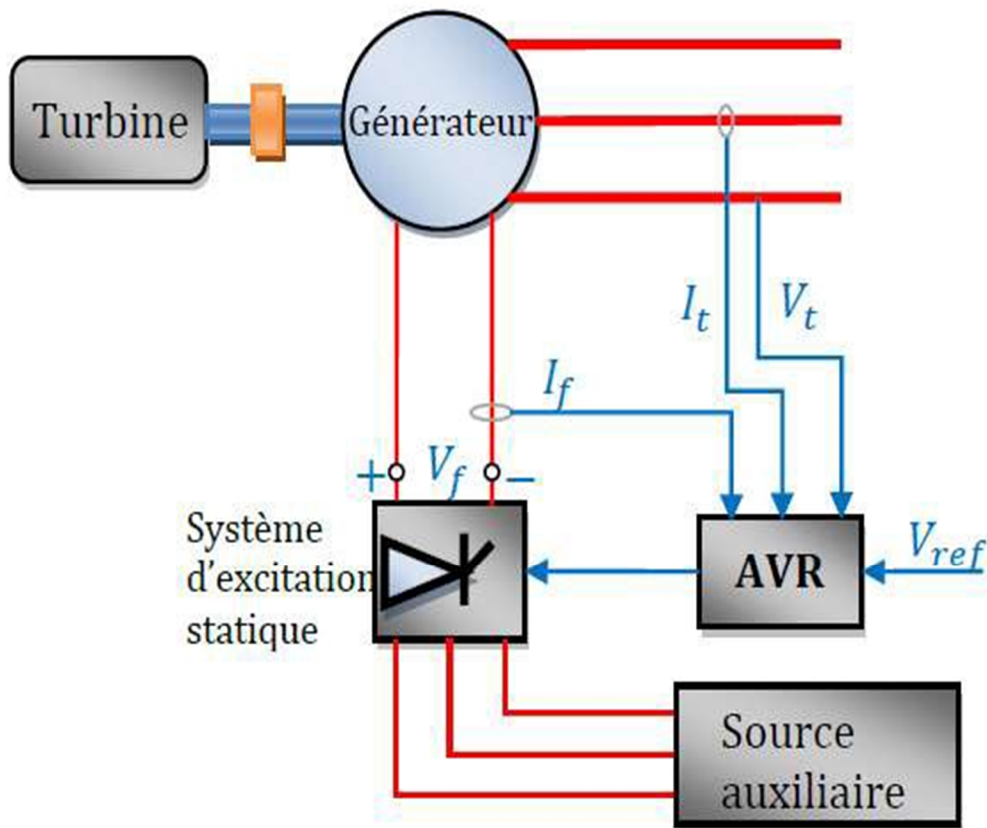


Figure I.6. Structure générale d'un système d'excitation statique avec AVR.

I.6. Moyens modernes (FACTS)

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques.[12]

Les système FACTS (Flexible AC Transissions Systèmes) est l'abréviation définie qui fournit des degrés de contrôle sur un ou plusieurs paramètres du réseau alternatif pour augmenter la contrôlabilité et améliorer la capacité de transfert de puissance .[13]

La technologie FACTS de trois générations sont regroupons une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie. Comme suite « une structure d'électronique de puissance ou tout autre système statique.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un réseau électrique. Le concept général de la stabilité est synthétisé en trois groupes (stabilité angulaire, de la tension et de la fréquence) .et exposé aussi les moyens d'amélioration de la stabilité. Les dispositifs FACTS sont capables de remplir diverses fonctions comme le maintien de tension, le contrôle des flux de puissance, et aussi l'amélioration de la stabilité du réseau, etc. Dans le chapitre suivant, nous allons exposer le concept des FACTS .

Chapitre II

II.1. Introduction

D'après IEEE, FACTS sont 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.

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie. Flexibilité de Transmission de l'énergie: 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. [14]

II.2. Types des FACTS

FACTS sont des dispositifs pour accroître la qualité de la puissance, deux secteurs principaux d'application :

Grand réseaux de transmission : Pour améliorer le contrôle, augmenter les capacités de transfert de puissance et assister la récupération du réseau consécutive à un défaut de transmission AC.

Réseau industriels : Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuation de charge ex. compensation du flicker pour les fours à arc gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission. Généralement installé par l'industriel à l'origine de la fluctuation de charge. Types de dispositifs Facts. [15]

- SVC classique à base de thyristors.
- STATCOM
- TCSC
- FACTS 'moderne' : SVC light, SSSC, IPFC, DVR, AF, BESS

Chaque élément dans les colonnes (figure 1) peut être structuré selon sa connexion au réseau, en général les FACTS sont divisés en trois grandes catégories principales.

II.2.1. Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série comme une impédance variable 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.

II.2.2. 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 nœuds.

II.2.3. Compensateurs hybrides série-shunt

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné 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. [16]

- 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 IGBT ou bien les IGCT 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.

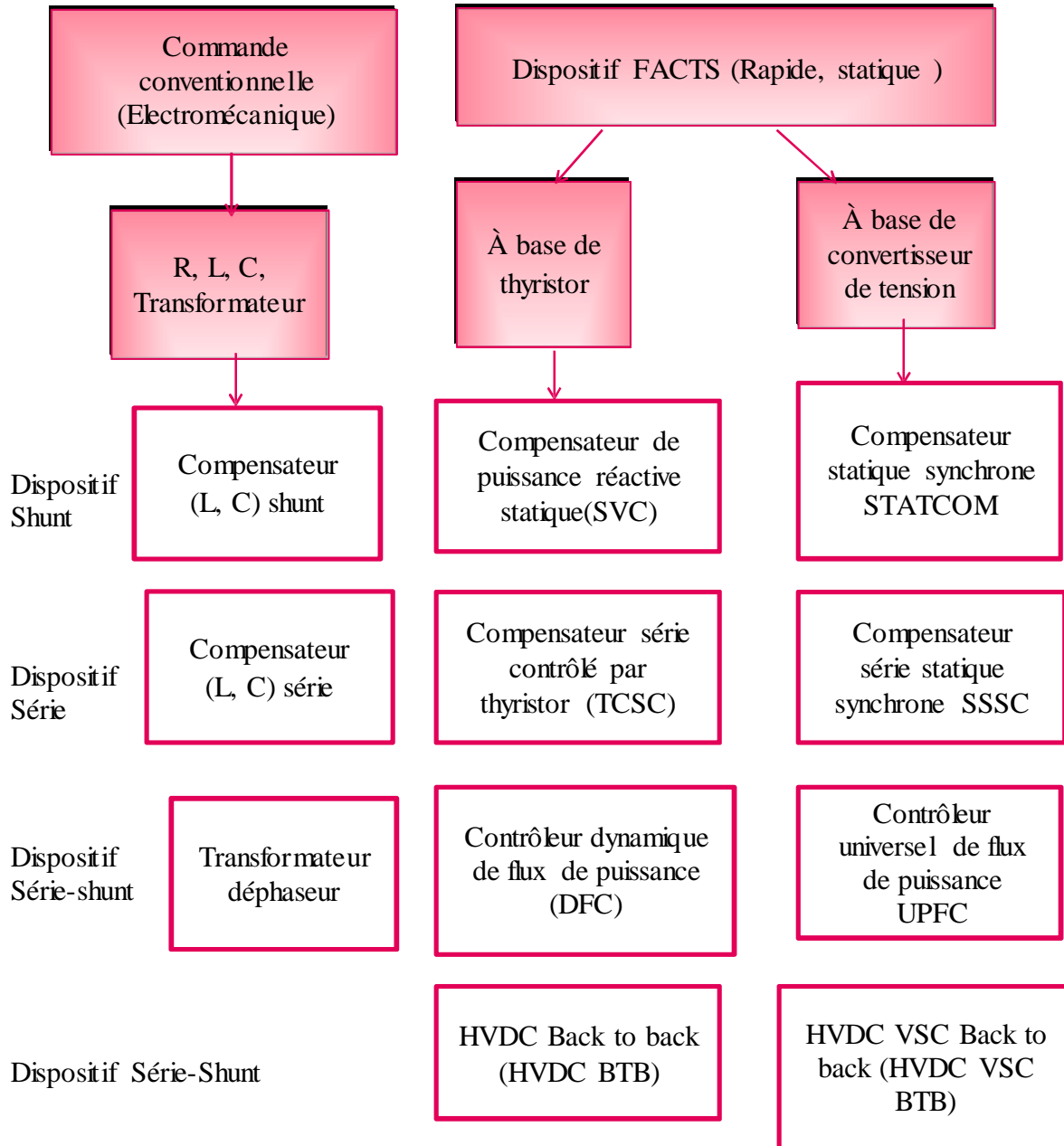


Figure II.1. Principaux Dispositifs FACTS.

II.3. Applications pratiques des dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau II.2 montre des chiffres approximatifs des Dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées. [19]

Tableau II.1. Statistiques des dispositifs FACTS autour du monde.

| Type | Nombre | Puissances installés MVAR |
|---------|--------|---------------------------|
| SVC | 600 | 90.000 |
| STATCOM | 15 | 1.200 |
| TCSC | 10 | 2.000 |
| HVDC | 40 | 14.000 |
| UPFC | 2-3 | 250 |

Tableau II.2. Le rôle des différents dispositifs FACTS

| | Problème | Action à mener | Solutions conventionnel | Dispositifs FACTS |
|------------------------------------|--|--|------------------------------------|---------------------|
| Limite de la Tension | Chut ou surtension | Fourniture ou absorption de l'énergie réactive | Condensateurs séries et shunts | SCV STATCOM |
| Limites thermiques | Surcharge des Lignes | Réduction des charges | Ajouter de nouvelles lignes | TCSC UPFC SVC |
| Courants de boucles | Répartition de La puissance transférée | Réajustement de la réactance de ligne | Ajouter des condensateurs en série | TCSC UPFC SVC |
| Niveaux des Courts-circuits | Courant de court-circuit très élevé | Limitation du courant de court-circuit | Ajouter des condensateurs en série | TCSC UPFC |
| Résonances Subsynchrones | Emballement des Générateurs | Atténuation des oscillations | Compensation Série | TCSC |

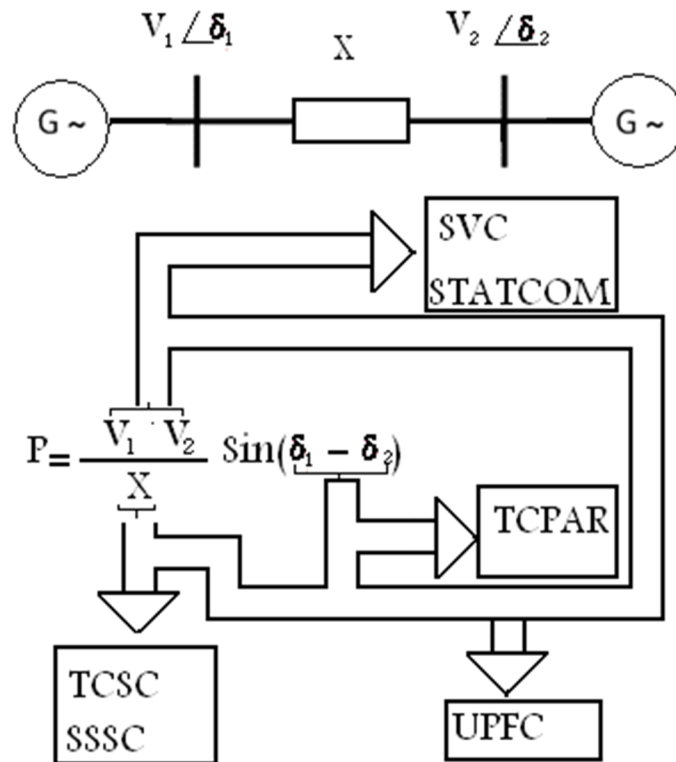


Figure II.2. Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.

II.3.1. FACTS et traction ferroviaire

Les compensateurs SVC et STATCOM sont très bénéfiques aux réseaux électriques alimentant les systèmes ferroviaires et les charges de traction. Leurs avantages, énumérés, en réduisent et même suppriment les investissements nécessaires au renforcement du réseau électrifié.

Les FACTS permettent aussi d'obtenir une qualité de puissance adaptée aux besoins et d'alimenter les voies à des tensions inférieures aux valeurs usuelles : la traction ferroviaire peut alors se contenter d'une alimentation, par exemple, En 132 kV au lieu du 220 kV, voire du 400 KV. [17][18]

II.3.2. Amélioration du transit de puissance

Les dispositifs FACTS compensent l'inductance de la ligne pour maximiser le transfert de puissance (compensation série) et offrir des capacités de gestion des flux. Dans certains cas, ils peuvent même doubler la capacité de transport du système électrique. Les FACTS atténuent également les perturbations et stabilisent le réseau (compensation dynamique par inductances shunt). Le plus gros compensateur statique de puissance réactive, fonctionnant dans la plage de +575 MVAR capacitifs à -145 MVAR inductifs sous 500 kV.

D'automatisation de ce type, avec son installation électrique, équipe déjà la plus puissante centrale solaire d'Europe (100 MW), en Espagne (Andasol). En Algérie, ABB a livré la commande complète de la première centrale solaire intégrée à cycle combiné (175 MW) tandis qu'il construisait en un temps record une centrale solaire à Concentration de 1 MW clé en main, avec un rendement de 80 %. La puissance d'énergie renouvelable raccordée par ABB au réseau atteint à ce jour 230 GW. [21]

II.4. Fonctionnement des FACTS

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive (courant réactif) 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. Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques (c'est faux, car ils des sources d'harmoniques à cause des composants EP) et la stabilisation de la tension. [20]

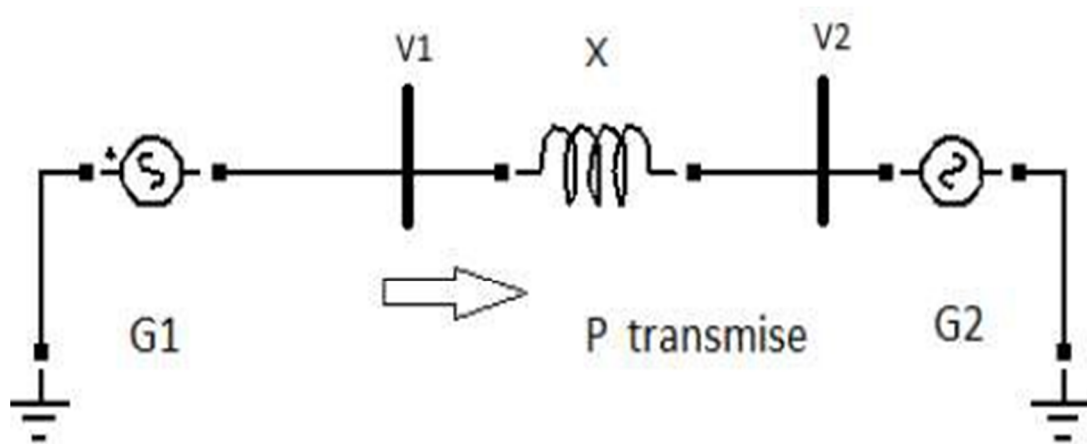


Figure II.3. Puissance transitée entre deux réseaux.

II.5. Intégration du stockage et des FACTS

Les FACTS, nous l'avons dit, régulent le transit de puissance ou la tension sur un Réseau pour maximiser la capacité en ajustant la réactance de la ligne ou en injectant du réactif. En combinant un système de stockage sur batteries et un FACTS, il est possible d'injecter ou de prélever rapidement de la puissance active en cas de besoin. En outre, cela permet d'équilibrer le transit, de gérer les pics et de maîtriser la qualité de la tension et de la puissance. Les futurs systèmes fonctionneront dans la gamme du MW. [21]

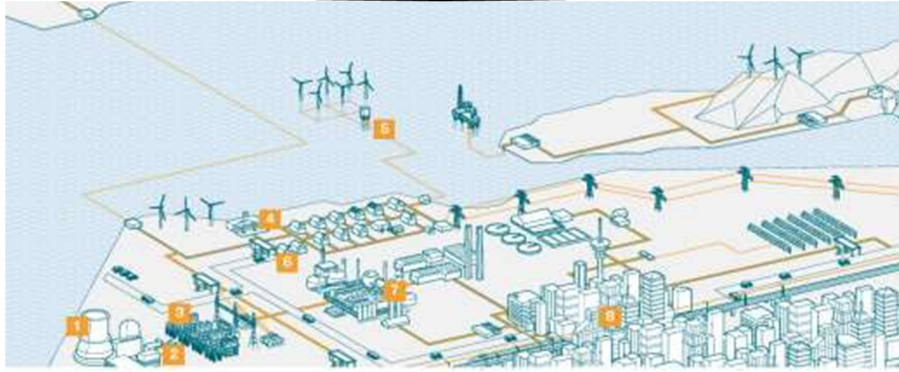


Figure II.4. Réseaux intelligents Les solutions par réseaux intelligents.

- 1 - Production d'énergie optimisée
- 2 - Gestion de réseau
- 3 - Sous-stations automatisées
- 4 - FACTS et stockage de l'énergie
- 5 - Transport de CC à haute tension (HVDC)
- 6 - Infrastructure pour véhicules électriques
- 7 - Systèmes de gestion de l'énergie
- 8 - Constructions active

II.6. Contexte Algérien

Depuis les années 2000, le développement du réseau de transport d'électricité fait partie des priorités de l'Algérie. Le réseau de transport algérien est en phase d'expansion, car il doit répondre à la forte augmentation de la demande en électricité (+ 5 à 7% par an). Les principaux besoins en électricité sont domestiques liés :

- À l'accroissement de la population (celle-ci a plus que triplé en 50 ans, et son taux de croissance est actuellement estimé à 1,2% par an).
- Au changement des habitudes de consommation avec l'usage des appareils. En outre, peu d'investissements ont été entrepris sur le réseau électrique, et celui-ci s'est dégradé.

Le développement du réseau de transport concerne à la fois le développement des réseaux haute tension (60 et 220 000 Volts), et la création d'un réseau à très haute tension (400 000 Volts). Le développement du réseau 400 000 Volts est mise en œuvre à la fois dans l'axe: Est-Ouest (interconnexions Internationales avec le Maroc et la Tunisie). Nord-Sud (raccordement des réseaux du Sud, jusqu'alors le point trop isolé du réseau national). En 2002, un total de trois SVC (static var compensator) a été introduit dans le réseau national de la Sonelgaz: un dispositif à la sous station de Naama et deux à Béchar (figure II.4). Les trois SVC ont une classe identique, -10/+40Mvar à la tension 220 kV et l'une des plates-formes de ses trois SVC est montrée par la figure (II.4)

Le réseau est constitué d'une ligne de 500km sous une tension de 220kv. Un seul circuit aérien de la ligne de transmission pour l'alimentation de la charge ébignée dans la partie ouest du pays.



Figure II.5. Un dispositif SVC à la sous station de Naama et deux à Béchar.

II.7. Avantages et Inconvénients de la Technologie FACTS

Il est clair que chaque technologie présente des avantages et des inconvénients ;

II.7.1. Avantages

- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Contrôle le transit de la puissance active.
- Améliore l'interconnexion et l'échange énergétique.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)

II.7.2. Inconvénients

L'introduction des harmoniques du réseau électrique ce qui le rend pollué, c'est-à-dire le signal sera tendu et non sinusoïdale. Il rend le réseau vulnérable au sur tension dues aux commutations répétitives. [19]

Mis à part les avantages techniques apportés par les dispositifs FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un dispositif FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation. Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système et la technologie du semi-conducteur utilisée. [24]

II.8. Description d'un STATCOM

Selon IEEE le STATCOM est un générateur synchrone statique fonctionnant comme un SVC connecté en parallèle dont le courant de sortie (capacitif ou inductif) peut être contrôlé indépendamment de la tension AC du réseau. [15]



Figure II.6. Présentation d'un STATCOM.

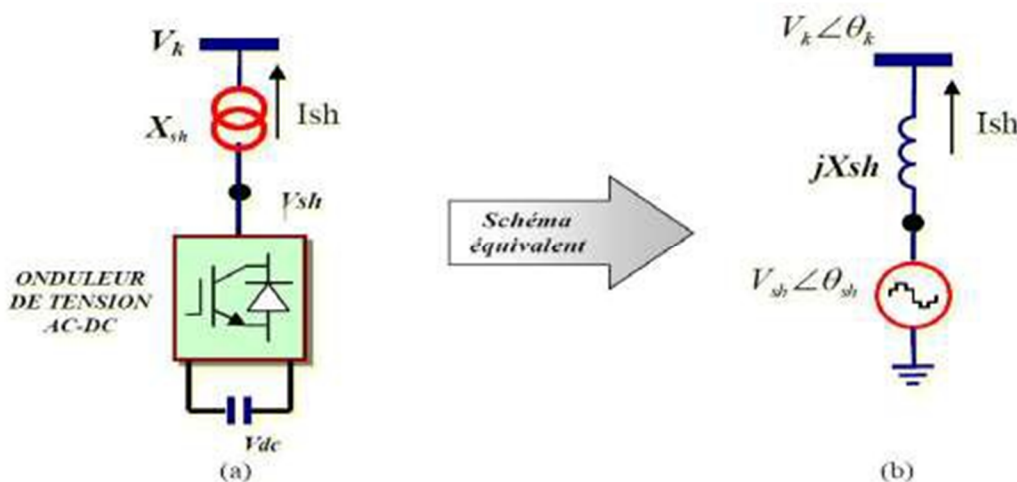


Figure II.7. (a) Structure d'un STATCOM, (b) Schéma équivalent.

Le STATCOM est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est indépendante de la tension du nœud. Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des puissances réactive suivante décrit le réseau électrique. [9]

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

- Si $|V_k| > |V_{sh}|$, alors Q_{sh} devient positive et le STATCOM absorbe de la puissance réactive.
- Si $|V_k| < |V_{sh}|$, alors Q_{sh} devient négative et le STATCOM fournit de la puissance réactive.

Le concept de base du STATCOM a été proposé par Gyugyien 1976. Les premiers STATCOM, à base de convertisseurs de deux niveaux, appliqués dans les réseaux de transports sont : Le STATCOM de 80 MVAR appliqués à un réseau de transport de 154KV à Inuyama au Japon et a été commercialisé depuis 1991 par Kansai Electric Power Corporation et Mitsubishi Electric Power Corporation. LE STATCOM de 100 MVAR à 161 KV installé à la station de Sullivan du Nord-Est de Tennessee par Westinghouse Electric Corporation aux Etats Unis en 1995.

Le STATCOM est la version des SVC composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme représenté dans la figure 8.

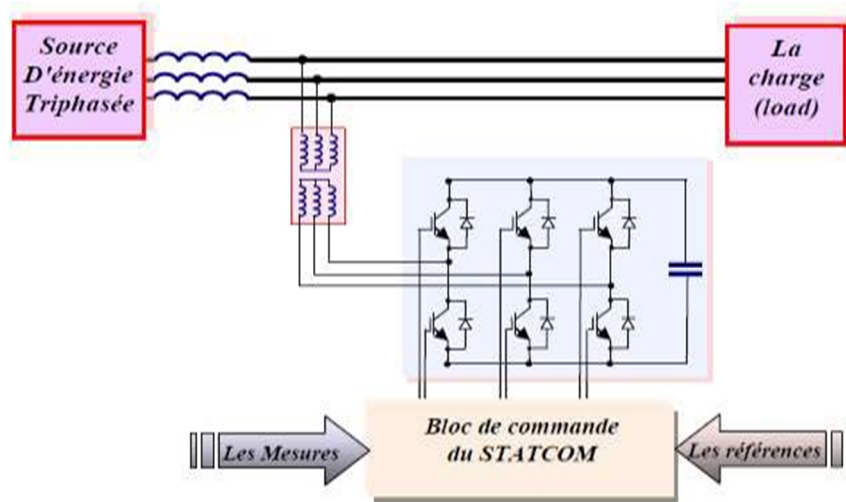


Figure II.8. Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau électrique.

II.9. 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 est injectée en phase avec la tension de la ligne et 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 9.

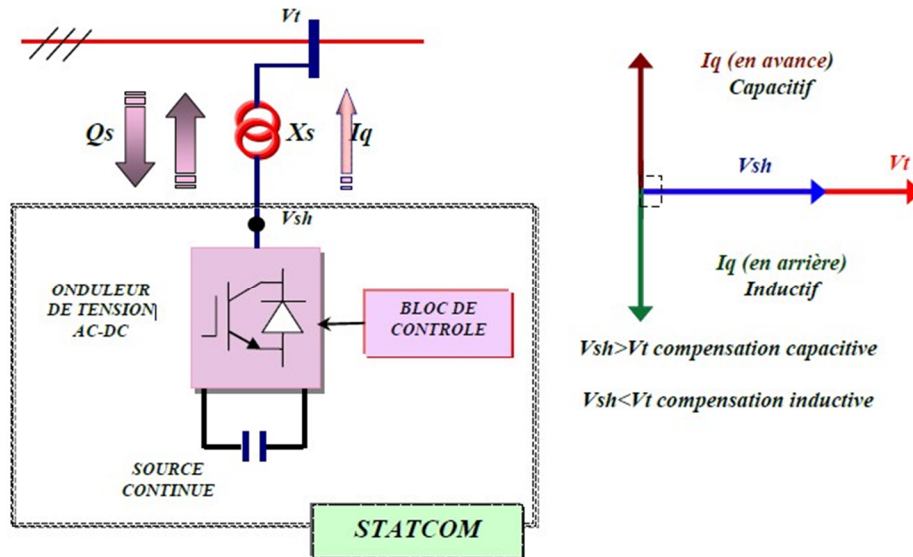


Figure II.9. Schéma globale d'un STATCOM.

II.10. Avantages et Inconvénients du STATCOM

II.10.1. Avantages

- 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.
- Pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une seule inductance. Contrairement au compensateur statique, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension V diminue

II.10.2. Inconvénients

- L'échange d'énergie réactive (absorber/fournir) avec le jeu de barre.
- Coût élevé

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu global sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC. Ces systèmes améliorent le transit de puissance dans les lignes et la stabilité du réseau. Grâce à la grande rapidité de réaction des contrôleurs électroniques constituant les FACTS, ces derniers sont caractérisés par une grande fiabilité. Dans la suite de notre travail nous allons essayer de vérifier l'impact de STATCOM sur les micros grids.

Chapitre III

III.1. Introduction

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter. Actuellement, les principales sources d'énergies proviennent des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel etc.). Cependant, Depuis les crises successives du pétrole des années 70, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles et leurs impacts sur l'environnement et aux déchets qu'ils engendrent.

III.2. Les énergies renouvelables

Les énergies sont dites "renouvelables" tant qu'elles dépendent du système écologique de la terre, de l'insolation et de l'énergie géothermique de la terre. En pratique, les sources énergétiques renouvelables font allusion à : [25]

- L'énergie hydraulique.
- l'énergie biomasse.
- l'énergie solaire.
- l'énergie géothermique.
- L'énergie marine.
- l'énergie éolienne.

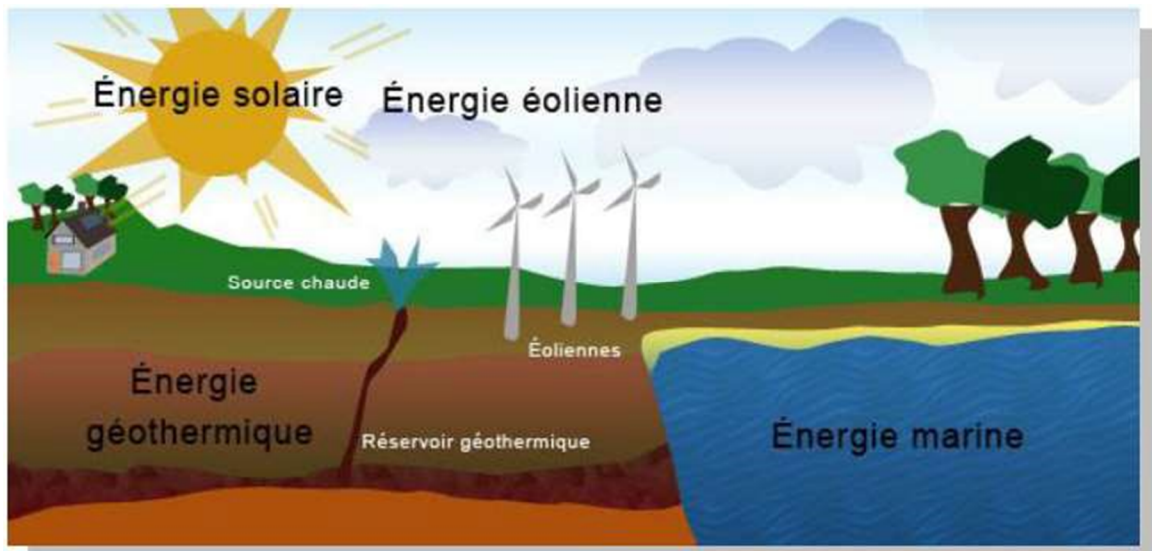


Figure III.1. Les énergies renouvelables.

III.2.1. L'énergie hydraulique

C'est une énergie résultante du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible comme l'eau douce ou salée et l'huile. Elle ne produit pas de polluants, mais pour l'exploiter, il faut investir une quantité considérable d'argent.

III.2.2. L'énergie biomasse

Est regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage), soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz biocarburant).[26]

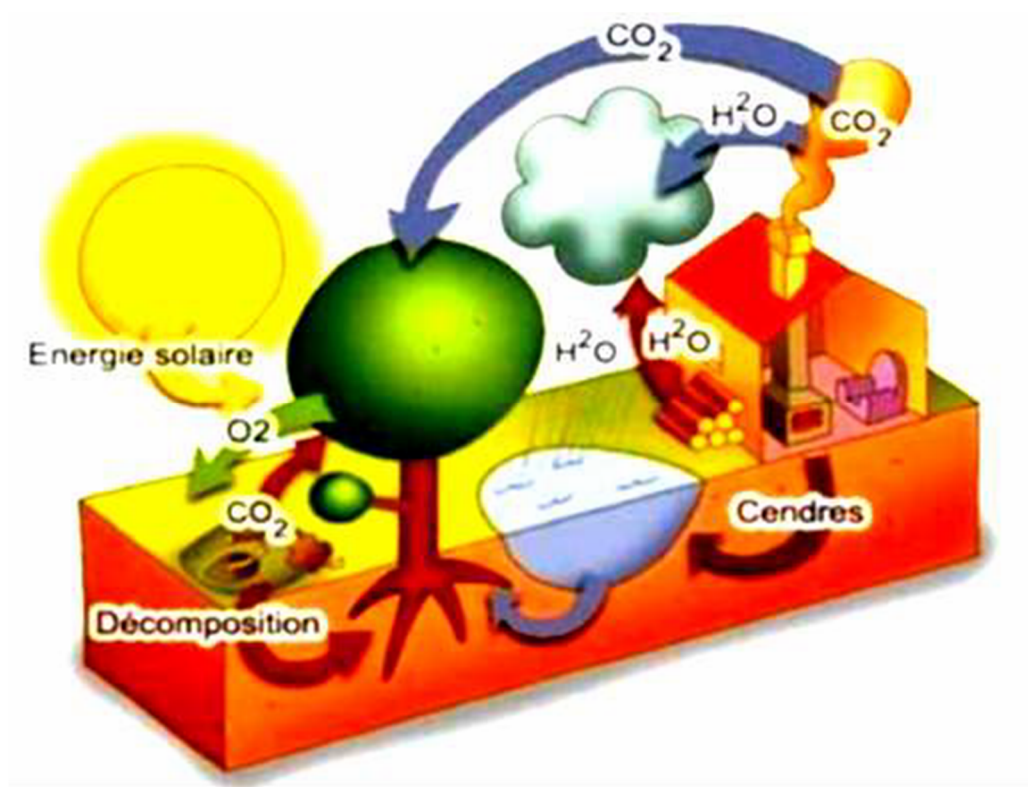


Figure III.2. L'énergie biomasse.

III.2.3. L'énergie solaire

Deux grands types d'énergies rentrent au-dessous de cette catégorie :

- La première thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant.
- La deuxième photovoltaïque basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.[27]



Figure III.3. L'énergie solaire thermique.

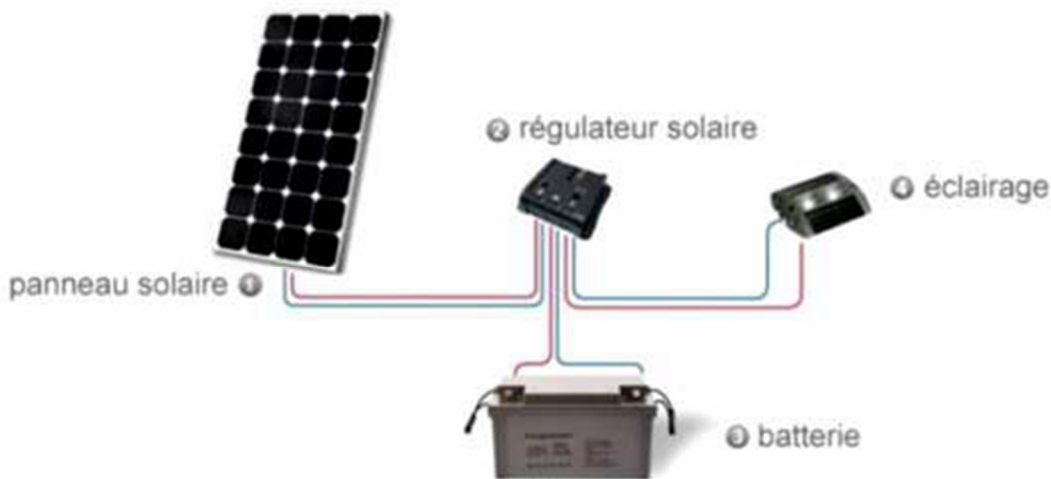


Figure III.4. L'énergie solaire photovoltaïque.

III.2.4. L'énergie géothermique

La géothermie utilise la chaleur prévenant du noyau terrestre, la température de la crouete terrestre augmente avec la profondeur et atteint 200°C à 5000°C dans le sous-sol. Le principe de la géothermie consiste à injecter à la profondeur de l'eau froide sous pression celle-ci va déplacer les roches et ainsi les fracturer. L'eau va pouvoir circuler dans les fractures et se réchauffer au contact de la roche, la présence de deux puits permet d'extraire cette eau réchauffer qui va enfin de produire de l'électricité grâce à un système d'échangeur thermique. La chaleur de l'eau récupérer peut aussi être employé pour le chauffage d'une habitation par exemple. L'eau utilisée dans un circuit ferme afin de ménager les ressources et pour éviter aussi son évaporation. [25]

III.2.5. Énergies marines

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolienne est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives. [28]

Pour toutes ces raisons l'énergie issue du vent fait déjà partie intégrante du Paysage et la tendance s'annonce irréversible [29].

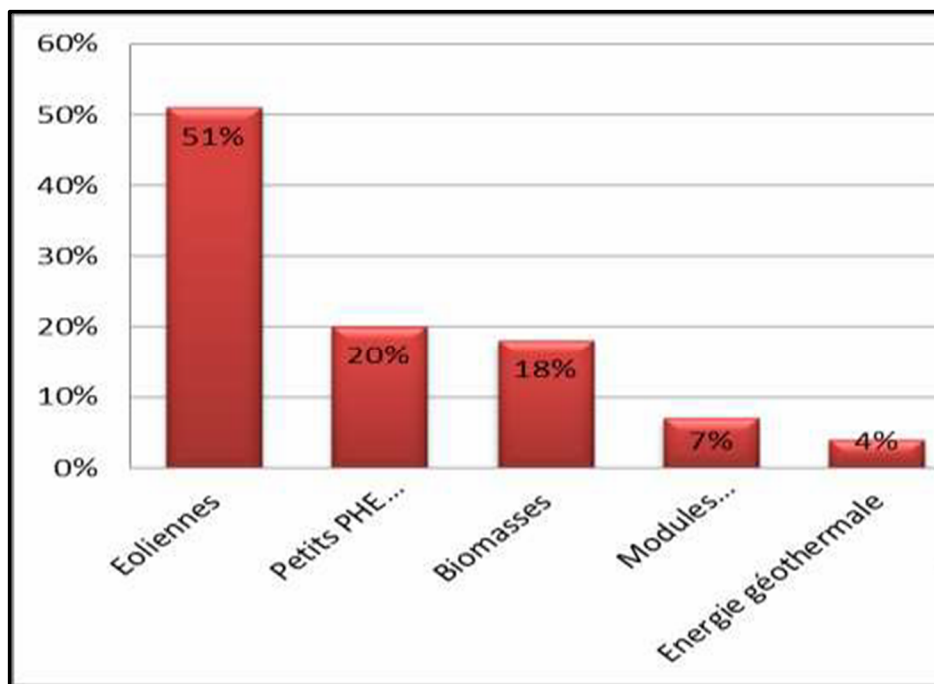


Figure III.5. Parts des différentes SER.

III.3. Historique de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie.

Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.



FigureIII.6. Présente un moulin à vent.

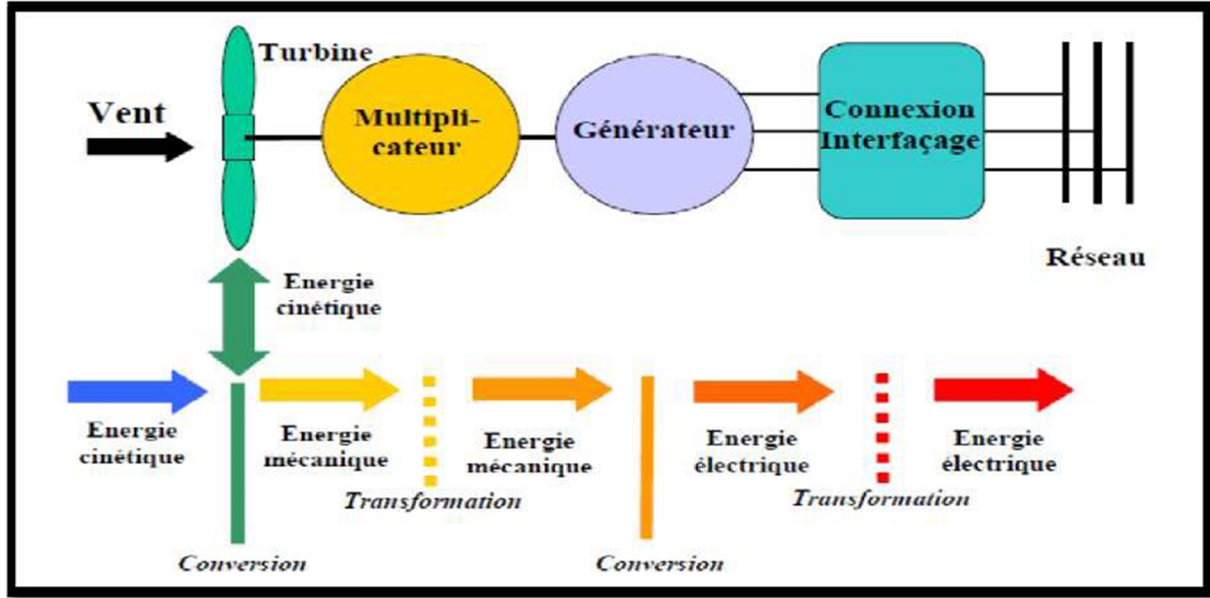
Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité.

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle. C'est principalement la crise pétrolière de 1973 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985. [30]

Les pays les plus exploitants d'énergie éolienne sont : les États-Unis d'Amérique, l'Allemagne, la Chine et l'Espagne, L'exploitation d'énergie éolienne en Afrique trouve une très faible contribution mondiale, les deux pays les plus exploitants sont : l'Égypte et le Maroc. Le premier avec une capacité totale de production de 430MW (enregistrée à la fin 2008) avec un taux de croissance annuel de 17.8% tandis que le Maroc produit environ 253MW. Selon le conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) (Global Wind Energy Council), une contribution de l'Algérie dans ce domaine reste à révéler.[31]

III.4. Énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables. [25]



FigureIII.7. Principe de la conversion d'énergie.

III.5. Différents types d'éoliennes

Il existe deux types d'éoliennes modernes, Eoliennes à axe vertical et à axe Horizontale

III.5.1.Éoliennes à axe vertical

Il est basé sur les voilures à l'axe vertical, ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue.



FigureIII.8. Éoliennes à axes vertical.

Il y'a deux types de structures d'éoliennes à axe vertical :

- Le rotor de Savonius
- Le rotor de Darrieus [32]

III.5.2. Éolienne à axe horizontal

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) ou les multi-pales.



Figure III.9 .Voilure bipale



Figure III.10. Voilure tripale.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

A / Amont

Le vent souffle sur le devant des pales en direction rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

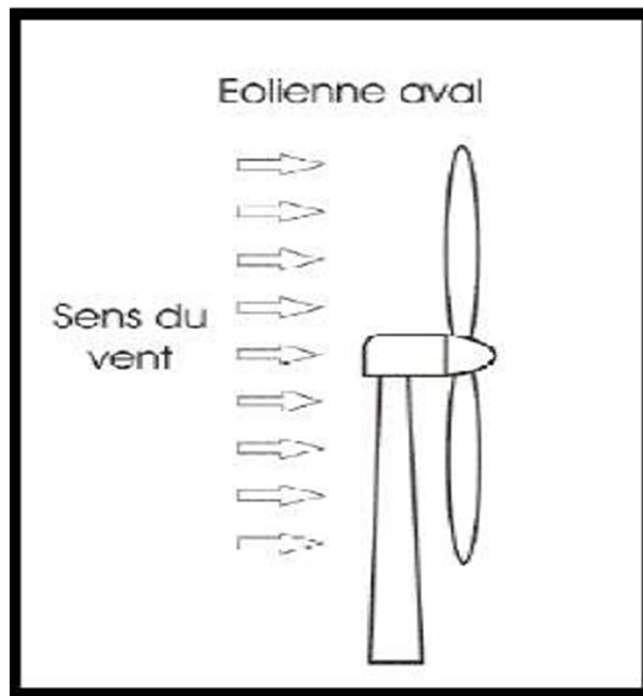
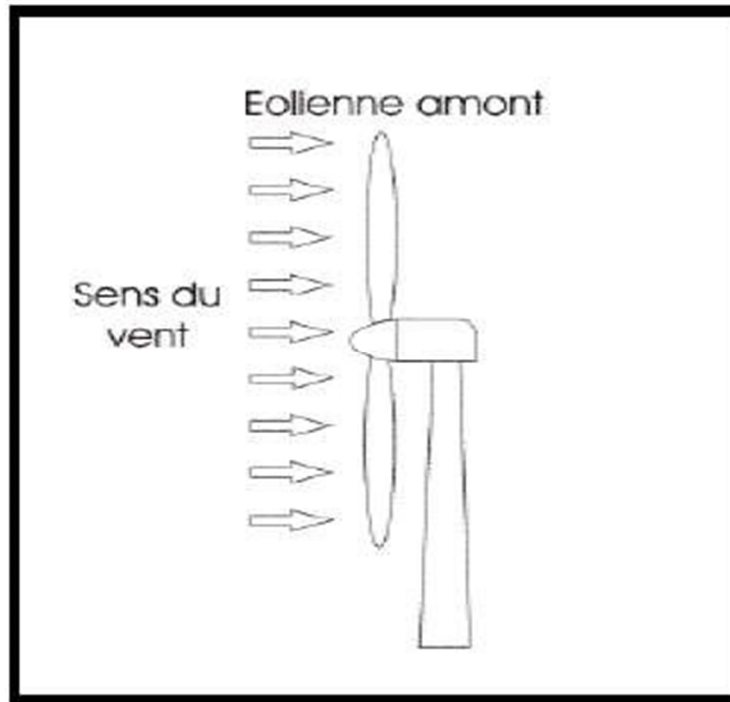


Figure III.11. D'une éolienne à axe horizontal amont.

B / Aval

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.[33]



FigureIII.12. D'une éolienne à Axe horizontal aval.

III.6. Avantages et inconvénients

III.6.1. Avantages

- L'énergie éolienne s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de gaz à effet serre pour maintenir l'augmentation de la température moyenne de la terre dans des niveaux acceptables.
- Comme toutes les énergies vertes, l'énergie éolienne crée des nouveaux emplois et assure le développement de pays.
- L'énergie éolienne est une énergie propre, écologique, fiable, et inépuisable.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie et elle est l'énergie la moins chère entre les autres énergies renouvelables.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'intégration des fermes éoliennes dans un réseau électrique déjà existant est très facile et l'installation de cette énergie est relativement simple. [26]

III.6.2. Inconvénients

- Le bruit mécanique ou aérodynamique engendré essentiellement par le multiplicateur.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques reste plus élevé surtout sur les sites moins ventés. [26]

III.7. Les Systèmes Hybrides

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergie : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables.

III.7.1. Classification des systèmes

Le champ d'application des systèmes hybrides est trop vaste à cause des multiples Structures, cette richesse en structure mène la tâche de classification des systèmes un Peu compliqué, on peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de Puissance selon le tableau suivant : [34]

Tableau III.1: Classification des SEH par gamme de puissance.

| La puissance de SEH [KW] | Application |
|--------------------------|---|
| Faible : < 5 | Systèmes autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau, autre application isolé |
| Moyenne : 10 - 250 | Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales |
| Grand : > 250 | Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires) |

III.7.2. Les composants d'un système hybride

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués :

- De sources d'énergie classiques (Groupe Électrogène, Diesel par exemple).
- Des sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, hydroélectricité, marémotrice, etc.).
- Des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (Batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène, FACTS...).
- Des charges principales et de délestages et un système de supervision [35]

III.7.3. La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc....

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc. [36]

III.7.4. Les avantages et les inconvénients de SEH

A - Avantages

- Le système hybride augmente la fiabilité de l'énergie, évitant ainsi des coûts importants avec des pannes de courant.
- Réduire les impacts environnementaux. Elle contribue à diminuer le niveau de pollution causé par les sources fonctionnant avec les carburants fossiles.
- Réduction de la consommation de carburant par l'ajout d'une source d'énergie renouvelable.
- Les systèmes d'énergies hybrides sont polyvalent parce qu'ils possèdent plusieurs sources d'énergie.
- Comme il est renouvelable de sorte qu'il soit en abondance et de longue durée.
- Peut-être l'option le moins cher où le carburant est plus couteuse et la source d'énergie renouvelable est bonne.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives par le système multi sources

B - Inconvénients

- Les systèmes hybrides sont généralement plus complexes donc un effort accru de conception et plus de complexité dans le fonctionnement.
- Nécessite e du système de stockage. [26]

III.8. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, tel que l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique...etc. Dans la seconde partie nous avons étayé la définition et les différentes structures des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique et les avantages et les inconvénients de ce système.

Chapitre IV

IV.1. Introduction

Les éléments qui composent un Micror-grid varient en fonction du type d'application. Cependant, il y a des éléments en commun : des systèmes de génération à base de renouvelable et des systèmes de soutien programmables et contrôlables. Parmi ces systèmes de soutien on trouve les systèmes de génération (les générateurs Diesel, les microturbines, etc.), les systèmes de stockage (les batteries, les volants d'inertie, les supercondensateurs, etc.) et les systèmes de compensation et de réglage (les STATCOMs, les SVCs, etc.).

L'objectif de ce chapitre est d'illustrer la capacité d'un STATCOM à améliorer la stabilité d'un micro-grid par la simulation numérique sous l'environnement Matlab. Pour cela nous avons choisis un micro-grid composée d'un générateur Diesel, un générateur d'énergie éolienne, deux charges et un STATCOM.

IV.2. Architecture du micro-grid

La structure du Micro Grid étudiée est illustrée à la figure IV-1. La tension du système est de 25kV, 60Hz et la puissance nominale Selon la capacité de production nominale totale est de 54MVA. Les bornes de sortie du générateur diesel (source principale) sont connecté directement à la ligne d'alimentation appelée Point de Couplage Commun (PCC). Un générateurs d'énergie éolienne de 25 V 60 HZ et 120 kVA et connecté au PCC par des lignes avec une impédance négligeable. Le STATCOM se compose d'un convertisseur DC-AC à deux niveaux avec un condensateur pour le stockage d'énergie, Il est relié au PCC par un filtre passe bas avec R-L est égal à $4e-4 \Omega$, $3e-5 H$. Les deux charges sont évaluées à 1,2 MVA chacune, Ils sont également connectées directement au système par un câble de transmission avec une impédance négligeable.

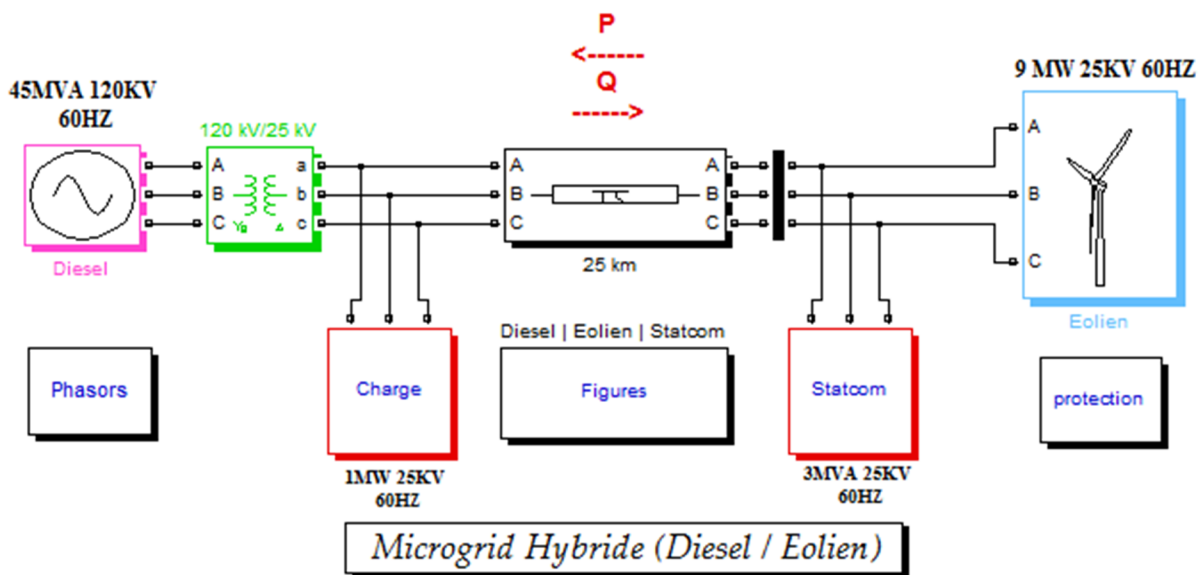


Figure IV.1. Structure du micro grid.

IV.3. Le Diesel

Le moteur Diesel comme son nom à son inventeur, l'ingénieur Alemand Rodolf Diesel né le 17 mars 1757 à paris, qui avait l'idée de réaliser un moteur dont le cycle se rapproche de cycle de Carnot. Rodolf Diesel a mis au point le premier moteur à allumage par compression, en faisant comprimer de l'air à l'intérieur du cylindre et on obtient une haute température de l'air suffisante pour enflammer un combustible finement pulvérisé. Actuellement les progrès réalisés surtout dans l'injection mécanique ensuite l'injection électronique font ressortir que les moteurs Diesel sont utilisés de plus en plus tant dans l'industrie des centrales électriques, dans les bateaux et sur les véhicules routiers Les groupes électrogènes fonctionnent comme une alimentation de soutien ou de secours, lors d'une défaillance sur le réseau normal d'alimentation électrique. Les composantes d'un générateur Diesel sont présentées sur la figure (IV.2) :

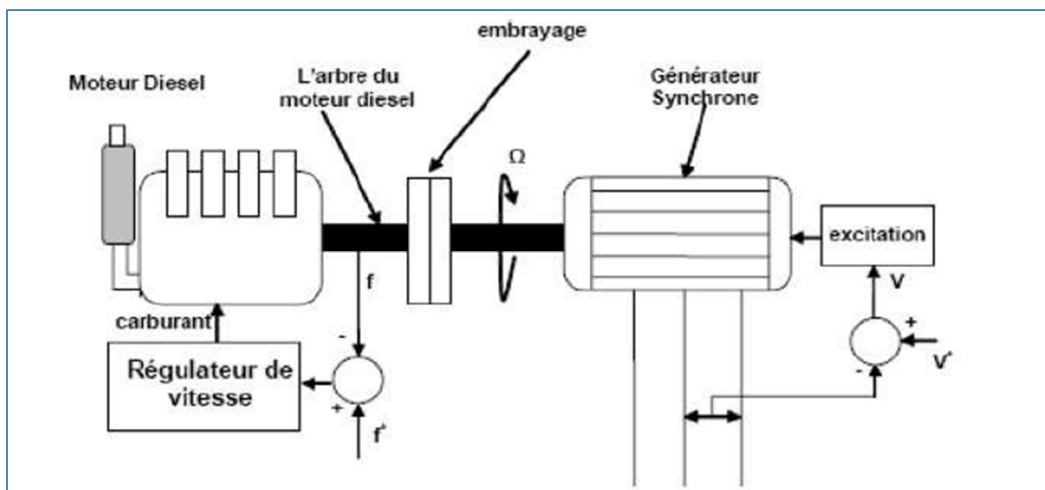


Figure IV.2. Configuration d'un générateur diesel.

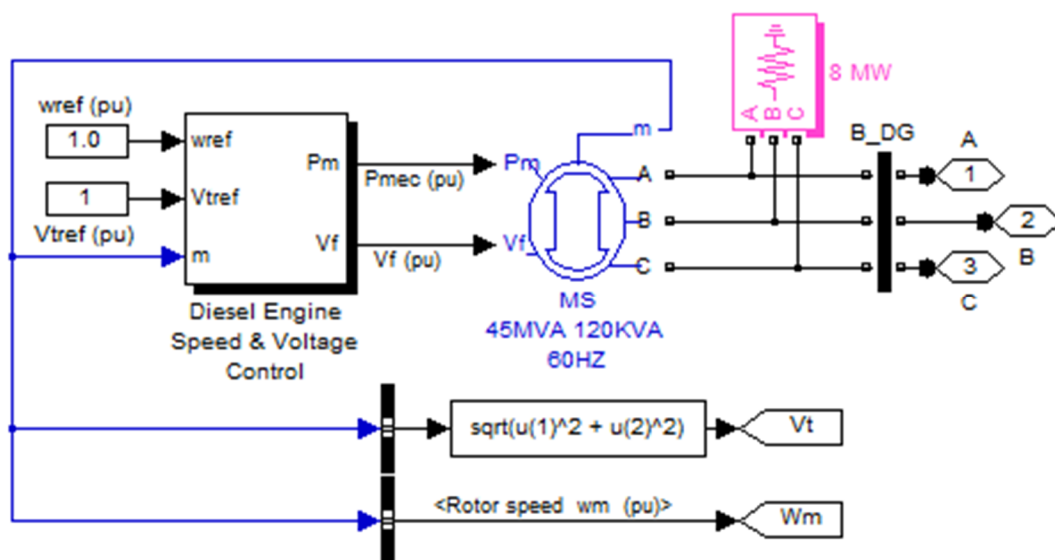


Figure IV.3. Schéma bloc du diesel avec simulink.

IV.4. L'éolienne

Lorsqu'une éolienne produit l'électricité, cette énergie est transportée aux clients via des réseaux électriques. Notamment, selon la quantité d'énergie produite par la ferme éolienne et adopter les conditions de raccordement. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production des transformateurs de puissance éleveur de tension permette de se raccorder aux réseaux électrique [7]. Cependant, le raccordement aux réseaux doit prendre en compte les conditions de couplage, qui se résumant comme suit :

- L'égalité de valeurs maximales de tension, donc de leurs valeurs efficaces.
- L'égalité de fréquences.
- Un déphasage nul entre elles.
- En triphasé, même succession des phases

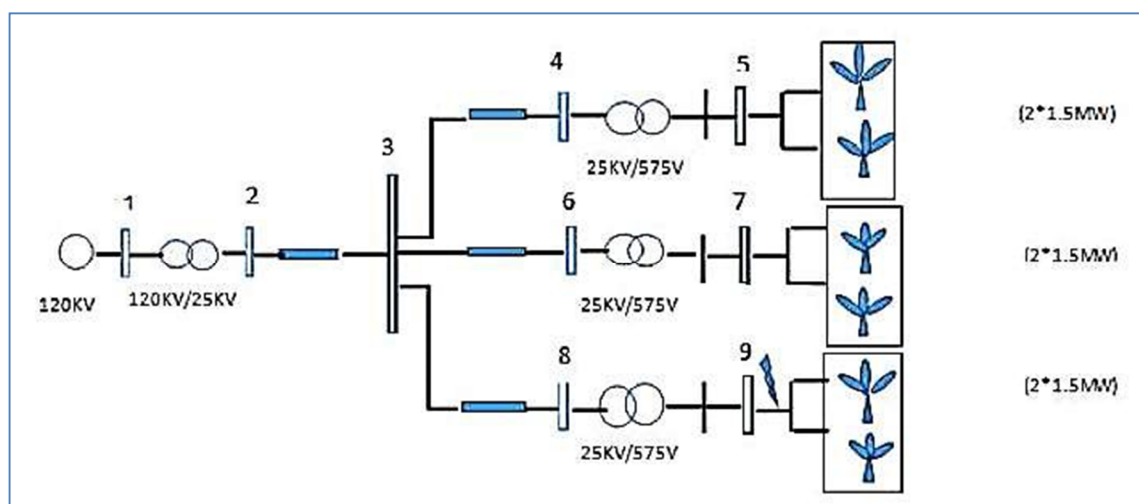


Figure IV.4. Structure de la ferme éolienne.

IV.5. Le STATCOM

Le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion, et par conséquence 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.

IV.6. Principe de fonctionnement du système hybride

Un parc éolien composé de 6 éoliennes de 1,5 MW raccordé à un réseau de distribution à 25 kV exporte de l'électricité à un réseau de 120 kV Le parc éolien de 9 MW est simulé par trois paires d'éoliennes de 1,5 MW. Les éoliennes utilisent des générateurs d'induction à cage d'écureuil . L'enroulement du stator est connecté directement au réseau 60 Hz et le rotor est entraîné par une éolienne à pas variable. L'angle d'inclinaison est contrôlé afin de limiter la puissance de sortie de l'alternateur à sa valeur nominale pour les vents dépassant la vitesse nominale (9 m/s).

Afin de générer de la puissance, la vitesse MAS doit être légèrement supérieure à la vitesse synchrone. La vitesse varie approximativement entre 1 pu à vide et 1.005 pu à pleine charge. Chaque éolienne dispose d'un système de protection surveillant la tension, le courant et la vitesse de la machine. La puissance réactive absorbée par les MAS est en partie compensée par des Batteries de condensateurs connectées à chaque bus basse tension de l'éolienne. Le reste de la puissance réactive requise pour maintenir la tension de 25 kV sur le bus B25 près de 1 pu est fournie par un STATCOM 3 Mvar avec un réglage de 3%. Chaque bloc d'éolienne représente deux turbines de 1,5 MW. [25]

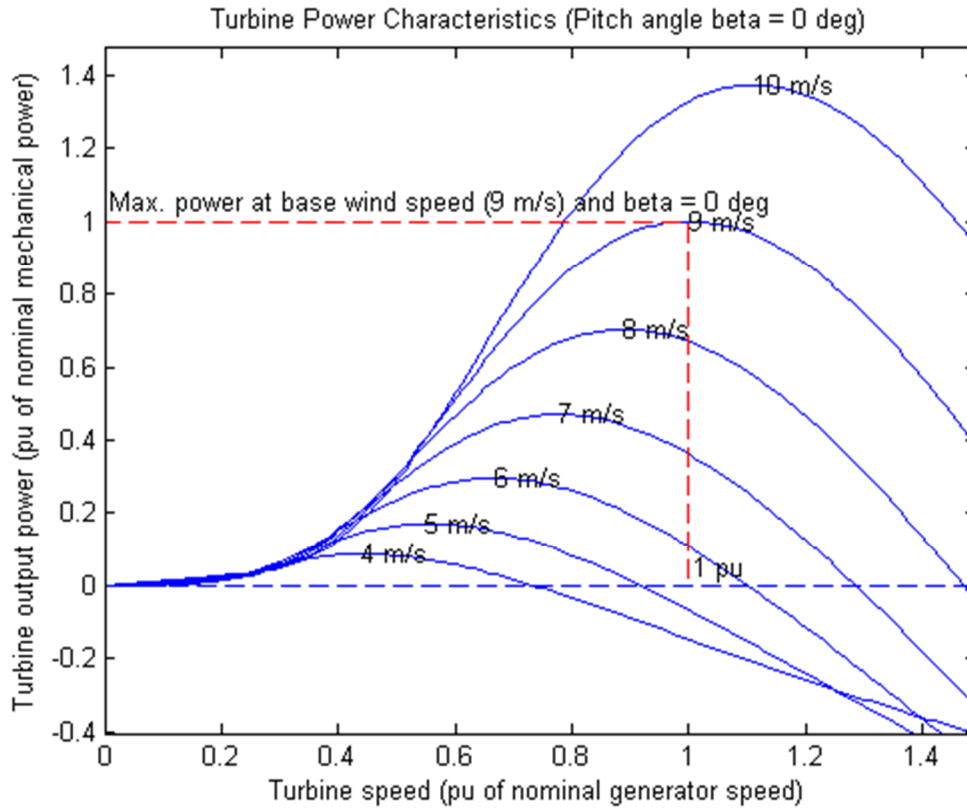


Figure IV.5. Caractéristiques de l'éolienne.

La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de la turbine est affichée pour des vitesses de vent allant de 4 m / s à 10 m / s. La vitesse nominale du vent donnant la puissance mécanique nominale (1pu = 3 MW) est de 9 m / s. Le modèle d'éolienne et le modèle STATCOM (issu de la bibliothèque FACTS) sont des modèles de phase qui permettent des études de type stabilité transitoire avec de longs temps de simulation. Dans cette étude, le système est observé pendant 20 s. La vitesse du vent appliquée à chaque turbine est contrôlée par les blocs "Wind 1" à "Wind 3". Initialement, la vitesse du vent est fixée à 7 m / s, puis à partir de $t = 2s$ pour "Wind turbine 1", la vitesse du vent est battue à 11 m / s en 3 secondes. La même rafale de vent est appliquée à Turbine 2 et Turbine 3, respectivement avec des retards de 2 secondes et 4 secondes. Ensuite, à $t = 15 s$, un défaut temporaire est appliqué aux bornes basses tension (575 V) de "Wind Turbine 2".

IV.7. Scénarios opérationnels

Trois scénarios opérationnels sont configurés pour vérifier les caractéristiques de système Diesel-Éolienne-STATCOM.

IV.7.1. Première Scénario (système sans défaut)

La puissance nominale est fournie par l'éolienne, le Diesel n'offre pas de puissance. Nous notons que pendant cette période le dispositif STATCOM est en mode flottant (c.-à-d. hors service).

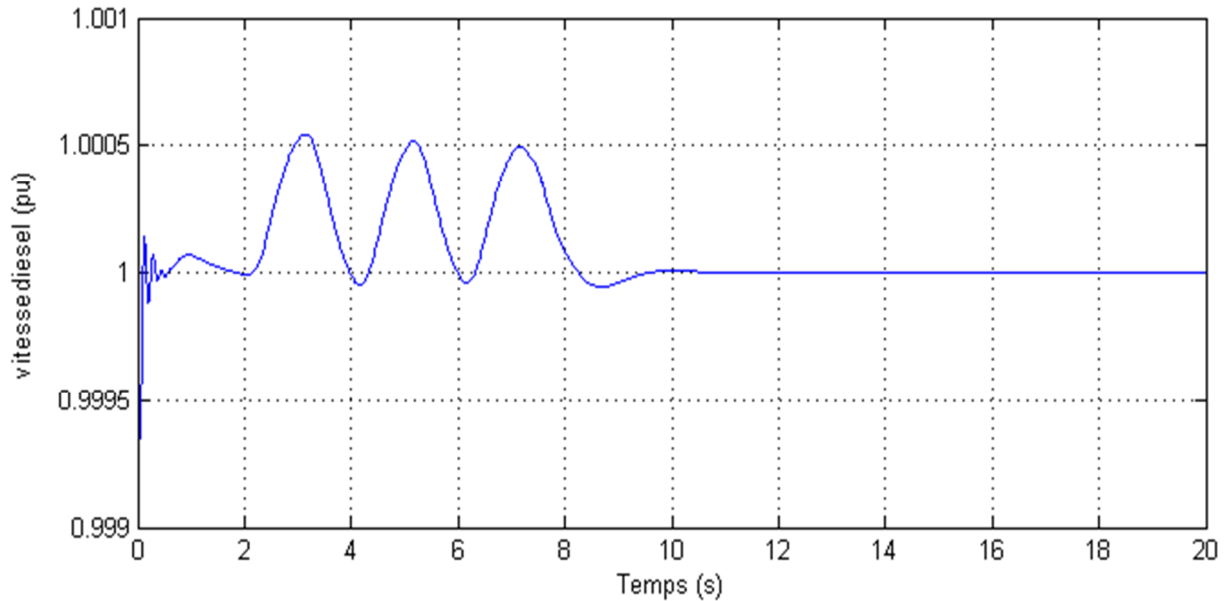


Figure IV.6. Vitesse de générateur Diesel.

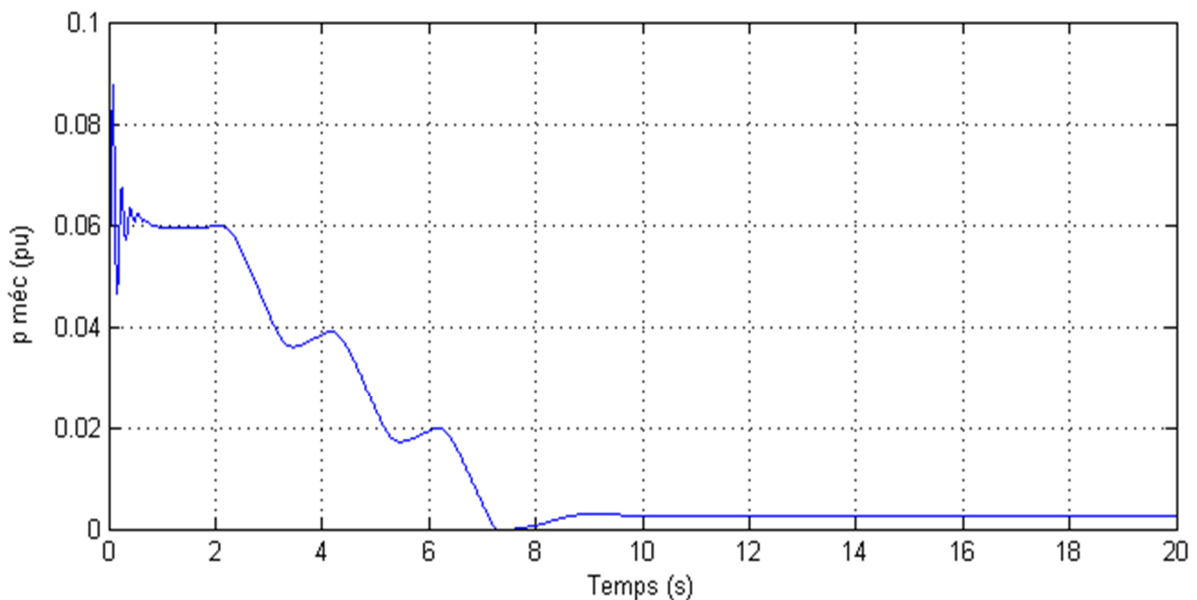


Figure IV.7. Puissance mécanique de générateur Diesel.

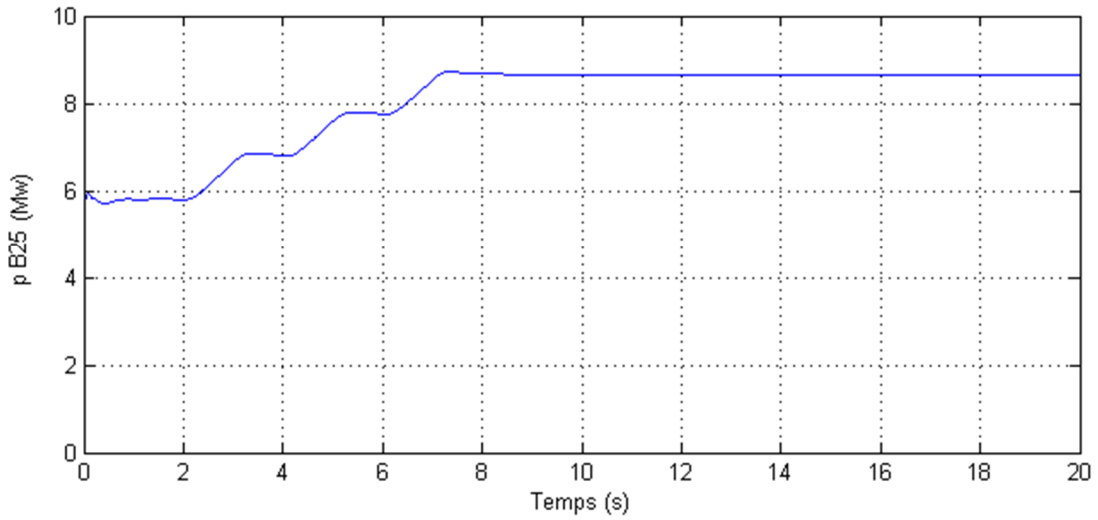


Figure IV.8. La puissance active au jeu de barre B25.

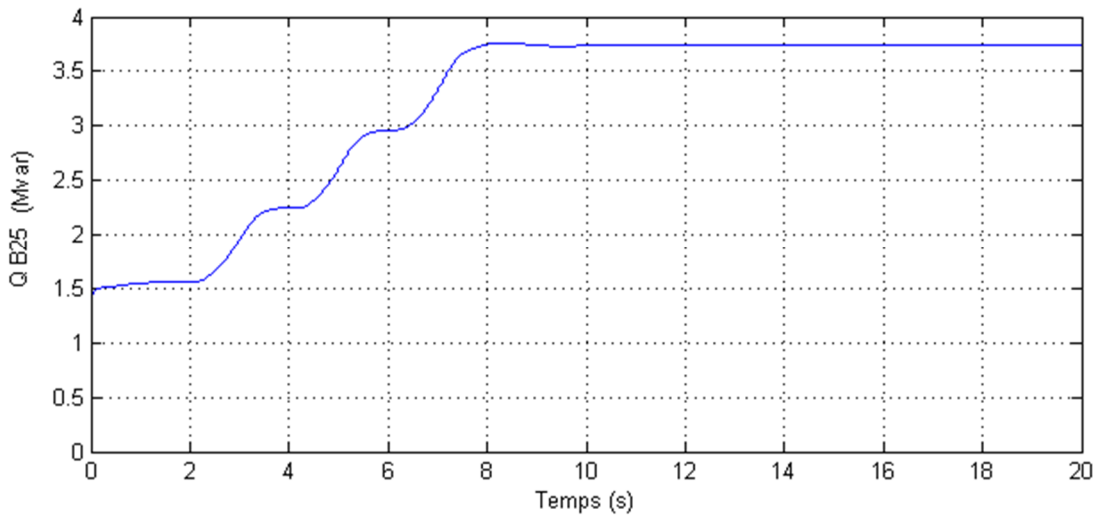


Figure IV.9. La puissance réactive au jeu de barre B25.

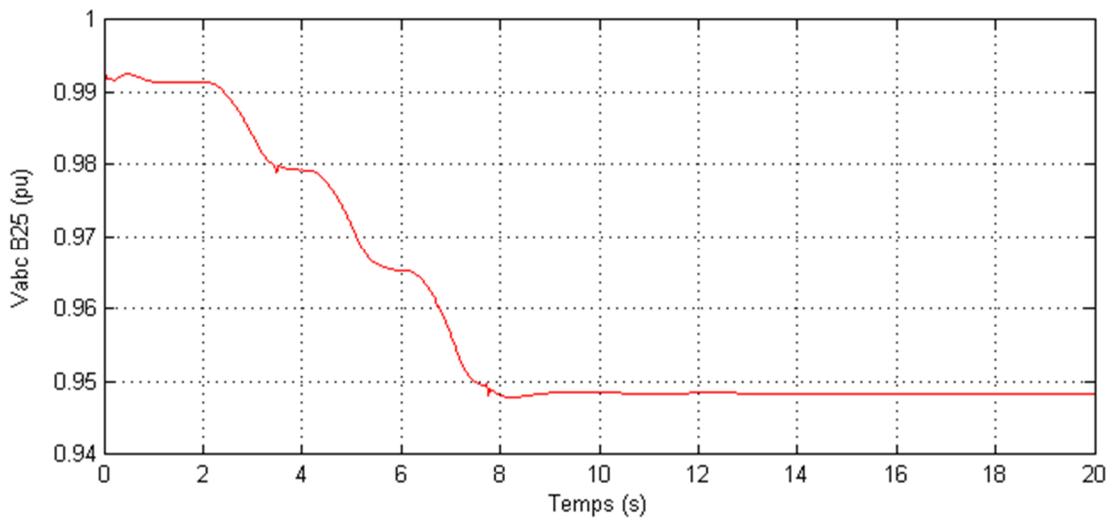


Figure IV.10. La tension V_{abc} au jeu de barre B25.

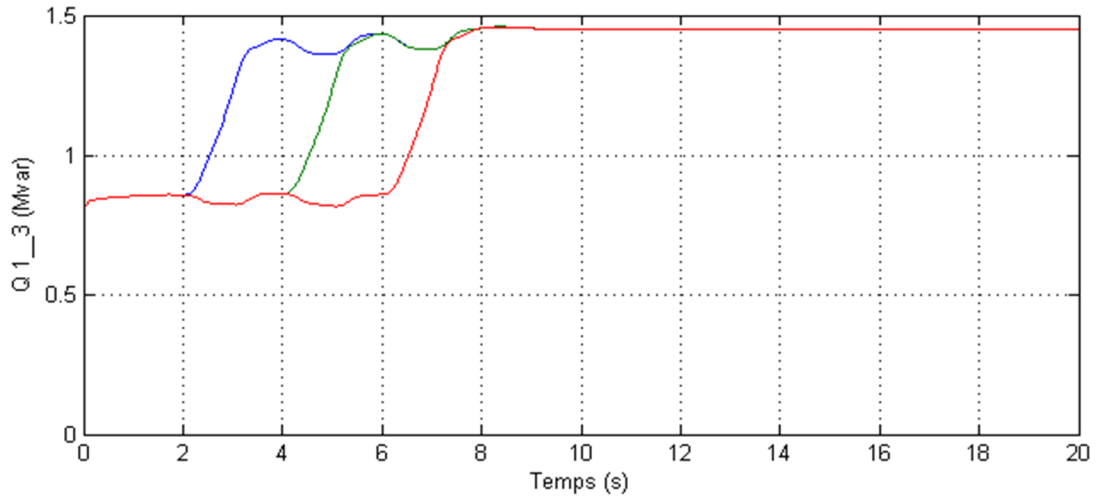


Figure IV.11. La puissance réactive des éoliennes.

IV.7.2. Deuxième Scénario (système avec défaut et sans STATCOM)

La puissance générée par les éoliennes diminue suite à l'apparition du défaut le groupe diesel reprend son fonctionnement pour pouvoir satisfaire la demande.

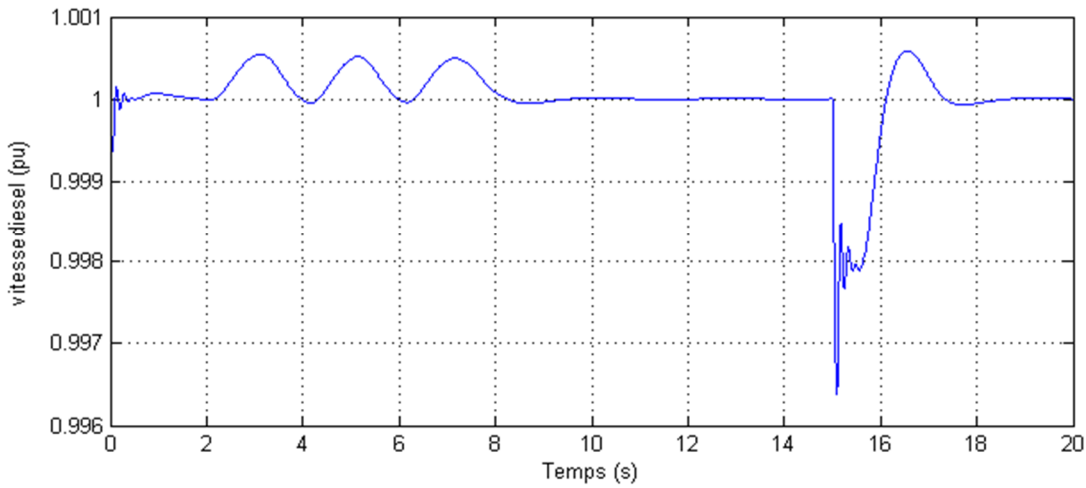


Figure IV.12. Vitesse de générateur Diesel.

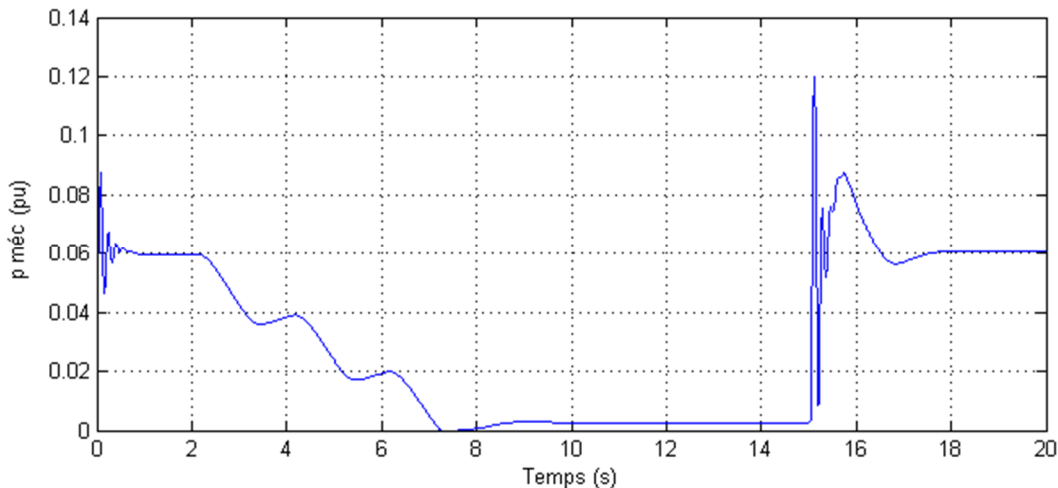


Figure IV.13. Puissance mécanique de générateur Diesel.

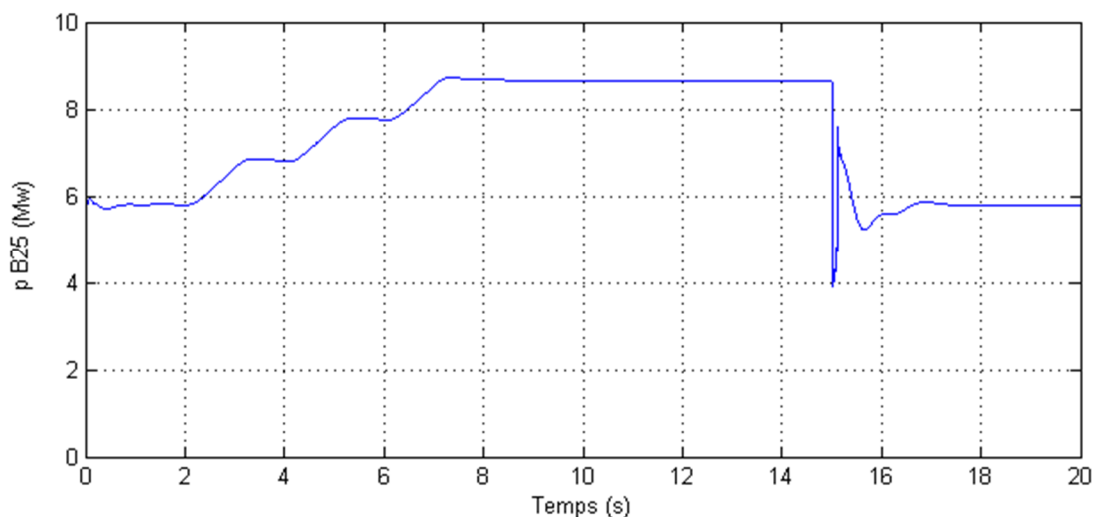


Figure IV.14. La puissance active au jeu de barre B25.

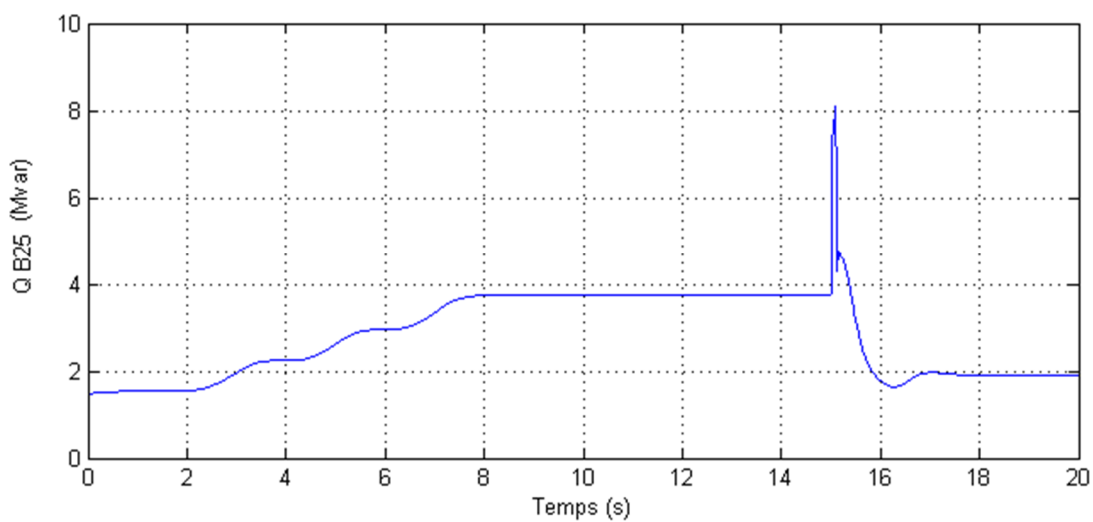


Figure IV.15. La puissance réactive au jeu de barre B25.

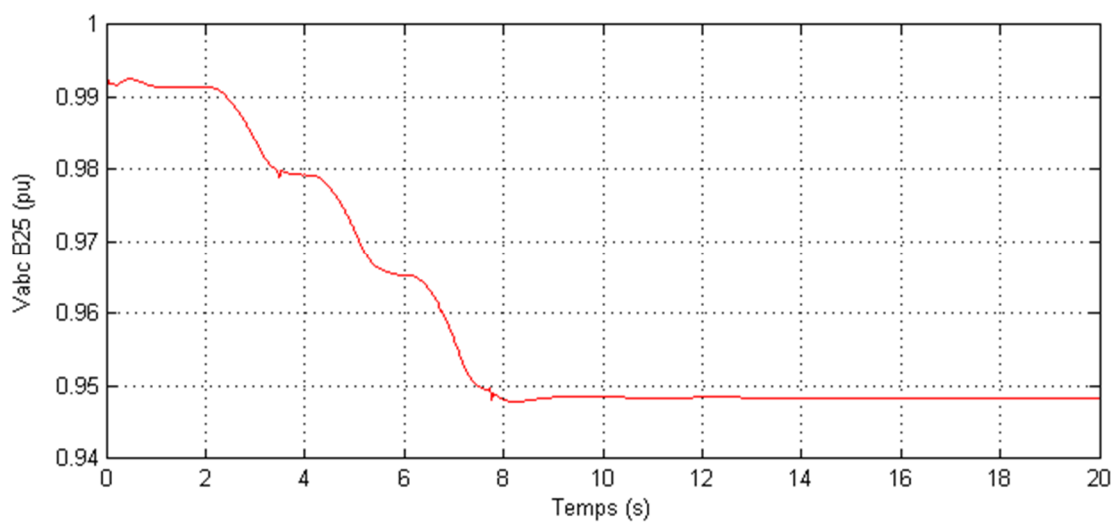


Figure IV.16. La tension V_{abc} au jeu de barre B25.

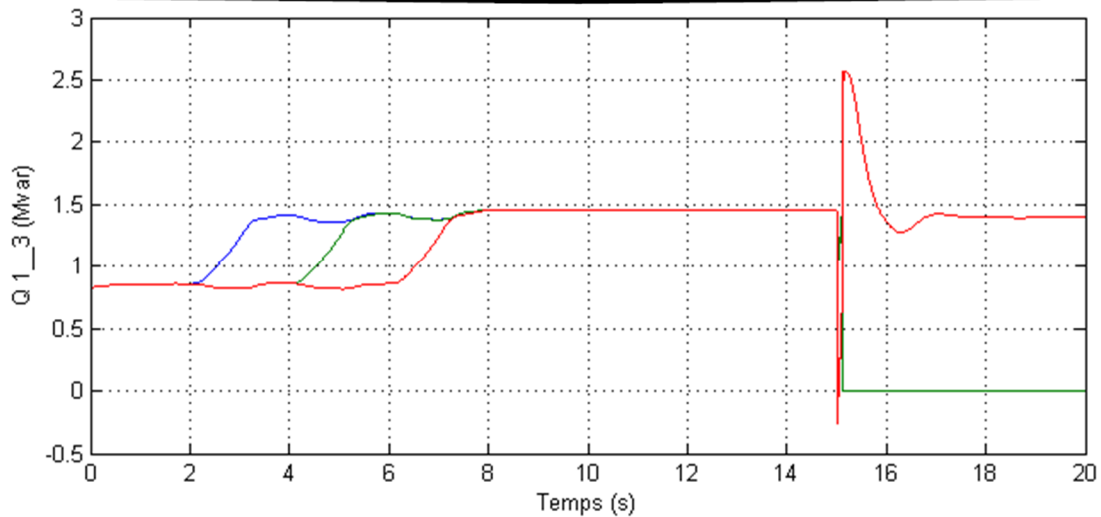


Figure IV.17. La puissance réactive des éoliennes.

IV.7.3. Troisième Scénario (système avec défaut avec statcom)

D'après les résultats de la simulation nous avons constaté que le système garde sa stabilité suite a une perturbation importante grâce au pouvoir du statcom donc le groupe diesel fourni moins d'énergie réactive alors moins de combustible, A cet état de fait nous avons prouvé l'impact que peut suscité un FACTS sur l'amélioration de la stabilité de la tension.

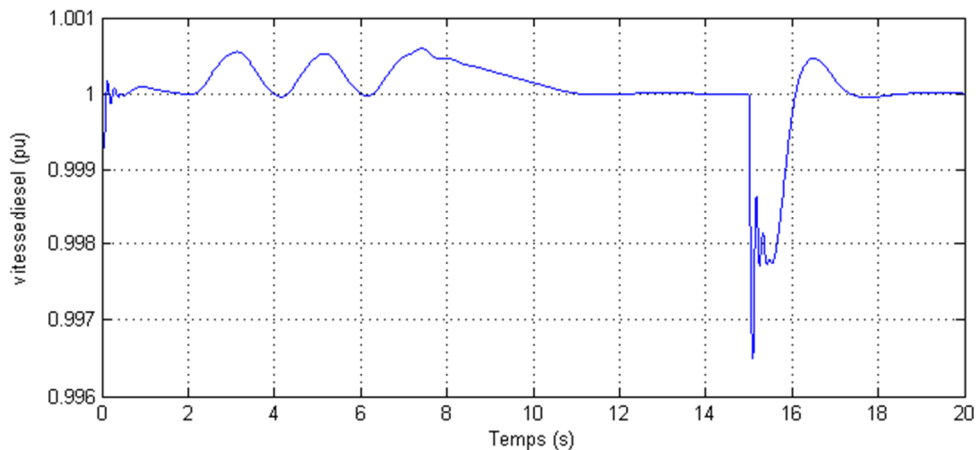


Figure IV.18. Vitesse de générateur Diesel.

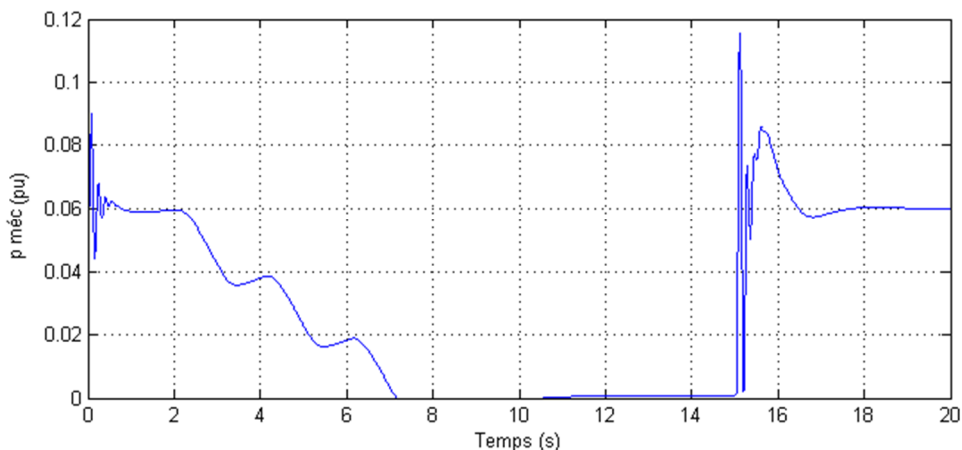


Figure IV.19. Puissance mécanique de générateur Diesel.

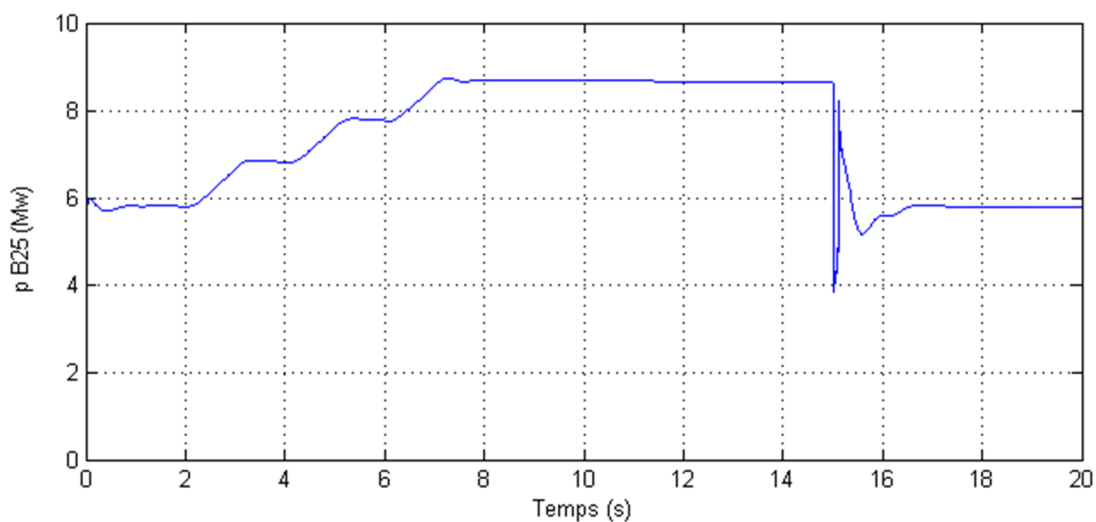


Figure IV.20. La puissance active au jeu de barre B25.

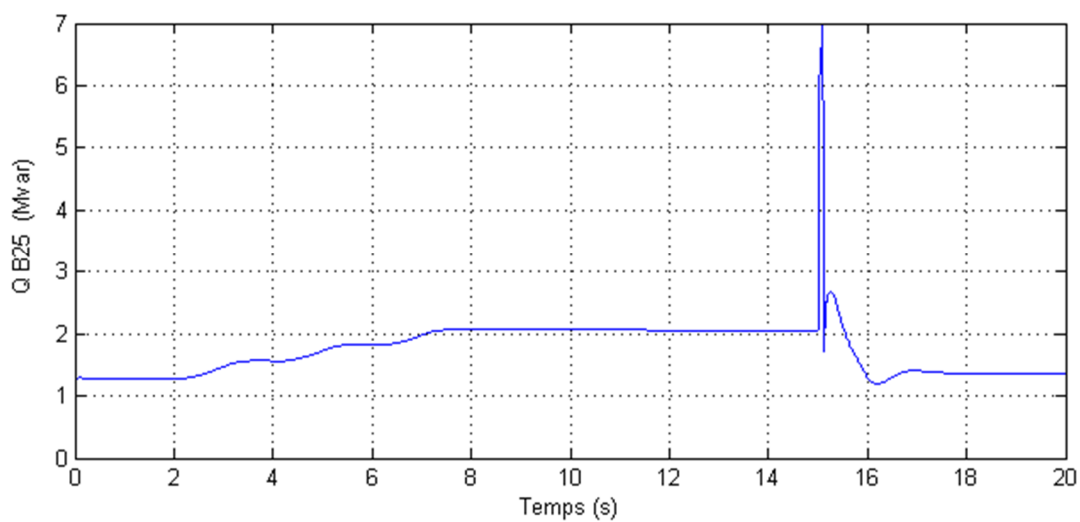


Figure IV.21. La puissance réactive au jeu de barre B25.

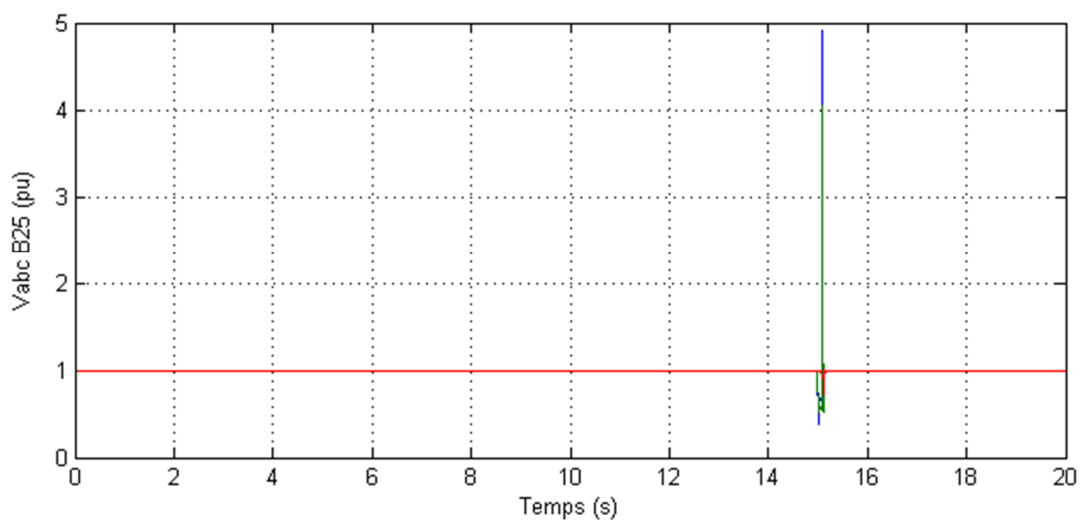


Figure IV.22. La tension V_{abc} au jeu de barre B25.

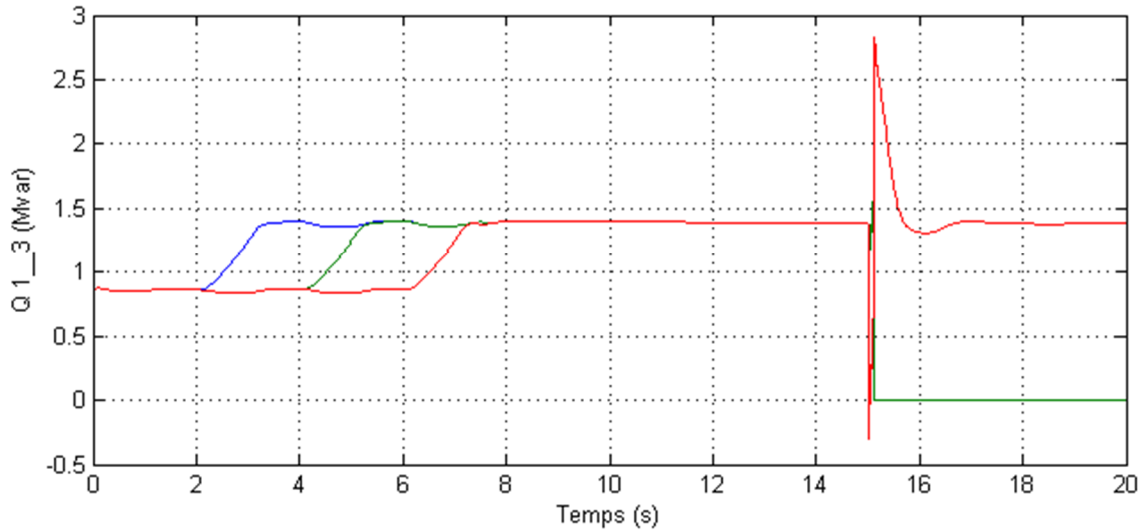


Figure IV.23. La puissance réactive des éolienne s.

IV.8. Résultats de Simulation en détail

À $t = 15$ s, un défaut est appliqué aux bornes de l'éolienne 2, provoque le déclenchement de la turbine à $t = 15,1$ s. Après le déclenchement de la turbine 2, les turbines 1 et 3 continuent de produire chacune 3 MW.

IV.8.1. Cas d'un défaut biphasé

IV.8.1.1. Fonctionnement sans STATCOM

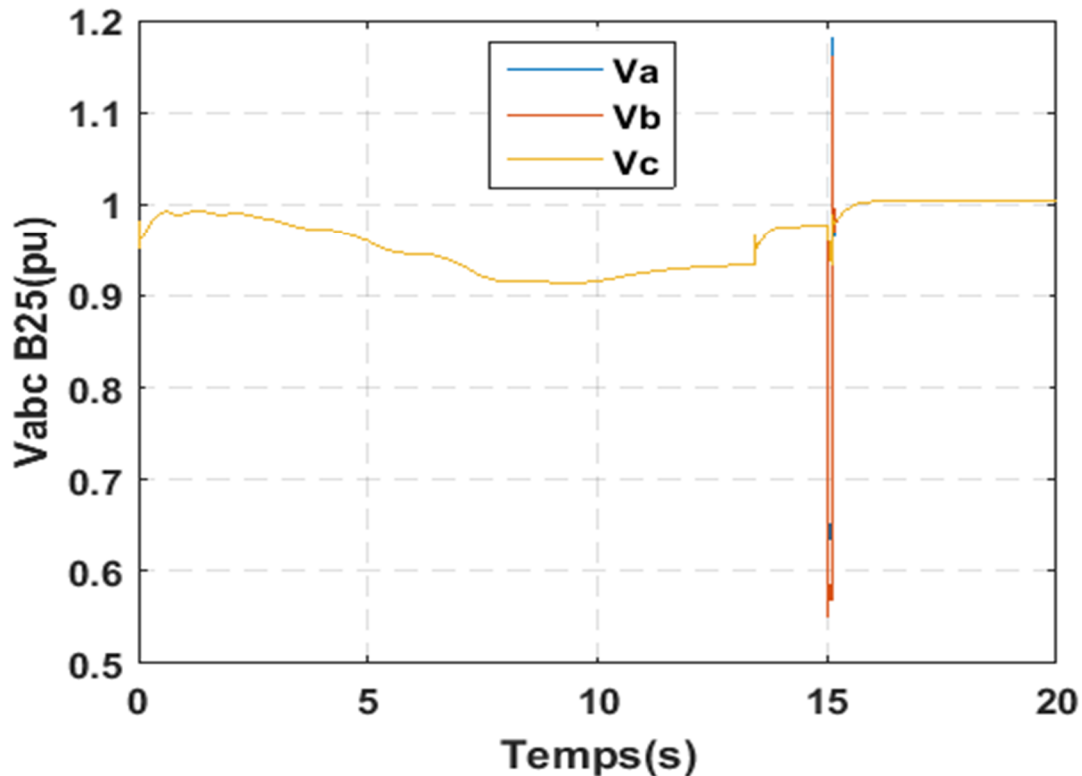


Figure IV.24. La tension V abc au jeu de barre B25.

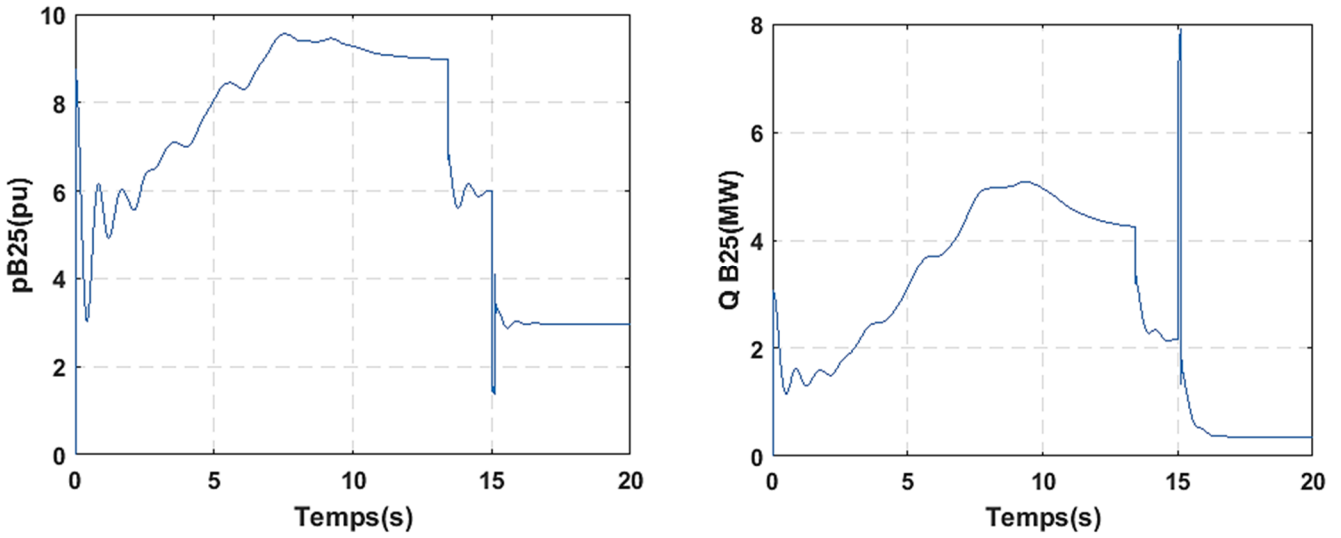


Figure IV.25. La puissance active et réactive au jeu de barre.

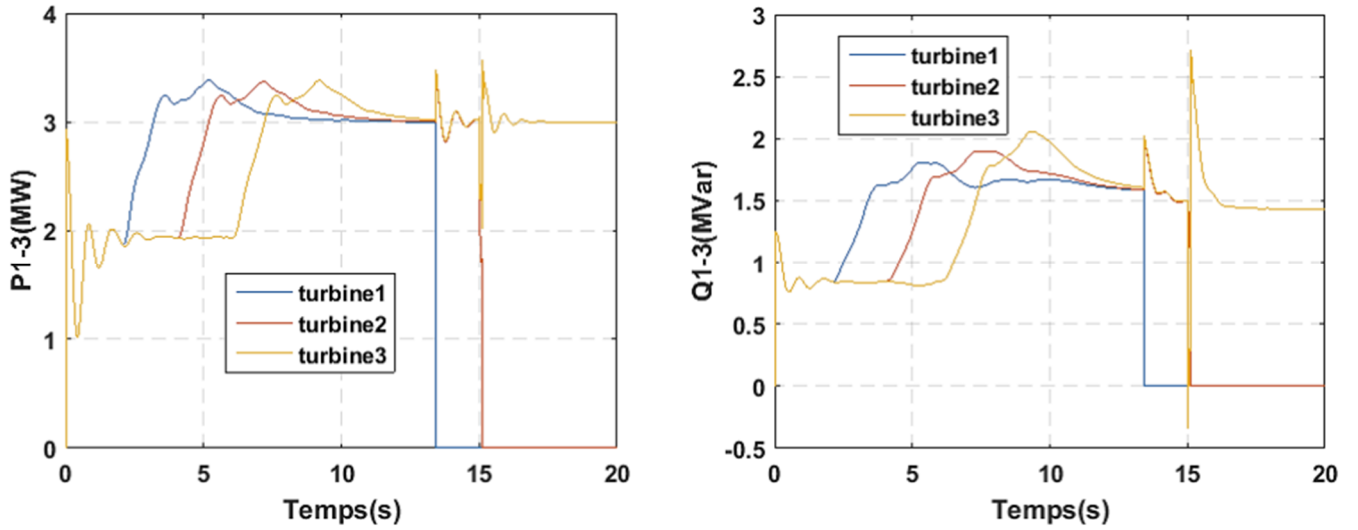


Figure IV.26. La puissance active et réactive des éoliennes.

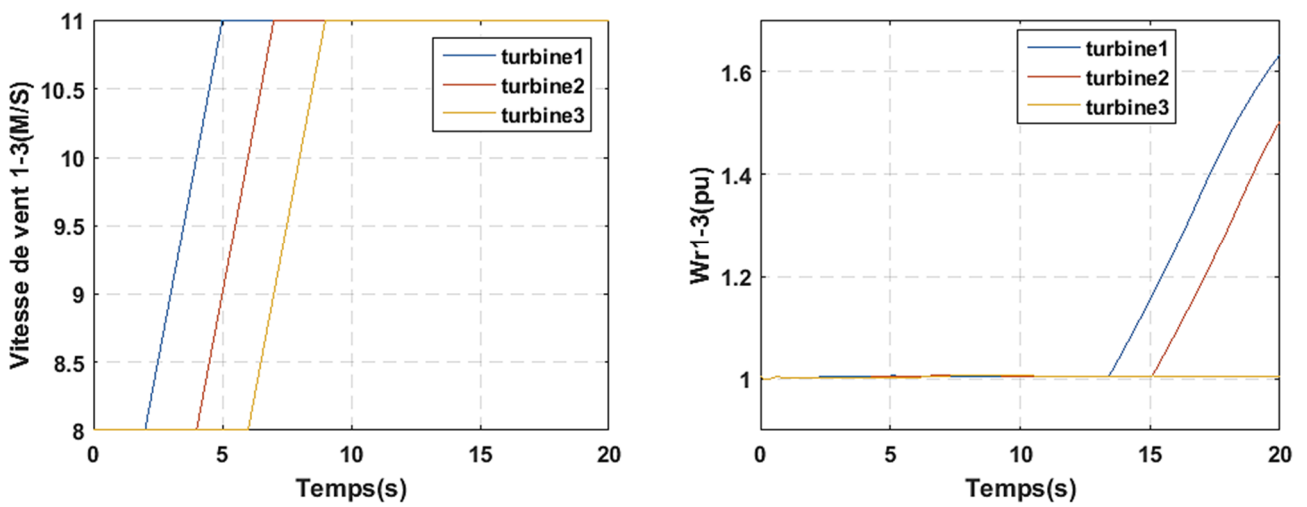


Figure IV.27. La vitesse du vent en m/s et la vitesse rotorique des turbines.

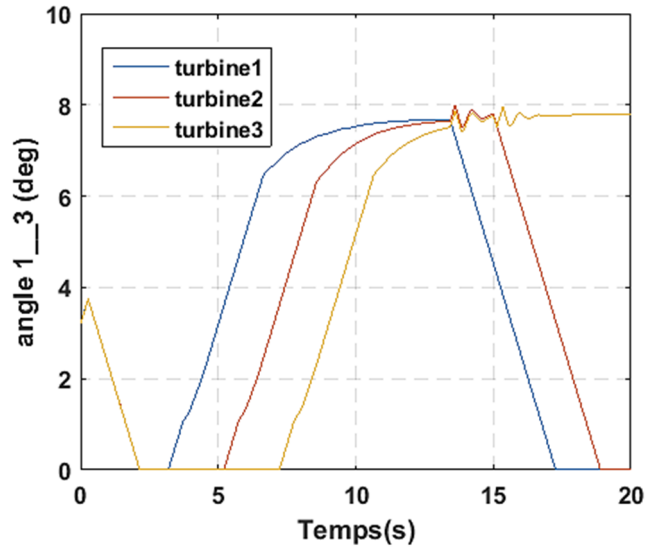


Figure IV.28. L'angle d'inclinaison de la turbine.

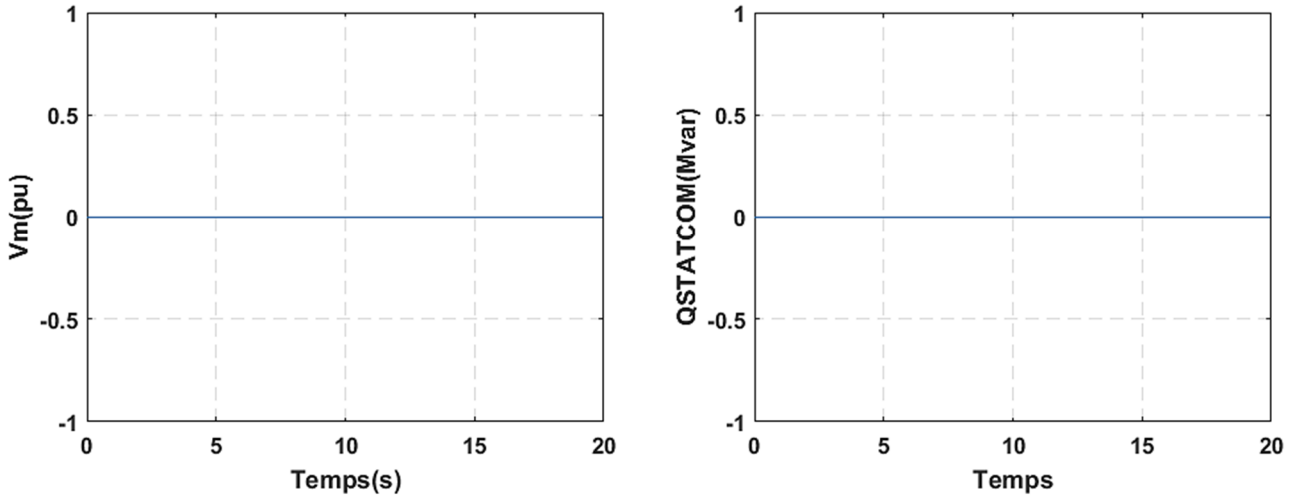


Figure IV.29. La tension et La puissance réactive du STATCOM.

IV.8.1.2. Fonctionnement avec STATCOM

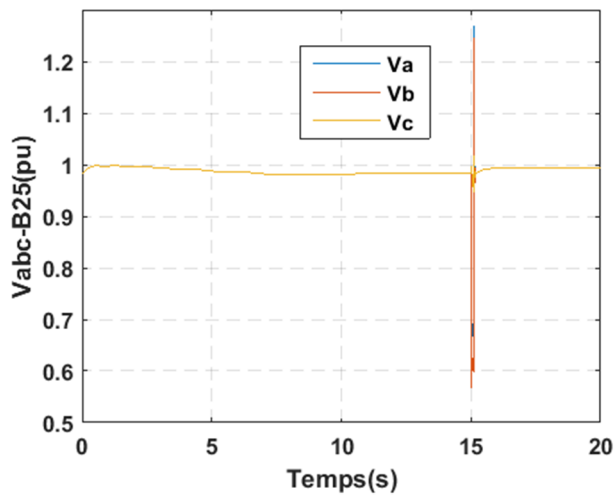


Figure IV.30. La tension Vabc au jeu de barre B25.

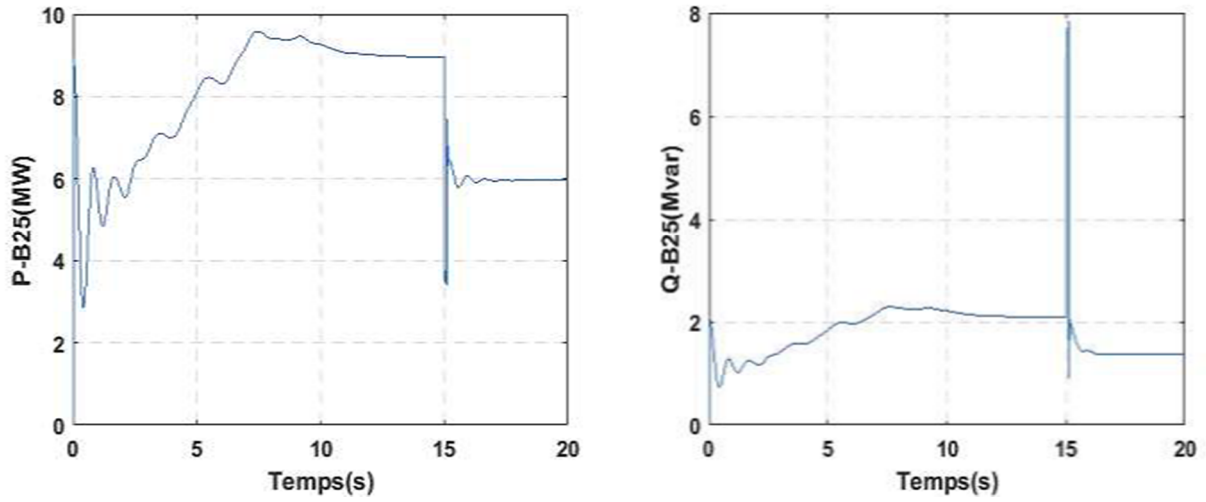


Figure IV.31. La puissance active et réactive au jeu de barre.

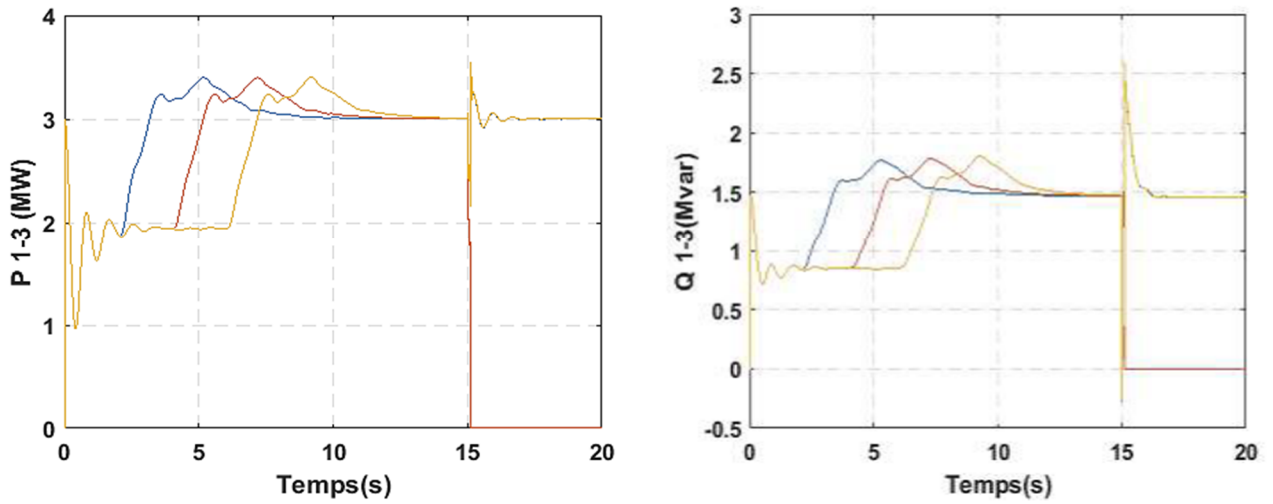


Figure IV.32. La puissance active et réactive des éoliennes.

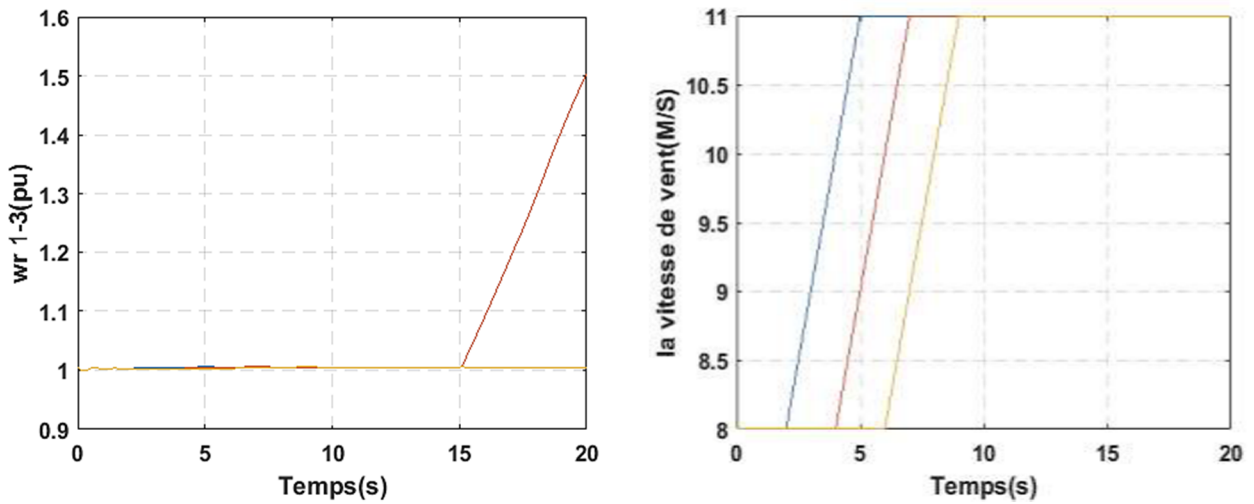


Figure IV.33. La vitesse rotorique des turbines et La vitesse du vent en m/s.

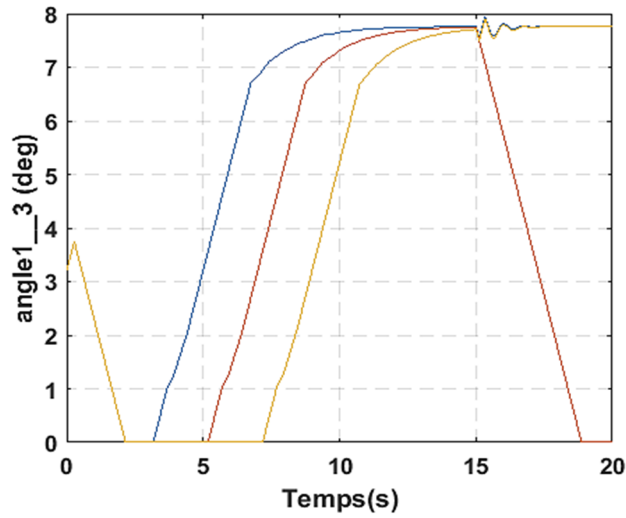


Figure IV.34. L'angle d'inclinaison de la turbine.

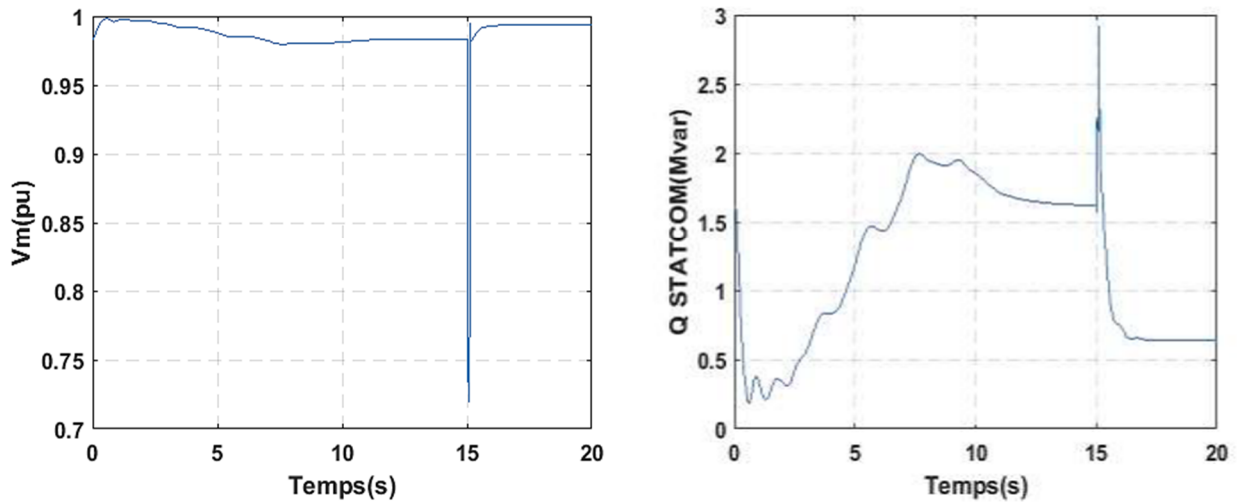


Figure IV.35. La tension et la puissance réactive du STATCOM.

IV.8.2. Cas d'un défaut triphasé

IV.8.2.1. Fonctionnement sans STATCOM

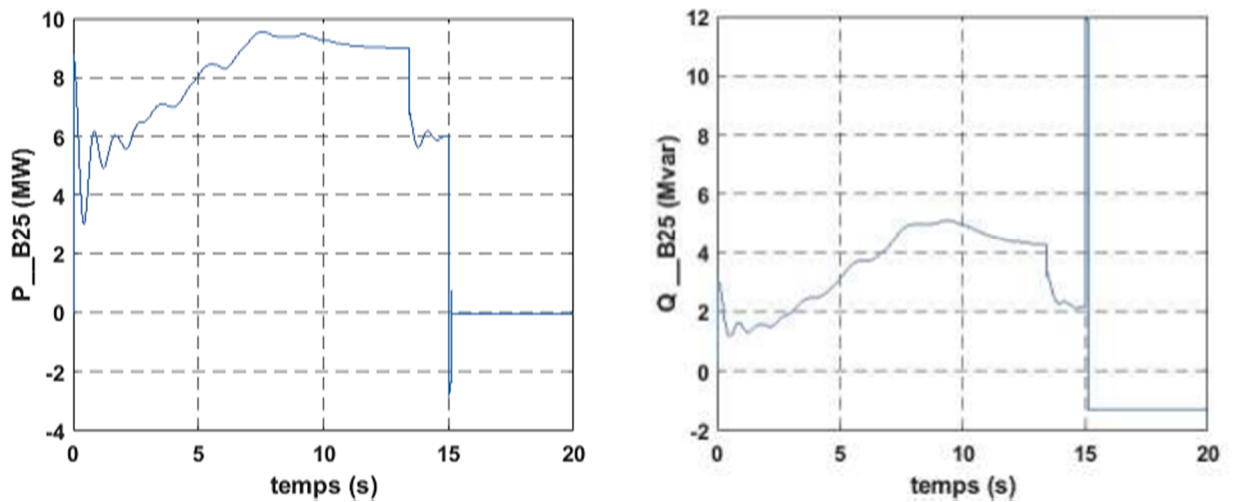


Figure IV.36. La puissance active et réactive au jeu de barre.

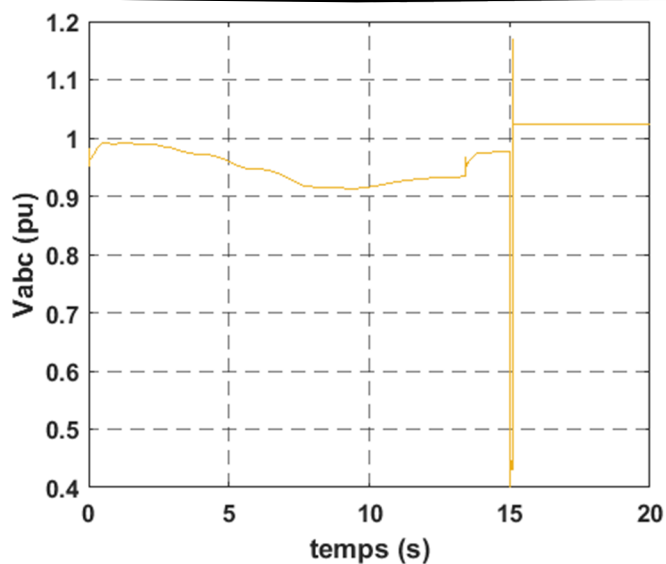


Figure IV.37. La tension V_{abc} au jeu de barre B25.

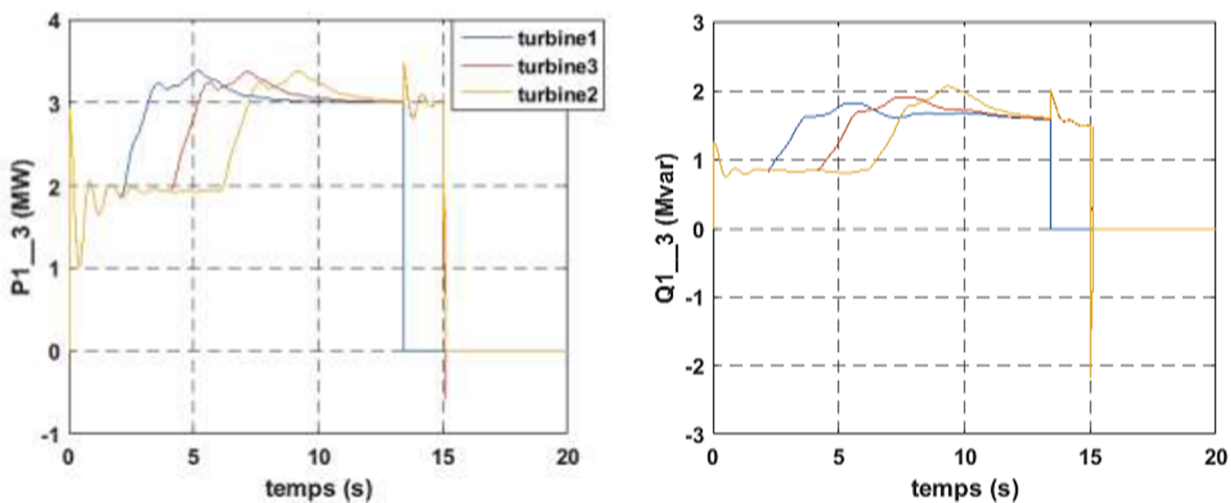


Figure IV.38. La puissance active et réactive des éoliennes.

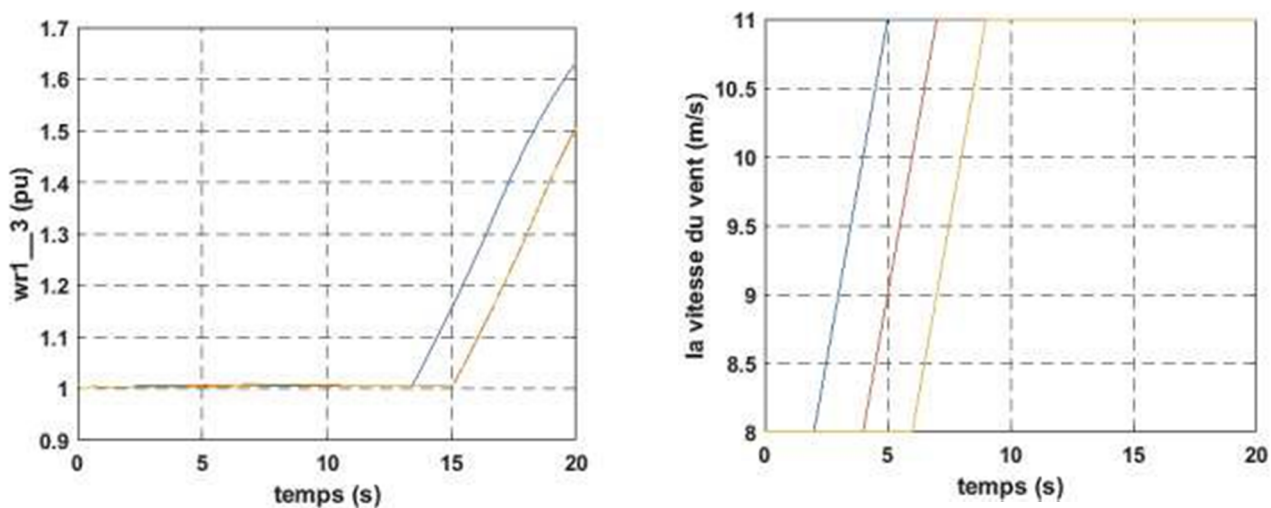


Figure IV.39. La vitesse rotorique des turbines et La vitesse du vent en m/s.

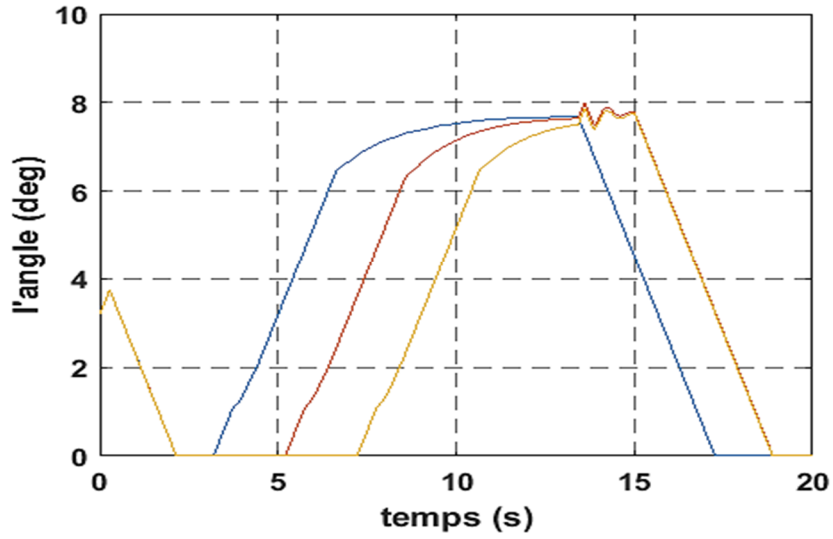


Figure IV.40. L'angle d'inclinaison de la turbine. IV.8.2.2. Fonctionnement avec STATCOM

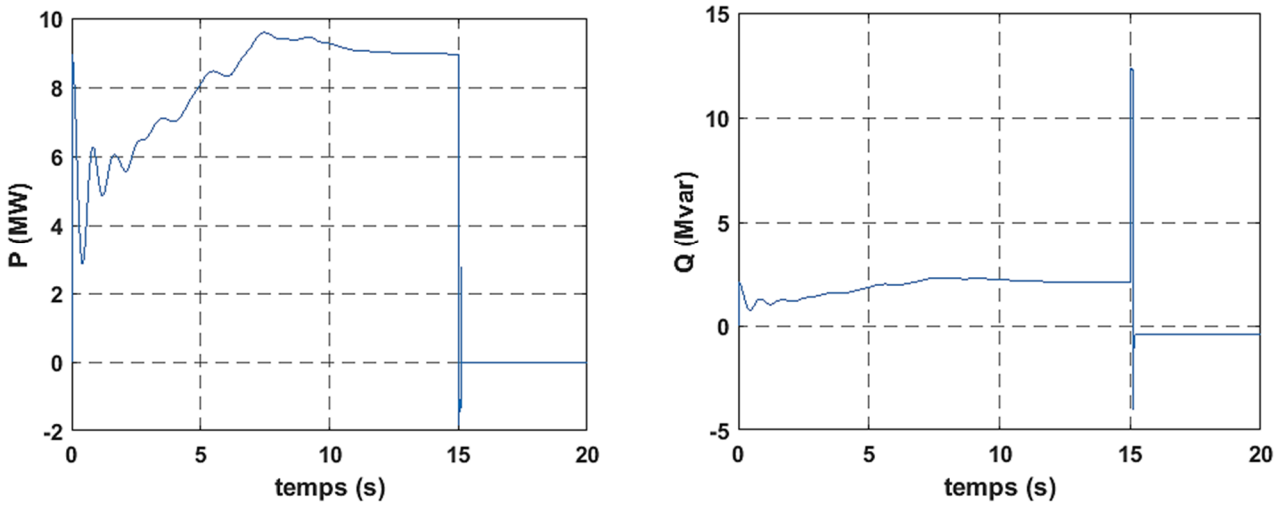


Figure IV.41. La puissance active et réactive au jeu de barre.

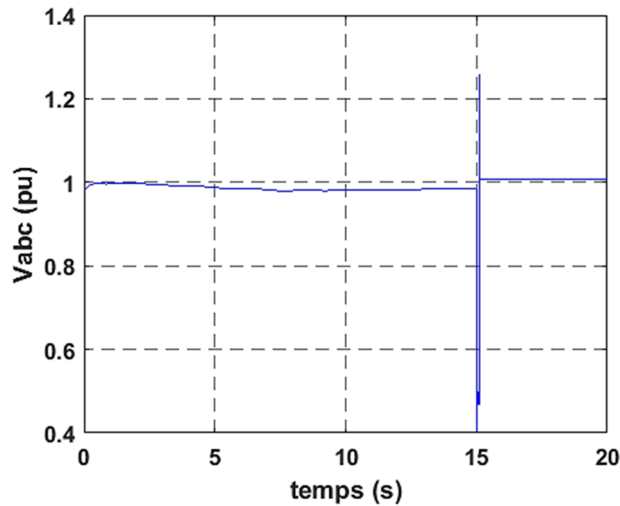


Figure IV.42. La tension Vabc au jeu de barre.

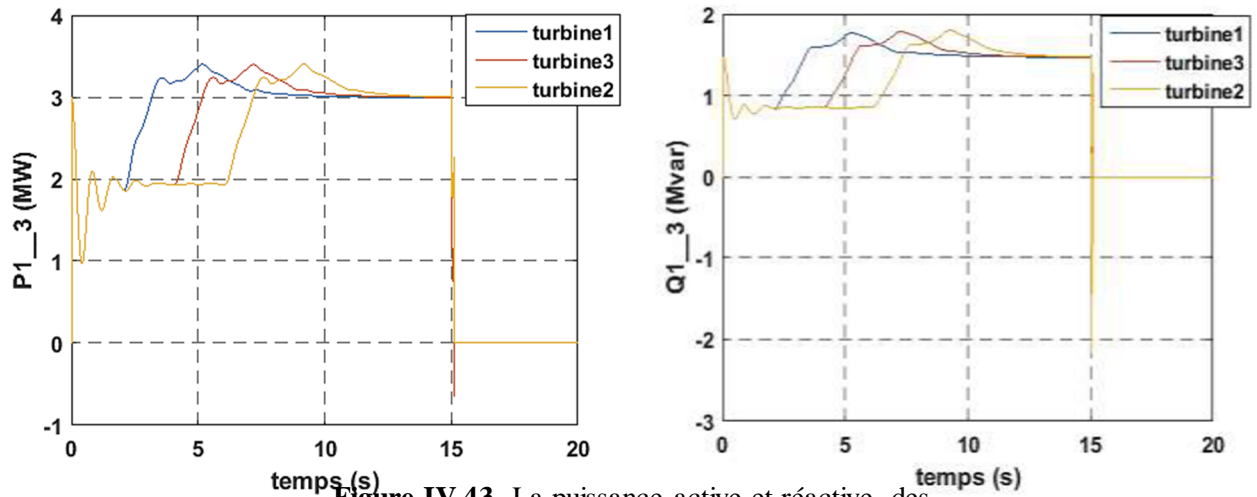


Figure IV.43. La puissance active et réactive des éoliennes.

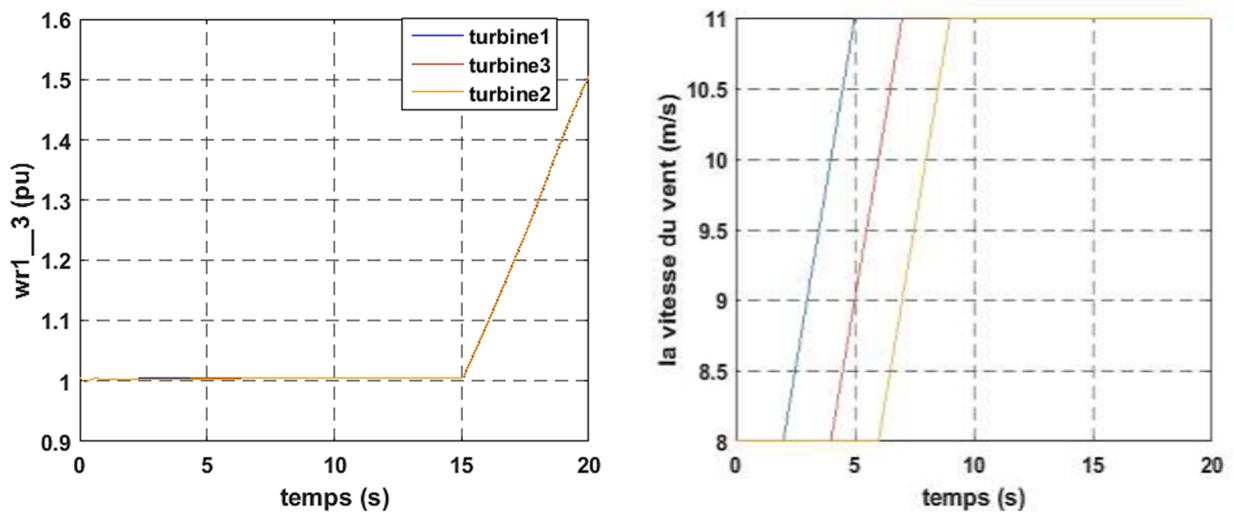


Figure IV.44. La vitesse rotorique des turbines et La vitesse du vent en m/s.

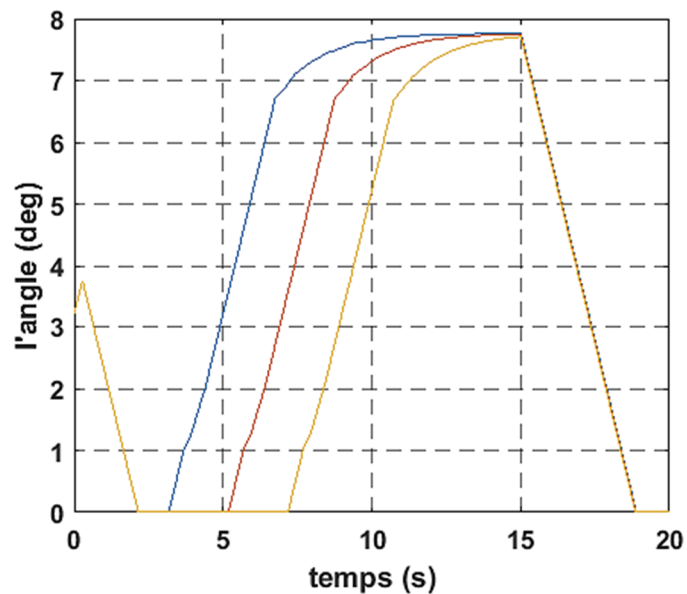


Figure IV.45. L'angle d'inclinaison de la turbine.

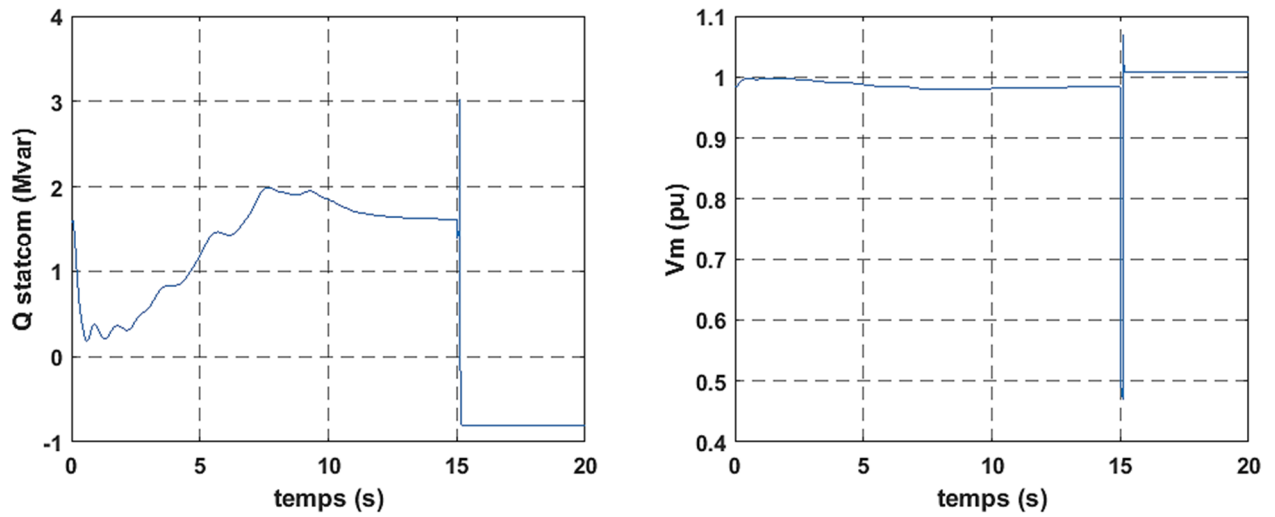


Figure IV.46. La puissance réactive et la tension du STATCOM.

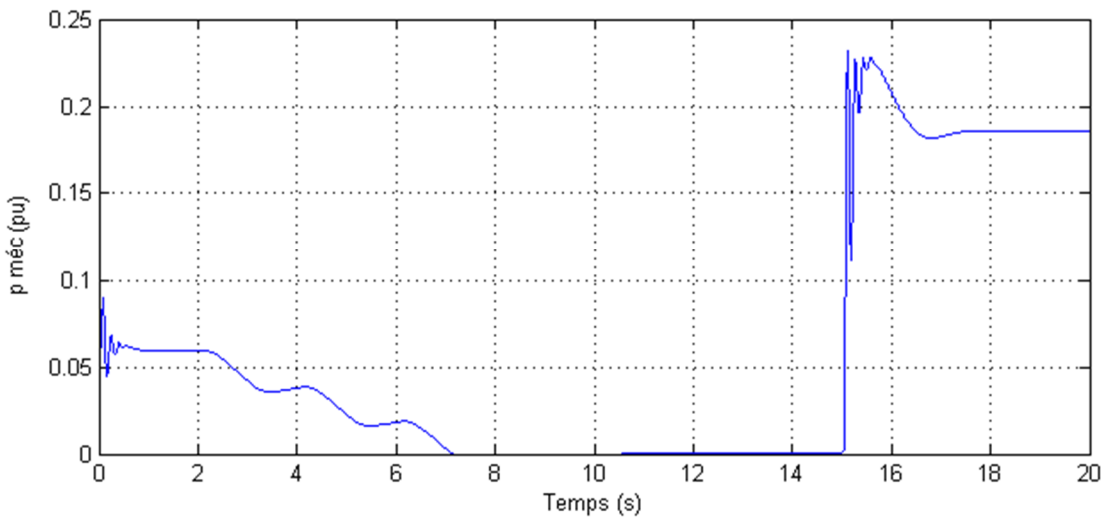


Figure IV.47. Puissance mécanique de générateur Diesel.

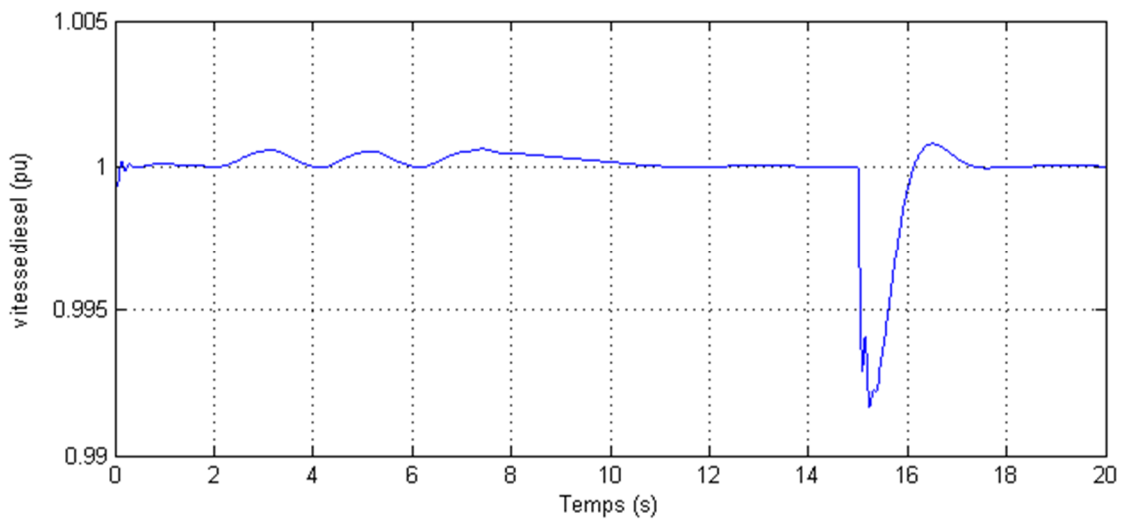


Figure IV.48. Vitesse de générateur Diesel.

Remarque

Les résultats de simulations du micro grid nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement du système et l'impact de dispositif FACTS dans les différents cas. Il s'est avéré qu'après l'insertion du STATCOM le système retourne à son état d'équilibre après l'apparition de défaut. Le STATCOM est un moyen très efficace pour maintenir le comportement d'un réseau isolé hybride (éolienne - diesel) stable en fréquence et en tension des jeux de barre auquel il est connecté. Quel que soit la perturbation court-circuit (biphasé ou triphasé).

Le micro grid a un Comportement stable, c'est-à-dire que, soumis à de petites perturbations (défaut monophasé), il revient à son point de fonctionnement initial, jusqu'au retour à l'équilibre concernant le défaut triphasé nous avons constaté que notre système tend vers l'effondrement.

IV.9. Conclusion

L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS améliore les performances dynamiques du système électriques tel que ;

- Une meilleure utilisation de moyens de transmissions existants.
- Augmenter la capacité du transfert du système de transmission.
- Améliorer la stabilité des réseaux électriques et la qualité de service.

Conclusion générale

Conclusion général et perspective

Le travail présenté dans ce mémoire montre l'intérêt du dispositif FACTS pour améliorer la stabilité d'un micro réseau Diesel, Eolienne, STATCOM

Le micro réseau électrique est constitué d'un parc éolien raccordé au groupe électrogène Diesel, l'apparition du défaut dans le parc éolien peut affecter la stabilité du système. Pour répondre efficacement au problème de perturbation sur le micro grid il s'avéré nécessaire de mettre en œuvre un STATCOM.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons suivi une méthodologie de travail comme suit :

En premier chapitre, nous avons commencé à énumérer quelques notions sur la stabilité des réseaux électriques

Dans le second chapitre on a présenté la description des dispositifs FACTS.

Concernant le troisième chapitre on a dressé un rappel sur les différents types des énergies renouvelables suivi par une représentation des systèmes hybrides

- A l'issue de ce travail, nous avons effectué des simulations à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink d'un micro grid assisté par un STATCOM. Les résultats obtenues favorisent la production éolienne, et permet de nous donner l'avantage d'étudier profondément le fonctionnement d'un système éolien-diesel qui satisfait nos besoins de l'énergie dans les régions éloignées utilisant un dispositif STATCOM pour agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le micro réseau.

Ceci a pour effet d'augmenter ou diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Comme perspective d'avenir nous proposons

- Contrôle de micro grid par un autre système FACTS ;
- Étudier le système hybride panneau photo -voltaïque diesel ;
- Introduire la technique PLL et MPPT.
- La fiabilité et la performance par rapport aux parcs éoliens de grande capacité raccordés au réseau à haute tension.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]: Ouali Abdelhamid, "Évaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences", mémoire de magister, département d'électrotechnique, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene 2008.
- [2]: IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms And Definitions," Definition And Classification Of Power System Stability'', IEEE Transactions on Power Systems, Vol19, No. 2, May 2004.
- [3]: HAMADOU Zakaria, " Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique «, mémoire de magister, département d'électrotechnique, université de SETIF ,2012.
- [4]: H. ELKHATIB, "Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique", Thèse de Doctorat Université de PAUL CEZANNE D'Aix-Marseille, 2008.
- [5]: M. Mokhnache, « étude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs facts », thèse de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.
- [6]: S. DAIBOUN, "Renforcement de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS," Mémoire de Magistère, Département d'électrotechnique Université de Skikda 2005.
- [7]: ZENDAGUI Fatima Zohra, "Analyse de la stabilité transitoire dans les réseaux électrique", mémoire de master, département de Génie Electrique, Université de Mohamed Khider Biskra ,2013
- [8]: N° 185 Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels
- [9]: BOUAFIA Asma et NOURANI Fatima,"Stabilité transitoires des fermes éoliennes en présence du STATCOM", Mémoire de Master, Département de Génie Electrique, université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [10]: BOUTABA Samia, "Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC", Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique, Université Hassiba Ben Bouali Chlef ,2009
- [11]: Sameh K. M. Kodsi, , " Accounting for the effects of Power System Controllers and Stability on Power Dispatch and Electricity Market Prices», Electrical and Computer Engineering, thesis Doctor Waterloo, Ontario, Canada, 2005.
- [12]: G. Andersson, «Modeling and analysis of Electric Power Systems", Lectures 227-526, EEH Power Systems Laboratory, ETH, Zurich, March 2006.
- [13]: B.bouhadouza, "amélioration de la stabilité transitoire des fermes eoliennes par l'utilisation du statcom ", mémoire de magistère, université farhatabbas, sétif, 2011.

- [14] : SEKHANE HOUSINE optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS.
- [15] : Pr. Jean –Luc thomas Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique, Paris de Versailles, 19 octobre 2006
- [16] : Abdelaàli ALIBI Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS université de Batna soutenu le 13/06/2009.
- [18] : Actualités technologiques du groupe ABB (ABB revue)
- [19] : M. HAMADOU Zakaria Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique université de Sétif soutenu le 20/06/2012.
- [20] : Benras Med Amine et Laroui Souleymane Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif université ouargla soutenu le 09/06/2015
- [21] : Actualités technologique du groupe ABB.
- [22] : Fiche d'information réseaux intelligents du groupe ABB actualités technologique
- [23] : Document connaissances de base, état: janvier 2016 association des entreprises électriques suisses.
- [24] : Kerbaa Amel Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de L'énergie électrique.
- [25] : Loukkaf Hanane, "Étude d'un Microgrid avec STATCOM ",Mémoire de Master, Département de Génie Electrique ,université Ibn khaldoun Tiaret, 2017
- [26] : TOURQUI Djamel Eddine " Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'intégration des sources d'énergies renouvelables ", Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2017
- [27] : FEDDAOUI Omar, " Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables ", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.
- [28] : La grenelle de la mer, " Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer ", Année 2009.
- [29] : L. Abdelhamid, " contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement ", thèse de doctorat, université hadj Lakhdar Batna, 2012.

- [30] : BOUAFIA Asma et NOURANI Fatima, "Stabilité transitoires des fermes éoliennes en présence du STATCOM", Mémoire de Master, Département de Génie Electrique, université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [31] : GASSAB Samir, " Modélisation d'une centrale à énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne". Thèse de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2011.
- [32] : A. Hassad , « influence de la commande d'une gada des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électrique», thèse magister, université Farhat Abbas, Sétif, 2012.
- [33] : Madjid Si Brahim, "étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone ", thèse doctorat 3 eme cycle en électrotechnique département d'électrotechnique soutenue 16 juin 2015.
- [34] : Baghdadi Fazia, " Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables». Mémoire de Magister, spécialité génie mécanique, Université Mouloud Mammeri Tizi -Ouzou.2011.
- [35] : Ludmil Stoyanov, " Structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables " Université Technique de Sofia, Faculté Électrotechnique, Sofia, Bulgarie ; Université de Corse, Équipe EnR, Ajaccio, France *Révisé et accepte le 15 mars 2010.*
- [36] : Ludmil Stoyanov. " Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. " Energie électrique. Université Pascal Paoli, Français. 2011.

Résumé

L'objectif de ce travail est de présenter la contribution d'un STATCOM sur la stabilité. Le micro grid est destiné à la production d'électricité à partir d'un système hybride composé d'un groupe diesel et une source renouvelable pour alimenter les régions éloignées. L'énergie éolienne est devenue l'une des principales sources d'énergie renouvelables dans le monde entier.

Un STATCOM est inséré sur le système afin d'améliorer la transit de puissance et la stabilité entre le groupe électrogène et la charge. Les résultats de simulation développés sous MATLAB Simulink/SimPower montrent que le STATCOM présente des performances importantes pour la stabilité de microgrid pendant les différents défauts.

Mots clés : Microgrid, Hybride, Diesel, Éolienne, STATCOM, Matlab, Default.

Abstract

The objective of this work is to present contribution of STATCOM for stability. The micro grid intended for the production of electricity from a hybrid system composed of a diesel group and a renewable source to supply remote areas. Wind power has become one of the world's leading renewable energy sources.

A STATCOM is inserted on the system to improve power flow and the stability between the production plants and the load. The simulation results developed under MATLAB Simulink/SimPower show that STATCOM has an important performance for microgrid stability for different faults.

Keywords: Microgrid, Hybrid, Diesel, Wind, STATCOM, Matlab, Fault.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقديم مساهمة STATCOM من أجل الاستقرار. وتهدف الشبكة الصغيرة لإنتاج الكهرباء من نظام هجين يتكون من مجموعة الديزل كمصدر متجدد لتزويد المناطق النائية. أصبحت طاقة الرياح واحدة من مصادر الطاقة المتجددة. الرائدة في العالم يتم إدخال STATCOM على النظام لتحسين تدفق الطاقة و الاستقرار بين محطات الانتاج و الحمل تظهر نتائج المحاكاة التي تم تطويرها تحت MATLAB Simulink Simpower أن STATCOM لديه أداء مهم لإنتقار microgrid لأخطاء محيطية .

الكلمات المفتاحية : microgrid ، Hybrid ، ديزل ، statcom ، Matlab ، Default.