



Mémoire de Master

Présente au

Département: Génie Electrique
Domaine: Sciences et Technologies
Filière: Electrotechnique
Spécialité: Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

SADAOUI Bouchra

Et

KOUBA Roukia

Thème

**Etude de la stabilité des réseaux électriques en présence
des sources d'énergies renouvelables**

Soutenu le: 25/06/2025

Devant le Jury composé de :

Mr : SAOUDI Kamel	M.C.A	Univ. Bouira	Président
GRICHE Issam	M.C.A	Univ. Bouira	Encadreur
YAHIOU Abdelghani	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur

Année Universitaire: 2024-2025



Dédicace

*Je voudrai dédier le présent travail
aux personnes les plus chère au monde
:mes parents qui mon toujours aidé et
soutenue dans mon parcours
universitaire ,sans oublié leur sacrifie et
amour,que dieu les garde et leur
donne une longue vie .*

A mes chères sœurs et frère .

*Et à tous ceux qui ont aidè de loin
ou de prés à la réalisation dece travail.*



Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et des Sciences Appliquées de l'Université de Bouira.

Je tiens à remercier, en premier lieu, Dr GRICH Issam, Directeur de ce mémoire, d'avoir accepté de nous encadrer et diriger ce travail.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nous aimerions remercier vivement nos chères amies et camarades de notre promotion « Electrotechnique Industrielle ».

Enfin, j'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

Table des Matières

Table des Matières	N
Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Tableaux des matières	
Liste des figures	
Liste d'abréviation	
Introduction générale	I
Chapitre 1 : Etat de l'art sur les énergies renouvelables et la stabilité des réseaux électriques	
1.Introduction.....	2
2. Energies renouvelables.....	2
2.1. Eolienne.....	3
2.2. Photovoltaïque.....	4
2.3.Hydroélectrique.....	5
2.4. Biomasse.....	6
2.5. Géothermique.....	6
3.La stabilité des réseaux électriques.....	7
3.1. Définition.....	7
3.2. Classification	7
3.2.1 Stabilité de l'angle du rotor	7
3.2.1.1.Stabilité angulaire aux petites perturbations.....	8
3.2.1.2.Stabilité angulaire aux grande perturbation.....	8
3.2.2.Stabilité de tension	9
3.2.3. Stabilité de fréquence	9
3.3. Amélioration de la stabilité	9
3.3.1. Amélioration de la stabilité par les PSS.....	9
3.3.2. Amélioration de la stabilité par les FACTS	9
3.4.Différentes catégories des FACTS.....	10
3.4.1. Compensateur parallèle.....	11
3.4.1.1. STATCOM.....	11
3.4.1.2. SVC.....	12
3.4.2. Compensateur série.....	13
3.4.2.1. TCSC.....	13
3.4.2.2. SSSC.....	14
3.4.2.3. TSSC.....	14
3.4.3. Compensateur série parallèle.....	14
3.4.3.1. UPFC.....	14
3.4.3.2. TCPST.....	15
3.4.3.3. TCPAR.....	16
4. Conclusion.....	16

Chapitre 2 : Modélisation des réseaux électriques

1. Introduction	17
2. Modélisation des composant d'un réseau électrique de base	17
2.1. La machine synchrone	17
2.1.1. suppositions de simplification.....	17
2.1.2. Principe de fonction.....	18
2.2. Modélisation de laligne de transmission	19
2.3. Modélisation de la charge	20
2.4. Modélisation de transformateur	20
3. Modélisation du réseau électrique en présence d'énergie renouvelable	21
3.1. Modélisation éolienne	21
3.1.1. Principe de fonctionnement	21
3.1.2. Les générateur éolienne.....	21
3.1.2.1 Eolienne a vitesse fixe	22
3.1.2.2 Eolienne a vitesse variable	22
3.1.3. Modèle mathématique de l'éolienne.....	23
3.2. Modélisation photovoltaïque	24
3.2.1. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	24
3.2.2. Module photovoltaïque.....	25
3.2.2.1. Mise en série	25
3.2.2.2. Mise en parallele.....	25
3.2.3. Architecture des systèmes photovoltaïques	26
3.2.3.1. Installation PV autonome	26
3.2.3.2. Instalation PV couplée au réseau	26
3.2.4. Modèle simplifié du système PV.....	27
4. Mise en équation du système mono machine connecté au jeu de barre infini.....	29
5. Modélisation de système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau.....	30
5.1 Définition	30
5.2. Classification des système hybrides.....	31
5.2.1. Le mode de fonctionnement	32
5.2.2. La structure du système hybride	32
5.2.3. Les avantages du système hybride PV/éolien.....	33
6. Conclusion.....	33

Chapitre 3 : Résultats et discussion

1. introduction	34
2. Application: Etude de la stabilité d'un réseau SMIB en présence des sources renouvelables, un SVC et un contrôleur PSS.....	34
2.1. Présentation du système étudié	34
2.2. Résultats de simulation	36
2.3. Interprétation des résultats	37
2.4. Régulation de la tension par SVC piloté par un contrôleur.....	38
2.4.1. Résultats de simulation.....	39
2.4.2. Interprétation des résultats.....	39
3. Application 2 : Etude de la stabilité d'un réseau en présence de l'énergie éolienne et un contrôleur TCSC.....	40

3.1. P résentation du système étudié	40
3.2.Résultats de simulation	41
3.3. Interprétation de résultats	43
4.Application 3 : Etude d'un réseau symétrique à 4 générateur avec intégration éolienne et forte charge de transfert	44
4.1. Présentation de système étudié	44
4.2.Résultats de simulation	46
4.3. Interprétation des résultats	47
5. Conclusion.....	48
Conclusion générale	49

Liste des Figures

Figure 1.1. Eolienne d'Adrar.....	03
Figure 1.2. Eolienne à axe horizontal et à axe verticale.....	04
Figure 1.3. Système Photovoltaïque.....	05
Figure 1.4. l'interface P-N dans un dispositif photovoltaïque.....	05
Figure 1.5. Centrale hydroélectrique.....	06
Figure 1.6. Classification de différent type de stabilité.....	08
Figure 1.7. représente la classification des dispositifs de compensation FACTS.....	11
Figure 1.8. schéma du STATCOM.....	12
Figure 1.9. schéma de principe d'un SVC.....	13
Figure 1.10. caractéristique du SVC.....	
Figure 1.11. schéma simplifié d'un SSSC.....	14
Figure 1.12. configuration de l'UPFC.....	15
Figure 2.1. couplage d'une machine synchrone avec un jeu de barres infini...	17
Figure 2.2. Principe de création de champ tournant par aimant permanent.....	18
Figure 2.3. Schéma équivalent d'une machine synchrone en régime transitoire	18
Figure 2.4. Schéma équivalent d'un modèle en π de la ligne de transport	20
Figure 2.5. Représentation d'une charge	20
Figure 2.6. Modèle du transformateur	21
Figure 2.7. Représentation schématisée d'une éolienne à vitesse fixe	22
Figure 2.8. Structure d'une éolienne à base MADA.....	23
Figure 2.9. Structure d'une éolienne à base de MS à aimants permanents.....	23
Figure 2.10. Installation photovoltaïque autonome.....	26
Figure 2.11. Installation photovoltaïque couplée au réseau.....	27
Figure 2.12. un modèle équivalent du cellule solaire à diode unique	27
Figure 2.13. système hybride éolienne –photovoltaïque.....	31
Figure 2.14. Classification des systèmes hybrides.....	33
Figure 3.1. système SMIB avec SVC et éolienne connecté au réseau.....	34
Figure 3.2. structure de Contrôleur PSS.....	36
Figure 3.3. vitesse de rotation et variation d'angle de rotor des générateurs (avec et sans CPSS).....	36
Figure 3.4. la puissance électrique générée par la machine synchrone et la puissance réactive (avec et sans CPSS).....	37
Figure 3.5. SVC avec Contrôleur PI.....	38
Figure 3.6. stabilité de la tension	39
Figure 3.7. schéma unifilaire du système SMIB avec éolienne	40
Figure 3.8. TCSC avec un régulateur lead-lag.....	40
Figure 3.9. réponse dynamique de la machine	41
Figure 3.10. réponse électrique de la machine	42
Figure 3.11. réponse électrique de la turbine éolienne.....	42
Figure 3.12. réponse dynamique de la turbine éolienne.....	43
Figure 3.13. différence de l'angle rotorique	43
Figure 3.14. réseau 4 machines 11 JB avec intégration du ferme éolienne	35
Figure 3.15. coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse	35
Figure 3.16. caractéristique de l'éolienne en fonction de vitesse du vent	36
Figure 3.17. réponse fréquentielle dans les deux zones.....	36

Figure 3.18. variation de la fréquence et de la puissance électrique	37
Figure 3.19. évolution du couple électromagnétique et de la vitesse du rotor...	37

Listes des Acronymes et Symboles

- **Acronymes**

GSR	Global Status Report
PSO	ParticleSwarm Optimisation (optimisation par essaim de particules)
FACTS	système Flexible de Transmission en CA
PSS	Power System Stabilizer (stabilisateur du système de puissance)
LFO	Low- Frequency Oscillation
AVR	Automatic Voltage Regulator (régulateur automatique de tension)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
GTO	Gate Turn-off
STATCOM	Static Compensator
SVR	Static Var Compensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
UPFC	Unified Power Flow Controller
TCPST	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
SMIB	Single Machine Inifinit Bus
MADA	Machine Asynchrone a Double Alimentation
MS	Machine Synchrone
CPSS	Conventional power system stabiliszer
PI	ProportionnelIntégral

• **Symboles**

E'	Tension interne	pu
E_t	Tension terminale	pu
I_g	Courant de la machine	pu
ω_s	Vitesse synchrone	rad/s
ω_r	Vitesse angulaire du rotor	pu
H	Constant d'inertie	S
P_m	Puissance mécanique	W
P_e	Puissance électrique	W
P	Puissance active	W
Q	Puissance réactive	Var
G	Conductance	S
V	Tension au niveau de la charge	V
Y	Admittance complexe de la charge	Ω
Z	Les pertes par effet joule et les inductances de fuite de transformateur ramenées au secondaire	Ω
Y	Matrice admittance du transformateur	S
ρ_w	Densité de l'air	Kg/m ³
A_{rw}	Surface balayée par les pales	m ²
V_w	Vitesse du vent	m/s
λ_w	Rapport de vitesse en bout de pale	
β_w	L'angle d'inclinaison des pales	Degrés
C_{pw}	Coefficient de puissance	
$A_{r\omega}$	Rayon du rotor	m
ω_{WT}	Vitesse angulaire du rotor	rad/s
V_{CO}, N_s	La somme de tension en circuit ouvert de N_s de cellule en série	V
I_{CC}, N_s	Courant de court-circuit de N_s cellules en série	A
V_{CO}, N_p	La somme de tension en circuit ouvert de N_p de cellules en parallèle	V
I_{CC}, N_p	Courant de court-circuit de N_p cellules en parallèle	A
V	La tension de sortie de la cellule	V

q	La charge élémentaire ($1.60217646 \times 10^{-19} \text{C}$)	C
K	La constant Boltzmann ($103806503 \times 10^{-23} \text{j/k}$)	j/k
T	Température absolue	K
I_{rs}	Le courant de saturation inverse de la cellule	A
N_s	Le nombre de cellule reliée en série	
T_r	La température de référence de la cellule	Degrés
I_{rr}	Le courant de saturation inverse correspondant à T_r	A
V_q, V_d	Tension de la stator dans le repère qd	V
x'_q, x'_d	Réactance transitoires quadrature et directes	Ω
δ	Angle de rotor par rapport au bus infini	Rad
ω	Vitesse mécanique de la machine	rad/s
ω_b	Vitesse synchronisme de base	rad/s
E'_q	Force électromotrice	N
T'_{d0}	Constant de temps à vide pour l'axe direct	S
I_q	Courant de stator	A
x	Réactance synchrone	Ω
r_s	Résistance du stator	Ω
D	Coefficient d'amortissement	
V_{ex}	Tension d'excitation	V
b_{SVC}	susceptance.	
V_{sup}^{\min}	Seuil de tension minimum	V
V_{sup}^{\max}	Seuil de tension maximum	V
V_{sup}	tension de stabilisation	V
K	Gain	
$\Delta\omega(\text{syn})$	la déviation de la vitesse du rotor	Rad/S

Q_{SVC}	La puissance réactive injectée	Ω
ΔX_{TCSC}^{ref}	Référence du TCSC	
K_s	le gain de TCSC.	
T_s	la constante du temps de TCSC.	S
$T_{1,2,3,4}$	compensateurs de phase	S

Introduction Générale

L'accroissement constant de la population mondiale et les avancées technologiques ont entraîné une hausse significative de la demande en énergie électrique. Afin de satisfaire cette demande en constante augmentation, il a été impératif d'augmenter la capacité de production d'électricité. Toutefois, cette expansion repose en grande partie sur la construction de nouvelles centrales thermiques, souvent coûteuses, et ayant un impact environnemental important. En effet, l'utilisation énergétique des combustibles fossiles engendre une émission considérable de gaz polluants, contribuant ainsi à la pollution atmosphérique et à la dégradation progressive des ressources non renouvelables.[01],[02].

Face à ces enjeux, les formes d'énergies renouvelables, en particulier le solaire et l'éolienne, ont connu un essor considérable ces dernières années. Les efforts de recherche et d'innovation dans ce domaine ont permis des avancées majeures à l'échelle mondiale. L'utilisation de ces sources d'énergie propres offre plusieurs bénéfices : elles permettent de réduire les émissions polluantes, de limiter l'impact environnemental et de favoriser une utilisation rationnelle des ressources fossiles.[01],[03]

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, l'exploitation des énergies vertes dans les réseaux électriques pose encore certains défis. En effet, la proportion de leur intégration dans le réseau nécessite une régulation rigoureuse afin d'assurer un équilibre stable du réseau électrique, tandis que le coût de génération d'un kilowattheure (kWh) reste supérieur à celui des sources conventionnelles.[01],[03]

Ce mémoire vise à étudier l'influence de l'injection des sources d'énergie renouvelables dans le réseau électrique sur les performances dynamiques du réseau, en particulier sous l'angle de sa stabilité opérationnelle et de la fiabilité de la fourniture électrique. Pour assurer une organisation logique du travail, l'étude est répartie en trois chapitres principaux détaillés comme suit :

- Chapitre 1 : vue d'ensemble sur les sources d'énergie renouvelables, les enjeux liés à la stabilité des réseaux, ainsi que les approches possibles pour y remédier.
- Chapitre 2 : Modélisation du système électrique en présence des sources d'énergies renouvelables.
- Chapitre 3 : Simulation du système électrique avec application des solutions

Chapitre 1:

Etat de l'art sur l'énergie renouvelables et la stabilité des réseaux électriques

1. Introduction

La transition vers les sources d'énergie renouvelables est essentielle pour répondre à la demande croissante en énergie. Toutefois, l'intégration de ces sources dans le réseau électrique reste encore limitée afin de garantir la stabilité du système. [03]

L'étude dans ce chapitre se décompose en deux concepts fondamentaux :

- Un aperçu général de quelques sources d'énergies renouvelable
- Une étude de la stabilité des réseaux électriques et des méthodes d'amélioration de cette stabilité

2. Énergies renouvelables

Pour préserver la planète et faire face aux défis environnementaux, des technologies durables et écologique ont été développées, connues sous le nom de technologie d'énergie renouvelable.

Les références [04] et [05] présentent une approche complémentaire du terme « énergie ». La référence [04] en donne une définition générale, la décrivant comme la capacité d'un système à produire un travail. La référence [05] présente un classement des sources d'énergie en trois grandes catégories : les combustibles fossiles, les ressources nucléaires et les énergies renouvelables.

La référence [06] présente un état des lieux des énergies renouvelables en détaillant leurs formes (solaire, éolienne, hydraulique, et bioénergies) et leur faible impact environnemental.

La référence [07] présente le rôle des énergies renouvelable dans la protection de l'environnement (produit de l'énergie avec des émissions nulles et amélioré la sécurité énergétique et réduit la dépendance aux combustibles fossiles) et leurs avantages pour les zones rurales.

La références [08] présente le rapport(GSR), qui explique l'état mondial des énergies renouvelables en 2016 (hydroélectricité représente la plus grande part 16.6 %des 22.7 d'énergie renouvelable mondial).

2.1. Eolienne

La référence [09] présente une définition de l'énergie éolienne comme une énergie issue de vent, exploitée pour produire de l'électricité. Elle décrit également son principe de fonctionnement, ses types ainsi que les avantages et inconvénients de cette source d'énergie. Cette référence constitue une étude importante pour comprendre les fondamentaux de l'énergie éolienne.

La référence [10] présente l'évolution de l'énergie éolienne en Algérie depuis ses débuts 1957. Il commence par la première installation d'un aérogénérateur de 100 kW à Alger, conçue par l'ingénieur français ANDREAU. Aussi le développement mondial de cette énergie et le rôle de la division des énergies éoliennes qui se concentre sur la recherche des systèmes de conversion et l'amélioration des performances éoliennes.



Figure.1.1. Eolienne d'Adrar[10]

La référence [11] présente l'impact de l'énergie éolienne sur le réseau électrique en soulignant les défis liés à son intégration, tels que la production intermittente et l'instabilité du réseau. Il compare différentes technologies d'éolienne et propose des solutions, notamment l'amélioration du stockage d'énergie et une meilleure régulation de la fréquence et de la tension ...etc.

La référence [12] présente une analyse des technologies éoliennes, de leur évolution et leur impact économique. Il retrace l'histoire de l'éolienne, explique le potentiel énergétique du vent, les caractéristiques des turbines et les différents types d'éolienne et décrit les mécanismes de

régulation, le développement de l'éolienne offshore et des petites éolienne pour site isolé. Enfin, il met en avant l'importance de l'électronique de puissance pour optimiser la production de l'énergie.



Figure.1.2. Eolienne à axe horizontal et à axe verticale[13]

2.2. Photovoltaïque

La référence [14] présente une définition de l'énergie solaire, expliquant qu'elle est issue du rayonnement du soleil et peut être transformée en électricité grâce aux cellules photovoltaïques. Puis, elle présente le principe de fonctionnement de ces cellules et leurs types (monocristallines, polycristallines et amorphes). De plus, elle aborde les modules et panneaux photovoltaïques ainsi que le générateur photovoltaïque. Elle explique enfin comment cette énergie est conservée, soit en la stockant dans des batteries, soit en l'injectant dans le réseau, et présente les aspects positifs et les limites de cette source d'énergie.

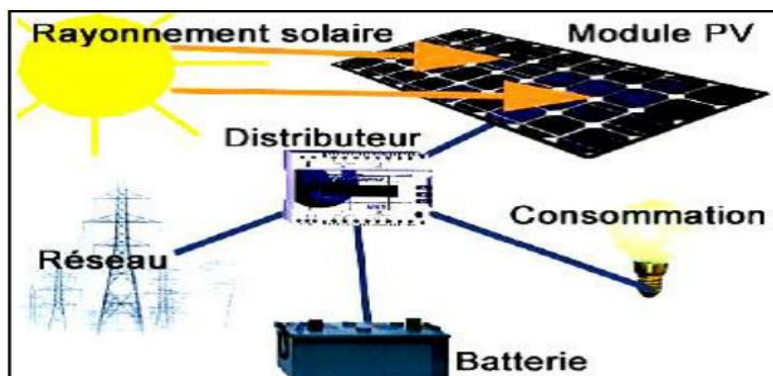


Figure.1.3. Système Photovoltaïque[14]

La référence [15] présente l'état de l'art des cellules photovoltaïques, en expliquant leur principe de conversion, leurs performances et leurs différentes générations technologiques. Elle met en avant les défis liés à l'efficacité, la stabilité et le coût, tout en soulignant les innovations récentes et l'importance de la recherche pour améliorer leur rentabilité et leur intégration dans la transition énergétique.

La référence [16] présente le principe de la conversion photovoltaïque, en expliquant le fonctionnement des cellules solaires et leur capacité à convertir l'énergie solaire en électricité. Elle étudie aussi les caractéristiques des panneaux photovoltaïques et les effets des températures sur les dispositifs de stockage de l'énergie solaire. Elle explore aussi l'état de l'art du stockage d'énergie.

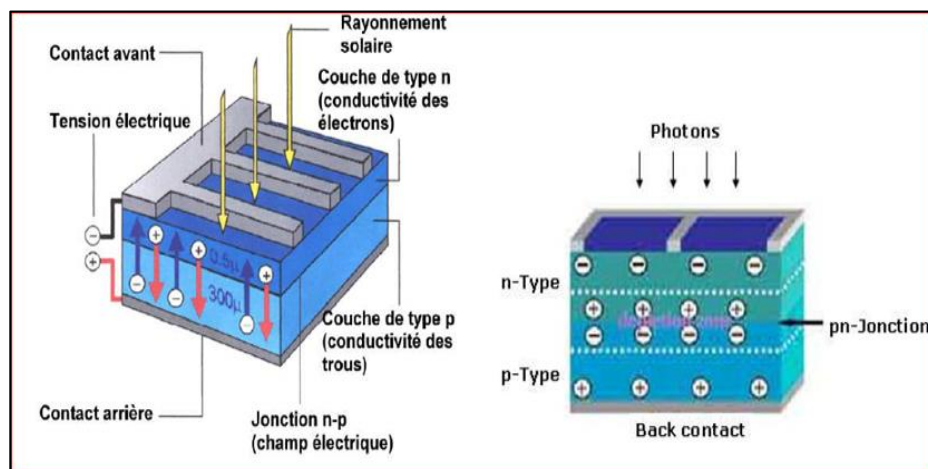


Figure.1.4. l'interface P-N dans un dispositif photovoltaïque [17 , 18]

2.3. Hydroélectrique

La référence [19] présente une analyse de l'hydroélectricité à petite échelle, en définissant ses caractéristiques et ses avantages et en classant les centrales selon leurs types. Elle présente les conditions de développement de cette énergie, ainsi que son rôle et son impact sur l'environnement. Ensuite, le coût des différentes composantes d'une centrale hydroélectrique et explore une méthodologie d'améliorer leur rentabilité et leur intégration environnementale.



Figure.1.5 :Centrale hydraulique .[09]

La référence [20] présente une étude visant au développement d'une turbine Francis en utilisant un nouveau système d'optimisation de conception basé sur PSO. Et elle a confirmé que PSO est un algorithme efficace pour l'optimisation de la conception des turbines hydrauliques.

La référence [21] présente l'apport des modèles liés aux erreurs et aux accidents dans la gestion de la sécurité des barrages hydroélectriques, en particulier chez EDF. Elle étudie comment le facteur humain est intégré dans ces études de dangers (EDD) des barrages.

2.4. Biomasse

Les références [22] et [23] présentent une définition de l'énergie biomasse, qui désigne l'ensemble des énergies issues de la dégradation de matières organiques ainsi que ses différents types : le biogaz, la biomasse solide, les biocarburants. Elles soulignent également son importance dans la production de l'électricité et la réduction des déchets.

2.5. Géothermique

La référence [24] présente une analyse de la géothermie et de son application dans la production d'énergie électrique. Elle débute par une introduction générale sur cette source d'énergie, ses différents types (température $>180^{\circ}\text{C}$) ainsi que les technologies utilisées pour extraire la chaleur du sous-sol. Ensuite, l'étude des types : géothermie basse enthalpie (température entre 30°C et 100°C), géothermie haute enthalpie exploite le logiciel Metamod pour simuler la variation thermique en fonction de la profondeur, analyse le coût de l'électricité produite par la géothermie et propose des recommandations pour le développement des centrales géothermiques et la réduction de leur coût.

3. stabilité des réseaux électriques

3.1. définition de la stabilité

La stabilité dans un réseau électrique correspond à l'aptitude du système à conserver un état d'équilibre pendant un fonctionnement normal, ainsi qu'à retrouver une condition stable après avoir subi une ou plusieurs perturbations. Cette notion concerne aussi bien les unités de production (turbines) que les générateurs, et repose principalement le maintien de l'équilibre entre la quantité d'énergie produite et celle consommée [25], [26].

3.2. classifications de la stabilité des réseaux électriques

Un réseau électrique moderne est généralement un système complexe, à plusieurs variables et de très haut ordre, dont le comportement dynamique dépend de nombreux composants possédant des caractéristique et des vitesses de réponse variées. La stabilité peut être vue comme l'équilibre entre différentes forces opposées. Suivant la configuration du réseau, les conditions de fonctionnement, ainsi que le type et l'ampleur des perturbations rencontrées, divers déséquilibres peuvent apparaître . ces déséquilibres sont susceptibles de provoquer différents formes d'instabilité [27]. Comme illustre à la Figure 1.6 :

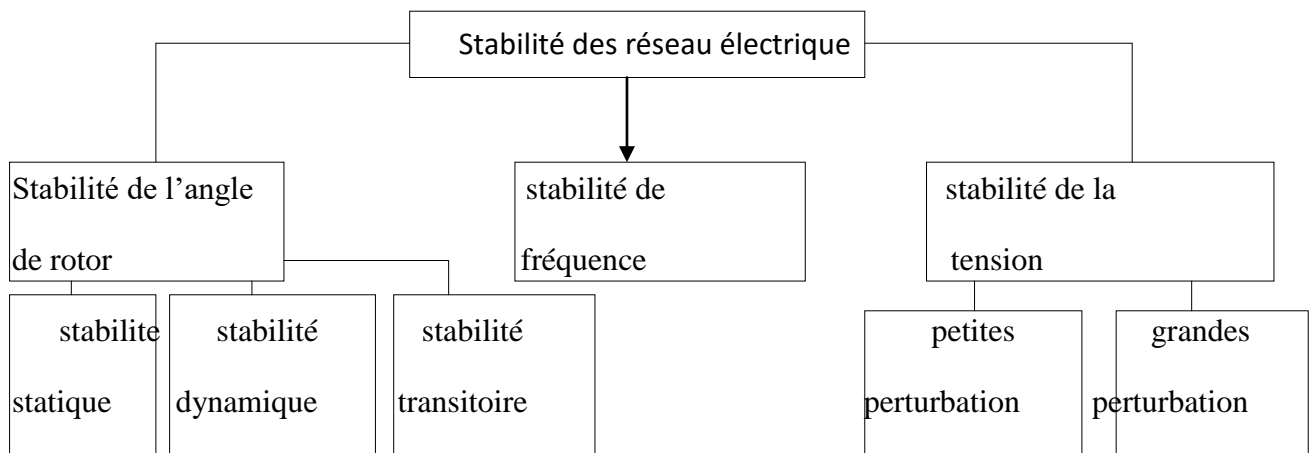


Figure.1.6. Classification de différent type de stabilité[03]

3.2.1. Stabilité angulaire du rotor

La stabilité angulaire du rotor correspond à l'aptitude des générateurs synchrones, au sein d'un réseau électrique interconnecté, à rester synchronisée après l'apparition d'un trouble. Elle dépend de la faculté de chaque machine à maintenir l'équilibre entre le couple mécanique appliqué et le couple électromagnétique produit. Si cet équilibre est rompu, cela peut provoquer une instabilité qui se manifeste par des oscillations croissantes de l'angle du rotor, pouvant conduire,

pour certaines machines, à une perte de synchronisme avec le reste du réseau. Suivant la sévérité de la perturbation, on distingue habituellement deux types de stabilité angulaire. [28]:

- Stabilité angulaire aux petites perturbations
- Stabilité angulaire aux grandes perturbations

3.2.1.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations

Elle désigne l'aptitude d'un réseau électrique à maintenir le synchronisme face à de légères fluctuations de charge ou de production. Ces perturbations sont assez minimales pour permettre une modélisation linéaire des équations du système.

Cette instabilité peut apparaître sous deux formes : soit par une dérivation continue de l'angle du rotor due à un couple synchronisant faible, soit par une amplification progressive des oscillations provoquée par un déficit de couple d'amortissement. [29]

a) La Stabilité statique

L'étude de la stabilité statique porte sur l'analyse des positions d'équilibre d'un réseau électrique. Elle sert à apprécier les niveaux de tension ainsi que les échanges de puissance entre les différentes parties du réseau. Cette analyse intervient principalement lors de la phase de dimensionnement des composants passifs tels que les câbles, les dispositifs de protection, etc.[30]

b) La Stabilité dynamique

L'étude de la stabilité dynamique porte essentiellement sur les faibles perturbations autour du point de fonctionnement nominal. Elle vise à évaluer le rôle des dispositifs de régulation dans le rétablissement de l'état initial du système. Bien que le comportement du système en régime dynamique soit régi par des équations différentielles non linéaires, il est possible de les linéariser localement autour du point de fonctionnement considéré. [03]

3.2.1.2. Stabilité angulaire face aux grandes perturbations

La stabilité angulaire en présence de fortes perturbations, souvent appelée stabilité transitoire, fait référence à l'aptitude du système électrique à maintenir le synchronisme entre les générateurs après un incident critique, comme un court-circuit sur une ligne de transmission ou une perte soudaine d'une charge importante ou d'un moyen de production. De telles perturbations provoquent des écarts significatifs dans les angles des rotors, influencés par la nature non linéaire de la relation entre la puissance électrique échangée et l'angle du rotor.[31]

3.2.2. Stabilité de tension

La stabilité de la tension se définit comme l'aptitude d'un réseau électrique à maintenir des niveaux de tension adéquats sur l'ensemble des jeux de barres après une perturbation. Divers événements, tels qu'un incident sur une ligne de transport ou l'arrêt d'un générateur, des variations importantes de la charge ou une modification de la structure du réseau, peuvent provoquer une dégradation progressive et incontrôlée de la tension, pouvant conduire une défaillance généralisée du système électrique. [32]

3.2.3. Stabilité de fréquence

La stabilité de la correspond de la capacité d'un réseau électrique à maintenir une fréquence proche de sa valeur nominale après l'apparition d'une perturbation majeure, entraînant un déséquilibre notable entre la production et la consommation d'énergie. [33]

3.3. Amélioration de la stabilité [34]

Il y a deux approches principales permettent d'améliorer rapidement la stabilité :

- L'utilisation d'un contrôleur coté générateur : signal de contrôle supplémentaire au système d'exécution de générateur.
- L'utilisation d'un contrôleur coté lignes de transmission : signal de contrôle supplémentaire dans les systèmes FACTS.

3.3.1. Amélioration de la stabilité par les PSS

Les Power System Stabilizers (PSS) sont couramment déployés depuis plusieurs décennies pour atténuer les oscillations électromécaniques de basse fréquence (LFO), offrant ainsi une amélioration notable de la stabilité à un coût compétitif. Ces dispositifs sont souvent intégrés au régulateur automatique de tension (AVR) des générateurs synchrones pour optimiser l'excitation. Toutefois, en modulant cette excitation, ils peuvent aussi réduire le coefficient d'amortissement du rotor, ce qui peut engendrer des oscillations résiduelles. Par ailleurs, l'action rapide des composants électroniques de puissance dans l'AVR peut créer une interaction défavorable avec la dynamique du générateur, exacerbant potentiellement ces oscillations de basse fréquence. [35]

3.3.2. Amélioration de la stabilité par les FACTS

Les systèmes FACTS tels que définis par l'IEEE (Institute of electronics engineers), désignent des technologies de transmission en courant alternatif reposant sur l'utilisation de dispositifs statiques, principalement basé sur l'électronique de puissance. Ces systèmes visent à renforcer la contrôlabilité du réseau électrique tout en augmentant sa capacité à transférer de la puissance. Ces technologies sont essentielles pour relever les défis liés à l'exploitation des réseaux

électriques modernes. Elles permettent notamment d'accroître la puissance active circulant entre deux réseaux en agissant sur différents paramètres comme le maintien de la tension, l'augmentation de l'angle de transport ou encore la diminution artificielle de l'impédance des liaisons. En modulant l'un ou plusieurs de ces facteurs, les dispositifs FACTS assurent une gestion fine des flux de puissance réactive, favorisent une utilisation optimale des infrastructures existantes pour le transport de puissance active, et contribuent de manière notable à la stabilité dynamique du système électrique.[36]

En outre, ces solutions technologiques apportent un avantage significatif aux consommateurs industriels, en leur permettant de mieux équilibrer les charges et de limiter les variations de tension provoquées par des changements rapides de la demande en puissance réactive. Cela se traduit par une amélioration de la production ainsi qu'une exploitation plus efficace du réseau électrique[35].

3.4. Différentes catégories des FACTS [36] [28]

Depuis l'apparition des premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont été développées, chacune se distinguant par l'évolution des technologies de semi-conducteurs et de puissance employés

- La première génération repose sur l'utilisation de thyristors classiques. Ses dispositifs sont principalement utilisés pour la mise en service ou l'arrêt de certains éléments du réseau permettant ainsi la fourniture ou l'absorption de puissance réactive ils sont également employés pour remplacer les changeurs de prises mécaniques dans les transformateurs à réglage de tensions
- La deuxième génération dite avancée a émergé avec l'introduction de semi-conducteurs de puissance à commande tant à l'ouverture qu'à la fermeture, le thyristor GTO (gate turn-off). Ces composants sont agencés pour constituer des convertisseurs de tension ou de courant capables d'injecter des tensions modulables dans le réseau électrique
- La troisième génération se caractérise par l'emploi de composants hybrides, adaptés aux besoins spécifiques de chaque application. Contrairement aux générations précédentes, ces dispositifs n'ont pas recours à des éléments auxiliaires volumineux, tels que les transformateurs de couplage, rendant ainsi leur intégration au réseau plus compacte et flexible.

Dans le cadre de notre étude, nous proposons une approche de classification des équipements FACTS reposant sur cinq critères indépendants :

1. Nature de la connexion au réseau (shunt, série, ou les deux) ;
2. Type de commutation employé (naturelle ou forcée) ;

3. Fréquence de commutation ;
4. Présence d'un moyen de stockage d'énergie ;
5. Mode de liaison au niveau du port DC (avec ou sans port DC).

À partir de ces cinq axes, trois grandes familles de dispositifs FACTS se détachent :

- Shunt : connectés en parallèle sur le réseau (ex. STATCOM, SVC).
- Série : insérés directement dans les lignes de transport (ex. SSSC, TCSC).
- Hybrides (série- parallèle) : réunissent les deux modes de connexion, comme l'UPFC.

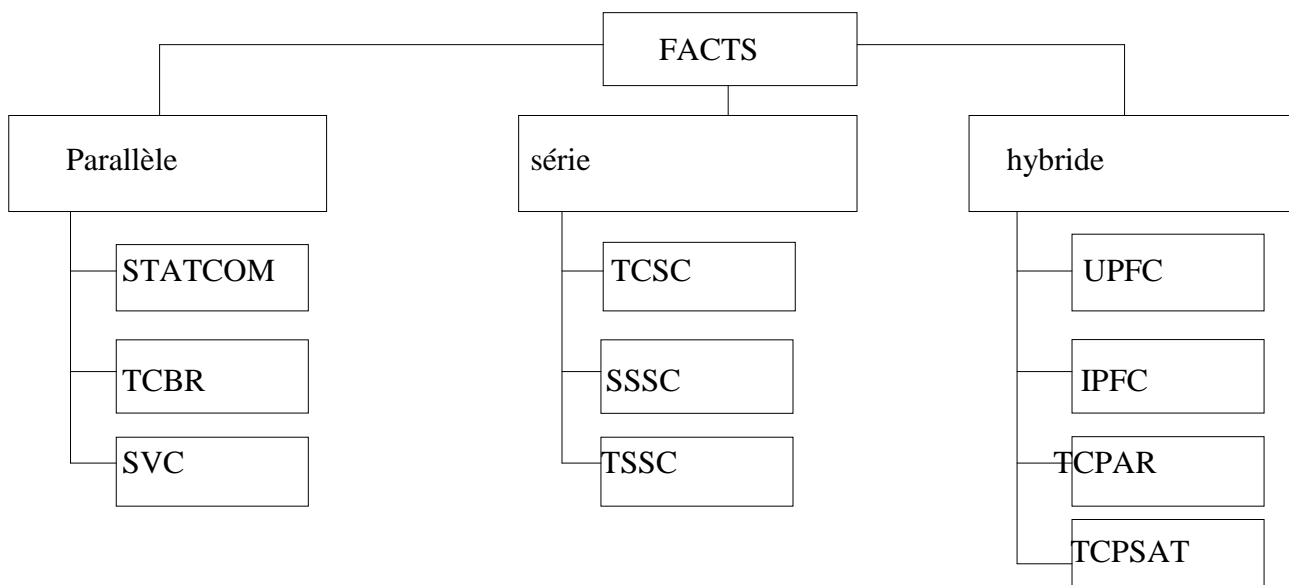


Figure.1.7. représente la classification des dispositifs de compensation FACTS [37]

3.4.1. Compensateur parallèle

3.4.1.1. STATCOM (Compensateur Statique Synchronique)

Un compensateur statique synchrone (STATCOM) est un dispositif de régulation utilisé dans les réseaux de transmission d'électricité en courant alternatif. Il est basé sur un convertisseur de tension à base d'électronique de puissance et peut fonctionner soit comme une source, soit comme un puits de puissance réactive dans le réseau électrique. S'il est connecté à une source d'énergie, il peut également fournir de la puissance active en courant alternatif. Il fait partie de la famille des dispositifs FACTS. En général, un STATCOM est installé pour soutenir les réseaux électriques présentant un facteur de puissance faible. Et souvent, une mauvaise régulation de la tension. Cependant, il existe d'autres utilisations, la plus courante étant la stabilisation de la tension [38]. Le schéma du STATCOM est présenté à la figure.

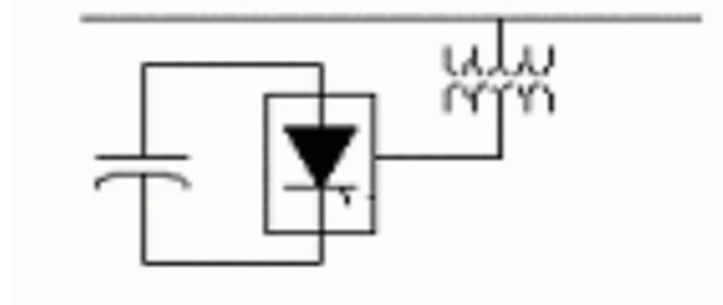


Figure.1.8. schéma du STATCOM[39]

3.4.1.2. SVC (Static Var Compensator)

Est un dispositif électrique permettant une compensation rapide de la puissance réactive sur les réseaux de transport d'électricité à haute tension. Les SVC font partie de la famille des dispositifs FACTS, servant à réguler la tension et à stabiliser le système le terme statique fait référence à l'absence de pièce mobile (à l'exception des disjoncteurs et des sectionneurs, qui ne bougent pas pendant le fonctionnement normal de SVC)

Avant l'invention de SVC, la compensation du facteur de puissance était assurée par de grandes machines tournantes, telles que les condensateurs synchrones. Le SVC est un dispositif automatisé d'adaptation d'impédance, conçu pour rapprocher le système de facteur de puissance unitaire si la charge réactive du système est capacitive (en avance), le SVC utilise des réactances (généralement sous forme de réactances commandées par thyristors) pour consommer des VARs du système, ce qui réduit la tension du réseau. En cas de charge inductive en retard, les bancs de condensateurs sont automatiquement mis en service, augmentant ainsi la tension du système.

Il existe plusieurs modélisations du compenseur statique de puissance réactive (SVC). En pratique, le modèle considéré ici représente un générateur synchrone ne produisant aucune puissance active, ce qui le rend équivalent à un condensateur synchrone connecté en parallèle avec une réactance inductive. Le point de connexion est assimilé à un nœud de type PV (tension active connue), qui peut évoluer vers un nœud de type PQ (puissance active et réactive connues) lorsque le SVC atteint ses limites de fonctionnement. Ce dispositif permet un contrôle rapide et efficace de la tension au sein du réseau électrique [38].

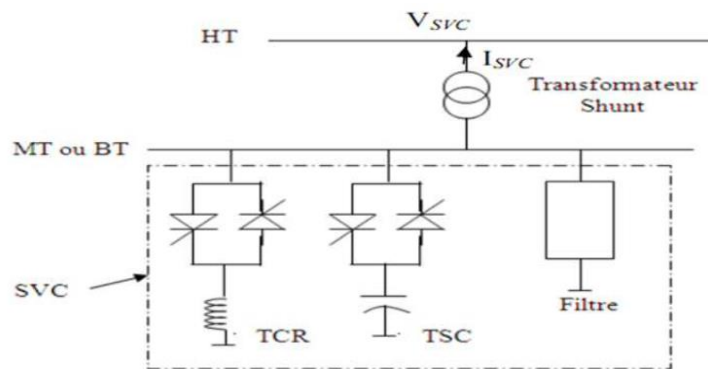


Figure 1.9.schéma de principe d'un SVC[40]

Le SVC repose sur la combinaison de trois composants principaux : un TCR (thyristor contrôler réacteur), un TSC (thyristor switcher capacitor), et un filtre d'harmonique. [40]

La figure ci-dessous illustre la caractéristique statique de ce type de dispositif FACTS

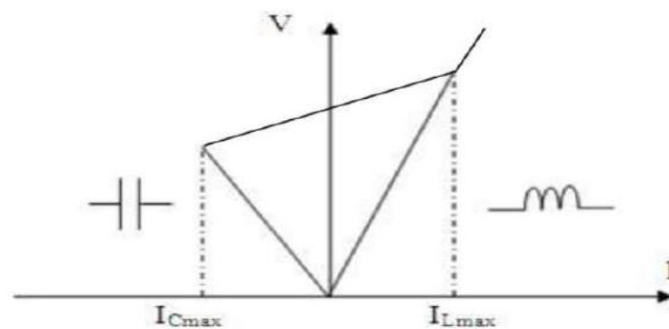


Figure1.10.caractéristique de SVC[40]

3.4.2. Compensateurs série

3.4.2.1.TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Le TCSC est une extension des condensateurs série conventionnelle avec l'ajoute d'un réacteur contrôle par thyristor. En connectant une réactance en parallèle avec un condensateur série, on obtient un système de compensation série a réglage continu et rapide.

Les principaux avantages de TSCS sont : l'augmentation de la puissance active transférée, l'amortissement des oscillations de puissance, l'atténuation de la résonance sous-synchrone, ainsi que le contrôle du flux de puissance dans la ligne

3.4.2.2. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Le SSSC fait des dispositifs FACTS les plus avancés utilisés par la compensation série dans les réseaux de transport d'énergie électrique, il agit comme une source de tension synchrone, capable d'injecter en série avec la ligne de transport une tension quasi sinusoïdale dont l'amplitude et l'angle de phase peuvent être ajusté de manière précise. Cette tension injectée est principalement en quadrature avec le courant circulant dans la ligne. Une faible composante, alignée en phase avec le courant, est utilisée pour compenser les pertes internes de l'onduleur. La composante principale, étant perpendiculaire au courant, simule l'insertion d'une réactance (inductive ou capacitive) variable en série avec la ligne. Cette réactance modulable permet de contrôler activement le flux de puissance sur la ligne de transmission. La figure 1.11 présente la structure de base d'un tel dispositif. [41]

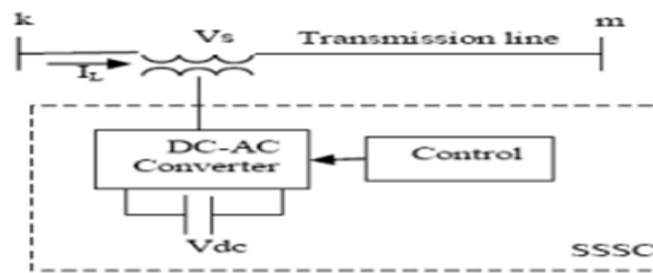


Figure 1.11: schéma simplifié d'un SSSC [41]

3.4.2.3. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) :

Selon la définition de l'EEE, le TSSC est un système de compensation capacitive constitué d'un ensemble de condensateurs connectés en série. Chaque unité capacitive est associée à un interrupteur à thyristor, permettant une compensation graduelle par paliers.

Le TSSC représente la première génération de dispositifs de compensation série dans la famille FACTS. Il est composé de plusieurs modules capacitifs montés en série, chacun étant contourné par une valve à thyristors montée en dérivation.

3.4.3. Compensateur série parallèle (hybride) :

3.4.3.1. UPFC (Unified Power Flow Controller) : [41]

Parmi les dispositifs FACTS disponibles, le UPFC se distingue comme étant le plus polyvalent. Il permet d'améliorer la stabilité en régime permanent, la stabilité dynamique ainsi que la stabilité transitoire du système électrique. La configuration de base de l'UPFC est représentée dans la figure 1.12.

Ce dispositif peut injecter ou absorber à la fois de la puissance active et réactive. Il est constitué de deux convertisseurs CA/CC : l'un est connecté en série avec la ligne de transport via un transformateur série, tandis que l'autre est branché en parallèle au moyen d'un transformateur shunt.

Les deux convertisseurs sont reliés entre eux par un condensateur commun sur le côté continu, qui assure l'alimentation en tension continue nécessaire au fonctionnement des convertisseurs. Pour maintenir une tension constante à ses bornes, un équilibre énergétique entre les convertisseurs série et shunt est indispensable.

Le convertisseur série peut injecter dans la ligne une tension dont l'amplitude et l'angle de phase sont réglable, ce qui lui permet d'échanger de la puissance active avec la ligne et ainsi d'optimiser le transfert de puissance tout en augmentant les limites de stabilité transitoire. De son côté, le convertisseur shunt injecte un courant dont l'amplitude et le facteur de puissance sont contrôlables. Son rôle principal est de compenser la puissance active absorbée ou injectée par le convertisseur série, en plus des pertes, en maintenant la tension du bus continu à une valeur de consigne.

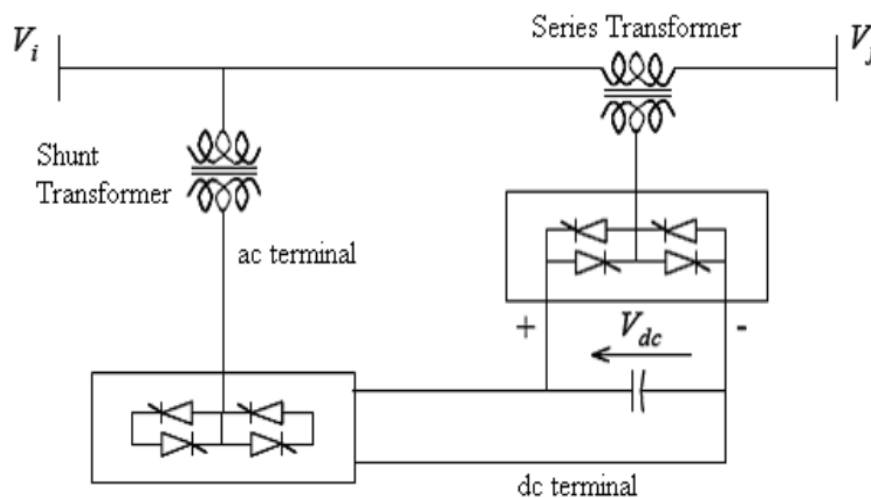


Figure.1.12. configuration de l'UPFC[41]

3.4.3.2. TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting transformer) [42]

Le TCPST est définie par l'IEEE comme un transformateur déphaseur dont l'angle de phase peut être ajusté de manière rapide et précise grâce à l'utilisation de thyristors.

Le TCPST représente l'un des premiers dispositifs FACTS de type combiné, permettant une gestion dynamique du flux de puissance en modifiant l'angle de phase entre les tensions, ce qui en fait un outil efficace pour le contrôle du réseau électrique.

3.4.3.3. TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) [42]

Selon la définition de l'IEEE, le TCPAR est un type de transformateur déphaseur permettant de moduler l'angle de phase entre les tensions a ses bornes, sans en altérer les amplitudes.

A la différence du TCPST, le TCPAR possède également la capacité d'injecter ou de soutirer de la puissance réactive au réseau, ce qui lui confère une fonction supplémentaire dans la régulation du flux d'énergie et l'amélioration de la stabilité du système électrique.

4. Conclusion

Ce chapitre dresse un panorama synthétique des énergies renouvelables et des défis associés à la stabilité des réseaux électriques.

Après avoir étudié les principales filières : éolienne, photovoltaïque, hydroélectrique, biomasse et géothermie. ainsi, nous avons décrit les différents types de stabilité du système : stabilité angulaire, de tension et transitoire. Nous avons ensuite présenté les méthodes visant à renforcer cette stabilité, notamment l'utilisation des Power System Stabilizers (PSS) et des systèmes FACTS. Une attention particulière a été accordée à ces derniers, en détaillant leurs dispositifs et caractéristiques.

Chapitre 2:

Modélisation des réseaux électriques

1. Introduction

Un réseau est qualifié de puissant ou assimilé à une source infinie lorsque la tension et la fréquence restent stables, même en présence d'une perturbation affectant une machine, sans que cela n'altère le comportement global du réseau.[43]

La machine synchrone est généralement utilisée pour générer l'énergie électrique, une machine est en synchronisme lorsque sa fréquence correspond à celle du réseau. Un système fonctionne en synchronisme lorsque toutes les machines connectées à ce réseau partagent la même fréquence. [25]

2. Modélisation des composant d'un réseau électrique de base

Afin d'étudier la stabilité du réseau électrique, un modèle simplifié a été adopté. Il représente un système composé d'un générateur synchrone relié directement à un réseau idéal, supposé insensible aux perturbations, par l'intermédiaire d'une ligne de transmission.

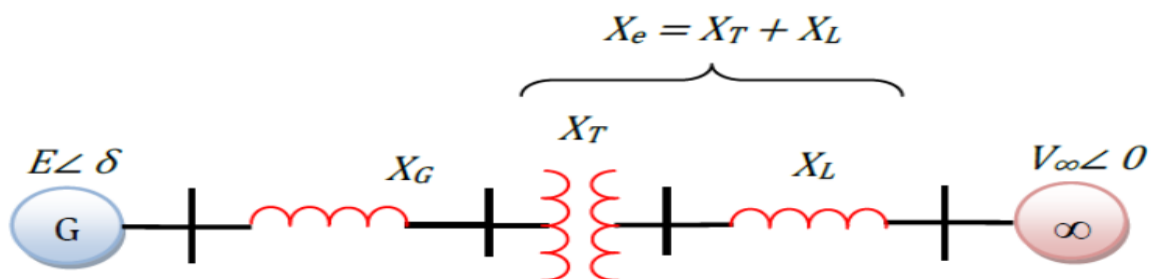


Figure.2.1.couplage d'une machine synchrone avec un jeu de barres infini. [44]

2.1. La machine synchrone

2.1.1. Supposition de simplification

Dans le but d'alléger l'analyse de la machine synchrone, certaines considérations permettent de réduire la complexité des équations et de se concentrer sur les phénomènes électromagnétique. Parmi les principales simplifications retenues, on peut citer :

- Entrefer constant.
- Effet d'encoche est supposé négligeable.

- La saturation est négligée ainsi que l'hystérésis et les courants de Foucault.
- La résistance des enroulements est considérée constante indépendamment de la température.
- L'effet de peau est également négligé. [45]

2.1.2. Principe de fonctionnement

La machine synchrone est une machine électrique fonctionnant en courant alternatif, dont le rotor tourne à une vitesse identique à celle du champ magnétique produit par le stator. Cette vitesse est directement liée à la fréquence de l'alimentation triphasée.

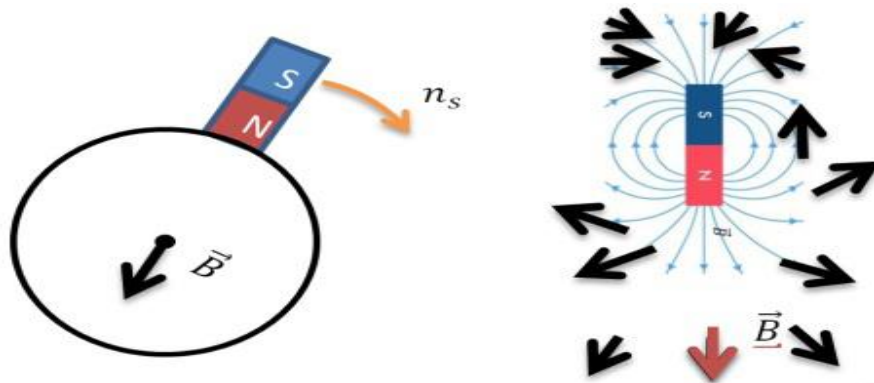


Figure 2.2. Principe de création de champ tournant par aimant permanent. [45]

La machine synchrone est raccordée au réseau électrique par un nœud appelé nœud générateur. En régime transitoire, elle est modélisée de manière simplifiée par une tension interne placée derrière une réactance transitoire. [46]

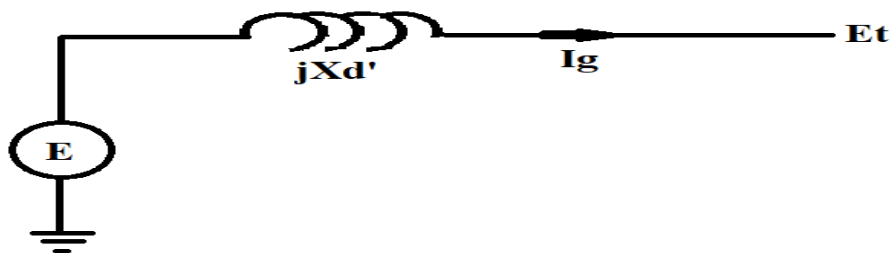


Figure 2.3. schéma du raccordement d'un générateur au système électrique.

La f.e.m de la machine synchrone est donnée par la relation suivante :

$$E' = Et + jXd' I_g \quad (2.1)$$

Où :

I_g : Courant de la machine en pu.

Et : Tension terminale au nœud générateur en pu.

E' : Tension interne derrière la réactance transitoire $jX'd$.

Le modèle du deuxième ordre de la machine synchrone est décrit par l'équation des couples :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e) \quad (2.2)$$

Avec :

$$P_e = \frac{E_v}{X}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - 2\pi f \quad (2.3)$$

Où :

ω_s = Vitesse synchrone

ω_r = Vitesse angulaire du rotor en [pu].

H : constant d'inertie.

P_m : Puissance mécanique.

P_e : Puissance électrique

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e) \quad (2-4)$$

2.2. Modélisation de la ligne de transmission

Les réseaux de transport jouent un rôle essentiel dans l'acheminement de l'énergie électrique entre les sites de production et les régions consommatrices. Ils permettent également des échanges d'énergie entre différents opérateurs de réseaux, que ce soit à l'échelle nationale ou internationale grâce aux lignes d'interconnexion.[43]

La ligne de transport est représentée à l'aide d'un modèle équivalent en π , comprenant une impédance série constitué d'une résistance R en série avec une réactance inductif ainsi qu'une admittance shunt modélisant l'effet capacitif de la ligne par rapport à la terre. Cette admittance se compose d'une susceptance capacitive B en parallèle avec une conductance d'isolation G.

La figure représente le modèle en Π d'une ligne de transmission :

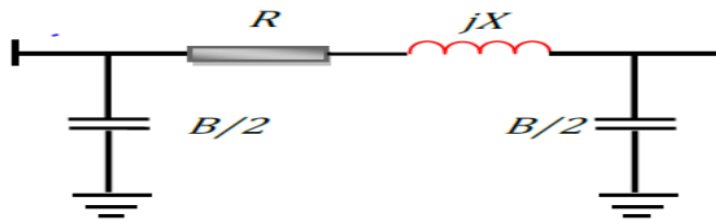


Figure.2.4 .Schéma représente le modèle en Π d'une ligne de transmission.

2.3. Modélisation de la charge

En modélisation, une charge électrique peut être représentée soit par les grandeurs P et Q , soit par une admittance Y , avec $Y = G - jB$.

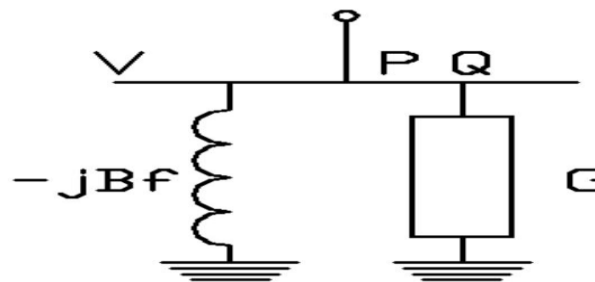


Figure.2.5 .schéma fonctionnel d'une charge.[48]

Où :

P : Puissance active (en watts, W).

Q : puissance réactive (en var, V).

G : conductance (en siemens).

V : tension au niveau de la charge (en volt, V).

Y : Admittance complexe de la charge, définie par $Y = G - jB$.

2.4. Modélisation de transformateur

Le rôle du transformateur est d'augmenter la tension délivrée par l'unité de production afin de la porter aux niveaux appropriés pour son acheminement via les réseaux de transport à haute ou très haute tension. Inversement, à l'extrémité côté consommation, il abaisse la tension aux niveaux compatibles avec les réseaux de distribution basse tension (BT).

Pour simplifier son comportement, le transformateur peut être assimilé à un circuit série comprenant une résistance et une réactance.[26]

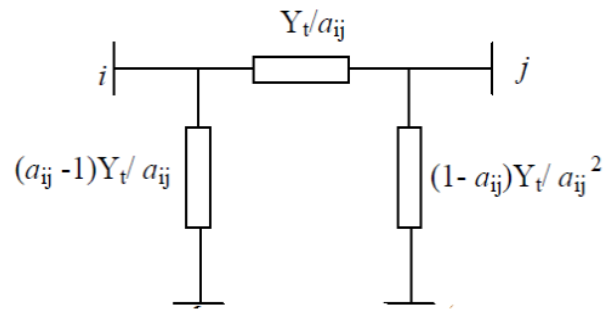


Figure.2.6. modèle du transformateur. [49]

3. Modélisation du réseau électrique en présence d'énergie renouvelable

Cette modélisation vise à analyser l'impact de l'introduction des systèmes de production d'énergie verte, notamment le solaire photovoltaïque et l'éolien, sur le maintien de l'équilibre dynamique.

3.1. Modélisation éolienne

3.1.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une éolienne repose sur la conversion de l'énergie du vent en électricité. Le rotor extrait l'énergie mécanique du vent, qui est ensuite convertie en énergie électrique. Selon la configuration de l'éolienne, l'électricité peut être injectée directement dans le réseau ou passer par un convertisseur. [50]

3.1.2. les générateur éolienne

Les générateur éolienne est pour rôle de convertir l'énergie mécanique issue du vent en énergie électrique .diverses technologies peuvent remplir cette fonction, chacune étant adaptée aux spécificités, qui exigent des caractéristique bien précises. [51]

3.1.2.1. Eolienne à vitesse fixe

Un système éolien comporte une turbine, un multiplicateur de vitesse et une machine asynchrones connecté directement au réseau. Elle fonctionne en régime d'hyper –synchronisme, c'est-à-dire à une vitesse légèrement supérieur à la vitesse synchrone du réseau, soit :

$$\Omega_s (1-g),$$

Où g représente le glissement de la machine (négatif dans ce cas) étant donné le couplage direct au réseau, la vitesse de rotation de la machine est quasiment constante car imposée par ce dernier. La puissance électrique produit par la machine, en tenant que le rendement, est donné par :

$$P_{elec} \cong \frac{1}{1-g} P_{mec} \quad (2.5)$$

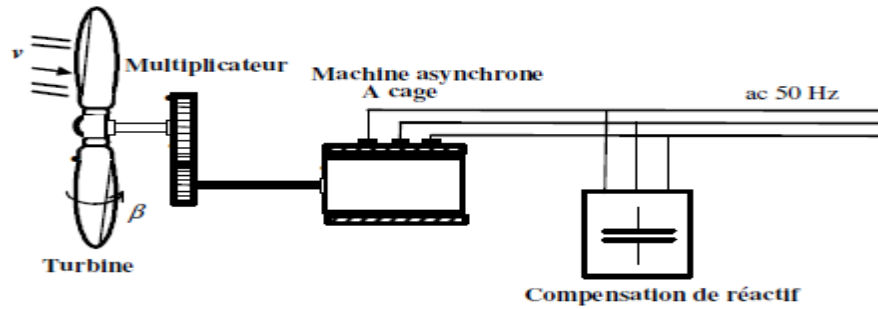


Figure . 2.7. Représentation schématique d'une éolienne à vitesse fixe.[51]

On remarque également la présence de batteries de compensation, installées afin de compenser la puissance réactive nécessaire au maintien de la magnétisation de la machine asynchrone.

3.1.2.2. Eolienne à vitesse variable

Cette technologie utilise une interface d'électronique de puissance placée entre le rotor et le réseau, offrant la possibilité de contrôler la tension et de gérer l'échange de puissance réactive entre ces deux éléments. [52]

Dans cette étude, deux types d'éolienne sont distingués :

- Eolienne à base de machine asynchrone à double alimentation (MADA).

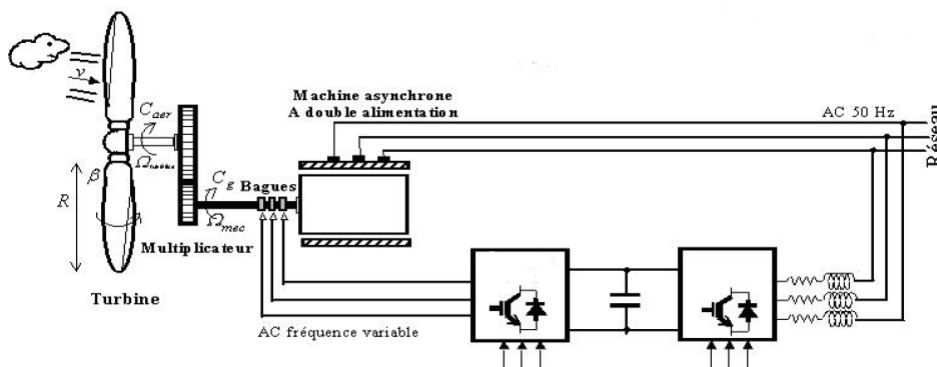


Figure.2.8. Structure d'une éolienne à base MADA. [51]

- Eolienne à base de machine synchrone à aimants permanents (MS).

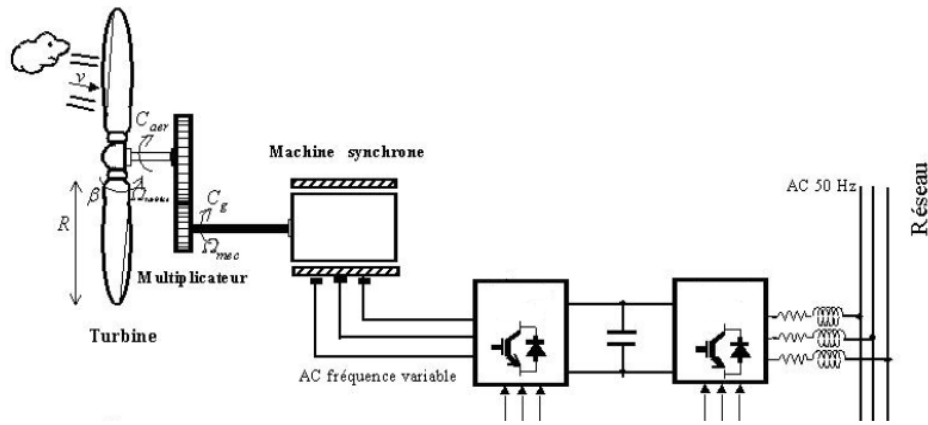


Figure. 2.9. Structure d'une éolienne à base de MS à aimant permanents. [51]

Cette technologie présente de nombreux avantages tels qu'une souplesse de contrôle, une séparation entre le réseau et la génératrice, une optimisation de la production grâce à une large plage de vitesse de fonctionnement. [50]

3.1.3. Modèle mathématique de l'éolienne

La puissance captée par l'éolienne (WT) peut être exprimé par la relation suivant :

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho_w \cdot A_{rw} \cdot V_w^3 \cdot C_{pw}(\lambda_w, \beta_w) \quad (2.6)$$

Avec :

ρ_w : Densité de l'air (kg/m³).

A_{rw} : Surface balayée par les pales (m²).

V_w : vitesse du vent (m/s).

λ_w : Rapport de vitesse en bout de pale.

β_w : L'angle d'inclinaison des pales (en degrés).

C_{pw} : Coefficient de puissance.

Le rapport de vitesse en bout de pale (TSR) est le rapport entre la vitesse de la turbine en bout de pale et la vitesse du vent en courant libre et est donné par :

$$\lambda_w = \frac{A_{rw} \omega_{WT}}{V_w} \quad (2.7)$$

Avec :

A_{rw} : Rayon du rotor (m).

ω_{WT} : Vitesse angulaire du rotor (rad/s).

V_w : Vitesse du vent en courant libre (m/s).

La courbe du coefficient de puissance a été décrit dans la littérature par différentes équation ajustées, est approximée analytiquement dans cette étude par :

$$C_{pw}(\lambda, \beta) = 0.5109 \left(\frac{116}{X} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(-\frac{21}{X}\right) + 116\lambda_w$$

Où :

$$X = \frac{1}{\lambda_w + 0.08\beta_w} - \frac{0.035}{1 + \beta_w^3} \quad [53]$$

3.2. Modélisation photovoltaïque

3.2.1. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est un dispositif permettant de convertir la lumière en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Elle est constituée de deux couches de silicium : l'une dopée P (au bore) et l'autre dopée N (au phosphore), formant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel.

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau semi-conducteur, son énergie est transmise aux atomes de la jonction. Ce transfert permet la libération des électrons et la création de trous, générant une différence de potentiel entre les deux couches. Cette tension est mesurable entre les bornes positive et négative de la cellule.

En connectant une charge électrique à la cellule, les porteurs de charge peuvent être récoltés et un courant continu est produit. La tension maximale fournie par une cellule, appelée tension de circuit ouvert (V_{oc}), est d'environ 0,6 V lorsque le courant est nul. Le courant de court-circuit (I_{cc}), qui correspond au courant maximal lorsque les bornes sont connectées entre elles, dépend principalement du niveau d'ensoleillement.[54]

3.2.2. Module photovoltaïque

Dans des conditions standards d'ensoleillement (1000 W/m², 25 °C, AM 1.5), une cellule photovoltaïque au silicium de [150 cm²] peut produire une puissance maximale d'environ 2,3 [WC] sous une tension de 0,5 [V]. Chaque cellule photovoltaïque élémentaire peut donc être considérée comme un générateur photovoltaïque de très faible puissance, insuffisant à lui seul pour la plupart

des besoins domestiques ou industriels. C'est pourquoi plusieurs cellules sont regroupées en modules photovoltaïques, par des associations en série et/ou en parallèle, afin d'atteindre des niveaux de tension et de courant adaptés à une utilisation réelle. [55]

3.2.2.1. Mise en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la tension totale est obtenue par l'addition des tensions individuelles [55] :

$$V_{co} \times N_s = N_s \times V_{co} \quad (2.9)$$

$$I_{cc} \times N_s = I_{cc} \quad (2.10)$$

Où :

V_{co}, N_s : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{cc}, N_s : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

3.2.2.2. Mise en parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellules permet d'augmenter le courant de sortie du générateur. Dans ce cas, les cellules sont soumises à la même tension et le courant total est la somme des courants individuels [55] :

$$I_{cc} (N_p) = I_{cc} \times (N_p) \quad (2.11)$$

$$V_{co} = V_{co} (N_p) \quad (2.12)$$

Avec :

I_{cc}, N_p : La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

V_{co}, N_p : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

3.2.3. Architectures des systèmes photovoltaïques

3.2.3.1. Installation PV autonome

Dans une installation photovoltaïque autonome, l'énergie produite par les panneaux solaires peut être utilisée immédiatement (par exemple pour le pompage ou la ventilation), ou bien stockée

dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Le courant continu généré peut alimenter directement des équipements adaptés, ou être converti en courant alternatif si nécessaire. [56]

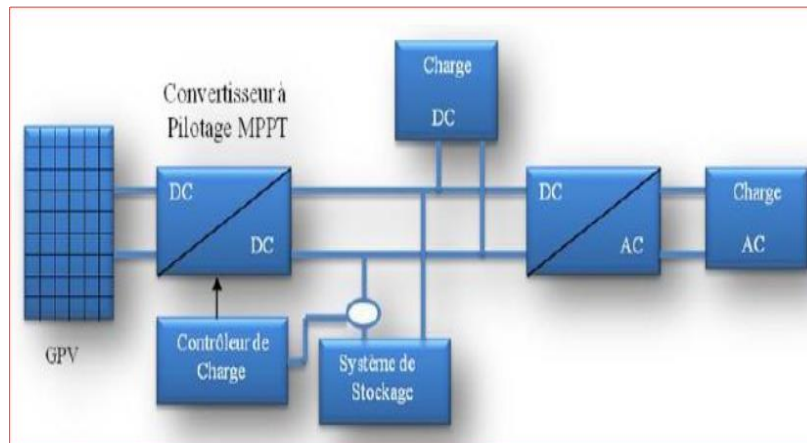


Figure.2.10. Installation photovoltaïque autonome.[57]

3.2.3.2.Installation PV couplée au réseau

Dans le cas d'une installation photovoltaïque couplée au réseau, l'énergie produite est injectée dans le réseau électrique public. Ce type de configuration permet d'éviter le recours au stockage, souvent coûteux et complexe. Cependant, dans les systèmes les plus simples, l'onduleur ne fonctionne que si le réseau est disponible. Ainsi, une panne du réseau rend inopérant le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est requis si la charge fonctionne en courant continu. [57]

Lorsque la production locale est insuffisante, le réseau fournit le complément d'énergie. À l'inverse, l'excédent est injecté dans le réseau et alimente d'autres consommateurs.

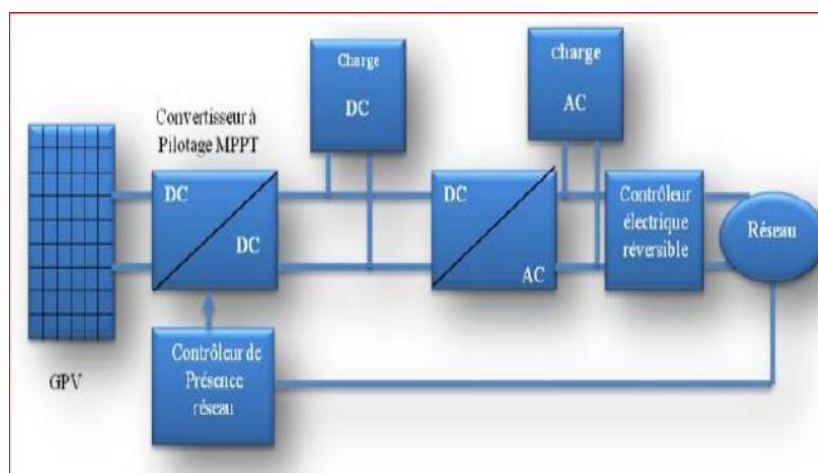


Figure. 2.11.Installation photovoltaïque couplée au réseau.[57]

3.2.4. Modèle simplifié du système PV

Les systèmes photovoltaïques reposent sur l'utilisation de cellules photovoltaïques (PV), qui représentent les unités de base du système. Chaque cellule génère une faible puissance, généralement inférieure à 3 W, avec une tension continue avoisinant 0,5 V. Pour obtenir une tension plus élevée, plusieurs cellules sont raccordées en série, formant ainsi un module photovoltaïque. Ensuite, ces modules peuvent être connectés entre eux, en série et en parallèle, afin de constituer un champ photovoltaïque capable de fournir différentes combinaisons de tension et de courant. [58]

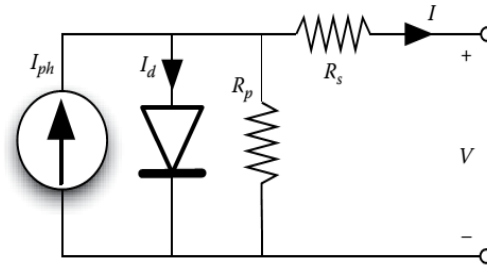


Figure.2.12.un modèle équivalent du cellule solaire à diode unique.[58]

le courant de sortie du champ photovoltaïque est noté I . Le courant I_{ph} , appelé courant photo-généré, est directement proportionnel à l'irradiation solaire. Le courant I_d correspond au courant traversant la diode. Les résistances R_p et R_s représentent respectivement les résistances série et parallèle de la cellule. Le comportement électrique de la cellule solaire peut être modélisé à l'aide du modèle à une seule diode, tel qu'illustré dans la figure.2. [25-26] :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[e^{\left(\frac{q(V + R_s I)}{A K T N_s} \right)} - 1 \right] - N_p \left(\frac{q(V + R_s I)}{N_s R_p} \right) \quad (2.13)$$

Où :

La tension de sortie de la cellule est notée V , tandis que q désigne la charge élémentaire ($1.60217646 \times 10^{-19} \text{C}$), et K représente la constante Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{J/K}$). La température absolue est exprimée en Kelvin (T). Le courant de saturation inverse de la cellule est indiqué par I_{rs} , alors que A correspond au facteur d'idéalité de la diode. le nombre de cellule photovoltaïques connecté en parallèle est noté N_p , tandis que N_s représente le nombre de cellule reliées en série. Par ailleurs, la relation entre le courant photo-généré (I_{ph}) l'irradiation solaire peut être formulée à l'aide de l'équation :

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - T_r)] \frac{S}{1000} \quad (2.14)$$

La coefficient de température du courant de court-circuit est représenté par k_i . L'irradiation solaire, exprimée en watts par mètre carré, La température de référence de la cellule est indiqué par T_r , tandis que I_{sc} désigne le courant de court-circuit de la cellule à cette température.

L'évolution du courant de caturation de la cellule en fonction de la température peut être d'écrite à l'aide de l'équation suivant :

$$I_{rs} = I_{rr} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left(\frac{q \cdot E_G}{K \cdot A} \left[\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right] \right) \quad (2.15)$$

Où :

E_G indique la bande interdite du semi-cnducteurutilisé dans la cellule. I_{rr} est le courant de saturation inverse correspodant à T_r .

On utilise des unités normalisées pour exprimer les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque (PV) fonctionnant dans des conditions homogènes. Dans certaines situations, les paramètres Tmax et Smax peuvent servir de références pour les tests du panneau. Les propriétés du panneau dépendent des matériaux, du type de cellules, ainsi que des choix technologiques adoptés durant le processus de fabrication. Par conséquent, pour permettre l'intégration du système photovoltaïque à une source d'énergie destinée à alimenter un utilisateur final, une étape intermédiaire de conversion est nécessaire. Cette phase vise à assurer un transfert optimal de la puissance électrique maximale produite par le générateur PV vers la charge. Pour ce faire, le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) doit être en mesure de s'adapter aux conditions de fonctionnement variables susceptibles d'affecter le rendement du générateur tout au long de sa durée de vie.

4. Mise en équation du système mono machine connecté au jeu de barre infini[53]

➤ Les équations de tension de stator sont :

$$V_q = -(r_s + R_e)I_q - (x'_d + X_e)I'_d + E'_q \quad (2.16)$$

$$v_d = -(r_s + R_e)I_d - (x'_q + X_e)I'_q + E'_d \quad (2.17)$$

Où :

V_q, V_d : Composantes de la tension de la stator dans le repère dq.

r_s : Résistance du stator

R_e, X : résistance et réactance de la ligne.

I_q, I_d : Courant synchrone dans les axe q et d.

x'_q, x'_d : Réactance transitoires quadrature et directes.

E'_q, E'_d : Tension internes de générateur.

➤ Equation de l'angle du rotor :

$$\dot{\delta} = (\omega - \omega_b) \quad (2.18)$$

$\dot{\delta}$: Angle de rotor par rapport au bus infini.

ω : vitesse mécanique de la machine.

ω_b : vitesse synchronisme (base).

➤ Equation du mouvement :

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_b}{2H} [P_m - P_e - D(\omega - \omega_b)] \quad (2.19)$$

Avec :

H : constante d'inertie.

D : coefficient d'amortissement.

P_m : Puissance mécanique appliquée.

P_e : Puissance électrique généré par la machine synchrone.

➤ Equation de la tension transitoire sur l'axe q :

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [V_{ex} - E'_q + (x_d - x'_d) I'_d] \quad (2.20)$$

Avec :

E'_q : Force électromotrice transitoire sur l'axe q.

T'_{d0} : Constante de temps à vide pour l'axe direct.

V_{ex} : Tension d'excitation.

x_d, x'_d : Réactance synchrone et transitoires de l'axe direct.

I_q : Courant du stator.

➤ Equation de la tension transitoire sur l'axe d :

$$\dot{E}'_d = \frac{1}{T'_{d0}} \left[-E'_d - (x_d - x'_d) I'_q \right] \quad (2.21)$$

➤ Puissance électrique au nœud 2 :

$$P_e = P_{gen} + P_{air} \quad (2.22)$$

P_e : Puissance électrique totale injectée au réseau.

P_{gen} : Puissance fournie par le générateur.

P_{air} : Puissance fournie par une source éolienne(w).

5. Modélisation de système hybride éolienne –photovoltaïque connecté au réseau

5.1. Définition

Un système hybride a sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie généralement renouvelable, dans le but d'alimenter une même charge ou réseau, en vue d'obtenir et de maintenir une production énergétique continue, stable et durable. [59]

Les principes composants d'un système hybride sont les générateurs éoliens, les générateurs photovoltaïques et les dispositifs de stockage l'énergie (onduleurs, convertisseurs), les équipements de régulation et la charge. Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs qui doivent fonctionner à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu. La régulation doit tenir compte du fait que le courant produit par Le photovoltaïque est assez constant et d'un seuil bas tandis que celui de L'éolien varie beaucoup.

Le rôle du système de régulation est de maintenir le fonctionnement du générateur hybride dans une zone optimale, notamment pour garantir une bonne gestion de la charge est, si nécessaire, du stockage par batteries. [60]

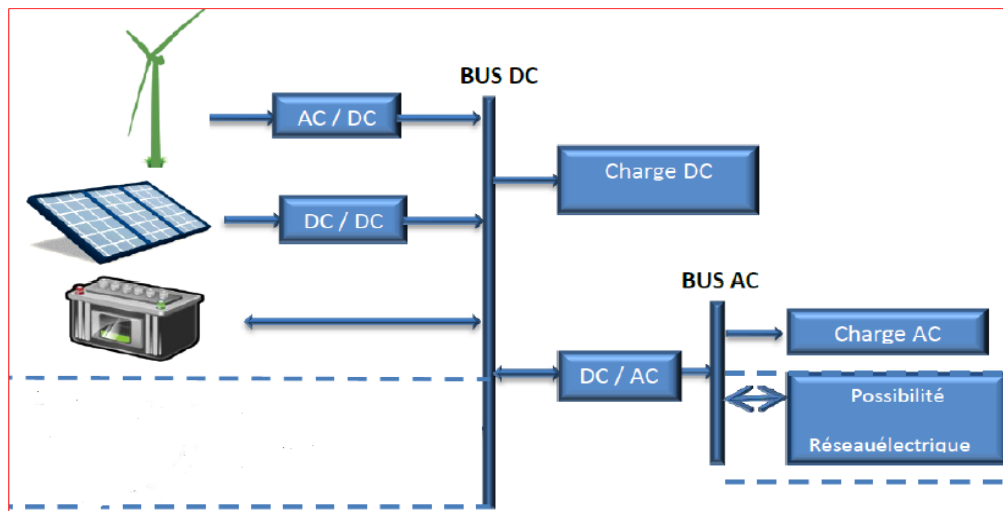


Figure2.13. système hybride éolien –photovoltaïque.[60]

Ce système combine deux sources de production d'énergie, chacune modélisé précédemment. Lorsque ces deux sources sont connectées à un même point de couplage dans le réseau, la puissance totale injectée peut être exprimée par la relation suivante :

$$P_{total} = P_{PV} + P_{EO} \quad (2-22)$$

5.2. Classification des systèmes hybrides[61]

La classification des systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables (SHSER) peut se faire selon plusieurs critères, liés au mode de fonctionnement, à la structure du système, ou encore à la nature des sources utilisées. Ci-dessous sont présentées les classifications les plus courantes.

5.2.1. Le mode de fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur mode de fonctionnement. La première regroupe les systèmes connectés au réseau électrique national, fonctionnant en parallèle avec celui-ci. Ces systèmes participent à l'approvisionnement en énergie du réseau général. La seconde catégorie concerne les systèmes opérant de manière isolée, c'est-à-dire sans lien direct avec le réseau électrique. Ces configurations sont souvent utilisées dans des zones éloignées ou difficiles d'accès telles que les régions montagneuses, les îles, les villages isolés, ou encore pour des applications spécifiques comme les panneaux de signalisation routière.

5.2.2. La structure du système hybride

dépend principalement du potentiel La structure d'un système hybride peut être définie selon plusieurs critères.

Le premier critère repose sur la présence ou non d'une source d'énergie conventionnelle. Cette dernière peut prendre la forme d'un générateur diesel, d'une micro-turbine à gaz, ou encore d'une centrale classique dans le cadre d'une étude de réseau global.

Un deuxième critère important est l'intégration d'un dispositif de stockage d'énergie. Ce type de composant permet d'assurer la continuité de l'alimentation électrique durant les périodes où les sources renouvelables ne sont pas disponibles. Parmi les technologies de stockage, on retrouve les batteries rechargeables, les systèmes à hydrogène (électrolyseurs et réservoirs), ainsi que les volants d'inertie.

Enfin, le dernier critère concerne les types de sources d'énergie renouvelable employées. Le système peut inclure des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des convertisseurs d'énergie hydraulique (centrales hydroélectriques, dispositifs exploitant les vagues), ou une combinaison de ces technologies. Le choix des sources énergétique du site d'implantation, ainsi que des caractéristiques des charges à alimenter, ce qui peut également justifier l'ajout d'un stockage ou d'une source d'appoint.

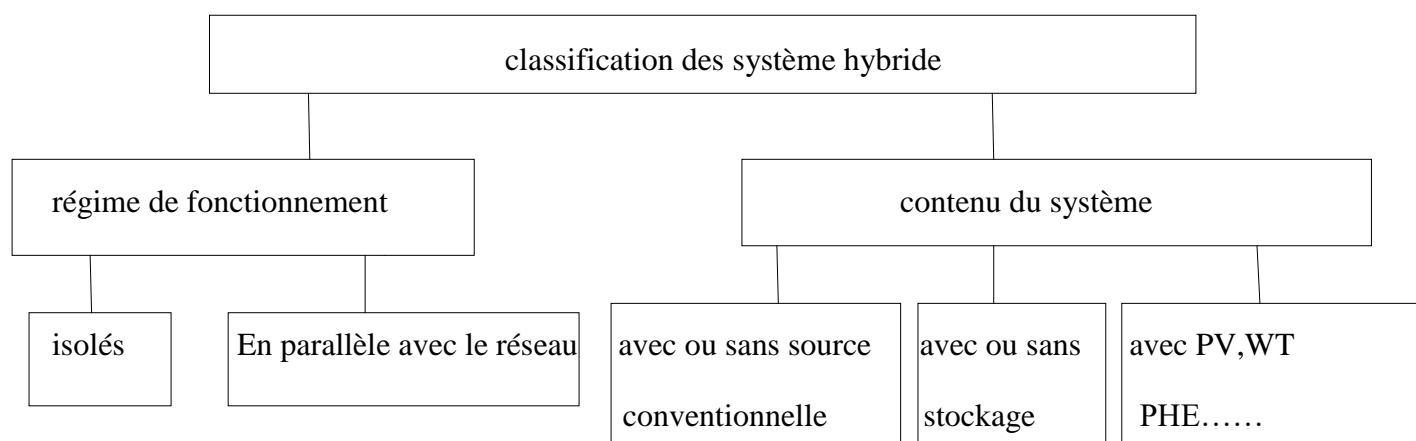


Figure 2.14.Classification des systèmes hybrides.[61]

5.2.3. Les avantages du système hybride PV/éolien

Le recours aux systèmes hybrides est de plus en plus répandu en raison des nombreux avantages qu'ils offrent, parmi lesquels[62] :

- Ils sont plus rentables que les systèmes fonctionnant uniquement avec des générateurs diesel.
- Ils permettent une alimentation fiable pour les sites isolés.
- Ils offrent une autonomie énergétique importante (65,2 heures).

- Ils reposent principalement sur des sources renouvelables (84 % éolien et 16 % photovoltaïque).
- Ils génèrent un excès d'énergie (59,8 %), réutilisable pour de futures extensions.

6. Conclusion

Le but de ce chapitre est de présenter la modélisation du réseau électrique en absence et en présence des sources d'énergie renouvelable (éolienne et photovoltaïque), ainsi qu'un système hybride. Cette modélisation est nécessaire pour simuler et analyse le comportement dynamique du réseau, notamment en termes de stabilité, dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Résultats et discussion

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une série de simulations visant à évaluer l'impact de différentes configurations d'intégration des énergies renouvelables sur la stabilité du réseau électrique.

Trois études de cas ont été développées. Dans chaque cas, un type de régulateur a été utilisé pour améliorer les performances dynamiques du système. Plus précisément : un Power System Stabilizer (PSS), un compensateur statique de puissance réactive (SVC), un régulateur de type PI, un Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) ainsi qu'un régulateur de fréquence.

Chaque étude présente un scénario différent de couplage ou d'interaction entre ces éléments, avec une analyse détaillée des résultats obtenus à travers des simulations réalisées sous Simulink.

2. Application 1 : Etude de la stabilité d'un réseau SMIB en présence des sources d'énergies renouvelables, un SVC et un contrôleur PSS

2.1. Présentation du système étudié

Afin d'évaluer la stabilité d'un réseau électrique en présence d'une source d'énergie renouvelable, un système simplifier de type SMIB (Single Machine Infinité Bus) a été utilisé. Ce système est constitué d'un générateur synchrone connecté à un bus infini, une charge, une petite éolienne, un système photovoltaïque et un compensateur statique de puissance réactive (SVC) également raccordé à ce même bus. Le générateur synchrone est connecté via une ligne de transmission caractérisé par une résistance R_e et une réactance X_e . La figure 3.1 présente le schéma de système étudié.

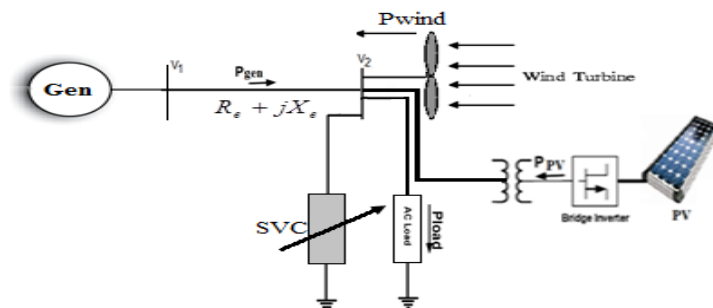


Figure. 3.1. Système SMIB avec SVC et éolienne connectée au réseau.[63]

Dans ce modèle l'objectif est d'analyser l'impact de l'intégration du système éolien et PV sur la stabilité du système en tenant compte de l'action du SVC pour la régulation de tension.

L'efficacité de la méthode proposée est testée à l'aide d'un système à machine synchrone unique connecté à un bus infini (SMIB), équipé d'un SVC et d'un système photovoltaïque (PV) connecté au bus 2, comme indique la figure 3.1.

Le modèle tient compte de deux paramètres externes de ligne, R et X, qui peuvent être ajustés pour simuler différentes résistances électriques entre le générateur synchrone et le bus infini auquel sont connectés la charge, le système PV et le SVC. [53]

La puissance électrique totale injectée par le système photovoltaïque peut être exprimée par la relation suivante :

$$P_e = P_{gen} + P_W + P_{PV} \quad (3.1)$$

Pour améliorer la stabilité transitoire du système électrique, on a utilisé un PSS conventionnel.

Le Correcteur de Puissance Supplémentaire (CPSS) est constitué principalement de trois éléments fonctionnels :

- un gain stabilisateur K_{PSS} ,
- un filtre passe-bas caractérisé par une constante de temps T_w
- ainsi que deux compensateurs de phase définis par les constantes T_1 et T_4 .

Selon la figure 3.2, le signal d'entrée du PSS est généralement la déviation de la vitesse du rotor ($\Delta\omega(\text{syn})$), tandis que le signal de sortie, représentant la tension de stabilisation (V_{sup}), est soumis à un dispositif de limitation (anti-enroulement) contraint par des seuils minimum (V_{sup}^{\min}) et maximum (V_{sup}^{\max}). Le signal supplémentaire est donné par l'équation suivante:

$$V_{sup} = \left[K_{PSS} \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \right] \Delta\omega(\text{syn}) \quad (3.2)$$

La structure bloc du PSS est donnée par la figure suivante:

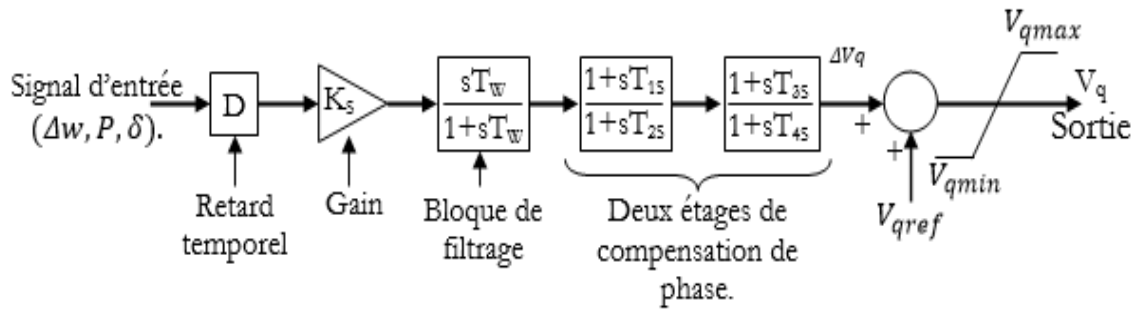


Figure 3.2. Structure de contrôleur PSS

2.2. Résultats de simulation

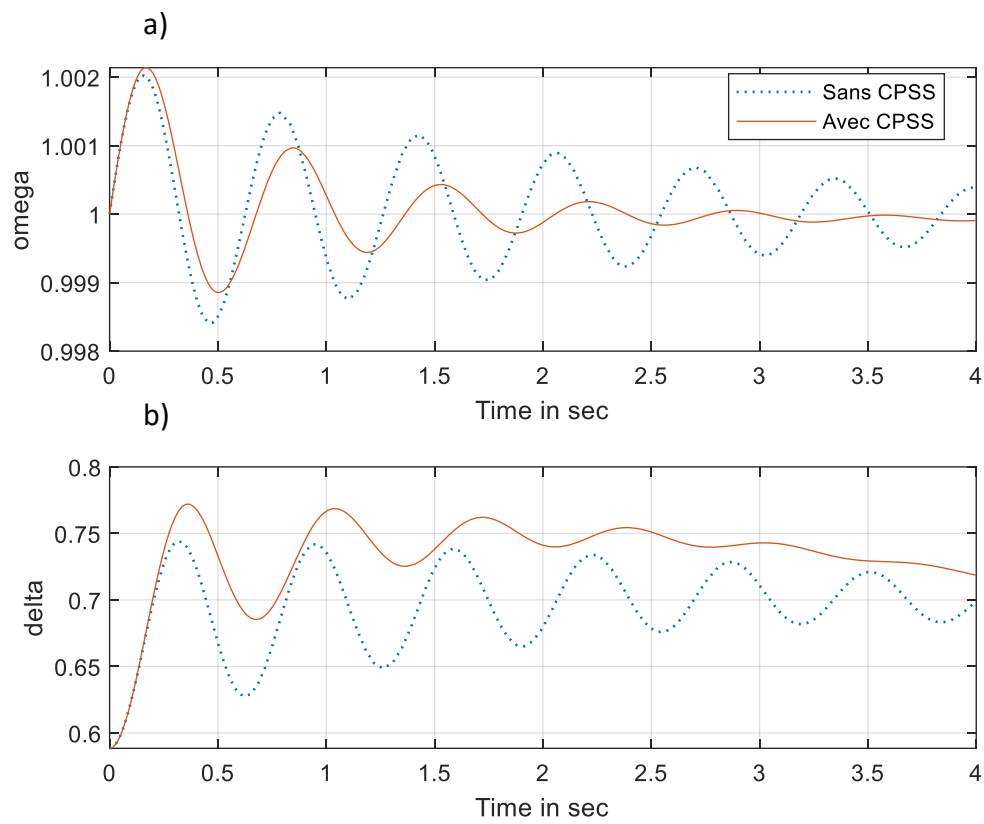


Figure 3.3. résultats de simulation

a) vitesse de rotation (avec/ sans CPSS)

b) variation d'angle de rotor des générateurs (avec/sans CPSS).

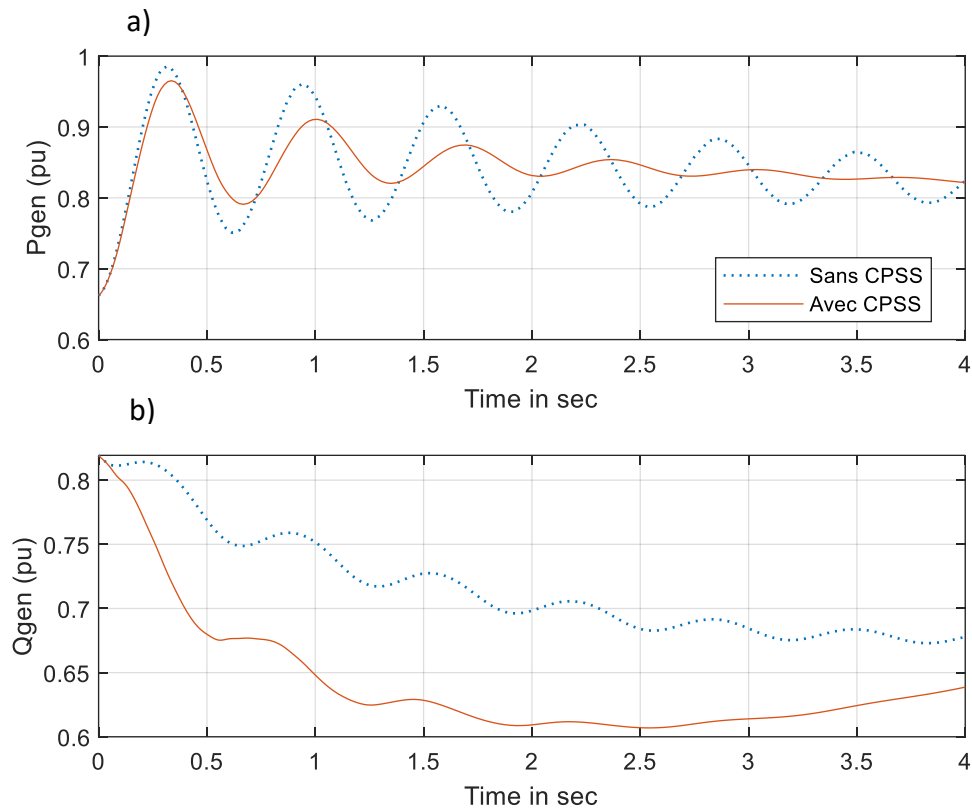


Figure 3.4. résultats de simulation

(a) la puissance électrique générée par la machine synchrone (avec/ sans CPSS)

(b) la puissance réactive de la machine synchrone (avec/sans CPSS).

2.3. Interprétation des résultats

La figure 3.3 représente les spectres des résultats de simulation respectivement la vitesse de rotation et la variation d'angle de rotor du générateur comparant deux cas :

- Sans CPSS
- Avec CPSS

Pour l'évaluation de la vitesse de rotation (ω)

- La courbe bleue (sans CPSS) représente des oscillations amorties lentement.
- La courbe rouge (avec CPSS) amortie beaucoup plus rapidement.
- On conclut que l'introduction du CPSS améliore clairement la stabilité dynamique du système en réduisant les oscillations et en raccourcissant le temps de stabilisation.

Pour la variation d'angle de rotor du générateur

- Même constat : réduction nette des oscillations avec le CPSS

- Sans CPSS, les oscillations sont plus amples et persistent plus longtemps
- Le CPSS permet une meilleure synchronisation des machines synchrones et atténue les variations d'angle

La figure 3.4 représente les spectres des résultats de simulation respectivement la puissance active de générateur et la puissance réactive

Pour la Pgene

- Sans CPSS, la puissance active montre des fortes variations en amplitude
- Avec CPSS, la réponse est plus lisse et plus stable
- Le CPSS aide à stabiliser la puissance générée, ce qui est essentiel pour la qualité et fiabilité de l'alimentation

Pour la Qgene

- On note une réduction significative des variations de la puissance réactive avec le CPSS
- Le stabilisateur améliore la régulation de la puissance réactive, ce qui est crucial pour maintenir la tension dans le réseau.

2.4. Régulation de la tension par SVC piloté par un contrôleur PI

Pour la régulation de la tension au bus 2, nous connectons un SVC dont la puissance réactive injectée Q_{SVC} est donnée par l'expression [54] :

$$Q_{SVC} = -b_{SVC} V_2^2 \quad (3.3)$$

Où b_{SVC} est la susceptance. La valeur de b_{SVC} est obtenue par le régulateur PI, représenté à la figure 3.5 :

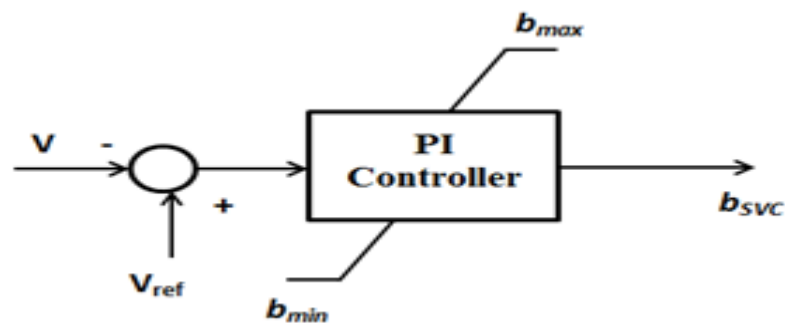


Figure 3.5. SVC avec contrôleur PI

Pour résoudre et calculer la tension du bus V_2 la méthode de Gusse –Sidel a été utilisée.[64]

$$V_2 = \frac{1}{y_{22} + y_{SVC}} \left[\frac{(P - P_{wind} - P_{PV}) - j(Q \pm Q_{SVC})}{V_2} - y_{12}V_1 \right] \quad (3.4)$$

Où y_{SVC} , y_{22} , y_{12} sont l'admittance du SVC, du bus 2 et de la ligne.

2.5. Résultats de simulation

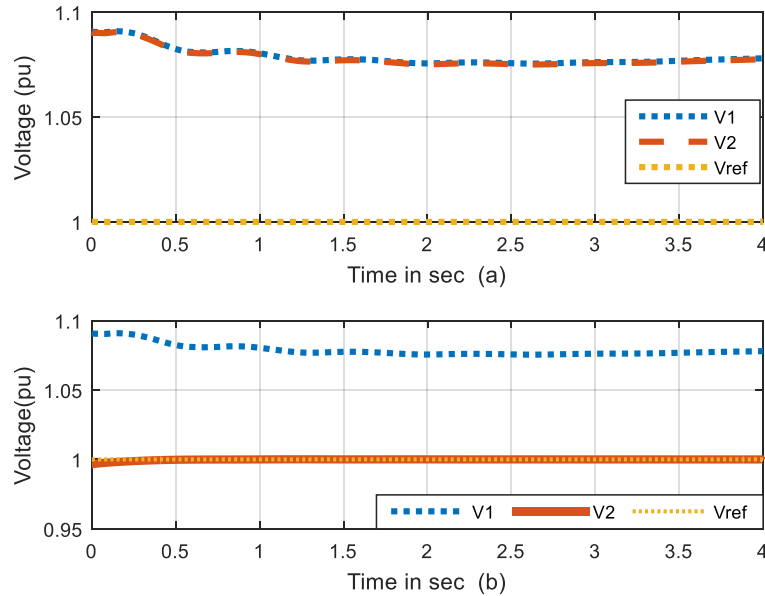


Figure 3.6. stabilité de la tension
(a) Sans SVC, (b) Avec SVC

2.6. Interprétation des résultats

La figure 3.6 représente la stabilité de tension avec/ sans SVC

- Sans SVC : la tension au niveau du bus 2 subit une chute notable après une perturbation, traduisant un manque de régulation et une faiblesse en stabilité
- Avec SVC : la tension montre une amélioration significative, confirmant l'efficacité du SVC à maintenir le niveau de tension grâce à l'injection de puissance réactive
- Le SVC permet une compensation dynamique de la puissance réactive, ce qui atténue les variations de tension causées par les fluctuations de charge ou les irrégularités de production des énergies renouvelables

- Le régulateur interne PI du SVC ajuste automatiquement la susceptance afin de stabiliser la tension au point de couplage

2. Application 2 : Etude de la stabilité d'un réseau en présence de l'énergie éolienne et un contrôleur TCSC

3.1. Présentation du système étudié

L'analyse implique un système d'alimentation à jeu de barre infini à machine unique (SMIB) intégré à une éolienne, comme illustré dans la figure 3.7:

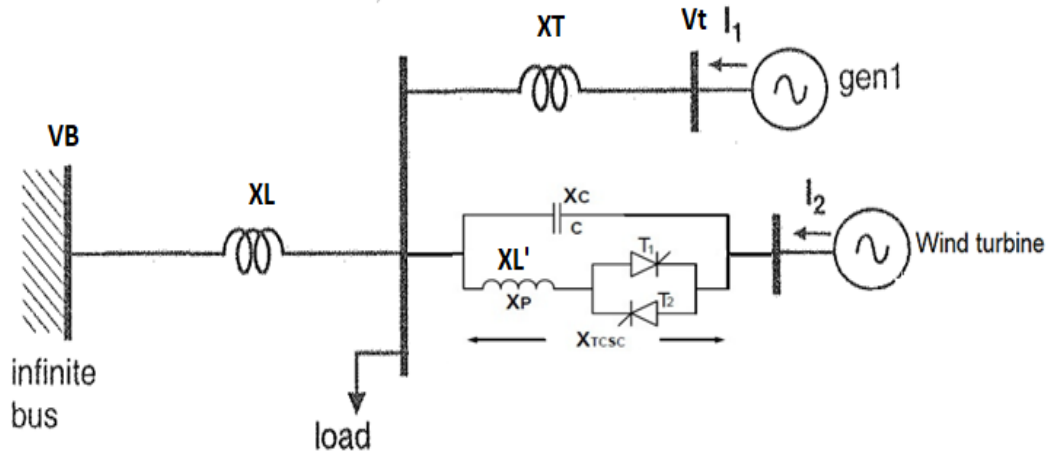


Figure 3.7.Schéma unifilaire du système SMIB avec éolienne.[65]

Cette étude utilise un contrôleur avance-retard pour le système de compensateur série contrôlé par thyristor (TCSC), comme illustré dans la figure 3.8 :

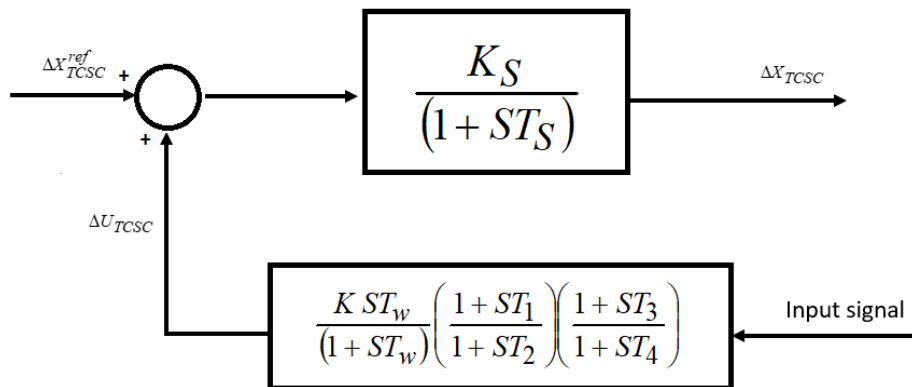


Figure 3.8. TCSC avec un régulateur lead-lag.

La constante de temps T_w , ainsi que les constantes de temps T_2 et T_4 , sont généralement prédéterminées. Dans cette étude, est fixée à 12 secondes, T_2 et T_4 sont fixées à 0,1 seconde. Les

gains du régulateur K_s , ainsi que les constantes de temps T_1 et T_3 , sont fixées par tâtonnement. L'équation régissant la dynamique de la réactance TCSC s'exprime comme suit :

$$\Delta \dot{X}_{TCSC} = \frac{1}{T_s} \left(K_s (\Delta X_{TCSC}^{ref} - \Delta U_{TCSC}) - \Delta \dot{X}_{TCSC} \right) \quad (3.5)$$

[65]

Tel que ΔX_{TCSC}^{ref} représente la référence du (TCSC), K_s et T_s sont le gain et la constante du temps de TCSC.

3.2. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes:

➤ Resultants pour la machine 1

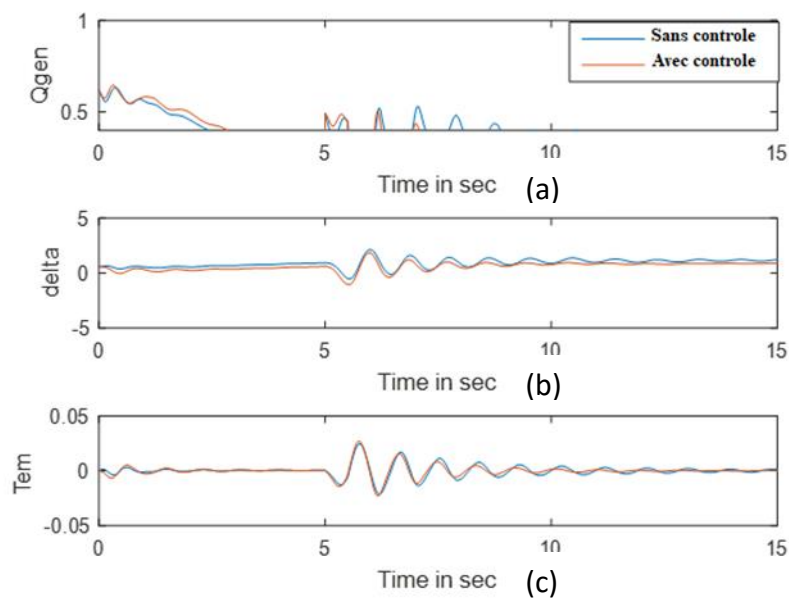


Figure 3.9.Réponse dynamique du la machine

(a) La puissance réactive du la machine

(b) d'angle variation de rotor

(c) variation du couple électromagnétique

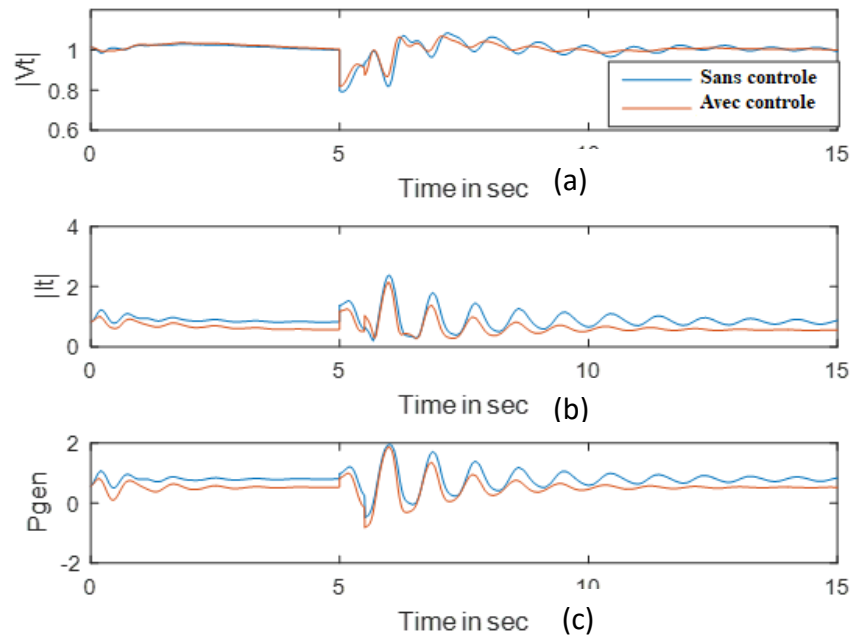


Figure 3.10.Réponse électrique du générateur

(a) tension terminale du générateur

(b) courant du sortie du générateur

(c) Puissance ractive générée

➤ **Résultats pour la turbine**

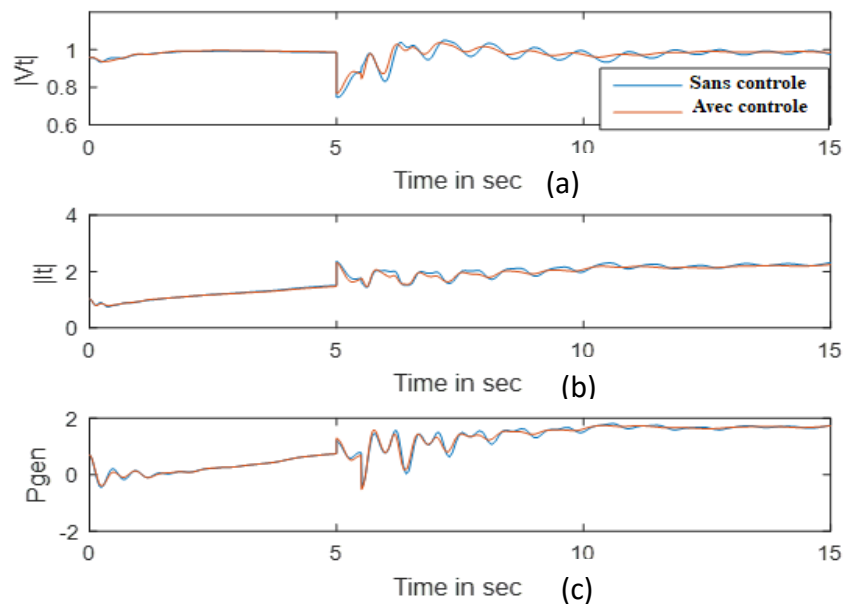


Figure 3.11.Réponse électrique du la turbine éolienne

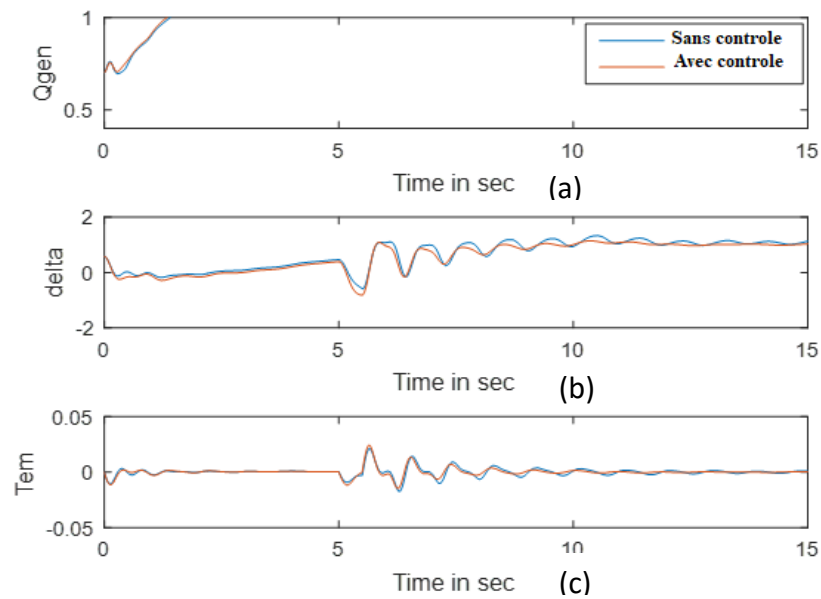


Figure3.12.Réponse dynamique pour la turbine éolienne

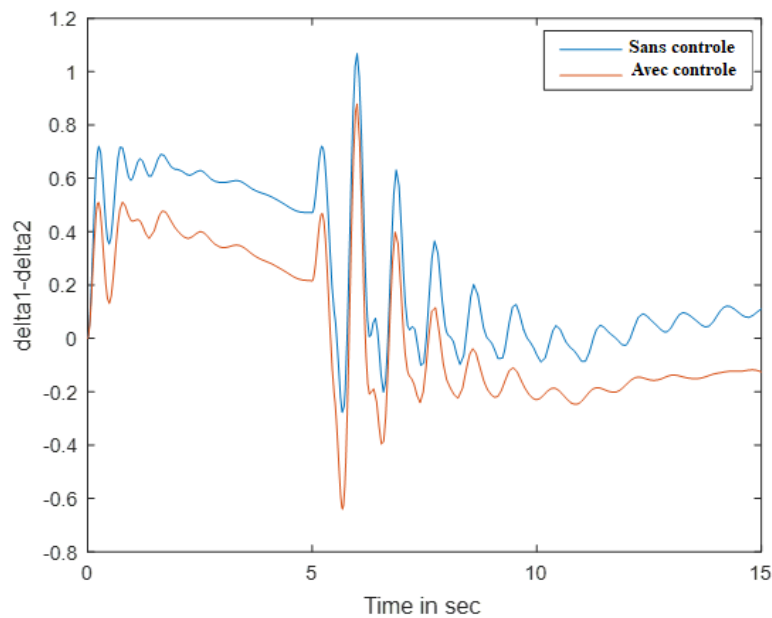


Figure3.13.Différence de l'angle rotorique

3.3. Interprétation des résultats

➤ Comportement du générateur synchrone

La figure 3.9: Réponse dynamique du générateur :

Cette figure illustre la stabilité transitoire du générateur après une perturbation. On observe que les oscillations s'amortissent progressivement, ce qui traduit l'effet positif du contrôleur TCSC sur la stabilité du système. Le système atteint un régime stable en un temps raisonnable.

Figure 3.10 : Réponse électrique du générateur :

La tension de sortie du générateur montre une réponse transitoire bien contrôlée. L'intégration du TCSC permet de réguler la tension et de minimiser les fluctuations, ce qui améliore la qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

➤ Comportement de la turbine éolienne

Figure 3.11 : Réponse dynamique de la turbine éolienne :

Cette figure met en évidence les variations de la vitesse ou de la puissance mécanique générée par la turbine. On remarque une réponse dynamique relativement rapide, indiquant une bonne interaction entre la turbine et le système global.

Figure 3.12 : Réponse électrique de la turbine éolienne :

La production électrique de la turbine reste stable, avec des fluctuations réduites grâce à l'action coordonnée du TCSC et du régulateur avance-retard. Cela contribue à maintenir un bon niveau de tension dans le réseau.

Figure 3.13 : Différence de l'angle rotorique :

L'évolution de l'angle rotorique entre le générateur et la turbine montre une synchronisation progressive. Une réduction de l'écart angulaire indique une amélioration de la cohérence du système et une stabilité améliorée de l'angle de rotor.

4. Application 3 : Etude d'un réseau symétrique à 4 générateur avec intégration éolienne et forte charge de transfert

4.1. Présentation du système étudié

Le réseau étudié, tel que présenté dans [12], se compose de deux zones parfaitement symétriques, interconnectées par deux lignes de transport parallèles de 230 km de long, fonctionnant sous une tension nominale de 220 kV. Ce modèle a été spécifiquement élaboré pour analyser les oscillations électromécaniques de basse fréquence dans les grands réseaux électriques interconnectés. Bien que de taille réduite, il reproduit fidèlement le comportement dynamique des systèmes électriques réels.

Chaque zone comprend deux générateurs synchrones identiques, équipés de rotors à pôles lisses, fonctionnant sous 20 kV et 900 MVA. D'après [12], les caractéristiques des machines sont similaires, à l'exception des constantes d'inertie : $H = 6,5$ s pour la zone 1 et $H = 6,175$ s pour la zone 2.

La charge est modélisée comme une impédance constante répartie entre les deux zones, de manière à ce que la zone 1 exporte 413 MW vers la zone 2. Étant donné que la capacité maximale de transfert sur une seule ligne est d'environ 140 MW, le système se trouve dans une situation de contrainte même en régime permanent. Le jeu de barres auquel est connecté le générateur M2 est défini comme le jeu de barres de référence.

Des batteries de condensateurs d'une puissance de 187 MVAR sont installées dans chaque zone afin d'améliorer le profil de tension, en maintenant une valeur proche de l'unité relative dans les deux régions. Par ailleurs, une ferme éolienne de même puissance est intégrée à proximité du générateur 4

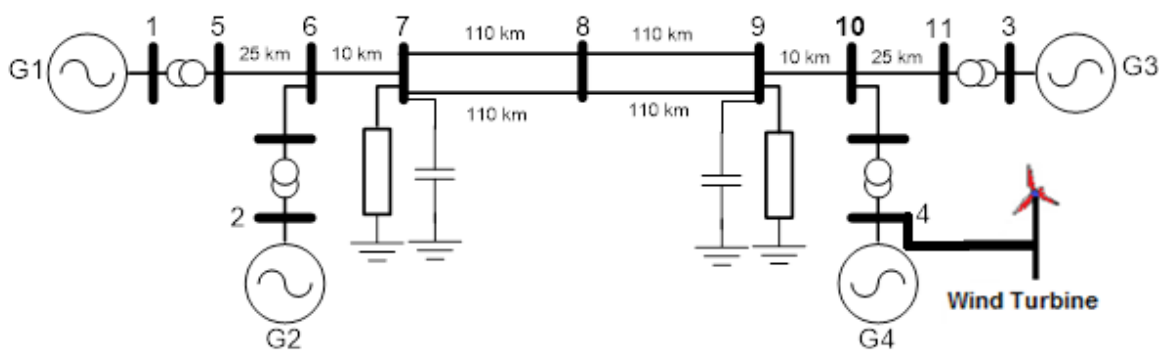


Figure 3.14. Réseau 4 machines 11 jeux de barres avec intégration d'une ferme éolienne.

Actuellement, dans les applications éoliennes, le convertisseur de tension est principalement utilisé. Cette topologie comprend une double conversion de courant alternatif à courant continu, puis de courant continu à courant alternatif. Les deux convertisseurs peuvent fonctionner en mode redresseur ou onduleur, permettant ainsi un flux de puissance bidirectionnel.

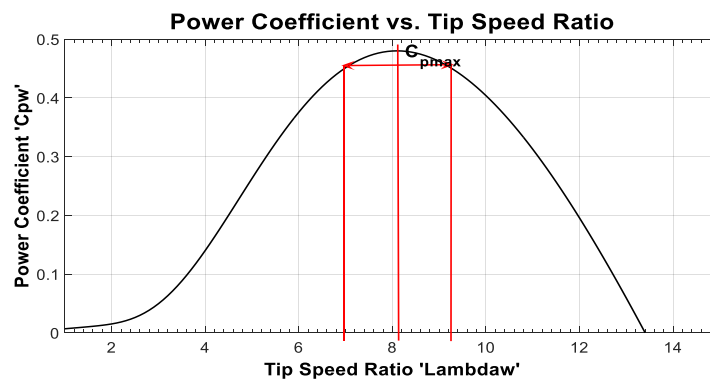


Figure 3.15: Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse

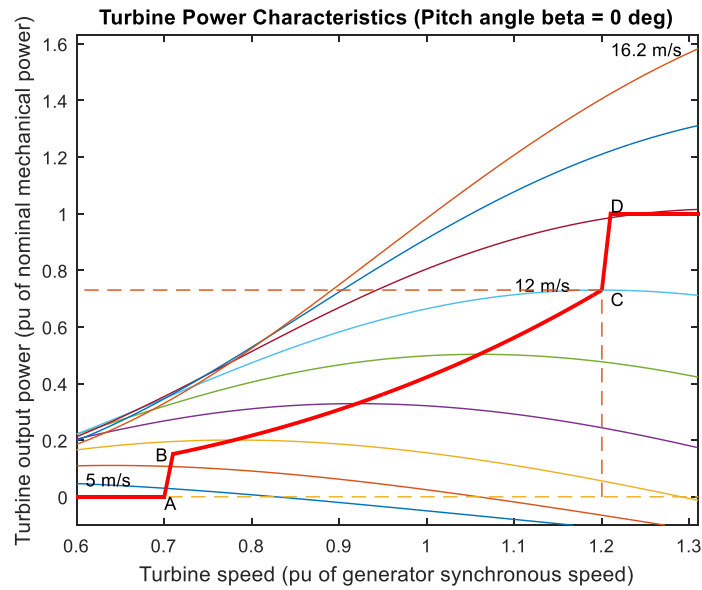


Figure 3.16. Caractéristique de l'éolienne en fonction de vitesse du vent

4.2. Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes:

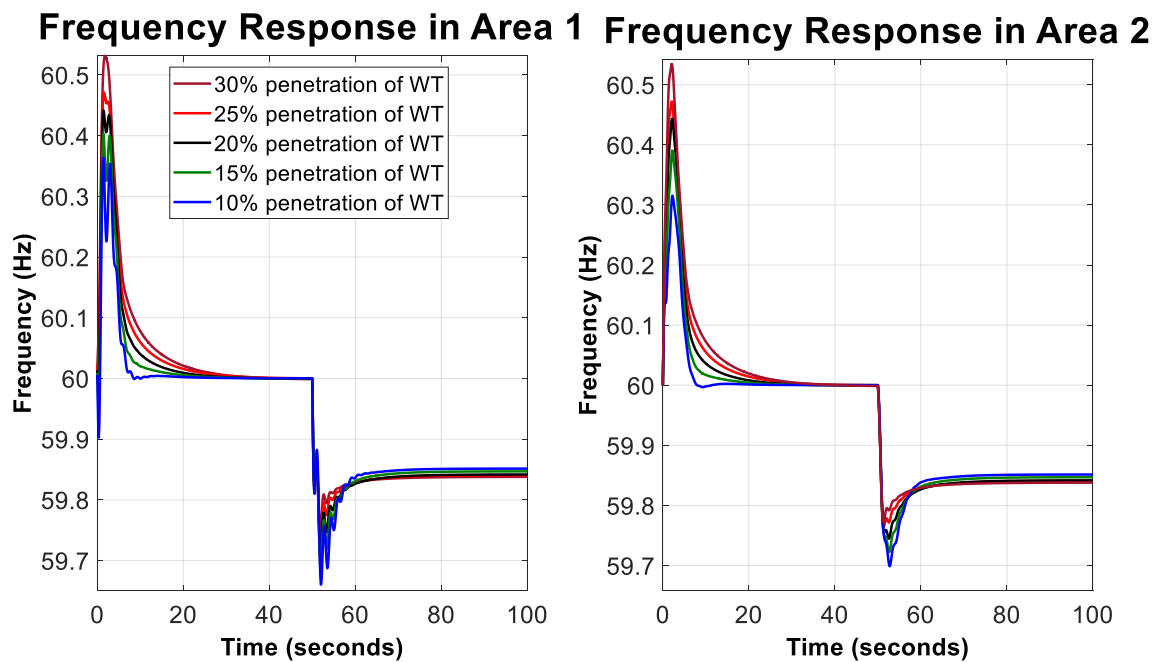


Figure 3.17. réponse fréquentielle dans les deux zones

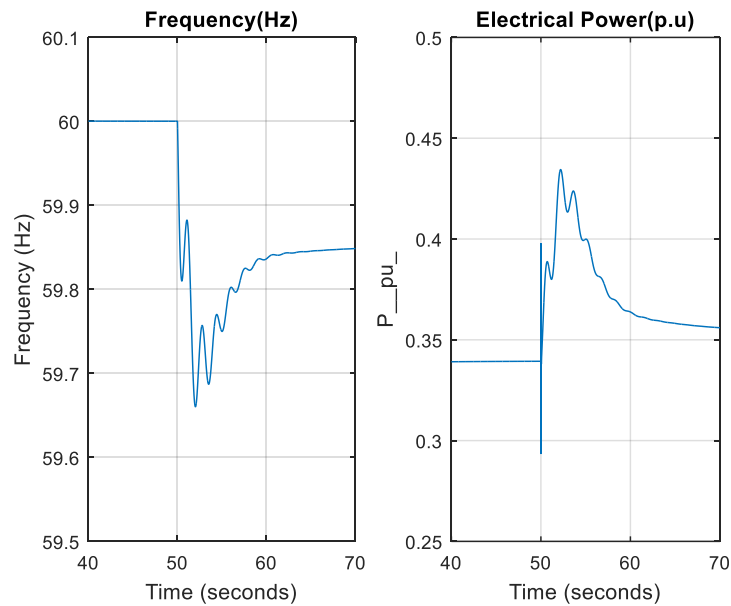


Figure 3.18.variation de la fréquence et de la puissance électrique

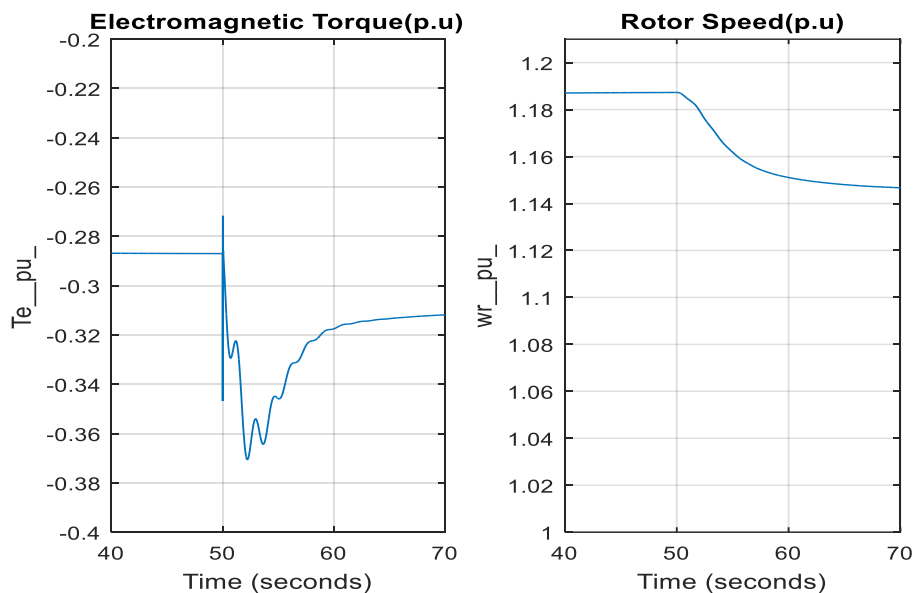


Figure 3.19.évolution du couple électromagnétique et de la vitesse du rotor.

4.3. Interprétation des résultats

Les résultats issus de la simulation permettent d'analyser le comportement dynamique du système après l'introduction d'une perturbation. La première figure compare la réponse en fréquence dans les deux zones. Bien que le réseau soit symétrique, une légère différence dans le comportement dynamique est observée, notamment au niveau du taux d'amortissement des oscillations. Cette différence est due à la variation de l'inertie des générateurs (6,5 s dans la zone 1 contre 6,175 s dans la zone 2). À noter également que des batteries de condensateurs de 187 MVAR installées dans chaque zone contribuent au maintien du profil de tension proche de l'unité relative, ce qui a permis d'assurer une meilleure stabilité du système face à la perturbation. La deuxième

figure présente l'évolution de la fréquence et de la puissance électrique, où l'on observe une variation initiale brusque suivie d'un retour graduel vers la valeur nominale. Cela reflète la réponse électromécanique du système face à un déséquilibre temporaire de puissance entre les deux zones. Ce déséquilibre est notamment accentué par l'intégration d'une ferme éolienne à proximité du générateur 4, utilisant une topologie à convertisseur de tension (VSC) à double conversion, permettant un flux de puissance bidirectionnel. Cette intégration a introduit des interactions dynamiques supplémentaires, influençant la stabilité globale du système. Enfin, la troisième figure illustre l'évolution du couple électromagnétique et de la vitesse du rotor, révélant une réponse transitoire typique d'un générateur synchrone à pôles lisses : le couple présente des oscillations amorties, tandis que la vitesse tend progressivement à se stabiliser. Cette dynamique met en évidence l'inertie du système et sa capacité à retrouver un régime permanent.

5. Conclusion

Les travaux présentés dans ce chapitre ont permis d'analyser, par le biais de simulations sous Simulink, le comportement dynamique d'un réseau électrique soumis à l'intégration des sources d'énergie renouvelables. Trois configurations ont été étudiées, chacune intégrant un dispositif spécifique de régulation ou de compensation, dans le but d'améliorer la stabilité du système.

L'analyse des résultats a révélé que les oscillations du système peuvent être efficacement atténuées grâce à l'ajout de régulateurs adaptés tels que le PSS, qui agit sur la stabilité angulaire, ou encore le SVC contrôlé par un PI, permettant une meilleure régulation de la tension. L'intégration du TCSC a, quant à elle, favorisé une réponse transitoire plus rapide et un meilleur contrôle du flux de puissance. De plus, l'étude d'un réseau symétrique fortement chargé a mis en évidence l'effet de l'inertie des générateurs et du renforcement capacitif sur la réponse du système après perturbation.

Dans l'ensemble, les simulations démontrent que, malgré les défis liés à la variabilité des sources renouvelables, leur insertion dans le réseau peut être maîtrisée efficacement si elle est accompagnée de dispositifs de contrôle appropriés. Ces résultats confirment l'intérêt d'une approche intégrée, combinant production renouvelable et régulation active, pour garantir un fonctionnement stable et fiable du système électrique

Conclusion Générale

La libéralisation du marché de l'électricité, ainsi que la raréfaction des combustibles fossiles, ont conduit à une évolution significative vers l'intégration de nouvelles sources d'énergie, dites renouvelables. Ces sources, en particulier l'énergie éolienne et photovoltaïque, représentent aujourd'hui des technologies matures, largement adoptées en raison de leur faible coût et de leurs avantages environnementaux. Leur croissance rapide à l'échelle mondiale témoigne de leur rôle de plus en plus central dans les réseaux électriques modernes. Toutefois, l'intégration de ces sources intermittentes dans un réseau électrique pose plusieurs défis, notamment en ce qui concerne la stabilité, la sécurité globale du système et les coûts de production.

Au fil de ce travail, nous avons étudié les effets de l'intégration des énergies renouvelables sur la stabilité des réseaux électriques. Le premier chapitre a été consacré à un état de l'art sur les différentes formes d'énergies renouvelables, les notions de stabilité, ses différentes formes et les méthodes couramment utilisées pour son amélioration. Dans le deuxième chapitre, nous avons développé une modélisation progressive du réseau électrique, en commençant par une structure de base sans énergies renouvelables, avant d'y intégrer successivement des sources de production éolienne et photovoltaïque, afin d'analyser leur impact sur le comportement global du système. Le troisième chapitre a porté sur une série de simulations visant à évaluer la réponse dynamique du réseau en présence de plusieurs dispositifs de stabilisation et de compensation.

Ce travail a permis de mettre en évidence l'influence significative de l'intégration des énergies renouvelables sur la stabilité des réseaux électriques. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de dispositifs de stabilisation et de compensation tels que le SVC, le TCSC, le PSS, le régulateur de fréquence et les correcteurs PI contribue de manière efficace à l'amélioration des performances dynamiques du réseau. Toutefois, les simulations réalisées dans un environnement numérique (MATLAB) restent limitées à des scénarios théoriques et à des modèles simplifiés. Cela ne permet pas de refléter l'ensemble des complexités d'un réseau réel, notamment les aléas climatiques, les charges variables ou les incidents imprévus. Pour approfondir cette étude, il serait pertinent d'envisager des expérimentations sur des systèmes plus complexes ou à travers des plateformes de test en temps réel. De plus, l'intégration de techniques avancées de contrôle, comme les approches basées sur l'intelligence artificielle ou le stockage d'énergie, pourrait offrir de nouvelles perspectives pour renforcer la stabilité des réseaux électriques modernes.

Références bibliographiques

[01] **MENZAR Meryem** « Analyse des performances d'un réseau électrique en présence des sources à énergie renouvelable » Mémoire de Master, université mohamedkhider de biskra, 25 juin 2018.

[02] **MERZOUGUI Hadjer** « Etude de la stabilité transitoire d'un réseau avec intégration des sources renouvelables » Mémoire de Master, L'Université de Annaba, juin 2018.

[03] **KRIBAA SLIMANE, AYMEN BERROUBA**, "Analyse de la stabilité électrique en présence de système de stockage et des sources renouvelables", MASTER ACADEMIQUE, 2021.

[04] **KhelifMammar, SettalHicham** , " Le taux d'intégration des sources solaires pour l'évaluation de la stabilité transitoire de réseau de transport" MASTER ACADEMIQUE, univ Ouargla,2020.

[05] Demirbas A. Recent advances in biomass conversion technologies. Energy Educ Sci Technol 2000;6:19–40.

[06] **Jean-louis Bal, Bernard chabot** " les énergie renouvelables. Etat de l'arte et perspectives de développement " ,comptes rendus de l'Académie des sciences –series IIA – Earth and planetary science 333 (12),827,2001.

[07] Panwara NL, Kaushik SC, Kothari Surendra. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. Renew Sustain Energy Rev 2011;15:1513–24.

[08] REN21. Renewable energy Policy Network for the 21st century. Renewables 2014. Global Status Report; 2016.

[09] **KADDOUR MEHDI, BOUSTER IMED** , "Etude d'un système de conversion éolienne connecté au réseau" ,MASTER ACADEMIQUE, univ BADJI-MOKHTAR –ANNABA-.

[10] O. Guerri, "L'Energie Eolienne en Algérie : un Bref Aperçu", Bulletin des Energies Renouvelables N°. 21, CDER, Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Algérie, 2011.

[11] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Anse, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse. "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie". CNRT FUTURELEC, 2006.

[12] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, et al. "Etat de l'art des aérogénérateurs". L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154, 2002. hal-00674088.

[13] **K. belmokhtar**, "contribution à l'intégration d'un parc éolien à un réseau électrique autonome, avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène" doctorat en génie électrique, université du Québec, 2015.

[14] **FERRAH Billel**, "Etude d'un system hybride (photovoltaïque –éolien) ",Mémoire de Master,univ BADJI-MOKHTAR –ANNABA,2015.

[15] M.Hadjab ,Etat de l'art technologique des cellules solaire photovoltaïque, Editions Universitaires Européennes ,2018.

[16] **MEEKUN Dariga**, "Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïques pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique ",Thèse de doctorat ,institut National des sciences appliquées, Toulouse 2010..

[17] C. Lerouge, et al., Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis 2006, SCIENCES PHYSIQUES ETATS-UNIS.

[18] MULLER, J.-C., Électricité photovoltaïque, in BE 8578. 2007, Techniques d'Ingénieur.

[19] **J.-L. KUENY**, " Objectives for Small Hydro technology ",INPG/ENSHMG - EPFL/IMHEF-LMH,1999.

[20] H.Kawajiri -2014- , "Design optimization method for Francis turbine",IOP .conf.ser. :EarthEnviron.sci.22 012026

[21] **Justin LAROUZEE**, " THEORIE ET PRATIQUE DES MODELES D'ERREUR HUMAINE DANS LA SECURITE DES BARRAGES HYDROELECTRIQUES : LE CAS DES ETUDES DE DANGERS DE BARRAGES D'EDF", Thèse de doctorat,MINESParisTech ,l'École nationale supérieure des mines de Paris ,2015 .

[22] World Walch Institute, "Feuille de route pour un système énergétique durable en Haïti", Rapport 2014

- [23] **S. Belakehal**, "Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables", Thèse de doctorat Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [24] **NDIAYE.Moustapha**, " étude de la géothermie et production d'énergie électrique", université de Dakar ,juillet 2004.
- [25] **P.M. Anderson and A.A. Fouad**, "Power system control and stability", IEEE Press, New York, 1977
- [26] **KOROM Yaya** « étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques », mémoire de master, université ibn-khaldoun de Tiaret, 2020
- [27] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 19, n°. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [28] **ZITOUNI .F** " Amélioration De La stabilité Transitoire Des réseaux électrique par L'utilisation Des Systèmes FACTS " Thème de Magister de Université de Ferhat Abbas Sétif, 2010.
- [29] **MEKHNANE mouhamed,BAHLOULabderrahim**, «etude de la stabilité de tension», mémoire de master, université 8 mai guelma, 2022.
- [30] **SABOUNE nabil**, « analyse de la stabilité d'un réseau électrique »,Mémoire de master, université 8 mai 1945, Guelma, 14 juillet 2021.
- [31] **GACEM Abdelmalek**, « Commande Robuste D'un Dispositif FACTS Par Les Méthodes Métaheuristiques Pour La Stabilité De Tension D'un Réseau Electrique », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 15/04/2019.
- [32] **BOURZAMI arif**, "Contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue", Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1
- [33] **SAOUDI kamel**, « Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques » Thèse de Doctorat, L'Université de SETIF, 02 Novembre 2014.
- [34] **M. TOUAFEK mouhamed yaakoub** « amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électrique par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS », MEMOIRE DE MAGISTER, université ferhatabbas-setif, 11 janvier 2012
-

- [35] **Benyoucef, B., Darou, A, Boudjema, Z,** «dynamic performance analysis of grid connected Pv system integrated with SVC controller under variable irradiance and temperature conditions » .Materials Today Proceedings ,71,107-114. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722016699>.
- [36] **BOUCHERIT YassmineSEBAA Manal "** Analyse et amélioration de la stabilité des réseaux électriques sous l'environnement PSAT", MÉMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider Biskra Le : 26 septembre 2020
- [37]**DJELLAL yacoub, BEN KUIDER khadir,** "stabilité statique dans les réseaux électrique en utilisant un « SVC » ", MÉMOIRE DE MASTER,Université SAAD DAHLAB de BLIDA,2021-2022
- [38] **A. BARIK, S. BARIK,** power system stability improvement using FACTS devices, international journal of modern engineering research (IJMER), vol. 1, no. 2, pp. 666-672, 2013.
- [39] **] Ranjit Kumar Bindal,** "A Review of Benefits of FACTS Devices in Power System",International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-3, Issue-4, April 2014
- [40] **ZENIR Dyaa El Hak , KELKOULI AmiraSoundos ,** "Effet du compensateur SVC sur la stabilité du réseau électrique ", MEMOIRE DE MASTER,universitékasdimerbahouargla, 2023/2024.
- [41]**D. Murali, M. Rajaram, and N. Reka,** "Comparison of FACTS Devices for Power System Stability Enhancement," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 8, no. 4, pp. 30–35, Oct. 2010, doi: 10.5120/1198-1701.
- [42]**ABAIDIA Fatma zohra,** "contribution du STATCOM dans l'amélioration du comportement du réseau électrique", MEMOIRE DE MASTER, université badjimokhtar, annaba, juin 2018.
- [43]**Y.Boukhedir et B.Adjel,** ‘‘Etude de la stabilité THT transitoire d’un réseau en utilisant l’AVR et le PSS avec intégration d’une source renouvelable éolienne’’, Mémoire master, Université Badji Mokhtar d’Annaba, Algérie 2019.
- [44] **Yanfeng Gong,** “Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index UsingSynchronizedPhasorMeasurement.” PHD thesis, Mississippi State University, Mississippi, USA, December 2005.
-

- [45] : Dr. Labiod.Chouaib, " Modélisation et simulation des systèmes électromécaniques", Cours Master Electromécanique, Université d'El Oued Faculté de Technologie Département mécanique, Février 2022.
- [46]**B.Boussahoua**,"Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique par les méthodes énergétiques", Thèse de Magister,ENP,Algérie, 2004
- [47]**JavadMorsali, HosseinMorsali**, "Novel Coordination of Dual-channel PSS, AVR and TCSC Damping Controller to Enhance Power System OverallStability", 20th IranianConference on Electrical Engineering, (ICEE2012), May 15-17, Tehran, Iran.
- [48]- **M.Tajayouti**, "Systèmes Photovoltaïques raccordés au réseau électrique"
Université Mohammed V –Rabat. Ecole Supérieure de Technologie de Salé, 2015.
- [49] **BOUCHENNE, AMMARI**, " Effet de taux d'intégrations des sources renouvelables sur l'optimisation d'un réseau électrique", MASTER ACADEMIQUE, univ Ouargla,2023
- [50] **NAWA Hacenna**, "Intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique "
MASTER Académique, Université 8 Mai 1945 – Guelma,02/07/2019
- [51] **EL AIMANI Salma**, "Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse doctorat, école centrale de Lille 2014
- [52] **NOUREDINE Hadjsaïd**, "Les réseaux électriques de distribution de la production décentralisée aux Smart Grids", Edition: Lavoisier, 2010.
- [53] **Kundur P.**" Power System Stability and Control. McGraw-Hill",1994.
- [54]**F.Z.Zerhouni**, « Adaptation Optimale D'une Charge À Un Générateur Photovoltaïque », Mémoire De Magister, Institut D'électronique, Usto, 1996.
- [55]**Sofiane Fellouah, Siham Mesbahi** "étude d'un système photovoltaïque connecte au réseau" master académique, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 15/07/ 2015.
- [56]**J. M.Martin-Amouroux**, « Perspectives Energétiques Mondiales », Techniques De L'ingénieur, Be 8 515 -2004.
- [57]**C. Zidani, F. Benyarou Et B. Benyoucef**, « Simulations De La Position Apparente Du Soleil Et Estimation Des Energies Solaires Incidents Sur Un Capteur Plan Photovoltaïque Pour La Ville De Tlemcen (Algérie) », Revue Energies Renouvelables, Vol.6, Pp.69-76, 2003.
-

[58] Segal R, Sharma A, Kothari ML, (2004), «A self-tuning power system stabilizer based on artificial neural network», *Elect Power Energy Syst* 26(6): 423–30.

[59]. A. El Khadimi, « Modélisation De L'irradiation Solaire Globale D'un Plan Horizontal Et De La Vitesse Du Vent En Vue De Leur Utilisation Dans Le Dimensionnement D'un Système Hybride », Thèse De Doctorat De 3ème Cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté Des Sciences Semlalia, Marrakech, 1998

[60]B. Brousse, « Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique », Thèse Doctorat, Université De Limoges, 2004.

[61]A. Ould Mohamed Yahia Et Al « Etude Et Modalisation D'un Générateur Photovoltaïque », *Revue Des Energie Renouvelables* Vol.11 N° 3 2008 Pp 473-483, 2008.

[62] BENCHERIF MOHAMMED, « *Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension* », DOCTEUR EN PHYSIQUE, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID TLEMCEN.

[63] Ramírez-Arredondo JM. (2000), «The closed loop characteristic polynomial as a means to obtain robust performance of conventional PSS», *Electr Power Energy Syst* 22: 259-68. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(99\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(99)00056-3).

[64]Dawood Amoozegar, « DSTATCOM modelling for voltage stability with fuzzy logic PI current controller», *Electr Power Energy Syst*; 76 129–135, 2016.

[65] Freddy Milla, Manuel A, Duarte-Mermoud, “Predictive optimized adaptive PSS in a single machine infinite bus”, *ISA Transactions*, 63, 315–327, 2016.

ملخص

في هذه المذكرة قمنا بدراسة تأثير دمج مصادر الطاقة المتجددة خاصة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، على استقرار الشبكات الكهربائية.

تم أولاً إجراء دراسة نظرية حول الطاقات المتجددة واستقرار الشبكات، تليها مرحلة نمذجة لتمثيل سلوك النظام في وجود هذه المصادر.

أما الجزء التطبيقي فيتضمن عدة محاكاة تهدف إلى تقييم التأثير العام لهذه المصادر على استقرار الشبكة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، استقرار الشبكات الكهربائية، الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، المحاكاة، النمذجة.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'impact de l'intégration des sources d'énergie renouvelable, notamment solaire (PV) et éolienne, sur la stabilité des réseaux électriques.

une étude théorique a d'abord abordé les énergies renouvelables et la stabilité des réseaux, suivie d'une modélisation du comportement du système avec ces sources.

Enfin, la partie pratique comprend plusieurs simulations, visant à évaluer l'effet global des sources sur la stabilité du réseau.

Mots clés : Énergies renouvelables, Stabilité des réseaux électriques, Solaire photovoltaïque (PV), Éolien, Modélisation, Simulation.

Abstract

In this work, we studied the impact of integrating renewable energy sources, particularly solar (PV) and wind, on the stability of electrical power systems.

A theoretical study was first conducted on renewable energy and grid stability, followed by a modeling phase to represent the system behavior in the presence of these sources.

The practical part includes several simulations to assess the overall effect of these sources on grid stability.

Keywords: Renewable energy, Power system stability, Solar photovoltaic (PV), Wind energy, Modeling,