

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف

UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF

UFAS (ALGERIE)

Mémoire de Magister

Présenté au département d'Electrotechnique

Faculté de Technologie

Pour obtenir le diplôme

De Magister En Electrotechnique

Option :

Réseaux électriques

Par :

M^{me}. CHELLIG SAMIA

Thème

***Impact des Fermes Eoliennes sur la Stabilité De Tension
dans les Réseaux Electriques***

Soutenu le 26 juin 2012 devant la commission d'examen composée de :

M. HACHEMI Mabrouk	Professeur à l'université de Sétif	<i>Président</i>
M.GHERBI Ahmed	Professeur à l'université de Sétif	<i>Encadreur</i>
M. BAYADI Abdelhafid	Professeur à l'université de Sétif	<i>Examinateur</i>
M.RADJEAI Hammoud	Maître de Conférences à l'université de Sétif	<i>Examinateur</i>

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A ma mère, mes sœurs et mes frères, qui depuis de si longues années, m'ont encouragé et soutenu dans la poursuite de mes études.

Je tiens aussi à exprimer mes dédicaces à tous ceux qui ont eu la gentillesse d'assister à la soutenance de cette thèse.

Mon dernier dédicace, mais non des moindres, s'adresse à **mon marie SID ALI** pour m'avoir donné le plus beau des fils **A. Koussai**, pour sa patience et l'amour qu'il a su m'apporter tout au long de cette thèse.

Sétif, le 13/10/2011

S. CHELLIG.

Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu Dr. Ahmed GHERBI, Directeur de ce mémoire. Pour m'avoir proposé ce sujet de magister et de m'avoir aidé par ses idées et ses conseils durant toute les étapes de réalisation de ce travail

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

- Dr. HACHEMI Mabrouk
- Pr. BAYADI Abdelhafid
- Dr. RADJEAI Hammoud

J'exprime aussi ma gratitude à mes collègues de l'université pour leur soutien et leur aide surtout les membres de l'équipe de recherche dirigé par mon encadreur pour l'esprit d'équipe qu'ils ont et qui m'a permis d'échanger des idées dans le même axe de recherche.

Je ne peux pas oublier mes enseignants pour leurs efforts durant toutes mes années d'étude dans l'université et pour leur soutien durant la réalisation de ce mémoire

Enfin je remercie toute personne de près ou de loin qui a participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Sétif, le 13/10/2011

S. CHELLIG.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
<i>Chapitre 01</i>	<i>3</i>
GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES	3
1.1. Introduction	3
1.2. Les différents types de l'énergie renouvelable	3
1.3. Evolution de la consommation et la production d'électricité	4
1.4. Etat De L'art Sur L'énergie Eolienne	9
1.5. Production optimale d'énergie	18
1.6. Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	19
1.7. Conclusion	19
<i>Chapitre 02</i>	<i>20</i>
CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE : MODE DE FONCTIONNEMENT ET MODELISATION	20
2.1. Introduction	20
2.2. Technologies des éoliennes	20
2.3. Conversion électromécanique d'énergie éolienne	23
2.4. Principe et modélisation	39
2.5. Modélisation d'une turbine éolienne	39
2.6. Modèle du multiplicateur	41
2.7. Equation dynamique de l'arbre	42
2.8. Conclusion	51
<i>Chapitre 03</i>	<i>52</i>
IMPACT DES FERMES EOLIENNES SUR LA STABILITE DE TENSION DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES	52
3.1. Introduction	52
3.2. Stabilité des réseaux électriques	52
3.3. Différentes classifications de la stabilité	53
3.4. Qualité de production	55
3.5. Etude de la stabilité de tension dans un réseau électrique	56

3.6. Classification la stabilité de tension	63
3.7. Conclusion	64
<i>Chapitre 04</i>	<i>65</i>
ETUDE DE LA STABILITE DE TENSION: FERMES EOLIENNES A VITESSE FIXE	65
4.1. Introduction	65
4.2. PSAT comme outil de simulation	65
4.3. Application sur quelques réseaux tests avec et sans intégration d'éoliennes	67
4.4. Conclusion	81
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	2

Liste des figures

Figure 1.1. Energie totale consommé dans le monde	5
Figure 1.2. Energie totale consommé aux états unis	5
Figure 1.3. Parts des ressources européennes pour la production d'électricité d'origine Renouvelable en 2000	6
Figure 1.4. Energie consommé en France.....	6
Figure 1.5. Evolution de la production nationale 2006-2015.....	7
Figure 1.6. Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.....	9
Figure 1.7. Conversion de l'énergie cinétique du vent	10
Figure 1.8. Composants d'une éolienne.....	10
Figure 1.9. Les éoliennes à axe horizontal : tripale_bipale	11
Figure 1.10. Les éoliennes à axe vertical.....	12
Figure 1.11. Les fermes éoliennes.....	13
Figure 1.12. Les éoliennes en pleine mer (offshore).....	13
Figure 1.13. Tube de courant autour d'une éolienne [11].....	14
Figure 1.14. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	15
Figure 1.15. Caractéristique : puissance – vitesse d'une éolienne de grande puissance	15
Figure 1.16. Génération à puissance électrique variable (Pales fixes, décrochage aérodynamique).....	16
Figure 1.17. Génération à puissance électrique constante (Pales orientables).....	17
Figure 1.18. Proportions des coûts d'investissement en zone terrestre [7].....	17
Figure 1.19. Proportions des coûts d'investissement en offshore [7].....	18
Figure 2.1. Rendement des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.....	21
Figure 2.2. Energie annuelle produite en fonction de la vitesse du vent :.....	22
Figure 2.3. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse du vent.....	23
Figure 2.4. Structure d'une éolienne avec multiplicateur	24
Figure 2.5. Schéma de principe des éoliennes à étage continu Connectées an réseau	25
Figure 2.6. Machine synchrone connectée au réseau par un redresseur et un onduleur [20]	26
Figure 2.7. Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs [20].....	26
Figure 2.8. Machine à champ radial classique (a) et machine discoïde à champ axial (b) [21].....	27
Figure 2.9. Schéma de principe d'un onduleur de tension pour connexion an réseau [19].....	28
Figure 2.10. Prototype de MRV non excitée [22]	28
Figure 2.11. MRV excitée par des courants triphasés au stator [23].....	29
Figure 2.12. machine asynchrone a cage reliée directement au réseau sans convertisseur [20].....	31
Figure 2.13. machine asynchrone à cage à double stator reliée au réseau sans convertisseur [29].....	32
Figure 2.14. La machine Asynchrone connectée au réseau par deux convertisseurs.....	32

Figure 2.15. La machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs : Redresseurs + onduleur [20].....	33
Figure 2.16. La machine Asynchrone a cage connectée au réseau par deux Onduleurs.....	33
Figure 2.17. Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"	34
Figure 2.18. Machine asynchrone BRUSHLESS connectée sur le réseau [30].....	34
Figure 2.19. Machine asynchrone a rotor bobiné [31]	35
Figure 2.20. MADA avec un contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique [32]	35
Figure 2.21. DFIG avec la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [33].....	37
Figure 2.22. DFIG avec la structure de Scherbius avec deux onduleurs [34]	37
Figure 2.23. Schéma de la turbine éolienne.....	40
Figure 2.24. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	43
Figure 2.25. Mode de fonctionnement de la MADA.	45
Figure 2.26. Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA.....	46
Figure 2.27. Modèle de la chaîne de conversion éolienne utilisant les modèles.....	48
Figure 2.28. Représentation de la machine asynchrone triphasée.....	49
Figure 3.1. Priorités de délestage	56
Figure 3.2. L'ilotage.....	56
Figure 3.3. Tension de la charge en fonction des puissances active et réactive consommées.....	58
Figure 3.4. évolution de la tension en fonction de la puissance consommé avec $FP=C_{ste}$	59
Figure 3.5. Exemple générateur – Charge.....	60
Figure 4.1.Fenêtre de PSAT	66
Figure 4.2. L'éditeur de PSAT (a) et bibliothèque de simulink (b).....	66
Figure 4.3. Réseau test de 9 jeux de barres.....	67
Figure 4.4. Simulation d'un réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres	68
Figure 4.5. Simulation d'un réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres	69
Figure 4.6. Intégration de la ferme éolienne au réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres.....	70
Figure 4.7. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs 11 jeux de barres.....	71
Figure 4.8. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs 11 jeux de barres.....	71
Figure 4.9. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres	72
Figure 4.10. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres avec AVR.....	73
Figure 4.11. Réseau de 5 générateurs 14 jeux de barres.....	74
Figure 4.12. Simulation de la ferme éolienne dans un réseau de 14 jeux de barres.....	79
Figure 4.13. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 5 générateurs 16 jeux de barres.....	80
Figure 4.14. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 5 générateurs 16 jeux de barres.....	80

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Répartition les différents types d'énergies par année.....	8
Tableau 4.1. La tension aux niveaux des jeux de barres lors de la déconnexion de ligne 7-5.....	69
Tableau 4.2. La tension aux niveaux des jeux de barres lors de la déconnexion de ligne 2-4.....	75
Tableau 4.3. Intégration de la ferme éolienne au réseau de 5 générateurs 14 jeux de barres.....	78

Listes des Symboles et Acronymes

Symboles

ρ	La densité volumique de l'air. (kg / m^3)
V_i	La tension au jeu de barre i. (<i>Volt</i>)
m	La masse de l'air. (kg)
v	La vitesse du vent. (m / s)
λ	Ratio de vitesse (sans unité)
G	Le gain du multiplicateur
Ω_{mec}	La vitesse mécanique de la génératrice (rad/s)
J_g	L'inertie de la génératrice ($kg.m^2$)
C_g	Le couple entraînant la génératrice
C_{vis}	Le couple des frottements visqueux (N.m)
f	Coefficient de frottement visqueux (sans unité)

Acronymes

MAS	Machine Asynchrone
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MRV	Machine à Réductance Variable
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
GTO	Gate Turn Off thyristor (le thyristor commandé à l'ouverture)
PSAT	Power System Analysis Toolbox

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie que sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies. Les crises pétrolières à relancé de nouveau la recherche et les réalisations des énergies renouvelables dans le monde. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne qui apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux autres énergies. [1]

La principale caractéristique du vent réside dans sa variabilité. Il est donc important d'évaluer l'impact d'intégration des fermes éoliennes dans les réseaux électriques et en particulier, sur sa stabilité de tension qui est l'un des problèmes les plus importants lors de l'étude d'un réseau d'énergie électrique complexe. Ceci est dû au développement important des réseaux ces dernières années, mais aussi à l'objectif de ce type d'étude qui est d'examiner le comportement du réseau face à des faibles ou importantes perturbations.

Le but de ce mémoire est de modéliser les différentes technologies de la production éolienne, en vue de l'étude du comportement des réseaux électriques en régime permanent, puis en régime transitoires lors d'apparition d'une petite ou grande perturbation. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'analyse de l'impact des fermes éoliennes sur les systèmes électro- énergétiques, et sur sa stabilité de tension lors d'un régime permanent et un régime transitoire. Toutes les simulations ont été effectuées sous environnement Matlab en utilisant le PSAT (Power System Analysis Toolbox). Pour ce fait, ce mémoire s'étale sur quatre chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre présente les différents types d'énergies renouvelables et quelques statistiques montrant l'évolution de la production et la consommation d'électricité, particulièrement en Algérie. Ces statistiques sont suivies par des rappels sur les systèmes éoliens et les équations qui s'y rapportent ; et les concepts physiques régissant leurs fonctionnements. Puis on terminera avec ces avantages et ces inconvénients.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur les principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir la vitesse (éolienne à vitesse fixe ou variable) tenant compte les machines

électriques et leurs convertisseurs associés. Après cet état de l'art, on s'intéresse essentiellement à la modélisation globale de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne grâce à l'utilisation des machines asynchrones de type MADA et les machines à cage d'écureuil.

Le troisième chapitre porte une étude globale sur la stabilité de tension dans les réseaux électriques : en un premier temps; présente les problèmes de la stabilité tenant compte de ses différentes classifications et ces principaux facteurs qui contribuent au problème. Ensuite, on s'intéressera essentiellement à l'étude de la stabilité de tension dans un réseau électrique avec ces différentes définitions et ces analyses.

Le quatrième chapitre présente des comparaisons entre des réseaux de test sans et avec l'intégration des fermes éoliennes fonctionnant à vitesse fixe. Des petites perturbations et des grandes perturbations ont été considérées pour étudier l'impact des éoliennes sur la stabilité de tension dans des systèmes électriques à partir de l'analyse des résultats obtenus.

Les résultats obtenus dans ces investigations, nous permettrons de conclure sur les méthodes et outils utilisés, et envisager les perspectives à ce travail.

Pour une bonne compréhension du contenu du présent mémoire, quelques annexes sont insérées à la fin. Ces annexes regroupent les paramètres d'une chaîne de conversion éolienne basée sur la machine asynchrone à cage, ainsi que les données numériques des réseaux électriques tests.

Chapitre 01

GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

1.1. Introduction

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive, Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer. C'est pour cela et pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir : Soit diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques ou bien trouver et développer des nouvelles sources d'énergie ; en particulier, l'énergie éolienne. L'étude de cette énergie sera notre objectif.

Ce chapitre permet de présenter les différents types d'énergies renouvelables et quelques statistiques montrant l'évolution de la production et la consommation d'électricité, particulièrement en Algérie. Ces statistiques sont suivies par des rappels sur les systèmes éoliens et les équations qui s'y rapportent ; et les concepts physiques régissant leurs fonctionnements.

1.2. Différents types d'énergie renouvelable

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...): [8]

1.2.1. Thermo solaire

Le principe consiste à transformer de l'énergie des photons solaires pour chauffer les capteurs thermiques. Ce type d'énergie à l'avantage d'être écologique, peu cher et longue durée de vie des capteurs utilisés. Par contre, leurs majeurs inconvénients, résident dans l'impossibilité de transporter l'énergie à grande distance.

1.2.2. Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre (bois, biocarburant et biogaz). C'est la ressource la plus utilisée au monde.

1.2.3. Géothermie

Elle consiste à extraire de l'énergie contenue dans le sol, dont la température varie de 3°C par 100m jusqu'à 180°C, suivant le gisement à exploiter. La géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps.

1.2.4. Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil, à partir des panneaux composés des cellules photovoltaïques à base de silicium.

1.2.5. Hydraulique

La masse de l'eau constitue une source d'énergie potentielle. Par le biais des barrages, les pays riches en cours d'eau bénéficient ainsi de cette énergie qui est propre et stockable.

1.2.6. Eolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres. Une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

1.3. Evolution de la consommation et la production d'électricité

1.3.1. Consommation mondiales

La consommation totale d'énergie dans le monde est actuellement de l'ordre de 8 milliards de tonnes équivalent pétrole livrés en 2006. Les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) couvrent plus de 62% des besoins en énergie primaire, le nucléaire 17% et les énergies renouvelables 21%. [1] (Figure 1.1)

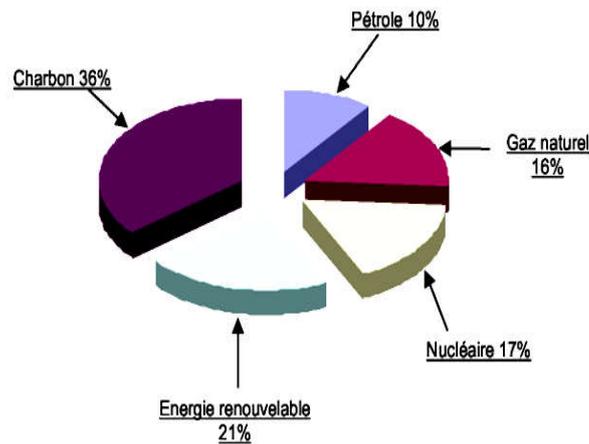


Figure 1.1. Énergie totale consommée dans le monde

1.3.1.1. Consommation d'énergie aux États-Unis :

Les États-Unis consomment 25% de l'énergie mondiale pour une population de 5% de celle du monde, le Japon consomme 5% avec une population qui représente 2% de celle de monde. (Figure 1.2)

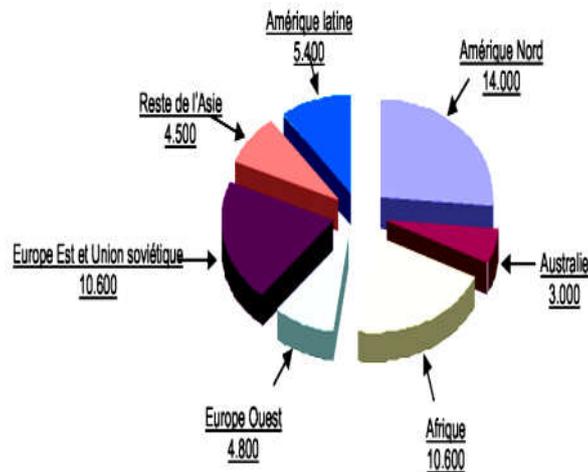


Figure 1.2. Énergie totale consommée aux États-Unis

1.3.1.2. Ressources en Europe :

Objectif en Europe en 2010:

- Atteindre une production supérieure à 22% d'électricité d'origine renouvelable soit 655TWh (+80%)
- Dont la contribution de l'éolienne arrive à la hauteur de 80TWh. (Figure 1.3)

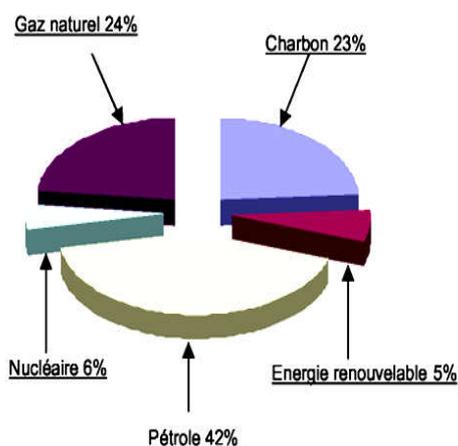


Figure 1.3.Parts des ressources européennes pour la production d'électricité d'origine Renouvelable en 2000

1.3.1.3. Ressources en France

En France; malgré les régimes durent favorables des bords de mer, et la compensation météorologique possible entre l'Atlantique et Méditerranée, la durée moyenne de fonctionnement des éoliennes à leur puissance nominale ne dépasse pas 2000 heures par an. (Figure 1.4)

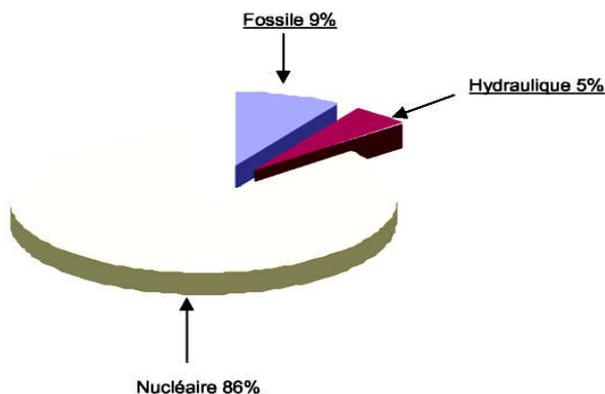


Figure 1.4.Energie consommé en France

1.3.2. Consommation d'énergies renouvelables en Algérie

Avec une production effective de 33.6TWh et plus de 245.00 Kms de réseaux de distribution le taux de couverture des besoins du pays en électricité est de 95%. Plus de 5.6millions de clients sont abonnés au réseau de la société par action SONELGAZ son parc de production totalise une puissance installé de plus de 7000MW dont 259MW pour la filière hydraulique et 306 MW pour les réseaux isolé du sud.[1](Figure 1.5)

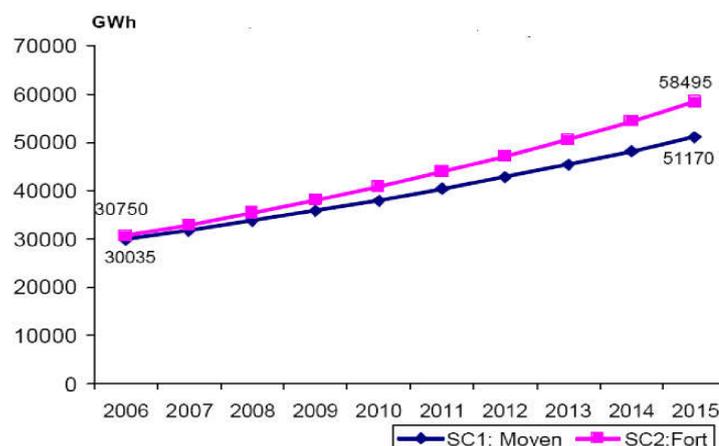


Figure 1.5. Evolution de la production nationale 2006-2015

Selon CREG (la Communion de Régulation d'Electricité et du Gaz) l'introduction des énergies renouvelables en Algérie peut se faire selon les approches suivantes: [3]

- Complément à l'électrification rurale pour alimentation en électricité de sites isolés.
- Hybridation de centrales diesels existantes ou nouvelles par des systèmes photovoltaïque ou par des éoliennes, selon le site et la puissance.
- Approche dictée par des considérations de politique énergétique de veille technologique ou de conformité à des engagements environnementaux .cette approche concerne notamment les filières thermiques éoliennes et cogénération.
- La valorisation à exploitation de l'électricité produite à partir de ces filières n'est pas prévue dans cette approche.

La répartition par année et selon les types d'énergie (renouvelable et cogénération) est année dans le tableau suivant:

<i>Année</i>		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>Solaire</i>	MW	0	0	30	30	100	100	100	100	170	170
	GWh	0	0	60	60	200	200	200	200	340	340
	%bilan	0	0	0.149	0.140	0.442	0.413	0.384	0.369	0.572	0.532
<i>Eolienne</i>	MW	0	0	20	40	40	60	80	80	0	100
	GWh	0	0	40	80	80	120	160	160	160	200
	%bilan	0	0	0.099	0.187	0.176	0.247	0.307	0.259	0.268	0.312
<i>Cogénération</i>	MW	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
	GWh	0	350	700	1050	1400	1750	2100	2450	2800	3150
	%bilan	0	0.937	1.767	2.508	3.178	3.732	4.183	4.174	4.911	5.156
<i>Photovoltaïque</i>	MW	0.3	1.1	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.1	4.6	5.1
	GWh	0.6	2.2	3.2	4.2	5.2	6.2	7.2	8.2	9.2	10.2
	%bilan	0.002	0.006	0.008	0.010	0.011	0.013	0.014	0.015	0.015	0.016
<i>Total en énergie Renouvelable</i>	MW	0.3	51.1	151.6	222.1	342.6	413.1	483.6	534.1	654.6	725.1
	GWh	0.6	3522	803.2	1194.2	1685.2	2076.2	2467.2	2818.2	3309.2	3700.2
	%bilan	0.002	0.943	2.023	2.844	3.808	4.404	4.888	5.392	5.766	6.016

Tableau 1.1. Répartition les différents types d'énergies par année

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année. La distribution de l'électricité connaît depuis quelque années de fortes perturbations du fait d'une augmentation croissante de la demande intérieure. L'Algérie devra produire d'ici à 2010, 7% de son électricité grâce notamment à l'énergie solaire et éolienne soit au moins 450MW. Le pays vise à exploiter les potentialités exceptionnelles d'ensoleillement pour utiliser, mettre au point et développer les applications de l'énergie solaire à l'électrification des sites isolés (zones désertiques du sud ; notamment les 04 wilayas du sud: Adrar ; Illizi ; Tamanrasset ; Tindouf) et régions montagneuses.

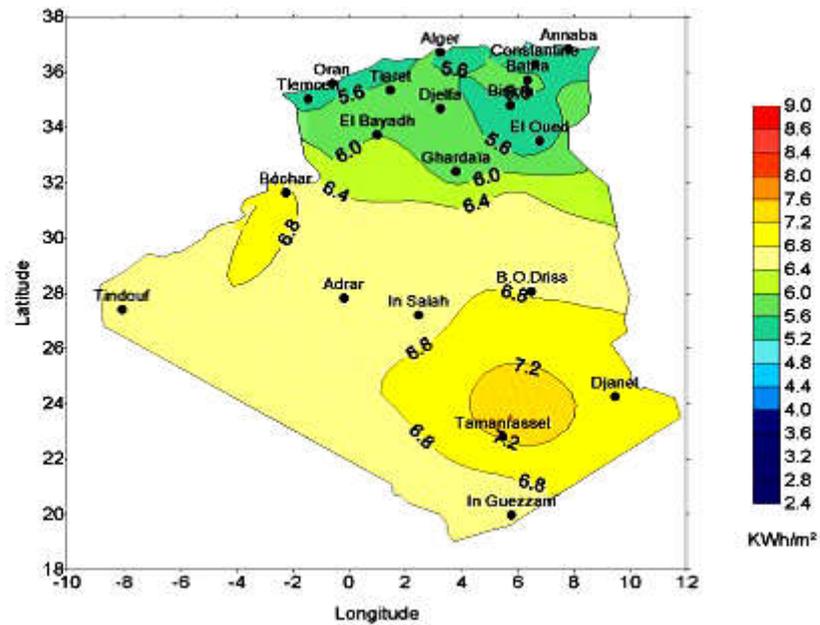


Figure 1.6. Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu

Des fermes éoliennes sont en projet à Tindouf; Timimoun ; Adrar ; pour 100MW au total .La filière hydraulique produit 1.77% de la puissance installée ; elle est constitué de 34 groupes dont la puissance unitaire varie de 1à5MW pour les basses chutes et de 12 à50MW pour les hautes chutes. L'Algérie a entrepris en matières de promotion du développement des énergies renouvelables, en programme qui contribuera à une progression de 6% d'ici 2015 à la satisfaction des besoins nationaux en énergie contre actuellement (année 2007) un taux de 0.02% au moment ou les potentialités de l'Algérie permettent de courir 60fois la consommation des pays d'Europe.

1.4. Etat De L'art Sur L'énergie Eolienne

1.4.1. Définition

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée ; la production d'électricité par cette énergie s'est considérablement développée dans le monde entier ; ceci est principalement due à deux raisons [4] :

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

L'éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une

génératrice (Figure 1.7). Les installations de ces derniers peuvent être réalisées sur terre ; comme on peut placées en Mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. [10]

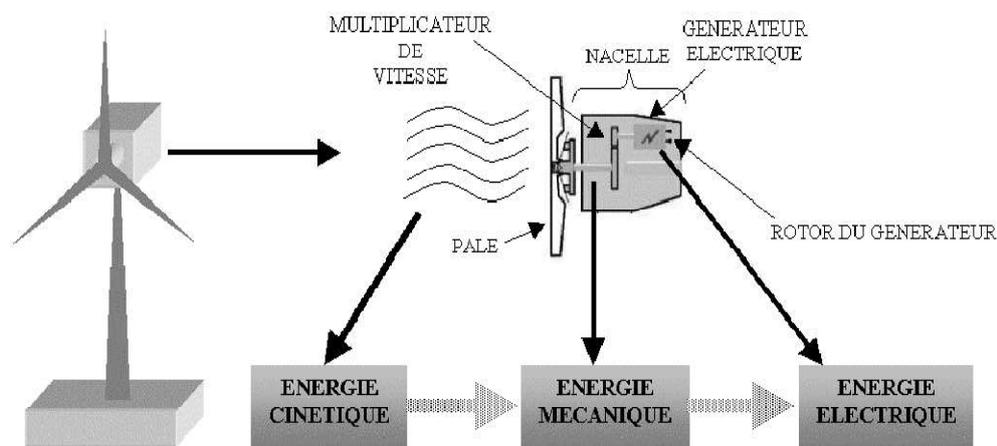


Figure 1.7. Conversion de l'énergie cinétique du vent

1.4.2. Composants fondamentaux d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

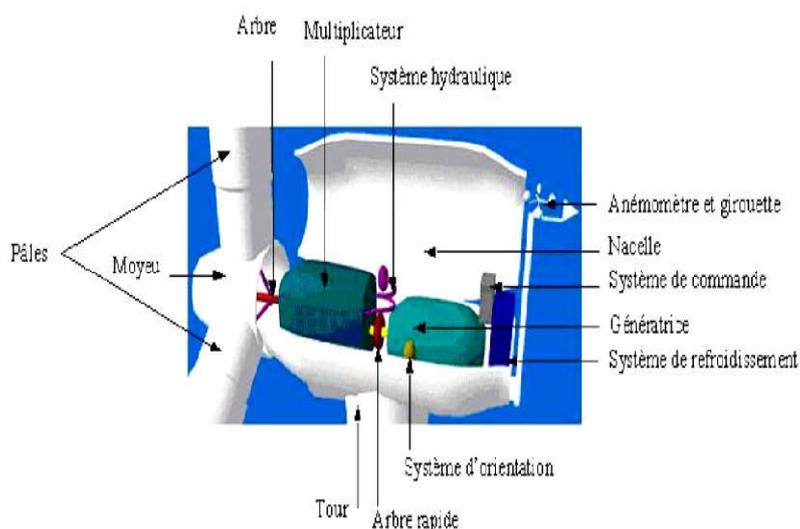


Figure 1.8. Composants d'une éolienne

– **Un mat** : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique; permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol.

– **Une nacelle** : montée au sommet du mat, regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, un générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent), un système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

– **Un rotor** : compose de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent. Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu. Il existe deux types de rotors :

- **Les rotors à vitesse fixe** sont souvent munis d'un système d'orientation de pale ; ils sont aussi connectés directement au réseau.
- **Les rotors à vitesse variable** sont souvent moins coûteux, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

1.4.3. Différents types des éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

1.4.3.1. Eoliennes à axe horizontal :

Une éolienne à axe horizontal est une hélice perpendiculaire au vent, montée sur un mat ; son rotor est généralement tripale. Ces dernières sont les plus employées aujourd'hui car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.



Figure 1.9. Les éoliennes à axe horizontal : tripale_bipale

1.4.3.2. Eolienne à axe vertical

Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours. Deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : Savonius et Darrieus (la plus répandue). Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation



Figure 1.10. Les éoliennes à axe vertical

Leur conception offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement. De par son axe vertical, il y a une symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor. Puis leur faible rendement et des fluctuations importantes de puissance provoquées.

1.4.4. Parc éolien important

Aussi appelés fermes éoliennes, Ces parcs peuvent se situer sur terre comme en mer ; on peut rencontrer différentes structures d'éoliennes, de génératrices et de modes de connexion au réseau. Principalement, on peut observer les structures suivantes : [19] ; [35]

- Les éoliennes raccordées, une à une, directement au réseau de distribution ou de transport.
- Les éoliennes connectées ensemble par un bus continu, alimentant un onduleur assurant la connexion avec le réseau.
- Les solutions mixtes existent afin d'avoir des onduleurs de taille modérée fonctionnant proche de leurs charges nominales.



Figure 1.11. Les fermes éoliennes

1.4.5. Eoliennes en pleine mer (offshore)

Les éoliennes offshore sont les éoliennes placées en mer, leur installation est beaucoup plus coûteuse qu'à terre :



Figure 1.12. Les éoliennes en pleine mer (offshore)

Les mats de l'offshore doivent être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion doit être renforcée, l'implantation en mer nécessite des engins spécialisés, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins coûteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens.

1.5. Production optimale d'énergie

1.5.1. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 1.13 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

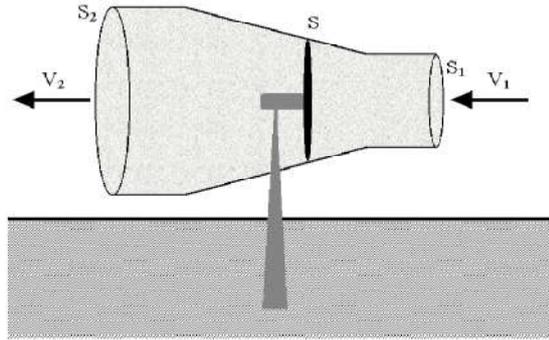


Figure 1.13. Tube de courant autour d'une éolienne [11]

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit

$\frac{V_1 + V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m , est donnée par la loi de Newton qui s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent:

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

En remplaçant m par son expression dans (1.1) :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.5)$$

La figure (1.14) représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.5). On constate que le ratio

$\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé ; aussi coefficient de puissance C_p , présente une limite égale à 0,59. Cette limite théorique

appelée **limite de Betz** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

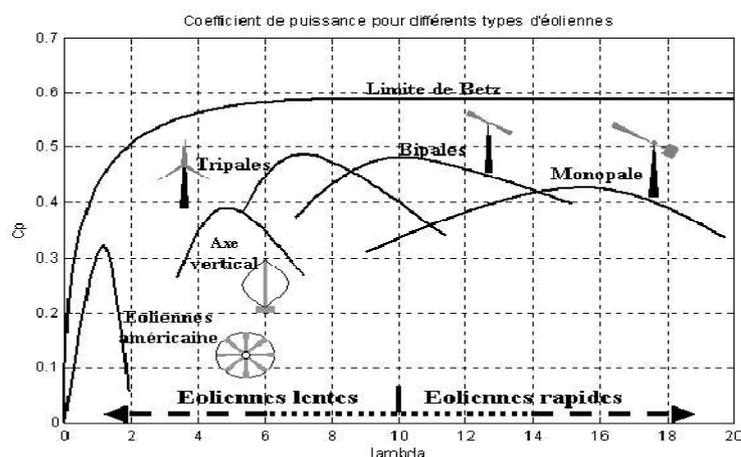


Figure 1.14. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

1.5.2. Caractéristique (puissance -vitesse) d'une éolienne de grande puissance

D'après la loi de Betz : La caractéristique de la puissance_vitesse d'une éolienne de grande puissance peut se décomposer en 04 zones principales (figure 1.15): [14]

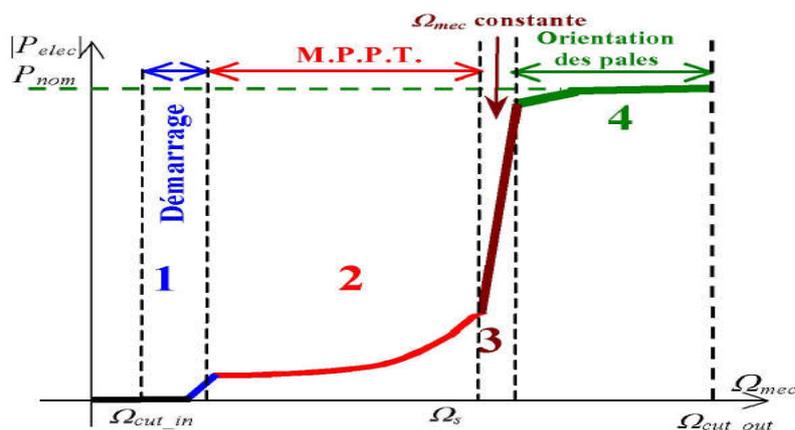


Figure 1.15. Caractéristique : puissance – vitesse d'une éolienne de grande puissance

– **Zone 01** : C'est la zone de démarrage de la machine; elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut_in}

– **Zone 02** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le

maximum de la puissance; l'angle de pale est maintenu constant a sa valeur minimal .Ce processus jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

– **Zone 03** : Au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante, dans cette zone, la puissance de la génératrice atteints des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

– **Zone 04** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} ; une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control. Au delà de la vitesse Ω_{cut_out} ; un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

En pratique ; le passage de la zone 02 à la zone 04, est un peu particulier. En, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 02 et en zone 04; c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

1.5.3. Systèmes des régulations de la vitesse de rotation de l'éolienne

1.5.3.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent (figure 1.16)

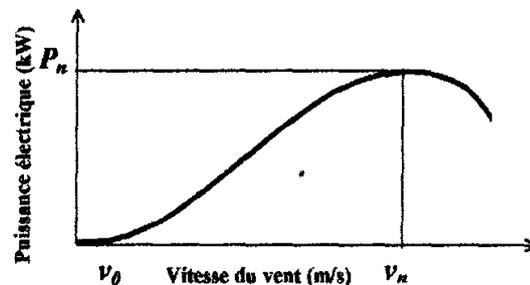


Figure 1.16. Génération à puissance électrique variable (Pales fixes, décrochage aérodynamique)

On définit

P_n : la puissance nominale de l'éolienne.

v_0 : la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.

v_n : la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") [5] permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent.

1.5.3.2. Système d'orientation des pales "pitch"

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à v_n (figure 1.17) [6].

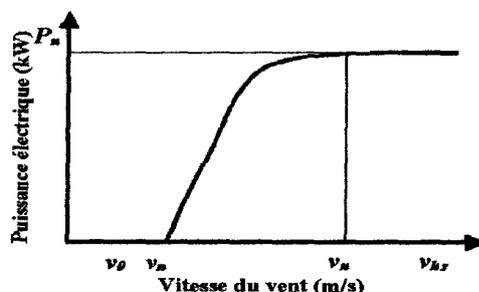


Figure 1.17. Génération à puissance électrique constante (Pales orientables)

Avec

V_f : la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.

V_{hs} : la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée

1.5.4. Coûts de l'énergie éolienne

Les facteurs suivants déterminent le coût de l'énergie éolienne :

- Le coût initial de l'éolienne et de son installation.
- Le taux d'intérêt à payer sur l'argent investi.
- La quantité d'énergie produite.

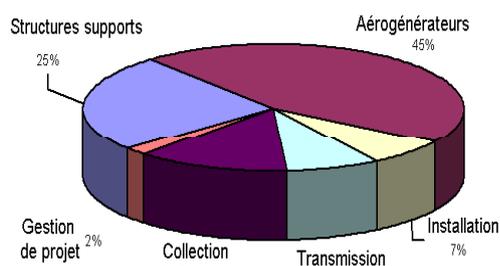


Figure 1.18. Proportions des coûts d'investissement en zone terrestre [7]

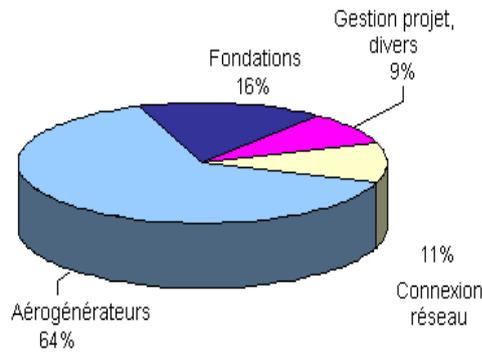


Figure 1.19. Proportions des coûts d'investissement en offshore [7]

1.6. Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

1.6.1. Avantages

C'est une source d'énergie renouvelable et inépuisable, non polluante et avec un faible impact sur l'environnement. Elle a également les avantages suivants: [8]

Création d'emploi : L'entretien d'un parc éolien crée un seul emploi, mais l'étude, la fabrication, le montage et la maintenance d'un projet éolien génère plusieurs dizaines d'emplois.

Attrait touristique : C'était au départ une conséquence qui n'avait pas été envisagée. Les touristes viennent parfois de loin pour observer et s'informer sur les éoliennes.

Taxes : Un autre avantage pour la région, les taxes professionnelles et foncières payées par les exploitants du parc éolien.

Environnement : Une éolienne ne produit aucun rejet nocif pour la santé et l'environnement, ni pour les riverains, ni pour les générations futures. Elle permet surtout de créer de l'électricité totalement propre.

- _ Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre.
- _ Elle ne nécessite aucun carburant.
- _ Elle ne crée pas de gaz à effet de serre._ Chaque mégawatt-heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- _ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes.
- _ Les propriétaires fonciers reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.

- _ La propriété des aérogénérateurs par des particuliers et la communauté permet aux gens de participer directement à la conservation de notre environnement.
- _ Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car une éolienne est constituée principalement de métal et de matière plastique.
- _ Une éolienne est en grande partie recyclable car construite en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans), elle est entièrement démontable.

1.6.2. Inconvénients

- Le principal inconvénient est le coût élevé d'un projet éolien (de l'étude à l'exploitation).
- La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision.
- Les éoliennes peuvent constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel.
- Les parcs éoliens produisent des interférences avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques. En effet, les éoliennes peuvent constituer un obstacle à la propagation de l'onde.
- Par son principe de fonctionnement même, une éolienne absorbe l'énergie du vent et le rend turbulent, créant ainsi un effet de sillage jusqu'à dix diamètres de rotor derrière elle. [8]

1.7. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre, dans une brève description des énergies renouvelables les différentes ressources de la production de l'énergie électrique avec quelques chiffres statiques du développement de cette dernière.

Après un rappel sur les notions fondamentales d'un système éolien avec les équations qui s'y rapportent. Puis on a traité les deux points suivants : Loi de Betz ; La caractéristique de la puissance-vitesse d'une éolienne ; Systèmes de régulation de la vitesse de rotation ont été aussi décrits (la production optimale de l'énergie). Finalement, on a cité ces avantages et ces inconvénients. Chapitre suivant sera consacré à la description de la conversion électromagnétique.

Chapitre 02

CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE : MODE DE FONCTIONNEMENT ET MODELISATION

2.1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande). ce chapitre consiste deux parties :

Dans un premier temps ; nous allons présenter un état de l'art sur les principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir : la vitesse (éolienne à vitesse fixe ou variable) tenant compte les machines électriques et leurs convertisseurs associés. La seconde partie, on s'intéresse essentiellement à la modélisation globale de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne grâce à l'utilisation des machines asynchrones de type MADA et les machines à cage d'écureuil.

2.2. Technologies des éoliennes

On peut classer les modèles en deux technologies suivant le mode de fonctionnement des éoliennes : celles dont la vitesse est constantes et celles dont la vitesse sont variables. [9]

2.2.1. Eoliennes à vitesse fixe

Elles sont les premiers à avoir été développé, dont il existe plusieurs systèmes sont proposé parmi lesquels :

- Les éoliennes à vitesse fixe dotées d'une génératrice asynchrones à cage.
- Les éoliennes à deux vitesses fixes dotées d'une génératrice à cage à double stator.

Les principaux avantages de fonctionnement à vitesse fixe sont cités comme suit : [12]

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

2.2.2. Eolienne à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable est une technologie qui se développe de plus en plus, pour être intégrée dans les réseaux de moyenne tension. Dont, il existe plusieurs systèmes à vitesse variable; on site :

- Les éoliennes a vitesse variable équipées d'une génératrice synchrone.
- Les éoliennes a vitesse variable équipées d'une génératrice asynchrone a double alimentation.
- Les éoliennes à vitesse variable équipées machine a réluctance variable.

Fonctionnement à vitesse variable est conçu par les avantages suivants : [12]

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité

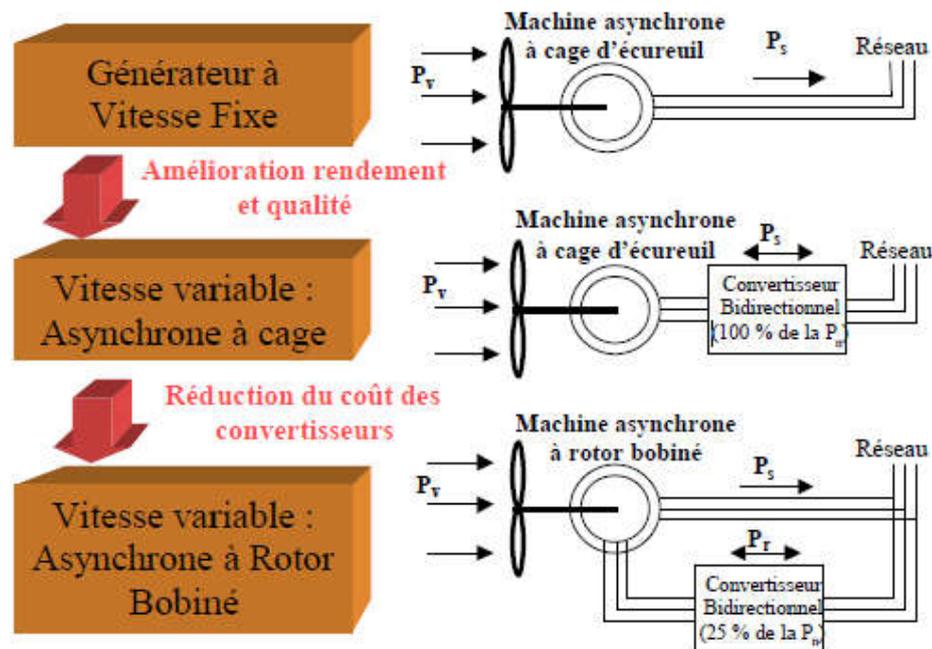


Figure 2.1. Rendement des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable

L'investissement nécessaire pour transformer le système à vitesse fixe en un système à vitesse variable est un compromis entre les frais financiers à investir et le revenu additionnel de l'extraction de l'énergie perdue avec le système à vitesse fixe.

Dans la figure (2.2) l'énergie annuelle extraite avec un système à vitesse constante (courbe 2) représente 86% de l'énergie extraite avec un système à vitesse variable, (courbe 1). [13]

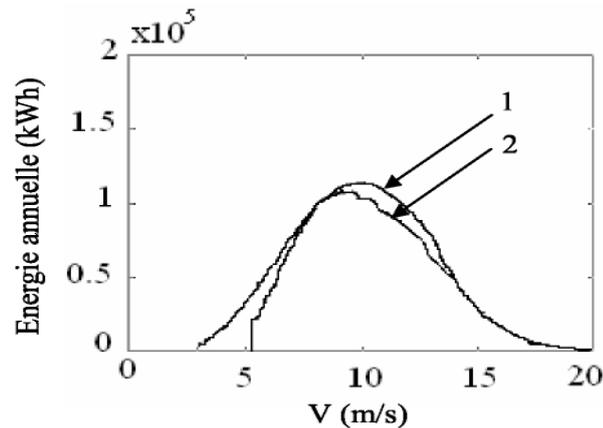


Figure 2.2. Energie annuelle produite en fonction de la vitesse du vent

(1) avec un système à vitesse variable ; (2) avec un système à vitesse fixe
(Pour un diamètre de 34m et une vitesse de vent moyenne de 8m/s).

Un autre inconvénient du système à vitesse constante, est la rigidité mécanique imposée par le multiplicateur. Le couple qui est produit par le rotor de la turbine n'est pas constant. Les fluctuations du couple ont pour conséquences des fluctuations sur la puissance transmise au rotor. Etant donné que la tension délivrée par la machine est constante, ces fluctuations apparaissent sur le courant injecté dans le réseau. Un dernier inconvénient qui s'ajoute aux précédents, est le bruit généré par la turbine en cas de vitesse fixe, Ce dernier représente un sérieux problème environnemental.

➤ *Intérêt de la vitesse variable*

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure 2.3

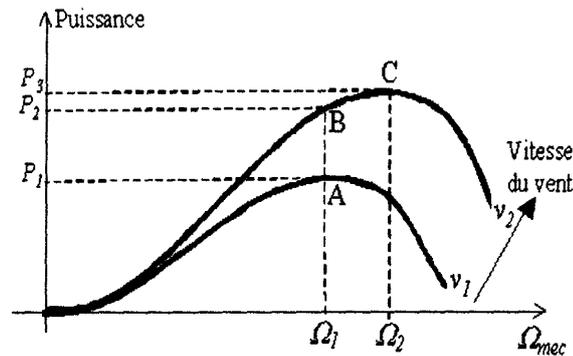


Figure 2.3. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse du vent

Pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice on obtient une puissance nominale P (point **A**). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point **B**). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point **C**). Si on désire extraire la puissance maximale, Il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse a une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

2.3. Conversion électromécanique d'énergie éolienne

2.3.1. Structure de la conversion

Pour diminuer le coût d'une installation de production électrique, le choix de type de générateur et ces composants du système de conversion énergétique est de première importance, la ou dans le marché des éoliennes, Il existe plusieurs types des machines qui peuvent être utilisées comme génératrices aux bords des éoliennes suivant le cahier de charge.

La vitesse de rotation d'une turbine de vent est assez basse et doit donc être ajustée à la fréquence électrique du réseau. Ceci peut être fait de deux technologies :

- **Une première technologie d'éoliennes** : reposent sur des machines tournantes synchrones (plutôt a rotor bobiné pour les éoliennes connectées en moyenne tension) de petite vitesse, comportant donc un grand nombre de pôle.

– **Une seconde technologie d'éolienne** : repose sur l'utilisation d'une machine asynchrone. D'une manière générale, cette dernière tourne à une vitesse beaucoup plus importante que la turbine éolienne. Il est alors nécessaire d'adapter celle-ci à la vitesse de la turbine en intercalant un multiplicateur mécanique

2.3.2. Constructions de la conversion

En fonction de la puissance d'éoliennes et de l'utilisation souhaitée pour l'énergie produite, on rencontre dans la littérature de nombreuse chaîne de conversion, elle soit l'exploitation directe de l'énergie, soit le passage par un étage continu et éventuellement un stockage [4], [15], [16]. L'on peut distinguer deux constructions différentes de la conversion selon que l'on utilise :

2.3.2.1. Conversion mécanique → Electrique : Avec multiplicateur

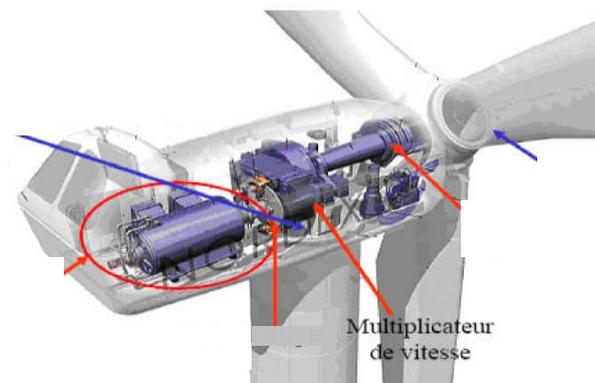


Figure 2.4. Structure d'une éolienne avec multiplicateur

➤ Chaîne de conversion à étage continu

Le passage par un étage continu permet une plus grande liberté lors de la gestion de l'énergie produite par l'éolienne car on n'a pas de fréquence imposée. C'est un moyen très approprié pour une alimentation de laboratoire ou une habitation isolée qui possède des appareils fonctionnant directement en basse tension continue; de plus, Il est facile de stocker de l'énergie dans des batteries pour obtenir une source permanente.

Par contre, Il s'agit de se connecter au réseau alternatif, il faut y associer un onduleur ainsi que des filtres et des transformateurs qui permettront de convertir la tension continue en signal alternatif sinusoïdal. [4]

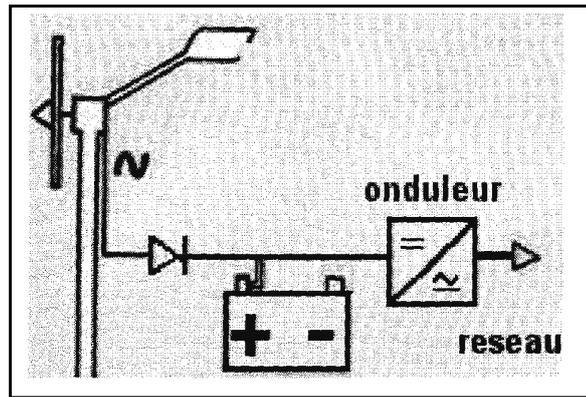


Figure 2.5. Schéma de principe des éoliennes à étage continu Connectées au réseau

➤ *Machine à Courant Continu*

Ce type de machine n'est utilisée que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieure à 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure. Elles sont également utilisées sur les bateaux, en association avec des panneaux solaires. Pour une telle machine, les équations de fonctionnement sont simples. Elle comporte un stator portant le circuit inducteur (bobinages alimentés ou aimants permanents) excitation et un rotor constituant le circuit induit connecté aux bornes de sortie, via le système balais_collecteurs. La tension est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'éolienne et à la valeur du courant d'excitation. Les éoliennes à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et un grand poids.

➤ *Machines synchrones*

C'est une machine de conception plus simple que la machine à courant continu. Son stator comporte des enroulements induits monophasés ou triphasés et son rotor porte un inducteur bobiné ou à aimants permanents. Ici il n'y a plus de système balais_collecteurs. L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée en bout d'arbre C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. [20]

De plus l'inconvénient majeur des machines synchrones à rotor bobiné est la maintenance fréquente au niveau des bagues et balais. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statiques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de

l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion [11].

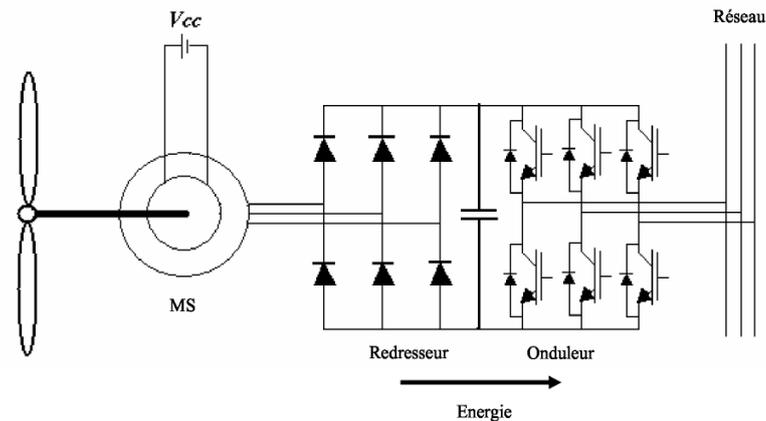


Figure 2.6. Machine synchrone connectée au réseau par un redresseur et un onduleur [20]

Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (voir la figure précédente) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [13].

On remplace souvent le bobinage d'un rotor par des **aimants permanents**. Seulement, ces derniers sont très coûteux, bien que leurs prix a tendance à s'abaisser à force de leur utilisation qui devient avec le temps plus fréquente. Cette configuration présente jusqu'à 3% des pertes et le dimensionnement des convertisseurs est fait suivant la puissance nominale de la machine. La machine synchrone peut être associée de deux onduleurs à MLI qui permettent de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance (figure 2.7)

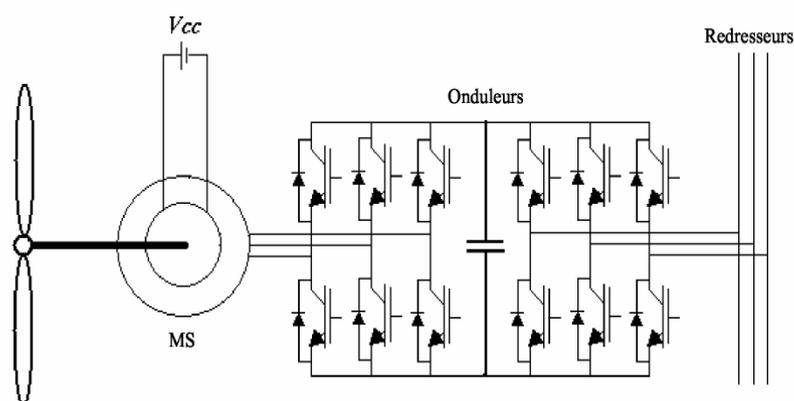


Figure 2.7. Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs [20]

Il existe plusieurs types de machines à aimants permanents qui sont destinées à l'énergie éolienne, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou

encore a rotor extérieur : **Lietner** (1.35 MW, 18 tr/mn), **Innowind** (1.2 MW, 21 tr/mn) et **Scan Wind** (3 MW, 20 tr/mn).

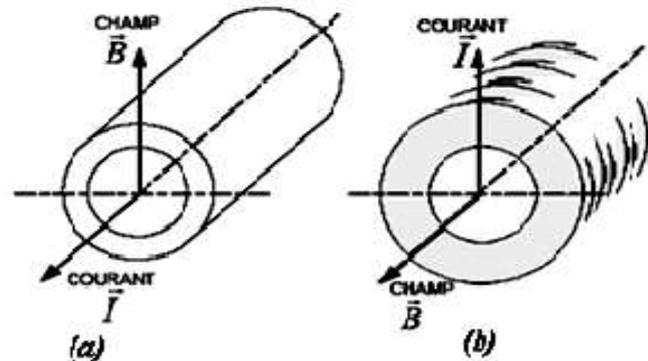


Figure 2.8. Machine à champ radial classique (a) et machine discoïde à champ axial (b) [21]

➤ *Conversion continu/alternatif*

Pour les éoliennes qui ne sont pas directement connectées au réseau, il faut un dispositif qui convertisse la tension continue en tension alternative sinusoïdale avec une pollution harmonique minimale. Pour les grands parcs éoliens, différentes stratégies [19] sont mises en place pour optimiser la conversion, On peut avoir :

- **Un onduleur par éolienne:** Ce sont des onduleurs de petite puissance, faciles à réaliser avec les composants électroniques courants. Par contre, l'onduleur est sous-exploité la plupart du temps car il doit être dimensionné pour la puissance maximale de l'éolienne.
- **Un onduleur pour tout le parc:** Cette solution permet d'optimiser la puissance de l'onduleur car on peut se baser sur la puissance moyenne de l'ensemble du parc. Cependant, l'onduleur doit supporter de très forts courants et les composants de puissance doivent alors supporter ces contraintes.
- **Un onduleur pour un groupement d'éoliennes:** C'est une solution intéressante car elle permet de construire des onduleurs de puissance raisonnable tout en les exploitant à un bon niveau de charge.

La présence d'un condensateur associé ou non avec une batterie d'accumulateurs au niveau de l'étage continu permet de stabiliser la tension et de fournir une puissance non fluctuante. La batterie se charge et se décharge en fonction de la force du vent.

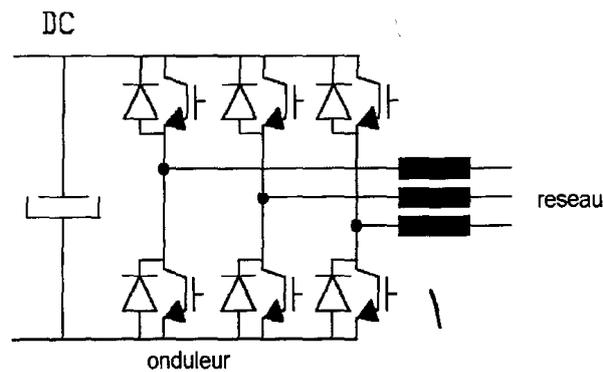


Figure 2.9. Schéma de principe d'un onduleur de tension pour connexion au réseau [19]

2.3.2.2. Connexion directe au réseau

a) Machines à réluctance variable

La MRV a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator actif où sont situés les bobinages et un rotor massif. Le rotor massif distingue la MRV des machines synchrones et asynchrones, Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ pulsé [22]. On distingue deux types de structures de MRV, les machines à réluctances non-excitées et les machines à réluctances excitées:

➤ Machines à réluctance variable non excitées

La (MRV) non excitée présentée sur la (Figure 2.10) comprend 48 dents au stator réparties sur douze plots et 64 dents au rotor. Il s'agit d'une machine triphasée à deux paires de pôles caractérisée par un pas dentaire statorique égal à celui du rotor. Sont principalement destinées à des fonctionnements à hautes vitesses, ne possèdent pas de contact glissant et sont très robustes. L'inconvénient majeur est qu'elles possèdent un facteur de puissance médiocre. [22]

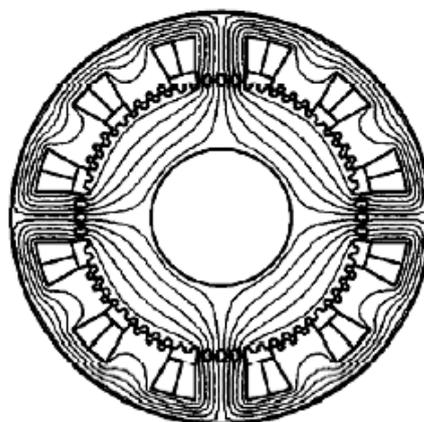


Figure 2.10. Prototype de MRV non excitée [22]

➤ Machines à réluctance variable excitées

La machine à réluctance variable excitée par des courants triphasés au stator est une structure à N_s dents au stator et N_r dents au rotor dotée de deux bobinages triphasés au stator de polarité p et p' (figure 2.11). Pallient à ce problème de facteur de puissance en intégrant une excitation constituée d'une alimentation continue et de bobines ou d'aimants permanents. [23]

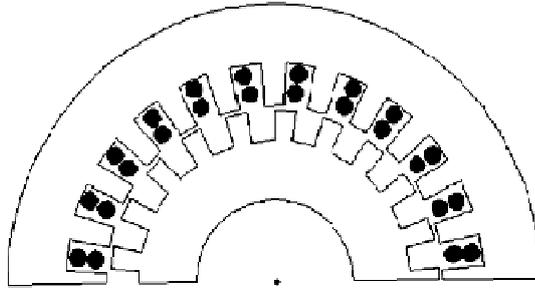


Figure 2.11. MRV excitée par des courants triphasés au stator [23]

La machine à réluctance variable est intéressante en raison de la simplicité de sa structure et de ses composants, son faible coût, sa bonne robustesse et son couple massique élevé, l'absence d'excitation au rotor qui permet de réduire les pertes. Des réalisations à grand nombre de pôles peuvent être obtenues sans difficulté et permettent la génération de puissance à faible vitesse. Les deux principaux inconvénients de cette machine sont la complexité relative de la commande et l'ondulation du couple qui provoque un bruit important.

En basse vitesse de rotation, il existe plusieurs types de MRV qui sont utilisées dans l'énergie éolienne :

- **MRV pure** : Elle est utilisée dans l'industrie pour les systèmes d'alternateur-démarrreur, dans les véhicules hybrides ou les avions mais aussi pour les systèmes de génération d'électricité dans l'aérospatial [24]

Cette machine est alimentée par des courants de forme rectangulaire de pulsation et la vitesse de rotation est limitée au nombre de dents au rotor :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r} \quad (2.1)$$

Où:

N_r : nombre de dents au rotor

Ω : vitesse de rotation mécanique

ω : pulsation des courants statiques

En revanche, elle présente un régime instable en fonctionnement générateur, et une grande complexité mécanique.

– **MRV Vernier** : Différemment à la MRV précédente, elle est alimentée par des courants sinusoïdaux, et excitée au rotor et au stator. on peut insérer des convertisseurs électroniques. La vitesse de rotation est inversement proportionnelle au nombre des dents du rotor.

– **MRV hybride** : Cette machine met en œuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet Vernier avec une alimentation sinusoïdale [25] [26].

Le grand nombre de dents rend cette structure intéressante pour les forts couples. Cette machine utilise des aimants à terre rare spéciaux afin d'éviter leur démagnétisation [27].

b) Machines Asynchrones

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ils contiennent des différentes configurations, de titre exemple:

➤ *Machines Asynchrone à cage d'écureuil*

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité).

Les machines asynchrones à cage sont connues par leur construction extrêmement simple, leur robustesse, leur sécurité de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant sur des bagues ainsi leur coût très compétitif. Elles ont aussi l'avantage d'être fabriquées en grande quantité et dans une très grande quantité d'échelle des puissances, moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé [28].

La majorité des applications en éolien (85%) sont à vitesse de la rotation constante et à connexion directe au réseau. La figure 2.12 représente la configuration la plus simple utilisant une machine asynchrone à cage. Nous remarquons l'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques, qui ont pour objectif de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie. [20]

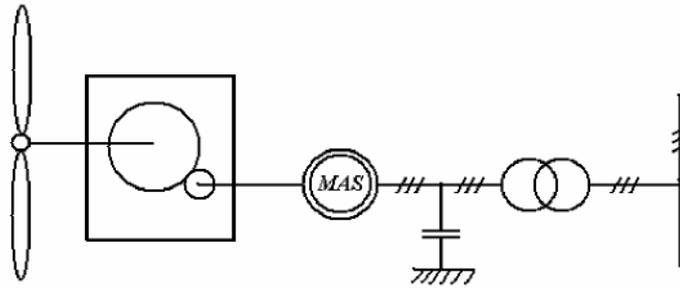


Figure 2.12. Machine asynchrone à cage reliée directement au réseau sans convertisseur [20]

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

- Il n’y a pas d’accès pour récupérer l’énergie induite dans le rotor.
- Elle ne permet pas une vitesse variable.

Le glissement est limité à 2% ce qui met la vitesse du rotor quasiment constante, montée sur une éolienne, avec un système d’orientation des pales, elle peut fonctionner en vitesse fixe. La vitesse spécifique est définie comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad (2.2)$$

Et le coefficient de puissance par :

$$C_{pr} = \frac{2P_r}{\rho \lambda R^2 V^3} \quad (2.3)$$

- Avec
- Ω : Vitesse rotorique (rd/s)
 - R : Rayon des pales
 - V : Vitesse du vent
 - ρ : Densité de l’air
 - P_r : Puissance électrique active transmise par le rotor

Cette machine est connue pour son décrochage fréquent du réseau en cas de chute de vent, En effet, puisque son glissement est très réduit, sa vitesse de rotation doit être légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme. Si elle est inférieure on est amené à déconnecter la machine du réseau sinon l’éolienne se transforme en ventilateur car elle fonctionne dans ce cas en moteur.

➤ *Les machines Asynchrone à cage à double stator*

Cette machine présente deux enroulements au stator, l’un de forte puissance à petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées, l’autre de faible puissance à grand nombre de paires de

pôles pour les vitesses les plus faibles. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Pour extraire plus d'énergie en basse vitesse de vent, plusieurs éoliennes sont dotées de machine asynchrone à double stator. Cette configuration est présentée au schéma de la figure 2.13. [29]

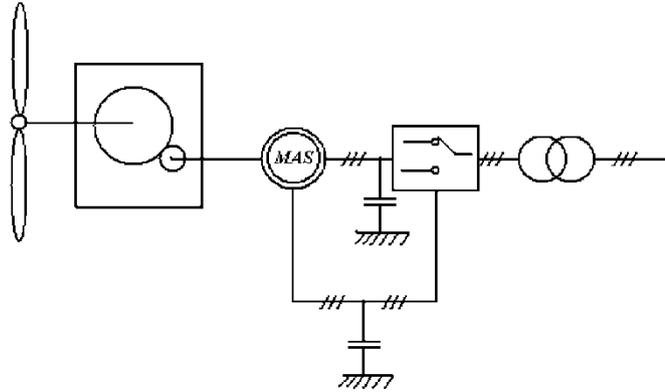


Figure 2.13. Machine asynchrone à cage à double stator reliée au réseau sans convertisseur [29]

Dans ce cas de configuration, le bruit audible est beaucoup plus faible en basse vitesse du vent par rapport à la configuration précédente. Mais les fluctuations affectant les courants injectés dans le réseau restent les mêmes. Il faut ajouter aussi que l'ajout d'un deuxième enroulement au stator rend la conception de la machine plus délicate, particulièrement l'augmentation de son poids et son encombrement, et augmente par conséquent son coût.

➤ *Machines Asynchrone à cage connectée au réseau par deux convertisseurs*

L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par la création d'un bus continu intermédiaire. Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée.

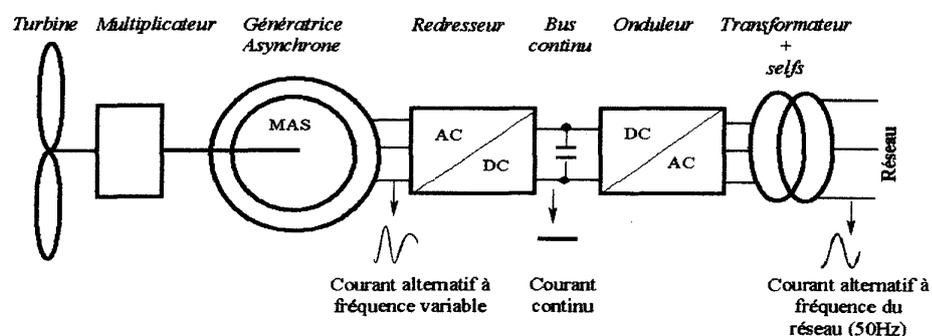


Figure 2.14. La machine Asynchrone connectée au réseau par deux convertisseurs

➤ **La machine Asynchrone à cage connectée au réseau par : Redresseur + Onduleur**

Cette configuration est présentée dans la figure suivante (2.15). Elle est composée d'une machine asynchrone à cage avec un seul stator, d'un multiplicateur, un redresseur et un onduleur inséré entre le stator de la machine et le réseau. Ceci augmente considérablement le coût et les pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine. Puisque le redresseur est unidirectionnel, pour la magnétisation de la machine, on a besoin des condensateurs en parallèle au stator.

Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent, et la commande adéquate de l'onduleur adapte la fréquence de la puissance fournie de la machine à la fréquence du réseau. [20] Avec cette configuration, la puissance nominale de la génératrice détermine la puissance maximale de l'éolienne.

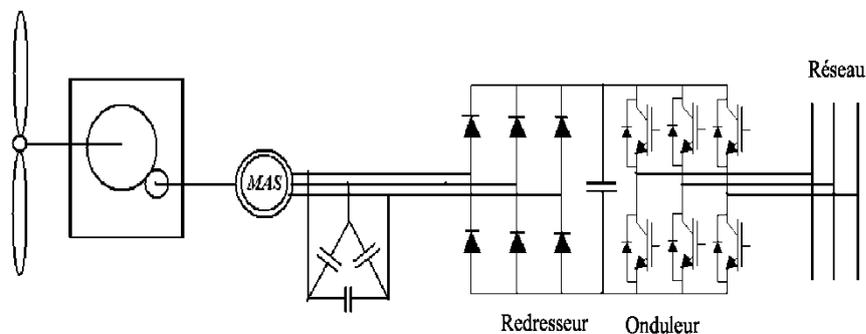


Figure 2.15. La machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs : Redresseurs + onduleur [20]

➤ **Machine Asynchrone à cage connectée au réseau par deux Onduleurs**

Toutefois, le redresseur peut être remplacé par un onduleur, ce qui permet le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (Figure 2.16) et ainsi fournir la puissance réactive à la machine asynchrone et éviter les condensateurs du montage précédent.

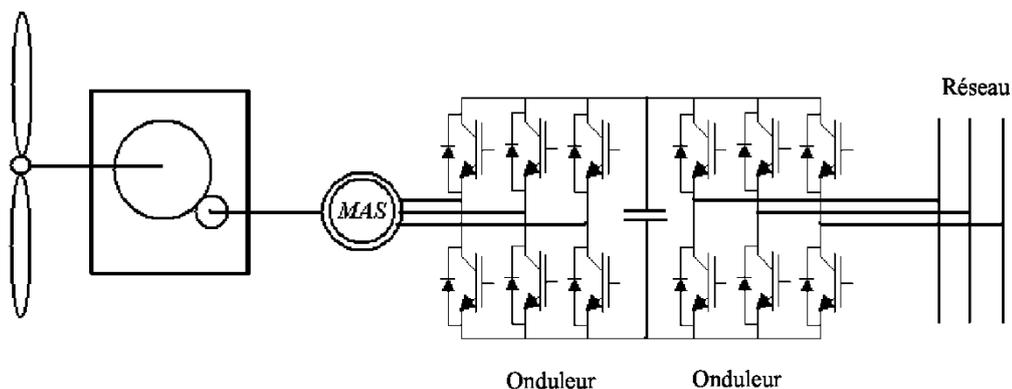


Figure 2.16. La machine Asynchrone à cage connectée au réseau par deux Onduleurs

Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des $\frac{\partial V}{\partial t}$ importants qui peuvent réduire leur durée de vie [20]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif

c) Machines Asynchrone double Alimentation

➤ Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" :

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste: Il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (Figure 1.17) [30]

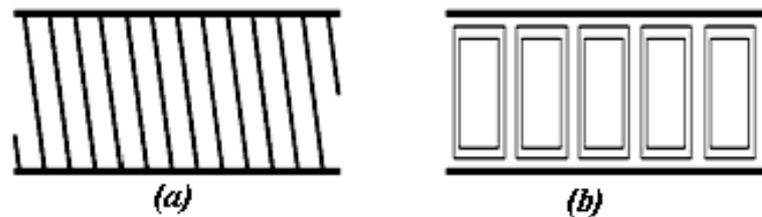


Figure 2.17. Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable. En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (figure 2.18).

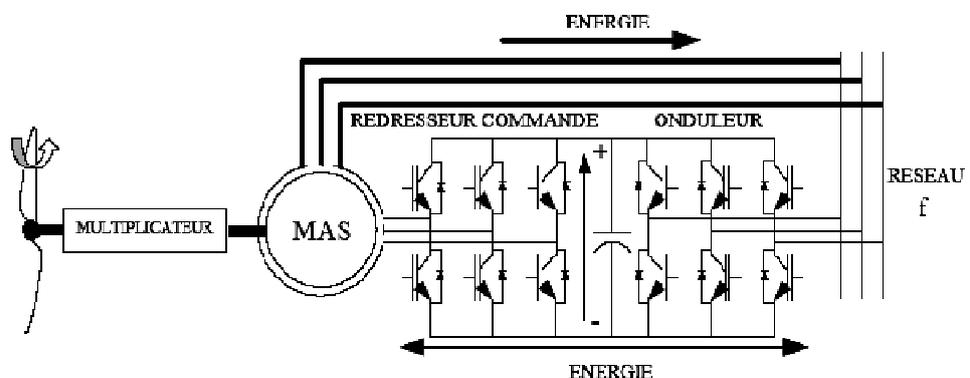


Figure 2.18. Machine asynchrone BRUSHLESS connectée sur le réseau [30]

➤ **Machine asynchrone à double alimentation type "Rotor bobiné"**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques figure 2.19 et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes [31].

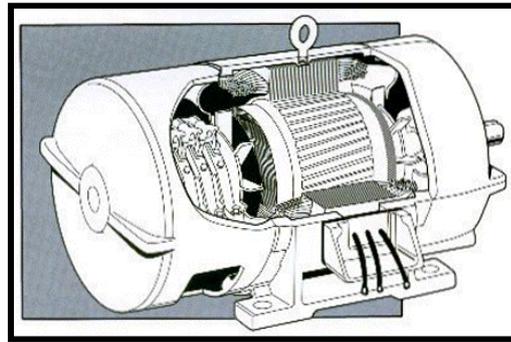


Figure 2.19. Machine asynchrone a rotor bobiné [31]

Le transfert de l'énergie au niveau du rotor varie selon les différentes configurations décrites ci-dessous. Cette énergie ne représente qu'une fraction de l'énergie totale de 20 à 30% (proportionnel au glissement), Les pertes dans les convertisseurs de puissance, dans ce cas de machine sont plus faibles que dans celles des configurations précédentes. Les convertisseurs sont aussi moins coûteux. Ceux-ci rendent cette machine plus attractive dans le domaine de l'éolien.

➤ **Configuration de la MADA avec circuit de dissipation au rotor**

Le convertisseur utilisé dans cette configuration est un redresseur à un seul sens de transfert de puissance vers une charge R (figure 2.20). Cette puissance contrôle la vitesse du rotor de la machine. Plus la puissance extraite par le rotor, et dissipée dans la charge, est importante plus le glissement est grand, mais plus le rendement est faible. Cette configuration est utilisée par la compagnie Vesta, le glissement ne dépasse pas 10%) [32].

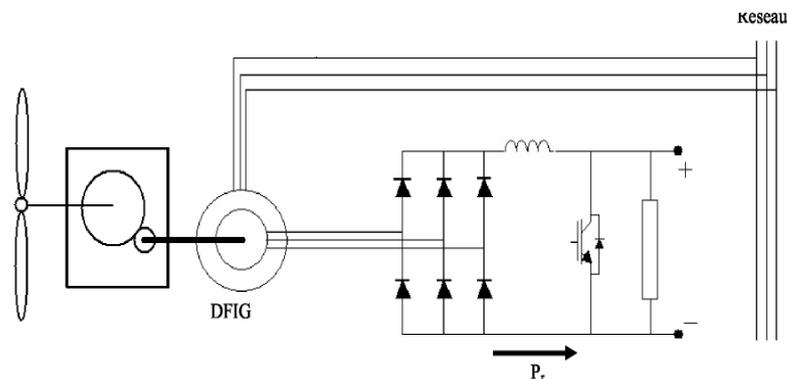


Figure 2.20. MADA avec un contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique [32]

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet Joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. Dans le passé, on utilisait à cet effet des machines tournantes à courant continu ou alternatif (montages Kramer, Scherbius, Rimcoy, etc.). De nos jours, on utilise, pour cette récupération, un système statique de conversion d'énergie constitué de convertisseurs de puissance ainsi qu'un transformateur. [32]

➤ **Configuration de la MADA avec la structure de Kramer**

Cette configuration présente la même caractéristique de transfert d'énergie que la précédente. Dans ce cas, nous pouvons contrôler la valeur du glissement que dans sa partie positive ce qui justifie l'utilisation de la configuration du paragraphe ci-après. La valeur maximale de transfert de puissance peut atteindre 25% de la puissance nominale de la machine. Ce qui limite le dimensionnement des convertisseurs utilisés. [32]

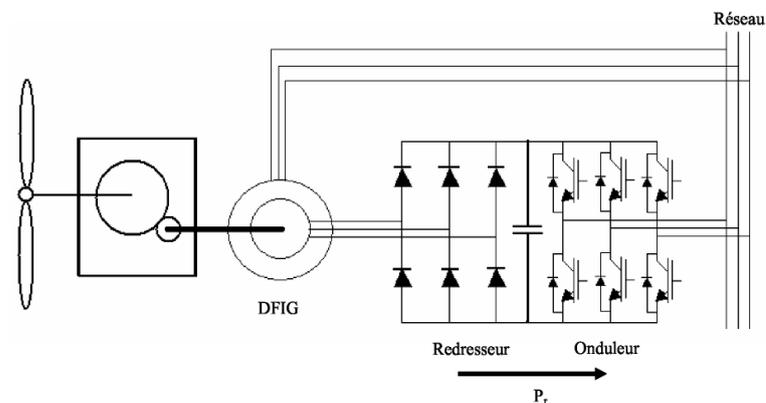


Figure 2.21. MADA avec la structure de Kramer [32]

➤ **Configuration de la MADA avec la structure de Scherbius:**

Le principe de Scherbius est basé sur l'utilisation de machines tournantes au lieu des convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, le principe de Scherbius est reproduit à l'aide d'un cycloconvertisseur. Celui utilisé dans la figure ci-dessus est connu pour des valeurs de fréquence rotorique très inférieures à celles du réseau autrement dit pour des glissements très faibles. Ainsi, ceci permet l'utilisation de thyristors qui sont intéressants du point de vue coût. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur. [33]

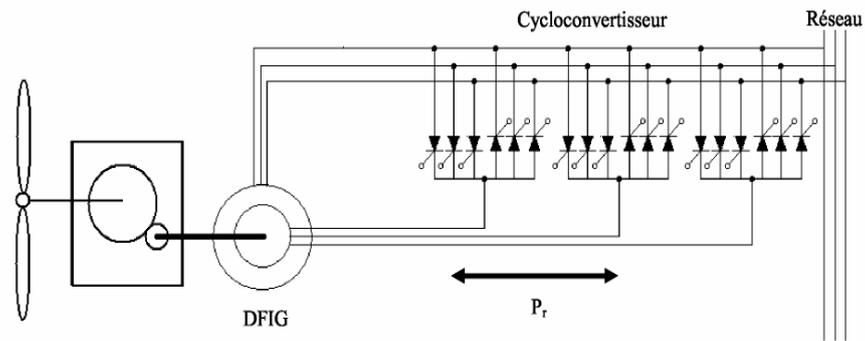


Figure 2.22. MADA avec la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [33]

Dans cette configuration, la puissance rotorique peut être transférée dans les deux directions. Le même cas se pose que précédemment sur les limites du glissement on la puissance rotorique, ce qui impose une puissance donnée au convertisseur. L'avantage de cette configuration est qu'elle double la plage du glissement (fonctionnement en hypo et hyper synchrone) en gardant la même puissance du convertisseur. Il faut signaler que l'utilisation du cycloconvertisseur a pour conséquence l'augmentation du nombre d'harmoniques injectés dans le réseau ou dans la machine, ainsi l'utilisation des thyristors limite sa fréquence de commutation ce qui limite ainsi la valeur du glissement.

➤ **Configuration de la MADA avec la structure de Scherbius utilisant deux onduleurs:**

Les deux onduleurs utilisés dans cette configuration, peuvent chacun le rôle d'un redresseur et l'autre celui d'un onduleur, suivant le sens du transfert de l'énergie. [34]

Le nombre de commutation dans les convertisseurs est plus élevé que dans la structure précédente. En utilisant des IGBT, la plage du glissement est plus élevée et avec moins d'harmoniques et des pertes moins de 1%. Avec cette configuration, on peut aussi contrôler le facteur de puissance. Pour toutes ces raisons, cette configuration est devenue plus attractive autant aux constructeurs d'éolienne qu'aux chercheurs en ce domaine.

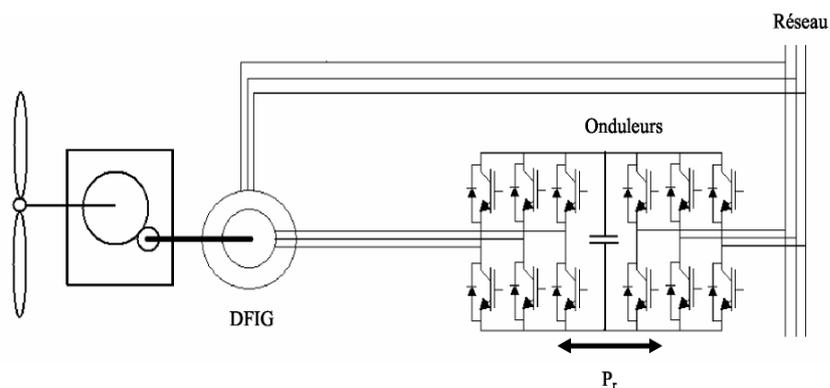


Figure 2.23. MADA avec la structure de Scherbius avec deux onduleurs [34]

2.3.2.3. Conversion mécanique → électrique à attaque directe

Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice. Ainsi il n'y a plus de multiplicateur, siège de perte de puissance et source de bruit. En contre partie, la génératrice ne tourne plus à 1500 tr/min mais à la vitesse de l'hélice, environ 18 à 50 tr/min, il faut donc qu'elle soit de conception différente de celle fonctionnant à plus grande vitesse.

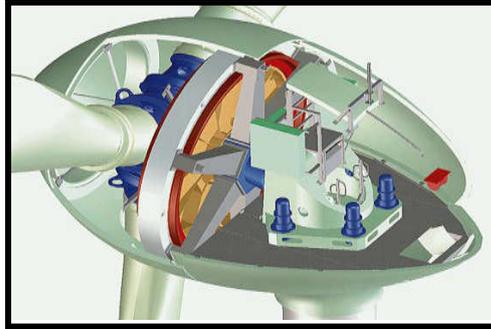


Figure 2.24. Exemple d'éolienne à attaque directe

Un autre avantage de ces éoliennes est qu'il n'y a qu'une pièce en mouvement pour toute l'éolienne: c'est l'arbre de l'hélice. Il n'y a donc que le palier de celui-ci à entretenir. C'est une maintenance moins lourde que pour les éoliennes à multiplicateur et ces éoliennes devraient alors être plus rentables. Au niveau de la chaîne de conversion mécanique/électrique, on peut retrouver les mêmes ensembles que pour les éoliennes à multiplicateur, seule la conception des génératrices diffère sensiblement.

➤ *Machine synchrone*

Toutes les grandes éoliennes à attaque directe sont équipées de génératrices synchrones multipolaires à aimants permanents [21]. Elles produisent des tensions multiphasées qui sont redressées par un pont de diodes situé dans la nacelle de l'éolienne :

- **Machine multipolaire classique**

Une majeure partie des génératrices synchrones multipolaires ressemble à la machine synchrone classique. Cependant le rotor et le stator sont inversés. En effet, le rotor forme une couronne entraînée par l'hélice et les aimants sont fixes à l'intérieur de celle-ci. [36]

- **Machine multipolaire discoïde**

Certaines éoliennes sont constituées de génératrices dites discoïdes [21]. Leur conception est telle que le stator et le rotor sont des disques empilés les uns à côté des autres, le long de l'arbre de l'hélice. Il y a alternance de disques stator, comportant les enroulements, et de disques rotor, équipés d'aimants permanents. Il s'agit toujours d'une conception multipolaire et de grand diamètre.

➤ *Machine asynchrone*

On peut aussi concevoir et utiliser des machines asynchrones multipolaires pour la production éolienne. Cependant, Il n'existe pas encore sur le marché des éoliennes à attaque directe avec ce type de génératrice.

2.4. Principe et modélisation

L'entraînement d'une machine électrique par un système éolien constitue une chaîne de conversion complexe dans laquelle le couple mécanique présent sur l'arbre de transmission dépend uniquement de la vitesse du vent et de l'éventuelle présence d'un dispositif d'orientation des pales. Le vent étant imprévisible et présentant des variations importantes, le couple résultant présente des ondulations dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne. [18]

2.5. Modélisation d'une turbine éolienne

2.5.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine

Afin de calculer le couple disponible sur l'axe de la turbine nous allons chercher à calculer la contribution de chacune des pales [37]. Nous allons déterminer, à partir des efforts de portance et traînée qui se créent sur le profil de la pale, le couple généré sur l'axe en fonction de l'angle de calage des pales et de la vitesse du vent.

Afin de simplifier les calculs et obtenir ainsi une modélisation permettant une simulation la plus fiable possible, nous calculerons l'effort moyen au milieu de la pale (à mi- rayon de la turbine). Nous supposerons cet effort égal et uniforme sur toute la longueur de la pale. En effet, la composition vectorielle des vitesses, circonférentielle et celle du vent, tout au long de la pale implique que le module du vecteur vent relatif est plus important en bout de pale que près de l'axe et que l'angle d'incidence α par rapport au profil de la pale varie lui aussi tout au long de la pale.

C'est pour ces deux raisons que premièrement les pales des éoliennes sont larges au niveau du pied de pale et vont en s'affinant jusqu'au bout, et deuxièmement les pales sont vrillées tel que l'angle de calage soit plus important au pied de pale et plus faible à l'extrémité afin d'obtenir un angle d'incidence α du vent relatif constant sur toute la pale. Ainsi, nous pouvons nous permettre de simplifier le modèle de la turbine en effectuant les calculs au milieu de la pale (à la moitié de sa longueur) et en considérant que l'ensemble de la pale de profil constant se trouve dans les mêmes conditions aérodynamiques. Cela revient en quelque sorte à calculer un effort moyen sur la pale. On étudie donc une pale à profil constant dans un vent relatif uniforme qui correspond en pratique à une pale vrillée et affinée dans un vent relatif variant selon la position sur la pale.

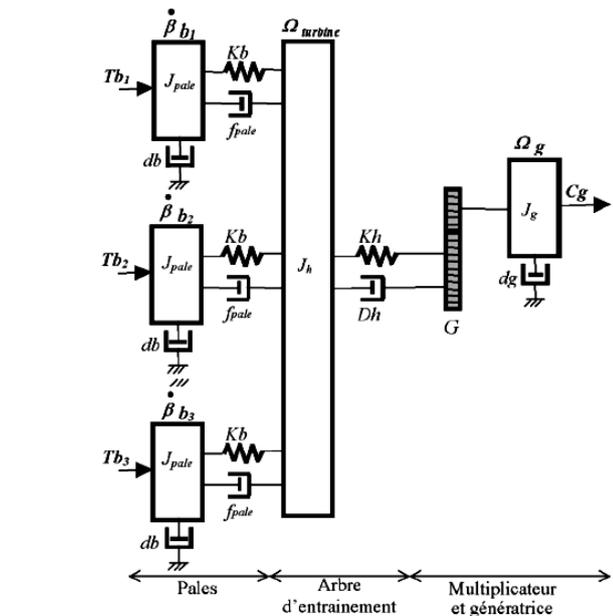


Figure 2.25. Système mécanique de l'éolienne

➤ Structure d'une turbine éolienne

La modélisation de cette partie mécanique doit permettre de faire la liaison, la plus fidèle possible à la réalité, entre le vent et la génératrice. La turbine et la génératrice ont en commun le couple et la vitesse de rotation (via le multiplicateur) [39]

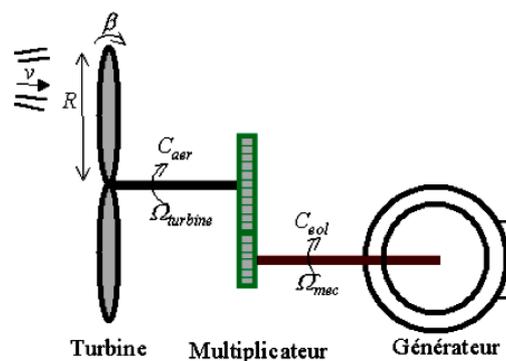


Figure 2.21. Schéma de la turbine éolienne

Au niveau de la turbine, le vent qui passe sur les pales crée des efforts de portance et traînée sur ce profil. Ces efforts vont générer un couple. Ce couple associé au couple de la génératrice va définir la vitesse de rotation de l'ensemble en fonction de la puissance produite par la génératrice. Si la puissance produite est grande, le couple de la génératrice sera supérieur au couple de la turbine et la vitesse de rotation va donc diminuer et inversement. C'est donc la turbine qui impose le couple mécanique et la génératrice impose la vitesse de rotation en fonction de la puissance qu'elle produit. [40][41]

➤ *La modélisation d'une turbine éolienne*

Nous nous intéressons ici à la modélisation d'une turbine éolienne tripale à axe horizontal à variable, la plus répandue actuellement pour la production électrique de forte puissance [39]. La littérature scientifique présente de nombreuses études d'éoliennes, mais rares sont celles qui décrivent la modélisation de turbine [42], surtout dans le cas des éoliennes à vitesse variable. Bien souvent, les calculs se limitent à déterminer la puissance disponible P_{amont} , [11] [17] [43] [44] issue de l'énergie cinétique du vent par la formule suivante :

$$P_v = \frac{\rho S v^3}{2} \quad (2.4)$$

Où :

ρ : La densité de l'air ($\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C).

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale. (m^2)

v : La vitesse du vent. (m/s)

Ensuite, un coefficient de puissance est appliqué afin de transcrire le rendement de la turbine pour le point d'étude considéré dépendant de la vitesse de rotation et de l'angle de calage des pales [9]. Le couple disponible sur l'axe de l'hélice est ensuite calculé en divisant la puissance par la vitesse :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.5)$$

Ce ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (2.6)$$

Ce calcul va déterminer le couple en fonction des efforts résultants de l'écoulement de l'air sur le profil des pales, en prenant en compte leurs caractéristiques aérodynamiques et les conditions de fonctionnement de la turbine (vitesse de rotation et angle de calage des pales) :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.7)$$

2.6. Modèle du multiplicateur

Les multiplicateurs utilisés comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épi-cycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplication de l'ordre de 100. Les différents engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques. Ceux-ci diminuent la puissance disponible en sortie de la génératrice. Pour la modélisation, nous allons utiliser un gain en couple et en vitesse correspondant au

rapport de multiplication. Les pertes seront modélisées par des couples de frottements secs et fluides qui vont se soustraire au couple de la turbine.

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.8)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.9)$$

Où G : C'est le gain du multiplicateur.

Ω_{mec} : La vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

2.7. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.10)$$

Où :

J : Est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de génératrice, $J_{turbine}$ l'inertie de la turbine et

J_g : L'inertie de la génératrice ($kg.m^2$).

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.11)$$

Le couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.12)$$

Le couple résistant due aux frottements est modélisée par un coefficient de frottement visqueux f

Tel que :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.13)$$

Où

C_{mec} : Le couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne,

C_g : Le couple entraînant la génératrice,

C_{em} : Le couple électromagnétique et

C_{vis} : Le couple des frottements visqueux (N.m)

f : Coefficient de frottement visqueux.

2.7.1. Modélisation des machines électriques

2.7.1.1. Les machines asynchrones à double alimentation

a. Structure de la MADA

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. On peut voir sur la figure 2.24 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

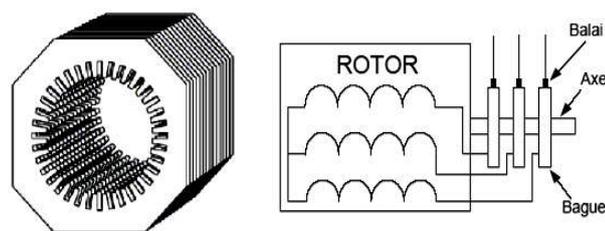


Figure 2.22. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif.

b. Application des machines asynchrones à double alimentation

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage :

– Le premier est l'utilisation de la MADA pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne. En effet, avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA connaissent un grand essor et un grand nombre de publications accompagnent ce développement.

– Le second thème, s'intéresse au fonctionnement moteur où la MADA est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor. Le nombre d'études traitant de ce type de configuration est inférieur au précédent. Néanmoins les travaux présents dans la littérature montrent les bonnes performances de cette machine dans ce mode de fonctionnement.

– Le troisième et dernier thème est dédié à la sûreté de fonctionnement. Cet axe de recherche est très important vu qu'il s'intéresse à la continuité de fonctionnement des systèmes même en présence de défaut. Ce domaine est largement traité en bibliographie par les automaticiens, mais les applications concernant les entraînements électriques à vitesse variable sont peu nombreuses.

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotoriques est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, ...etc. Pour des applications moteur, la machine asynchrone à cage occupe certes la première place, néanmoins la MADA alimentée par deux convertisseurs présente, notamment pour des applications de grandes puissances, de bonnes performances : fonctionnement en survitesse (jusqu'à deux fois la vitesse nominale) sans démagnétisation, bonnes performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur de vitesse, ...etc. Par ailleurs, la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine.

c. Mode de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

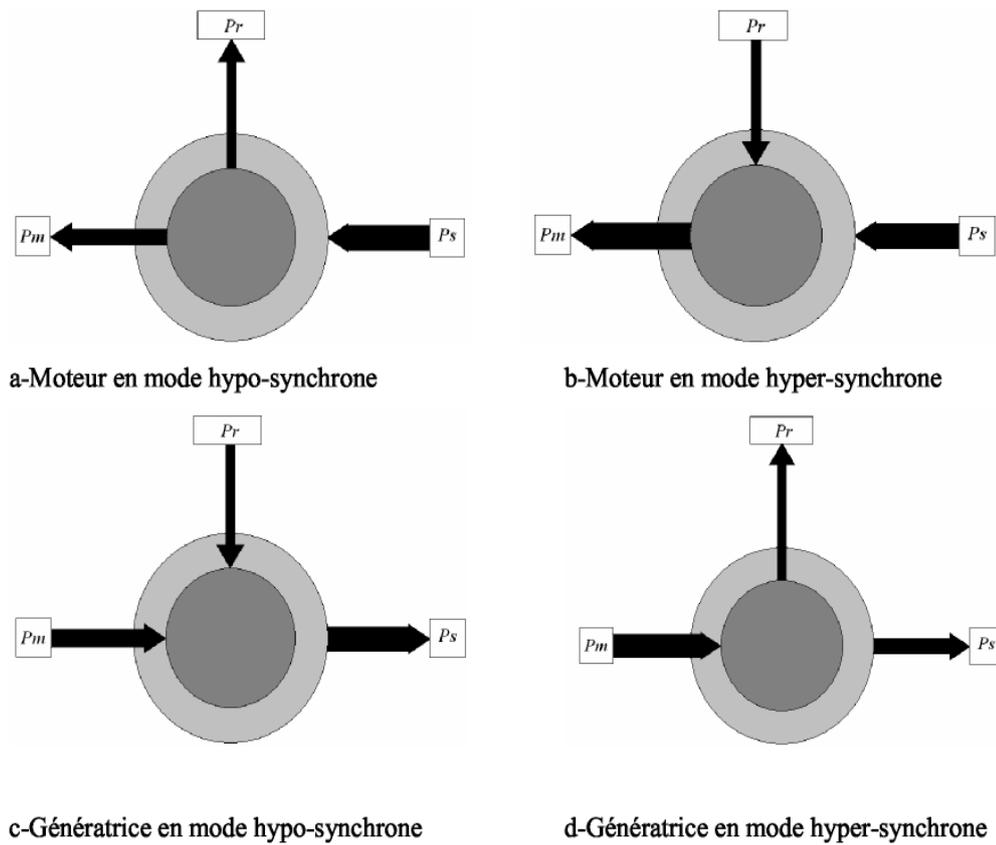


Figure 2.28. Mode de fonctionnement de la MADA.

a. Les équations électriques et magnétiques

Pour aboutir à des équations simples régissant le fonctionnement de la machine et qui permettent de mener à bien les études analytiques, on va utiliser une génératrice asynchrone double alimentée idéalisée:

- **Equation électrique :** Les équations aux tensions au stator et au rotor de la machine sont données par :

$$V_s = R_s I_s + \frac{\partial \varphi_s}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{\partial \varphi_r}{\partial t} \quad (2.5)$$

- **Equation magnétique :** Ainsi les flux statoriques et rotoriques peuvent s'écrire sous la forme des expressions suivantes :

$$\varphi_s = L_s I_s + L_m \ell^{j\theta} I_r = L_s I_s + L_m I_r \quad (2.6)$$

$$\varphi_r = L_r I_r + L_m \ell^{-j\theta} I_s = L_r I_r + L_m I_s \quad (2.7)$$

Où : les indices s et r identifient respectivement les grandeurs du stator et de rotor et $\omega_m = \omega_s - \omega$
 ω_m : est la vitesse de rotation électrique du rotor.

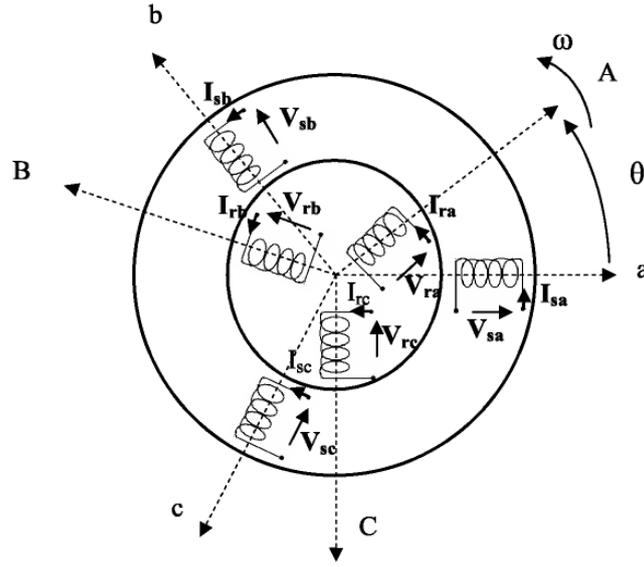


Figure 2.23. Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

En remplaçant ces expressions du flux dans les équations aux tensions, on obtient :

$$\begin{aligned}
 [V_s] &= [R_s][I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}[I_s] + \frac{d}{dt}[M_{sr}][I_r] \\
 [V_r] &= [R_r][I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}[I_r] + \frac{d}{dt}[M_{rs}]^T \cdot [I_s]
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

a- Mise en forme d'équation d'état

Ces équation peuvent être disposée sous la forme de représentation d'état .on choisit pour vecteur d'état le vecteur de courants $[i_{\alpha s}, i_{\beta s}, i_{\alpha r}, i_{\beta r}]^t$. En combinant les deux dernières équations on trouve l'équation d'état sous la forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -M\omega_s \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega_m)M & R_r & -(\omega_s - \omega_m)L_s \\ (\omega_s - \omega_m)M & 0 & (\omega_s - \omega_m)L_s & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_{ds} \\ U_{qs} \\ U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix}
 \tag{2.9}$$

Avec :

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1}; [R] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$[R1] = \omega_s \cdot \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_s & -L_s & 0 & -M \\ L_s & R_s & M & 0 \\ 0 & -M & R_r & -L_s \\ M & 0 & L_s & R_r \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$[R2] = \omega_m \cdot \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_s \\ -M & 0 & -L_s & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

b- Modèle de la MADA dans le repère de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation P, permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère biphasé tournant (d, q) . Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Donc l'équation d'état prend la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt}[X] = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot [X] + [L]^{-1} \cdot [U] \quad (2.14)$$

$$[Z] = [R] \cdot [L] + [R1] \cdot [L] + [R2] \cdot [L] \quad (2.15)$$

c- Couple électromagnétique et Puissance

Le couple électromagnétique découle de ces variables électriques ; En effet :

$$C_{em} = k_p I_m (\varphi_s^* i_s) = k_t I_m (i_r^* i_s) = k_t p M (i_{\alpha r} i_{\beta r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}) \quad (2.16)$$

Où

k_t : est un paramètre dépendant du type de transformation de Park réalisée (à puissance constante ou à amplitude constante).

p : est le nombre de paire de pôles de la machine.

Les puissances actives et réactives du stator et du rotor sont respectivement données par :

$$\begin{aligned} \text{Stator :} \quad P_s &= R_e (u_s i_s^*) \\ Q_s &= I_m (u_s i_s^*) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Rotor :} \quad P_r &= R_e (u_r i_r^*) \\ Q_r &= I_m (u_r i_r^*) \end{aligned} \quad (2.18)$$

d. Modèle complet de la chaîne de conversion éolienne

➤ Modèle utilisant des interrupteurs idéaux pour les convertisseurs de puissance

Un premier modèle de la chaîne de conversion éolienne peut être établi en utilisant les modèles à interrupteurs idéaux des convertisseurs. C'est le modèle le plus généralisé de la MADA (figure 2.30).

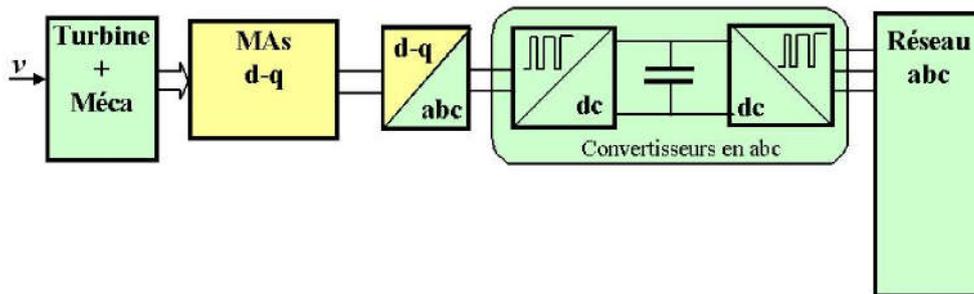


Figure 2.30. Modèle généralisé de la MADA utilisant des interrupteurs idéaux

➤ Modèle utilisant le modèle continu équivalent des convertisseurs de puissance

Un second modèle de la chaîne de conversion éolienne peut être établi en utilisant les modèles continus équivalents des convertisseurs de puissance. Ce modèle est établi dans le repère de Park et prend en compte les composantes utiles des courants et tensions au niveau des génératrices, du bus continu et du réseau

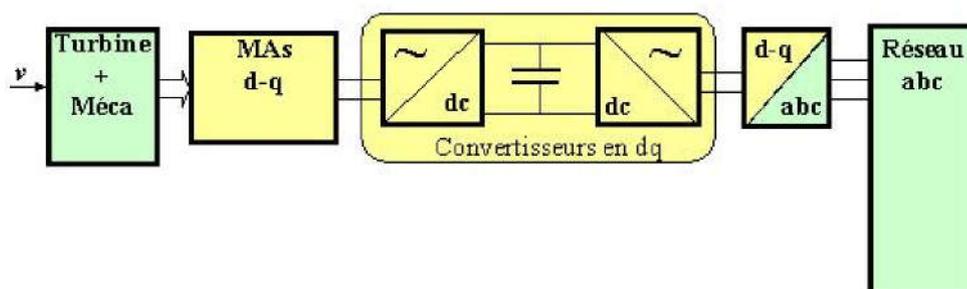


Figure 2.31. Modèle de la chaîne de conversion éolienne utilisant le modèle continu équivalent des convertisseurs de puissance

2.7.1.2. Machines asynchrones à cage d'écureuil

La machine asynchrone triphasée est formée d'un stator fixe, et d'un rotor cylindrique mobile. Les trois enroulements statoriques, couplés en étoile ou en triangle, sont alimentés par un système triphasé de tensions. Leur principe de fonctionnement est basé sur l'interaction électromagnétique du

champ tournant, créée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont coupés par le champ tournant.

Nous pouvons représenter la machine asynchrone schématiquement par les trois enroulements de phase du stator a, b, c, ainsi, que les trois enroulements du rotor a, b, c, comme montre la figure 2.31

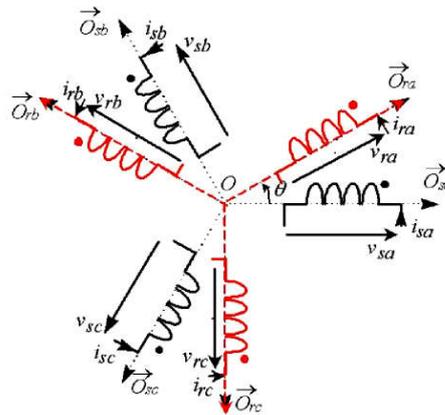


Figure 2.32. Représentation de la machine asynchrone triphasée

a) Équations électriques et magnétiques

➤ Equations électriques

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle :

$$v_r = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d\varphi_r}{dt} + R_r i_r = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$v_s = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d\varphi_s}{dt} + R_s i_s = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Où : les indices s et r identifient respectivement les grandeurs du stator et de rotor

R_s, R_r ; l_s, l_r : La résistance, et l'inductance propre d'une phase du stator et du rotor.

m_s, m_r, m_{rs} : Sont respectivement l'inductance mutuelle entre deux phases du stator et du rotor et l'inductance mutuelle (maximale) entre une phase du stator et une phase du rotor.

➤ **Equations magnétiques** Les flux sont reliés aux courants selon les relations :

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s i_s + M_{sr} i_r \\ \varphi_r = M_{rs} i_s + L_r i_r \end{cases} \quad (2.21)$$

a) **Mise en forme d'équation d'état**

$$L_s = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad L_r = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad M_{rs} = (M_{sr})^T \quad (2.22)$$

$$M_{sr} = m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Où θ désigne l'angle électrique entre une phase du rotor et la phase correspondante du stator et vérifie :

$$\frac{d\theta}{dt} = p\Omega. \quad \Omega : \text{étant la vitesse de la génératrice et } p \text{ le nombre de paire de pôles.}$$

b) **Modèle de la MAS dans le repère de Park**

Transformation de Park est souvent définie par la matrice [P] normalisée.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Lorsque la valeur zéro est attribuée à l'angle θ , la transformation de Park porte le nom de transformation de Concordia C et les axes d, q seront désignés par α, β . En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel (équations (3.12) et (3.13)), un modèle de la machine est obtenu de la façon suivante :

$$\frac{d}{dt} \phi_{sdq} = V_{sdq} - R_s I_{sdq} - \lambda \cdot \phi_{sdq} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \quad (2.25)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_{rdq} = V_{rdq} - R_r I_{rdq} - \lambda \cdot \phi_{rdq} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.26)$$

Où : V_{sdq} ; I_{sdq} ; ϕ_{sdq} ; V_{rdq} ; I_{rdq} ; ϕ_{rdq} sont respectivement : vecteur tension, courant, flux statorique puis rotorique dans le repère de Park.

c) Expression du couple électromagnétique

Dans le repère de Park, les flux et les courant sont liés par : Les deux expressions du couple électromagnétique sont données par les expressions suivantes :

Stator :

$$C_{em} = p.(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (2.27)$$

Rotor :

$$C_{em} = p.(\phi_{rd} \cdot i_{rq} - \phi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (2.28)$$

d) Modèle complet de la chaîne de conversion éolienne

La représentation du modèle de cette chaîne de conversion est illustrée sur la figure suivante :

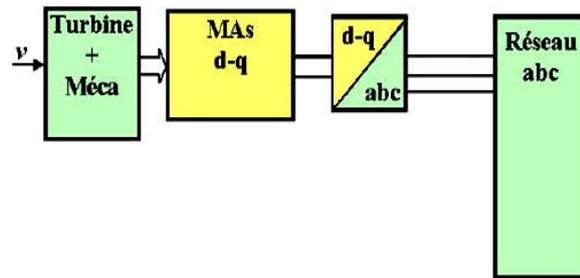


Figure 2.33. Modèle de la chaîne de conversion éolienne fonctionnant à vitesse fixe

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différents éléments d'une éolienne utilisant un multiplicateur de vitesse et leur modélisation. Puis nous avons établi les deux grandes familles d'éolienne existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe basées sur la machine asynchrone à cage, et les éoliennes à vitesse variable basées sur la machine double alimentation, le modèle de ces machines sont ainsi décrites.

Chapitre 03

IMPACT DES FERMES EOLIENNES SUR LA STABILITE DE TENSION DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES

3.1. Introduction

L'un des problèmes les plus importants lors de l'étude d'un réseau d'énergie électrique complexe, est celui de sa stabilité. Ceci est dû au développement important des réseaux ces dernières années, mais aussi à l'objectif de ce type d'étude qui est d'examiner le comportement du réseau face à des faibles ou importantes perturbations. Dans notre travail et pour les fermes éoliennes, la principale caractéristique du vent réside dans sa variabilité, c'est pourquoi, il est important d'évaluer l'impact des fermes éoliennes sur la stabilité dans les réseaux électriques et en particulier, sur sa stabilité de tension.

Ce chapitre présente une étude globale sur la stabilité de tension dans les réseaux électriques : en un premier temps ; nous allons présenter un état de l'art sur les problèmes de la stabilité tenant compte des différentes classifications et des principaux facteurs qui contribuent au problème puis on passe à une étude de la stabilité de tension dans les réseaux électriques bien précise (définitions et analyses).

3.2. Stabilité des réseaux électriques

Le problème de stabilité est dû aux faibles ou importantes perturbations, Les variations continues de charge sont un exemple de petites perturbations, les défauts comme les courts-circuits et la perte de synchronisme d'un générateur de forte puissance sont des exemples de grandes perturbations. Ces perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation). Cet écart doit être absorbé sous forme d'énergie et à l'heure actuelle on sait stocker l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique dans des volants d'inertie. Leur défaut est un très mauvais rendement. L'écart en termes de puissance va se traduire par une modification de la vitesse de rotation de l'alternateur ou en d'autres termes par des variations de sa vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Après l'élimination de la perturbation, le réseau sera stable si la valeur moyenne des écarts de vitesse est nulle.

Le problème de la stabilité des réseaux électriques peut influencer sur une grande gamme des factures, et il peut prendre des différentes formes. L'analyse de problème de la stabilité y compris d'identifier les causes essentielles qui contribuent à l'instabilité et appliquer des méthodes d'amélioration qui facilite grandement les catégories appropriées grâce à la classification des différents types de la stabilité ; Ceux-ci sont basés sur les considérations suivantes: [48]

- La nature physique de l'instabilité résultante : a été en rapport avec les paramètres du réseau principal dans qui l'instabilité peut être observée.
- Les appareils : les processus et la durée du temps qui doivent être prise en considération la stabilité
- Les dimensions du défaut considéré : indiquent la méthode de calcul la plus approprié et prédiction de la stabilité.

3.3. Différentes classifications de la stabilité

On distingue deux types de stabilité du réseau électrique : celle de son angle rotorique des alternateurs ou celle de la tension. Et suivant la valeur de la perturbation, on classe la stabilité des réseaux électriques : la stabilité dynamique, la stabilité statique et la stabilité transitoire. [49]

3.3.1. Stabilité d'angle rotorique

La stabilité d'angle rotorique se réfère à la capacité des machines synchrones interconnectée aux réseaux électriques de rester dans le domaine de synchronisme sous des conditions normales du fonctionnement ; et/ou après soumis à une forte perturbation. Il dépend de la capacité d'équilibré entre le moment de rotation électromagnétique et le moment de rotation mécanique dans le réseau électrique pour chaque machine synchrone. L'instabilité qui peut résulter se produit dans la forme d'augmentations des balancements anguleux de quelques générateurs qui mènent à leur perte de synchronisme avec des autres générateurs.

Le problème de la stabilité d'angle rotorique implique l'étude des oscillations électromécaniques inhérentes dans les réseaux électriques. Un facteur fondamental dans ce problème est la manière dans laquelle la production de puissance de la machine synchrone varie comme leur rotor oriente le changement. Sous les conditions d'état stable, Ilya un équilibre entre l'entrée de moment de rotation mécanique et la production de moment de rotation électrique de chaque machine, et la vitesse reste constante ; et lorsque le système est perturbé, cet équilibre est renversé, résultant en accélération ou décélération rotorique des machines d'après les lois de mouvement d'un corps tournant. [50]

3.3.2. Stabilité de tension

La stabilité de tension se réfère à la capacité d'un réseau de maintenir des tensions stables au niveau de tous les jeux de barres dans un réseau électrique sous des conditions normales de fonctionnement, et/ou après soumis à une perturbation ; donc l'instabilité résultante se produit sous forme d'une chute progressive ou une tension élevée au niveau de quelque jeu de barre. [50]

L'instabilité de tension peut être :rapide de courte durée avec une chute de tension d'ordre de fraction d'une seconde à quelques secondes et lent à long terme avec une chute de tension de minute à quelques heures. En termes simple;l'instabilité de tension provient d'un comportement des charges qui tend à restaurer la consommation de puissance de celles-ci au-delà de ce que peuvent fournir ensemble le réseau de transport et les générateurs. La source d'instabilité de tension sans doute la plus importante pour un réseau est le transport de grandes puissances sur des grandes distances. [51]

Suivant la valeur de la perturbation, on classa la stabilité des réseaux électriques : la stabilité dynamique, la stabilité statique et la stabilité transitoire.

3.3.3. Stabilité dynamique

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau.

3.3.4. Stabilité transitoire

La stabilité transitoire d'un réseau électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer : [31 notamment aux bornes des machines.

3.3.5. Stabilité statique

En général, à la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint son régime permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : état instable ou état d'urgence. Dans un réseau qui est dans un état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires. Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, l'une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement normal.

Une autre définition peut être donnée à la stabilité statique qui consiste à dire qu'un réseau d'énergie électrique est dit stable en régime statique si suite à une perturbation quelconque infiniment petite, il retrouve un état de marche synchrone, identique ou infiniment voisin de l'état d'origine.

3.4. Qualité de production

Le terme « qualité de production » se réfère à la stabilité de tension, à stabilité transitoire, à la stabilité de fréquence et aux harmoniques des grandeurs générées. Si une ferme éolienne est raccordée à un réseau électrique, il peut y avoir des problèmes sur sa stabilité, chute de tension et fluctuation de puissance [40]. Les aspects de qualité de production les plus rencontrés sont : Variation de tension

Elles sont définies par un changement de la valeur efficace de la tension sur une durée de quelques minutes ou plus. Les normes internationales imposent que cette variation ne doit pas dépasser $\pm 5\%$ de la tension nominale dans les réseaux électriques. Les variations de tension produite lors d'un fonctionnement des éoliennes sont causées par les fluctuations de puissance. Ces dernières mènent essentiellement des variations de la vitesse du vent.

La procédure de démarrage des éoliennes n'est pas identique d'une technologie d'éolienne à l'autre : les éoliennes à vitesse variable et à orientation des pales ont un démarrage moins brutal que les éoliennes à vitesse fixe.

Généralement, lors de la mise en service d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone, la puissance réactive, nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique, provoque des chutes de tension au point de connexion. Cette dernière est rétablie par la connexion d'un banc de condensateurs. [40]

3.4.1. . Variation de fréquence

L'effet de la variation de la puissance éolienne doit être considéré dans le fonctionnement d'un système de production autonome. Dans le cas de l'utilisation d'éolienne à vitesse fixe, l'oscillation de la vitesse de rotation de la génératrice est provoquée par l'augmentation ou la diminution de la vitesse du vent. Cette variation induit sur la variation de la fréquence. Pour les éoliennes à vitesse variable reliées au réseau par des convertisseurs de puissance, les variations de fréquence sont facilement respectées.

3.4.2. Interruptions

On distingue deux types d'interruptions dans les réseaux électriques :

3.4.2.1. Délestage

Le délestage est l'action par laquelle une partie prédéterminée de la charge du réseau est déclenchée quand la fréquence de celui-ci devient assez basse, c'est-à-dire quand les moyens de production sont insuffisants. Le délestage permet d'éviter la détérioration des équipements tournants tant dans les centrales de production que chez les usages. [2]

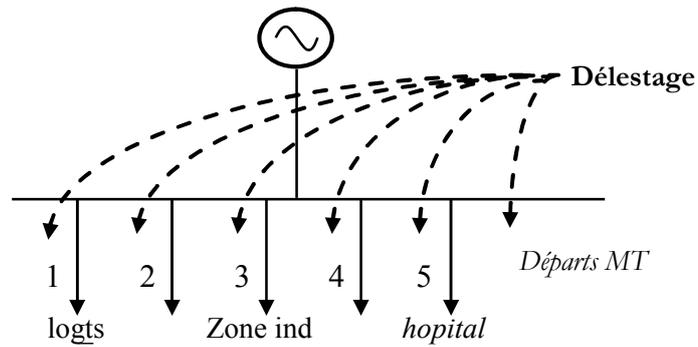


Figure 3.1. Priorités de délestage

3.4.3.2. Ilotage

Pour limiter l'étendue de la zone perturbée, le réseau est progressivement découpé jusqu'à retrouver la stabilité dans chaque partie isolée. Ce découpage sacrifie la région en détresse pour préserver le reste du réseau. Cette action est connue sous le nom îlotage (Figure 3.2). L'îlotage est l'ultime action qui consiste à isoler du réseau la partie déficiente de manière à en sauvegarder la partie saine. Actuellement, l'îlotage régional réglé à 46,5Hz et 0.2 sec. [2]

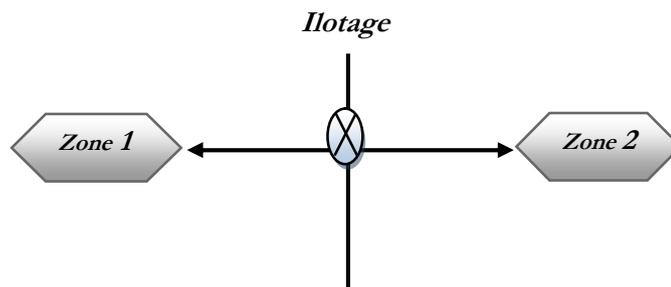


Figure 3.2. L'îlotage

Le système contrôle- commande doit donc surveiller sans cesse la tension et la fréquence du courant alternatif transmis au réseau. Dans le cas où la tension ou la fréquence du réseau local dépasseront certaines limites pendant une fraction de seconde, l'éolienne coupera automatiquement la connexion au réseau et s'arrêtera immédiatement en actionnant les freins aérodynamiques. [2]

3.5. Etude de la stabilité de tension dans un réseau électrique

Le transfert de puissance au travers d'un réseau électrique s'accompagne des chutes de tension entre les points de production et ceux de consommation. Dans des conditions normales de fonctionnement; ces chutes de tension sont d'ordre de quelques pour-cent de la tension nominal. Une des préoccupations des planifications et des exploitants est de s'assurer que les tensions aux différents jeux de barres du

réseau demeurent, malgré tout dans des limites prescrites, spécialement dans des conditions de forte charge.

Dans certaines circonstances cependant dans les secondes ou dans les minute ; qui suivent l'apparition d'une perturbation. Les tensions peuvent décroître de manière catastrophique, à tel point qu'a puissance ne peut plus être acheminée correctement aux consommateurs et que l'intégralité du système peut être mise en danger. Le mécanisme qui sous-tend cet affaissement des tensions est l'instabilité de tension et la catastrophe qui en résulte l'effondrement de tension. [52]

3.5.1. Définition

La stabilité de tension se réfère à la capacité d'un réseau électrique de maintenir des tensions stables au niveau de tous les jeux de barres sous des conditions normales de fonctionnement, et/ou après soumis à une perturbation ; donc l'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'une chute progressive ou une tension élevé au niveau des quelques jeux de barres.

En d'autres termes, un réseau est dite stable si la sensibilité de VQ est positive au niveau de chaque jeu de barres et instable si la sensibilité VQ est négative au moins pour un jeu de barre. [51]

3.5.2. Facteurs contribuant à l'instabilité de tension

Le facteur principal qui contribue à l'instabilité de tension; est habituellement la tension qui se produit une puissance actif et réactif à travers des réactances d'inductions associées avec un réseau de transmission; cela limite la capacité de ce dernier pour transfert de puissance. La limite du transfert de la puissance est limitée en outre quand quelques-uns du coup es générateurs leurs limites de la capacité des puissances réactives. Comme on peut citer autres facteurs : [53] ; [54]

- Comme on le sait, la construction de nouvelle lignes électriques est de plus en plus difficile, souvent retardés et parfois impossibles.
- La concentration de la production dans des centrales de plus en plus puissantes a diminué le nombre de points tenus en tension dans le réseau augmenté les distances électriques entre centres de production et de consommation.
- L'usage massif de condensateurs shunt pour soutenir le profil de tension permet de transporter de plus grandes quantités de puissance mais rapproche le point d'instabilité des plages de fonctionnement normal.
- L'instabilité de tension est souvent déclenchée par la perte d'équipements de transport et/ou de production, incidents dont la probabilité d'apparition est relativement élevée (comparée par exemple à celle du court-circuit triphasé).

– L'ouverture de marché de l'électricité incite à faire fonctionner les réseaux plus près de leurs limites physiques pour des raisons de rentabilité économique, il est donc nécessaire d'évaluer ces limites ; en particulier vis-à-vis du risque d'instabilité de tension.

3.5.3. Phénomène de la chute de tension

La chute de tension est la plus complexe qu'instabilité de tension, et est habituellement le résultat d'une séquence d'événements qui s'accompagnent l'instabilité de tension qui mène à un profil de basse tension inacceptable dans une partie considérable dans les réseaux électriques. Quand le réseau électrique est soumis à une soudaine augmentation de la demande de la puissance réactive, suite à une contingence de système électrique; la demande supplémentaire à rencontrer par la puissance réactive réserve des générateurs et des compensateurs. Généralement, il y a des réserves suffisantes et le système ressort à un niveau de tension stable, cependant, c'est possible d'une combinaison d'événements et les conditions du réseau qui manquent une demande de puissance réactif supplémentaire peut mener une chute de tension, en causant un total ou échec partiel du système. Et les principaux facteurs qui contribuent à une chute de tension : [55]

- Caractéristiques des charges.
- Caractéristique de la compensation réactive.
- Les générateurs : puissance réactive /Tension (QV)

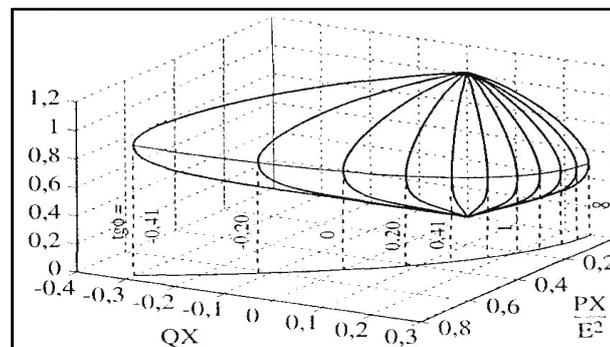


Figure 3.3. Tension de la charge en fonction des puissances active et réactive consommées.

Cette figure montre la variation de la tension V avec les puissances P et Q (en fait, des grandeurs sans dimension équivalentes). Dans des conditions normales, le point représentant le fonctionnement du système se situe sur la partie supérieure de la surface $V(P, Q)$. Un fonctionnement sur la partie inférieure, caractérisé par un courant très important et une tension très basse, est généralement inacceptable.

➤ Les Courbes PV_QV

En coupant la surface de la figure (3.3) par des plans verticaux $Q=P.tg\xi$ on obtient les courbes de la figure (3.4) qui donnent l'évolution de la tension en fonction de la puissance consommé, Lorsque la charge se comporte un facteur de puissance constant. Ces courbes, usuellement appelés: courbes PV, sont fort utilisées dans de nombreux raisonnements ainsi que dans les travaux industriels. Des courbes QV se définissent de la même manière.

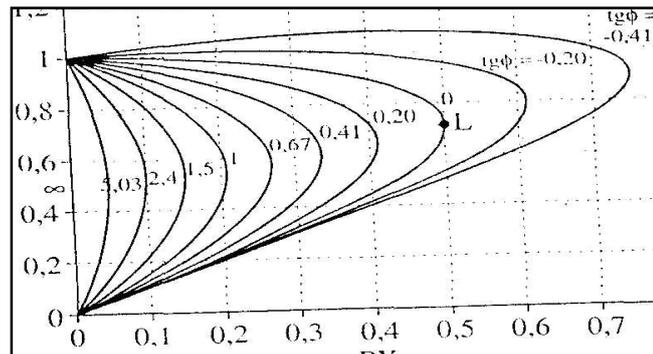


Figure 3.4. Évolution de la tension en fonction de la puissance consommé avec $FP=Cste$

3.5.4. Analyse de la stabilité de tension par des équations différentiels

Le problème de stabilité de tension peut être expliqué simplement par l'incapacité du réseau électrique de fournir la puissance réactive ou la consommation fameuse de la puissance réactive par le système lui-même. Donc il est considéré comme un problème de puissance réactive et est aussi un phénomène dynamique. En général, l'analyse de problème de la stabilité de tension d'un réseau donné devrait couvrir l'examen des aspects suivants:

- Comment ça se passe le phénomène de la stabilité et ces chutes ?
- Quand est-ce que l'instabilité de tension se produit ?
- Où est-ce que sont les taches vulnérables du système ?
- Quelles sont les facteurs contribuent au problème ?
- Quelles régions sont impliquées ?

L'analyse de la stabilité de tension exige souvent l'examen de plusieurs états du système et beaucoup de scénarios de la contingence. Pour cette raison, les approches qui sont basées sur l'analyse de l'état stable sont plus faisables, et ils peuvent fournir aussi des perspicacités au problème de stabilité de tension (puissance réactive). Quelques utilités utilisent les courbes QV à quelques jeux de barres (niveaux de la charge) [51] mais le problème de ces derniers (courbe QV) se concentrant sur des petits

nombre des jeux de barres, contrairement l'étude de la stabilité de tension dans les réseaux électriques demande des jeux de barres largement suffisante; donc ne sera pas dévoilé aisément (facilement).

Toutes les solutions des équations d'écoulement de puissance peuvent être complotées pour céder les courbes PV (La tension aux niveaux des jeux de barres de la charge de la puissance active) ou les courbes QV (La tension aux niveaux des jeux de barres de la charge de la puissance réactive) pour ce système.

➤ **Principe : générateur – Charge**

Le simple modèle générateur_ charge représenté dans Figure (3.5) peut être utilisé pour expliquer aisément le concept de base qui est derrière le phénomène de la stabilité de tension.

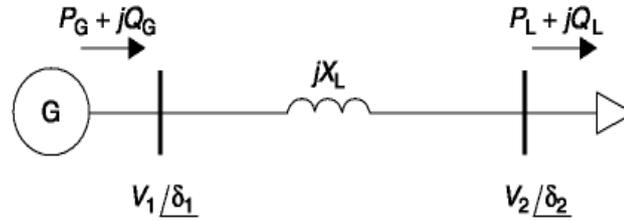


Figure 3.5. Exemple générateur – Charge

Ce modèle peut être représenté par les équations suivantes :

$$\dot{I}_2 = \dot{V}_2 \dot{Y}_s + \left(\dot{V}_2 - \dot{V}_1 \right) \dot{Y}_L = \frac{S_2^*}{V_2^*} \quad (3.1)$$

$$S_2^* = V_0^2 \dot{Y}_s + V_2^2 \dot{Y}_L - V_2^* \dot{V}_L \dot{V}_1 = V_2^2 \dot{Y}_{22} + \dot{V}_0 V_2^* \dot{Y}_{22} \quad (3.2)$$

Avec :

$$Y_{22} = \dot{Y}_s + \dot{Y}_L \text{ Et } \dot{V}_0 = \frac{\dot{Y}_L}{\dot{Y}_s + \dot{Y}_L} \dot{V}_1 \quad (3.3)$$

Pour résoudre $\left| \dot{V}_2 \right|$; il est exigé de résoudre le complexe de l'équation (3.2) ; On suppose que

$$\frac{S_2^*}{\dot{Y}_{22}} = P + jQ ; \text{ L'équation (3.2) :}$$

$$\frac{S_2^*}{\dot{Y}_{22}} = P + jQ = V_2^2 + \dot{V}_0 V_2^* = V_2^2 + V_0 V_2 \cos(\delta_0 - \delta_2) + j V_0 V_2 \sin(\delta_0 - \delta_2) \quad (3.4)$$

$$\text{D'où : } \dot{V}_0 = V_0 \angle \delta_0$$

$$\cos(\delta_0 - \delta_2) = \frac{P - V_2^2}{V_0 V_2} \quad (3.5)$$

$$\sin(\delta_0 - \delta_2) = \frac{Q}{V_0 V_2} \quad (3.6)$$

D'après la somme de l'équation (3.5)² + (3.6)²; on obtient :

$$V_0^2 V_1^2 = (P - V_1^2)^2 + Q^2 = P^2 - 2P V_1^2 + V_1^4 + Q^2 \quad (3.7)$$

La solution de l'équation (3.7) devient comme suit

$$V_2 = \sqrt{\frac{V_0^2}{2} + P \pm \sqrt{\frac{V_0^4}{4} + P V_0^2 - Q^2}} \quad (3.8)$$

Quand $\sqrt{\frac{V_0^4}{4} + P V_0^2 - Q^2} = 0$, la tension au niveau de jeu de barre 2 soumis à une chute de tension. En revanche, l'équation (3.5) + (3.6) est aussi

$$\begin{aligned} f(V_2, \delta) &= V_0 V_2 \cos \delta + V_2^2 = P \\ g(V_2, \delta) &= V_0 V_2 \sin \delta = Q \end{aligned} \quad (3.9)$$

A partir de l'équation (3.9); il est facile de trouver la matrice Jacobienne :

$$J = \begin{bmatrix} 2V_1 + V_0 \cos \delta & -V_1 V_0 \sin \delta \\ V_0 \sin \delta & V_1 V_0 \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Si la chute de tension au niveau de jeu de barre est subit; dans ce cas on peut dire qu'il n'y a aucune solution pour l'équation; puis son déterminant doit être égal à zéro :

$$\det(J) = 2V_2^2 V_0 \cos \delta + V_2 V_0^2 = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{V_2 \cos \delta}{V_0} = -\operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_0} \right\} \quad (3.11)$$

Quand l'équation (3.2) est divisée par $V_2^2 Y_{22}$, il devient:

$$\frac{S_2^*}{V_2^2 \dot{Y}_{22}} = 1 + \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_2} \quad (3.12)$$

Quand la tension s'écroule, il est dit que $\operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_0} \right\} = -\frac{1}{2}$; lequel implique cela : $\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_0} = -\frac{1}{2} + jC$

D'où :

$$\left| 1 + \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_2} \right| = \left| 1 + \frac{1}{-\frac{1}{2} + jC} \right| = 1 \quad (3.13)$$

L'équation (3.12) et (3.13), un indicateur de la stabilité de tension est défini comme :

$$\left| 1 + \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_2} \right| = \frac{S_2^*}{V_2^2 \dot{Y}_{22}} = \frac{S_2}{V_2^2 Y_{22}} \quad (3.14)$$

De cette façon un indicateur a été dérivé lequel peut être utilisé pour diriger le problème de la stabilité de tension du système et pour répartir le degré de risque pour une possibilité d'une chute de tension. Quand $S_2 = 0$, l'indicateur sera zéro ; et indique qu'il n'y aura aucun problème de tension. Quand $S_2 = 1$ la tension au niveau de jeu de barre de la charge s'écroulera.

Un exemple d'un générateur_ charge : $V_1 = 1 \angle 0$ $Y_S = 0$ $Y_L = -j4$ ($X = j0.4$) $FP = 0.97$

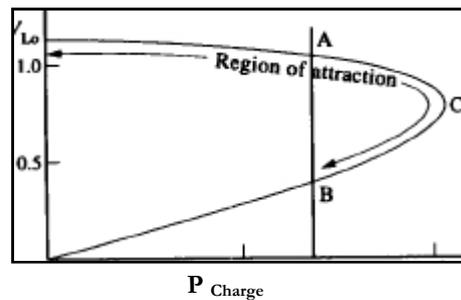


Figure 3.6. La tension de charge en fonction de la puissance délivrée

➤ Généralité pour n Jeux de Barres

D'après le théorème de base d'un système énergétique multi-jeux de barres, tous ces derniers peuvent être divisés en deux catégories: Les jeux de barres de générateur (jeu de barre PV et jeu de barre de référence) et les jeux de barres de Charge (PQ). Puisque le problème de la stabilité de tension est de problème de la puissance réactive relatif, et le jeu de barre de générateur peut fournir la puissance réactive, de supporter la magnitude de tension au niveau de jeu de barre, c'est absolument nécessaire que tous les jeux de barres soient distingués.

Le réseau électrique peut être exprimé à travers la forme de Kirchoff :

$$I_{Syst} = \begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{LG} \\ Y_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} = Y_{Syst} V_{Syst} \quad (3.15)$$

L veut dire le jeu de barre de charge, et G veut dire le jeu de barre de Générateur.

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & -Z_{LL}Y_{LG} \\ Y_{GL}Z_{LL} & Y_{GG} - Y_{GL}Z_{LL}Y_{LG} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

D'où : $Z_{LL} = Y_{LL}^{-1}$

Pour tous les jeux de la charge $j \in L$, à travers l'équation (3.16), la tension au jeu de barre est connu comme suit :

$$V_j = \sum_{i \in L} Z_{ji} \dot{I}_i + \sum_{K \in G} Z_{jk} \dot{V}_K \quad ; \quad A = -Z_{LL}Y_{LG} \quad (3.17)$$

Lequel peut être exprimé comme:

$$V_{2j}^2 + \dot{V}_{0j} V_j^* = \frac{S_j^{*'}}{Y'_{jj}} \quad (3.18)$$

Nous avons $S_j^{*'} / Y'_{jj} / \dot{V}_{0j}$ est défini comme suit :

$$\dot{V}_{0j} = - \sum_{K \in G} A_{kj} V_K \quad (3.19)$$

$$Y_{jj} = \frac{1}{Z_{jj}} \quad (3.20)$$

D'où, nous voyons que la tension au niveau de jeu de barre de la charge j est affectée par une puissance complexe équivalente $S_j^{*'}$ et par une partie du générateur équivalente \dot{V}_j

$$\dot{S}_j' = \sum \frac{Z_{ij}^* \dot{S}_i}{Z_{jj}^* U_i} \times \dot{V}_j = \dot{S}_i + \sum \frac{Z_{ij}^* \dot{S}_i}{Z_{jj}^* U_i} \times \dot{V}_j \quad (3.21)$$

D'après l'équation (3.21) et (3.2), nous pouvons observer qu'ils ont une forme identique, et la stabilité de tension du système multi-jeux de barres a été équivalente à un réseau simple générateur- charge.

3.6. Classification de la stabilité de tension

On peut classer la stabilité de tension en deux catégories : celle de grande perturbation, et celle de petite perturbation : [56]

a. Stabilité de tension de grande perturbation

La Stabilité de tension de grande perturbation se réfère à la capacité d'un réseau électrique de maintenir la tension stable lorsque est soumis à des fortes perturbations tel que: les défauts des court- circuits et les pertes de synchronisme des générateurs de forte puissance. Cette capacité est déterminée par le système (réseau) et les caractéristiques des charges

La détermination de la stabilité de tension de grande perturbation exige l'examen de la repense non linéaire de réseau pendant un certain temps suffisant capturer la performance dynamique d'interaction de tel appareil. Le délai d'intérêt les problèmes de ce type peuvent varier de quelques secondes à dizaines de minute. [56]

b. Stabilité de tension de petite perturbation

La Stabilité de tension de petite perturbation se réfère à la capacité d'un réseau électrique de maintenir la tension stable lors soumis à une petite perturbation tel que : les variations des charges. Le période d'intérêt peut atteindre de quelques secondes à quelques minutes, et elle peut prendre une courte durée ; comme de long durée.

3.6.1. Parades contre L'instabilité de tension

Il est clair que le remède le plus efficace est la construction de nouvelles lignes de transport et/ou l'installation des nouvelles centrales près des centres de consommation. Cependant, dans les nombreux cas ou des contraintes environnementales. [57]

➤ ***Compensation***

La compensation *shunt* est le moyen traditionnel de fournir in puissance réactive requise pour maintenir un bon profil de tension. Les bancs de condensateurs sont places près des charges pour en améliorer le facteur de puissance et dans les réseaux de répartition pour en compenser les pertes réactives.

La compensation série est no moyen très efficace de diminuer les impédances des longues lignes de transport et les chutes de tension qui les accompagnent.

➤ ***Automates et régulateurs***

Certains dispositifs qui contribuent à soutenir la tension suite à une perturbation normale peuvent également contribuer à stabiliser en cas d'urgence.

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude globale sur la stabilité de tension dans les réseaux électriques : en un premier temps ; nous avons présenté un état de l'art sur les problèmes de la stabilité tenant compte ces différents classifications et ces principaux facteurs qui contribuent au problème puis on s'intéresse a une étude particulière de la stabilité de tension dans les réseaux électriques avec ces définitions et ces analyses.

Chapitre 04

ETUDE DE LA STABILITE DE TENSION: FERMES EOLIENNES A VITESSE FIXE

4.1. Introduction

L'étude de la stabilité de tension consiste à analyser la tension au niveau des quelques jeux de barres à la suite d'une petite perturbation en diverses positions du système électrique. Pour cela, des simulations sont effectuées sur quelques réseaux électriques tests IEEE de tailles différentes, avec et sans l'intégration de parc éolien. La simulation effectuée sous environnement Matlab, en utilisant le PSAT, le comportement dynamique d'un système électro-énergétique et le problème de la stabilité est prévue pour nous donner des informations prédictives sur : La stabilité des machines (angle rotorique, vitesses angulaire), les valeurs crêtes de tension, les puissances actives et réactives générées... etc., à la suite des petites ou importantes perturbations.

Dans ce chapitre, on étudie l'influence de l'intégration d'une ferme éolienne à vitesse fixe dans le réseau électrique, vis-à-vis de la stabilité de tension. Pour se faire, on a considéré des réseaux tests de différentes tailles.

4.2. PSAT comme outil de simulation

Le PSAT (Power System Analysis Toolbox), figure (4.1), est une boîte à outils dans le Matlab qui sert à analyser les systèmes électro-énergétiques et leur contrôle. Dans notre étude, on a choisi le PSAT comme logiciel de simulation pour valider les modèles étudiés.

4.2.1. Fenêtre de PSAT

Le PSAT inclut : [40]

- L'écoulement de puissance basé sur la méthode de Newton Raphson.
- L'écoulement de puissance continu.
- L'écoulement de puissance optimal.

. Toutes les opérations de PSAT peuvent être réparties en deux genres d'analyse :

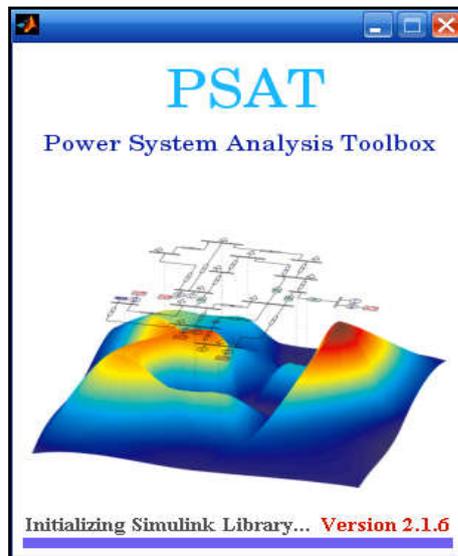


Figure 4.1. Fenêtre de PSAT

4.2.2. Editeur de PSAT

L'analyse des problèmes de l'écoulement de puissance s'effectue dans une page de commande ou un éditeur comme montre la figure (4.2 (a)).

4.2.3. Bibliothèque de SIMULINK

La seconde analyse est d'implanter le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque de Simulink qui contient de nombreux modèle pour l'implantation les systèmes électriques, figure (4.2 (b)).

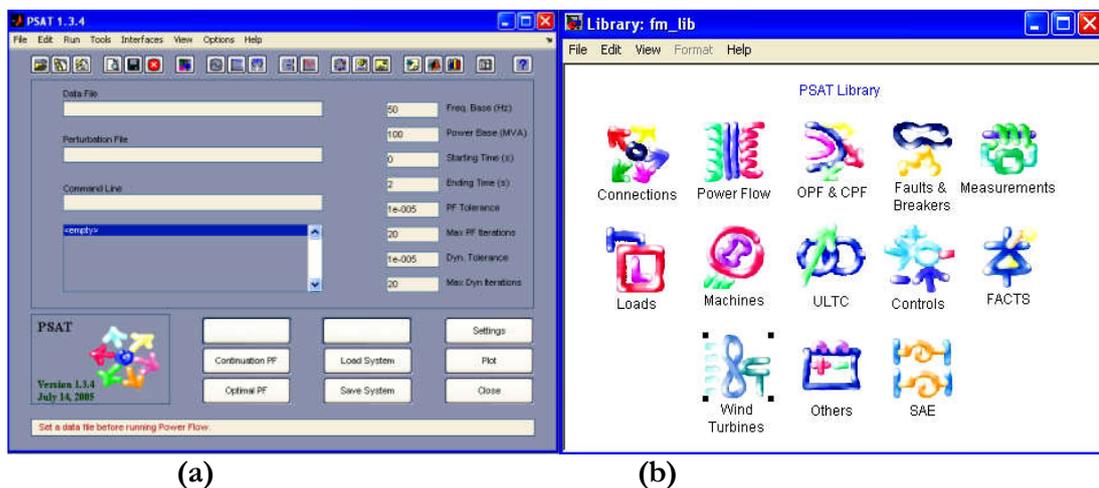


Figure 4.2. L'éditeur de PSAT (a) et bibliothèque de Simulink (b)

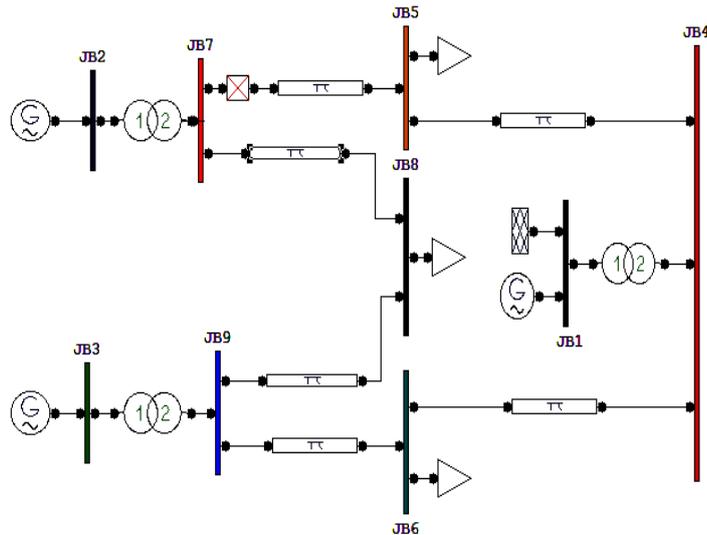
4.3. Application sur quelques réseaux tests avec et sans intégration d'éoliennes

4.3.1. Première application

4.3.1.1. Sans l'intégration de la ferme éolienne

Cette première application consiste à simuler le comportement de réseau test représenté dans la figure (4.3), qui est constitué de : 9 jeux de barres ; 3 charges statiques ; 3 machines.

En affectant un défaut symétrique à 60 Hz : on déconnecte la ligne 7-5 avec une base puissance de : S



= 100 MVA.

Figure 4.3. Réseau test de 9 jeux de barres

Tous les paramètres de ce réseau sont détaillés dans l'annexe B.1.

Pour analyser le problème de la stabilité de tension, et pour valider les résultats du programme de simulation en utilisant le PSAT, ce dernier permet de résoudre le problème par la méthode d'écoulement de puissance.

➤ Simulation

L'exécution du programme PSAT nous a permis d'obtenir les résultats de simulations représentés dans les figures (4.4) ; (4.5)

Les figures 4.4 (a), 4.4 (b), 4.4 (c), 4.4 (d) représentent respectivement les tensions aux jeux de barres (1, 2,3), (4, 5,6), (7, 8,9) et son spectre.

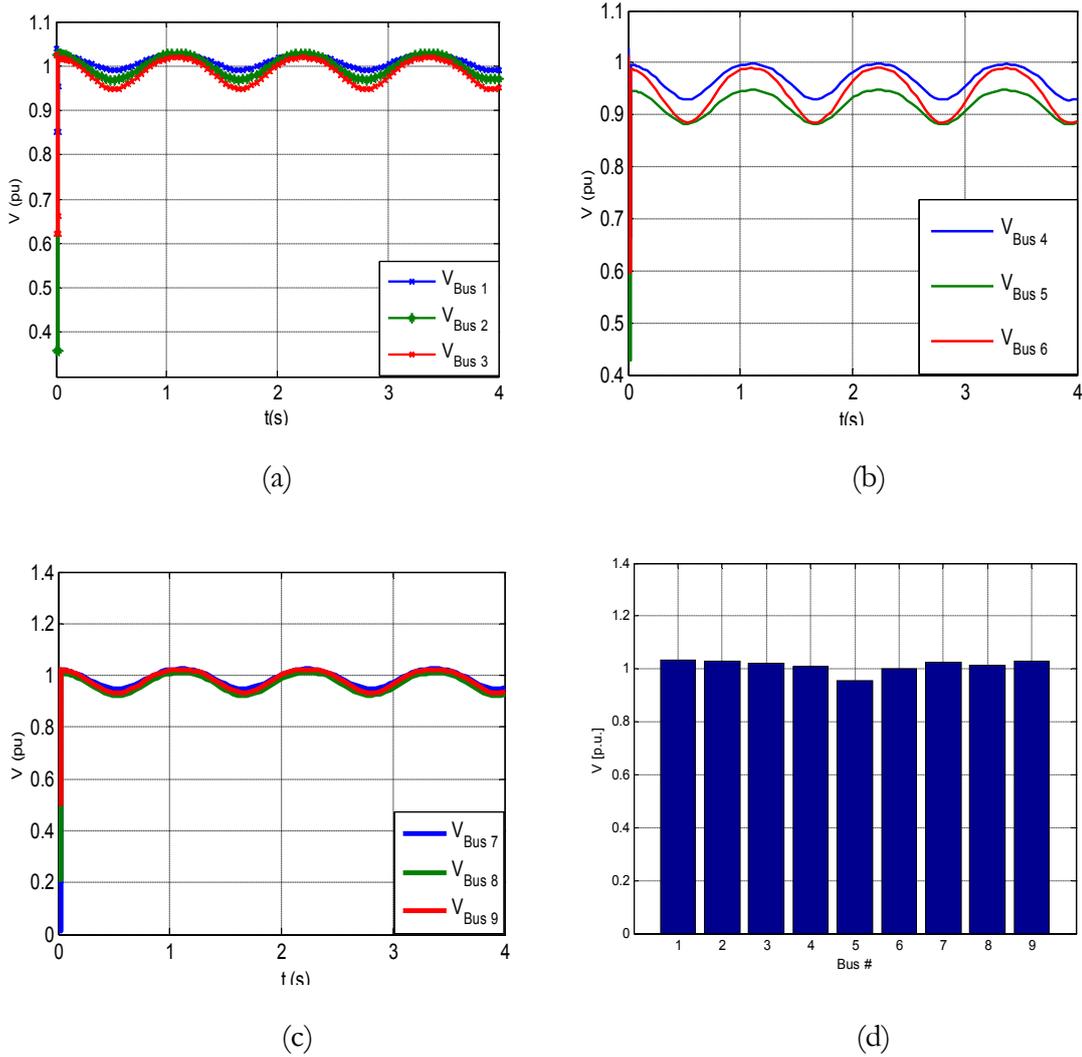


Figure 4.4. Simulation d'un réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres

- a- Tension aux jeux de barres de connexion des générateurs (1, 2,3) [pu]
- b- Tension aux jeux de barres (4, 5,6) [pu]
- c- Tension aux jeux de barres (7, 8,9) [pu]
- d- Spectre des tensions aux jeux de barres. [pu]

Les figures 4.5 (a), 4.5 (b), représentent respectivement les puissances réactives et actives aux jeux de barres de connexion.

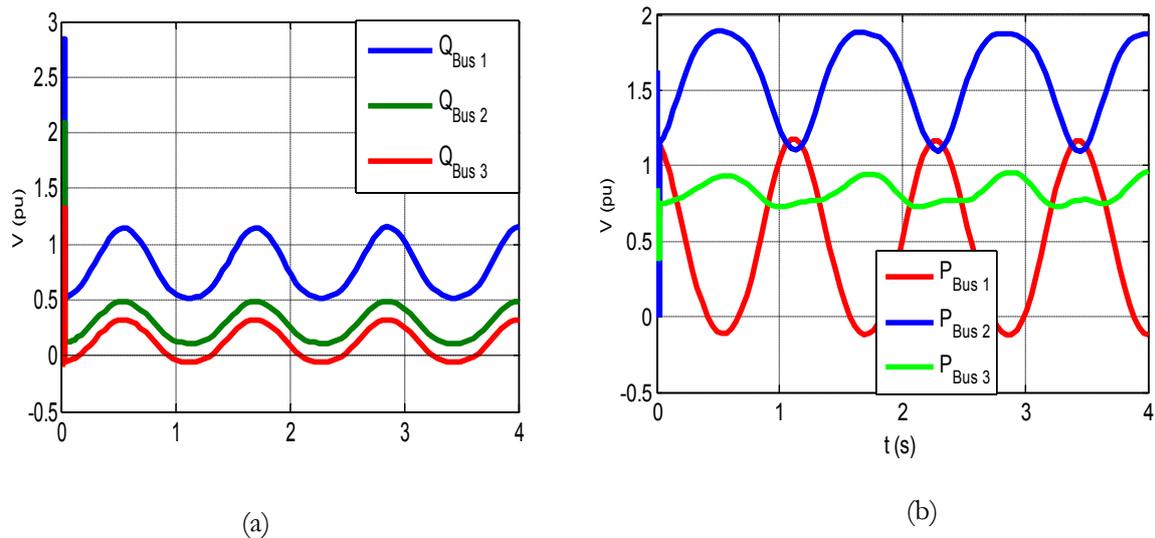


Figure 4.5. Simulation d'un réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres

a- Les puissances actives aux jeux de barres de connexion [MW]

b- Les puissances réactives aux jeux de barres de connexion [MVAR]

L'exécution de programme PSAT nous a permis d'obtenir des résultats numériques représentés dans le tableau (4.1) :

N° JB	Tension [pu]
<i>1</i>	0.99683
<i>2</i>	0.98557
<i>3</i>	0.96028
<i>4</i>	0.92097
<i>5</i>	0.87466
<i>6</i>	0.87314
<i>7</i>	0.94321
<i>8</i>	0.91524
<i>9</i>	0.92339

Tableau 4.1. La tension aux niveaux des jeux de barres lors la déconnexion de ligne [7-5]

Les tensions aux différents jeux de barres sont en valeurs normalisées comprises entre 0.87314 [pu] et 0.99683 [pu].

➤ *Interprétation des résultats*

On constate que pendant la déconnexion de la ligne [7-5] une chute de tension importante apparaît aux bornes des jeux de barres de connexion. Lors, $t = 0.0250s$, les tensions oscillent longuement. Du fait que la puissance électrique fournie est en fonction de la tension, elle diminue considérablement.

D'après les valeurs du tableau ; on remarque bien qu'il y a un abaissement de la tension au niveau des jeux de barre qui atteint une valeur de 16 % de la tension nominal du réseau. Cette tension dépasse la marge de la stabilité de la tension.

4.3.1.2. Avec l'intégration de la ferme éolienne

Les simulations réalisées dans cette première application ont démontré la fonctionnalité et l'efficacité d'analyser l'impact de l'intégration des fermes éoliennes dans un réseau électrique représenté dans la figure (4.6), ainsi l'étude de la stabilité de tension à la suite d'une perturbation donnée.

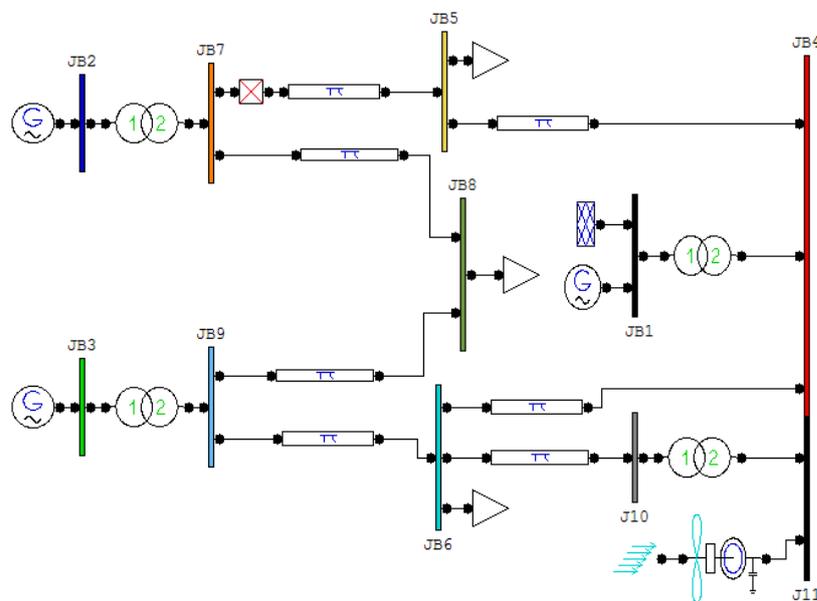


Figure 4.6. Intégration de la ferme éolienne au réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres

Simulation

Les figures 4.7(a) et 4.7(b) représentent respectivement les tensions dans tous les jeux de barres et son spectre.

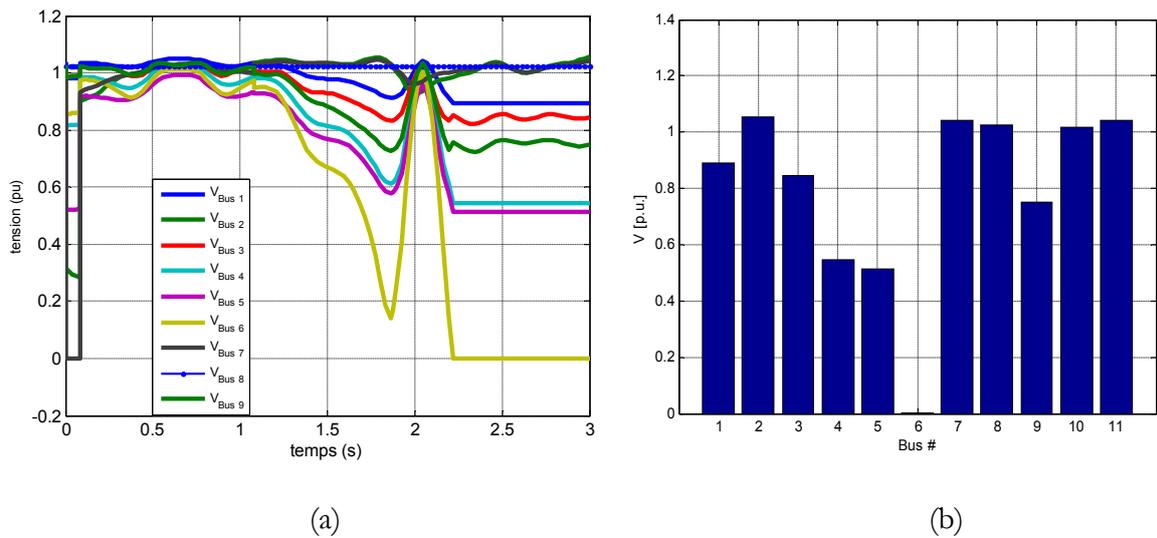


Figure 4.7. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs 11 jeux de barres

- a- La tension aux jeux de barres [pu].
- b- Le spectre des tensions [pu].

Les figures 4.8 (a) et 4.8 (b) représentent respectivement le déphasage entre le courant et la tension et la tension aux jeux de barres (10, 11) en [pu].

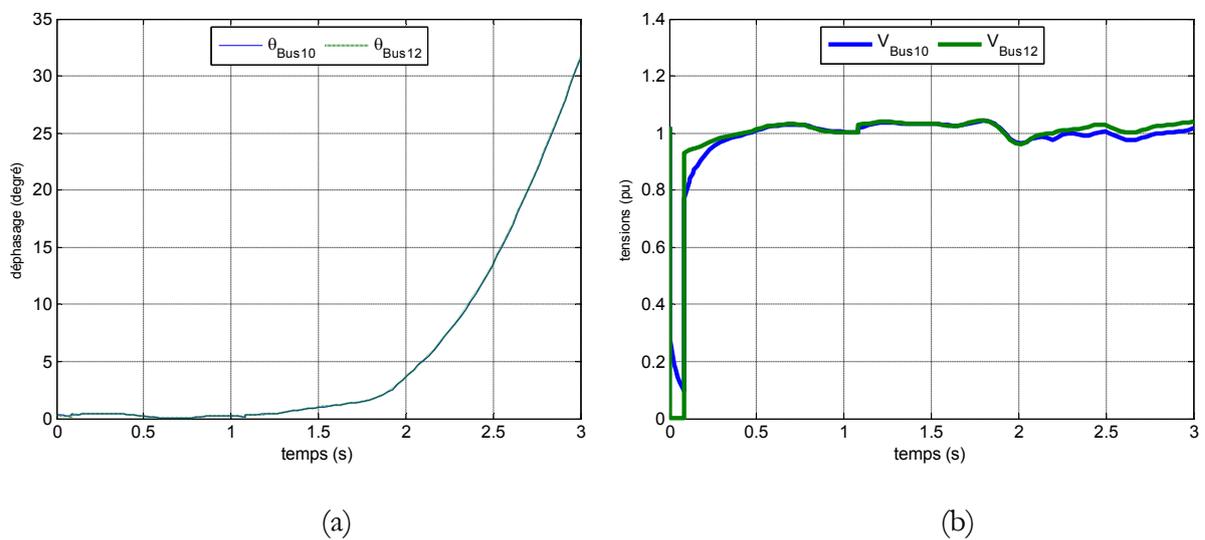


Figure 4.8. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs 11 jeux de barres

- a- Le déphasage entre le courant et la tension [degré].
- b- La tension aux jeux de barres (10, 11) [pu].

Les figures 4.9 (a) et 4.9 (b) représentent respectivement les puissances actives et réactives aux jeux de barres de connexion.

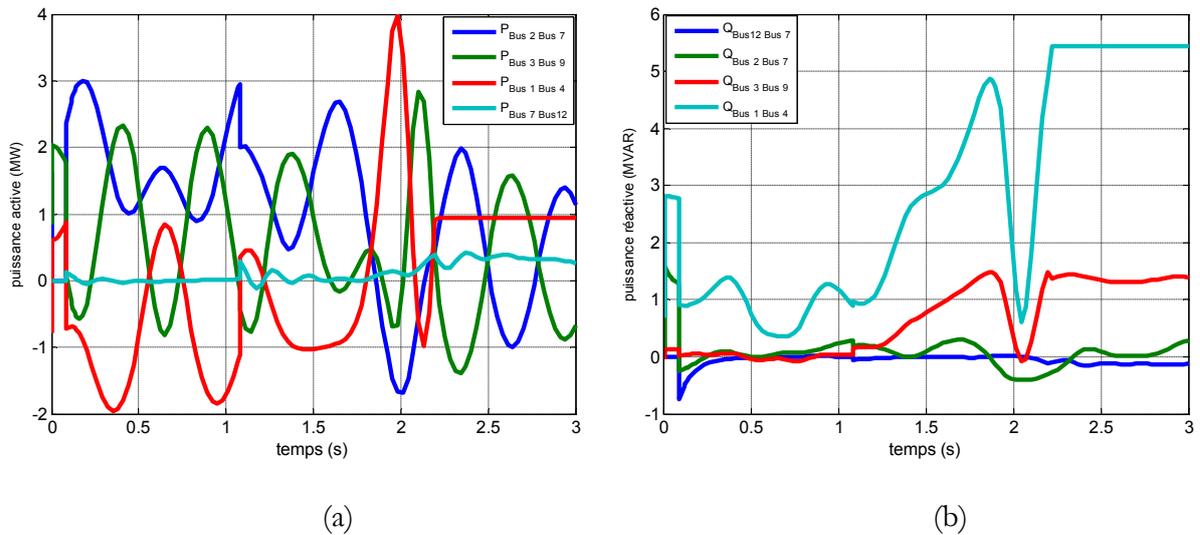


Figure 4.9. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres

- a- La puissance active générée [MW]
- b- La puissance réactive consommée [MVAR].

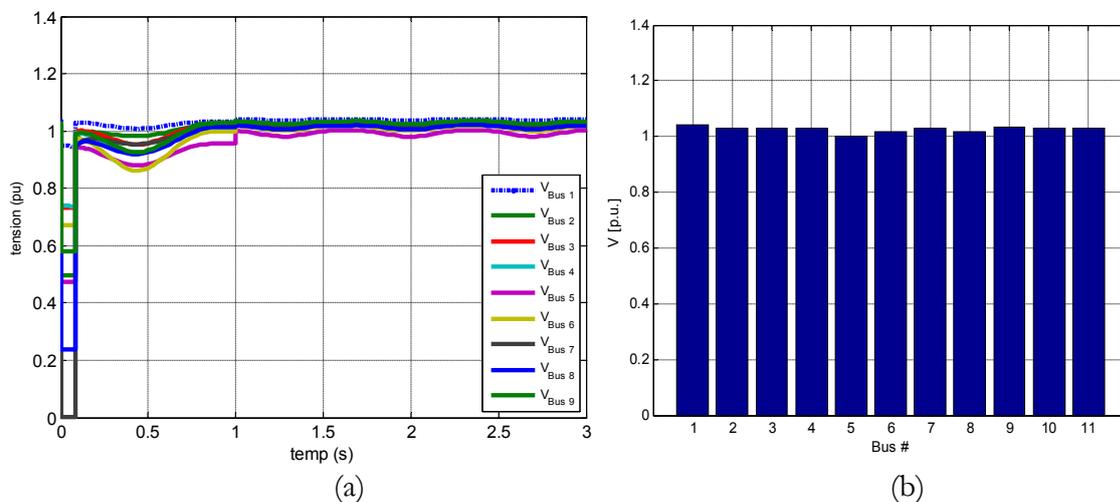
➤ **Interprétation des résultats obtenus**

Après la mise en service de la ferme éolienne ; on peut dire que le système a perdu sa stabilité.

4.3.1.3. L'intégration des régulateurs de tension (AVR)

➤ **Simulation**

Pour prévenir la stabilité de ce réseau, on ajoute des régulateurs de tension (AVR) au niveau des générateurs, on trouve les résultats de simulations montrées dans les figures (4.10)



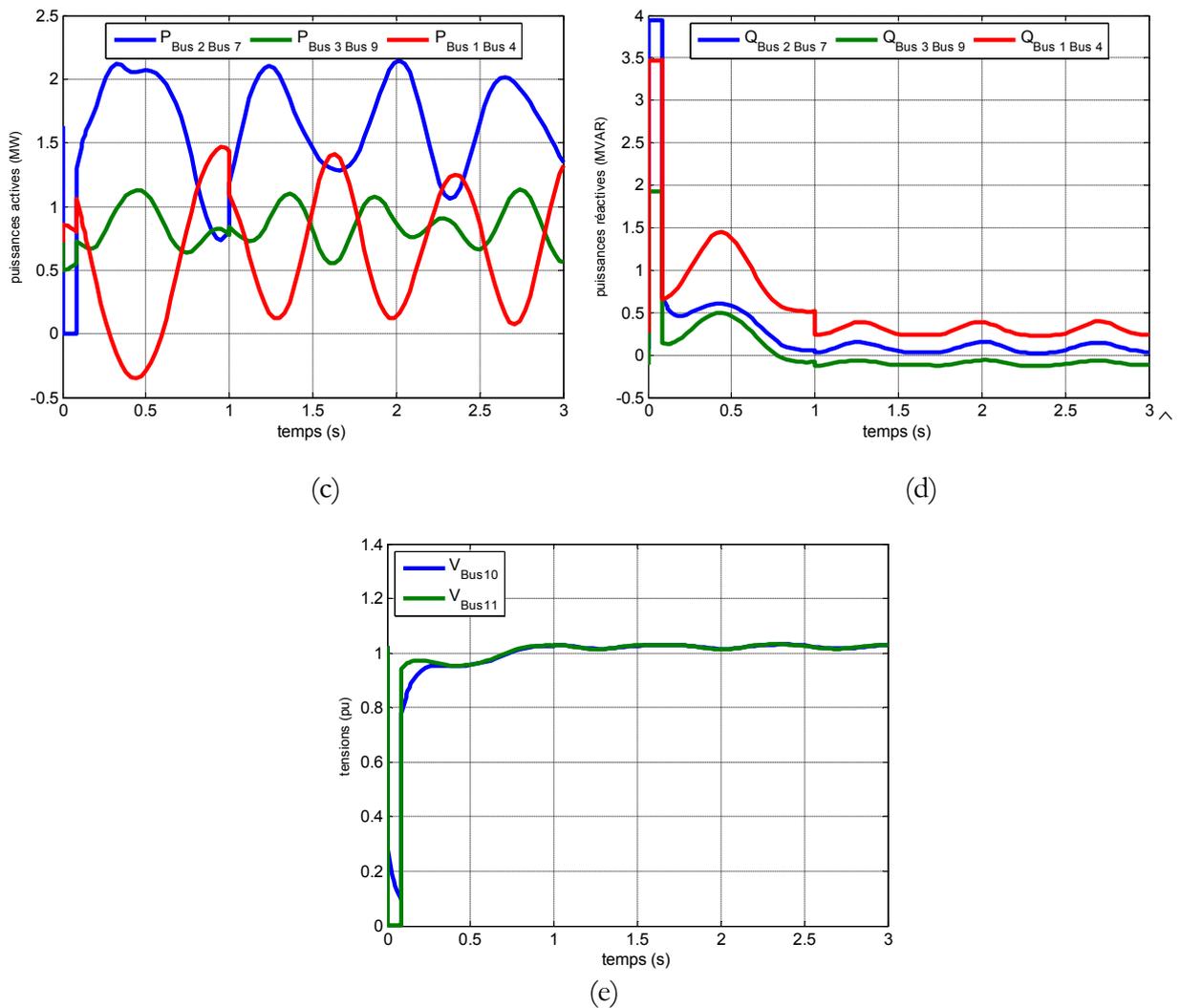


Figure 4.10. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs
9 jeux de barres avec AVR

- a- La tension au niveau de tous les jeux de barres
- b- Le spectre des tensions [pu].
- c- La puissance active générée [MW]
- d- La puissance réactive consommée [MVAR].
- e- La tension aux jeux de barres (10, 11) [pu].

➤ **Interprétation des résultats obtenus**

Après la mise en place des régulateurs de tension au niveau des générateurs, le système est revenu dans sa stabilité. Quand la demande de l'énergie électrique s'écarte de sa valeur normale, l'état du système change. Il faut que le système de régulation automatique détecte ce changement et commence à réagir en temps réel.

La tension au niveau de groupe de production subit à un réglage appelé réglage primaire de tension en agissant sur la tension du champ pour la maintenir égale à une valeur désirée. Pour cette raison, on utilise le régulateur à action continu qui a pour caractéristiques une grande rapidité ce qui permet de faire face aux variations aléatoire de la tension aux bornes de la machine et maintenir la stabilité du réseau.

4.3.2. Deuxième application

4.3.2.1. Sans l'intégration de la ferme éolienne

Cette application consiste à simuler le comportement de réseau test représenté dans la figure, (4.11), et constitué de:5 machines ; 2 générateurs et 3 compensateurs synchrones ; 14 jeux de barres ; 10 charges statiques. En déconnectant la ligne 2-4, donc en affectant un défaut symétrique à 60 Hz

Toutes les données sont exprimées en (pu) dans la base de puissance de : $S = 100$ MVA.

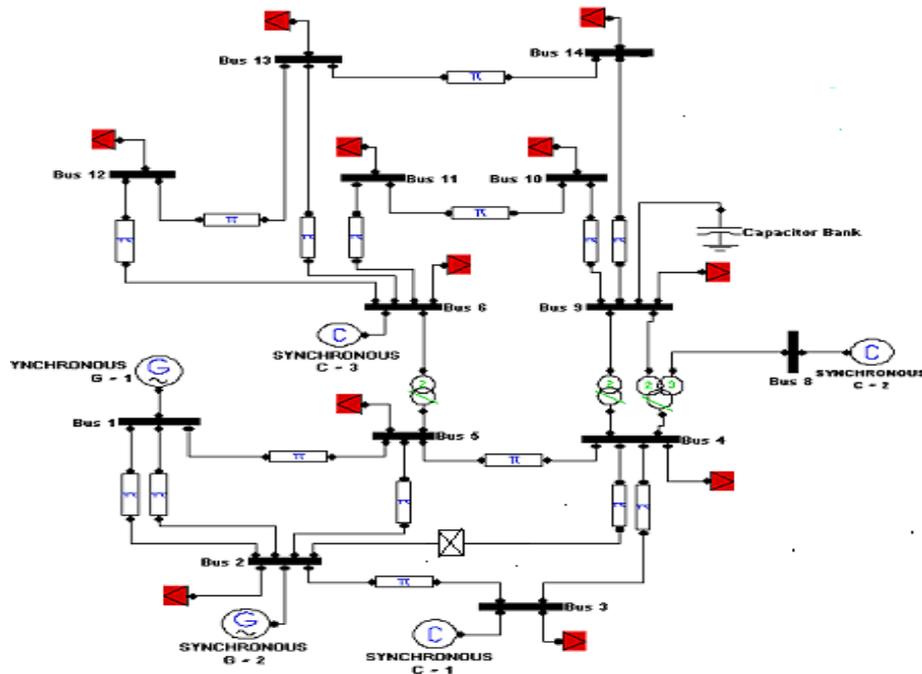


Figure 4.11. Réseau de 5 générateurs 14 jeux de barres

➤ Simulation

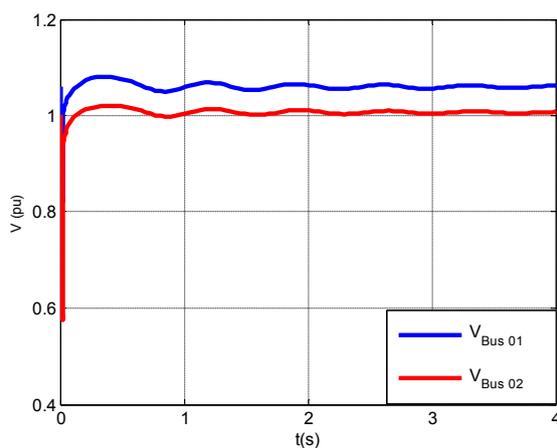
L'exécution de programme PSAT nous a permis d'obtenir des résultats représentés dans le tableau (4.2) :

N° JB	Tension [pu]	N° JB	Tension [pu]
<i>1</i>	1.0600	<i>8</i>	0.97619
<i>2</i>	1.0059	<i>9</i>	0.89816
<i>3</i>	0.92603	<i>10</i>	0.89547
<i>4</i>	0.90257	<i>11</i>	0.91675
<i>4twt</i>	0.92555	<i>12</i>	0.92456
<i>5</i>	0.9211	<i>13</i>	0.91465
<i>6</i>	0.94999	<i>14</i>	0.87646

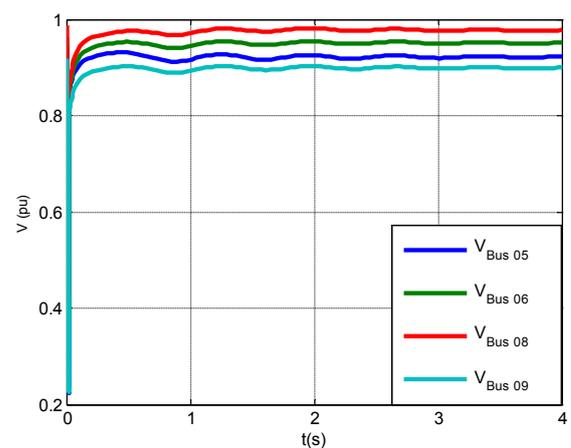
Tableau 4.2. La tension aux niveaux des jeux de barres lors de la déconnexion de la ligne [2-4]

Lors de la déconnexion de la ligne 2-4 ; en remarque bien que l'écroulement de la tension est plus sévère dans certain jeu de barre qui atteint 10 % de la tension nominale. Cette valeur n'est pas acceptable par les normes concernant la stabilité de la tension.

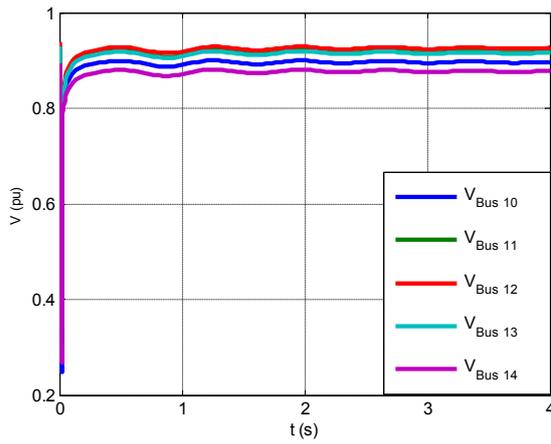
L'exécution de programme MATLAB/PSAT nous a permis d'obtenir les résultats de simulations représentées dans les figures (4.12) et (4.13). Les figures 4.12 (a), 4.12 (b), 4.12 (c), 4.12 (d) représentent respectivement les tensions aux jeux de barres (1, 2), (5, 6,8,9), (10, 11, 12, 13,14) et son spectre.



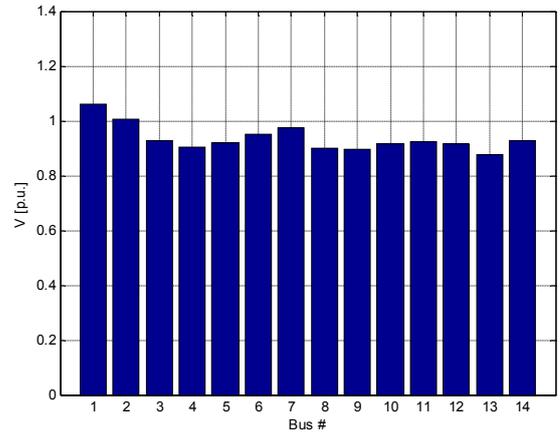
(a)



(b)



(c)

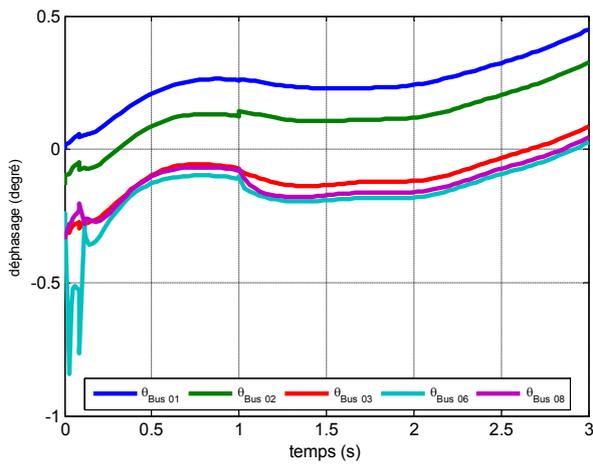


(d)

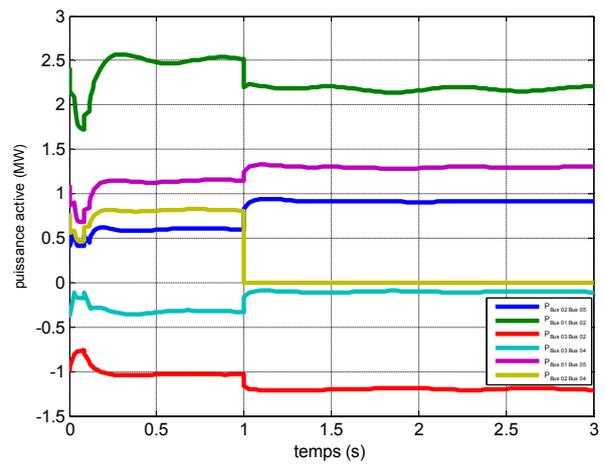
Figure 4.12. Simulation d'un réseau de 5 générateurs 14 jeux de barres

- a- Tension aux jeux de barres de connexion des générateurs (1, 2) [pu]
- b- Tension aux jeux de barres (3, 5, 6,9) [pu]
- c- Tension aux jeux de barres (10, 11, 12, 13,14) [pu]
- d- Spectre des tensions aux jeux de barres [pu]

Les figures 4.13 (a), 4.13 (b), 4.13 (c), 4.13 (d) représentent respectivement le déphasage entre le courant et la tension aux jeux de barres de connexion, ainsi que les puissances actives et réactive premièrement dans les jeux de barres 1, 2 et 3 ensuite dans le jeu de barre 6 et 8.



(a)



(b)

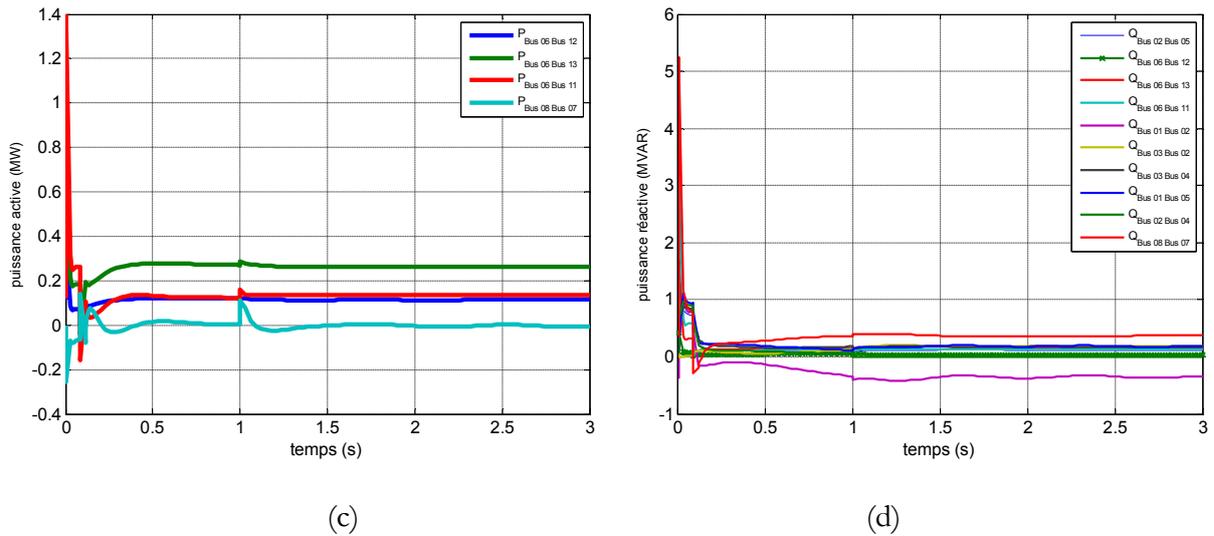


Figure 4.13. Simulation du réseau de 5 générateurs 14 jeux de barres

- a- Le déphasage entre le courant et la tension aux jeux de barre de connexion [degré].
- b- La puissance active aux jeux de barres de connexion (1, 2,3) [MW]
- c- La puissance active aux jeux de barres de connexion (6,8) [MW]
- d- La puissance réactive aux jeux de barres de connexion [MVAR]

➤ *Interprétation des résultats obtenus*

La puissance électrique fournie et en fonction de la tension, elle diminue pendant le défaut, alors une énergie d'accélération importante apparaît au niveau des rotors des machines, ce qui provoque une augmentation des vitesses rotoriques et par conséquent les angles de charge.

4.3.2.2. Avec l'intégration de la ferme éolienne

Les simulations réalisées dans cette application ont également démontré la fonctionnalité et l'efficacité d'analyser l'impact de l'intégration des fermes éoliennes éolienne dans un réseau électrique représenté dans la figure (4.14) ainsi l'étude de la stabilité de tension à la suite d'une perturbation donnée

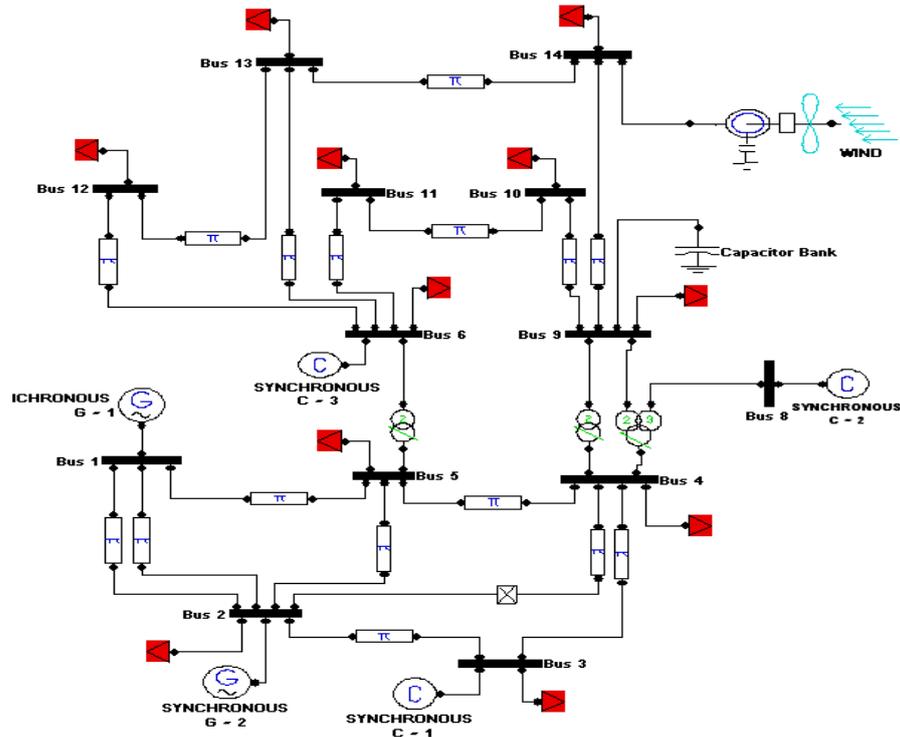


Figure 4.14. Intégration de la ferme éolienne au réseau de 5 générateurs 14 jeux de barres

On Intégrant une ferme éolienne de 1.5 MW au niveau de jeu de barre N°14 modélisée par une seule éolienne équivalente. Puis en affectant une déconnexion dans la ligne 2-4

➤ Simulation

L'exécution de programme PSAT nous a permis d'obtenir des résultats représentés dans le tableau (4.3)

N° JB	Tension [pu]	N° JB	Tension [pu]
<i>1</i>	1.07400	<i>8</i>	0.98945
<i>2</i>	1.0496	<i>9</i>	0.95828
<i>3</i>	1.0052	<i>10</i>	0.9524
<i>4</i>	0.9531	<i>11</i>	0.96529
<i>4twt</i>	0.9702	<i>12</i>	0.97296
<i>5</i>	0.9637	<i>13</i>	0.97139
<i>6</i>	0.9895	<i>14</i>	0.9894

Tableau 4.3. Intégration de la ferme éolienne au réseau de 5 générateurs 14 jeux de barres

L'exécution de programme MATLAB/PSAT nous a permis d'obtenir les résultats de simulations représentées dans les figures (4.15) et (4.16).

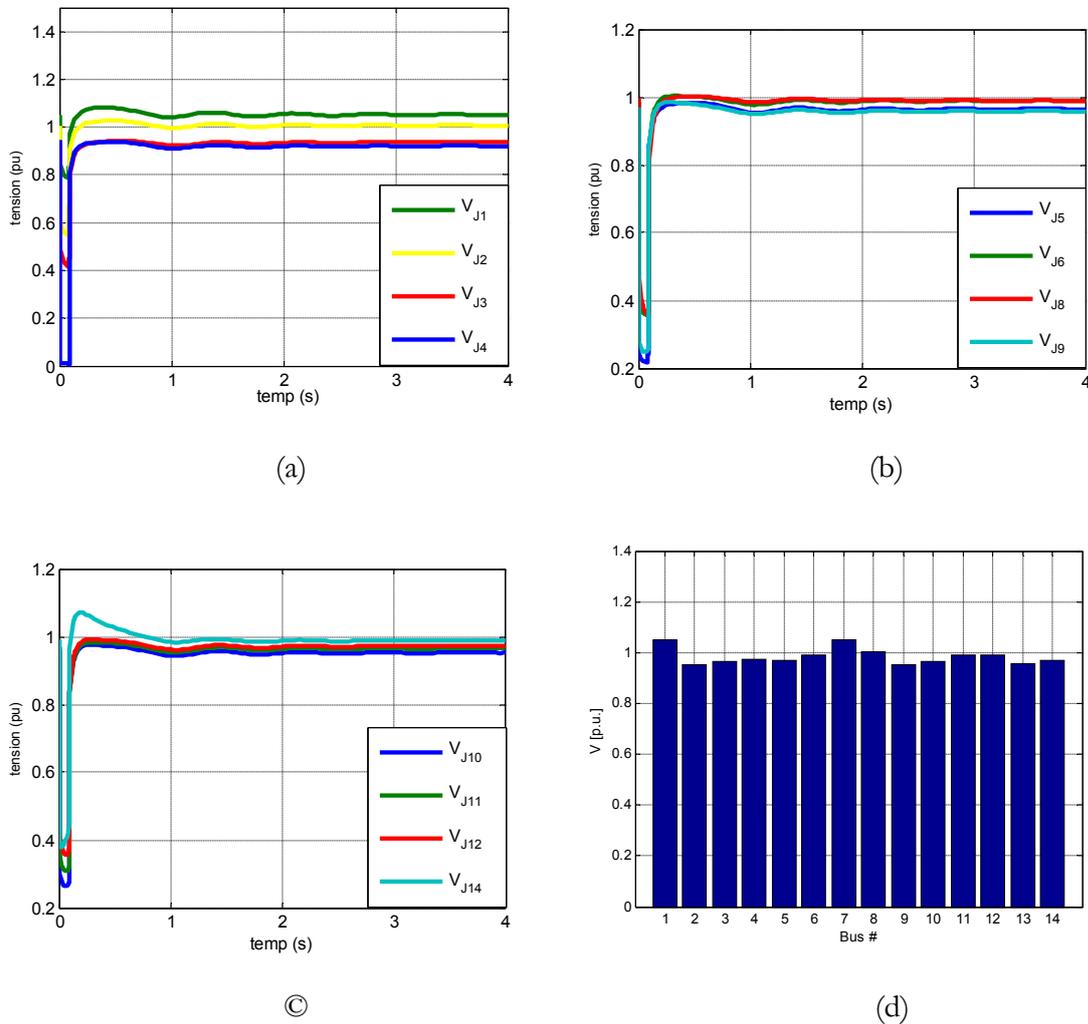


Figure 4.12. Simulation de la ferme éolienne dans un réseau de 14 jeux de barres

- a- Tension aux jeux de barres de connexion des générateurs (1, 2, 3) [pu]
- b- Tension aux jeux de barres (3, 4, 5, 6, 9) [pu]
- c- Tension aux jeux de barres (10, 11, 12, 13, 14) [pu]
- d- Spectre de tension aux jeux de barres

Les figures 4.16 (a), 4.16 (b) représentent les puissances actives et réactives aux jeux de barres de connexion 1, 2 et 3

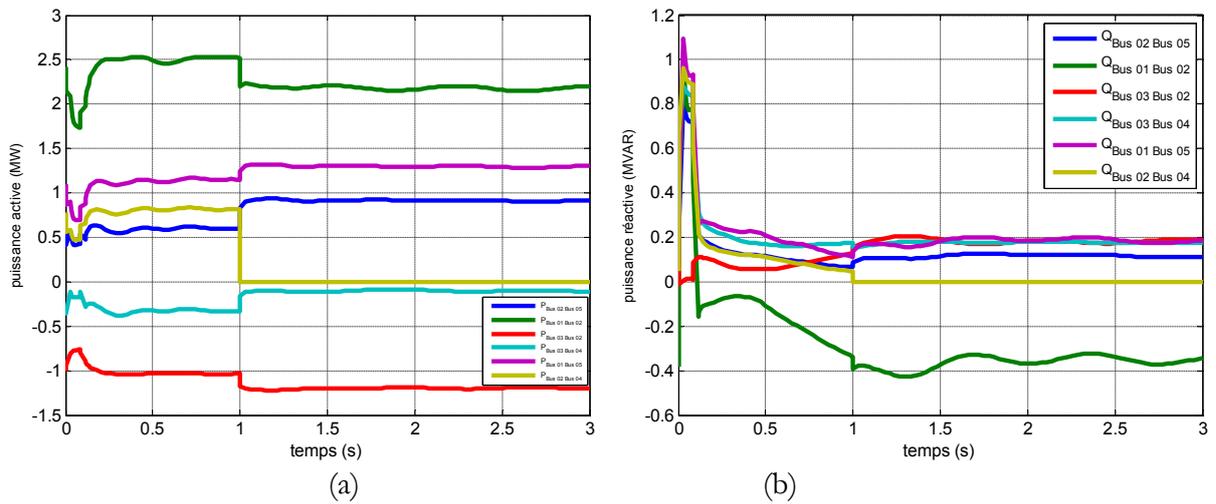


Figure 4.13. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 5 générateurs 16 jeux de barres

a- La puissance active aux jeux de barres de connexion (1, 2,3) [MW].

b- La puissance réactive aux jeux de barres de connexion (1, 2, 3) [MVAR].

Les figures 4.17 (a), 4.17 (b) représentent respectivement les puissances actives et réactives aux jeux de barres de connexion 6 et 8

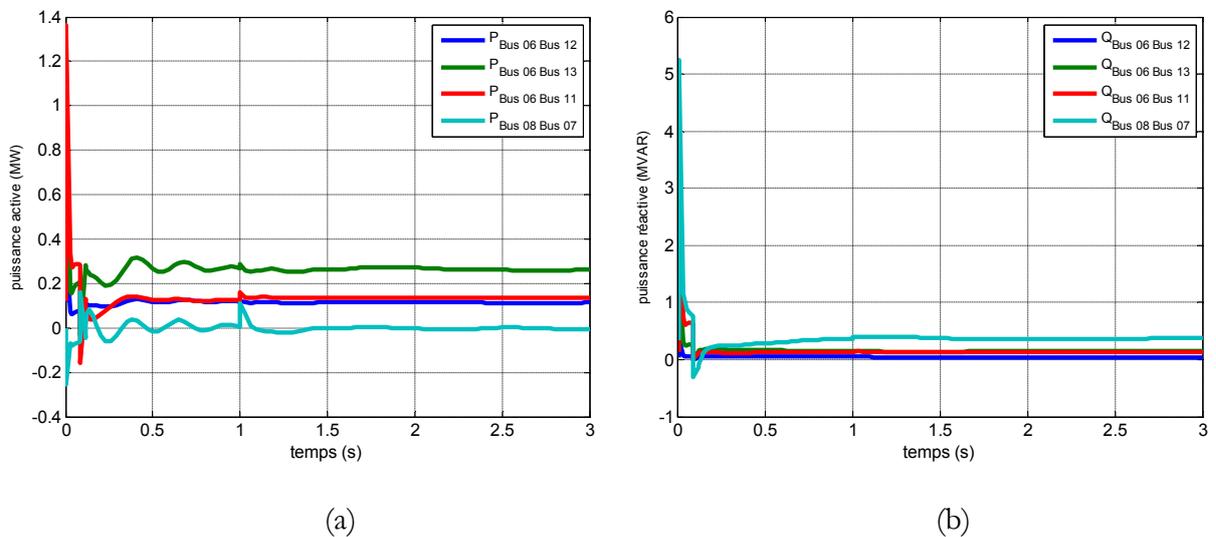


Figure 4.14. Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 5 générateurs 16 jeux de barres

a- La puissance active aux jeux de barres de connexion 6 et 8 [MW].

b- La puissance réactive aux jeux de barres de connexion 6 et 8 [MVAR].

➤ ***Interprétation des résultats obtenus***

L'intégration de la ferme éolienne produit une amélioration des tensions des nœuds duquel les valeurs après l'intégration sont comprises entre 0.9531 [pu] et 1.07400 [pu]. La figure 4.17(c) représente la puissance électrique fournie et en fonction de la tension, elle diminue pendant le défaut.

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un système de génération d'électricité par les éoliennes, susceptible de participer au réseau électrique. On a effectué deux applications pour la validation du modèle proposé.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

La principale caractéristique du vent réside dans sa variabilité, c'est pourquoi, il est important d'évaluer l'impact des fermes éoliennes sur la stabilité dans les réseaux électriques et en particulier, sur sa stabilité de tension. L'objectif de ce type d'étude qui est d'examiner le comportement du réseau face à des perturbations données. Comme nous avons pu le constater tout le long de ce mémoire.

Ce travail fait partie d'un projet de recherche réalisée par le CNEPRU sous le numéro. J0201220070019, mené au département d'Electrotechnique de l'université de Sétif. Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne.

Nous avons établi, dans le cadre de ce travail, dans un premier temps une vue générale sur les énergies renouvelables particulièrement l'énergie éolienne et leur impact sur la production d'électricité. En deuxième temps, nous avons abordé les différentes conversions électromagnétiques

Le travail mené avait l'objectif de mettre en œuvre les programmes de Simulink sous environnement Matlab, en utilisant le PSAT Toolbox, qui peut assurer un fonctionnement robuste vis-à-vis des perturbations qui affectent les réseaux électriques, telle que la variation des charges pour les faibles perturbations ou une déconnexion des lignes/court circuit pour les fortes perturbations,

Le premier et le deuxième chapitre respectivement rappelle sur les notions fondamentales d'un système éolien avec les équations qui s'y rapportent. Puis la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés où les conditions de couplage sont nécessaires. Enfin, étude et analyse de la stabilité de tension sur quelques réseaux de tests où le système éolien est intégré lors d'une importante perturbation (défaut : déconnexion des lignes) dans son régime transitoire.

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble des chaînes de conversion d'éolienne, dans le but est d'envoyer une énergie propre non polluante au réseau électrique, parmi les perspectives envisageables :

- Utilisation des systèmes FACT pour l'amélioration de la stabilité de tension dans les réseaux électriques
- Etudes de la stabilité de tension lors des défauts asymétriques.
- Intégration des fermes éolienne à vitesse variable dans un système électro énergétique

- Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ;
- Améliorer les commandes de l'onduleur, de titre exemple : la commande vectorielle, la commande par MLI.

Annexe A. Paramètre de la chaîne de conversion éolienne basée sur MAS

Annexe A.

Les paramètres mécaniques de la turbine éolienne de 1.5 MW basée sur une génératrice asynchrone, sont donnés dans le tableau (A.1).

Tableau A.1. Paramètres de l'éolienne de 1.5 MW

Valeur numérique du paramètre	Signification
Rayon de l'éolienne en m	$R=40$
Gain de multiplicateur de vitesse	$G=90$
Masse volumique de l'air (kg/m^3)	$\rho = 1.22$
Résistance statorique (Ω)	$R_s = 0.0089$
Résistance rotorique (Ω)	$R_r = 0.0137$
Inductance mutuelle (H)	$M=0.0126$
Inductance statorique (H)	$l_s = M + 2.5060e^{-4}$
Inductance rotorique (H)	$l_r = M$
Inertie de l'arbre ($kg.m^2$)	$J=1000$
Coefficient de frottement de la MAS	$f=0.0024$
Nombre de paire de pôles	$p = 2$

Annexe B. Paramètres des réseaux étudiés

B.1. Le réseau de 9 jeux de barres

➤ *Caractéristique des machines*

Tableau A.2. Caractéristique des machines

Paramètres	Centrale 1	Centrale 2	Centrale 3
Sn(MVA)	247.5	192	128
U(kV)	16.5	18	13.8
Facteur de puissance	1.0	0.85	0.85
Type	Hydraulique	Turbo	Turbo
W(tr/min)	180	3600	3600
X_d	0.1460	0.8958	1.3125
X'_d	0.0608	0.1198	0.1813
X_q	0.0969	0.8645	1.2578
X'_q	0.0969	0.1969	0.25

➤ *Caractéristique des lignes*

Tableau A.3. Caractéristique des lignes

NŒUD 1	NŒUD 1	R	X	B/2
1	8	0	0.0576	0
2	7	0	0.0625	0
3	9	0	0.0856	0
4	7	0.032	0.161	0.153
4	8	0.01	0.085	0.088
5	8	0.017	0.092	0.079
5	9	0.039	0.170	0.179
6	7	0.0085	0.072	0.0745
6	9	0.0119	0.1008	0.1045

Références Bibliographiques

- [1] BELFEDAL Chiekh, "Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies d'Oran, 2007.
- [2] Mission Découverte sur les Energies Renouvelables et la Maîtrise de l'Energie du 3 au 6 décembre 2006, disponible aux sites : www.neal-dz.com, www.sonelgaz.dz
- [3] Commission de régulation d'électricité et du gaz (CREG), Programme indicatif des bousions en moyens de production d'électricité 2006-2015 : janvier 2006
- [4] E.Muljadi, K.Pierce, P.Migliore, Control strategy for variable- speed,Stall regulated wind turbine,Presented at American .Controls Conference Philadelphia,PAJune 24-26,1998
- [5] R. Hoffman, P. Mutschler, " Comparison of wind turbines regarding their energy generation", PESC'02, Cairns, Australia, 23-27 June, 2002, CD
- [6] M. Deicke, R.W. De Doncker" Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines", IEEE Industry Applications Magazine, May - June 2000, 1077-2618/02, pp.26 - 33.
- [7] OWEE (Offshore Wind Energy in Europe), "Technology of Wind Energy", 25 fév 2003 www.offshorewindenergy.org
- [8] Energie éolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations, Editions Eyrolles, Paris, 1980, 267 p, disponible aux sites : www.energie-plus.com ; www.espace-eolien.fr
- [9] Dr. Gary, L. Johnson "Wind Energy Systems", Electronic Edition, 21 November, 2001
- [10] P. Berlu, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.

-
- [11] Frédéric POITIERS, "Etude et commande de générateurs asynchrones pour l'utilisation de l'énergie ", Thèse de Doctorat, l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [12] Ackermann T, Söder L., An Overview of Wind Energy-Status 2002. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, Vol. 6, pp. 67-128.
- [13] M.R.Dubois, Review of Electromechanical Conversion in Wind Turbines Report EPP00.R03 April 2000
- [14] Salma El Aimani, " Modélisation De Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension " ; Délivre Conjointement par L'école Centrale De Lille ; Université Des Sciences Et Technologies De Lille
- [15] B. "Aérogénérateur Electrique " Technique De L'ingénieur ,2004 D3960
- [16] MENY IVAN. "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance" Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier.
- [17] E.Muljadi, K.Pierce, P.Migliore, " A CONSERVATION Control strategy for variable-speed, Stall regulated wind turbine" Presented At The 19th American Society Of Mechanical Engineers (ASME) Wind Energy Symposium Reno ,Nevada January 10-13 2000
- [18] P.Bauer, S .W.H. de Haam, M.C.E Damen, J.T.G Pierik, "Tool for Evaluation of configuration of offshore wind parks: Models Of The Components EPE2001-Graz.
- [19] D. Schreiber, "State of art of variable speed wind turbines", 11th International symposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings.
- [20] R. Michaux, P. Letellier, "Les Machines Discoïdes à Champ Axial dans les Systèmes de Production Electrique", Revue de l'Electricité et de l'Electronique, N° 3, Mars 1997, pp.37-42.
- [21] L. Moreau. "Modélisation, Conception Et Commande De La Génératrice A Reluctance Variable A Basse Vitesse"

-
- [22] S. Taibi, «Contribution à l'étude, la conception, le dimensionnement et l'optimisation des machines à réluctance variable de type Vernier" Thèse de Doctorat de l'Université de Lille 1 (USTL), juillet 2002.
- [23] D.A. Torrey, "Switched Reluctance Generator and their Control, IEEE Transactions on Industrial"
- [24] D.Matt, J.F. Llibre, "Performances Comparées des Machines à Aimants et Réluctance Variable". Journal de Physique III, octobre 1995, pp. 1621-1641
- [25] M.Machemoum, L.Moreau, M.Zaim, C.Barakat, N.Takorabet, C.Chillet, D.Matt, S.Taibi, A.Tounzi, C. Espanet, A. Miraoui, H.S.Zire, "Comparaison de structures électromagnétiques pour des applications à faible vitesse et fort couple", RS série RIGE – 08/2005, maîtrise de l'énergie électrique, pp 259 à 286.
- [26] Iwabushi, N.Kawahara, A.Kurane, T.Kabashima, T.Nagasaka, N.Yaskawa, "A novel high-torque reluctance motor with rare-earth magnet", IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 30, Issue 3, pp. 609-614, May-June 1994.
- [27] J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.
- [28] A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.
- [29] C. Colliez, A. Tounzi, F. Piriou, "Vector Control of an Autonomous Induction Generator Connected to a PWM Rectifier", Proceedings of EPE 97, vol. 2, pp. 711-716, Trondheim, Norvège, 8-10 Septembre 1997.
- [30] "The Electrical Engineering Handbook Series", Editor Richard C. Dorf University of California, Davis Published in 2006 by CRC Press.
- [31] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.

-
- [32] L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi, A.G. Jack "Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-339.
- [33] G.A. Smith, K.A. Nigim, "Wind-energy Recovery by a Static Scherbius Induction Generator", Proc. IEE, 1981, 128, pp. 317-324.
- [34] Armand. Boyette "Control-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne, Thèse de Doctorat
- [35] M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaïm, G. Barakat, N. Takorabet, Ch. Chillet, D. Matt,
- [36] S.Taïbi, A.Tounzi, Ch.Espanet, A.Miraoui, H.S.Zire, "Comparaison de structures électromagnétiques pour une application en générateur à faible vitesse et fort couple, Aparâître dans "Electrotechnique du Futur" - 9 & 10 Décembre 2003, Gif-sur-Yvette.
- [37] Wilki, W. E. Leithead, C. Aderson, "Modelling of Wind turbines by simple models Wind engineering", vol. 14, No 4, 1990,pp.247-274.
- [38] S. El-Aimani, B. Francois, F. Minne, B. Robins, "Modeling and simulation of doubly fed induction generators for variable speed wind turbines integrated in distribution network" European conference on power electronics and applications, September 2003, Toulouse, France.
- [39] Tomas Petru." "Modelling of Wind Turbines for Power System Studies", Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2003.
- [40] A.Haniotis,A.Kladas and J.Tegopoulos, "A control procedure for permanent magnet variable wind turbine" Laboratory for electrical Machines Electric Power Division ; Departement of Electrical and computer Engineering ; National technical University of Athens 9 ;Iroon Polytechniou ;Street 15780 Athens ,Greece
- [41] Andrew T Leel ,Be(Hons) Richard GJ Flay2, Be(Hons),PhD,MIMechE ,(Fellow), "Compliant Blades For Wind Turbines" The Institution Of Professional Engineers New Zealand

-
- [42] Aland Mullane,G .Lightbody ,R.Yacamini, " Adaptive Control Of Variable Speed Wind Turbines" University College Cork
- [43] Roberto Cardenas,Ruben Pena,Ramon Balasco, "Flywheel Energy System Using A Vector Controlled Induction Machine" Department Of Electrical Engineering University Of Magallanes P.O113-D Punta Arenas Chile.
- F. Milano, L. Vanfretti, J. C. Morataya, An Open Source Power System Virtual Laboratory:
- [44] "The PSAT Case and Experience", IEEE Transactionson Education, vol. 51, no. 1, pp. 17-23, February2008.Available at: www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/
- A. D. Hansen, F. Iov, P. Sørensen, N. Cutululis, C. Jauch, F. Blaabjerg, "Dynamic wind turbine
- [45] models in power system simulationtool DIGSILENT", Risø National Laboratory Technical University of Denmark Roskilde, Denmark August 2007.
- [46] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability ", IEEE Press, New York.
- [47] B.Gao, G.K Morison, and P.Kundur , "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis" IEEE Trans ,Vol .Pwrs-7,N°4,Pp 1529-1542
- [48] Electrotechnique et application ", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D3 545, D4 025, D4 090 et D4 120Technique de l'ingénieur
- [49] Kundur p., "power system stability and control", ed. mcgraw hill inc., new york.
- [50] Michel Crappe, "Stabilité et Sauvegarde Des Réseaux Electriques" .621.319 1#CRA
- [51] C.Barbier, J.P.Barret "Analysis Of Phenomena Of Voltage Collapse On A Transmission System" Revue Générales D'électricité, Numéro Spécial, P.3-21,1980

-
- [52] A.J.Calvaer "Voltage Stability And Collapes : A Simple Theory Based On Real And Reactive Currents" Revue Générales D'électricité, Vol 8,P1-17,1986
- [53] CIGRE Task Force 38-01-03 ; "Plannig Against Voltage Collapse" Electra, Vol 111, P.55-57,1988
- [54] T.VAN Cutsem ,C.Vournas; "Voltage Stability Of Electrical Power System" Norwell ,Kluwer Academic Publishers,1998
- [55] Johansson, S."Long-term Voltage Stability in Power Systems - Alleviating the Impact of Generator Current Limiters". Technical Report No. 335, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. 1998.

ملخص

إن النمو القوي التي مرت به الطاقة الريحية على مدى العقد الماضي في أوروبا نجده نفسة الآن في العالم. وقدّم هذا النمو ممكنا بفضل العوامل المختلفة التي وجهت لإرادة سياسة الطاقوية للحصول على الطاقة.

السمة الرئيسية للرياح تكمن في التغير ، ولهذا السبب ، من المهم إن قيمة تأثير الرياح على الاستقرار على الشبكات الكهربائية.

بعد التطرق إلى المفاهيم العامة و المعادلات التي تحكم عمل المولدات الريحية و الآلات المستخدمة في هذا النظام في توليد الطاقة الكهربائية متبوع بدراسة شاملة لظاهرة استقرار الجهد، في الأخير اهتمنا بصفة خاصة بدراسة الحقول الريحية على الشبكات الكهربائية و على استقرار الجهد بعد اضطراب معين. تم تنفيذ هذا النظام باستخدام برنامج MATLAB بالموازاة مع PSAT الذي يضمن التشغيل المناسب للشبكات الكهربائية. إن المحاكاة المطبقة على النظام تشمل على تنميط مختلف تقنيات إنتاج الطاقة الريحية تحت تأثير اضطراب قوي.

كلمات مفتاحية : الطاقة الريحية, تنميط, شبكات كهربائية, استقرار الجهد

Résumé

Le fort développement qu'a connu l'énergie éolienne cette dernière décennie en Europe se retrouve aujourd'hui au niveau mondial. Cette croissance a été rendue possible grâce à divers facteurs qui ont guidés les volontés de politique énergétique en faveur de cette énergie.

La principale caractéristique du vent réside dans sa variabilité. Il est donc important d'évaluer l'impact d'intégration des fermes éoliennes dans les réseaux électriques.

Après un rappel des concepts et équations régissant le fonctionnement d'un système éolien, ce travail dresse un état de l'art des ensembles machines – convertisseurs utilisés dans l'énergie éolienne suivi par une étude de phénomène de la stabilité de tension. Finalement, nous sommes plus particulièrement intéressés à l'analyse de l'impact d'un parc éolienne sur un systèmes électro- énergétique, et sur sa stabilité de tension lors d'une importante perturbation ; Cette analyse faite réalisée à partir d'un programme de simulink sous environnement Matlab, en utilisant le PSAT (Power System Analysis Toolbox), qui peut assurer un fonctionnement robuste vis-à-vis des perturbations qui affectent les réseaux électriques.

Les simulations effectuée étude consiste à modéliser les différentes technologies de la production éolienne, en vue de l'étude du comportement des réseaux électriques en régime transitoires lors d'apparition d'une forte perturbation.

Mots Clés : Energie Eolienne, Modélisation, Réseaux Electriques, Stabilité de tension

Abstract

The strong growth experienced by the wind over the last decade in Europe now finds itself in the world. This growth was made possible by various factors that have guided the will of energy political for energy.

The main characteristic of wind resides in its variability; therefore it is important to study the impact of the wind farms integration on the stability on the electric networks.

After a brief recall of the concepts and equations governing the working of a wind system, this thesis presents a state of the art of the different machines - converters used in the wind energy, followed of the voltage stability studies on electric networks. Finally, we are particularly interested in analyzing the impact of a wind farm on an electro-energy and its voltage stability at allow or high disturbance.

The analysis carried on from a program in Matlab Simulink, using the PSAT (Power System Analysis Toolbox), which can ensure a robust operation vis-à-vis the disturbances that affect power grids. The simulations performed study is to model the different technologies of wind generation in order to study the behavior of electrical networks in transient during development of a strong disturbance.

Key Words: Wind Energy, Modeling, Electrical Networks, voltage stability.

