

Article 17. Intégration de sources à énergie renouvelable dans un réseau d'énergie électrique îloté

E. A. Razafindrakoto¹, L. F. Rafanotsimiva^{1,2}, N. J. Razafinjaka²

¹Direction de l'Ecole du Génie Industriel, Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana

²EDT « Energies Renouvelables et Environnement » de l'Université d'Antsiranana

Correspondant : erazafindrakoto@ist-antsiranana.mg

Mots clés : Machines, Eolienne, réseaux électriques, Flicker, Creux d tension.

Résumé

En termes d'électrification, Madagascar n'est pas encore au stade d'un réseau interconnecté national. A part les réseaux des Chefs-lieux de provinces, on compte une soixantaine de petits réseaux ruraux îlotés. Dans ce travail de recherche, il s'agit de contribuer à trouver des solutions aux problèmes de stabilité due à l'intégration des sources éoliennes dans les réseaux électriques de petite taille.

Pour les aérogénérateurs, plusieurs techniques sont utilisées lors de transformation de l'énergie mécanique en électrique. Mais les trois technologies éoliennes suivantes sont les plus répandus : Eoliennes à vitesse fixe à base d'une Machine ASynchrone à cage d'écureuil, éoliennes à vitesse variable utilisant une Machine Asynchrone Doublement Alimentée et éoliennes à vitesse variable avec Machine Synchrone.

Lors de connexion des éoliennes aux réseaux d'énergie électrique, ils constituent une charge fluctuante qui peut conduire à des variations de tensions responsables des phénomènes de Flicker et harmoniques et aussi à des variations de la puissance réactive. A ces problèmes dus aux variations aléatoires de la source éolienne, viennent se rajouter les problèmes liés aux incidents inattendus tels que les creux de tension ainsi que les coupures brèves.

Ce pendant, certains chercheurs portent ses attentions sur les échanges de puissance active et réactive en réglant la tension et la fréquence pour minimiser l'augmentation du niveau de tension dans les réseaux de distribution. Et d'autre sur la compensation des harmoniques dans une ferme éolienne, l'analyse du comportement de l'éolienne face aux creux de tension, etc.

La synthèse des résultats de nos recherches bibliographiques sera présentée dans cet aticle.

I. INTRODUCTION

Que ce soit dans les pays industrialisés ou dans les pays en voie de développement, à cause du réchauffement climatique et de la tarification des ressources fossiles et dans une optique de protection de l'environnement, on se tourne actuellement vers les sources à énergie renouvelable et alternative. L'installation d'un tel système est déjà maîtrisée à petite échelle et en utilisation indépendante.

Par contre, si elles doivent être raccordées à un réseau existant de puissance finie, leur intégration n'est pas du tout gagnée d'avance. Une des raisons principales est la nature différente des sources. Les sources d'énergie actuelles sont généralement à base d'alternateurs (machines synchrones) délivrant uniquement du courant alternatif alors que les sources à énergies renouvelable et alternative sont à base d'autres types de machines électriques (asynchrones, à aimant permanent, à réluctance variable,...) ou de cellules photovoltaïques et peuvent débiter du courant alternatif et/ou du courant continu. La taille du réseau de raccordement a vraiment une grande influence dans cette intégration. Ce qui limite actuellement le taux de pénétration des énergies renouvelables à seulement 20% à 30%.

L'intégration dans les réseaux électriques des sources d'énergies renouvelables est d'une manière plus générale de la production décentralisée, si elle présente un intérêt incontestable à divers points de vue, implique aussi le respect de contraintes techniques pour assurer aux citoyens et aux entreprises une alimentation en énergie électrique fiable et de qualité. Dans les réseaux de distribution qui n'ont pas été conçus à l'origine pour accueillir de la production, les problèmes à résoudre dépendent du taux de pénétration de la production décentralisée [3]

En termes d'électrification, Madagascar n'est pas encore au stade d'un réseau interconnecté national. A part les réseaux des Chefs lieux de provinces, on compte une soixantaine de petits réseaux ruraux îlotés.

Il s'agit, dans le cadre de ce travail de faire des recherches bibliographiques sur l'état de l'art des systèmes que se soit éolienne, réseaux électriques ou les techniques d'intégration Eolienne/Réseaux.

I.1. GENERATEUR EOLIEN

Héritiers des moulins à vent, les aérogénérateurs - plus souvent appelés éoliennes - utilisent la force du vent pour la transformer en électricité. La machine se compose de pales (3 en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé sur une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la nacelle afin que le rotor soit toujours face au vent. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. Le générateur transforme l'énergie mécanique ainsi créée en énergie électrique injectée dans le réseau en conformité aux

normes électriques applicables. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure. [5]

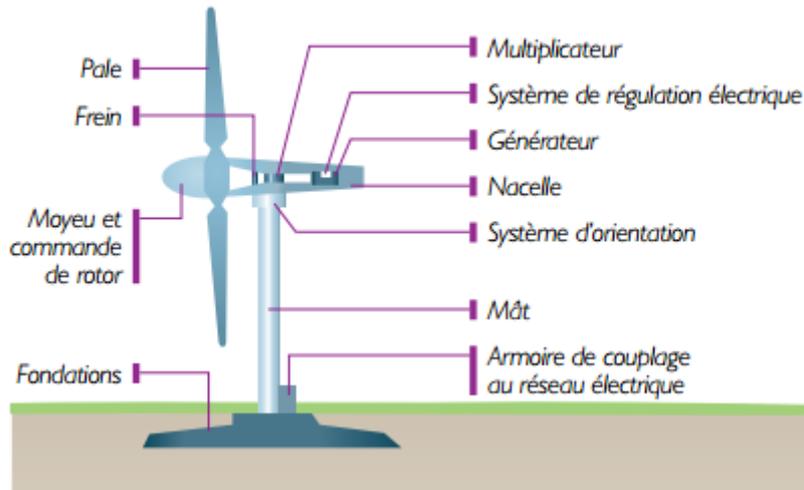


Figure 1 : Eolienne de type aérogénérateur

1.1.1. Transmission de puissance

1.1.1.1. Conversion d'énergie (cinétique en mécanique)

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \tag{1}$$

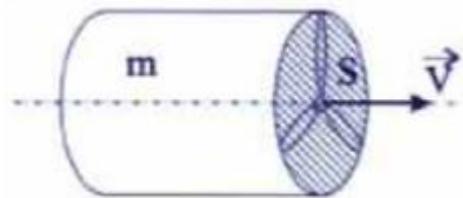


Figure 2 : colonne du vent

En supposant qu'en sortie de l'éolienne, la vitesse de cette colonne soit nulle, il serait possible de récupérer dans l'intervalle du temps dt , l'énergie élémentaire. [7]

$$dE_c = \frac{1}{2} dm \cdot v^2 \tag{2}$$

Où dm représente la masse d'air ayant traversé la surface S pendant le temps dt .

$$dm = \rho \cdot S \cdot v \cdot dt \tag{3}$$

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot dt \tag{4}$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \tag{5}$$

ρ : masse volumique du fluide (1,20kg/m³ pour l'air à 20°C)

S : surface du capteur éolien en m²

v : vitesse incidente (amont) du fluide en m/s

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance P_e inférieure à la puissance incidente P_v , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation :

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \tag{6}$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique.

$$C_p = \frac{R \cdot \Omega}{\lambda} \tag{7}$$

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales (β). La relation (5) montre qu'une petite variation de la vitesse du vent induit une grande variation de la puissance générée. [8]

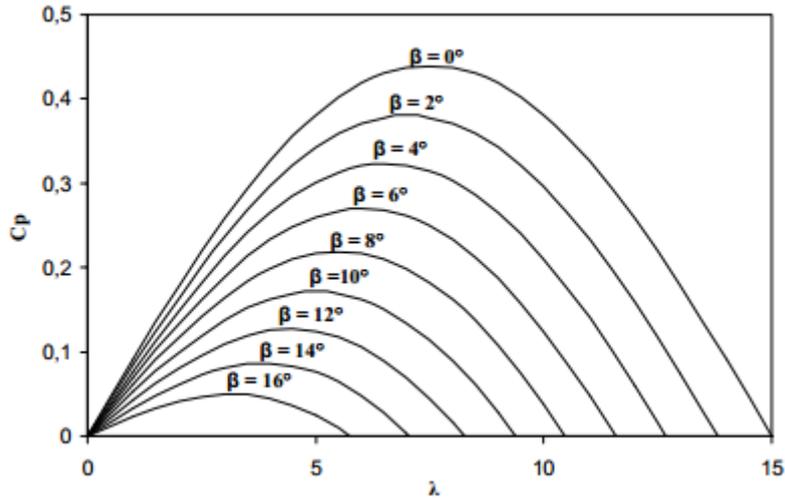


Figure 3 : Exemple d'évolution approchée du coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse λ pour différents angles d'orientation des pales β

I.1.1.2. Puissance réelle

En pratique, les turbines ont une efficacité réduite et l'on définit un coefficient de puissance C_p tel que :

$$P_e = P_v \cdot C_p = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p \tag{9}$$

Avec $C_p < 16/27$

Ce coefficient de puissance est caractéristique d'une turbine et, pour un angle de calage donné des pales, dépend uniquement du rapport vitesse de rotation de l'hélice sur la vitesse du vent. On définit une vitesse spécifique, une vitesse en bout de pale sur la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V} \tag{10}$$

Avec

R : rayon de l'hélice

V : vitesse du vent

Ω : vitesse de rotation angulaire de l'hélice

I.1.1.3. Conversion mécanique en électrique

Plusieurs techniques sont utilisées lors de transformation de l'énergie mécanique en électrique. Mais les trois technologies éoliennes suivants sont les plus répandus : (a) Eoliennes à vitesse fixe à base d'une Machine ASynchrone à cage d'écureuil (MAS) ; (b) Eoliennes à vitesse variable utilisant une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) et (c) Eoliennes à vitesse variable avec Machine Synchrone (MS). [7]-[9]

a) Eolienne à vitesse fixe avec MAS

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). [8]

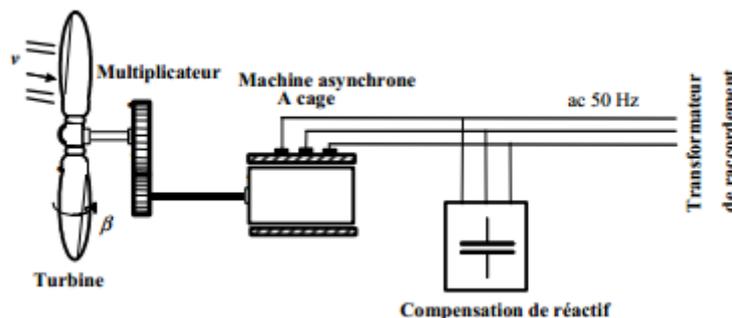


Figure 4 : Eolienne à vitesse fixe avec MAS à cage

b) Eolienne à vitesse variable avec MADA

En réglant la vitesse de rotation Ω de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent, il est possible de maintenir la vitesse spécifique λ à une valeur telle que le coefficient de puissance C_p soit maximum.

Avec MADA, il y a une liaison directe du stator avec le réseau et une liaison avec le rotor réalisée par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence. Le fonctionnement à vitesse variable de cette éolienne permet de contrôler la puissance extraite du vent de façon à avoir une efficacité aérodynamique optimale. Cela est possible grâce à l'usage d'un convertisseur de fréquence d'une puissance à hauteur de 30% de la puissance nominale du générateur.

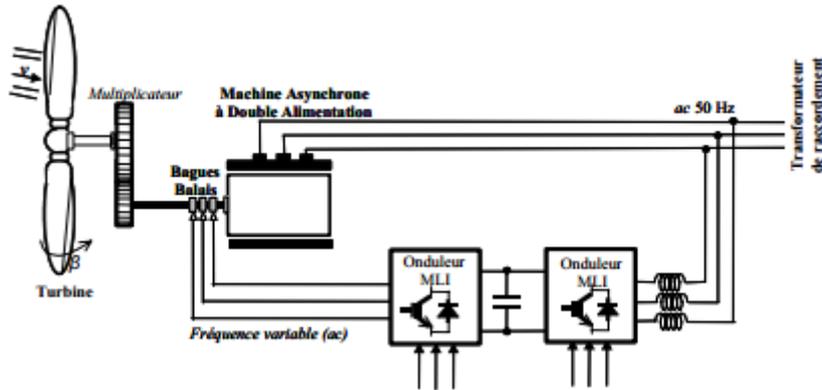


Figure 5 : Eolienne à vitesse variable avec MADA

c) Eolienne à vitesse variable avec MS

Les éoliennes à vitesse variable avec l'utilisation de la Machine Synchronne ont une liaison avec le réseau réalisée par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence.

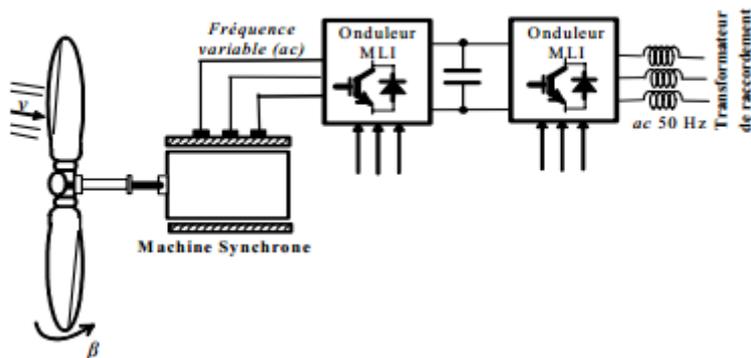


Figure 6 : Eolienne à vitesse variable avec MS

Cette machine utilise un convertisseur de la même puissance que celle de la machine permettant ainsi un contrôle total de la production de puissance active et réactive mais augmentant le prix de l'éolienne d'une façon significative. Le générateur peut être excité électriquement ou par l'intermédiaire d'aimants permanents. Les générateurs éoliens les plus répandus comptent avec une machine synchronne de type annulaire à très grand nombre de pôles de façon à éliminer le multiplicateur de vitesse ou à réduire son rapport de multiplication. Ce type de structure permet d'avoir un couple massique élevé. Le rotor tourne à des vitesses très faibles. L'inducteur est à pôles saillants. Le générateur n'a pas un couplage direct au réseau. La tension et la fréquence de sortie qui varient selon la vitesse de rotation, sont converties au moyen d'un circuit intermédiaire en courant continu et d'un onduleur avant injection dans le réseau. [9]

I.2. RESEAUX ELECTRIQUES

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

Le réseau électrique se compose d'un ensemble d'ouvrages de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Pour assurer sa stabilité, une bonne surveillance et un contrôle en temps réel de son fonctionnement est nécessaire.

Il est considéré parmi les systèmes les plus complexes et aujourd'hui, les grands flux d'électricité d'origine renouvelable et l'indispensable solidarité entre les territoires constituent les principaux vecteurs d'évolution du réseau en France et en Europe. [2]

1.2.1. Infrastructure du réseau

Le réseau est constitué de lignes électriques aux niveaux de tensions normalisés, et de postes électriques :

- Les lignes HTB : Ce sont des lignes hautes et très haute tension, de 225kV à 400kV (THT) ou 63kV à 90kV (HT) pour les longues distances : transport national et interconnexions avec les autres pays européens.
- Les lignes HTA : Ce sont des lignes de moyenne tension pour la répartition régionale et interrégionale, de 15kV à 33kV.
- Les Lignes BT : Les lignes basse tension (de 230V ou 400V) pour la répartition locale (distribution et consommation). Les particuliers sont livrés en 220V (BT), les gros consommateurs (industrie, réseau ferré) peuvent être alimentés en HTA.

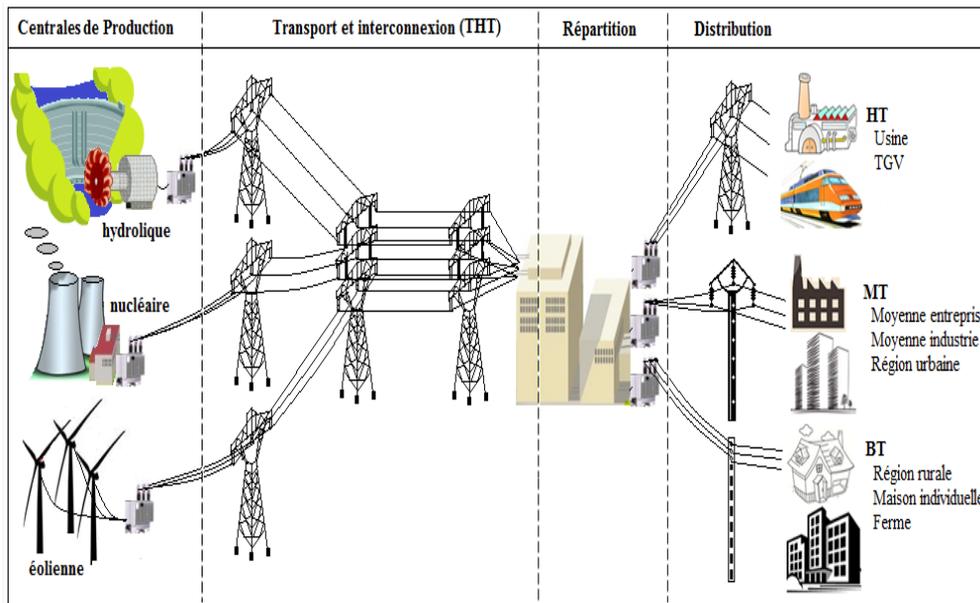


Figure 6 : Schéma d'une infrastructure d'un réseau électrique

1.2.2. Grandeurs électriques importantes

Les grands réseaux électriques nécessitent la surveillance constante de certains paramètres afin de maintenir le réseau, ainsi que les installations de production et de consommation qui y sont raccordées, dans les domaines d'utilisation prévus.

Les principales grandeurs à surveiller sont :

- la tension,
- et la fréquence (donc la vitesse relative de rotation électrique ω) qui doit rester dans des marges admissibles (5% en Basse Tension (BT), 10% en Moyenne Tension (HTA) et 1% en Haute Tension (HTB)).

1.2.3. Perturbation du système électrique

Les perturbations les plus fréquentes affectant le réseau électrique au cours de son fonctionnement sont classées en deux familles : On peut avoir des perturbations affectant soit directement le réseau de transport et donc le support d'échange d'énergie, soit le réseau de production et donc le producteur d'énergie. Ce type de perturbation provoque dans la plupart des cas, un déséquilibre entre la production et la consommation : Les grandeurs caractéristiques touchées sont la fréquence. [14]

1.2.4. Surveillance de tension

Un grand réseau électrique possède de multiples niveaux de tension. Chaque niveau de tension est conçu pour une plage d'utilisation bien spécifique. Des tensions légèrement trop élevées conduisent à une usure prématurée du matériel, puis si elles sont franchement trop élevées à un « claquage » de l'isolant (cas des câbles souterrains, des câbles domestiques, ou des isolateurs des lignes électriques). Les surtensions très élevées (par exemple causées par la foudre) sur des conducteurs « nus » (c'est-à-dire sans isolant, ce qui est le cas des lignes électriques) peuvent conduire à des amorçages avec des objets proches, par exemple des arbres.

A contrario, des tensions trop basses par rapport à la plage spécifiée conduisent à un mauvais fonctionnement de beaucoup d'installations, que ce soit chez les consommateurs (par exemple les moteurs), ou sur le réseau en lui-même (mauvais fonctionnement des protections). De plus, des tensions basses sur les réseaux de transport d'électricité ont été

la cause de grands incidents qui ont été responsables de la coupure de plusieurs millions de foyers (ex. du blackout grec le 12 juillet 2004 ou du 12 janvier 1987 en France).

Bien que les plages d'utilisation des matériels spécifient une marge de 5 à 10 % par rapport à la tension nominale, les grands opérateurs de réseaux privilégient actuellement une exploitation plutôt en tension haute car cela limite les pertes joules dans le réseau.

1.2.5. Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent à la création d'un scénario propice à une instabilité de tension. Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau [13] :

- les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection,
- les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe,
- les chargeurs de prises en charge et les transformateurs fixes,
- le relais de protection,
- les caractéristiques de la charge.

1.3. IMPACT DE L'INTEGRATION DES EOLIENNES AUX RESEAUX ELECTRIQUES

1.3.1. Impact sur les réseaux de transport

L'augmentation de la puissance éolienne installée en Europe a un impact croissant sur le réseau de transport du fait de la difficulté à prévoir la production, de la capacité d'accueil limitée du réseau, du risque de déconnexions intempestives des fermes d'éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité. [8]

Les aérogénérateurs sont actionnés par des forces de pression dynamique du vent, qui sont variables. De ce fait, lors de leur connexion au réseau électrique, ils constituent une charge fluctuante qui peut conduire à des variations de tensions responsables des phénomènes de Flicker et harmoniques et aussi à des variations de la puissance réactive. A ces problèmes dus aux variations aléatoires de la source éolienne, viennent se rajouter les problèmes liés aux incidents inattendus tels que les creux de tension ainsi que les coupures brèves. [12]

1.3.2. Impact sur les réseaux insulaires

L'énergie éolienne est actuellement en pleine croissance dans les réseaux insulaires. Or que les réseaux insulaires sont plus fragiles que les réseaux interconnectés et l'insertion massive d'éoliennes s'accompagne de caractéristiques particulières pouvant dégrader le fonctionnement du système électrique.

Les réseaux insulaires sont caractérisés par leur taille, très limitée. Il y a deux types de réseaux insulaires :

- Les « petits » systèmes isolés, devant produire sur place l'ensemble de l'électricité qu'ils consomment ;
- Les systèmes autonomes disposant d'une interconnexion synchrone limitée.

Selon la recherche, afin de minimiser l'augmentation du niveau de tension dans les réseaux de distribution avec forte pénétration éolienne, certains chercheurs portent ses attentions sur les échanges de puissance active et réactive en réglant la fréquence et la tension.

Deux stratégies de commande sont étudiées pour le contrôle de l'éolienne dont :

- La première : s'agit d'un contrôle indirect de la vitesse par action sur le couple électromagnétique.
- La deuxième : la vitesse est contrôlée directement par action sur l'angle d'orientation de pales.

Les figures suivantes montrent les variations de fréquence et des puissances selon les deux stratégies de commande.

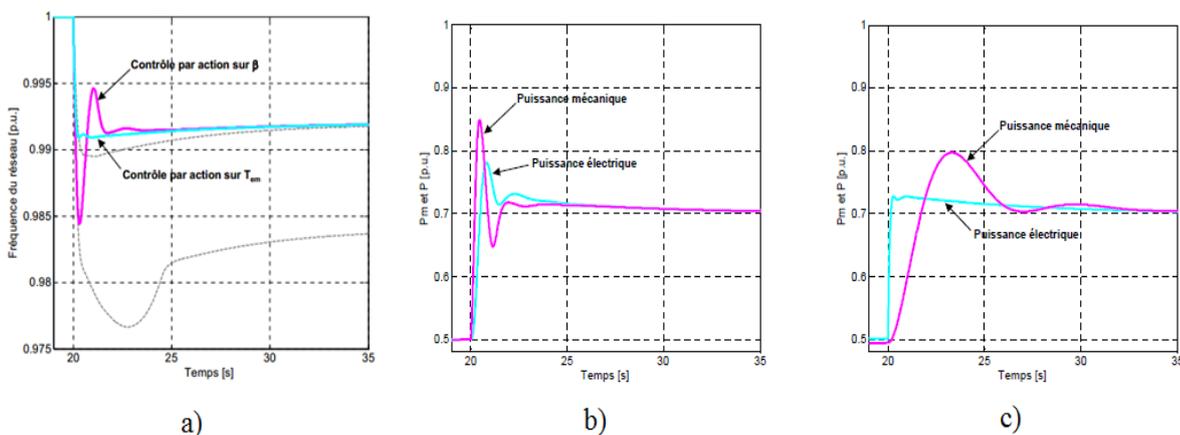


Figure 7 : a) Fréquence contrôlée par l'angle β et le couple électromagnétique, b) Puissance contrôlée par l'angle β et c) Puissance contrôlée par le couple électromagnétique

I.3.3. Cause des problèmes induits par l'intégration d'une éolienne sur le réseau électrique

Les problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans le réseau électrique sont causés par :

- leur production aléatoire et difficilement prévisible ;
- une absence de réglage puissance - fréquence ;
- une participation au réglage de la tension limitée pour les éoliennes à vitesse variable, et aucune participation à ce réglage pour les éoliennes dont la génératrice est directement couplée au réseau ;
- une sensibilité élevée aux creux de tension et aux variations de fréquence pour certaines technologies ;
- une sensibilité importante aux variations rapides de la force du vent. Les problèmes majeurs de l'éolien sont la grande variabilité de sa production et surtout la difficulté de prévoir cette production précisément plusieurs heures à l'avance. L'expérience allemande montre que des prévisions à 72h sont impossibles, et que l'erreur sur des prévisions à 24h est en moyenne de 10% de la capacité installée et peut atteindre parfois 50%.

La grande sensibilité de l'éolien aux perturbations du réseau, tels que les creux de tension ou les variations de fréquence, entraîne souvent une déconnexion de la production lors d'incidents sur le réseau. Cette déconnexion peut aggraver un déséquilibre production - consommation et par effet domino accélérer l'avènement d'un incident majeur dans le réseau. La tendance actuelle est, dès lors, de demander à cette production de rester connectée au réseau lors de creux de tension et de variations de fréquence dépassant certaines limites déterminées par les gestionnaires de réseau. [8]-[9]

I.3.4. Code de réseau de raccordement des éoliennes aux réseaux électriques

Afin de relever le défi de coordination d'une production d'électricité basée sur l'exploitation de l'énergie éolienne avec le reste du système électrique, de nombreux pays ont imposé dans leur code de réseau de nouvelles exigences relatives au raccordement et au fonctionnement des aérogénérateurs et parcs éoliens.

L'objectif des codes de réseau est de fixer des règles techniques de raccordement au réseau de transport de l'électricité, de conduite et de fonctionnement du système électrique afin de garantir un niveau adéquat de sécurité et de fiabilité.

Les éoliennes modifient la structure du réseau. Cette modification change les comportements dynamiques des machines lors d'une perturbation. [11]

I.3.5. Participation au réglage de fréquence

La forte et rapide croissance de la production de l'énergie éolienne à travers le monde a une nécessité de mettre en vigueur de nouveaux critères normalisés permettant de l'intégrer dans les réseaux électriques sans affecter la qualité et la stabilité du système, et pouvant demander aux éoliennes de participer au réglage de la fréquence dans les réseaux en cas de besoin. [15]

Dans un système électrique, il est important de maintenir la fréquence autour de sa valeur nominale (50Hz). Le respect strict de cette valeur est non seulement nécessaire au bon fonctionnement des charges, mais également reste un indicateur d'équilibre entre les puissances actives produites et celles consommées.

I.3.6. Limite de fréquence pour certain pays

Dans les récents codes de réseaux, les éoliennes restent connectées au système et peuvent fonctionner dans une gamme de fréquence proche de la valeur nominale pendant une certaine période qui varie avec la déviation. Les exigences pour la fréquence changent selon le pays.

Tableau 1 : Exigence sur les limites de fréquence

<i>Pays</i>	<i>Limite de fréquence (Hz)</i>	<i>Durée maximale</i>
Danemark	$48.5 < f < 51$ $f < 48.0$ ou $f > 51.0$ $f < 47.5$ ou $f > 52.0$ $f < 47.0$ ou $f > 52.0$	Continu 25 min 5 min 10 sec
Allemagne	$49.0 < f < 50.5$ $f < 48.5$ ou $f > 51.5$ $f < 47.5$ ou $f > 51.5$ $f < 46.5$ ou $f > 53.5$	Continu 30 min 10 min 10 sec
Ireland	$49.5 < f < 50.5$ $f < 47.5$ ou $f > 52.0$ $f < 47.0$ ou $f > 52.0$	Continu 60 min 20 sec

I.4. TRAVAUX DEJA FAITS PAR DIFFERENTS CHERCHEURS

Il s'agit ici des articles publiés et des livres produits par différents chercheurs, dans le domaine d'intégration d'une éolienne aux réseaux électriques et aussi des travaux similaires en ne citant que quelques un d'entre eux selon l'année de publication et l'année de soutenance.

En mars 2017, B. Benyachou, F. Ait Ouhrouch, K. Gueraoui, B. Bahrar ont publié un article sur la modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Ils ont étudié le mode de fonctionnement du système de conversion d'énergie éolienne (modèle de la turbine à vitesse variable, modèle de la Générateur asynchrone à double alimentation) et ils ont conclu que les résultats de simulation de leurs modèles montrent que le rendement du système est très encourageant et conforme à ceux trouvés dans la littérature. [19]

En Novembre 2016, Dr SAHEB KOUSSA Djohra a publié un article sur la qualité de l'énergie électrique et conditions de raccordement des parcs éoliens au réseau électrique. Dans son travail, elle a expliqué que les aérogénérateurs sont actionnés par des forces de pression dynamique du vent, qui sont variables. De ce fait, lors de leur connexion au réseau électrique, ils constituent une charge fluctuante qui peut conduire à des variations de tensions responsables des phénomènes de Flicker et harmoniques et aussi à des variations de la puissance réactive. A ces problèmes dus aux variations aléatoires de la source éolienne, viennent se rajouter les problèmes liés aux incidents inattendus tels que les creux de tension ainsi que les coupures brèves.[12]

En juin 2015, Merzak AIMENE a publié un article sur l'analyse de creux de tension sur une Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP), La méthode de contrôle est réalisée en planifiant les trajectoires de référence sur les éléments du vecteur de la variable de sortie du système. Celle-ci permet de poursuivre de puissance maximale de l'éolienne et de maintenir stable la tension du bus continu en dépit de la perturbation du réseau.

En juillet 2014, Zhibin Zhou, Franck Scuiller, Jean Frédéric Charpentier, Mohamed Benbouzid ont publié un article sur l'intégration d'une batterie à circulation pour lisser la puissance quotidienne fournie par une hydrolienne sur un réseau îloté. La méthode c'est d'utiliser une batterie à circulation ou « flow battery » pour faciliter la gestion quotidienne de la puissance d'une hydrolienne et permettre de fournir ainsi une puissance demandée par les utilisateurs d'un réseau électrique isolé. Un générateur diesel de faible puissance est également intégré pour charger la batterie lorsque l'état de charge de la batterie est très bas et que le courant marin est insuffisant pour assurer l'alimentation du réseau et la recharge de la batterie.

En juillet 2014, Merzak AIMENE, Alireza PAYMAN et Brayima DAKYO ont publié un article sur la commande par platitude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable connecté au réseau. Le principe de commande est basé sur la planification des trajectoires des composantes du vecteur représentatif des variables de sortie du système. Une méthode de commande classique est utilisée pour la régulation de la tension du bus continu et pour la gestion de la puissance réactive échangée entre la machine et le réseau.[16]

En novembre 2013, Abdelkarim Chemidi, Sidi Mohammed Meliani, Mohamed Choukri Benhabib ont publié un article sur l'analyse et la compensation des harmoniques sur des fermes éoliennes à base d'une MADA. Le principe est d'utiliser un convertisseur de puissance qui injecte en temps réel dans le réseau électrique des harmoniques de courant égaux à celles absorbées par la charge mais en opposition de phase. Faire suivre à la MADA une référence en puissance ; en tenant compte de la limite de fréquence de commutation des interrupteurs des convertisseurs de puissances.[17]

En 2010, Saci Taraff, Djamila Rékioua et Djamel Aouzellag ont publié un article sur la commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau. Le travail consiste à analyser le comportement dynamique d'une MADA. La méthode est de déterminer en premier lieu la surface de glissement adéquate, ainsi que la valeur équivalente et non linéaire pour chaque grandeur à réguler.[20]

En novembre 2009, Bruno François et son équipe ont publié un article pendant le séminaire "Le développement des Energies éoliennes en Tunisie" sur l'intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique. Ils ont proposé des solutions pour intégrer l'éolien dans le système (réseaux d'énergie électrique). Système de prévision et de conduite (Prévision de la production éolienne), Systèmes de conduite centralisée (Pour gérer l'impact de l'éolien, il faut le mesurer et le contrôler), Nouvelles sources de flexibilité (Couplage avec d'autres moyens de production, recherche des complémentarités au travers des marchés (économique), stockage, modification des éoliennes en générateur actif participant aux services système (statisme de réglage puissance/fréquence et réactif/tension).[21]

REFERENCES

- [1]. REVUE : Les réseaux électriques du futur
- [2]. Matthieu Orphelin et Hervé Mignon, 'L'intégration des énergies renouvelables dans le réseau de transport d'électricité' Juin 2014
- [3]. PAUL MAKANGA KOUNBA, 'Etude d'intégration de sources d'énergie renouvelable à un réseau électrique autonome', l'Université du Québec à Trois-Rivières, Novembre 2013

- [5]. ADEME, Dans l'air du temps : l'énergie éolienne, décembre 2011
- [7]. C.LAROUCI, 'L'énergie Eolienne : Etat de l'art', Laboratoire Commande et Systèmes Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA), France, 2005
- [8]. B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, 'Impact de l'éolienne sur le réseau de transport et la qualité d'énergie', Centre National de Recherche Technologique (CNRT FUTURELEC), Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP), France, 2006
- [9]. David Humberto Marin, 'intégration d'une éolienne dans les réseaux électriques insulaires', Thèse de doctorat à l'Ecole centrale de Lille, avril 2009
- [11]. Code de réseaux de raccordement des parcs éoliens aux réseaux électriques
- [12]. SAHEB KOUSSA Djohra, Maître de recherche A Division Energie Eolienne - CDER 'Qualité de l'énergie électrique et condition de raccordement d'un parc éolien sur un réseau électrique' Novembre 2016
- [13]. Liva RAFANOTSIMIVA, ' Etude de commandes non linéaires pour réseaux électriques – application a un système SMIB, Thèse pour l'obtention du Diplôme De Doctorat de l'Université d'Antsirana Spécialité Sciences de l'Ingénieur Option Génie Electrique, juillet 2008
- [14]. Souad Chebbi, Production - Transport et Distribution d'Energie : Notion de base sur les réseaux électriques, Université Virtuelle de Tunis,
- [15]. J.N. RAZAFINJAKA et T.P. ANDRIANANTENAINA 'Nouvelles Structures pour le Contrôle des Puissances d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation insérée dans une Eolienne', Département d'Electricité, Ecole Supérieure Polytechnique Université d'Antsirana Madagascar, Octobre 2016
- [16]. Merzak AIMENE, 'Analyse de la tenue aux creux de tension d'une éolienne connectée au réseau en utilisant la commande par amplitude différentielle' Laboratoire GREAH, Faculté de sciences Techniques, Université du Havre, Juin 2015
- [17]. Abdelkarim Chemidi, Sidi Mohammed Meliani, Mohamed Choukri Benhabib, 'Etude d'une Ferme d'éolienne à Base De MADA Connectée au Réseau Electrique : Analyse et Compensation des Harmoniques', Département de génie électrique et électronique, Université Abou Bekr-Belkaid, Algérie, Novembre 2013
- [18]. Saci Taraff, Djamilia Rékioua, Djamel Aouzellag, 'Commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau' Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information, Département d'Electrotechnique Université A. Mira, Route de Targa Ouzemour, Béjaia, Algérie, 2010.
- [19]. B. 1Benyachou, F. 1Ait Ouhrouch, K. 1Gueraoui, B. 2Bahrar « Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) » 13ème Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017 (Meknès, MAROC)
- [20]. Saci Taraff* , Djamilia Rékioua et Djamel Aouzellag, « Commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau », laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information, Département d'Electrotechnique Université A. Mira, Route de Targa Ouzemour, Béjaia, Algérie
- [21]. Bruno François , « l'intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique », séminaire "Le développement des Energies éoliennes en Tunisie", novembre 2009