

Contrainte électrique majeure d'une génératrice synchrone à rotor bobiné associée à un aérogénérateur chargé et influence de rayon de pales sur la vitesse du vent au démarrage du groupe

Major electric constraint of a synchronous wound rotor generator associated with a charged wind generator and blades ray influence on the group starting wind speed

Delphin Tomboravo¹, Elodie Francia Siaka², Jeannot Velontsoa³, Roger Vony⁴, Tsialefitry Aly Saandy⁵

¹ Laboratoire de Machines Electriques de l'E.S. Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar, dtomboravo@gmail.com

² Laboratoire de Machines Electriques de l'E.S. Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar,

³ Laboratoire de Machines Electriques de l'E.S. Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar,

⁴ Laboratoire de Machines Electriques de l'E.S. Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar, tsilaidrano@gmail.com

⁵ Laboratoire de Machines Electriques de l'E.S. Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar, alysaandy@gmail.com

RÉSUMÉ. Le système de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique comprend un moteur, une génératrice et une charge. Une interface mécanique placée entre le moteur et la génératrice adapte la vitesse de rotation des deux maillons, tandis qu'une interface électrique reliant la génératrice et la charge assure la stabilité de la fréquence et des niveaux des signaux électriques de la charge. Les contraintes électriques de la génératrice synchrone à rotor bobiné de la chaîne et la vitesse du vent à son démarrage sont étudiées en ramenant à la génératrice la charge et l'interface électrique et en solidarisant l'éolienne et la génératrice. La puissance limite de Betz, affectée du facteur atténuant du site, est utilisée comme puissance motrice du groupe. L'instabilité de la vitesse du vent convertit la génératrice en une source à fréquence variable alimentant une cellule RL modélisant la charge et l'interface électrique ramenées à la génératrice. La simulation par programmation sous Scilab avec des données proches de celles d'une vraie génératrice a révélé des surintensités pour les vitesses élevées du vent et une augmentation de la vitesse du vent au démarrage du groupe pour une diminution du rayon des pales. Ceci justifie la nécessité des interfaces et des organes de commande dans le groupe.

ABSTRACT. System of mechanical energy conversion into electric energy includes a motor, a generator and a load. A mechanical interface placed between the motor and the generator adapt the two links rotation speed, while an electric interface connecting generator and load ensures the frequency and the load electric signals levels stability. The chains synchronous wound rotor generator electric constraints and the group starting wind speed are studied by referring the load and the electric interface to the generator and by solidarizing the generator and the wind mill. Betz limit power, affected by the site attenuating factor is used like motive power of the group. Wind speed instability converts the generator into a variable frequency source supplying a RL cell modelling the referred load and electric interface. Simulation by programming under Scilab with data close to that real generator revealed overcurrent in the generator for for high speeds of the wind and an increase of starting wind speed of the group for a blades ray reduction. This justifies the interfaces and the control units need in the group.

MOTS-CLÉS. Aérogénérateur chargé, Conversion d'énergie, Génératrice synchrone à rotor bobiné, Surintensité.

KEYWORDS. Charged wind generator, Energy conversion, Synchronous wound rotor generator, Overcurrent.

1. Introduction

L'exploitation de l'énergie cinétique E_1 du vent lors de son déplacement, à travers des éoliennes de pompage et de moulins à vent, développée l'an 600 au Moyen Orient, puis en Grande Bretagne

un peu avant l'an 1000 avant de s'être généralisée au XII^{ème} siècle dans toute l'Europe est devenue une attraction de la curiosité intellectuelle de l'homme [PHI 19], [HAS 19]. Sa conversion en électricité, expérimentée à la fin du XIX^{ème} siècle [ISM 18], [MOH 15] et [JEA 07], a donné naissance à des aérogénérateurs de nos jours. Des vestiges de fouilles [BOU 16] et [FRA 19] pourraient modifier ces dates.

Dans un aérogénérateur, l'énergie entre dans la zone de l'éolienne. Les pales en captent une partie pour en faire son énergie motrice d'entrée W_m . Une partie de cette dernière va contrebalancer la perte mécanique globale du système [SAM 10]. L'énergie restante est convertie en énergie électrique dans une génératrice synchrone ou asynchrone sous forme de perte fer dans le circuit magnétique statorique, perte joule dans les enroulements statoriques et en puissance utile vers de diverses utilisations [SMA 11]. Ce processus est décrit par la figure 1 ci-dessous.

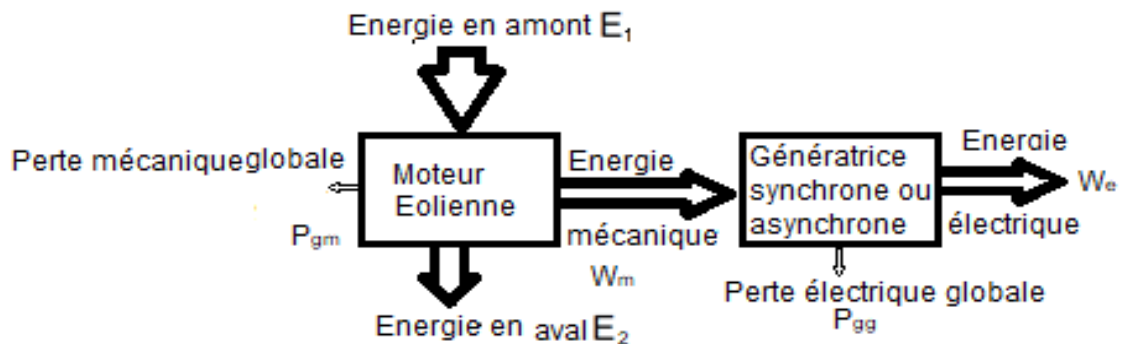


Figure 1. Processus de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

Un système de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique comprend un moteur, un générateur et une charge. Ces trois principaux maillons sont reliés entre eux dans l'ordre par une interface mécanique qui adapte la vitesse de rotation du moteur à celle du générateur et une interface électrique qui assure la stabilité de la fréquence et les niveaux des signaux électriques de la charge. Une bonne gestion d'une chaîne passe par une connaissance poussée de comportement de ses maillons et de leurs interactions. Cet article est concentré sur l'analyse des contraintes électriques de la génératrice synchrone à rotor bobiné d'un aérogénérateur et à l'étude de l'effet des rayons des pales sur la vitesse du vent au démarrage du groupe. A cet effet, la charge et l'interface électrique sont ramenées à la génératrice isolée par l'association du rapport de transformation du transformateur avec les rapports cycliques des convertisseurs de tensions d'une part. D'autre part, l'éolienne lui est considérée mécaniquement solidaire par les rapports de divers engrenages. La puissance limite de Betz, affectée du facteur atténuant du site d'implantation [FRA85], [FRA12] est utilisée comme puissance motrice du groupe. La charge et l'interface électrique ramenées au générateur sont modélisées par des cellules RL. L'instabilité de la vitesse du vent convertit la génératrice chargée isolée en une source à fréquence variable.

La relation entre la fréquence des signaux électriques des charges ramenées à la génératrice et la vitesse du vent est établie par le bilan de puissances de la génératrice. Elle a permis de calculer et de tracer les puissances et les courants fournis par la génératrice ainsi que sa force électromotrice en charge, en fonction de la vitesse du vent, pour quatre rayons des pales différents. Pour des vitesses du vent, supérieures à une vitesse limite, la puissance motrice dépasse la puissance mécanique nominale requise par la génératrice provoquant une surintensité qui endommagera la génératrice. Pour les valeurs inférieures à une valeur minimale. La puissance motrice est insuffisante et la génératrice ne produit pas d'énergie car le groupe ne peut pas démarrer. Les valeurs des vitesses maximales comme celles des vitesses minimales diffèrent d'un rayon à l'autre.

L'énergie motrice W_m est calculée par la théorie de Betz et W_e par la loi de Boucherot combinée aux lois de Faraday et de Joule. L'analyse de fonctionnement d'un aérogénérateur chargé explique la régulation naturelle de l'aérogénérateur sur une plage de vitesse du vent. Elle permet de

déterminer les interactions des différents paramètres intrinsèques du groupe à un point de fonctionnement sans aucune intervention d'un organe externe tel que le régulateur. La présente étude traite le fonctionnement du groupe sans en approfondir la conception. Elle est destinée à fournir des renseignements utiles à la conception des dispositifs de commande à lui associer pour optimiser ses utilisations. La génératrice synchrone à rotor bobiné est retenue dans cet article parce qu'elle offre plusieurs possibilités de regards. Cet article est focalisé aux phénomènes électromécaniques au niveau de la génératrice et de la charge. Les rappels sur la théorie de Betz et sur la génératrice synchrone à rotor bobiné sont nécessaires avant l'étude de l'aérogénérateur chargé. Une série de simulations par programmation sous Scilab est menée à partir de la caractéristique à vide et des données d'une génératrice synchrone à rotor bobiné proches de celles d'une machine réelle utilisée dans [ALY 94]. Les résultats afférents sont interprétés et ont donné une conclusion générale.

2. Rappels généraux

2.1. Rappels sur la théorie de Betz

La rentabilisation de l'énergie des fluides a été et reste une attraction de la curiosité des chercheurs. Albert Betz (1885 – 1968) en est un qui y a laissé son emprunt par l'élaboration de sa loi sur la limite maximale de puissance extractible d'un fluide en mouvement [FRA 12] , [JOU 07] et [HLA 84]. La théorie de Betz peut être élaborée à partir de la figure 2 ci-dessous qui schématise l'écoulement d'un fluide à travers une machine dotée d'un capteur d'énergie placé au niveau de la section S. Le fluide arrive avec une vitesse V_1 , traverse les trois sections S_1 avec la vitesse V_1 , S avec V et S_2 avec V_2 .

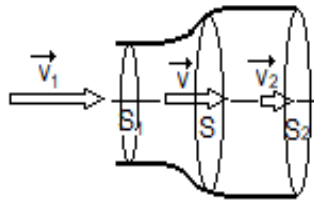


Figure 2. Ecoulement d'un fluide à travers 3 sections

A débit constant, pour une masse volumique ρ invariable, la masse m du fluide qui traverse les sections S_1 , S et S_2 par unité de temps vaut :

$$m = \rho S_1 V_1 = \rho S V = \rho S_2 V_2 \quad [1]$$

Cette relation conduit à la formule suivante :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad [2]$$

La variation de l'énergie cinétique du débit massique du fluide à travers S vaut :

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho S V [V_1^2 - V_2^2] \quad [3]$$

Lorsque la moyenne arithmétique de la vitesse d'entrée et de sortie du fluide est donnée à la vitesse V , la formule [3] devient comme la suivante :

$$\Delta E = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad [4]$$

L'introduction d'un coefficient α tel que $V_2 = \alpha V_1$ permet de réécrire la formule [4] comme

$$\text{suit } \Delta E = \frac{1}{4} \rho S V_1^3 [1 + \alpha]^2 [1 - \alpha] \quad [5]$$

Conformément à la définition de la puissance, ΔE est la puissance motrice théorique P_m de l'éolienne étudiée. Ce qui donne la formule suivante :

$$P_m = \frac{1}{4} [1 + \alpha]^2 [1 - \alpha] \rho S V_1^3 \quad [6]$$

Elle est maximale si :

$$\frac{dP_m}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \begin{cases} \alpha = -1 \\ \text{ou} \\ \alpha = \frac{1}{3} \end{cases} \quad [7]$$

La première valeur correspond à un obstacle infranchissable causant un refoulement total du vent et ne présente pas d'intérêt à la présente étude.

La deuxième valeur est la valeur de α donnant la valeur maximale appelée limite de Betz exprimées à l'aide de la formule [6], elle a pour expression :

$$P_{\text{Betz}} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad [8]$$

En réalité, cette puissance n'est jamais atteinte, car en plus des pertes dans l'éolienne, il y a aussi des facteurs atténuateurs dus aux contextes géographiques [FRA 85] dont la valeur globale est strictement inférieure à l'unité. Il en résulte que la puissance d'une installation d'un aérogénérateur vaut :

$$P_{\text{installation}} = K P_{\text{Betz}} = \frac{8}{27} K \rho S V_1^3 \quad [9]$$

Dans la suite de cet article, la puissance à la formule [9] sera la puissance motrice de l'éolienne qui entraîne la génératrice dont les éléments constitutifs sont donnés à la section ci-dessous.

2.2. Morphologie simplifiée et symbole d'une génératrice synchrone à rotor bobiné

Par sa facilité didactique, une génératrice bipolaire est utilisée dans ce paragraphe. Les résultats peuvent être extrapolés pour la mise en équation d'une génératrice multipolaire.

La génératrice synchrone triphasée à rotor bobiné présente deux circuits magnétiques portant chacun un groupe de circuits électriques :

- ❖ une partie fixe nommée le stator, logeant dans ses encoches les trois enroulements statoriques formant l'induit. Les axes magnétiques de ces enroulements sont régulièrement décalés de 120° ou $\frac{2\pi}{3}$ rad entre eux ;
- ❖ une partie tournante appelée le rotor, portant l'enroulement rotorique ou inducteur destiné à produire l'induction excitatrice. Le rotor ou la roue polaire compte autant d'axes magnétiques qu'il y a de paires de pôles dans la génératrice.

Une génératrice synchrone à rotor bobiné est représentée par le symbole de la figure 3 ci-dessous.

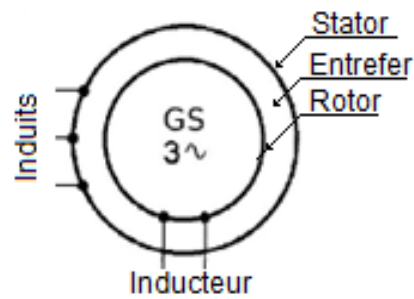


Figure 3. Génératrice synchrone triphasée à rotor bobiné

2.3. Définition des paramètres de repérage pour les calculs

La figure 4 ci-dessous [ALY 94] est utilisée pour déterminer les paramètres de calcul. Le centre O du rotor est choisi comme origine de différents repères. Les lettres a, b et c désignent à la fois les enroulements et leurs axes magnétiques. Quant à d et q, elles indiquent respectivement l'axe magnétique de l'inducteur appelé aussi axe direct et l'axe quadrature perpendiculaire au premier.

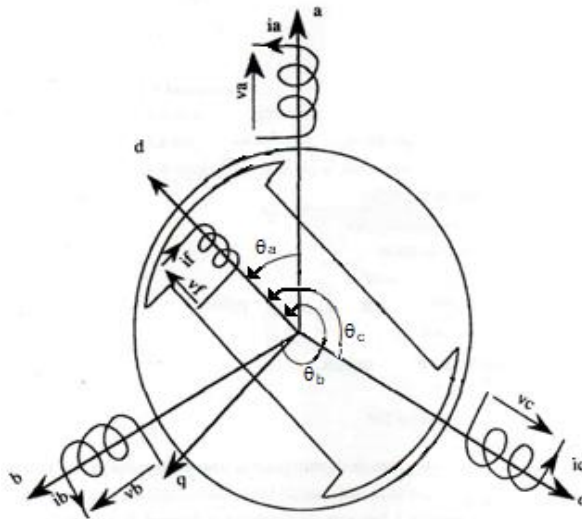


Figure 4. Génératrice synchrone triphasée bipolaire

Les définitions d'angles suivantes sont adoptées :

$$\left\{ \begin{array}{l} (od; oq) = \frac{\pi}{2} \\ (oa; od) = \theta_a = \theta \\ (ob; od) = \theta_b = \theta - \frac{2\pi}{3} \\ (oc; od) = \theta_c = \theta + \frac{2\pi}{3} \end{array} \right. \quad [10]$$

2.4. Différentes inductances et résistances d'une génératrice synchrone à rotor bobiné

2.4.1. Inducteur

L'enroulement inducteur présente :

- ❖ son inductance propre L_f et sa résistance R_f ;
- ❖ ses inductances mutuelles avec les induits à la matrice suivante :

$$M_{RS} = \begin{bmatrix} M_{fa} = M \cos(\theta) \\ M_{fb} = M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{fc} = M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad [11]$$

2.4.2. Induit

Les enroulements de l'induit présentent :

❖ leurs matrices d'inductances propres et mutuelles L_S et leur résistance R_S respectivement exprimées par les matrices suivants :

$$M_S = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad [12]$$

$$R_S = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad [13]$$

❖ leurs inductances de fuite propres et mutuelles provenant des têtes de bobines et des encoches exprimées à la matrice suivante :

$$L_{\sigma S} = \begin{bmatrix} \ell & m & m \\ m & \ell & m \\ m & m & \ell \end{bmatrix} \quad [14]$$

❖ leurs inductances mutuelles avec l'inducteur à la matrice suivante :

$$M_{SR} = \begin{bmatrix} M_{af} = M \cos(\theta) \\ M_{bf} = M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf} = M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad [15]$$

2.5. Force électromotrice induite et caractéristique à vide d'une génératrice synchrone à rotor bobiné

L'inducteur est alimenté par une source continue E_f qui fournit le courant d'excitation I_f en produisant au sein de chaque enroulement statorique les flux totalisés donnant la matrice suivante :

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_a = MI_f \cos(\theta) \\ \Psi_b = MI_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Psi_c = MI_f \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad [16]$$

Selon la loi de Faraday, les forces électromotrices induites des enroulements statoriques valent :

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = \begin{bmatrix} e_a = \dot{\theta} M I_f \sin(\theta) \\ e_b = \dot{\theta} M I_f \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = \dot{\theta} M I_f \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{avec } \dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \quad [17]$$

La valeur maximale et la valeur efficace communes de ces trois fems sont respectivement \hat{E} et E telles que :

$$\begin{cases} \hat{E} = \dot{\theta} M I_f & (a) \\ E = \frac{\dot{\theta} M}{\sqrt{2}} I_f & (b) \end{cases} \quad [18]$$

Comme la mutuelle M est constante, la valeur efficace E dépend de $\dot{\theta}$ et de I_f . L'expression de la valeur efficace E en fonction du courant d'excitation I_f pour une valeur donnée de $\dot{\theta}$ est la caractéristique à vide de la génératrice à cette valeur de $\dot{\theta}$. Habituellement, les constructeurs donnent le courant d'excitation nominal et les acquéreurs construisent la caractéristique à la vitesse nominale de la génératrice à partir des essais. La figure 5 ci-dessous montre un réseau de caractéristiques à vide tracé en système per unit à l'aide de la caractéristique à vide de la génératrice de simulation à la figure 10 comme suit :

$$\begin{cases} e = \frac{E}{E_{0n}} & (a) \\ i_f = \frac{I_f}{I_{f0n}} & (b) \end{cases} \quad [19]$$

Dans la formule [19] E_{0n} et I_{f0n} désignent respectivement la fem induite et le courant d'excitation dans la génératrice en fonctionnement nominal.

Les courbes sont paramétrées par le nombre de tours par minutes N du rotor de la machine auquel sont familiarisés des lecteurs au lieu de la pulsation ω , car une machine synchrone à p paires de pôles satisfait les relations ci-dessous :

$$\begin{cases} \Omega = \frac{\pi N}{30} & (a) \\ \omega = p\Omega & (b) \\ \omega = 2\pi f & (c) \\ f = p \frac{N}{60} & (d) \end{cases} \quad [20]$$

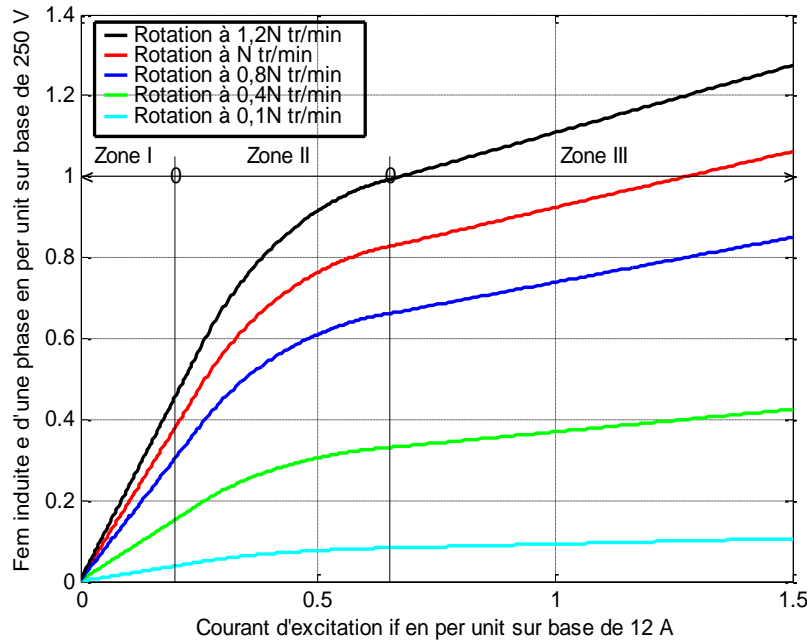


Figure 5. Réseau de caractéristiques à vide d'une génératrice synchrone triphasée en per unit

La figure 5 ci-dessus montre :

- ❖ La proportionnalité de la valeur efficace de la tension induite à la vitesse de rotation du rotor de la génératrice. Ce qui est en accord avec la présence de la dérivée $\frac{d\theta}{dt}$ de la position angulaire dans son expression.
- ❖ La présence de trois parties sur chaque caractéristique :
 - Partie 1 : Elle correspond à la zone I. Elle est parfaitement linéaire et a pour équation :

$$e = \begin{cases} ki_f \frac{\omega}{\omega_n} & (a) \\ ki_f \frac{f}{f_n} & (b) \\ ki_f \frac{\Omega}{\Omega_n} & (c) \\ ki_f \frac{N}{N_n} & (d) \end{cases} \quad [21]$$

- Partie 2 : Elle correspond à la zone II. Elle marque la mutation de l'état linéaire du circuit magnétique vers la saturation. Elle est présentée par un coude parabolique d'équation :

$$e = \begin{cases} \left(ai_f^2 + bi_f + c \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\omega}{\omega_n} & (a) \\ \left(ai_f^2 + bi_f + c \right)^{\frac{1}{2}} \frac{f}{f_n} & (b) \\ \left(ai_f^2 + bi_f + c \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\Omega}{\Omega_n} & (c) \\ \left(ai_f^2 + bi_f + c \right)^{\frac{1}{2}} \frac{N}{N_n} & (d) \end{cases} \quad [22]$$

Partie 3 : Elle se trouve dans la zone III. Elle correspond à la saturation du circuit magnétique et présente une caractéristique affine d'équation :

$$e = \begin{cases} (mi_f + p) \frac{\omega}{\omega_n} & (a) \\ (mi_f + p) \frac{f}{f_n} & (b) \\ (mi_f + p) \frac{\Omega}{\Omega_n} & (c) \\ (mi_f + p) \frac{N}{N_n} & (d) \end{cases} \quad [23]$$

Dans les formules [21, 22, 23] ;

- ❖ ω, f, Ω, N , désignent respectivement, la pulsation, la fréquence, la vitesse angulaire et le nombre de tours par minute à un point de fonctionnement donnée.
- ❖ $\omega_n, f_n, \Omega_n, N_n$ désignent respectivement, la pulsation, la fréquence, la vitesse angulaire et le nombre de tours par minute à un point de fonctionnement nominal.
- ❖ k, a, b, c, m, p des coefficients réels

3. Etude d'une génératrice synchrone à rotor bobiné associée à un aérogénérateur chargé

3.1. Description

C'est un groupe dont le moteur est une éolienne et la génératrice une génératrice synchrone à rotor bobiné. Il alimente une charge à courant continu ou variable à travers une interface électrique comme à la figure 6 ci-dessous.

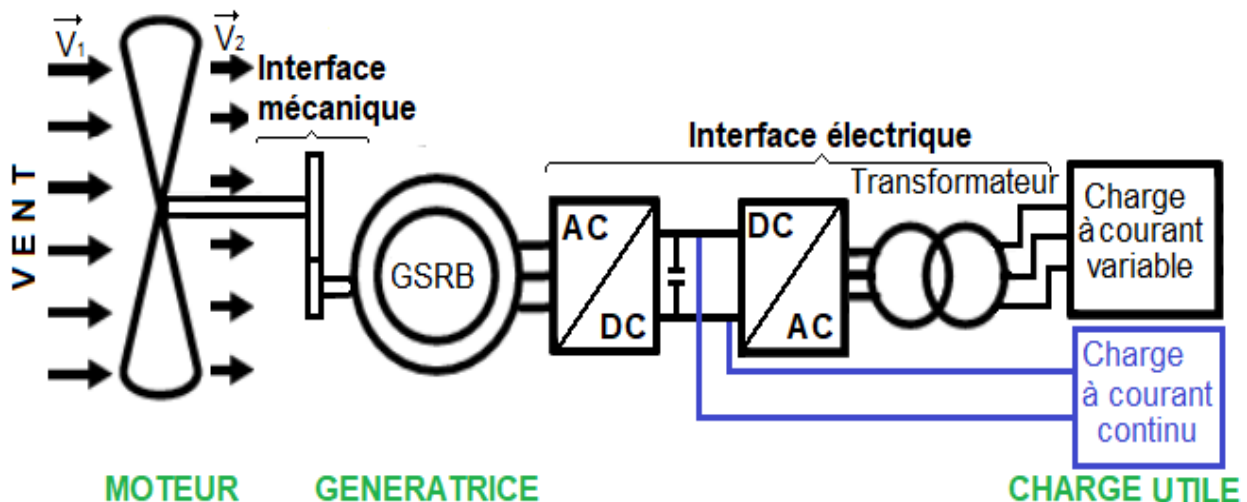


Figure 6. Aérogénérateur chargé et ses maillons

L'association du rapport de transformation du transformateur avec les rapports cycliques de différents convertisseurs de l'interface électrique permet de ramener la charge utile à la génératrice en trois cellules RL équilibrées en triphasé. La démarche similaire permet de créer la solidarité de la génératrice avec l'éolienne en un seul arbre équipé des pales. Il en résulte la schématisation simplifiée de l'aérogénérateur avec sa génératrice chargée comme à la figure 7 ci-dessus.

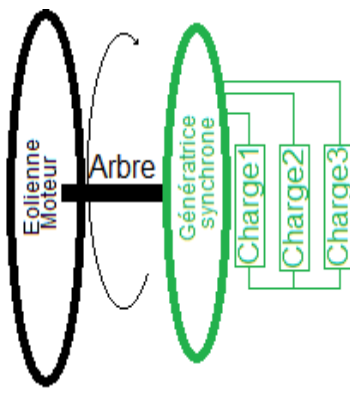


Figure 7. Aérogénérateur chargé et ses maillons ramenés à sa génératrice

Les charges Charge_1 , Charge_2 et Charge_3 représentent les charges utiles et les éléments de l'interface électrique ramenés à la génératrice. Elles appellent de la génératrice les courants i_a , i_b et i_c . Dans tout ce qui va suivre ces charges sont considérées équilibrées et représentées par la résistance R_{ch} et l'inductance L_{ch} .

3.2. Mise en équation et élaboration d'un schéma électrique de la génératrice du groupe

Le régime est équilibré. La génératrice est régie par les équations suivantes :

$$\begin{cases} e_a = R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + v_a \\ e_b = R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} + v_b \\ e_c = R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt} + v_c \end{cases} \quad [24]$$

Dans ce groupe de formules ψ_a , ψ_b et ψ_c sont des flux totalisés par les phases a, b et c avec la prise en compte des différentes inductances des enroulements de ces phases. Comme les courants i_a , i_b et i_c sont équilibrés, l'équation [24] ci-dessus va faire intervenir la résistance de chaque enroulement statorique R_s et l'inductance synchrone L_s de la génératrice [CHA 83] et [KOS 79] comme suit :

$$\begin{cases} e_a = R_s i_a + L_s \frac{d}{dt} i_a + v_a \\ e_b = R_s i_b + L_s \frac{d}{dt} i_b + v_b \\ e_c = R_s i_c + L_s \frac{d}{dt} i_c + v_c \end{cases} \quad [25]$$

La formule [25] donne la représentation schématique temporelle suivante.

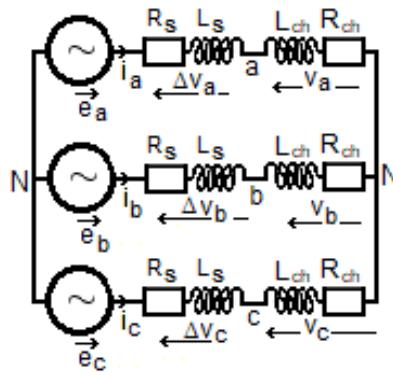


Figure 8. Schéma électrique temporel d'une génératrice triphasée chargée

La conversion de la formule (25) en formule complexe donne la formule (26) et la figure 9 ci-dessous.

$$\begin{cases} \underline{E}_a = R_s \underline{I}_a + j\omega L_s \underline{I}_a + \underline{V}_a \\ \underline{E}_b = R_s \underline{I}_b + j\omega L_s \underline{I}_b + \underline{V}_b \\ \underline{E}_c = R_s \underline{I}_c + j\omega L_s \underline{I}_c + \underline{V}_c \end{cases} \quad [26]$$

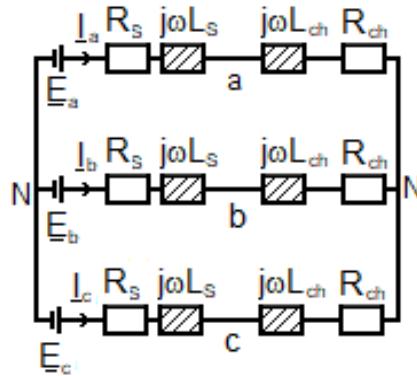


Figure 9. Schéma électrique complexe d'une génératrice triphasée chargée

La figure 9 ci-dessus fait apparaître deux impédances :

- ❖ l'impédance synchrone \underline{Z}_s telle que :

$$\underline{Z}_s = \begin{cases} R_s + j\omega L_s \\ R_s + jX_s \end{cases} \quad [27]$$

- ❖ l'impédance de charge \underline{Z}_{ch} telle que :

$$\underline{Z}_{ch} = \begin{cases} R_{ch} + j\omega L_{ch} \\ R_{ch} + jX_{ch} \end{cases} \quad [28]$$

3.3. Bilan de puissances actives du groupe

3.3.1. Hypothèses simplificatrices

Le bilan de puissances actives du groupe est effectué avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ❖ La perte mécanique est constante et donnée par la vitesse du vent au démarrage V_D du groupe ;
- ❖ La perte par hystérésis et la perte fer sont négligées ;
- ❖ La génératrice est en état magnétique de la zone III de la figure 5.

3.3.2. *Elaboration de l'expression du bilan de puissances actives du groupe*

L'aérogénérateur de principe ramené à sa génératrice de la figure 7 fait apparaître les puissances suivantes :

- ❖ La puissance motrice moyenne qui vaut :

$$P_{Motrice} = \langle p_{mo} \rangle = \frac{8}{27} K \rho S V_1^3 \quad [29]$$

- ❖ La perte mécanique due aux frottements et à l'inertie globale du système qui vaut :

$$p_{Méca} = \frac{8}{27} K \rho S V_D^3 \quad [30]$$

- ❖ La perte statorique provenant de la perte joule dans les enroulements qui vaut :

$$p_J = 3R_s I_{ch}^2 \quad [31]$$

- ❖ La puissance utile moyenne reçue par la charge qui vaut :

$$P_U = 3R_{ch} I_{ch}^2 \quad [32]$$

A une valeur efficace commune E des trois forces électromotrices de la génératrice, le courant appelé par la charge ramenée vaut :

$$I_{ch} = \frac{E}{\sqrt{(R_s + R_{ch})^2 + (\omega L_s + \omega L_{ch})^2}} \quad [33]$$

Le bilan de puissances actives du groupe s'écrit :

$$P_{Motrice} = p_{mec} + p_J + P_U \quad [34]$$

De ce qui précède, ce bilan de puissances du groupe s'écrit comme suit :

$$\frac{8}{27} K \rho S V_1^3 = \frac{8}{27} K \rho S V_D^3 + 3(R_s + R_{ch}) \frac{E^2}{(R_s + R_{ch})^2 + (\omega L_s + \omega L_{ch})^2} \quad [35]$$

La génératrice fonctionne dans la zone III de la figure 5. Avec la prise en compte de la formule [23], la valeur efficace de sa fem induite a pour expression :

$$E = \begin{cases} (mI_f + p) \frac{\omega}{\omega_n} & (a) \\ (mI_f + p) \frac{\Omega}{\Omega_n} & (b) \\ (mI_f + p) \frac{N}{N_n} & (c) \\ (mI_f + p) \frac{f}{f_n} & (d) \end{cases} \quad [30]$$

Finalement, par l'usage des formules [27], [28] et [36a], le bilan de puissances de l'aérogénérateur à la formule [35] devient :

$$\frac{8}{27} K \rho S (V_1^3 - V_D^3) = 3(R_s + R_{ch}) \frac{(mI_f + p)^2 \omega^2}{(R_s + R_{ch})^2 \omega_n^2 + (X_s + X_{ch})^2 \omega^2} \quad [37]$$

La formule [37] donne la relation entre la vitesse V_1 du vent et la pulsation ω des signaux électriques permettant à la génératrice de fournir la perte Joule statorique p_j et la puissance utile P_U . Elle établit donc la relation entre la fréquence f des signaux électriques de la génératrice et la vitesse V_1 du vent attaquant l'éolienne. Selon les formules [23] et [37], la vitesse V_1 du vent fixe la vitesse angulaire Ω et le nombre de tours par minute N du rotor de la génératrice aussi.

4. Simulation avec charge ramenée égale à la charge nominale pour des fréquences variant de 0 Hz à 100 Hz

4.1. Hypothèses simplificatrices

C'est un groupe dont le moteur est une éolienne et la génératrice une génératrice synchrone à rotor bobiné chargé par une interface électrique alimentant une charge à courant continu ou variable comme à la figure 6 ci-dessous.

Les hypothèses simplificatrices en 3.3.1 sont enrichies des hypothèses suivantes :

- ❖ La prise en compte de la réaction magnétique de l'induit est globalisée par le coefficient d'équivalence de 0,16 fixant l'état magnétique de la génératrice en excitation nominale à son état de 14,5 A d'excitation correspondant à une fem de 250 V sur la droite en noir de la figure 9 ;
- ❖ L'excitation est fournie par une source indépendante ;
- ❖ La perte par excitation est négligée ;
- ❖ La génératrice est représentée par sa force électromotrice en série avec sa résistance R_s et son inductance synchrone L_s .

4.2. Matériels utilisés

Les calculs et le traçage des courbes sont effectués avec Scilab.

Trois séries de simulation sont menées sur une génératrice dont les caractéristiques sont fortement inspirées des données de la génératrice utilisée dans [ALY 94]. A cause des clauses y afférentes, la génératrice de plaque signalétique suivante est utilisée.

Puissance apparente nominale : $S_n = 15$ kVA Courant d'excitation en pleine charge 17,2A

Tension composée nominale : $U_n = 400$ V Couplage des enroulements statoriques : Y

Pôles saillants sans amortisseur Nombre de paires de pôles $p=2$ Fréquence : 50 Hz

En admettant que cette génératrice soit homothétique à celle utilisée dans [ALY 94], la valeur efficace de force électromotrice de la génératrice représentée par la figure 9 ci-dessous.

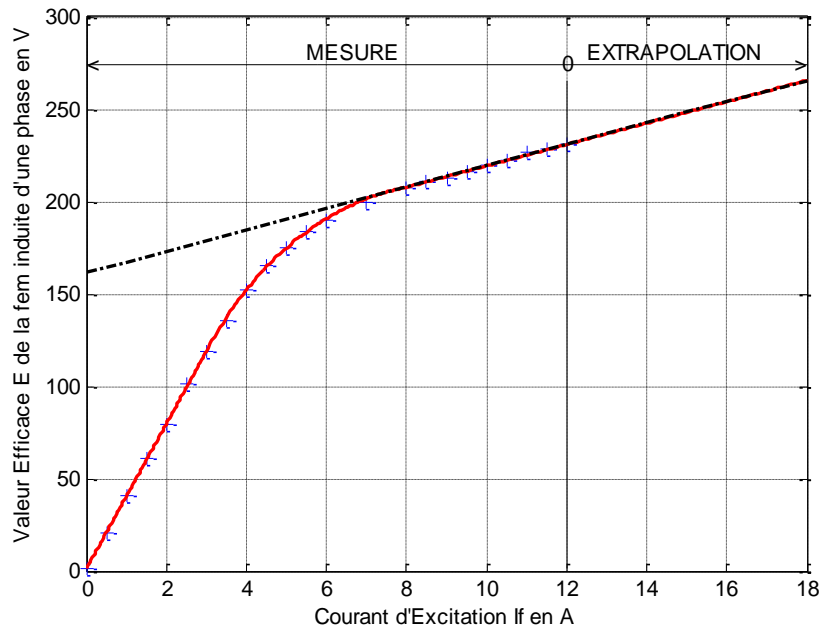


Figure 10. Caractéristique à vide de la génératrice de simulation

Son impédance synchrone à 50 Hz est estimée à $\underline{Z}_s = R_s + j11R_s = 0,2 + j2,2$.

4.3. Mode opératoire

4.3.1. Détermination de l'impédance nominale ramenée à la génératrice et du courant et de la tension y afférents

Le module Z_n de l'impédance nominale ramenée à la génératrice est calculé à l'aide la puissance apparente nominale S_n de la génératrice avec le facteur de puissance de 0,8. En désignant par V_n la valeur efficace de la tension aux bornes de l'impédance nominale ramenée à la génératrice, et en admettant que la génératrice soit surexcitée en produisant une fem de valeur efficace E_n , les grandeurs S_n , Z_n , V_n et E_n vérifient les relations suivantes :

$$\begin{cases} S_n = 3Z_n \frac{E_n^2}{(R_s + 0,8Z_n)^2 + (X_s + 0,6Z_n)^2} & (a) \\ \text{Soit} \\ S_n Z_n^2 + [S_n(1,6R_s + 1,2X_s) - 3E_n^2]Z_n + S_n(R_s^2 + X_s^2) = 0 & (b) \\ I_n = \frac{E_n}{\sqrt{(R_s + 0,8Z_n)^2 + (X_s + 0,6Z_n)^2}} & (c) \\ V_n = Z_n I_n & (d) \end{cases} \quad [38]$$

Le module Z_n de l'impédance nominale ramenée à la génératrice tirée de l'équation [38b] et des données ci-dessus vaut :

$$Z_n = 9\Omega \Rightarrow \begin{cases} R_{chn} = 7,2\Omega \\ X_{chn} = 5,4\Omega \end{cases} \quad [39]$$

La valeur efficace I_n du courant fourni par la génératrice tirée de l'équation [38c] et de la plaque signalétique vaut :

$$I_n = 23,57A \Rightarrow I_{ch} = 18,86 - j14,14 \quad [40]$$

La valeur efficace V_n de la tension aux bornes de la génératrice tirée de l'équation [38d] :

$$V_n = 212,10 \square 212V \quad [41]$$

Or, conformément aux normes en vigueur et à la plaque signalétique de la génératrice cette tension doit être de 220 V. Ce qui correspond à une variation relative de -3,7% dont la valeur absolue est inférieure à 5%. C'est une valeur acceptable. L'impédance de la formule [39] sera utilisée comme impédance nominale de la charge ramenée à la génératrice dans toutes les simulations.

4.3.2. Détermination du rayon des pales

Le rayon des pales est calculé avec la formule [35] dans laquelle la surface S vaut πR^2 , pour les grandeurs nominales de la génératrice. Pour ce calcul, le facteur de puissance est de 0,8, la fréquence 50Hz. Le démarrage est conditionné par la supériorité de la puissance motrice par rapport à la perte mécanique globale du groupe, responsable du couple résistant du démarrage. Cette situation est obtenue dès que la vitesse du vent est supérieure à la valeur V_{Dn} .

A la vitesse V_n du vent correspond le rayon R tel que :

$$R = \sqrt{\frac{27}{\pi 8 K \rho (V_n^3 - V_{Dn}^3)} \left(P_n + 3 \frac{R_s}{(R_s + R_{ch})^2 + X_s^2} E_n^2 \right)} \quad [42]$$

Selon [FRA 85], la vitesse moyenne annuelle du vent à Antsiranana est de l'ordre de 7m/s et K de l'ordre de 0,4. Les autres données afférentes au calcul sont :

$f=50$ Hz, $E_n=250$ V, $R_s=0,2\Omega$, $X_s=2,2 \Omega$, $R_{chn}=6,4\Omega$ et $X_{chn}=5,4\Omega$, $\rho=1,2 \text{ kgm}^{-3}$, $V_{Dn}=3 \text{ ms}^{-1}$ et $S_n=15000 \text{ VA}$

Le rayon des pales calculé avec la formule [42] ci-dessus a pour valeur approchée par excès :

$$R_n=10,46 \text{ m} \square 10,50 \text{ m} \quad [43]$$

4.3.3. Influence du rayon des pales

4.3.3.1. Expressions de différentes puissances actives et de divers courants

La première série de simulation est effectuée dans les conditions suivantes :

❖ La courbe de la valeur efficace de la fem induite par phase de figure 10 est exploitée dans la troisième zone et contient les points (10A ; 220V) et (12A ; 231V). Sa droite d'approximation en noire a pour équations :

$$E = \begin{cases} \left(\frac{11}{2} I_f + 165 \right) \frac{\omega}{\omega_n} & \text{(a)} \\ \left(\frac{11}{2} I_f + 165 \right) \frac{\Omega}{\Omega_n} & \text{(b)} \\ \left(\frac{11}{2} I_f + 165 \right) \frac{N}{N_n} & \text{(c)} \\ \left(\frac{11}{2} I_f + 165 \right) \frac{f}{f_n} & \text{(d)} \end{cases} \quad [44]$$

La génératrice est quadripolaire et conçue pour 50 Hz. A une fréquence donnée correspond une pulsation des signaux électriques de la génératrice. La vitesse requise du vent par cette fréquence est

tirée des formules [35] et [36d] en tenant en compte la puissance utile ramenée à la génératrice associée à la perte Joule et à la perte mécanique.

❖ La charge ramenée à la génératrice est maintenue à la charge nominale sous 212 V avec le facteur de puissance de 0,8 à 50Hz. Soit $R_{ch}=7,2\Omega$ et $L_{ch}=\frac{0,054}{\pi}H$;

❖ Le rayon nominal $R_n=10,5m$ et trois autres $R_1=8,5m$, $R_2=5,5m$, et $R_3=2,5m$ sont les quatre rayons, considérés dans les séries de simulations effectuées. La perte mécanique est constante. Il en résulte que la vitesse V_{DR_k} du vent au démarrage du groupe, pour un rayon R_k avec $1 \leq k \leq 3$ des pales vaut :

$$V_{DR_k} = V_{Dn} \sqrt[3]{\frac{R_n^2}{R_k^2}} \quad [45]$$

❖ Le courant d'excitation est constamment égal à 17,2 A mais ses effets sont équivalents à ceux de 15,45 A. La fem de la génératrice en fonction de la fréquence devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \left(\frac{11}{2} 15,45 + 165 \right) \frac{f}{50} = \frac{250}{50} f \quad (a) \\ \text{Soit} \\ E = 5f \quad (b) \end{array} \right. \quad [46]$$

❖ Le courant fourni par la génératrice a l'expression suivante

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ch} = \frac{E}{\sqrt{(R_s + R_{ch})^2 + (\omega L_s + \omega L_{ch})^2}} \quad (a) \\ \text{Soit} \\ I_{ch} = \frac{5f}{\sqrt{(R_s + R_{ch})^2 + \left(\frac{f}{50} X_s + \frac{f}{50} X_{ch} \right)^2}} \quad (b) \end{array} \right. \quad [47]$$

❖ La perte Joule vaut :

$$P_J = 3R_s I_{ch}^2 = \frac{75R_s f^2}{(R_s + R_{ch})^2 + \left(\frac{f}{50} X_s + \frac{f}{50} X_{ch} \right)^2} \quad [48]$$

❖ La puissance utile a pour expression :

$$P_U = 3R_{ch} I_{ch}^2 = \frac{75R_{ch} f^2}{(R_s + R_{ch})^2 + \left(\frac{f}{50} X_s + \frac{f}{50} X_{ch} \right)^2} \quad [49]$$

❖ La puissance fournie par la génératrice vaut :

$$P_{gén} = P_J + P_U = \frac{75(R_s + R_{ch}) f^2}{(R_s + R_{ch})^2 + \left(\frac{f}{50} X_s + \frac{f}{50} X_{ch} \right)^2} \quad [50]$$

❖ La vitesse du vent requise pour que la génératrice puisse produire la puissance $P_{gén}$ sous la fréquence f , compte tenu de la prise en compte de la vitesse du vent au démarrage du groupe et pour un rayon R des pales de l'éolienne, a pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = \sqrt[3]{\frac{27P_{gén}}{8K\rho\pi R^2}} + V_D^3 \quad (a) \\ \text{Soit} \\ V_1 = \sqrt[3]{\frac{27}{8K\rho\pi R^2} \frac{75(R_s + R_{ch})f^2}{(R_s + R_{ch})^2 + \left(\frac{f}{50}X_s + \frac{f}{50}X_{ch}\right)^2}} + V_D^3 \quad (b) \end{array} \right. \quad [51]$$

❖ La puissance motrice fournie par le vent à la génératrice produisant la puissance $P_{gén}$ sous la vitesse V_1 , compte tenu de la prise en compte de la vitesse du vent au démarrage du groupe et pour un rayon R des pales de l'éolienne, a pour expression :

$$P_{mot} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{8}{27}K\rho\pi R^2 V_1^3 \quad (a) \\ \text{Soit} \\ \frac{8}{27}K\rho\pi R^2 \left(\frac{27}{8K\rho\pi R^2} \frac{75(R_s + R_{ch})f^2}{(R_s + R_{ch})^2 + \left(\frac{f}{50}X_s + \frac{f}{50}X_{ch}\right)^2} + V_D^3 \right) \quad (b) \end{array} \right. \quad [52]$$

La formule [50] provient de la combinaison des formules [36] et [37] aux formules [43] à [48] avec les considérations et hypothèses simplificatrices énoncées plus haut.

4.3.3.2. Valeurs limites des grandeurs électriques

Le courant électrique I_{ch} et la puissance apparente S_{ch} appelés par la charge ramenée à la génératrice sont limités par le courant nominal I_n de cette génératrice et déterminés comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ch} \leq I_n = \frac{S_n}{3V_n} \quad (a) \\ \text{Soit} \\ I_{ch} \leq I_n = \frac{15000}{3 \times 212} = 23,585 \Rightarrow I_{ch} \leq 23,5A \quad (b) \\ S_{ch} \leq S_n \quad (c) \\ \text{Soit} \\ S_{ch} \leq 15000VA \quad (d) \end{array} \right. \quad [53]$$

Le dépassement de la valeur limite du courant causera la destruction des enroulements de l'induit de la génératrice par échauffement excessif qui peut être traduite par la fusion des conducteurs qui constituent l'induit.

4.3.3.3. Résultats

Les tableaux suivants donnent comme résultats de simulations la FEM, le courant, la perte Joule, la puissance utile et la puissance de la génératrice ainsi que la vitesse du vent et la puissance motrice de l'aérogénérateur pour les quatres différents rayons R des pales.

Rayon des pales R=10,5 m et Vitesse du vent au démarrage du groupe Vd = 3 m/s														
f [Hz]	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E [V]	0	0	0	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
I [A]	0	0	0	0	6,62	12,50	17,26	20,88	23,57	25,54	27,01	28,10	28,93	29,58
pj [W]	0	0	0	0	26	94	179	262	333	391	438	474	502	525
P _U [W]	0	0	0	0	946	3375	6433	9419	11998	14094	15753	17056	18082	18894
P _g [W]	0	0	0	0	972	3469	6611	9681	12331	14485	16190	17530	18584	19419
V ₁ [m/s]	0	1	2	3,00	3,60	4,60	5,44	6,07	6,52	6,85	7,09	7,26	7,39	7,50
P _{mot} [W]	0	49	394	1330	2303	4799	7941	11011	13661	15815	17520	18860	19914	20749

Tableau 1. Résultats pour R=10,5 m

Rayon des pales R=8,5 m et Vitesse du vent au démarrage du groupe Vd = 3,45 m/s															
f [Hz]	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E [V]	0	0	0	0	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
I [A]	0	0	0	0	0	6,62	12,50	17,26	20,88	23,57	25,54	27,01	28,10	28,93	29,58
pj [W]	0	0	0	0	0	26	94	179	262	333	391	438	474	502	525
P _U [W]	0	0	0	0	0	946	3375	6433	9419	11998	14094	15753	17056	18082	18894
P _g [W]	0	0	0	0	0	972	3469	6611	9681	12331	14485	16190	17530	18584	19419
V ₁ [m/s]	0	1	2	3	3,45	4,15	5,30	6,27	6,99	7,51	7,88	8,16	8,36	8,51	8,63
P _{mot} [W]	0	32	259	874	1330	2303	4799	7941	11011	13661	15815	17520	18860	19914	20749

Tableau 2. Résultats pour R=8,5 m

Rayon des pales R=5,5 m et Vitesse du vent au démarrage du groupe Vd = 4,62 m/s															
f [Hz]	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E [V]	0	0	0	0	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
I [A]	0	0	0	0	0	6,62	12,50	17,26	20,88	23,57	25,54	27,01	28,10	28,93	29,58
pj [W]						26	94	179	262	333	391	438	474	502	525
P _U [W]	0	0	0	0	0	946	3375	6433	9419	11998	14094	15753	17056	18082	18894
P _g [W]	0	0	0	0	0	972	3469	6611	9681	12331	14485	16190	17530	18584	19419
V ₁ [m/s]	0	1	2	4	4,62	5,54	7,08	8,38	9,34	10,04	10,54	10,90	11,17	11,38	11,54
P _{mot} [W]	0	13	108	863	1330	2303	4799	7941	11011	13661	15815	17520	18860	19914	20749

Tableau 3. Résultats pour R=5,5 m

Rayon des pales R=2,5 m et Vitesse du vent au démarrage du groupe Vd = 7,81 m/s															
f [Hz]	0	0	0	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E [V]	0	0	0	0	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
I [A]	0	0	0	0	0	6,62	12,50	17,26	20,88	23,57	25,54	27,01	28,10	28,93	29,58
pj [W]		0	0	0	0	26	94	179	262	333	391	438	474	502	525
P _U [W]	0	0	0	0	0	946	3375	6433	9419	11998	14094	15753	17056	18082	18894
P _g [W]	0	0	0	0	0	972	3469	6611	9681	12331	14485	16190	17530	18584	19419
V ₁ [m/s]	0	1	4	7	7,81	9,38	11,98	14,17	15,80	16,98	17,82	18,44	18,90	19,25	19,51
P _{mot} [W]	0	3	179	958	1330	2303	4799	7941	11011	13661	15815	17520	18860	19914	20749

Tableau 4. Résultats pour R=2,5 m

Les résultats contenus dans ces tableaux peuvent être repris graphiquement dans l’ordre comme aux courbes suivantes.

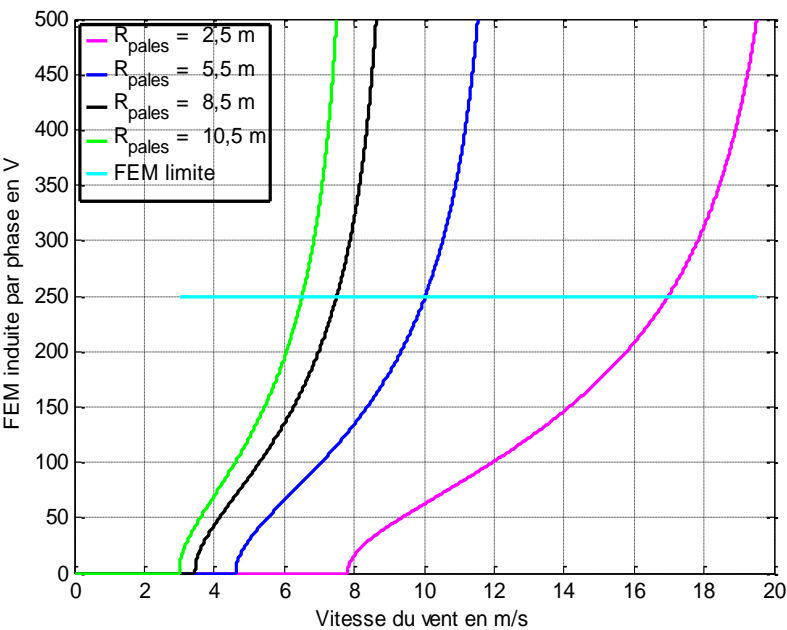


Figure 11. FEM induite en charge par phase de la génératrice pour les quatre rayons des pales

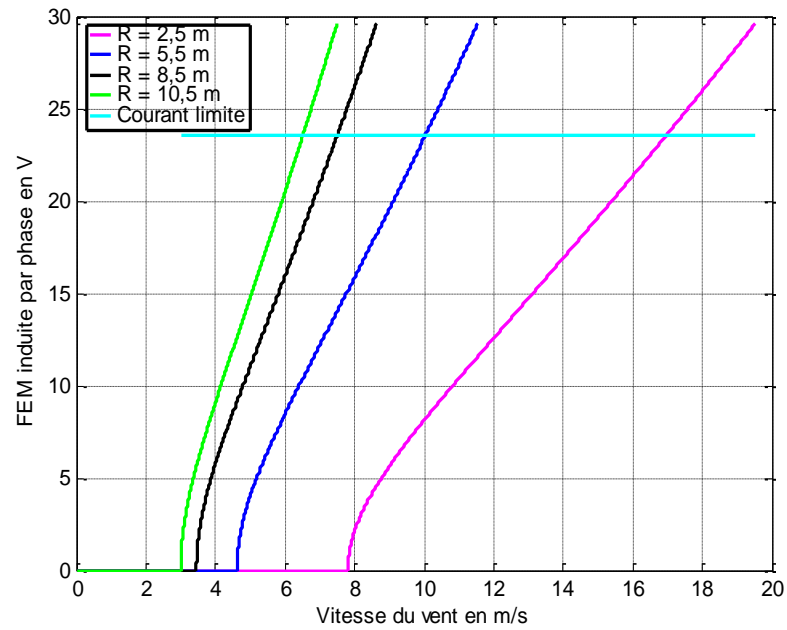


Figure 12. Courant fourni par la génératrice pour les quatre rayons des pales

Pour être représenté avec les puissances, le courant fourni par la génératrice doit être référé à la puissance nominale de la génératrice par sa conversion en système per unit et sa multiplication par la puissance active nominale de la génératrice comme suit :

$$I_g' = 3 \frac{(R_s + R_{ch}) I_n^2}{I_n} I_g \quad [54]$$

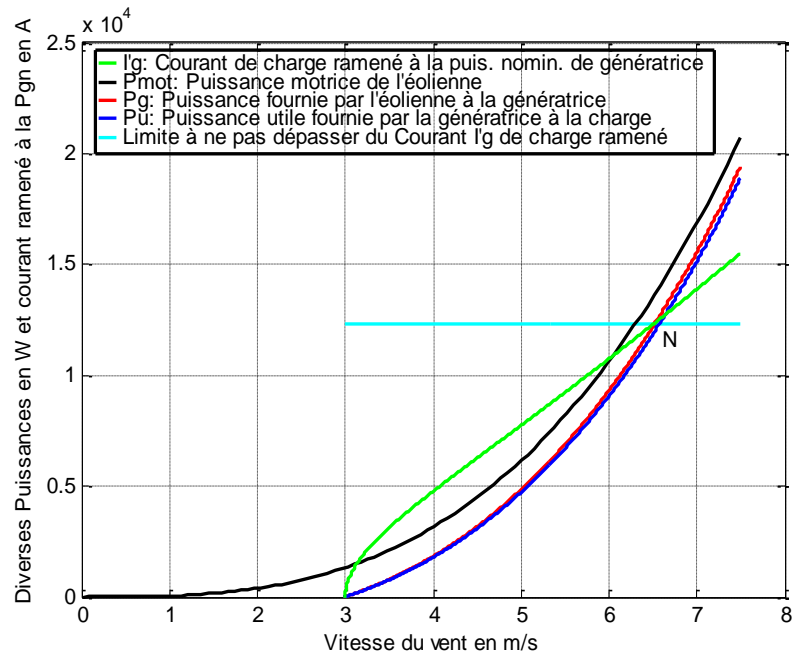


Figure 13. Puissance motrice, puissance de la génératrice et de charge, courant ramené de charge pour rayon des pales $R = 10,5 \text{ m}$

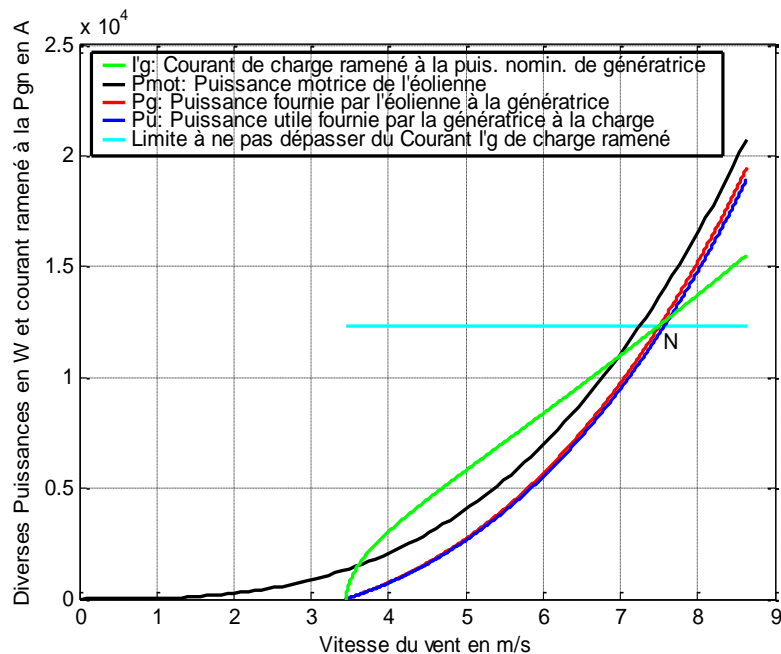


Figure 14. Puissance motrice, puissance de la génératrice et de charge, courant ramené de charge pour rayon des pales $R = 8,5 \text{ m}$

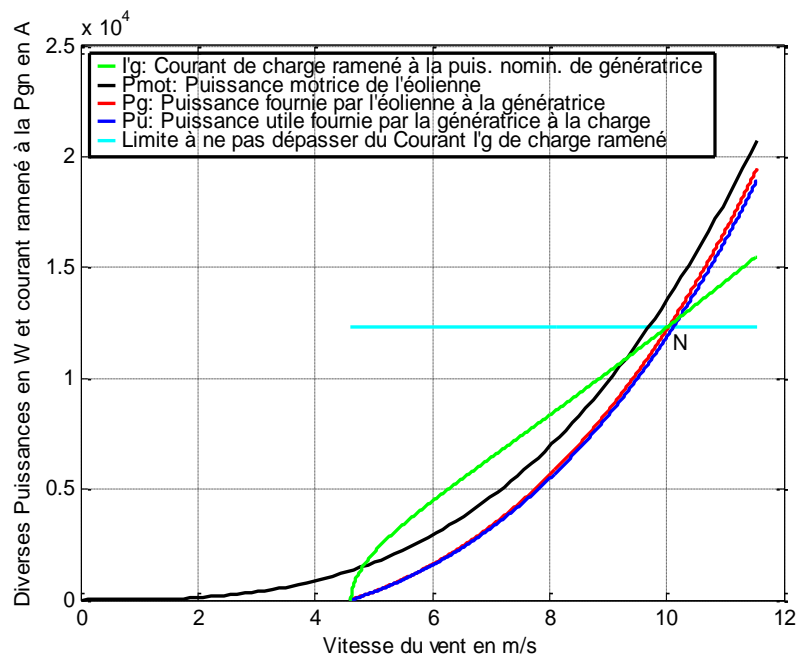


Figure 15. Puissance motrice, puissance de la génératrice et de charge, courant ramené de charge pour rayon des pales $R = 5,5 \text{ m}$

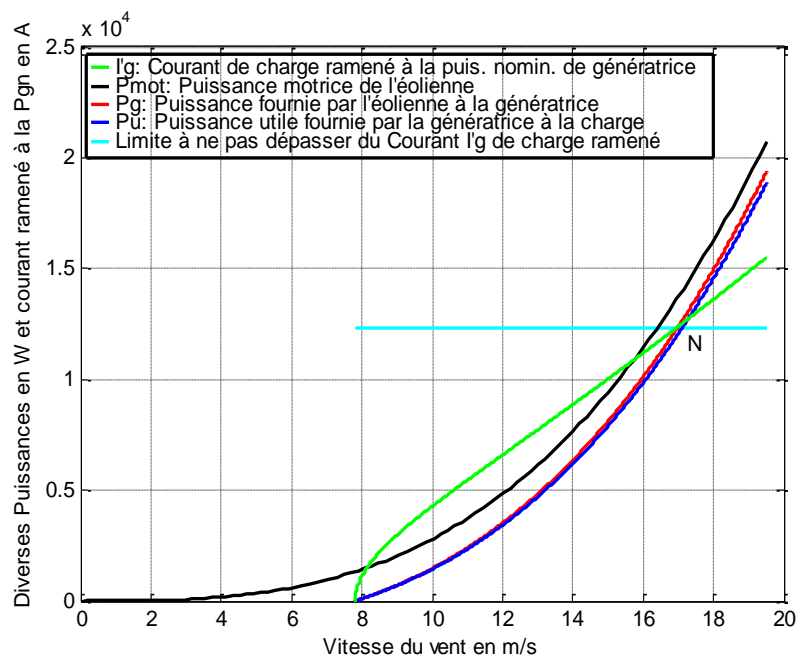


Figure 16. Puissance motrice, puissance de la génératrice et de charge, courant ramené de charge pour rayon des pales $R = 2,5 \text{ m}$

4.3.3.4. Interprétations des résultats

Chacun des quatre tableaux 1 à 4 comporte une colonne verte correspondant aux grandeurs de démarrage et une colonne bleue donnant les grandeurs nominales. En deçà de la colonne verte, le groupe ne tourne pas, car la puissance motrice de l'éolienne est inférieure à la perte mécanique globale du groupe. La fem par phase de la génératrice y est nulle. Par conséquent, le courant et les puissances électriques y sont nuls aussi. Au-delà de la colonne bleue, la puissance motrice de l'éolienne est supérieure à la puissance nominale de la génératrice. La conversion de la puissance excédentaire en puissance électrique causera la destruction des enroulements de la génératrice par échauffement excessif. Cette destruction peut être évitée par adjonction d'une impédance en série

avec la charge. L'ajout d'une impédance en parallèle est strictement déconseillé car ce montage affaiblit l'impédance équivalente alimentée par la génératrice qui subit une surintensité.

Indépendamment des rayons des pales, toutes les grandeurs afférentes à la colonne d'une fréquence sont identiques sauf la vitesse du vent. Ceci vient de la démarche adoptée. En effet, la fréquence conditionne la génératrice dont la fem induite est proportionnelle à la fréquence. Par contre la relation entre la vitesse du vent et la fréquence donnée par la formule [37] ne l'est pas. Il en résulte une croissance de la vitesse du vent au démarrage contre la diminution des rayons des pales de l'éolienne. Il en est de même pour la vitesse du vent pour l'atteinte de la tension, du courant et de la puissance nominale de la génératrice.

La fem induite et le courant en charge ont des variations non linéaires à cause de la relation non linéaire entre la fréquence et la vitesse du vent à la formule [37]. La vitesse du vent au démarrage comme à l'atteinte de la tension, du courant et de la puissance nominaux de la génératrice augmente lorsque les rayons des pales de l'éolienne diminuent. Cette situation est conforme à la proportionnalité de la puissance motrice à la surface balayée par les pales. Ces faits sont relatés par les courbes aux figures 10 et 11.

Face à sa faiblesse devant la puissance motrice, la puissance transmise à la génératrice et la puissance utile, la perte joule n'est pas directement représentée sur les figures 13 à 16. Elle est incluse dans la puissance transmise à la génératrice et donnée par la différence entre la puissance de la génératrice en rouge et la puissance utile en bleu.

Les courbes de ces figures sont des translatées entre elles à cause du glissement de la vitesse du vent au démarrage selon les rayons. La courbe en vert représente le courant fourni par la génératrice, ramené à la puissance nominale selon la formule [54]. Elle coupe la courbe de la puissance de la génératrice au point N qui est le point de fonctionnement nominal pour lequel la génératrice a été conçue. Ce point N glisse dans le sens croissant de la vitesse du vent pour les mêmes raisons évoquées plus haut. Au-delà de vitesse au point N, le surplus de la puissance motrice provoquera une surintensité dans la génératrice car la fem induite dépassera la fem induite nominale à cause de la constance du courant d'excitation.

5. Conclusion et perspectives

Cet article s'est fixé comme objectif la détermination de la contrainte électrique majeure d'une génératrice synchrone à rotor bobiné associée à un aérogénérateur chargé. A cet effet, la charge et l'interface électriques sont considérées ramenées à la génératrice à l'aide du rapport de transformation du transformateur et des rapports cycliques des convertisseurs de tension intercalés entre les différentes charges et la génératrice à laquelle l'éolienne et l'interface mécanique sont solidarisées. L'excitation, fournie par une source indépendante est supposée constante et la charge ramenée invariable. La simulation par programmation sous Scilab menée sur la génératrice ci-dessus décrite a permis d'émettre les conclusions suivantes :

- ❖ Une génératrice synchrone à rotor bobiné associée à un aérogénérateur chargé a besoin des interfaces mécaniques et électriques pour pouvoir fonctionner correctement. Toutefois, il est possible de l'étudier comme maillon isolé de l'aérogénérateur en lui ramenant les charges avec l'interface électrique et en la solidarissant avec l'éolienne ;
- ❖ Pour un rayon donné et un angle d'incidence fixé, à chaque vitesse de vent correspond une fréquence des grandeurs électriques fournies par la génératrice ;
- ❖ Tant que la puissance motrice délivrée par l'éolienne reste inférieure à la perte mécanique globale de l'aérogénérateur, le groupe demeure immobile et toutes les grandeurs électriques de la génératrice sont nulles. La vitesse du vent pour l'atteinte de cette puissance motrice minimale

croît avec la vitesse du vent quand le rayon des pales diminue. Ce rayon des pales fait glisser le point de fonctionnement nominal de la même façon que la vitesse du vent au démarrage du groupe ;

❖ Après le démarrage du groupe, la génératrice fournit un courant admissible qui dépend de l'appel de courant de la charge, jusqu'à la vitesse du vent produisant le courant nominal. Au-delà de cette valeur, la puissance motrice forcera, par le biais de son excédent, la génératrice à fournir un surplus de courant causant une surintensité pouvant lui être fatale à cause de l'échauffement excessif ;

❖ La surintensité constitue la contrainte majeure de la génératrice synchrone à rotor bobiné. Cette contrainte peut être gérée par l'ajustement du courant d'excitation. Ce qui qualifie d'avantageuse une génératrice synchrone à rotor bobiné par rapport à une génératrice synchrone à aimant permanent dont l'excitation est figée dès sa construction.

L'étude thermoélectrique et l'analyse des effets des harmoniques de courant causés par le convertisseur alternatif-continu de l'interface électrique n'ont pas été abordées dans le présent article et constituent des pistes à explorer. La capture de la puissance motrice, la commande des pales ou d'orientation, l'ajustement de la fem à l'aide du courant d'excitation, le réglage des composantes réactives de la charge et la recherche des interfaces électriques efficaces forment des champs de réflexion sur les travaux futurs pour lesquels les auteurs convient les chercheurs intéressés par l'aérogénérateur. Cette liste est encore loin de l'exhaustivité compte tenu de questions autour de chaque maillon de l'aérogénérateur.

Pour terminer, les auteurs tiennent à attirer l'attention de tout utilisateur d'aérogénérateur sur le degré très élevé de la dangerosité de la surintensité au niveau de la génératrice associée à un aérogénérateur chargé. Cette surintensité peut apparaître dès que la vitesse maximale du vent est atteinte si l'excitation est suffisante. Cet alerte constitue l'intérêt principal de la présente étude pour bonne protection d'une installation.

Bibliographie

- [AHM 10] AHMED BEKHTI, « Simulation de l'écoulement autour d'un profil de pale d'éolienne », Centre de Développement des Energies Renouvelables B.P. 62, Route de l'observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie, Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 49 – 56
- [ALY 94] Tsialefitry ALY SAANDY « Influence de la géométrie des machines synchrones sur leur comportement face aux harmoniques de courant » Thèse de doctorat soutenue le 06 juillet 1994 à Gif-sur-Yvette, <http://www.theses.fr/1994PA066299> ou www.rennes.supelec.fr/ren/biblio/theses/CatalogueTheses.pdf
- [BAK 15] Larbi EL BAKKALI, « Modélisation et Simulation du système de conversion énergétique d'un aérogénérateur », Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, Dec 2015, Tanger, Maroc. fffal-01260740 Ing.mohamed.elyaacouby@gmail.com larbi_elbakkali_20@hotmail.com
- [BOU 16] BOUMRAR I., « Effets de l'angle de calage des pales d'une petite éolienne sur sa puissance électrique générée », ICEMAEP2016, Octobre 30-31, 2016, Constantine, Algeria
- [CHA 83] CHATELAIN, “ Machines électriques ”. Traité d'électricité volume X, Presses polytechniques romandes 1983
- [FRA 85] Manuel FRANQUESA « Le potentiel énergétique du vent d'Antsiranana », Rapport pour la coopération technique suisse sur le projet E.E.S.P. CUR d'Antsiranana, Madagascar, mars 1985
- [FRA 12] Manuel FRANQUESA « La energía eólica y su aprovechamiento mediante molinos de viento », traduction en 2012 de l'allemand en espagnol de l'un des manuscrits de 1926 d'Albert Betz, répertorié sous « betz_energia_eolica.pdfiranana » pp 14-18.
- [HLA 84] HLADIK « Energétique éolienne », Edition Masson 1984, Québec, Canada

- [ISM 18] ISMAÏL SOSSEY, « Une étude aérodynamique d'une pale d'éolienne à axe horizontal », Université Hassan 1er, F.S.T Settati, Maroc, ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr, Publié le 16 mai 2018 DOI : 10.21494/ISTE.OP.2018.0257
- [JEA 07] JEAN-LUC HARION, « Simulations numériques des performances d'une nouvelle géométrie d'éolienne à axe vertical », École des Mines de Douai Département Énergétique Industrielle 941, rue Charles Bourseul, BP 10838, 59508 Douai Cedex, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007
- [JOU 07] Munif JOURIE « Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien », thèse de doctorat N° : 2007 ENAM 0032 de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers soutenue publiquement le 20 décembre 2007 pp 14-18.
- [KOS 79] M. KOSTENKO et I. PIOTROVSKI, ' ' Machines électriques' ', Tome 2, Traduction française, Editions Mir 1979
- [MEN 01] Jean-Luc MENET, « Une procédure de Comparaison de quelques éoliennes classiques basée sur l'utilisation du critère L-Sigma », Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis Le Mont Houy - 59313 Valenciennes Cedex 9, XV^{ème} Congrès Français de Mécanique Nancy, 3 – 7 Septembre 2001.
- [MUL 12] Bernard Multon « Le Génie Electrique dans le vent: état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne », HAL Id: hal-00674684, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674684>
- [PHI 19] PHILIPPE BRUYERRE, « Naissance des éoliennes : question de définition(s) », Centre Alexandre Koyré, ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr Technologie et Innovation, 2019, vol. 4, n° 4, Publié le 12 septembre 2019 DOI : 10.21494/ISTE.OP.2019.0409
- [RAV 19] Francis Raveloson « Etude de l'écoulement tridimensionnel et instationnaire dans un rotor d'une éolienne Savonius », Université d'Antsiranana, Madagascar, ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr, Publié le 12 avril 2019 DOI : 10.21494/ISTE.OP.2019.0357
- [SAM 10] Samir Bellarbi « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie pour un système éolien de petite puissance », Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 57 – 67
- [SMA 11] Smaïl. M. « Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne équipée d'une machine asynchrone double alimentation », Université de l'Unité Africaine Ahmed Draïa, Adrar, Algérie, Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 (2011) 233 – 238
- [ZOU 19] Hassane ZOUIRI « Energie renouvelable et développement durable au Maroc », Université Mohammed V, FSJES Agdal, Rabat – Maroc (REMFO N°8 Mars 2019), <http://revues.imist.ma/?journal=REMFO&page=about>