

Modélisation et Simulation d'une Chaîne de Conversion Éolienne

Mr. Bencherif Bilal^{#1}, Pr. Benalla Hocine^{*2}

Université Mentouri I de Constantine, Algérie

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'électrotechnique

¹bilelb21@yahoo.fr

²benallad@yahoo.fr

II. MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

Résumé— Dans cet article, nous avons développé un modèle d'une chaîne de conversion éolienne composée d'une turbine horizontale à trois pales couplée directement à une génératrice synchrone à aimant permanent, et de deux convertisseurs électroniques connectés entre eux à travers un bus continu équipé d'une capacité de filtrage et d'un système de stockage. La modélisation de la turbine éolienne est basée sur le calcul des efforts aéronautiques exercée par le vent sur les pales, ce qui a permis de distinguer le variable qui agit effectivement sur le coefficient de puissance et de mieux comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne.

Mots clés—Machine synchrone à aimant permanent, Onduleur, pale, portance, Redresseur non contrôlé, trainée, Turbine.

I. INTRODUCTION

La modélisation de cette chaîne de conversion a été fait pour bien comprendre le principe de fonctionnement et surtout pour dimensionner de façon optimale les principaux éléments de la chaîne,

Pour ce faire, on a réparti l'article comme suit:

- une première partie contiendra la modélisation aéronautique de la turbine éolienne.
- une deuxième partie présentera l'association de la turbine éolienne et de la génératrice synchrone à aimants permanents connectée à un redresseur à six diodes.
- en terminera par un modèle complet d'une chaîne éolienne alimente une charge résistive (figure 1).

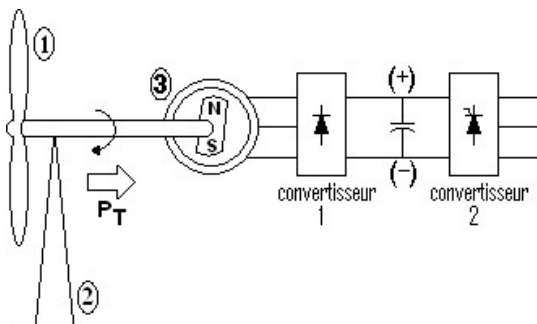


Fig. 1. Chaîne de conversion éolienne.
(1) : Les pales ; (2) : Tour ; (3) : La génératrice

La figure. 1 montre une turbine éolienne couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents. La vitesse de rotation optimale de la turbine détermine la fréquence d'alimentation de la génératrice synchrone.

II. A. Notions sur la théorie de l'aile portante

L'élément principal du moteur éolien est la pale. Considérons donc un profil d'aile dans un vent de vitesse V (figure. 2) et précisons quelques définitions.

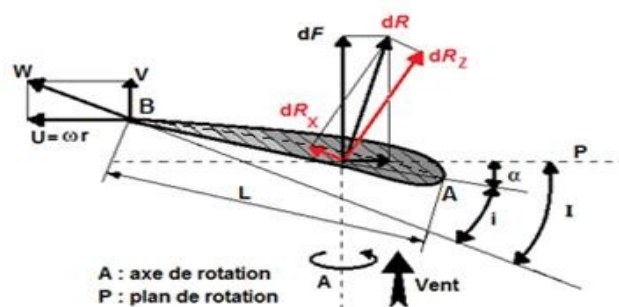


Fig. 2. Caractéristique d'un profil de pale d'éolienne. AB : corde de référence du profil, L : profondeur du profil, i : Angle d'incidence du profil, α : Angle de portance

II. B. Evaluation des efforts axiaux et tangentiels

Considérons l'élément de pale (figure. 2) compris entre les distances r et $r+dr$ (figure. 3). Calculons les efforts qui s'exercent sur cet élément de deux manières tout d'abord en considérant l'action aérodynamique directe et ensuite par les théorèmes généraux de la mécanique des fluides. Ce qui nous permet la connaissance de la poussée axiale et du couple moteur produit et de calculer la puissance fournie par le vent à l'hélice.

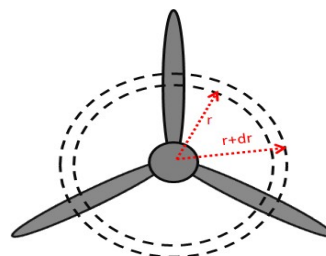


Fig. 3. Élément de surface (de pale) entre les cercles de rayon r et $r+dr$

1) *première évaluation* : La projection de la résistance de l'air selon l'axe de l'éolienne donne la composante axiale F_V , et par projection sur la vitesse U , on trouve la composante tangentielle F_U , tel que :

$$\begin{aligned} dF_V &= dR_z \cos I + dR_x \sin I \\ dF_U &= dR_z \sin I - dR_x \cos I \end{aligned} \quad (1)$$

Ces expressions peuvent s'écrire encore, prenant en considération la contribution des éléments des pales situés entre r et $r+dr$ dans la poussée axiale F et dans le couple moteur M , et en posant :

$$\operatorname{tg} \varepsilon = dR_x/dR_z = C_x/C_z \quad (2)$$

Comme suit :

$$\begin{aligned} dF &= p dF_V = (1/2) \rho p L W^2 C_z (\cos(I - \varepsilon) / \cos \varepsilon) dr \\ dM &= r p dF_U = (1/2) \rho p L W^2 C_z (\sin(I - \varepsilon) / \cos \varepsilon) r dr \end{aligned} \quad (3)$$

2) *deuxième évaluation* : Evaluons maintenant ces deux quantités (équation 3) en appliquant les théorèmes généraux de la mécanique à la veine fluide annulaire qui traverse l'éolienne entre les cercles de rayon r et $r+dr$.

On obtient en appliquant le théorème d'Euler pour la poussée axiale élémentaire :

$$dF = \rho \pi r dr V_f^2 (1 - K^2) \quad (4)$$

Et pour le moment élémentaire :

$$dM = \rho \pi r^3 dr \omega V_1 (1 + K)(h - 1) \quad (5)$$

Sachant que k et h sont des constants de calcul.

Egalons les valeurs respectives de dF et dM obtenues par les deux méthodes. Il vient :

$$\frac{G}{E} = \frac{(1 - K)(h + 1)}{(h - 1)(1 + K)} = \operatorname{ctg}(I - \varepsilon) \operatorname{ctg} I \quad (6)$$

II. C. Coefficient de puissance

Considérons les éléments de pales compris entre r et $r+dr$ comme précédemment, C_p est défini par la relation :

$$C_p = \frac{(V dF)(U dF_U)}{(\rho \pi r dr V_f^3)(V dF_V)} \quad (7)$$

En remplaçant dF_V , dF_U et V par leurs valeurs respectivement et en tenant compte des relations :

$$\operatorname{ctg} I = \lambda \frac{1 + \square}{1 + k} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{C}{C_z}$$

On obtient tous calculs faits :

$$C_p = \left[\frac{(1 + k)(1 - k^2)}{1 + h} \right] \cdot \left[\frac{1 - \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} I}{1 + \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \operatorname{tg} I} \right] \quad (8)$$

Lorsque $\operatorname{tg} \varepsilon = 0$, le premier facteur du second membre de l'équation (17) représente le coefficient de puissance à la

distance r , d'une éolienne parfaite sans traînée de pale. Ce coefficient est maximal pour :

$$\frac{d(\lambda^2(1 + K) (\sqrt{1 + \frac{1 - K^2}{\lambda^2}} - 1))}{dK} = 0$$

Dans l'hypothèse où $\operatorname{tg} \varepsilon$ est différent de zéro (pale à traînée non nulle), la figure. 6 indique en fonction de λ et pour différentes valeurs du rapport C_x/C_z , les coefficients de puissance maximaux susceptibles d'être atteints.

D. La puissance de la turbine

La puissance mécanique d'une turbine est donnée par :

$$P_m = (1/2) C_p(\lambda) \rho \pi R^2 v_1^3 \quad (9)$$

Sachant que λ est le rapport entre la vitesse des extrémités des pales et la vitesse du vent.

On pose $(1/2) \rho \pi R^2 = 1$, pour simplifier l'équation précédente, on aura alors P_m en fonction de (C_p, v_1^3) seulement. D'autre part, si la vitesse spécifique supposée maintenue à la valeur optimale, on isole la vitesse du vent pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique (équation (9)), on obtient :

$$P_m = \left(\frac{(1 + k)(1 - k^2)}{(1 + h)} \cdot \frac{1 - \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} I}{1 + \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \operatorname{tg} I} \right) \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \Omega^3 \quad (10)$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω uniquement.

E. le couple de la turbine

L'équation (10) permet le calcul de la valeur du couple de la turbine éolienne :

$$C_t^{opt} = \left(\frac{(1 + k)(1 - k^2)}{(1 + h)} \cdot \frac{1 - \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} I}{1 + \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \operatorname{tg} I} \right) \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \Omega^2 \quad (11)$$

III. ASSOCIATION DE LA TURBINE ET DE LA GÉNÉRATRICE

Le couplage entre la génératrice et la turbine est donné par l'équation suivante :

$$(J_t + J_g) \frac{d\Omega}{dt} = C_t - C_g - f \Omega \quad (12)$$

Tel que :

J_t, C_t : L'inertie et le couple de la turbine.

J_g, C_g : L'inertie et le couple de la génératrice.

III. A. Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent

Le modèle complet de la génératrice synchrone à aimant permanent dans le repaire de PARK (d, q) lié au rotor,

prenant compte le sens des courants dans le fonctionnement générateur, est donné par les équations 13, 14, 15 et 16

$$v_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega L_q i_q \quad (13)$$

$$v_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega L_d i_d + \omega \Phi_f \quad (14)$$

$$C_e = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (15)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\Omega \quad (16)$$

III. B. Modélisation du redresseur de tension

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, commutation instantanée.

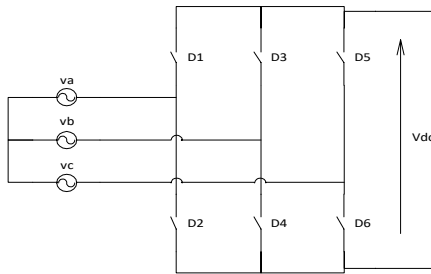


Fig. 3. Redresseur triphasé à six diodes

$$D_{ab} = 1 \begin{cases} D_1 \text{ est} \\ \text{passante} \\ D_4 \text{ est} \\ \text{passante} \end{cases}; D_{ba} = 1 \begin{cases} D_3 \text{ est} \\ \text{passante} \\ D_2 \text{ est} \\ \text{passante} \end{cases}$$

$$D_{ac} = 1 \begin{cases} D_1 \text{ est} \\ \text{passante} \\ D_6 \text{ est} \\ \text{passante} \end{cases}; D_{ca} = 1 \begin{cases} D_5 \text{ est} \\ \text{passante} \\ D_2 \text{ est} \\ \text{passante} \end{cases}$$

$$D_{bc} = 1 \begin{cases} D_3 \text{ est} \\ \text{passante} \\ D_6 \text{ est} \\ \text{passante} \end{cases}; D_{cb} = 1 \begin{cases} D_5 \text{ est} \\ \text{passante} \\ D_4 \text{ est} \\ \text{passante} \end{cases}$$

La tension du bus continu est donnée alors par :

$$V_{dc} = D_{ab} (v_a - v_b) + D_{ba} (v_b - v_a) + D_{ac} (v_a - v_c) + D_{ca} (v_c - v_a) + D_{bc} (v_b - v_c) + D_{cb} (v_c - v_b) \quad (17)$$

III. C. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension peut être représenté selon la figure (4), où Ti (i=1, 2, 3, 4, 5, 6) sont les interrupteur statique. On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables (Sa, Sb, Sc) en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

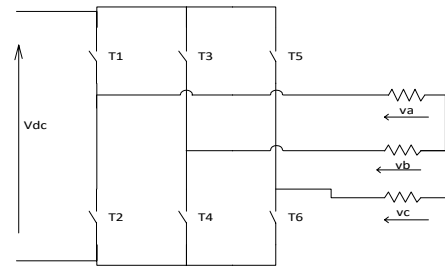


Fig. 4. Onduleur triphasé à six interrupteurs

Branche1 :

Sa = 0 si T1 est en position off et T2 est à on.

Sa = 1 si T1 est en position on et T2 est à off.

Branche2 :

Sb = 0 si T3 est en position off et T4 est à on.

Sb = 1 si T3 est en position on et T4 est à off.

Branche 3 :

Sc = 0 si T5 est en position off et T6 est à on.

Sc = 1 si T5 est en position on et T6 est à off.

* Les tensions simples à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$v_{a'} = \frac{1}{3} (u_{ab} - u_{ca}) = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} (2S_a - S_b - S_c) \mathbf{I}$$

$$v_{b'} = \frac{1}{3} (u_{bc} - u_{ab}) = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} (2S_b - S_c - S_a) \mathbf{I}$$

$$v_{c'} = \frac{1}{3} (u_{ca} - u_{bc}) = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} (2S_c - S_a - S_b) \mathbf{I} \quad (18)$$

* Les états de commutation des commutateurs sont déterminés par la SPWM, tel que la fréquence des tensions de sortie est 50Hz. figure.5.

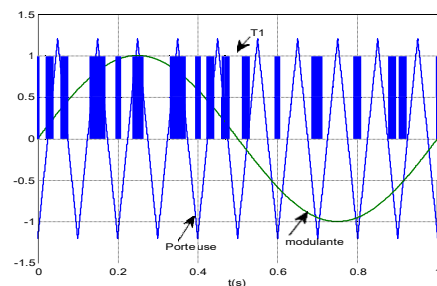


Fig. 5. Principe de la SPWM

III. D. Modélisation du système de stockage

L'électricité ne peut être stockée facilement et nécessite sa transformation sous une autre forme d'énergie (chimique, thermique, potentielle, mécanique, etc.). Le stockage de

l'énergie électrique constitue un des composants d'un futur développement durable.

D'un point de vue technique un système de stockage peut être caractérisé par :

- * P_{max} : puissance maximale de charge/décharge
- * W_{max} : énergie stockée maximale
- * $r_{c\bar{}}$: constante de temps de charge
- * $r_{dc\bar{}}$: constante de temps de décharge
- * $P_{c\bar{max}}$: puissance maximale de charge
- * $P_{dc\bar{max}}$: puissance maximale de décharge

La puissance du système de stockage est donnée par :

$$P_{stock} = \left(\frac{1}{r_{c\bar{}} S + 1} P_{c\bar{}} + \frac{1}{r_{dc\bar{}} S + 1} P_{dc\bar{}} \right) \quad (19)$$

Et l'énergie stockée dans le système de stockage sera :

$$W_{stock} = \int P_{c\bar{}} dt + \int P_{dc\bar{}} dt \quad (20)$$

- Dans notre cas le système de stockage est composé essentiellement d'un groupe des batteries en parallèles. Les batteries sont commandé de tel sort qu'un groupe décharge et les autres charge pour garder la tension d'alimentation du l'onduleur constante et au même temps pour emmagasiné l'énergie fournie par la génératrice.

- Une batterie est représentée par l'équation suivante :

$$V = E_0 + a * e^{-b*D} - I * R_b - I * K \frac{Q}{Q - D} \quad (21)$$

IV. MODELE COMPLET DE LA CHAINE EOLIENNE

Le modèle complet de la chaîne éolienne contient l'ensemble des quatre modèles, celui de la turbine, de la machine et des convertisseurs électroniques avec le système de stockage.

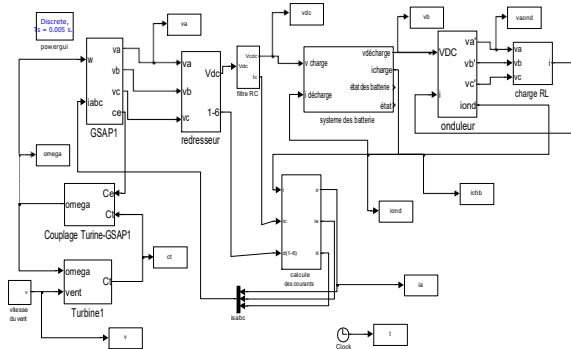


Fig. 5. Modèle complet de la chaîne éolienne

On utilise un système de stockage après le pont des diodes pour emmagasiner l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique et au même temps pour lisser la tension d'alimentation de l'onduleur. Les paramètres du système de stockage et de l'installation éolienne sont les suivants (tableau 1):

TABLEAU 1
Les paramètres du modèle

Symbole	Désignation	valeur
R_s	La résistance statorique	0,018 ohm
$L_s=L_d=L_q$	L'inductance statorique	0,000835 H
ϕ	Le flux	0,71 Wb
J	L'inertie totale	0,052 kg.m ²
R_c	Résistance du filtre	100 ohm
C	Capacité du filtre	1 μ F
P	Nombre de paire de pôles	6
r	Rayon de l'éolienne	1 m
E_0	Tension de base de la batterie	200 v
R_b	Résistance interne de la batterie	0,6 ohm
a- b-K	Constantes empiriques	0,26-26-0,007
R	La résistance de la charge	10 ohm
L	L'inductance de la charge	20 mH
V	Vitesse moyenne du vent	12 m/s

On a utilisé une vitesse du vent perturbée d'une valeur moyenne égale à 12 m/s pour visualiser la nécessité d'un système de stockage dans la régulation de la tension de sortie de l'installation.

V. RESULTATS DE SIMULATION

On commence par la simulation de la turbine seule, après on passe à la simulation du modèle complet.

V. A. Simulation de la turbine

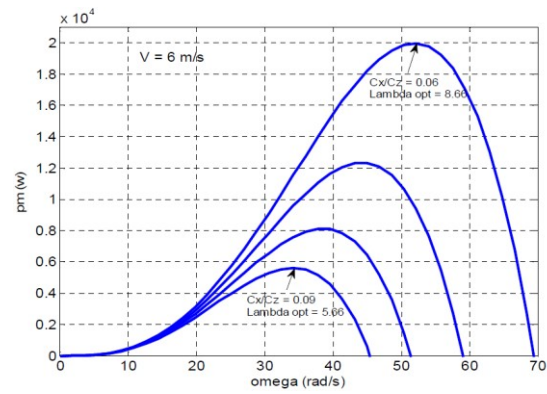


Fig. 6. variation de λ_{opt} en fonction du rapport C_x/C_z

La figure.6 montre que, pour des rapports C_x/C_z plus petites la turbine possède une vitesse spécifique plus élevée et au même temps un bon coefficient de puissance. Le rapport entre la traînée et la portance est fixe à son valeur optimale par construction. Mais lorsqu'on veut faire réduire la vitesse de rotation de la turbine, on agit sur l'angle de calage et par conséquent sur le rapport C_x/C_z .

V. B. Simulation de la chaîne de conversion

L'objectif de cette simulation est de comprendre l'importance de faire une conception du système qui prend en considération l'influence de la variation de la vitesse du vent sur le bon fonctionnement de la chaîne.

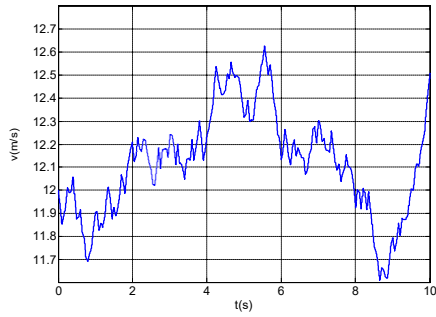


Fig. 7. La vitesse du vent

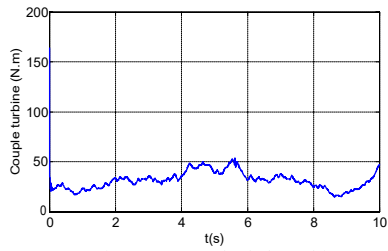


Fig. 8. Le couple de la turbine

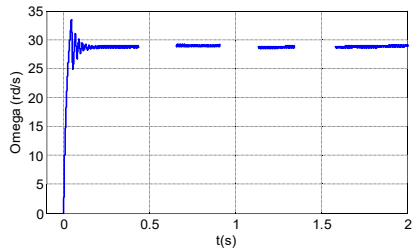


Fig. 9. La vitesse de rotation de la turbine

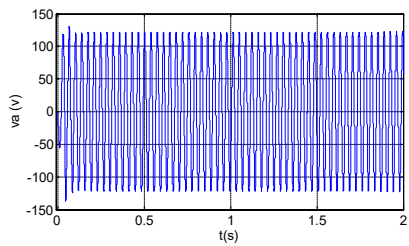


Fig. 10. La tension va de la génératrice

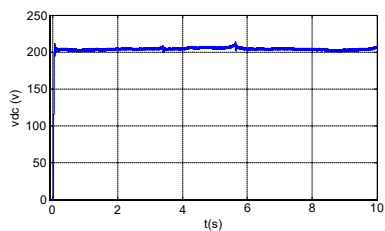


Fig. 11. La tension de bus continu

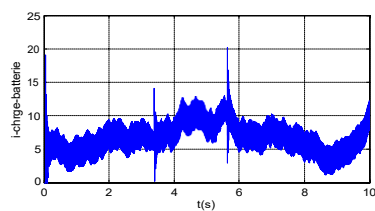


Fig. 12. Le courant de chargement du système de stockage

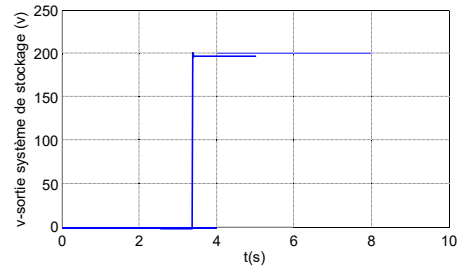


Fig. 13. La tension à la sortie du système de stockage

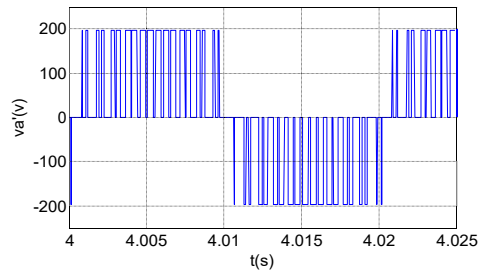


Fig. 14. La tension va' aux bornes de la charge

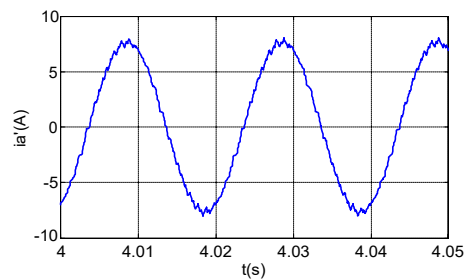


Fig. 15. Le courant de la phase « a » de la charge

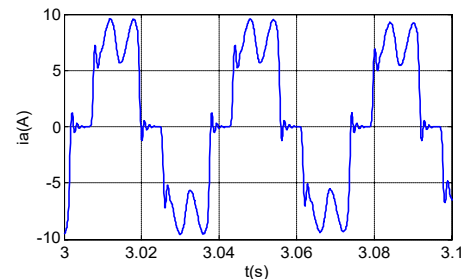
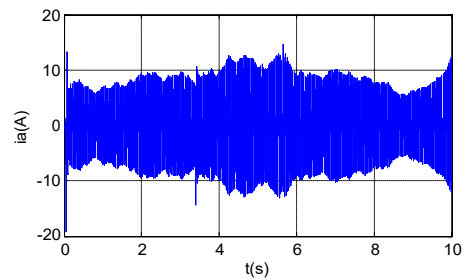


Fig. 16. Le courant de la phase « a » de la génératrice

V. C. Interprétation des résultats de simulation

D'après les figures 7, 8, 12 et 16 on remarque que le couple de la turbine et le courant de chargement des batteries dépendent de la vitesse du vent. L'augmentation de la vitesse du vent tend à augmenter la vitesse de rotation de la turbine et par conséquent la tension du bus continue, et comme la charge au niveau du bus continu est un groupe des batteries, cela va augmenter le courant de chargement, ce qui donne la croissance du couple résistant de la génératrice et en fin le système génératrice et turbine se stabilise à une vitesse de rotation quasi constant comme il est représenté dans la figure 9.

La figure 13 montre que le système de stockage commence à fournir une tension stable après le chargement des batteries. Cette tension reste stable quelque soit la vitesse du vent. L'onduleur de tension alimente la charge avec une tension échantillonnée d'une principale sinusoïdale comme il est illustré dans les figures 14 et 15.

La génératrice fournit un courant d'une amplitude variable suivant la variation du courant de chargement des batteries ; la forme de ce courant n'est pas sinusoïdale à cause du pont redresseur à diode qui relie la machine avec le bus continu, figure 16.

VII. CONCLUSION

Dans ce type d'aérogénérateur, la charge est en générale constante mais la vitesse du vent varie (diminuer ou augmenter), on aura alors une puissance supérieure ou inférieure à la puissance demandée par la charge. Donc, pour extraire le maximum de la puissance du vent et au même temps, pour alimenter la charge sous une tension stable. La solution se trouve dans un système de stockage qui absorbe la puissance supplémentaire générée par la turbine, ou bien fournit la puissance manquante de la puissance désirée.

Donc, Il est préférable d'utiliser ce type d'aérogénérateur dans un système hybride de production d'électricité pour couvrir l'inconvénient majeur de l'énergie éolienne, qui est l'instabilité de la puissance disponible dans le vent

REFERENCE

- [1] T.Wildi, Gilbert Sybille, « Electrotechnique », Chapitres 34, 36 et 45, 4ème édition 2005, Ed. «De Boeck »
- [2] F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes 2003.
- [3] Jean MARTIN « Energies éoliennes », article, 1996.
- [4] Abdenour ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse 2007.
- [5] Désiré LE GOURIERES professeur à l'université de DAKAR « Energie Eolienne Théorie, conception et calcul pratique des installations », Chapitre 2 et 4, 2ème édition 1982.
- [6] Technique de l'ingénieur « Aérogénérateurs électriques », D 3 960.
- [7] Les machines synchrones Technologies et différents modes d'alimentations des machines synchrones, cours des machines.
- [8] BABAK VASEGHI « contribution à l'étude des machines électrique en présence de défaut entre spire », thèse de doctorat de l'I.N.P.L., 2003.
- [9] R. Abdessemed & M. Kadjoudj, « Modélisation des machines électriques », Batna 1997.
- [10] J. P. CARON et J. P. HAUTIER « modélisation et commande de la machine asynchrone », éditions technique, 1995.
- [11] BENBRAHIM Amel « Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », thèse de magistère à l'université de Batna, 2009.
- [12] E. Wolfgang, F.J. Niedernostheide, D. Reznik, H.J. Schulze, «Advances In Power Electronic devices», In the 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, 4-6-1999.
- [13] License EEA «Energie et convertisseur d'énergie», chapitre 3, Université de Savoie, cours 2010.
- [14] G. Séguier et R. Bausière, "les convertisseurs de l'électronique de puissance", la conversion continu-alternatif Tome 4, deuxième édition, Lavosier TEC II DOC, livre, 1992
- [15] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, article « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne », Université Mentouri de Constantine, le 28 Mars 2010.
- [16] Haritza CAMLONG, thèse de doctorat « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », L'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [17] Stefan Laurentiu CAPITANEANU, thèse de doctorat « Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux », l'institut national polytechnique de Toulouse, 2002.
- [18] Miguel LOPEZ, thèse de doctorat « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », 2008.
- [19] Gabriel-Octavia CIMUCA, thèse de doctorat « système inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens », école nationale supérieure d'arts et métiers centre de Lille, 2005.
- [20] Vincent COURTECUISSÉ, thèse de doctorat « Supervision d'une centrale multi-source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », L'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, novembre 2008.