

Maximisation du Rendement d'Un Générateur Eolien à Base d'Une Génératrice Synchrones à Aimant Permanent

Hassen Baccar^{#1}, Moncef Zagrouba^{#2}, Nawel Mensia^{#3}, Mongi Bouaicha^{#4}

[#]Laboratoire Photovoltaïque (LPV), Centre des Recherche et des Technologies de l'Énergie de Borj-Cédria

BP 95 Hammam Lif 2050, Tunisie

¹hassen.bac@gmail.com

²moncefzagrouba@yahoo.fr

³Mensia_Nawel@hotmail.com

⁴Mongi.Bouaicha@crten.rnrt.tn

Résumé— Dans le présent travail, nous présentons une étude numérique d'optimisation d'une turbine éolienne de petite puissance dédiée aux sites isolés. La chaîne de conversion d'énergie éolienne est composée d'un pont de diodes servant à redresser le courant alternatif, d'une batterie et d'un hacheur intercalé entre le pont de diodes et la batterie. La méthode d'optimisation utilisée est basée sur la connaissance de la caractéristique de la voilure. Elle utilise un pilotage indirect de la génératrice par le contrôle du courant de charge débité dans la batterie. Ce mode de pilotage est assuré par une structure de convertisseur statique de type hacheur MLI. Les bons résultats obtenus après simulation dans l'environnement Matlab_simulink justifie le choix de la méthode utilisée comme technique d'optimisation du rendement de la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent.

Mots clefs— Turbine éolienne ; Source continue ; Convertisseur statique (AC-DC, DC-DC) ; Optimisation ; Matlab_Simulink.

I. INTRODUCTION

Actuellement, l'énergie que nous utilisons quotidiennement provient essentiellement des sources usuelles de type combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) [1]. Mais divers problèmes viennent d'apparaître qui obligent l'homme à penser à d'autres sources d'énergie (épuisement très proche, perturbations climatiques engendrées par le rejet massif de gaz à effet de serre ...). Face aux contraintes posées par les énergies fossiles, la meilleure solution possible serait d'utiliser les énergies renouvelables qui présentent l'avantage d'être abondantes et inépuisables dans les millénaires à venir. Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne de petite puissance qui peut être utilisée en mode autonome pour divers applications : pompage, éclairage, etc. Nous envisageons dans ce travail de résoudre le problème de poursuite du MPP (point de puissance maximale) de l'éolienne (Maximum Power Point Tracking : MPPT). Il existe deux stratégies d'algorithmes MPPT. La première, sans

connaissance de la caractéristique de la voilure $C_p(\lambda)$, a fait l'objet de plusieurs travaux. La deuxième est avec connaissance de la caractéristique de la voilure $C_p(\lambda)$. Certains travaux intéressés à cette dernière stratégie ont utilisé une structure de convertisseurs à base d'un redresseur MLI pour une commande de la génératrice en couple ou en vitesse. D'autres travaux ont utilisé une structure de convertisseurs à base de hacheur MLI pour contrôler le courant de charge.

II. DESCRIPTION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE

La chaîne de conversion d'énergie éolienne (Aérogénérateur) est décrite par l'ensemble de systèmes interconnectés suivant : Turbine éolienne à axe vertical de type Savonius, une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), un redresseur triphasé à diode, un hacheur série parallèle réversible en courant et non réversible en tension, un pack batterie, une charge de type moteur à courant continu. Le bilan de puissance du système en régime permanent se présente comme suit :

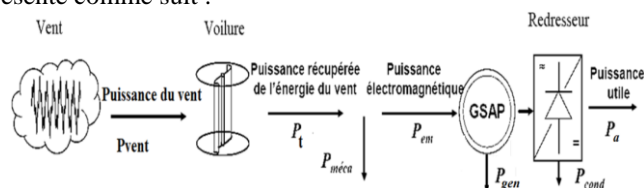


Fig. 1 Bilan de puissance de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

A. Modèle de la partie mécanique (voilure savonius + multiplicateur mécanique) :

La puissance aérodynamique P_v [watt] du vent qui va attaquer la surface active de l'éolienne est défini par :

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^3 \quad (1)$$

ρ : Masse volumique de l'air [kg.m^{-3}] ; S : surface active de l'éolienne [m^2] ; v : vitesse du vent [m/s].

Selon la loi de Betz, la puissance du vent ne peut jamais être extraite dans sa totalité [2]. La puissance maximale $P_{t \max}$ pouvant être captée par une éolienne est fournie par la limite de Betz.

$$P_{t \max} = 0.59 \times P_v \quad (2)$$

On définit le rendement de l'éolienne C_p par :

$$P_t = C_p \times P_v = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times S \times v^3 \quad (3)$$

P_t : Puissance turbine [watt]

On définit la vitesse spécifique λ de la turbine par :

$$\lambda = \frac{R \times \omega_t}{v} \quad (4)$$

R : rayon de la voilure [m]; ω_t : vitesse mécanique de l'arbre lent [rad/s].

Le rendement de l'éolienne est fonction de la vitesse spécifique λ :

$$C_p(\lambda) = -0.2121 \times \lambda^3 + 0.0856 \times \lambda^2 + 0.2539 \times \lambda \quad (5)$$

La surface active attaquée par le vent s'écrit:

$$S = 2 \times R \times H \quad (6)$$

Le multiplicateur mécanique est un sous système qui permet la multiplication de la vitesse mécanique de l'arbre lent vers l'arbre rapide en cas de besoin. Il est décrit par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \omega_t = \frac{\omega_g}{G} \\ T_t = G \times T_g \end{cases} \quad (7)$$

G : rapport de multiplication ; ω_g : vitesse mécanique de l'arbre rapide [rad/s]. T_t : le couple de la turbine côté arbre long [N.m] ; T_g : le couple de la turbine côté arbre rapide [N.m].

L'équation mécanique au niveau de l'arbre rapide (côté génératrice) :

$$J \times \frac{d\omega_g}{dt} = T_g - T_{em} - F \times \omega_g \quad (8)$$

J : inertie totale de l'arbre rapide [kg.m^2] ; T_{em} : couple électromagnétique de la génératrice [N.m].

F : frottement visqueux total sur l'arbre rapide [N.m.s/rad].

Mais vu qu'on va utiliser une génératrice à grand nombre de pôles ($2P = 34$ pôles), on peut ne pas utiliser un multiplicateur mécanique. Donc on prend $G = 1$. On aura donc :

$$\begin{cases} \omega_t = \omega_g \\ T_t = T_g \end{cases} \quad (9)$$

Donc l'arbre lent (côté turbine) est confondu avec l'arbre rapide (côté génératrice). L'équation mécanique au niveau de l'arbre mécanique devient :

$$J \times \frac{d\omega_t}{dt} = T_t - T_{em} - F \times \omega_t \quad (10)$$

Le couple turbine T_t s'écrit :

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (11)$$

Le modèle de la voilure se décrit par la figure suivante :

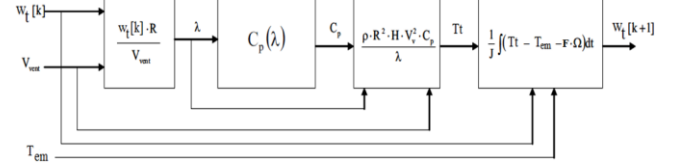


Fig. 2 Schémas blocs de la turbine éolienne

B. Modèle de la partie électrique (GSAP + Redresseurs à diodes + Hacheur MLI)

On s'intéresse dans ce projet à la machine synchrone à aimant permanent grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix). Compte tenue de la complexité des équations on peut utiliser les hypothèses simplificatrices suivantes [3] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

On va utiliser une matrice de transformation appelé matrice de Park qui va assurer le changement du repère triphasé (a, b, c) vers un repère biphasé (d, q), elle est définie par :

$$[P_3(\theta)] = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2 \times \pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4 \times \pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2 \times \pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4 \times \pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Les grandeurs physiques dans le repère de Park sont définies par :

$$[X(d, q)] = [P(\theta)] \times [X(a, b, c)] \quad (13)$$

Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{sd} = -R_s \times i_{sd} - \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - P \times \omega_t \times \varphi_{sq} \\ v_{sq} = -R_s \times i_{sq} - \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + P \times \omega_t \times \varphi_{sd} \end{cases} \quad (14)$$

P : nombre de paire de pôles de la génératrice.

Equations magnétique:

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_{sd} \times i_{sd} + \phi \\ \varphi_{sq} = L_{sq} \times i_{sq} \end{cases} \quad (15)$$

L_{sd} ; L_{sq} : inductances statoriques dans le repère de Park [henry]. ϕ : flux aimant permanent [wb].

Le couple électromagnétique de la génératrice s'écrit :

$$T_{em} = \frac{3}{2} \times P \times [\varphi_{sd} \times i_{sq} - \varphi_{sq} \times i_{sd}] \quad (16)$$

La machine utilisée est à pôles lisses : $L_{sd} = L_{sq}$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \times P \times \phi \times i_{sq} \quad (17)$$

Equation mécanique :

$$J \times \frac{d\omega_t}{dt} = T_t - T_{em} - F \times \omega_t \quad (18)$$

Le modèle de comportement complet d'un redresseur triphasé à diodes consiste à définir, diode par diode, les conditions logiques de conduction ($S_a = 1$) ou blocage ($S_a = 0$) selon l'état des courants et des tensions ([4], [5], [6]). Les équations qui décrivent le fonctionnement du redresseur à diode :

$$\begin{cases} v_{sa} = \frac{2 \times S_a - S_b - S_c}{3} \times v_{dc1} \\ v_{sb} = \frac{2 \times S_b - S_a - S_c}{3} \times v_{dc1} \\ v_{sc} = \frac{2 \times S_c - S_a - S_b}{3} \times v_{dc1} \end{cases} \quad (19)$$

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = R_s \times \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_s \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

L'association de la génératrice + redresseur à diodes est décrite par :

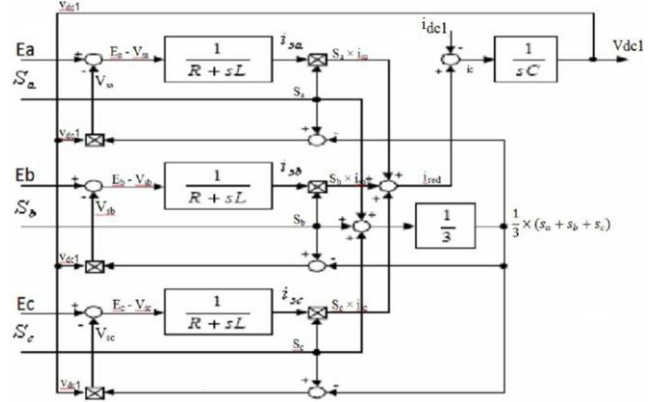


Fig. 3 Modèle du GSAP + redresseur à diodes

L'équation de couplage des côtés alternatif et continu :

$$c \times \frac{dv_{dc1}}{dt} = [S_a \times i_{sa} + S_b \times i_{sb} + S_c \times i_{sc}] - i_{dc1} \quad (21)$$

Les signaux à la sortie du redresseur vont attaquer un étage de filtrage décrit par une capacité c [farad].

L'association hacheur MLI + charge est décrite par :

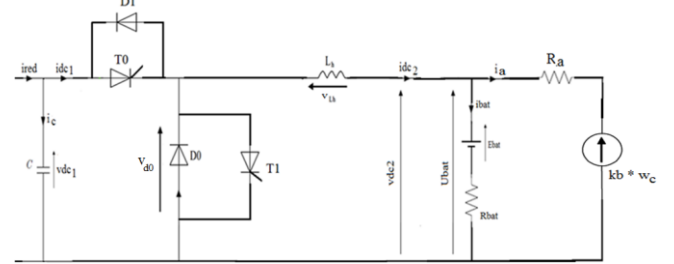


Fig. 4 Modèle du hacheur MLI + charge

En connaissant tous les paramètres du circuit à réguler, les équations du processus peuvent être écrites au sens des valeurs moyennes sur une période de commutation du hacheur T_{dec} . L'association Hacheur + pack batterie est décrite par le système d'équations (22) :

$$\begin{cases} v_{d0} = \alpha \times v_{dc1} \\ L_h \times \frac{di_{dc2}}{dt} = v_{d0} - v_{dc2} \\ v_{dc2} = E_{bat} + R_{bat} \times i_{bat} \end{cases} \quad (22)$$

La chaîne de conversion d'énergie éolienne avec MPPT est connectée à un moteur à courant continu à aimant permanent (MCC) ([7], [8]). L'association moteur MCC + pack batterie est décrite par :

$$\begin{cases} v_{dc2} = R_a \times i_a + E \\ E = k_b \times \omega_c \\ \frac{d\omega_c}{dt} = \frac{k_b}{j_c} \times i_a - \frac{k_t + F_c}{j_c} \times \omega_c \end{cases} \quad (23)$$

ω_c : la vitesse de rotation du moteur MCC [rad/s] ;

E : la force contre électromotrice (f_{cem}) du MCC [v] ;
 j_c : inertie du moteur MCC [kg.m²] ;
 k_b : constante du couple électromagnétique [N.m.A⁻¹] ;
 k_f : constante du couple de pertes fer [N.m.s.rad⁻¹]

F_c : constante du couple de pertes par frottement visqueux [N.m.s.rad⁻¹].

C. Etude de la maximisation du rendement de la turbine :

Il y a deux stratégies de maximisation de puissance ([9], [10]) :

1) Maximisation de puissance sans connaissance de la caractéristique de la voilure

Les stratégies de commande MPPT sans connaissance de la caractéristique $C_p(\lambda)$ se basent sur des algorithmes heuristiques. Parmi eux on peut citer :

- Algorithme P&O basique :

Il consiste à introduire une perturbation sur la consigne de commande, par exemple sur le rapport cyclique d'un hacheur MLI. Son effet est par la suite remarqué sur la puissance turbine P_t [10]. Cet algorithme présente des avantages comme la simplicité, et ne pas utiliser de capteur mécanique. Mais il présente des inconvénients au niveau : temps de convergence, oscillation au niveau de la puissance de sortie en permanence, sensibilité aux variations brusques de la vitesse du vent.

- Algorithme flou :

Il utilise des règles de comportement dans le but de converger vers le point optimal MPP. Ces règles dépendent des variations de la puissance turbine ΔP_t et de la vitesse de rotation $\Delta \omega_t$. L'algorithme flou n'est pas sensible aux variations brusques de la vitesse du vent. Il est aussi plus rapide que l'algorithme P&O basique. Les paramètres de l'algorithme flou sont insensibles aux conditions climatiques (température, etc.). Mais il est plus complexe que l'algorithme P&O basique.

2) Maximisation de puissance avec connaissance de la caractéristique de la voilure:

Ces stratégies de commande, dites aussi « contrôle basé sur la relation optimale » [10], utilisent la caractéristique de la voilure $C_p(\lambda)$ à fin de déterminer la constante K_{Op} définie par :

$$K_{Op} = \frac{C_{pmax} \times \rho \times R^4 \times H}{\lambda_{op}^3} \quad (24)$$

La constante K_{Op} permet de dresser la relation optimale entre puissance maximale P_{top} et vitesse de rotation optimale ω_{top} . Cette relation optimale est définie par :

$$P_{top} = K_{Op} \times \omega_{top}^3 \quad (25)$$

Ces stratégies permettent de simplifier l'algorithme MPPT, l'utilisation de convertisseurs plus basiques et moins coûteux,

et de trouver rapidement la consigne à appliquer au régulateur pour traquer le point MPP.

Parmi ces stratégies de commande on peut citer :

- Commande en vitesse :

La puissance extraite par la turbine s'écrit :

$$P_t(\omega_t) = \frac{\rho \times R^4 \times H \times C_p(\lambda)}{\lambda^3} \times \omega_t^3 \quad (26)$$

L'algorithme MPPT consiste à supposer à chaque instant que le point optimal est atteint, c'est-à-dire la paire (C_{pmax} , λ_{op}) est vérifiée. Au point MPP on a :

$$P_{top} = \frac{C_{pmax} \times \rho \times R^4 \times H}{\lambda_{op}^3} \times \omega_{top}^3 \quad (27)$$

L'algorithme MPPT de commande en vitesse nécessite comme entrée la puissance turbine P_t pour déduire via le rapport K_{Op} la nouvelle consigne de vitesse ω_t . Il se sert de la mesure du courant et de la tension pour déterminer la puissance turbine P_t .

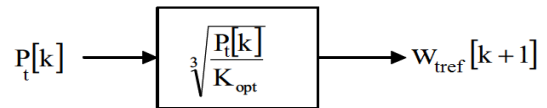


Fig. 5 Vitesse turbine de référence

La commande en vitesse présente une difficulté de réglage pour une turbine fortement inertielle. Une commande en couple peut être envisagée [10].

- Commande en couple:

Le couple de la turbine s'écrit :

$$T_t(\omega_t) = \frac{P_t(\omega_t)}{\omega_t} = \frac{\rho \times R^4 \times H \times C_p(\lambda)}{\lambda^3} \times \omega_t^2 \quad (28)$$

L'algorithme MPPT consiste à supposer à chaque instant que le point optimal est atteint. Au point MPP on a :

$$T_{top} = \frac{C_{pmax} \times \rho \times R^4 \times H}{\lambda_{op}^3} \times \omega_{top}^2 \quad (29)$$

L'algorithme MPPT de commande en couple nécessite comme entrée la vitesse de rotation ω_t pour déduire via le rapport K_{Op} la nouvelle consigne du couple T_t .

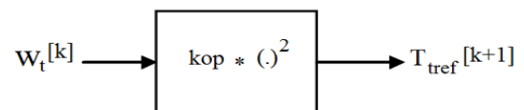


Fig. 6 Couple turbine de référence

Pour les applications de petites puissances ayant une contrainte d'économie, il est préférable de faire un calcul de la vitesse de rotation à l'aide d'un observateur à partir de la mesure de tension aux bornes de la génératrice.

- Commande indirecte par pilotage du courant de charge:

Pour la commande en couple ou en vitesse, on utilise une structure de convertisseurs statiques à base de redresseurs MLI. Cette structure à six interrupteurs commandés est onéreuse et requiert un circuit de commande assez complexe. Ce redresseur commandé est donc remplacé par un redresseur triphasé à diodes. De ce fait le control de la génératrice se fait d'une façon indirecte en intercalant entre le redresseur et la charge un hacheur MLI réversible en courant et non réversible en tension. Ce dernier est capable de régler le courant de charge qui débite sur une batterie selon le point de fonctionnement de la turbine. Le rôle du hacheur MLI est d'assurer une adaptation d'impédance dans le but de maximiser le rendement de l'éolienne. Le capteur mécanique peut être remplacé par un observateur à partir de la mesure de la tension bus continu v_{dc1} .

L'algorithme MPPT présente comme entrée la vitesse de rotation ω_t , et comme sortie le courant de charge i_{dc2} .

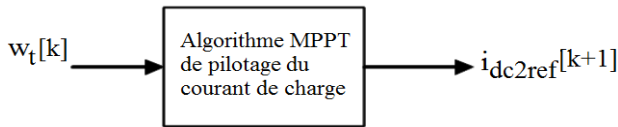


Fig. 7 courant de charge de référence

L'algorithme MPPT consiste à supposer qu'à chaque instant qu'on est à l'optimum. A chaque instant k (pas d'échantillonnage) on mesure la vitesse de rotation $\omega_t(k)$. Le couple turbine de référence T_{tref} s'écrit :

$$T_{tref}(k+1) = k_{op} \times \omega_t(k)^2 \quad (30)$$

On suppose que le pas d'échantillonnage est assez petit de façon que la vitesse de rotation $\omega_t(k) = cte$ à l'instant k . A partir de l'équation au niveau de l'arbre mécanique, on tire le couple électromagnétique de référence.

$$T_{emref}(k+1) = T_{tref}(k+1) - F \times \omega_t(k) \quad (31)$$

On calcule par la suite la puissance électrique de référence absorbée par la charge $P_{aref}(k+1)$ à partir du bilan de puissance de la génératrice :

$$P_{aref}(k+1) = T_{emref}(k+1) \times \omega_t(k) - P_j(k) - \frac{\Delta E_m}{\Delta t}(k) \quad (32)$$

P_j : Pertes joules [watt].

$\frac{\Delta E_m}{\Delta t}$: Pertes par variations d'énergie magnétique emmagasinée [watt].

Si on suppose que le rendement des convertisseurs statique soit unitaire.

$$P_{aref}(k+1) = v_{dc2ref}(k+1) \times i_{dc2ref}(k+1) \quad (33)$$

Mais vu que la tension v_{dc2} est presque constante au niveau du pack batterie, donc commander la puissance absorbée revient à piloter le courant de la charge i_{dc2} .

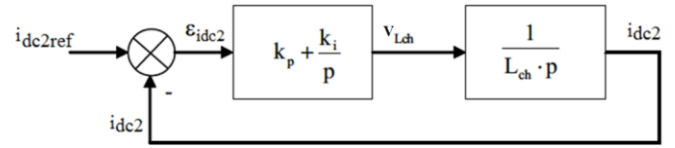


Fig. 8 Boucle de régulation du courant i_{dc2}

Les constantes k_p et k_i du régulateur PI sont déterminées

en tenant compte des critères de stabilité. On pose : $T_i = \frac{k_p}{k_i}$

La fonction de transfert en boucle ouverte du régulateur :

$$FTBO(p) = \frac{k_i}{k_p} \times \frac{p \times T_i + 1}{p^2} \quad (34)$$

La bande passante du correcteur est définie par la fréquence f_{bp} ou la pulsation ω_{bp} [9].

D'une part, on peut se baser sur un critère de marge de phase tel que :

$$M\varphi = \arctg(T_i \times \omega_{bp}) = \arctg(T_i \times 2 \times \pi \times f_{bp}) \quad (35)$$

La marge de phase : $M\varphi = \frac{\pi}{3}$ donne :

$$T_i = \frac{\sqrt{3}}{2 \times \pi \times f_{bp}} \quad (36)$$

D'autre part, un critère sur la marge de gain donne :

$$|FTBO(j\omega)| = \frac{k_i}{L_h} \times \frac{\sqrt{1 + (T_i \times \omega_{bp}^2)}}{\omega_{bp}^2} = 1 \quad (37)$$

Ce qui permet de calculer le second membre du correcteur :

$$k_i = \frac{1}{2} \times L_h \times \omega_{bp}^2 \quad (38)$$

Donc la valeur du gain proportionnel k_p est obtenue par :

$$k_p = k_i \times T_i \quad (39)$$

III. RESULTATS DE SIMULATIONS :

On a fait une étude numérique de la maximisation du rendement d'une turbine-éolienne de type savonius. On a choisit l'algorithme de commande indirecte par pilotage du courant de charge.

La simulation numérique du système est appliquée pour un signal du vent quasi-statique de valeurs {13, 15, 12, 10} et chaque palier dure 30 secondes.

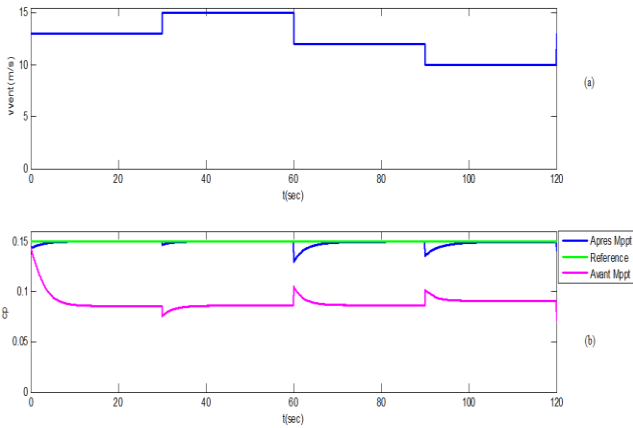


Fig. 9 (a) vitesse du vent, (b) rendement éolienne

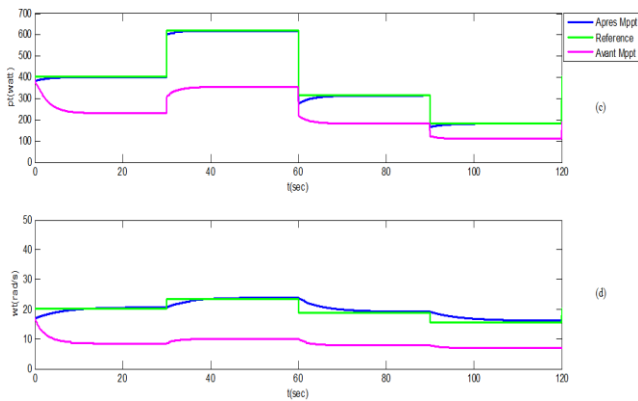


Fig. 10 (c) puissance turbine, (d) vitesse de rotation

Les résultats de simulations sous l'environnement Matlab_simulink sont très encourageants.

IV. CONCLUSIONS :

Dans ce travail, nous avons fait une étude numérique de la maximisation du rendement d'une éolienne de petite puissance à axe vertical de type savonius dédiée aux sites isolés. Nous avons utilisé un algorithme MPPT avec connaissance de la caractéristique de la voilure $C_p(\lambda)$, nommé commande indirecte par pilotage du courant de charge. L'aérogénérateur est connecté à une charge de type moteur à courant continu dans le but de l'utiliser dans une activité de pompage. Les résultats obtenus ont prouvé le succès de l'approche utilisée à la satisfaction de bon rendement.

NOMENCLATURE

MLI : Modulation largeur impulsion
 FMM : Force magnétomotrice.
 fem : force électromotrice
 v_{vent} : Vitesse du vent [m/s]
 H : Hauteur de la voilure [m]
 v_{sd}, v_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park [v]
 i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park [A]

R_s : Résistance statorique [Ω]
 L_s : Inductance statorique [henry]
 E_a, E_b, E_c : fem statorique dans le repère (abc) [v]
 $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux magnétique statorique du repère Park [wb]
 $X(d, q)$: Grandeurs physique dans le repère Park
 $X(a, b, c)$: Grandeurs physique dans le repère (abc)
 S_a, S_b, S_c : Etats de conduction des diodes du redresseur
 v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Tensions statorique dans le repère (abc) [v]
 v_{dc1}, v_{dc2} : Tensions respectivement à l'entrée et à la sortie du hacheur MLI [v]
 i_{dc1}, i_{dc2} : Courants respectivement à l'entrée et à la sortie du hacheur MLI [v]
 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statoriques dans le repère (abc) [A]
 i_{red} : Courant redressé à la sortie du redresseur [A]
 T_0, T_1 : Thyristors à commande complémentaires
 D_0, D_1 : Diodes de roue libre
 i_a : Courant statorique du MCC [A]
 R_a : Résistance statorique du MCC [Ω]
 α : Rapport cyclique du hacheur MLI
 v_{d0} : Tension de la diode D_0 [v]
 L_h : Inductance de lissage du courant i_{dc2} [henry]
 E_{bat} : fem de la batterie [v]
 R_{bat} : Résistance interne de la batterie [Ω]
 i_{bat} : Courant traversant le pack batterie [A]
 T_{top} : Couple optimal de la turbine [N.m]
 P_{top} : Puissance optimale de la turbine [watt]
 λ_{op} : Vitesse spécifique optimale de la turbine
 ω_{top} : Vitesse de rotation optimale de la turbine [rad/s]
 θ : Angle électrique [rad]
 C_{pmax} : Rendement maximal de la turbine
 P : Nombre de paires de pôles
 P_{mecc} : Pertes au niveau de l'arbre mécanique [watt]
 P_{gen} : Pertes au niveau de la génératrice [watt]
 P_{cond} : Pertes dans les convertisseurs statiques [watt]

PARAMETRES DU SYSTEME

• Turbine éolienne :
 $R = 0.5$ m ; $H = 2$ m
 $\rho = 1.2$ kg.m⁻³ ; $\lambda_{op} = 0.78$
 $C_{pmax} = 0.15$

• Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) :
 $P_n = 600$ watt
 $P = 17$; $R_s = 1.137$ Ω

$$L_S = 2.7 \times 10^{-3} \text{ henry} \quad ; \quad \phi = 0.15 \text{ wb}$$

- Arbre mécanique :

$$J = 16 \text{ kg.m}^2 \quad ; \quad F = 0.06 \text{ N.m}$$

- Etage de filtrage :

$$c = 0.0033 \text{ farad} \quad ; \quad L_h = 0.001 \text{ henry}$$

- Pack batterie :

$$E_{bat} = 24 \text{ v} \quad ; \quad R_{bat} = 0.072 \Omega$$

- Correcteur PI :

$$\text{Fréquence de la bande passante : } f_{bp} = 50 \text{ hertz}$$

- Moteur à courant continu (MCC) :

$$U_n = 24 \text{ v} \quad ; \quad I_n = 12 \text{ A} \quad ; \quad P_{cn} = 2200 \text{ watt}$$

$$R_a = 1.072 \Omega \quad ; \quad F_c = 8814 \times 10^{-7} \text{ N.m.s.rad}^{-1} \quad ;$$

$$j_c = 476 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \quad ;$$

$$k_b = 0.5 \text{ N.m.A}^{-1} \quad ; \quad k_t = 0.1 \text{ N.m.rad}^{-1}$$

REFERENCES

- [1] *Cours développement durable*, école centrale de Paris, Avril 2014.
- [2] Ali Bouhedda, "Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne", mémoire de magister en électrotechnique, faculté de génie électrique et informatique, département d'électrotechnique, université Mouloud Mammeri. Tizi-ouzou, Juillet 2011.
- [3] *Notes de cours machines électriques (Mohamed Ben Ali Kamoun), génie électrique*, école nationale des ingénieurs de Sfax (E.N.I.S), 2004
- [4] Bruno François, "Formalisme de modélisation et de synthèse des commandes appliqués aux convertisseurs statiques à structures matricielles", mémoire de thèse spécialité génie électrique, université des sciences et technologies de Lille, Janvier 1996.
- [5] Abdenour Abdelli, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", mémoire de thèse spécialité génie électrique, institut national polytechnique de Toulouse, octobre 2007.
- [6] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, "Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne", *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 pp 149 - 161*, Mars 2010.
- [7] M.Zagrouba, M. Bouaïcha, A. Sellami, M. Ksouri, "Optimisation par les algorithmes génétiques et modélisation par la méthode LPV d'un système photovoltaïque", *Vème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement (CERE)*, 04-06 Novembre, 2010, Sousse, Tunisie.
- [8] Yannick Morel (2006), <http://fisik.free.fr/> (page d'accueil) [en ligne]. Disponible : <http://fisik.free.fr/ressources/MachineCourantContinu.pdf>.
- [9] Adam Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", mémoire de thèse, laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de l'ENSEEIH, unité mixte de recherche CNRS N° 5828, Avril 2005.
- [10] Adnane Zaimi, "Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimant permanent", mémoire en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM, conservatoire national des arts et métiers centre du Maroc, Juin 2014.