

Modélisation et identification par les réseaux de neurones d'un système énergétique éolien à base d'une génératrice asynchrone

Mimi Belatel* et Abdelghani Ouazeta

Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, LEC
Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Constantine 1
Route Ain-El-Bey, 25000 Constantine, Algérie

(reçu le 20 Janvier 2016 - accepté le 30 Juin 2017)

Résumé - *L'objectif de ce travail est de modéliser les principaux composants du système énergétique éolien, essentiellement la génératrice asynchrone (GAS) et la turbine éolienne, ainsi que le développement d'un outil d'identification et d'optimisation, tel que les réseaux de neurones (ANN's) pour l'étude de la quantité de charge de l'unité de stockage d'un système énergétique éolien autonome. La modélisation et l'identification de toute la chaîne de conversion est une phase importante pour pouvoir déterminer les caractéristiques optimales du système éolien.*

Abstract - *The objective of, largely, as well as artificial's, this work is to model the main components of the wind energy system a synchronous generator (ASG) and the wind turbine the development of a tool for the identification and optimization of networks such as neural Networks (ANN's) for the study of the amount of charge of the storage unit of a wind energy system independent modelling and identification of the entire conversion chain is an important phase in order to determine the optimal characteristics of the wind turbine system.*

Mots clés: Modélisation - Identification - ANN's - Eolienne - GAS - Stockage.

1. INTRODUCTION

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance au cours de ces dernières années. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins.

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par les éoliennes n'a pas cessé d'augmenter depuis 1980. C'est la source qui progresse le plus rapidement.

L'industrie éolienne est en mesure de devenir une industrie énergétique mondiale si on se base sur l'accélération des installations dans la dernière décennie. Un marché important et compétitif s'est établi à un niveau international imposant à l'industrie le besoin d'améliorer la conception des éoliennes dans le but de réduire les coûts.

Il est même prévu que le vent sera la source de production d'électricité la moins chère. Il est clair qu'actuellement le coût de l'énergie éolienne concurrence celui de l'énergie conventionnelle. Grâce à la progression de la productivité et à l'amélioration des rapports qualité/prix des matériaux, les coûts d'installations des éoliennes diminuent d'années en années [1, 2].

* belatelmimi2002@yahoo.fr

2. MODELISATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION ÉOLIENNE

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes,

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et constitue par la suite une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

La production d'électricité à partir d'aérogénérateur ou éolienne dans un site isolé, nécessite l'utilisation de l'ensemble machine électrique-convertisseur statique. Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne [3-10]. Nous définissons alors la puissance éolienne par la relation suivante,

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

ρ , Masse volumique de l'air en kg/m^3 ; S , Surface traversée par l'air en m^2 ; $S = \pi \times R^2$; R , Rayon du rotor de l'éolienne; V , Vitesse du vent en m/s .

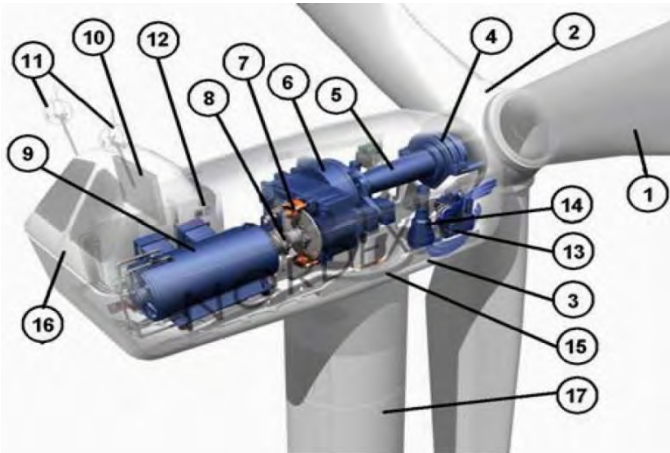


Fig. 1: Vue d'une éolienne éclatée

- 1: Pales; 2: Moyeu rotor; 3: Nacelle; 4: Cardan; 5: Transmission; 6: Multiplicateur de vitesse; 7: frein à disque; 8: Accouplement; 9: Génératrice; 10: Radiateur de refroidissement; 11: Centrale de mesures; 12: Contrôle; 13: Centrale hydraulique; 14: Mécanisme d'orientation face au vent; 15: Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque; 16: Capot; 17: Mât.

La distribution de Weibull décrit la distribution en fréquence de la vitesse du vent. Elle s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de Weibull est fonction de deux paramètres c et k et peut s'écrire,

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2)$$

où, c et k sont respectivement le facteur d'échelle en (m/s) et le facteur de forme sans dimension, qui caractérise l'asymétrie de la distribution. Ainsi, en utilisant la définition de $f(v)$ celle-ci s'écrit,

$$f(v) = \left(\frac{k}{v}\right) \left(\frac{v}{k}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3)$$

La puissance fournie par le rotor de l'éolienne est donnée par la relation suivante,

$$P = C_p \frac{\rho.S.V^3}{2} \quad (4)$$

C_p , Coefficient qui dépend de la forme du rotor et de la vitesse du vent, ainsi qu'il existe une relation linéaire entre la vitesse du vent et la vitesse angulaire du rotor.

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.3} - 13.2 \right) e^{18.4/\lambda_i} \quad (5)$$

Nous définissons le couple développé sur le rotor de l'éolienne de la manière suivante,

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (6)$$

avec, $T = C_p \cdot \frac{\rho.S.V^3}{2\omega} = C_p \cdot \frac{R.\rho.S.V^2}{2k}$ (7)

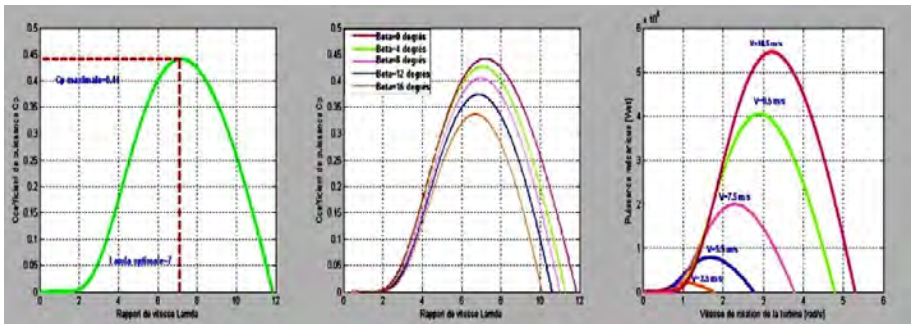


Fig. 2: Caractéristiques de la turbine

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ).

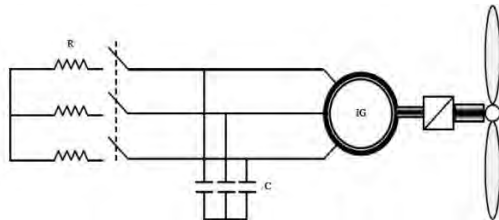


Fig. 3: Chaîne de conversion éolienne à base d'une génératrice asynchrone

Les éoliennes utilisent toujours une génératrice synchrone ou asynchrone comme générateur, où deux principaux procédés sont appliqués : - vitesse fixe, - vitesse variable.

Dans notre étude, nous avons présenté le modèle du générateur asynchrone en tenant compte de l'effet linéaire et l'effet de saturation dans le système d'axes d-q. Les équations aux tensions sont établies sous la forme matricielle suivante [11, 13],

$$[V_{abc}]_s = [R_s] \cdot [i_{abc}]_s + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}]_s \quad (8)$$

$$[V_{abc}]_r = [R_r] \cdot [i_{abc}]_r + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}]_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Les flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme,

$$[\Phi_{abc}]_s = [R_s] \cdot [i_{abc}]_s + [M] \cdot [i_{abc}]_r \quad (10)$$

$$[\Phi_{abc}]_s = [M] \cdot [i_{abc}]_s + [L_r] \cdot [i_{abc}]_r \quad (11)$$

Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par:

$$[S_{dq0}] = [A(\theta)] \cdot [S_{abc}] \quad (12)$$

$$\text{où, } [A(\theta)] = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Les équations des tensions s'écrivent dans un référentiel d-q sous la forme générale suivante,

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \theta_s \cdot \Phi_{qs} \quad (14)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \theta_s \cdot \Phi_{ds} \quad (15)$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \theta_r \cdot \Phi_{qr} = 0 \quad (16)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \theta_r \cdot \Phi_{dr} = 0 \quad (17)$$

Les expressions des flux à leur tour s'expriment par,

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (18)$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (19)$$

$$\Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (20)$$

$$\Phi_{qr} = L_{rs} \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \quad (21)$$

L'autoamorçage du générateur asynchrone est assuré par la présence des condensateurs et de la saturation. Les condensateurs fournissent l'énergie réactive

nécessaire et la saturation limite la tension du générateur. Ce processus est gouverné par la relation suivante, appelée les équations d'amorçage du générateur.

$$\frac{dV_{ds}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{ds} \tag{22}$$

$$\frac{dV_{qs}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{qs} \tag{23}$$

■ □ Influence de la saturation

Le modèle de la machine asynchrone établi pour une inductance magnétisante constante n'est pas réel et le fonctionnement correct de la génératrice est redevable à la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine.

L'effet de la saturation est pris en compte par l'intermédiaire de l'inductance de magnétisation. Cette dernière est approximée par un polynôme en fonction de la tension de sortie de la génératrice. On remarque que la tension et le courant statorique croient d'une façon exponentielle dans la zone de non saturation puis elles convergent vers une valeur fixe dans la zone saturée. Le délai d'amorçage jusqu'au régime permanent est de l'ordre d'une (1) s. Les amplitudes des tensions et des courants statoriques obtenues en régime permanent sont égales à 270V et 5.079 A, avec une fréquence de 50 Hz.

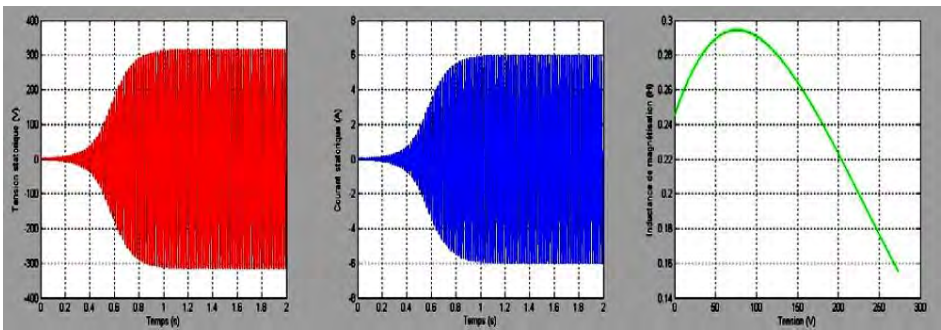


Fig. 4: Caractéristiques en régime saturé

En fonctionnement linéaire, l'inductance de magnétisation est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non-saturé, la caractéristique de magnétisation ne présente alors pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. L'auto-amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie ainsi que le courant atteint rapidement des valeurs inadmissibles.

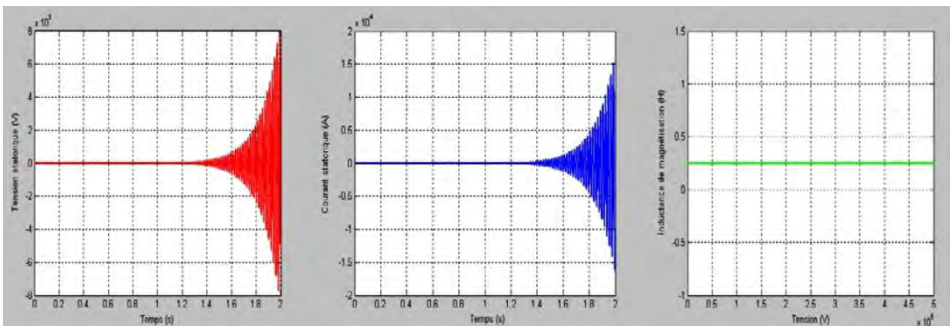


Fig. 5: Caractéristiques en régime non saturé

■ □ Influence de la capacité

Pour mieux voir l'influence de la capacité sur la tension pour une vitesse donnée, on étudie l'évolution de la tension lorsque l'excitation nécessaire à l'auto-amorçage varie par la variation du condensateur.

On constate d'après les résultats de la figure 6, que l'augmentation et la diminution de la valeur de la capacité influe sur le transitoire de la tension, les courants statoriques et de magnétisations augmentent pour $C > 60 \mu\text{F}$, et diminuent pour $C < 60 \mu\text{F}$. Par contre cette variation n'a pas beaucoup d'effet sur la fréquence de la tension, mais elle influe seulement sur la vitesse.

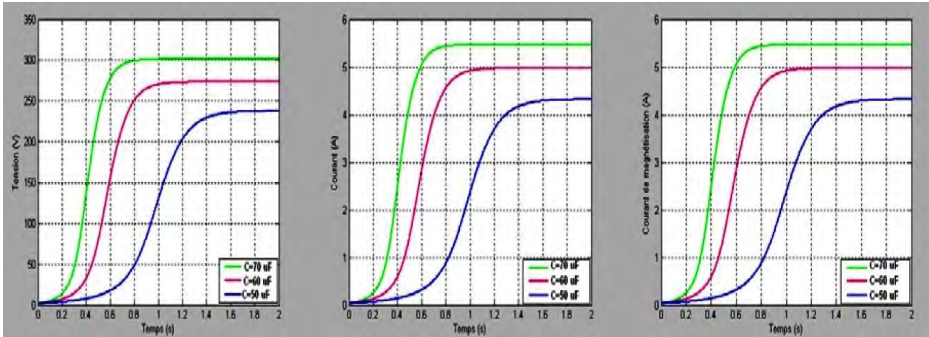


Fig. 6: Effet de la capacité sur les caractéristiques (tension- courant) statorique

■ □ Influence du champ rémanent

Le champ rémanent est le reste de magnétisation de la machine, qui permet à cette dernière de s'amorcer. L'augmentation de ce reste conduit à réduire le délai d'amorçage.

Les résultats obtenus sont représentés avec les trois valeurs de x , ($x_1 = (1.5) \times x_0$; $x_2 = (1.5) \times x_0$ et $x_3 = x_0$; avec x_0 , est un facteur qui représente le champ rémanent pour $i_{ds} = i_{qs} = i_{dr} = i_{qr} = 0.01 \text{ A}$).

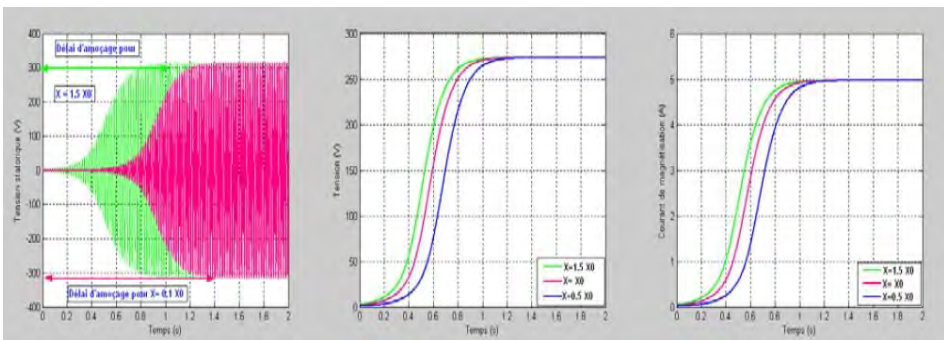


Fig. 7: Effet du champ rémanent sur le délai d'amorçage

■ □ Influence de la vitesse

Le passage de la vitesse de 1800 tr/min à 1500 tr/min, représente une variation de 16.7 %, ce qui provoque une variation de la tension de 19 %. On remarque que la vitesse a une influence directe sur la tension.

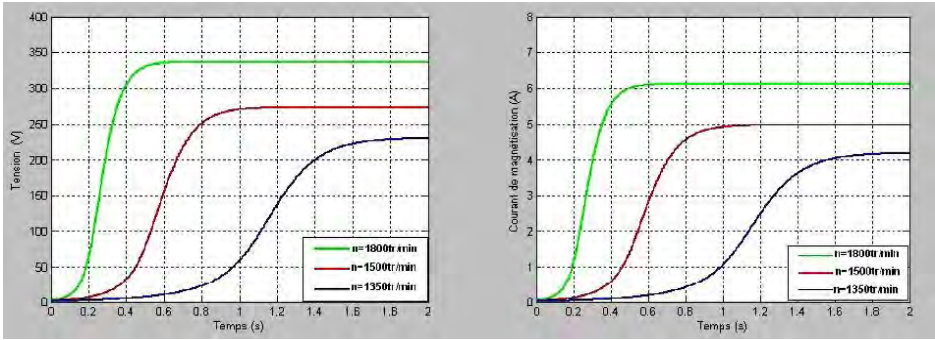


Fig. 8: Effet de la vitesse sur les caractéristiques de la génératrice

Pour voir l'influence de la vitesse sur la tension et le courant statorique, on entraîne la machine à la vitesse $n = 1500 \text{ tr/min}$, puis à l'instant $t = 1.9 \text{ s}$, on diminue la vitesse jusqu'à $n = 900 \text{ tr/min}$.

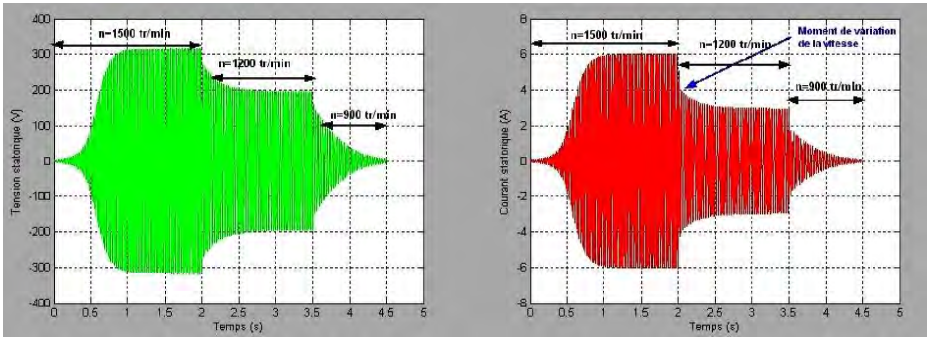


Fig. 9: Influence de la vitesse sur la tension et le courant statorique

■ □ Influence de la résistance

Lorsqu'on branche une charge résistive R , la tension diminue, par contre le courant augmente à l'instant où la résistance est utilisée comme charge. Ce courant diminue jusqu'à l'obtention de la valeur initiale pour ($C = 60 \mu\text{F}$ et $n = 1500 \text{ tr/min}$).

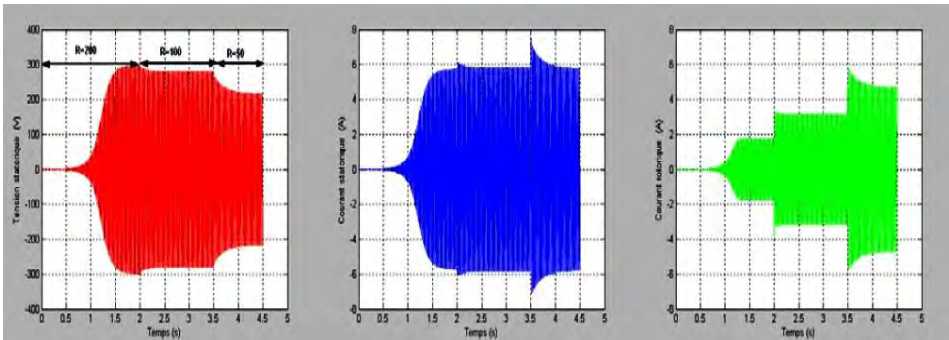


Fig. 10: Effet de la connexion d'une charge R sur les caractéristiques de la génératrice

La plage de la variation d'une résistance R connectée sur une machine asynchrone auto-excitée varie entre $R=25\Omega$ et $R=190\Omega$, au dessous de la valeur $R_{\min}=37\Omega$ la tension s'annule et le courant augmente rapidement jusqu'à atteindre une énorme valeur puis il s'annule pour $R=20\Omega$.

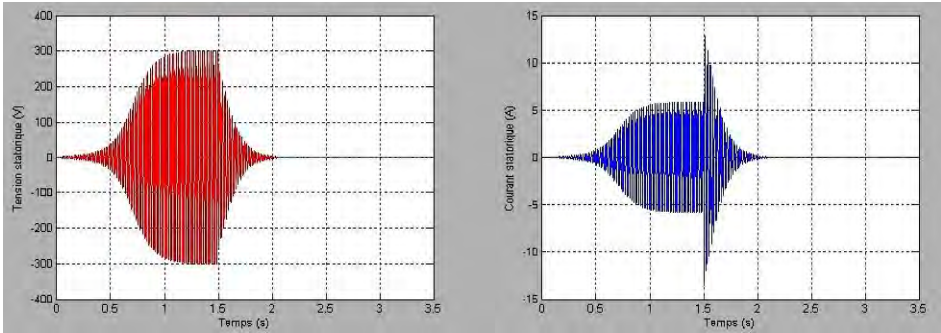


Fig. 11: Effet d'une résistance au dessous de R_{\min} sur la tension et le courant
($C = 60\mu\text{F}$, $n = 1500$ tr/min)

Pour une charge critique, la variation de la tension est d'environ de 99.28 % et la variation de la fréquence est de 10 %. Ce qui conduit au désamorçage de la génératrice asynchrone, suivi d'un court circuit causé par cette charge qui nécessite un contrôle. Au dessus de la valeur de $R_{\max}=190\Omega$, la tension et le courant restent fixés à la valeur du permanent et ne changent plus.

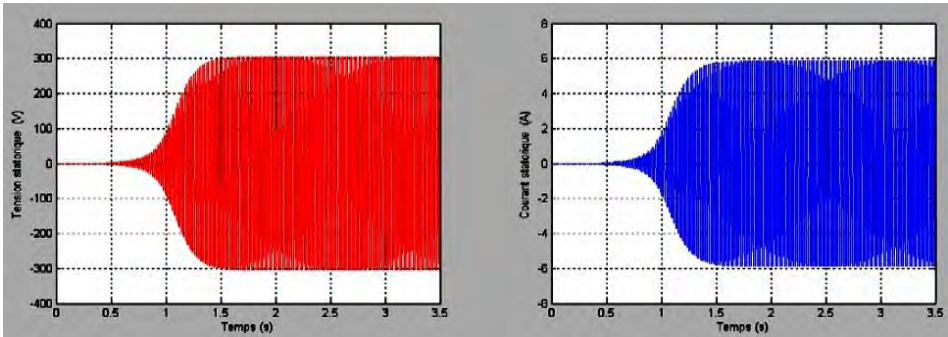


Fig. 12: Effet d'une résistance R_{\max} sur la tension et le courant
($C = 60\mu\text{F}$, $n = 1500$ tr/min)

3. IDENTIFICATION PAR LES RESEAUX DE NEURONES DE LA QUANTITE DE CHARGE DU SYSTEME DE STOCKAGE

Les unités de stockage sont introduites dans les systèmes énergétiques autonomes pour répondre à la demande de l'utilisateur pendant les périodes de l'indisponibilité de la source d'énergie renouvelable.

Pour chaque jour l'état de l'unité de stockage, pendant le temps de $(t-1)$ à (t) , dépend de l'état de charge antérieur de l'unité, de la quantité d'énergie produite et de la consommation de l'utilisateur. Pendant le processus du chargement, quand la production totale de l'aérogénérateur est plus grande que la demande des charges du

consommateur, la quantité de la charge disponible dans l'unité de stockage au jour (t) peut être décrite par la fonction suivante,

$$E_B(t) = E_B(t-1).(1-\sigma) + \left(E_e(t) \cdot \frac{B_j(t)}{\eta_{ond}} \right) \cdot \eta_{bat} \quad (24)$$

De plus, quand la demande des charges est plus grande que l'énergie produite disponible, l'unité de stockage est dans un état de décharge. Par conséquent, la quantité de la charge disponible de l'unité de stockage à ce jour (t) peut être exprimée comme suit,

$$E_B(t) = E_B(t-1).(1-\sigma) + \left(\frac{B_j(t)}{\eta_{ond}} - E_e(t) \right) \quad (25)$$

$E_B(t)$ et $E_B(t-1)$ sont les quantités de la charge disponible de l'unité de stockage en (Wh) au jour (t) et (t-1) respectivement, η_{bat} est l'efficacité des batteries sachant que pendant le processus de décharge, l'efficacité est en général égale à 1 et pendant le processus de charge, l'efficacité est de 0.65 à 0.85 environ selon l'intensité du courant de chargement.

De plus, σ est le taux d'autodécharge des batteries (la majorité des fabricants estiment que pour 6 mois, le taux d'autodécharge est de 25 % pour une température du stockage de 20 °C, c'est-à-dire 0.14 % par jour). η_{ond} est l'efficacité de l'onduleur.

La quantité de la charge de l'unité de stockage dépend des contraintes suivantes,

$$E_{Bmin} \leq E_B(t) \leq E_{Bmax} \quad (26)$$

où E_{Bmax} et E_{Bmin} sont le maximum et minimum de la quantité de charge de l'unité de stockage.

L'énergie totale produite par le système énergétique peut satisfaire ou non la demande des charges journalières. D'où, trois situations différentes peuvent survenir à tout instant. Ces situations dépendent de la quantité de charge et de la puissance totale produite,

- ◆ Si l'énergie totale produite est inférieure aux besoins moyens journaliers, alors il y aurait un manque d'énergie produite: $E_e < B_j$. Le manque d'énergie peut être soigné par l'énergie déjà stockée. La quantité de la charge disponible dans les batteries est calculée en utilisant l'expression (25).
- ◆ Si l'énergie totale produite est égale avec la demande de l'utilisateur, il n'y a ni un excès ni un manque: $E_e = B_j$.
- ◆ Si l'énergie produite est supérieure à la demande, la puissance produite est en excès: $E_e > B_j$. Le surplus d'énergie est emmagasiné dans les batteries et la quantité de charge de l'unité de stockage est calculée en utilisant l'équation (24) jusqu'à ce que la capacité totale de l'unité de stockage est obtenue [1, 14-17].

Les réseaux de neurones formels sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et des services. Néanmoins, ils n'ont pas encore atteint leurs pleins développements, pour des raisons plus psychologiques que techniques, liées aux connotations biologiques du terme, et au fait qu'ils sont considérés, à tort, comme des outils d'intelligences artificielles.

Or l'intérêt des réseaux de neurones, dans le domaine des sciences de l'ingénieur, ne doit rien à la métaphore biologique: il est uniquement dû aux propriétés mathématiques spécifiques de ces réseaux [18-21]. D'après [22], à partir de principes simples, les auteurs présentent, que sont réellement les réseaux de neurones, et on présente nous dans ce travail, leurs applications qui sont illustrées par l'identification de la quantité de charge du système de stockage d'un système éolien autonome.

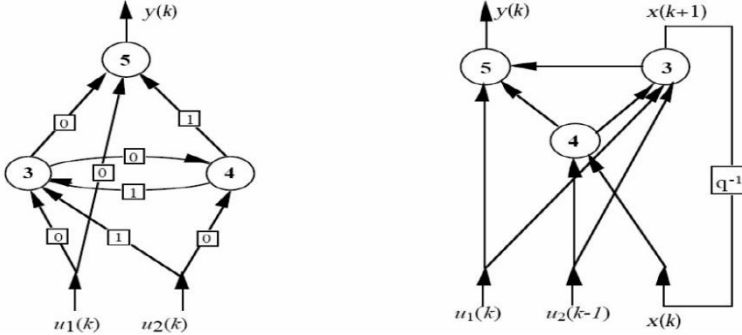


Fig. 13: Un réseau de neurones artificiel

Le perceptron comporte une couche d'entrée constituée de (n) neurones élémentaires et une couche de sortie constituée d'un ou de plusieurs neurones dont la fonction est en général du type plus ou moins.

Notant (ω_{ij}) le poids reliant le $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche d'entrée au $i^{\text{ème}}$ neurone de la couche de sortie, il vient,

$$y_i = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \cdot x_j + \omega_{i0} \cdot x_0 \tag{27}$$

avec, $z_i = f(y_i)$ (28)

x_0 , correspond à l'entrée inhibitrice constante.

Dans le cas d'un réseau admettant (q) couches, une notation simplifiée est utilisée pour alléger la formulation.

Notant $E(t)$ la somme des carrés des erreurs à la $t^{\text{ème}}$ présentation,

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_q} (z_i^{(q)}(t) - s_i(t))^2 \tag{29}$$

Le problème d'optimisation peut être formulé comme suit :

$$\min E(t) = \min \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_q} (z_i^{(q)}(t) - s_i(t))^2 \right) \tag{30}$$

$$z_i^{(l)}(t) = f(y_i^{(l)}(t)) \quad i = 1, 2, \dots, n_i \tag{31}$$

$$y_i^{(l)}(t) = \sum_{j=1}^{n_{i-1}} \omega_{ij}^{(l)}(t) \cdot z_j^{(l-1)} \quad i = 1, 2, \dots, n_i \tag{32}$$

Dans la suite, (ω) représente l'ensemble des poids d'interconnexion du réseau de neurones et $\omega^l(t)$ la valeur à l'instant (t) des poids liant les neurones de la couche $(l-1)$ à ceux de la couche (l) .

L'application de la méthode du gradient pour les poids de la couche (l) conduit à l'algorithme,

$$\omega^{(l)}(t+1) = \omega^{(l)}(t) - \eta(t) \frac{\partial E(t)}{\partial \omega^{(l)}} \tag{33}$$

On considère que $\text{tot}_i^{(l)}(t)$ est la somme de tous les signaux atteignant le $i^{\text{ème}}$ neurone de la couche (l) . Il vient, en notation simplifiée, l'algorithme de rétro propagation du gradient.

$$\omega_{ij}^{(l)}(t+1) = \omega_{ij}^{(l)}(t) - \eta \left(\frac{\partial E(t)}{\partial z_i^{(l)}} \right) \cdot \left(\frac{\partial z_i^{(l)}(t)}{\partial \text{tot}_i^{(l)}(t)} \right) \left(\frac{\partial \text{tot}_i^{(l)}(t)}{\partial \omega_{ij}^{(l)}} \right) \tag{34}$$

Soit pour la couche de sortie $(l=q)$,

$$\omega_{ij}^{(q)}(t+1) = \omega_{ij}^{(q)}(t) - \eta \cdot \delta_i^{(q)}(t) \cdot z_j^{(q)}(t) \tag{35}$$

avec,
$$\delta_i^{(q)}(t) = \left(z_i^{(q)}(t) - s_i(t) \right) \cdot \frac{\partial f(\text{tot}_i^{(q)}(t))}{\partial \text{tot}_i^{(q)}(t)} \tag{36}$$

Pour les couches cachées, $(2 \leq l \leq q-1)$

$$\omega_{ij}^{(l)}(t+1) = \omega_{ij}^{(l)}(t) - \eta \cdot \delta_i^{(l)}(t) \cdot z_j^{(l-1)}(t) \tag{37}$$

avec,
$$\delta_i^{(l)}(t) = \frac{\partial f(\text{tot}_i^{(l)}(t))}{\partial \text{tot}_i^{(l)}(t)} \cdot \sum_{m=1}^{n_{l+1}} \delta_m^{(l+1)} \cdot \omega_{mi}^{(l+1)} \tag{38}$$

Le réseau de neurones doit, à partir des commandes à l'instant $(k-1)$, prédire la sortie qu'aurait le processus à l'instant (k) si les perturbations $\omega(k)$, non mesurables, n'existaient pas [18, 22].

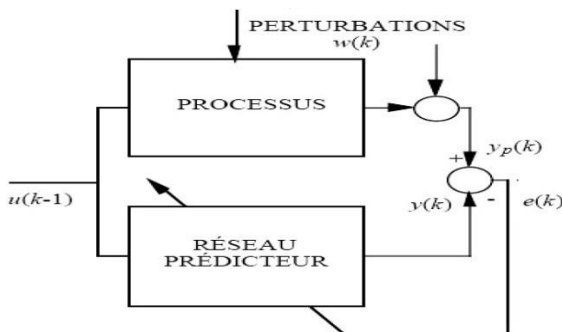


Fig. 14: Identification des paramètres d'un modèle

L'itération se poursuit en présentant successivement au réseau l'ensemble des patrons. Le calcul s'arrête au bout d'un nombre d'itérations prédéfini ou lorsque l'erreur pour chaque patron devient inférieure au seuil choisi.

Dans notre cas on a choisis le nombre d'itérations égal à 300 pour les trois cas ($E_e < B_j$, $E_e = B_j$, $E_e > B_j$), déjà définis précédemment.

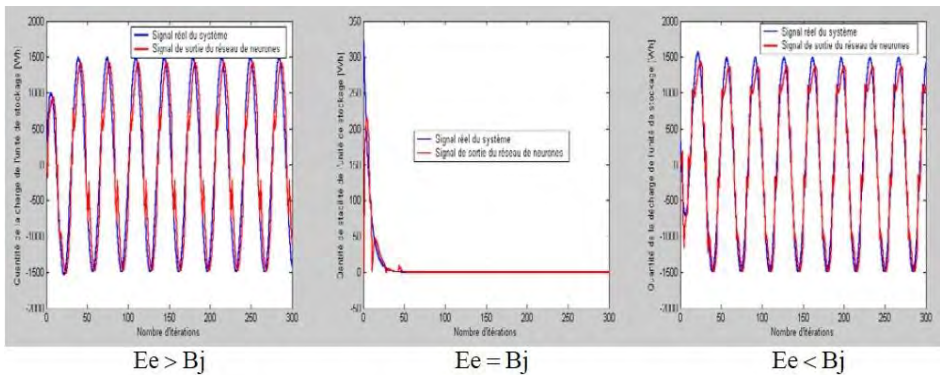


Fig. 15: Identification par ANN's de la quantité de la charge du système de stockage

Le but de l'utilisation des réseaux de neurones est d'aboutir à un approximateur qui peut fournir une bonne estimation de la sortie d'un système pour un ensemble donné de valeurs d'entrées.

Les approximateurs conventionnels sont généralement basés sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système considéré. Il n'est cependant pas toujours possible de disposer d'un modèle suffisamment précis, ou encore il peut même qu'un modèle mathématique conventionnel n'existe pas.

Dans ce cas, des méthodes non conventionnelles faisant appel non pas à une modélisation mathématique mais à une manipulation de données numériques expérimentales, telles que les réseaux de neurones artificiels, qui peut être utilisés.

4. CONCLUSION

L'objectif de ce travail est de faire l'étude d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une génératrice asynchrone, en vue de,

- Modéliser les caractéristiques des différents composants du système éolien autonome, plus particulièrement l'aérogénérateur et l'unité de stockage.
- Etudier et développer un modèle à base des réseaux de neurones pour identifier et optimiser un système d'énergie éolien. Ainsi, les réseaux de neurones constituent une alternative intéressante à l'élaboration d'approximateurs des modèles pour des systèmes réels.

Cette démarche peut être maintenue pour la conception d'un système hybride multi-sources afin de compenser le manque d'énergie pendant les périodes de déficit d'énergie éolienne.

5. ANNEXE

(1) Paramètres de la turbine éolienne

Rayon de la voilure (Diamètre rotor)	$R = 48\text{m}$
Nombre de pales	3
Coefficient de puissance optimal	$C_p = 0.44$
Masse volumique de l'air	122 kg/m^3
Vitesse réduite optimale	$\lambda = 7$
Inertie de la voilure	100000 kg.m^2
Angle de calage	$\beta = 0$

Surface active $S = 2 \text{ m}^2$

(2) Caractéristiques de la génératrice synchrone

Résistance d'enroulement statorique	$R_s = 1.66 \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 2.74 \Omega$
Inductance de fuite (sta/rot)	$l = 11.4 \text{ mH}$
Inductance de fuite mutuelle	$l_m = 0.245 \text{ mH}$
Moment d'inertie	$J = 0.038 \text{ kg.m}^2$
Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Vitesse nominale (synchronisme)	$n = 1500 \text{ tr/min}$
Capacité d'excitation	$C = 60 \mu\text{F}$
Capacité de compensation	$C_{ch} = 30 \mu\text{F}$

$$L_m = -1.56 \times 10^{-11} \cdot v^4 + 2.44 \times 10^{-8} \cdot v^3 - 1.19 \times 10^{-5} \cdot v^2 + 1.42 \times 10^{-3} \cdot v - 0.245$$

$$L_s = L_r = L_\sigma + L_m$$

$$R_{ch} = 55 \Omega$$

REFERENCES

- [1] W. Zghal, G. Kantchev and H. Kchaou, 'Optimisation Technico-Economique d'un Système Énergétique Eolien pour une Maison Familiale', IV^{ème} Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, CERÉ, Monastir, Tunisie, 19 - 21 Mars, 2009.
- [2] Site internet : http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_001_05.pdf.
- [3] L. Chang, 'Systèmes de Conversion de l'Énergie Éolienne', IEEE Canadian Review, pp. 1 - 5, 2002.
- [4] B. Multon, 'Aérogénérateurs Électriques', Editions GEEA, Cachan, 2004.
- [5] M. Belatel et H. Benalla, 'Étude par CAO d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent pour la Production d'Énergie Éolienne', Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 11, N° 2, pp. 167 - 180, 2008.
- [6] M. Belatel, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous, 'Technologie du Couplage d'un Système Hybride de Type Photovoltaïque-Éolien avec la Pile à Combustible pour la Production de l'Électricité Verte', Revue des Énergies Renouvelables, Vol.14, N°1, pp. 145 - 162, 2011.
- [7] G. Tina and S. Gugliano, 'Probability Analysis of Weather Data for Energy Assessment of Hybrid Solar/Wind Power System', 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'08), Algarve, Portugal, June 11-13, 2008.
- [8] S. Farahat, M.A. Yazdanpanah Jahromi, and S.M. Barakati, 'Modeling and Sizing Optimization of Standalone Hybrid Renewable Energy Systems', International Conference on Mechanical, Nanotechnology and Cryogenics Engineering (ICMNC'2012), Kuala Lumpur, Malaysia, August 25 - 26, 2012.
- [9] S. Younsi et al., 'Modelling and Control of Hybrid Renewable Energy System Connected to AC Grid', International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE), Vol. 3, N°12, pp. 3854 - 3865, 2011.

- [10] L. Louze, '*Production Décentralisée de l'Energie Electrique: Modélisation et Contrôle d'une Génératrice Asynchrone Auto Excitée*', Thèse de Doctorat en Science, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2010.
- [11] S.E. Ben Elghali, '*Modélisation et Commande d'une Hydrolienne Equipée d'une Génératrice Asynchrone Double Alimentation*', Conférence JCGE'08, Lyon, Décembre 16-17, 2008.
- [12] B. Beltran, '*Maximisation de la Puissance Produite par une Génératrice Asynchrone Double Alimentation d'une Eolienne par Mode Glissant d'Ordre Supérieur*', Conférence JCGE'08, Lyon, Décembre 16-17, 2008.
- [13] K. Ferkous, '*Etude d'une Chaîne de Conversion d'Energie Eolienne*', Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2009.
- [14] H. Yang, W. Zhou, L. Lu and Z. Fang, '*Optimal Sizing Method for Stand-Alone Hybrid Solar Wind System with LPSP Technology by Using Genetic Algorithm*', Solar Energy, Vol. 82, N°4, pp. 354 - 367, 2008.
- [15] A. Kaabeche, M. Belhamel and R. Ibtouen, '*Optimal Sizing Method for Stand-Alone Hybrid PV/Wind Power Generation System*', Revue des Energies Renouvelables SMEE'10, Bou Ismail, Tipaza, pp. 205 – 213, 2010.
- [16] F.O. Hocaoglu, O.N. Gerek and M. Kurban, '*A Novel Hybrid (Wind–Photovoltaic) System Sizing Procedure*', Solar Energy, Vol. 83, N°11, pp. 2019–2028, 2009.
- [17] Fatemeh Jahanbani and Gholam H. Riahy, '*Optimum Design of a Hybrid, Renewable Energy System, Renewable Energy - Trends and Applications*', Publisher InTech, pp. 231 - 250, 2011..
- [18] G. Dreyfus, '*Les Réseaux de Neurones*', Mécanique Industrielle et Matériaux, N°51, pp. 1 - 19, 1998.
- [19] A.K. Jain, J. Mao and K. Mohiuddin, '*Artificial Neural Networks: A Tutorial*', Edited by IEEE Computational Science & Engineering, Vol. 29, N°33, pp. 31 - 44, 1996.
- [20] G.P. Zhang, '*Neural Networks for Classification: A Survey*', IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, Vol. 30, N°4, pp. 451 - 462, 2000.
- [21] M. Belatel and H. Benalla, '*A Multiobjective Design Optimization of Induction Machine using CAD and ANNs*', ICGST-AIML-Journal, Vol. 8, N°2I, pp. 25 - 32, 2008.
- [22] P. Borne, M. Benrejeb et J. Haggège, '*Reseaux de Neurones, Présentation et Applications (Automatique)*', Collection Méthodes et Pratiques de l'Ingénieur dirigée par P. Borné, 252 p., 2007.