



MODELISATION ET CONTROLE D'UN AEROGENERATEUR CONNECTE AU RESEAU

¹Mama BOUCHAOUR, ¹Laarej MERAD, ²Amira SEFSAF et ²Ilhem BELDJERBA

¹Université de Tlemcen, Faculté des Sciences, Département de Physique
Unité de Recherche « *Matériaux et Energies Renouvelables* », URMER

BP: 119, Fg. Pasteur, Tlemcen, 13000, Algeria

²Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, ESSAT

BP: 165, Bel Horizon, Tlemcen, 13000, Algeria

Abstract:

This work deals with a study of a wind power system based on a synchronous generator with permanent magnets driven by a variable speed turbine. First, a general overview on wind energy and the different types of generators are given. In a second step, the first part of the wind chain, is modeled namely the high power wind turbine and the MPPT control strategy. This one allows to the power coefficient to be maintained at an optimal value regardless in the variations in the power and wind speed. Then, the permanent magnet synchronous generator, the PWM rectifier by the operation, its control and the three-phase inverter (which allows injection into the network) are studied with Matlab software. The vector control applied to the permanent magnet synchronous generator makes it possible to have a similar behavior of the DC machine with separate excitation. In the end, simulation results permit to analyze the behavior of the wind power generation system.

Key words: Wind power, turbine, permanent magnet synchronous generator, vector control, grid, modeling, simulation Matlab.

RESUME

Ce travail présente une étude d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents entraînée par une turbine à vitesses variables. Dans un premier temps, un aperçu général sur l'énergie éolienne et les différents types des génératrices est abordé. Dans un second temps, la première partie de la chaîne éolienne, à savoir la turbine éolienne de grande puissance, est modélisée. La stratégie de commande MPPT qui permet de maintenir le coefficient de puissance à une valeur optimale quelques soient les variations de la vitesse du vent est exposée. La génératrice synchrone à aimant permanent, ainsi que le redresseur à MLI, sa structure, son fonctionnement et l'onduleur triphasé (qui permet l'injection au réseau) sont ensuite simulés par le logiciel MATLAB. La commande vectorielle appliquée à la génératrice synchrone à aimant permanent permet de rendre son comportement similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. Enfin, les résultats obtenus de simulation permettent d'analyser le comportement du système de génération éolienne.

Mots clés : Aérogénérateur, énergie éolienne, turbine, machine synchrone à aimant permanent, réseau, commande vectorielle, Matlab, modélisation, simulation.

I. INTRODUCTION

L'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, aussi bien pour des sites isolés ou bien des sites connectés au réseau [1, 2]. L'utilisation des éoliennes a connu un développement rapide. Elles font partie des techniques les plus prometteuses en termes d'écologie et de compétitivité, en contribuant à la réduction de la demande de plus en plus galopante de l'électricité [2].

Dans notre pays, l'énergie éolienne accuse un retard considérable par rapport aux autres pays. Les études qui se font dans ce domaine sont minimales. Ce travail est une contribution à l'étude des systèmes de commande d'une éolienne connectée au réseau électrique. Pour ce faire, notre choix est porté sur une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanent [3, 4].

Ce choix est fait car la machine synchrone à aimants permanent a des caractéristiques et/ou offrent des performances intéressantes et une meilleure contrôlabilité. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation de la GSAP à moindre coût pour la construction de grandes et puissantes éoliennes autrement dit les éoliennes de l'avenir [5, 6].

L'article est structuré comme suit :

La modélisation et la commande de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau électrique. Une illustration des différents constituants de système de conversion d'énergie et les techniques de commande utilisées, est présentée, ainsi que les résultats obtenus de la simulation.

II. THEORIE

II.1. Modélisation à vide de la GSAP :

Pour la génératrice à vide les courants statoriques sont nulles :

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Les expressions de tension et du couple deviennent :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = w \dot{\theta}_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

II.2. Modélisation de la GSAP en charge :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - w L_{ch} i_q \\ V_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} i_q - w L_{ch} i_d \end{cases} \quad (3)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q , on aura le système suivant [14]:

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_d + w (L_q + L_{ch}) i_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) i_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_q + w (L_d + L_{ch}) i_d + w \dot{\theta}_f \end{cases} \quad (3)$$

En introduisant le modèle d'état dans les équations ci-dessus, elles deviennent : [14]

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) i_d + w (L_q + L_{ch}) i_q] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) i_q + w (L_d + L_{ch}) i_d] + w_f \end{cases} \quad (4)$$

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce fonctionnement, on voulait montrer la proportionnalité entre la vitesse de rotation de la génératrice, l'amplitude et la fréquence de la tension fournie [7, 8]. Pour ce faire, on a démarré le générateur par un couple moteur égale à 4.138 N.m pour une durée de 0.01s puis on l'a laissé tourner librement. Le frottement dans ce cas est nul.

La figure (1) représente les tensions statoriques.

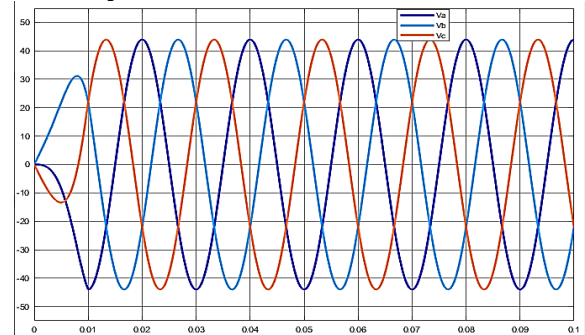


Figure (1) : Tensions statoriques

D'après la figure ci-dessus (1) on a remarqué que l'amplitude des tensions augmente avec la vitesse, puis les tensions deviennent parfaitement sinusoïdales en régime

permanent à (0.01 s) avec une valeur crête de 44 (V) et une fréquence de 50 Hz.

Dans la figure (2), nous avons présenté les composantes des tensions directe V_d et quadratique V_q .

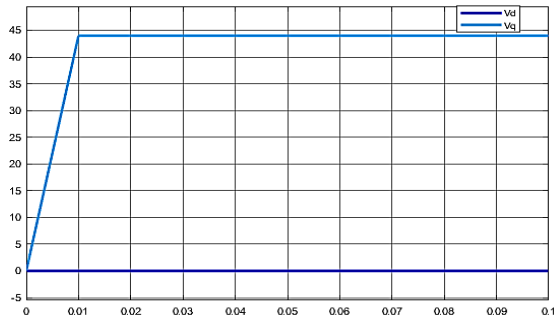


Figure (2) : Composantes V_d et V_q

Nous avons remarqué que les deux tensions directe et quadratique prennent respectivement une valeur de 0V et 44V à (0.01s) ; ce qui correspond à la valeur crête. La figure (3) représente le couple moteur et la vitesse de rotation.

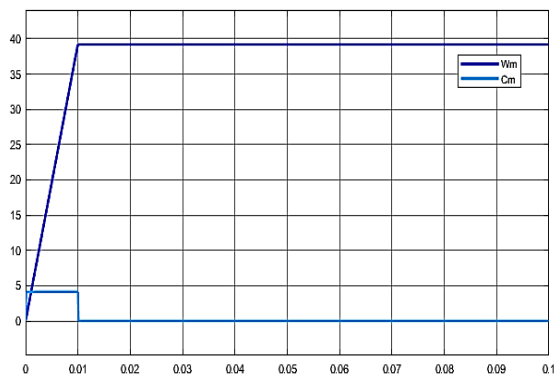


Figure (3) : Vitesse de rotation et couple moteur

Le couple moteur appliqué à la génératrice est égal à 4.138 Nm puis il s'annule à (0.01s) et la vitesse de rotation augmente jusqu'à ce qu'elle se stabilise à la valeur (39.2 tr/min). Les couple moteur et électromagnétique et le frottement sont nuls à partir de cet instant, alors on peut dire que l'amplitude des tensions statoriques et la fréquence sont proportionnels à la vitesse de rotation [9, 10, 11].

Pour déduire le comportement de la charge sur le fonctionnement de la génératrice, on a supposé que le couple d'entraînement soit $C_m=3.5$ N.m à l'instant

0s. Ensuite, on a diminué ce couple $C_m= 3$ Nm à l'instant 0.5 s. Pour voir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur le générateur [12, 13].

La simulation a donné les résultats suivants :

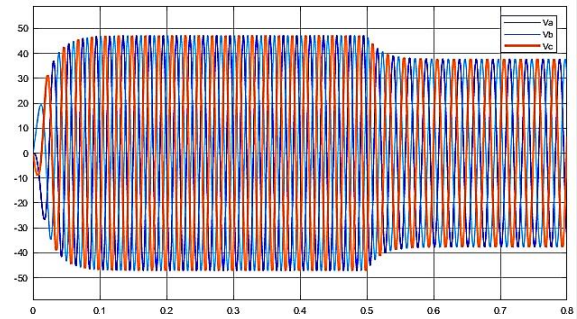


Figure (4) : Tensions de phases V_a , V_b , V_c

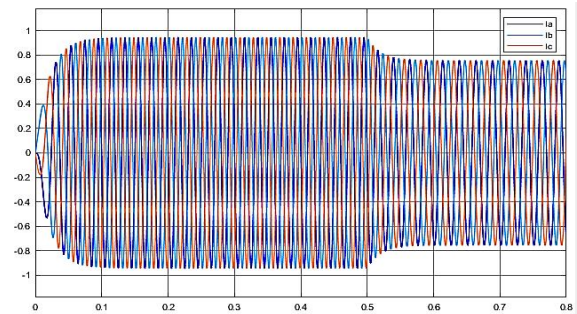


Figure (5) : Courants de phase I_a , I_b , I_c

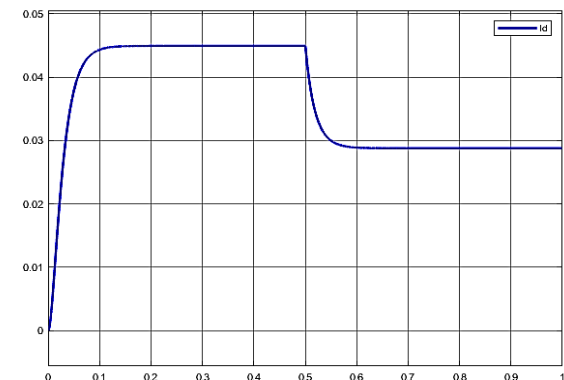


Figure (6) : Courants direct I_d .

❖ Interprétations:

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la GSAP en fonction de la puissance mécanique fournie on applique un couple mécanique $C_m= 3.5$ N.m, on remarque que le courant commence à augmenter en manifestant un couple électromagnétique qui suit le couple magnétique C_m [14, 15, 16].

Les tensions réelles de la GSAP entrent dans un régime uniforme et stable ; $V_a=V_b=V_c$.

Une fois que le couple d'entraînement diminue à la valeur $C_m=3 \text{ N.m}$, la machine va ralentir.

Les tensions réelles de la GSAP vont diminuer en limitant le courant. Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

Le couple électromagnétique va diminuer jusqu'à ce qu'il soit égal au C_m .

On remarque aussi que le courant direct est inférieur au courant quadratique.

III.2. Profil du vent

En considérant un profil du vent moyen autour de (8.2 m/s). La mise en application du modèle MATLAB/Simulink est représentée par l'équation suivante :

$$V(t) = 8.2 + 2 * \sin wt - 1.75 * \sin 3wt + 1.5 \sin 5wt - 1.25 * \sin 10wt + \sin 30wt + 0.5 \sin 50wt + 0.25 \sin 100wt$$

La figure (7) montre le profil de vent qui reflète un vent réel considéré pour la simulation de la turbine avec asservissement de vitesse.

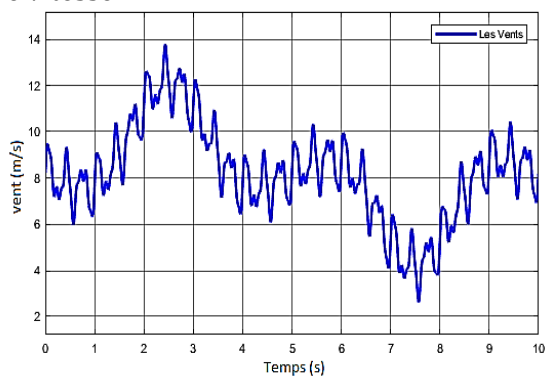


Figure (7) : Profil du vent

III.3. Caractéristique de la turbine éolienne :

La figure (8) présente le coefficient de puissance en fonction du ratio de la vitesse. Elle est la superposition de plusieurs courbes. Nous nous sommes intéressés à celles possédant le plus haut sommet ($\beta=0$). En fait, cette courbe a comme vitesse spécifique optimale 8.1 qui correspond à un coefficient de puissance maximale égale à

0.48. Ce point indique qu'on a récupéré un maximum de puissance mécanique et que l'augmentation de l'angle de calage permet de réduire le coefficient de puissance ce qui impose la diminution de la puissance mécanique récupérée.

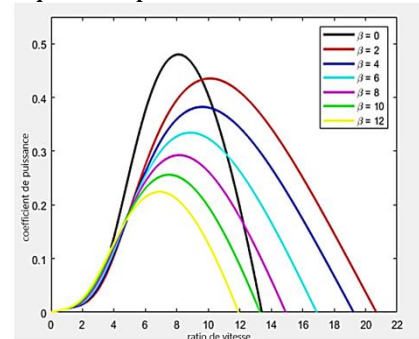


Figure (8) : Coefficient de puissance en fonction du ratio de la vitesse.

Quant à la figure (9), elle présente la puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation. Nous avons remarqué que pour une vitesse mécanique de vent v_1 et une vitesse de la génératrice, on obtient une puissance P_1 , si cette vitesse de vent varie et la vitesse de la génératrice reste fixe on peut dire que c'est le cas d'une éolienne à vitesse fixe, la deuxième puissance est dans la deuxième courbe caractéristique et ainsi de suite. Si la puissance maximale doit être extraite, la vitesse de la génératrice doit être réglée sur une vitesse supérieure.

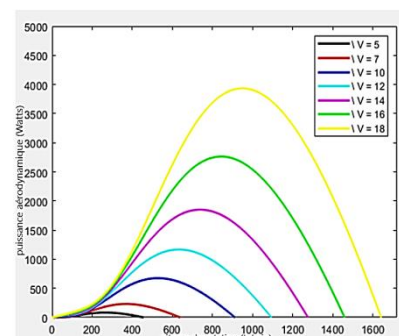


Figure (9) : Puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation.

D'après la figure (10) ; la puissance en fonction de la vitesse mécanique ; on a remarqué que chaque courbe correspond à une vitesse de vent, chaque sommet de ces caractéristiques représente un point optimale recherché ce qui définit une courbe dite de puissance optimale.

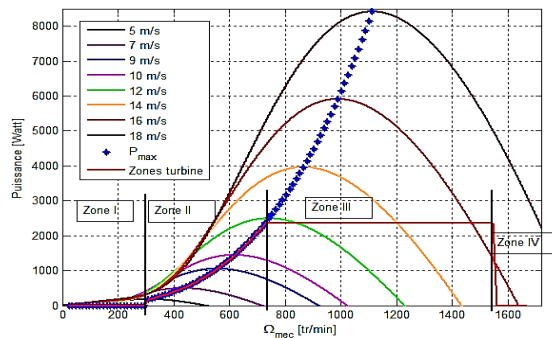


Figure (10) : Puissance en fonction de la vitesse mécanique.

Un bon fonctionnement nécessite un bon suivi de cette courbe. Pour s'approcher de ce but une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT) qui correspond à la deuxième zone est étudiée. Cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique.

III.4. Maximisation de puissance de la turbine avec asservissement de vitesse :

On a réalisé le modèle mathématique de la turbine (avec MPPT) avec une vitesse variable sous l'environnement Matlab/simulink.

III.4.1. Résultats de simulations :

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation avec asservissement de vitesse.

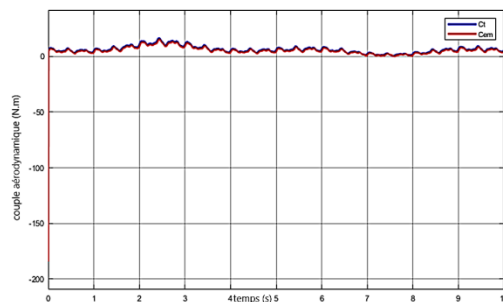


Figure (11): Couple aérodynamique

Au démarrage, l'allure du couple aérodynamique accroit, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($C_{aer} = 15 \text{ N.m}$). Cela est dû aux perturbations créées par le profil du vent sur le couple aérodynamique ce qui a produit des vibrations sur le système.

La figure (12) représente la puissance aérodynamique de la turbine.

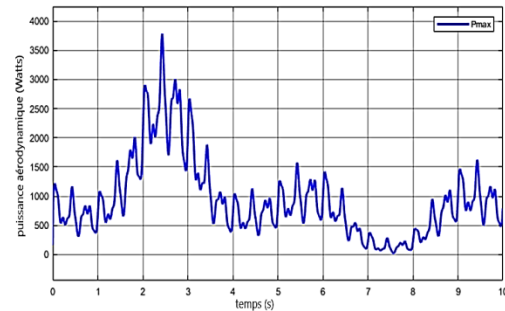


Figure (12) : Puissance aérodynamique.

Pendant le temps de démarrage, l'allure de la puissance aérodynamique augmente, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($P_{aer} = 1500 \text{ W}$). Cela est dû aux perturbations créées par le profil du vent sur la puissance aérodynamique, ce qui change la qualité d'énergie issue plus tard de la génératrice.

La figure (13) représente le coefficient de puissance

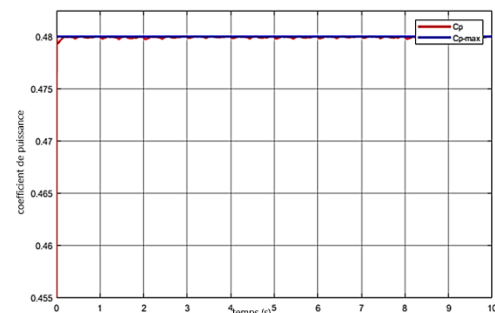


Figure (13) : Coefficient de puissance.

Au démarrage, l'allure du coefficient de puissance est sous forme croissante, puis il se stabilise à la valeur ($C_p = 0.48$) et à partir de ça, on peut conclure que la turbine récupère 48% de la puissance du vent.

D'après la figure (14) qui représente la vitesse spécifique, nous avons remarqué que l'allure de la vitesse relative suit la référence ($\lambda_{opt} = 8.152$, pour un coefficient de puissance 0.48 on aura une vitesse spécifique égale à 8.152 posé comme référence), avec un léger dépassement au régime transitoire.

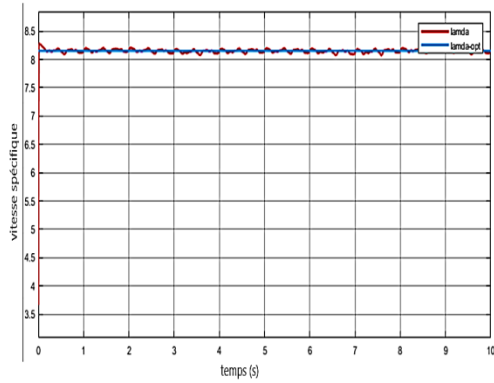


Figure (14) : Vitesse spécifique

La figure (15) représente la vitesse de rotation mécanique et vitesse de référence.

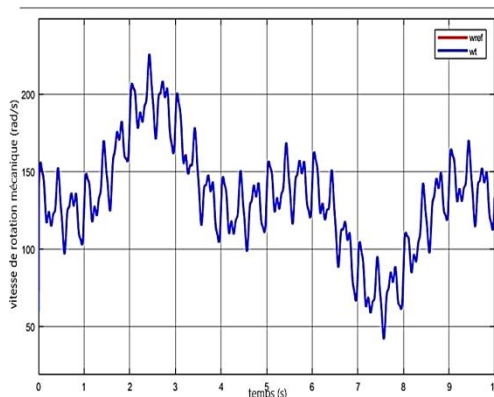


Figure (15) : Vitesse de rotation mécanique et vitesse de référence.

On a remarqué que pendant le démarrage, la vitesse de rotation mécanique prend une forme croissante, puis au régime permanent elle se met à osciller autour de la valeur (125 tr/min), elle suit sa référence ce qui montre clairement la perturbation créée par le vent sur la vitesse de rotation, ce qui altère la fréquence de la tension et du courant produite par la génératrice. On remarque aussi qu'elle suit sa référence avec un dépassement légère au régime transitoire.

III.5. Simulation de la chaine globale :

III.5.1. Simulation de la chaine globale sans commande vectorielle :

Nous avons également effectué la simulation de la chaine éolienne constitué de (turbine éolienne+ MPPT, génératrice, convertisseur coté machine, convertisseur coté réseau).

Le profil de vent est représenté sur la figure (16).

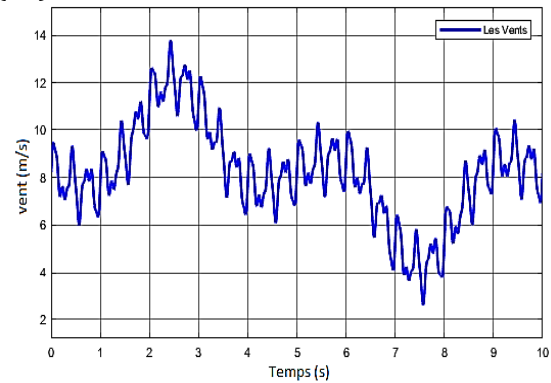


Figure (16) : Profil de vent.

Le profil de vent varie de 8 m/s à 14 m/s à l'instant 2.5 s, puis il diminue à la valeur de 3 m/s dans un intervalle de temps de [2.5s à 7.5s]. Il augmente une autre fois pour atteindre une valeur de 10 m/s à l'instant 10s ce qui prouve que c'est un vent aléatoire.

La figure (17) du coefficient de puissance à sa valeur maximale (11) montre que le coefficient de puissance est ajusté à sa valeur maximale malgré que la vitesse de vent varie. Ce qui prouve que la puissance captée par le vent est maximale.

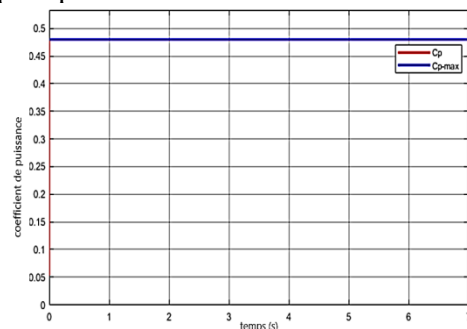


Figure (17) : Coefficient de puissance à sa valeur maximale.

On a constaté d'après La figure (18) montrant la vitesse de rotation et la vitesse de rotation optimale, que la vitesse de rotation est analogue à la vitesse optimale de référence, la vitesse de la génératrice synchrone à aimants permanents subit les différentes variations du vent car il n'y a pas de bobinage au niveau du rotor. Ce qui lui rend plus efficace.

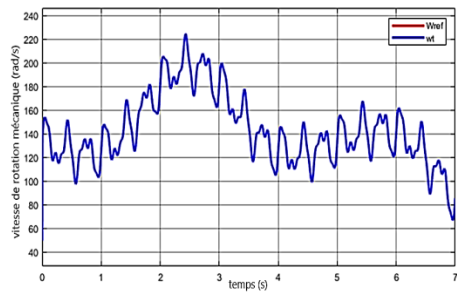


Figure (18) : Vitesse de rotation et vitesse de rotation optimale.

D'après la figure (19) : la vitesse spécifique et la vitesse spécifique optimale) on a observé que la vitesse spécifique et identique à la vitesse spécifique optimale.

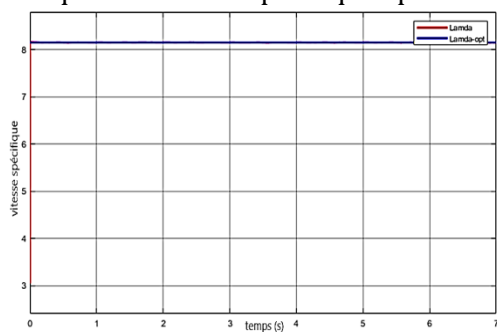


Figure (19) : Vitesse spécifique et vitesse spécifique optimale.

Selon la figure (20) qui représente les tensions statoriques générées par la génératrice synchrone à aimants permanents, on a remarqué que les tensions statoriques générées par la GSAP ont une forme sinusoïdale et elles sont adaptées à la variation de la vitesse du vent. Donc, le vent influe sur l'amplitude et la fréquence des tensions des phases.

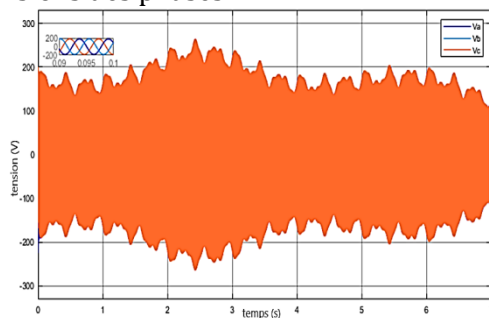


Figure (20) : Tensions statoriques V_{abc}

La figure (21) présente les courants statoriques I_{abc} . Le courant a une forme sinusoïdale. Sa valeur est comprise entre -5 et 5 Ampère ces résultats sont bien entendu influés par la vitesse de vent.

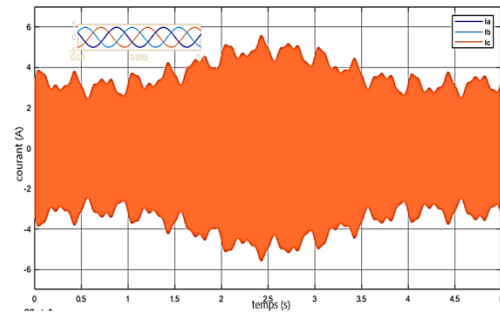


Figure (21) : Courants statoriques I_{abc} .

Les figures (22), (23) représentent la tension redressée et la tension filtrée.

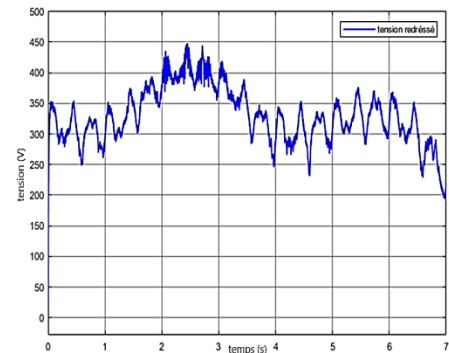


Figure (22) : Tension redressée

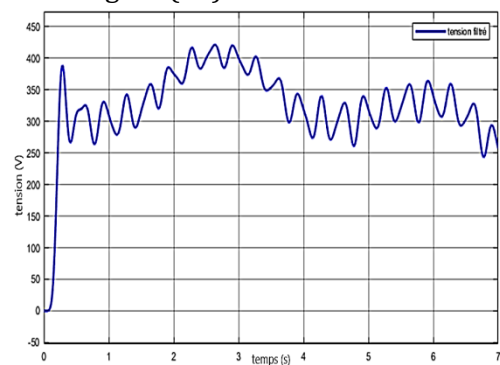


Figure (23) : Tension filtrée.

On a remarqué qu'après l'application du filtre passe bas, les ondulations présentes au niveau de la tension redressée deviennent bien filtrées car le filtre passe bas laisse passer les basses fréquences et atténue les hautes fréquences, c'est-à-dire les fréquences supérieures à la fréquence de coupure.

En simulant également, les tensions ondulées à la sortie de l'onduleur (La figure (24), on a constaté que l'onduleur délivre une tension MLI d'amplitude variable. Ces tensions sont en fonction de la variation du vent.

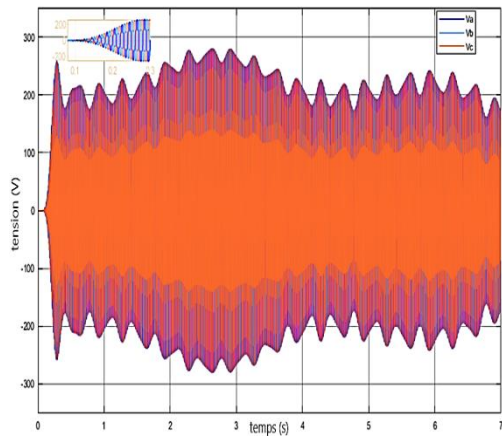


Figure (24) : Tensions ondulées.

III.5.2. Simulation de la chaîne globale avec commande vectorielle :

Notre travail a consisté aussi à effectuer la simulation du système globale avec commande vectorielle.

Les figures (25), (26), (27), (28), représentent respectivement les tensions générées par la GSAP, les courants de la GSAP, le courant direct avec sa référence et le courant quadratique avec sa référence.

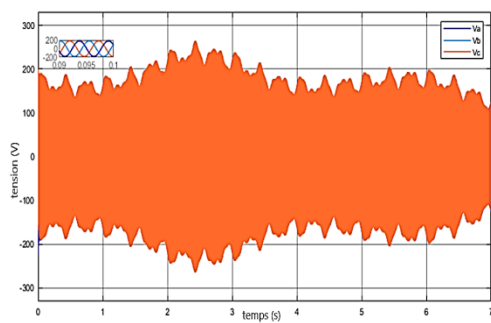


Figure (25) : Tensions statoriques V_{abc}

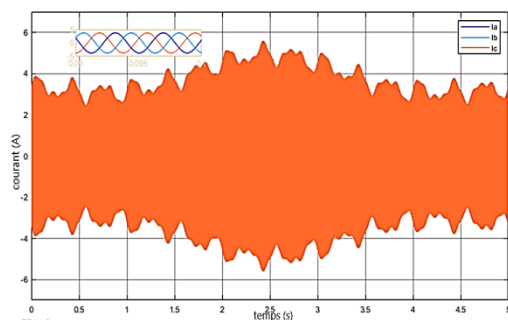


Figure (26) : Courants statoriques I_{abc} .

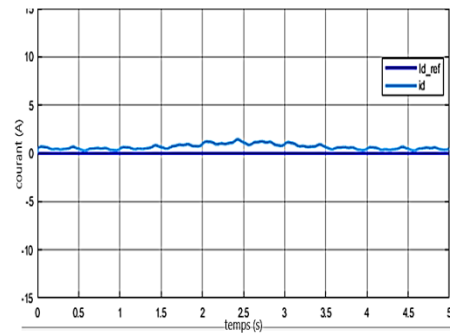


Figure (27) : Courant direct et sa référence

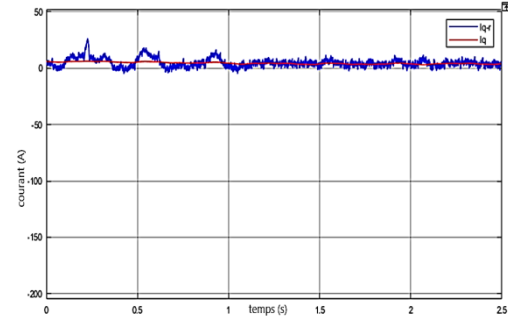


Figure (28) : Courant quadratique et sa référence.

D'après ces figures, on a remarqué que le courant généré par la GSAP a diminué et les courants I_d et I_q sont trouvés découplés et suivent leur référence donc on peut dire qu'on a un bon fonctionnement de la commande vectorielle.

La figure (29) représente la tension à la sortie du redresseur (la tension redressée) et la valeur de la tension de référence (qui est égale à 310V). Ainsi l'allure de la tension redressée reprend la valeur de la tension de référence après les perturbations du vent grâce à la commande appliquée sur l'onduleur. La tension du redresseur est établie à (310V). Le temps de réponse dépend de la commande du redresseur et le niveau de perturbation.

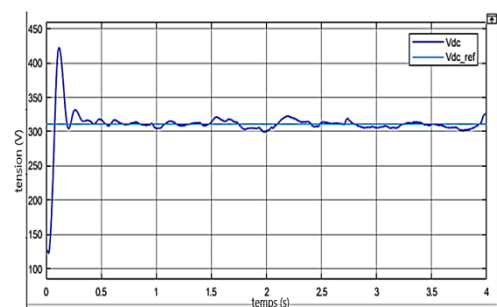


Figure (29) : Tension du bus continu.

La figure (30) représente les tensions et les courants injectés au réseau.

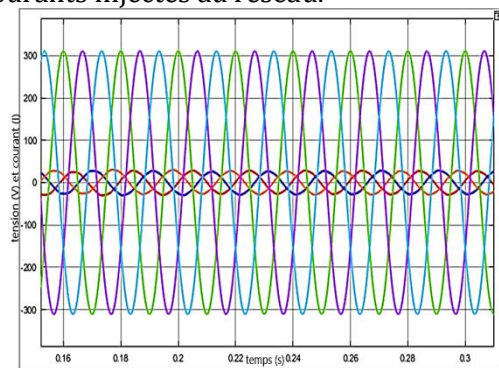


Figure (30) : Tensions de réseau et courants injectés au réseau.

La figure (30) représente les trois courants et tensions injectés au réseau, on constate que ces courants et tensions sont sinusoïdaux grâce à la commande de l'onduleur MLI2, avec une amplitude proportionnelle à la vitesse du vent, et une fréquence constante et adéquate à la fréquence du réseau 50Hz.

IV. Conclusion

Nous avons présenté les caractéristiques de la turbine éolienne et le fonctionnement avec une puissance maximale à l'aide de la commande MPPT. Ce qui permet d'extraire un maximum de puissance. Ensuite, nous avons effectué des essais sur le fonctionnement de la génératrice synchrone à aimants permanents pour voir son comportement à vide et en charge. Par la suite, nous avons présenté la simulation du système globale sans commande vectorielle et avec commande vectorielle. Cette dernière permet de régler la tension du bus continu à la sortie du redresseur qui garantit une tension constante et stable quelques soit les perturbations créées par le vent.

REFERENCES

- [1] B.SABRI «Modélisation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone/asynchrone », Mémoire de Master, ESSA Tlemcen, 2019.
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>.
- [3] F.MAZOUZ et M.KORICHI, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à aimant

permanent », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2019.

[4] <https://eolienne.f4jr.org>; 2020.

[5] M. MAYOUF, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent », Thèse de Magister, Université de Batna, 2008.

[6] S. Hamecha, « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2013.

[7] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.

[8] T. GHENNAM, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, (2012).

[9] N.BOUKHARI et L.STITI « Commande d'un redresseur triphasé à MLI », Mémoire Master Université Tizi-Ouzou, 2014.

[11] M.ADDOUR, « Etude et maximisation d'un système éolien », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2013.

[12] A.TABTI et Z.AHMEDI, « Commande et modélisation d'une éolienne à base d'une MSAP couplé au réseau », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2013.

[13] O.TOUNSI et Z.LASAKRI, « Etude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de Master, Université de Annaba, 2018.

[14] A.KERBOUA, « Cours machine électrique à courant continu », Ecole supérieur en sciences appliquées, Tlemcen, 2019.

[15] L.ALLALI, « Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents », Mémoire de Master, Université d'Oum el Bouaghi, 2016.

[16] A.TEBBAL et M. SEKHRI, « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent » Mémoire de MASTER, Université de Jijel, 2019.

[17] G.BOUKERCHE, Mémoire de Master, « Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application », Université de Annaba, 2017.

- [18]** A.DAHBI, « Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes », Mémoire de Magister, université de Sétif;2012.
- [19]** F. KENDOULI, K. NABTI, K. ABED, H. BENALLA, « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation ». Revue des Energies Renouvelables, vol. 14 N°1, pp. 109-120, 2011.
- [20]** F. Poitiers ; « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne ». Thèse de doctorat, Université de NANTES, France, (2003)
- [21]** S.M. DEHGHAN, M. MOHAMADIAN, A.Y. VARJANI, « A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent-Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter », IEEE transactions on energy conversion, vol. 24, N° 3, (2009)
- [22]** X.GUO, He. GUO, « Simulation and Control Strategy of a Micro-Turbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operations », Energy Procedia, vol N°12, (2011).
- [23]** D.H. TRAN ; « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale», Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, (2010).
- [24]** A.BELAMRI,« Simulation d'une turbine éolienne à axe horizontal», Mémoire de Master, Université Annaba, (2018).