

Etude et simulation des composants de système hybride éolien-photovoltaïques avec stockage (supercondensateur _ batteries)

ELHAMRANI Ramadan¹, BENHAMOU Amina^{*2}, BERKOUK Madjid³

¹Laboratoire électronique de puissance-Ecole militaire polytechnique
Bordj-el-Bahri-Alger-Algérie

¹ramadan_elhamrani@yahoo.com

^{2*}Boumerdes University-Boumerdes-Algeria

²amina_benhamou@hotmail.com

³école nationale polytechnique-elHarrach –Alger-Algeria

Résumé: L'objectif de ce travail est Les systèmes de production d'énergie hybrides PV-éolien, se présentent comme l'une des options technologiques pouvant permettre d'opérer de façon progressive la transition entre les sources renouvelables (solaire et éolien). En particulier pour les zones isolées d'Afrique Subsaharienne qui disposent d'un potentiel important en ressource solaire et pour lesquelles la production d'énergie est généralement assurée par les groupes Diesels .

Pour permettre d'exploiter au mieux ces sources d'énergie, le système doit être correctement dimensionné pour qu'il puisse fournir l'énergie d'une manière continue. Le dimensionnement d'un tel système implique la détermination des caractéristiques nominales des sources et du système de stockage, pour des ressources énergétiques et des contraintes d'utilisation données.

Pour ce fait, une modélisation et simulation des différents éléments de système hybride solaire et éolien , sont illustrés dans ce travail, après une recherche parmi les différents concepts et techniques de ces composants.

Mots clés— énergie solaire, énergie éolienne, système hybride, stockage supercondensateur, hacheur buck-boost-simulation.

I. INTRODUCTION

La croissance économique est devenue équivalente à une consommation énergétique de plus en plus importante. Les systèmes de génération éolienne et photovoltaïque sont les plus prometteurs parmi les technologies de production d'énergie renouvelables, par leurs nombreux avantages. Cependant, chacune des technologies mentionnées ci-dessus a ses propres inconvénients [1]. Néanmoins, le système d'énergie hybride est utilisé pour surmonter l'intermittence, l'incertitude, et la faible disponibilité de chaque source d'énergie renouvelable, ce qui rend le système plus fiable.

Les systèmes d'énergie hybride (éolien –photovoltaïque) bien adaptés à une production connectée au réseau ou bien décentralisée peuvent contribuer à résoudre plusieurs problèmes d'approvisionnement énergétique [2].

Le système d'énergie hybride a connu des nouveaux développements ces dernières années pour ce qui concerne les méthodes de gestions de la production, ainsi que l'optimisation du dimensionnement par des logiciels spécialisés (HOMER, SOMES, RAPSIM...).

II. CLASSIFICATION DES SYSTEMES D'ENERGIE HYBRIDE

Les systèmes d'énergie hybride sont classifiés suivant plusieurs critères.

Il existe deux principaux groupes des systèmes d'énergie hybride. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes

hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique.

Le système d'énergie hybride peut fonctionner avec la présence ou non d'une source d'énergie conventionnelle qui peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz...etc, aussi à la présence ou non d'un dispositif de stockage qui permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. La gestion de la capacité de stockage limitée, ainsi que leur coût élevé représente un inconvénient, et afin de minimiser le recours au stockage, on a eu recours aux systèmes d'énergie hybride. [3]

La structure du système hybride peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un générateur hydraulique, ou bien une combinaison de plusieurs sources renouvelables. Le choix des sources se base sur une analyse technico- économique.

Dans notre travail, on s'est intéressé à faire le bon choix technique des composants de notre système hybride éolien photovoltaïque, avec stockage et isolé du réseau. (fig 1).

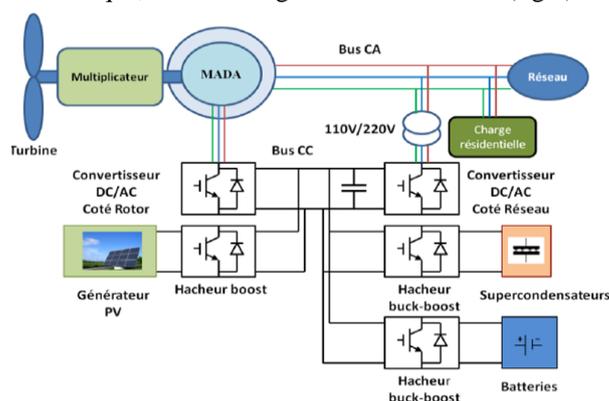


Fig. 1 schéma de système hybride éolien –photovoltaïque

A. Le générateur photovoltaïque:

La caractéristique (I/V) d'un GPV est non linéaire (fg.2). Le module PV produit une puissance à un point appelé point de fonctionnement qui appartient à la courbe caractéristique. Les coordonnées de ce point sont la tension et le courant de

fonctionnement. De même que pour la cellule, le MPP correspond au point de fonctionnement pour lequel le GPV.

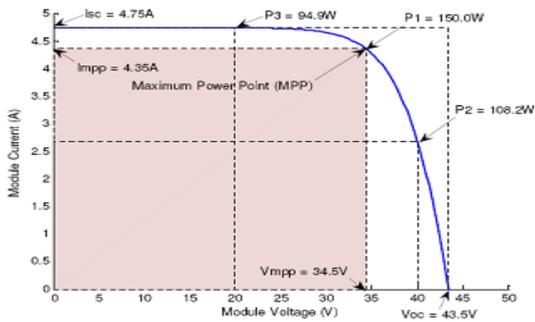


Fig.2.Cacractéristique I/V de module PV

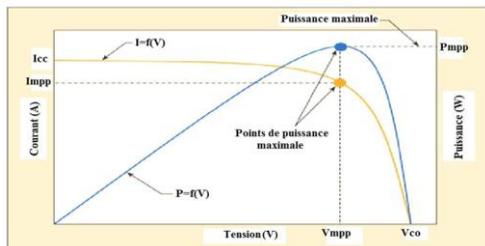


Fig.3.caractéristique de PV au MPPT.

La figure 3 présente un exemple de la caractéristique (P/V) et (I/V) d'un module PV. Elle illustre l'importance de faire fonctionner le système au MPP pour tirer le maximum de la puissance disponible [4].

Une cellule photovoltaïque est modélisée de manière simple par une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse (figure 4), en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction p-n.

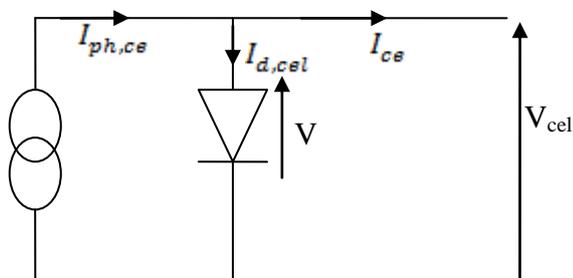


Figure 4 : Modèle d'une cellule idéale

Le circuit représenté ci-dessus est régi par la relation suivante:

$$I_{cel} = I_{ph,cel} - I_{d,cel} = I_{ph,cel} - I_{0,cel} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (11.3)$$

Avec :

Ce modèle reste théorique et ne prend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles, où on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s , et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p (figure 5).

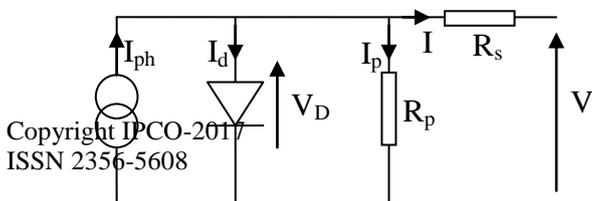


Figure 5 : Modèle d'une cellule réelle.

$(I_{cc,n}$ et K_I): Sont donnés par le fabricant.

a) Courant de saturation (I_0)

Pour avoir l'expression du courant de saturation de référence ($I_{0,n}$), on remplace par les conditions du point du circuit ouvert ($V_{oc,n}, 0$) dans l'équation suivante :

$$I_{0,n} = \frac{I_{ph,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{aV_{T,n}}\right) - 1}$$

$I_{0,n}$ [A]: Courant de saturation aux conditions standards ;

$V_{oc,n}$ [V]: Tension du circuit ouvert aux conditions standards ;

$V_{T,n} = \frac{n_s k T_n}{q}$: Potentiel thermique aux conditions standards.

Dans les conditions de fonctionnement, le courant de saturation est donné par :

$$I_0 = I_{0,n} * \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

E_g [eV]: Énergie de gap du semi-conducteur ($E_g=1.12$ eV pour le silicium)

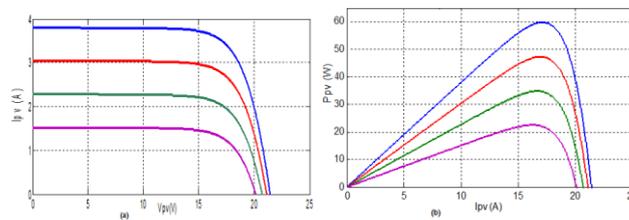


Figure 7.profil de l'intensité en fonction de la tension et la puissance en fonction de l'intensité

Pour étudier l'influence de l'éclairement (G) et la température (T_c) sur les caractéristiques du panneau on fait varier l'un et on fixe l'autre à sa valeur de référence, les résultats de simulation sont représentés dans les figures 7 et 8

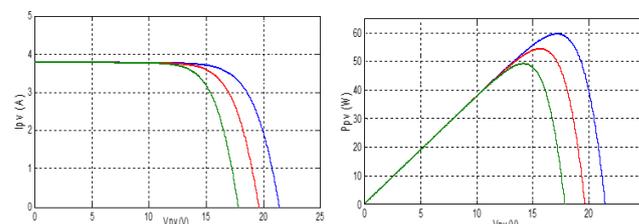


Figure 8.caractéristique de la puissance de panneau PV et le courant en fonction de l'intensité.

D'après les résultats de simulation, nous remarquons que le courant de court-circuit est fortement lié à l'irradiation solaire, il est directement proportionnel avec ce facteur. Contrairement à I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{oc} est légèrement affectée par la variation de l'irradiation, elle augmente un peu avec l'augmentation de cette dernière, [5]on peut conclure donc que la puissance maximale du panneau est fortement liée à l'irradiation solaire.

Pour la température nous constatons que le courant de court-circuit est peu sensible aux variations de cette dernière. Nous remarquons aussi que la tension à vide est inversement proportionnelle avec la température ce qui engendre une petite diminution de la puissance.

Simulation du générateur photovoltaïque

Dans notre travail, nous avons utilisé un générateur photovoltaïque constitué de 12 panneaux en série et 5 panneaux en parallèle afin de produire la puissance dimensionnée du générateur qui est de 3.5 KWatt. Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 9 :

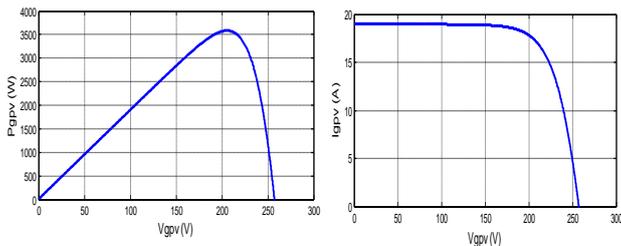


Figure 9. Caractéristiques P-V et I-V du générateur photovoltaïque étudié.

B. Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :
 La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) [6]

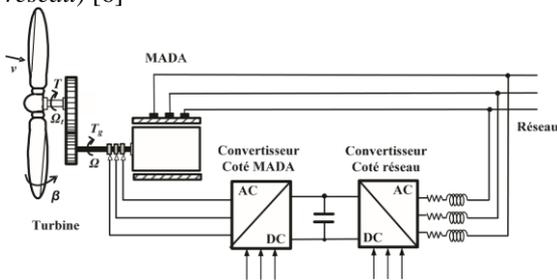
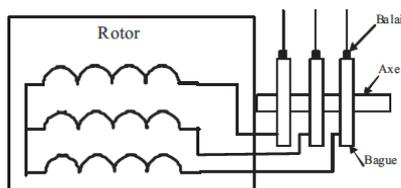


Figure 10. schéma de l'éolienne MADA

Elle possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone. La différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile [7], ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques.



Structure du rotor de la MADA.

Figure 11. structure du rotor de la MADA

Lors du fonctionnement de la MADA en moteur, la puissance Ps est fournie par le réseau [8].

Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle de la génératrice Jg et l'inertie de la turbine Jt, ramenée au rotor de la génératrice.

$$J = J_g + J_t G^2$$

L'évolution de la vitesse mécanique dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice Tmec qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice Tem, d'un couple de frottement visqueux Tvis et d'un couple du multiplicateur de vitesse Tg.

$$T_{mec} J \frac{d\omega}{dt}$$

$$T_{mec} = T_g T_{em} - T_{vis}$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f

$$T_{vis} = f \omega$$

nous aurons :

$$T_g T_{em} J \frac{d\omega}{dt} - f \omega = T_{mec}$$

A partir des équations précédentes la REM et le schéma bloc de l'arbre mécanique sont représentés comme suit :

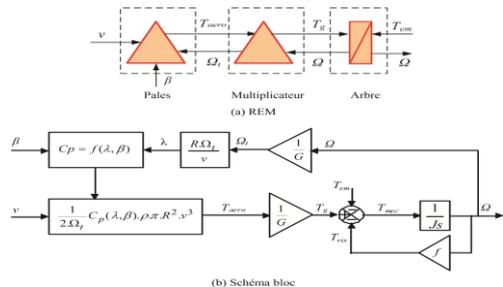


(a) REM

(b) Schéma bloc

Fig. 11. REM et schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique

La REM et le schéma bloc représentant le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine (Fig. 12), sont obtenus en regroupant les composantes respectives développées précédemment (Fig. 9, 10 et 11)



(b) Schéma bloc

Fig 12. la chaîne cinématique de la turbine.

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique Taero à partir de la puissance cinétique Pv du vent et par action de l'angle d'orientation des pales.

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice : résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur Tg auquel s'oppose le couple électromagnétique Tem. Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice. [9]

Simulation du modèle de la turbine: Dans la simulation numérique de la partie mécanique du système éolien on a utilisé

les modèles mathématiques. L'ensemble des modèles de la turbine, multiplicateur de vitesse et arbre mécanique ont été simulés en conservant l'architecture réelle. La vitesse du vent v , l'angle d'orientation des pales et le couple électromagnétique T_{em} fournis par la MADA constituent les entrées du système tandis que le couple de sortie du multiplicateur T_g et la vitesse mécanique ω sont les sorties.

L'angle d'orientation des pales est fixé à une valeur constante (égale à 2). Le couple électromagnétique de la MADA correspond à un point de fonctionnement optimal quant à la puissance générée (Maximum Power Point Tracking MPPT).

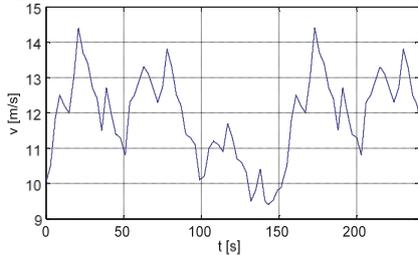


Fig.13. Profil du vent appliqué à la turbine pendant 250 secondes.

La figure 13, représente le profil du vent, figure 14 (a) et (b) montrent les vitesses de la turbine et la vitesse mécanique de l'arbre, on remarque que pendant 250s, le système éolien passe par deux de fonctionnement hypo et hyper synchrone.

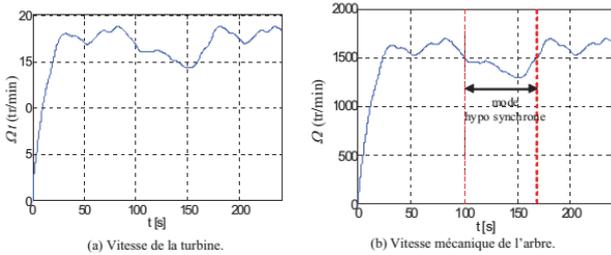


Figure 14.(a) vitesse de la turbine , (b) vitesse de l'arbre

Les figures 15 (a) et (b) présentent respectivement la variation du rapport de vitesse et le coefficient de puissance C_p en fonction du temps. On vérifie, que les valeurs de coefficient de puissance n'atteignent pas la valeur théorique maximale donnée par Betz (0,59). La puissance aérodynamique disponible au niveau de la turbine P_{aero} et le couple aérodynamique T_{aero} sont illustrés respectivement dans les figures 16.c et 16.d. Les figures 16.e et 16.f montrent respectivement le couple issu du multiplicateur et le couple appliqué par la MADA qui agissent directement sur l'arbre.

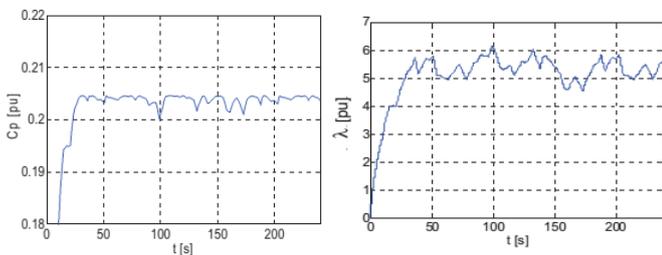


Figure 15 (a) coefficient de puissance (b) rapport de vitesse de vent.

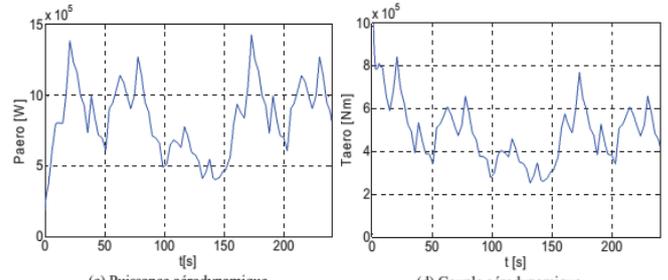


Figure 16 (c) coefficient de puissance (d) rapport de vitesse de vent.

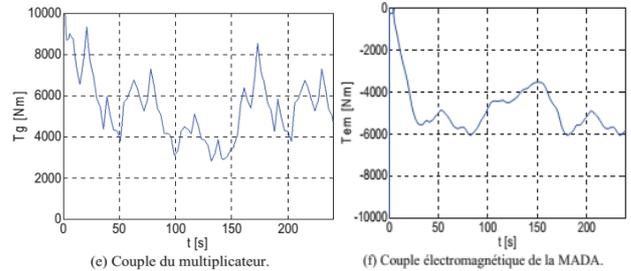


Figure 17 (e) couple de multiplicateur (f) couple électromagnétique de MADA.

C. Système de stockage :

Pour un bon fonctionnement du système d'énergie hybride, le système de stockage joue un rôle crucial, il permet d'avoir une continuité de service et une meilleure qualité d'énergie fournie. Nous rappelons quelques paramètres électriques employés pour caractériser une batterie, ces derniers sont:

- ❖ **La capacité nominale (Q) :** C'est le nombre maximal d'ampères-heures (Ah) qui peut être extrait de la batterie, pour des conditions de décharge données.
- ❖ **L'état de charge « SOC » (State of charge) :** C'est le rapport entre la capacité présente « q » et la capacité nominale « Q » : $SOC = \frac{q}{Q}$ ($0 \leq SOC \leq 1$). Si $SOC = 1$ la batterie est totalement chargée et si $SOC = 0$ la batterie est totalement déchargée.
- ❖ **Le régime de charge (ou décharge) :** C'est le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée). Il est exprimé en heures.
- ❖ **La durée de vie :** C'est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale. [9]

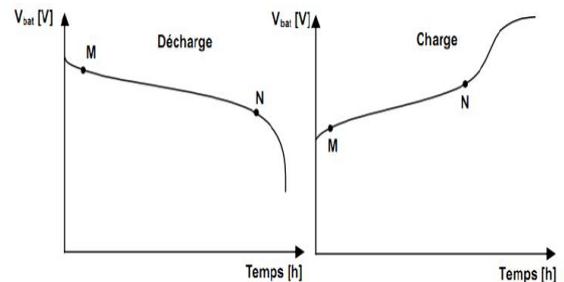


Figure 18. Évolution de la tension V_{batt} , durant la charge et la décharge.

La courbe de décharge (Q-V) est donnée par la figure 19.

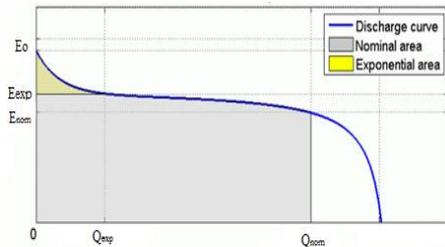


Figure 19. Courbe de décharge (Q-V) de la batterie [11].

En analysant la figure ci-dessus, on peut constater la présence de trois points spécifiques sur la caractéristique (Q-V) : ces trois points sont : la tension de la pleine charge (E_0), la tension correspondante à la fin de la zone exponentielle (E_{exp}) et la tension correspondante à la fin de la zone nominale (E_{Nom}).

Les équations de charge et de décharge sont données comme suit :

$$\text{Décharge : } E_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - i_t} (i_t + i^*) + Exp(t)$$

$$\text{Charge : } E_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{i_t - 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + Exp(t)$$

$$Exp(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot sel(t))$$

La figure 20, montre la caractéristique de décharge de la batterie utilisée et l'évolution de la tension de cette dernière pour différents courants de décharge.

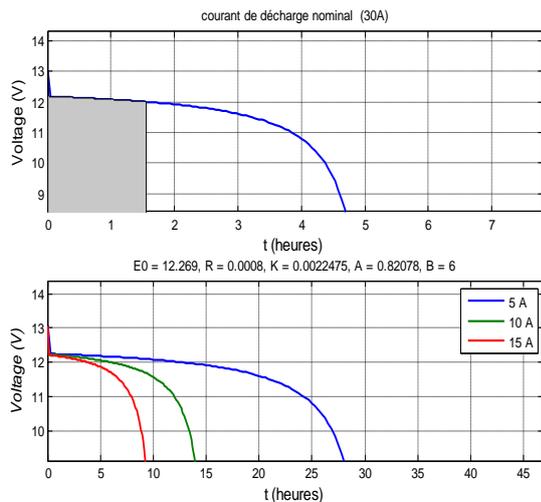


Figure 20. Caractéristique de décharge et tension de la batterie pour différents courants de décharge.

Nous remarquons que plus le courant de décharge est important, plus la batterie se décharge plus rapidement.

D.Modélisation du hacheur buck-boost réversible en courant

Le hacheur buck-boost est utilisé pour le système de stockage par batteries. Il est considéré comme un étage d'adaptation, et il permet de réaliser les opérations de charge et de décharge vu sa réversibilité en courant. Ainsi, il est élévateur de tension pour la décharge, et abaisseur de tension pour la charge. [10]

Le modèle du hacheur buck-boost associé aux batteries est représenté sur la figure 21.

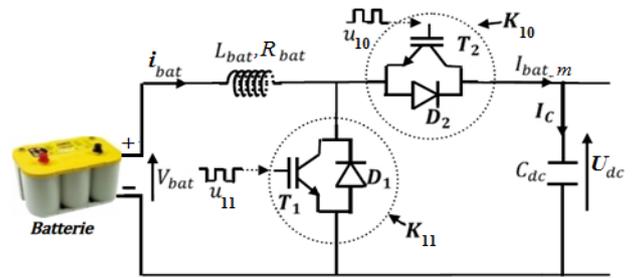


Figure 21. Hacheur réversible en courant associé aux batteries

Les deux interrupteurs « K_{11} » et « K_{10} » forment une cellule de commutation. Leur fonctionnement sera donc complémentaire [12]. Si on associe deux fonctions de connexion u_{11} et u_{10} représentant respectivement l'état de conduction des interrupteurs « K_{11} » et « K_{10} », on obtient :

$$\{u_{11} = 1 - u_{10}$$

Selon l'état des deux interrupteurs « K_{11} » et « K_{10} », deux configurations sont possibles (figure 22):

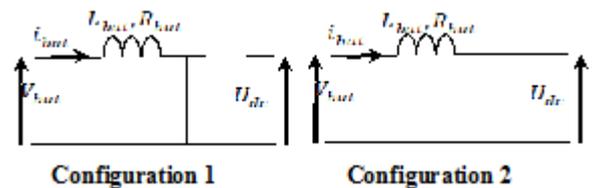


Figure 22. Les deux configurations du convertisseur buck-boost réversible en courant.

Configuration 1 : K_{11} fermé et K_{10} ouvert

$$L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + R_{bat} i_{bat} = V_{bat}$$

Configuration 2 : K_{11} ouvert et K_{10} fermé

$$L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + R_{bat} i_{bat} = V_{bat} - U_{dc}$$

En analysant ces deux configurations, on peut conclure que les relations entre les grandeurs d'entrée (V_{bat}, I_{bat}) et celles de sortie ($U_{dc}, I_{bat,m}$) du convertisseur sont données par le système d'équations ci-dessous

$$\begin{cases} L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + R_{bat} i_{bat} = V_{bat} - U_{dc}(1 - u_{11}) \\ I_{bat,m} = I_{bat}(1 - u_{11}) \end{cases}$$

Simulation du système de stockage

L'insertion du stockage dans le système hybride a été simulée dans les deux modes de fonctionnement (isolé et parallèle) et sous différentes contraintes telles que les variations de la charge et de l'éclairage. Dans cette section, le générateur photovoltaïque est commandé de sorte à produire le maximum de puissance, la tension du bus continu est régulée à une valeur de référence de 700V et la capacité du bus continu (C_{dc}) est supposée initialement chargée à 700V.

Pour tester les performances du système de stockage, nous avons procédé à la variation de l'éclairage afin de varier I_{pv} , et au changement du mode de fonctionnement (isolé à

parallèle) pour montrer le comportement du système de stockage pendant les deux phases [11] (charge et de décharge).

Les résultats de simulations sont présentés sur les figures ci-dessous :

Paramètres de simulation : $P_{ch}=1500W$. $C_{dc}=4.7$ mF.
 $P_{GPV}=1000W$. $P_{stock}=2400W$.

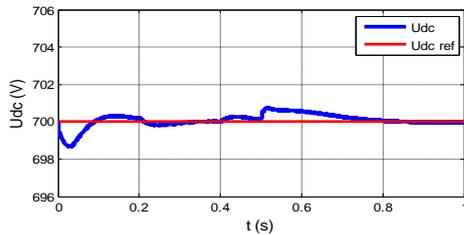


Figure 23. Régulation de la tension du bus continu

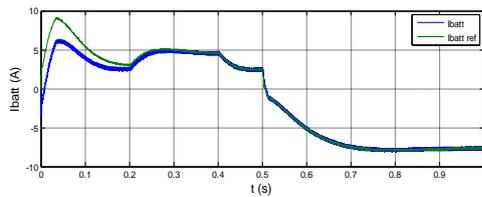


Figure 24. Régulation du courant des batteries

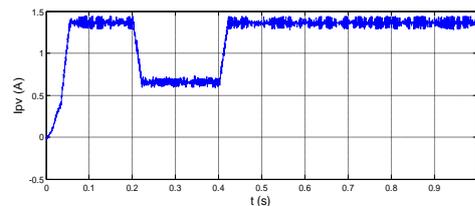


Figure 25. Évolution du courant Ipv

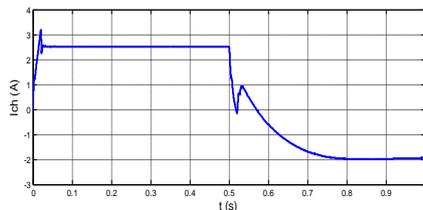


Figure 26. Évolution du courant de charge coté bus continu

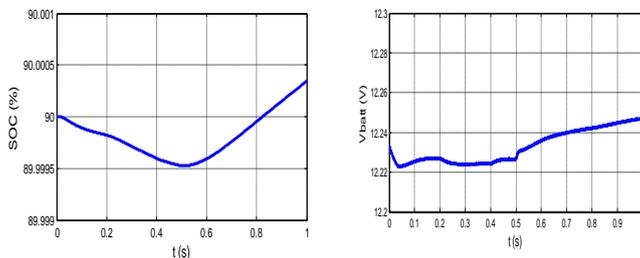


Figure 27.Évolution de l'état de charge et la tension d'une batterie de stockage.

La figure 27 montre l'évolution de la tension du bus continu, nous remarquons que cette dernière est régulée à sa valeur de référence.

En se référant à la figure 24, nous constatons que le courant des batteries suit bien le courant de référence avec une très bonne dynamique.

À partir des figures (24, 25, 26), nous remarquons ce qui suit :

Du 0s à 0.2s : le mode de fonctionnement du système est le mode isolé, le système de stockage se retrouve dans la phase de décharge ($I_{batt} > 0$) et la puissance demandée par la charge est assurée par les batteries de stockage et le générateur PV, en effet :

$$i_{dc} = I_{pv,m} + I_{bat,m} - I_{ch,m}$$

Conclusion: le but de ce travail est l'intégration des énergies renouvelables dans la production d'électricité mondiale, la modélisation de la chaîne photovoltaïque avec tous ces composants, est effectuée en appliquant les principaux algorithmes de maximisation de puissance MPPT, en particulier la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

Nous avons développé le modèle mathématique de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA avec l'étude de la partie mécanique de la chaîne éolienne.

Nous avons intégré un système de stockage hybride batteries–super condensateurs, dont la modélisation et l'asservissement était détaillée avec son hacheur buck-boost Une description détaillée de la commande fera l'objet d'autres travaux,

Références :

- [1]B. Multon, " Production d'énergie électrique par sources renouvelables ", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 4 005.
- [2] M. Amin, "Efficiency and Power Density Improvement of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems utilizing High Frequency-Based Power Converters", Doctorat, Université Internationale de Florida, 2012.
- [3] I. Vichiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelable dans un réseau autonome", Mémoire de Doctorat, Université du Havre, Décembre, 2005.
- [4] S. Astie, "Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule ", Techniques de l'Ingénieur, D 3 936.
- [5]W. Omran, "Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems", Thèse de Doctorat, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [6]F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices Asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne", Doctorat, université de Nantes, 2003.
- [7]B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 3 960.
- [8]J. M. Noël, "Énergie éolienne pour la fourniture d'électricité", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique BE 8 585.
- [9] S. Elaimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, 2004. T.
- [10] Scimone, " Energy Storage in Electric Power Generation Plant from Renewable Sources ", Université Degli Studi di Catania, Italie, 2010.
- [11]P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, et M. L. Crow, "Energy Storage Systems for Advanced Power Application", Proceedings Of The IEEE, VOL. 89, NO. 12, December 2001.
- [12]J. De Dinechin , "Le stockage énergétique", Cours A5-2 Energies Renouvelables. ENSTA, 2007.

