

Identification des paramètres d'un modèle de batterie lithium-ion pour une source hybride de véhicule électrique

GHOULAM Yasser¹, MESBAHI Tedjani¹, DURAND Sylvain¹, LALLEMENT Christophe²,
BARTHOLOMEUS Patrick³

¹ICube (UMR CNRS 7357), INSA Strasbourg, France

²ICube (UMR CNRS 7357), Université de Strasbourg, France

³Univ. Lille, Centrale Lille, Arts et Metiers ParisTech, HEI, HeSam, EA 2697 L2EP - Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, Lille, France

RESUME – Le système de stockage d'énergie possède un rôle crucial dans les applications des véhicules électriques et hybrides. Les sources d'énergie hybrides combinent deux ou plusieurs sources d'énergie ayant des caractéristiques différentes. Dans la source hybride, la source primaire agit comme une source d'alimentation principale, tandis que la source secondaire sert de tampon en puissance pour les demandes rapides. Cet article présente la modélisation de la batterie Lithium-ion, ainsi que l'identification des paramètres en utilisant plusieurs algorithmes proposés par la toolbox « Optimisation » de Matlab. Les résultats obtenus montrent la bonne performance du modèle dynamique développé par rapport aux résultats expérimentaux issus du banc d'essai du laboratoire.

Keywords—véhicule électrique hybride, source de stockage hybride, batterie lithium-ion, algorithme d'optimisation, identification.

1. INTRODUCTION

A l'ère du développement durable et de la recherche en faveur de la transition énergétique, de nouveaux challenges émergent. L'électrification des véhicules en fait partie. En effet, à l'heure actuelle, l'industrie du transport est l'une des plus polluantes au monde, et l'arrivée des véhicules électriques ouvre des perspectives en faveur de la réduction des gaz à effet de serre. Dans ce contexte, le domaine d'application des véhicules électriques est assez particulier puisqu'il nécessite à la fois un haut degré d'énergie et une forte demande de puissance. Pour les véhicules électriques, la batterie est la clé dans l'ensemble du système de stockage, et la source d'énergie principale dont il faut optimiser la consommation, gérer

l'utilisation et augmenter la durée de vie. Parmi les idées proposées dans la littérature afin de remédier à ce problème, est d'utiliser une batterie lithium-ion haute énergie couplée à des supercondensateurs servant de tampons afin de limiter le stress de la batterie [1].

Ces dernières années, les batteries Li-ion sont largement utilisées dans diverses applications, telles que les applications électriques et hybrides. Leur puissance spécifique et leur densité énergétique plus élevées, leur durée de vie élevée et leur coût décroissant en font une technologie de stockage de l'énergie attrayante et alternative aux batteries au plomb ou au nickel-hydrure métallique dans les alimentations électriques intégrées [2] [3].

Dans le présent travail, la modélisation électrique d'une pile au lithium-ion pour une application de véhicule électrique est réalisée. Un modèle de circuit dynamique équivalent a été utilisé pour simuler plusieurs processus électrochimiques se produisant dans des cellules de batterie Li-ion de 4.5 Ah et de 20 Ah utilisées pour les données expérimentales de cette étude [4] [5].

La littérature offre un large choix de modèles de batteries, en particulier les modèles de circuits électriques équivalents qui feront l'objet de notre étude [6] [7]. Par la suite, une méthode d'identification de ses paramètres est détaillée dans le but de valider le comportement de la batterie.

2. TOPOLOGIE DE LA SOURCE HYBRIDE ÉTUDIÉE

La Fig. 1 présente la topologie de la source électrique hybride (SEH) proposée. C'est une topologie parallèle avec un seul convertisseur du côté du supercondensateur [6]. Dans ce papier on s'intéressera seulement au modèle de la batterie, à l'identification des paramètres et à la

validation expérimentale en utilisant différents jeux de données de charge/décharge de la batterie suivant différents courants d'entrée.

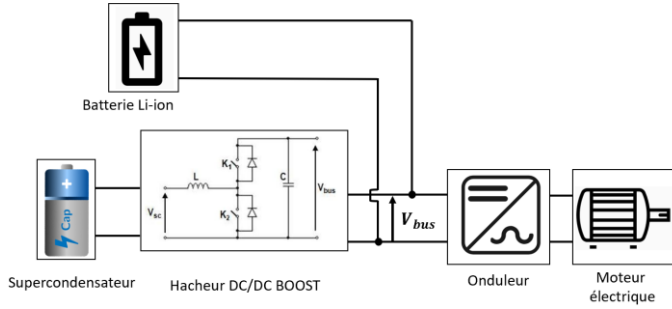


Fig. 1. Topologie de la SEH étudiée

Dans cette étude, on ne s'intéressera qu'à la modélisation du comportement de la batterie li-ion à l'aide d'un circuit électrique équivalent. La modélisation des autres éléments a été faite dans un précédent article.

Ces modèles ont la capacité de prédire avec précision les performances de la batterie. Cependant, ces modèles ne sont pas coûteux en termes de calcul et ne nécessitent des expérimentations approfondies pour en déterminer les paramètres.

Ces modèles de circuits équivalents offrent une simplicité et leur capacité à prédire les caractéristiques de courant-tension les rendent adaptés à la modélisation dynamique des véhicules électriques [8].

3. MODÈLE DE LA BATTERIE LI-ION

Pour les méthodes d'estimation basées sur des modèles les plus populaires, les modèles de circuits équivalents, qui permettent d'obtenir une grande précision d'estimation de l'état de charge de la batterie (SOC) ainsi que sa tension instantanée (V_{bat}), et sa tension à circuit ouvert (V_{oc}) avec un nombre relativement faible de paramètres.

La modélisation des piles au lithium présente un intérêt général et actuel. Certains chercheurs ont publié des modèles théoriques qui représentent par des équations différentielles les principaux phénomènes se produisant à l'intérieur de la batterie [9].

Ce type de modèles est utile pour étudier les paramètres ayant la plus grande influence sur le comportement des batteries et pour améliorer la technologie des batteries. Cependant, comme le prouve une étude comparative [9], les modèles théoriques sont plus complexes sur le plan mathématique, les variables sont plus difficiles à ajuster aux données mesurées et leur précision est similaire à celle des modèles de circuits équivalents lorsqu'il s'agit de modéliser le comportement réel d'une batterie commerciale. Les modèles de circuits équivalents représentent la performance de la batterie au moyen d'un circuit électrique. Contrairement aux modèles théoriques, les modèles de circuits équivalents utilisent fréquemment

un ajustement polynomial ou une table de correspondance afin de représenter la relation entre la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et l'état de charge de la batterie (SOC).

Les circuits RC sont la représentation la plus typique des caractéristiques de charge et de décharge des batteries. Certains auteurs proposent un circuit RC de premier ordre, d'autres études publient un réseau de deuxième ordre ou même des circuits RC de troisième ordre.

Dans cet article, nous proposons un modèle de batterie au lithium-ion et une validation expérimentale consistant en plusieurs expériences réalisées avec une batterie commerciale, mesurant ainsi tous les phénomènes se produisant à l'intérieur de la batterie.

Un modèle simple pourrait décrire la caractéristique dynamique de la batterie [4], dans laquelle la tension de circuit ouvert (V_{oc}) est considérée comme la fonction du SOC de la batterie.

Afin d'améliorer la précision de l'estimation du SOC, certains modèles plus performants existent dans la littérature : le modèle RC du premier ordre [10][11], et le modèle RC du second ordre [12] [13], sont présentés.

Les modèles présents dans la littérature visent à modéliser le comportement de la batterie avec une grande fiabilité et/ou représenter des phénomènes dynamiques à l'intérieur de la batterie comme le phénomène de diffusion, la résistance électrolytique et le transfert de charge [7]. Le modèle retenu est basé sur des circuits R-C comme présenté dans la Fig. 2.

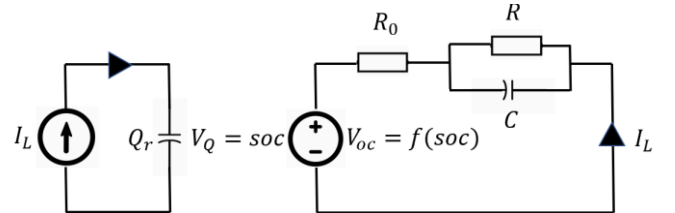


Fig. 2. Circuit électrique équivalent de la batterie

Sur ce modèle la résistance R représente la résistance de diffusion, et la capacité C est représentative des phénomènes diffusifs à l'intérieur de la batterie [14]. Le modèle d'état obtenu est un deuxième ordre présenté par l'équation (1).

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{SOC} \\ \dot{V}_{RC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/RC \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SOC \\ V_{RC} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1/Q_R \\ 1/C \end{pmatrix} I_L \\ V_T = (b_1 \quad 1) \begin{pmatrix} SOC \\ V_{RC} \end{pmatrix} + R_0 I_L + b_0 \end{cases} \quad (1)$$

La validation du modèle est effectuée en confrontant la tension issue du modèle d'état à celle provenant des données réelles de la batterie (cycles de charge/décharge).

Dans ces équations :

- SOC fait référence à l'état de charge de la batterie (%).

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q_R} \int_0^t I_L(t).dt \quad (2)$$

- V_{RC} : Tension du circuit RC (V). Nommée aussi tension de polarisation en se référant à la tension aux bornes du condensateur C .
- V_T : Tension totale de la batterie (V).
- I_L : Courant total de la batterie (A). Il représente le courant circulant dans la batterie, avec une valeur négative $I_L < 0$ lorsque la batterie est en charge, et une valeur positive $I_L > 0$ lorsque la batterie est en décharge.
- V_{OC} : Tension à circuit ouvert (ou à vide) de la batterie (V).
- V_{OC} : Tension à circuit ouvert dépendant linéairement du SOC (V).

$$V_{oc} = b_0 + b_1 SOC \quad (3)$$

- b_0 est un offset qui indique la valeur initiale de la tension V_{oc} (V).
- b_1 est un coefficient de proportionnalité reliant le V_{oc} au SOC . Ce paramètre est utilisé pour le bon "fitting" avec les données expérimentales.
- Q_R : la capacité actuelle (résiduelle) de la batterie en Ampère-Heures (Ah).

4. IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES

L'identification des paramètres du modèle est faite par le biais de la minimisation de l'erreur (relative+absolue) en utilisant la toolbox « Optimisation » de Matlab. Plusieurs méthodes d'optimisation ont été comparées pour avoir un résultat optimal [14].

Pour bien choisir les algorithmes à utiliser pour l'identification, les courbes de convergence sont comparées. Plusieurs bons résultats ont été obtenus en utilisant des méthodes hybrides (le meilleur est de type « Genetic Algorithm » couplé avec le « Fmincon ») ou en utilisant seulement des algorithmes seuls de types « Fmincon », « Pattern Search » ou « Fminsearch ». Le motif du choix du meilleur algorithme repose sur la comparaison de la vitesse de convergence (qui doit être rapide), le nombre d'itérations et la fonction « objectif » de telle sorte qu'elle atteigne l'objectif. Dans notre cas d'étude, la fonction « objectif » qu'il faut minimiser, est la somme de l'erreur relative et l'erreur absolue.

On commence l'identification avec l'algorithme « Genetic Algorithm ». Le vecteur obtenu est utilisé comme valeur initiale injectée dans le deuxième algorithme « Fmincon » par la suite. Cette approche

nommée hybride permet d'avoir de bons résultats, mentionnés dans le Tableau 1 ci-dessous.

Paramètre	$R_0(\Omega)$	$C_1(F)$	$R_1(\Omega)$	$b_0(V)$	$b_1(V)$	$Q_r(Ah)$
Valeur estimée	0.0019	71.2434	6.49E-5	-3.135	-1.18E-8	-1.0305

Tableau 1. Paramètres identifiés suite à la méthode hybride

Le Tableau 2 ci-dessous, récapitule les différents algorithmes utilisés dans notre étude:

Algorithme d'optimisation	Appellation sur Matlab
Méthode de Nedler et Mead	Fminsearch
Méthode Séquentielle Quadratic Programming	Fmincon
Algorithme génétique	Genetic Algorithm
Pattern search	Pattern Search
Algorithme génétique + Méthode Séquentielle	Genetic Algorithm + Fmincon

Tableau 2: algorithmes d'optimisation utilisés pour l'identification

La courbe de convergence ci-dessous est relative à l'algorithme « Fmincon ». On pourra observer que le courbe converge après une dizaine d'itérations.

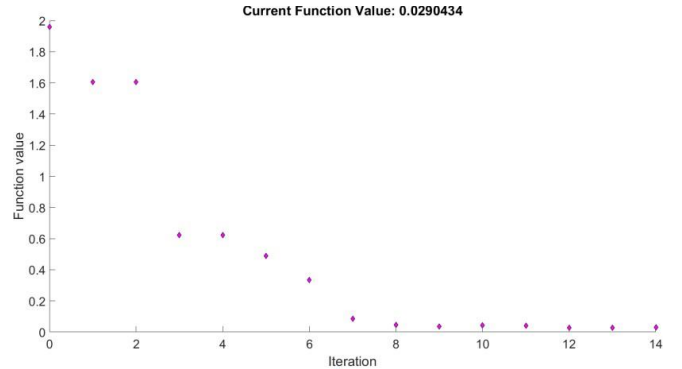


Fig. 3. Courbe de convergence "fmincon"

La courbe de convergence ci-dessous est relative à l'algorithme hybride « Genetic Algorithm » suivi par l'algorithme « Fmincon ». On pourra observer que le courbe converge après 3 itérations seulement.

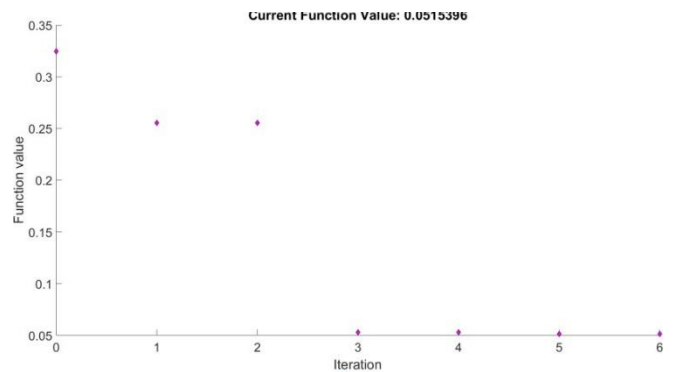


Fig. 4. Courbe de convergence de l'algorithme hybride

L'objectif ici est de confronter la tension de la batterie issue du modèle d'état à celle issue des données expérimentales et comparer l'erreur entre les deux courbes. En appliquant le courant d'entrée de la Fig. 5 et en utilisant les paramètres donnés dans le Tableau 1, on retrouve les résultats démontrés sur les Fig. 6 et Fig. 7.

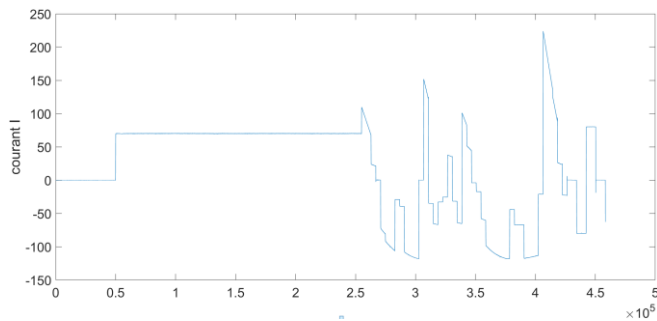


Fig. 5. Profil de courant d'entrée relatif au premier jeu de données

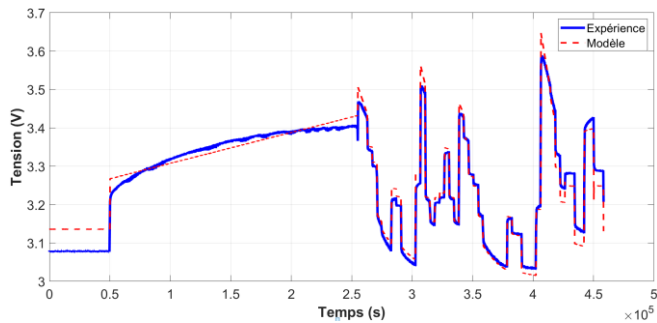


Fig. 6. Confrontation des tensions relatives au premier jeu de données

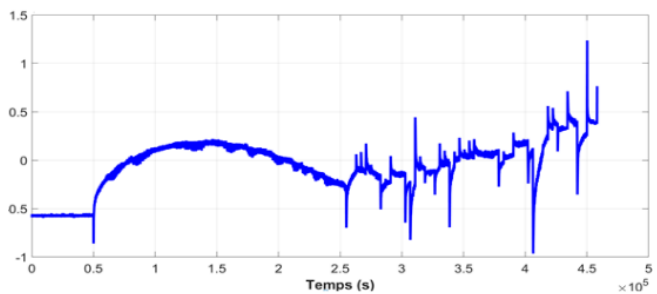


Fig. 7. Erreur relative entre les deux tensions de la batterie (en %)

Le vecteur obtenu sera utilisé par la suite pour valider un deuxième jeu de données différent que celui utilisé pour l'identification. Les résultats sont démontrés dans les Fig. 8 et Fig. 9. L'erreur relative aux deux tensions est présentée sur la Fig. 10.

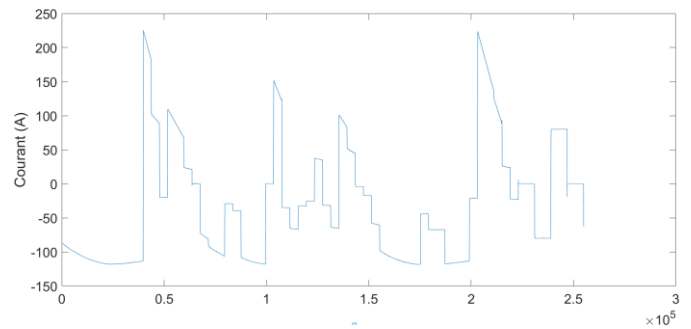


Fig. 8. Profil de courant d'entrée relatif au deuxième jeu de données

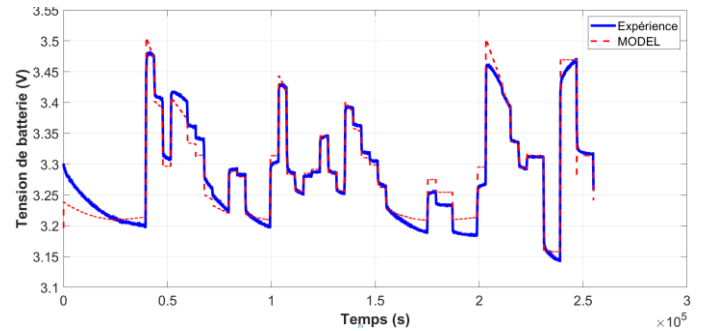


Fig. 9. Confrontation des tensions relatives au deuxième jeu de données

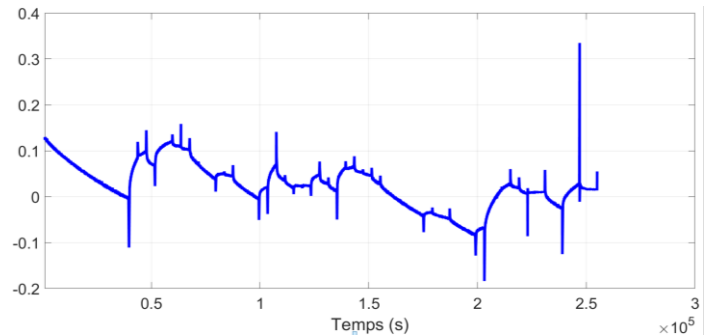


Fig. 10. Erreur relative entre les deux tensions (en %)

5. CONCLUSION

Dans cet article, le modèle basé sur le circuit équivalent non linéaire est développé pour une batterie li-ion. Ce modèle dynamique est composé d'un OCV, d'une résistance série et d'une impédance complexe. Ses paramètres ont été améliorés en tenant compte de l'influence du SOC et du signe du courant chargé. Toutefois, en raison de la grande complexité et de la non-linéarité des processus se produisant à l'intérieur de la batterie, plusieurs algorithmes d'optimisation ont été utilisés afin d'obtenir les paramètres optimaux du modèle de batterie. Cette approche de modélisation nous a permis de reproduire le comportement réel de la batterie en comparant plusieurs méthodes. Les futurs travaux seront axés sur le développement des modèles des autres éléments de la source hybride et par la suite le développement d'une gestion avancée de l'énergie. Cela nous permettra de démontrer clairement les avantages de notre approche de modélisation.

6. RÉFÉRENCES

- [1] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications Issues and Recommendations," *IEEE Access*. 2018.
- [2] M. B. Camara, H. Gualous, F. Gustin, and A. Berthon, "Design and New Control of DC / DC Converters to Share Energy Between Supercapacitors and Batteries in Hybrid Vehicles," vol. 57, no. 5, pp. 2721–2735, 2008.
- [3] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholoméüs, R. Sadoun, F. Khenfri, and P. Le Moigne, "Dynamic model of li-ion batteries incorporating electrothermal and ageing aspects for electric vehicle applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 2, pp. 1298–1305, 2018.
- [4] N. Rizoug, T. Mesbahi, R. Sadoun, P. Bartholoméüs, and P. Le Moigne, "Development of new improved energy management strategies for electric vehicle battery/supercapacitor hybrid energy storage system," *Energy Effic.*, vol. 11, no. 4, pp. 823–843, 2018.
- [5] G. Yasser, P. Theophile, M. Tedjani, and D. Sylvain, "Modeling, Identification and Simulation of Hybrid Battery/Supercapacitor Storage System Used in Vehicular Applications," *ICEVT 2019 - Proceeding 6th Int. Conf. Electr. Veh. Technol. 2019*, pp. 156–162, 2019.
- [6] T. Mesbahi, "Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique," Centrale Lille, 2017.
- [7] B. Hredzak, V. G. Agelidis, and M. Jang, "A model predictive control system for a hybrid battery-ultracapacitor power source," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1469–1479, 2014.
- [8] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, K. Chaaban, P. Bartholoméüs, and P. Le Moigne, "Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid Particle Swarm-Nelder-Mead (PSO-NM) optimization algorithm," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 131, pp. 195–204, 2016.
- [9] A. Berrueta, V. Irigaray, P. Sanchis, and A. Ursua, "Lithium-ion battery model and experimental validation," *2015 17th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE-ECCE Eur. 2015*, 2015.
- [10] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
- [11] X. Guo, L. Kang, Y. Yao, Z. Huang, and W. Li, "Joint estimation of the electric vehicle power battery state of charge based on the least squares method and the Kalman filter algorithm," *Energies*, vol. 9, no. 2, pp. 1–16, 2016.
- [12] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs - Part 3. State and parameter estimation," *J. Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 277–292, 2004.
- [13] H. Al-sheikh, O. Bennouna, and G. Hoblos, "Modeling , Design and Fault Analysis of Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Electric Vehicles," *2014 IEEE 23rd Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 1689–1695, 2014.
- [14] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, P. Bartholome, and P. Le Moigne, "Combined Optimal Sizing and Control of Li-Ion Battery / Supercapacitor Embedded Power Supply Using Hybrid Particle Swarm – Nelder – Mead Algorithm," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 59–73, 2017.