

Nouvelle méthode d'équilibrage des états de santé des batteries lithium-ion d'un microgrid AC

Sidlawendé V. M. OUOBA, Azeddine HOUARI, Mohamed MACHMOUM, Anthony ROY, Jean-Christophe OLIVIER

Nantes Université, Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique, IREENA, UR 4642, F-44600 Saint Nazaire, France

RESUME - Dans les stratégies classiques comme le droop ou l'équilibrage de l'état de charge (SoC), l'état de santé (SoH) des unités de stockage d'énergie distribuées (DESU) n'est pas pris en compte. Cela entraîne des dégradations inégales pouvant augmenter la charge et le coût d'entretien des DESUs. Dans cette proposition, un nouveau contrôle distribué est proposé pour assurer un équilibrage du SoH des DESUs afin de réduire leur charge d'entretien et prolonger leur durée de vie, tout en restaurant les fréquences et tensions des Générateurs Distribués (DG) à leurs valeurs nominales. Le consensus moyen est modifié pour évaluer le niveau de participation de chaque DESU pour déterminer les références de puissance afin d'égaliser les SoHs des DESUs. Des simulations sous Matlab/Simulink sont réalisées pour vérifier l'efficacité de la méthode proposée, en comparaison avec une méthode d'égalisation du SoC issue de la littérature.

Mots-clés— Batterie, Control distribué, Consensus, Micro-réseau, Etat de santé, Etat de charge.

1. INTRODUCTION

L'intérêt pour l'intégration des unités de stockage d'énergie distribuées (DESUs) dans les réseaux électriques ne cesse de croître. Cet intérêt s'explique par les multiples avantages offerts par les DESUs. En effet, plusieurs projets intégrant des DESUs tels que le projet américain AURORA, financé par le département américain de l'énergie, le projet asiatique ACCESS, lancé par l'Autorité de Singapour ou les projets européens Grid4EU en France et récemment les 24MW/48MWh aux Pays-Bas ont vu le jour et démontrent l'efficacité des DESUs dans le fonctionnement des réseaux électriques. Par conséquent, l'incorporation des DESUs à des RESs devient une approche très intéressante pour améliorer le fonctionnement, la stabilité, la résilience et la qualité de l'énergie des micro-réseaux insulaires. Les batteries représentent la technologie de stockage d'énergie la plus utilisée dans les micro-réseaux (MG) grâce à leur durabilité et leur coût attractif [1]. Cependant, ces composants sont sujet au vieillissement et leur dégradation est très fortement liée à leur usage. Ainsi, le pilotage des batteries devient important pour prévenir leur dégradation rapide et réduire ainsi la charge de maintenance. Comme l'état de charge (SoC) des DESUs est un des paramètres affectant fortement leur dégradation, les méthodes d'égalisation du SoC sont habituellement appliquées dans les MGs composés de DESUs.

Dans [2] et [3], une stratégie de système multi-agent (MAS) est réalisée pour l'équilibrage du SoC des DESUs en ajustant la puissance de sortie des onduleurs des batteries en fonction leurs SoCs. Les tensions et les fréquences des générateurs distribués (DGs) sont rétablies à leurs valeurs nominales évitant ainsi des

déviations de fréquence lors d'impact de charge ou de connexion/déconnexion de DG. Bien que l'égalisation du SoC des batteries permette de minimiser le nombre de cycles qui provoquent un vieillissement précoce, elle ne prend pas en compte l'état de santé des batteries. Cela pourrait entraîner des dégradations inégales pouvant augmenter la charge d'entretien des batteries. Dans [4], un contrôle distribué d'équilibrage du SoH basé sur une commande du statisme P-f est utilisé. Dans ce contrôle, la puissance de sortie de l'onduleur du DESU est ajustée en fonction de l'état de santé (SoH) grâce à la profondeur de décharge (DoD : *Depth of discharge*). Cependant, des déviations de la fréquence des DGs apparaissent lors d'un impact de charge. Ce qui pourrait entraîner l'instabilité du MG ou la détérioration de la charge si ces déviations dépassent les valeurs limites de la Norme EN 50160 ($\pm 1\%$ de la valeur nominale pour la fréquence).

Dans cette proposition, un nouveau contrôle distribué est proposé pour assurer un équilibrage efficace des SoHs des DESUs dans les micro-réseaux insulaires AC. Cette stratégie utilise des références de puissance active qui sont envoyées au contrôle primaire pour réaliser l'égalisation des SoHs. Chaque DESU fournit de la puissance au MG en fonction de son niveau de participation qui est déterminé par un consensus de moyenne dynamique modifié. En outre, les références de puissance active sont choisies pour stabiliser la fréquence des DG à la fréquence nominale du MG. Ainsi, la fréquence du DG est instantanément restaurée à sa valeur nominale même en cas d'impact de charge ou de connexion/déconnexion de DG. Cette restauration de la fréquence se fait sans aucun contrôle supplémentaire dans la boucle de contrôle de la fréquence du DG. Seul le contrôle pour la restauration de la tension est réalisé. Les principales contributions de cet article sont les suivantes :

1. Une nouvelle technique d'équilibrage du SoH qui permet un partage efficace de la puissance active des DGs est proposée.
2. La correction des déviations de fréquence est automatiquement effectuée, contrairement à ce qui est fait dans [4].

Le reste de ce document est organisé comme suit : la Section 2 présente le système MG étudié. Le modèle de vieillissement des batteries est présenté dans la Section 3. La technique d'équilibrage du SoH des DESUs est développée dans la Section 4. Les résultats de simulations sont présentés dans la Section 5 et la Section 6 conclut ce travail.

2. SYSTEME ETUDIE

Le schéma général du système MG étudié dans cet article est présenté dans la Fig. 1. Ce système représente un micro-réseau

AC maillé, constitué d'une source d'énergie renouvelable (photovoltaïque et éolienne) avec son onduleur et de trois batteries avec leurs onduleurs alimentant 4 charges (2 charges à puissance constante (CPL) et 2 résistances). Les profils de puissance du DG4 et des CPLs pour 24 h, sont représentés dans la Fig. 1. Le micro-réseau fonctionne en mode autonome.

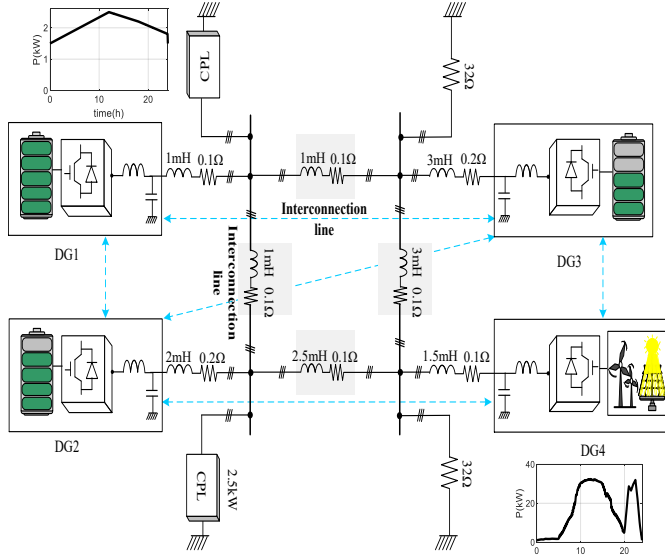


Fig. 1. Système MG étudié

3. MODELE DE DEGRADATION DES BATTERIES LI-ION

Le modèle de vieillissement des batteries utilisé dans cette étude est proposé par [5] et est donné par l'équation (1).

$$\dot{h}_{cell} = -(\beta_1 + \beta_2 \|I\| + \beta_3 V + \beta_4 \|I\|^2 + \beta_5 V^2 + \beta_6 \|I\|V + \beta_7 V^3) \quad (1)$$

Avec I : courant la cellule [A] ; V : tension aux bornes de la cellule [V] ; \dot{h}_{cell} dégradation de la cellule [$\text{Ah} \cdot \text{s}^{-1}$] ; β_1 - β_7 : paramètres obtenus après ajustement du modèle.

Ce modèle semi-empirique a été développé pour le contrôle des batteries Li-Ion et présente donc l'avantage d'être simple et adapté aux stratégies de gestion des DESUs. De plus, ce modèle permet d'estimer le vieillissement de la cellule de la batterie Li-Ion avec seulement sa tension et son courant comme données d'entrée et est de ce fait applicable à de nombreuses applications de contrôle en temps réel.

En considérant que la tension de la cellule est fixe et maintenue à sa tension nominale V_{cell} , sa puissance peut être définie comme suit :

$$P_{cell} = I * V_{cell} \quad (2)$$

Pour une batterie constituée de n_{cell} cellules montées en série, sa puissance est calculée de la façon suivante :

$$P = n_{cell} * P_{cell} \quad (3)$$

En combinant (1), (2) et (3), le modèle de santé d'une unité $DESU_i$ peut donc être exprimé de la manière suivante :

$$\dot{h}_i = n_{cell} * \dot{h}_{cell} \quad (4)$$

$$\dot{h}_i = a \|P_i\|^2 + b \|P_i\| + c \quad (5)$$

avec, P_i : Puissance du $DESU_i$ [W] ; V_{cell} : tension nominale de la cellule [V] ; \dot{h}_i : dégradation du $DESU_i$ [$\text{Ah} \cdot \text{s}^{-1}$] ; n_{cell} : nombre de cellule du $DESU_i$; $\beta_1 - \beta_7$: paramètres définis dans [5] ; a , b et c sont définis comme suit :

$$\begin{cases} a = -\frac{\beta_4}{n_{cell} V_{cell}^2} \\ b = -(\beta_6 + \frac{\beta_2}{V_{cell}}) \\ c = -n_{cell} (\beta_1 + \beta_3 V_{cell} + \beta_5 V_{cell}^2 + \beta_7 V_{cell}^3) \end{cases} \quad (6)$$

Ainsi, la dégradation du $DESU_i$ pour une durée τ [s], est exprimée par la formule suivante :

$$h_i = \int_0^\tau \dot{h}_i(\tau) d\tau \quad (7)$$

h_i : capacité perdue [Ah] pendant le temps de fonctionnement τ . L'état de santé SoH_i du $DESU_i$ en (%) est estimé par :

$$SoH_i = SoH_{i_init} - \frac{100 * h_i}{C_{ibatt}} \quad (8)$$

avec SoH_{i_init} : SoH initial du $DESU_i$ (en %) ; C_{ibatt} : capacité initiale de la batterie [Ah].

4. METHODE D'EQUILIBRAGE DES SOHS DES BATTERIES

4.1. Théorie des graphes

Le réseau de communication peut être exprimé par un graphe $G=(V, E)$, avec $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$, l'ensemble des N nœuds ou N agents et $E \subseteq V \times V$, l'ensemble des arcs. Les éléments de E sont notés (v_i, v_j) et représentent les arcs du nœud v_i au nœud v_j et sont représentés par des flèches à sens unique ou double selon le flux de données entre les deux agents (unidirectionnel ou bidirectionnel) comme représenté sur la Fig. 2. Chaque arc (v_i, v_j) est associé à un poids $a_{ij} > 0$ si v_i reçoit des informations de v_j sinon $a_{ij} = 0$. La matrice d'adjacence est définie comme suit : $A=[a_{ij}]$; La matrice diagonale est décrite comme suit : $D=\text{diag}\{d_i\}$, $d_i=\sum_{j=1}^N a_{ij}$ et la matrice Laplacienne du graphe est déterminé comme suit : $L=D-A$.

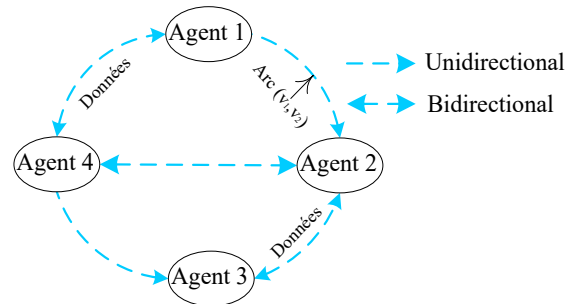


Fig. 2. Graphe avec 04 agents.

Le protocole dynamique global du consensus est décrit comme suit :

$$\dot{X} = K(-LX + B(X_0 - X)) \quad (9)$$

où $X = [x_1, \dots, x_N]^t$ et représente l'état x_i de l'agent i ; $X_0 = [x_0, \dots, x_0]^t$ et x_0 est la valeur de consensus ; $B = \text{diag}\{b_i\}$ avec $b_i > 0$ si l'agent i possède des données sur la valeur de consensus, sinon $b_i = 0$.

Pour le système étudié défini dans la Fig. 1, la matrice d'adjacence A , Laplacienne L et diagonale B entre les trois DESUs sont définies respectivement comme :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

4.2. Méthode d'équilibrage des SoHs des DESUs

Conventionnellement, le contrôle droop est utilisée pour le partage de la puissance dans les systèmes multi-sources. Ce contrôle amène tous les DGs à fournir des puissances au réseau en fonction de leurs puissances nominales. Les équations du contrôle droop sont représentées comme suit :

$$\omega_i = \omega_n - m_i(P_i - P_{in}) \quad (10)$$

$$V_i = V_n - n_i(Q_i - Q_{in}) \quad (11)$$

Avec $\omega_n, V_n, m_i = \frac{\Delta\omega}{P_{in}}, n_i = \frac{\Delta V}{Q_{in}}, P_i, Q_i, P_{in}, Q_{in}$ sont respectivement la fréquence nominale, la tension nominale, le coefficient droop de la fréquence, le coefficient droop de la tension, la puissance active du DG_i , la puissance réactive DG_i , la puissance active nominale DG_i et la puissance réactive nominale DG_i . $\Delta\omega$ et ΔV , écart maximal de la fréquence et de la tension respectivement.

Le contrôle droop n'est pas adapté à un système MG possédant plusieurs DESUs car il entraîne des dégradations inégales entre les DESUs compliquant la maintenance.

Le principe de la stratégie d'équilibrage des SoHs est de s'assurer que le DESU avec le SoH le plus élevé (respectivement le plus bas) fournisse ou reçoive plus (respectivement moins) de puissance en mode de décharge ou de charge, en ajustant la fréquence du DG. L'équation globale de la méthode proposée est la suivante.

$$\omega_i = \omega_n - m_i(P_i - P_{iSoH}) \quad (12)$$

$$P_{iSoH} = K_{iSoH} P_{it} \quad (13)$$

$$K_{iSoH} = \frac{SoH_{im}}{SoH_{imt}} \quad (14)$$

avec P_{it} : puissance active totale des DGs et K_{iSoH} : niveau de participation du $DESU_i$. SoH_{im} et SoH_{imt} représentent respectivement le SoH_i modifié du $DESU_i$, le SoH_i total modifié de tous les DESUs, définis par l'équation (14) et (15).

$$SoH_{im} = SoH_i^{k_s} \quad (15)$$

$$SoH_{imt} = \sum_{i=1}^N SoH_{im} \quad (16)$$

Avec N : nombre de DESU dans le MG ; $k_s \geq 1$: coefficient de vitesse de convergence d'équilibrage des SoHs. Plus k_s est grand, plus les SoHs des DESUs convergent rapidement vers la même valeur.

Afin d'évaluer SoH_{imt} et P_{it} de manière distribuée, le consensus moyen dynamique modifié est utilisé (voir équation (13) et (14)).

$$X_{it}[k+1] = N(X_i[k] + K_{mean} \sum_{\substack{j \in N_i \\ j \neq i}} \beta_{ij}[k+1]) \quad (17)$$

$$\beta_{ij}[k+1] = \beta_{ij}[k] + X_{jmean}[k] - X_{imean}[k] \quad (18)$$

k représente l'itération; X_{it} peut être remplacé dans notre d'étude par SoH_{imt} et P_{it} ; K_{mean} : gain moyen du consensus modifié.

La méthode proposée assure automatiquement la restauration de la fréquence des DGs à la valeur nominale puisqu'elle fournit au niveau primaire les références de puissance appropriées ($P_i = P_{iSoH}$). Par conséquent, même en cas de changements soudains de la charge, le contrôle permet de rejeter rapidement les perturbations avec un impact réduit sur la fréquence. La régulation de la tension des DGs est réalisée grâce au contrôle consensus détaillé ci-dessus dans l'équation (5). L'équation globale de la régulation des tensions des DGs sont conçues comme suit :

$$\dot{X}_v = K_v(-L\bar{V} + B(\bar{V}_n - \bar{V})) \quad (19)$$

$$V_i = V_n - n_i(Q_i - Q_{in}) + x_{iv} \quad (20)$$

Avec $X_v = [x_{1v}, \dots, x_{Nv}]^t$; $\bar{V} = [V_1, \dots, V_N]^t$; $\bar{V}_n = [V_1, \dots, V_N]^t$; K_v : gain de contrôle du consensus de tension ; x_{iv} : compensateur de tension du DG_i .

Le schéma global de la méthode proposée pour l'équilibrage du SoH et la régulation de la tension est présenté sur la Fig. 3. Il convient de mentionner que les liaisons de communication entre les RESs et les DESUs ont été ajoutées pour assurer l'écrêtage de la puissance des RESs afin d'éviter les surcharges des DESUs. Cependant, les algorithmes de contrôle pour assurer l'écrêtage de la puissance des RESs ne seront pas traités dans ce document.

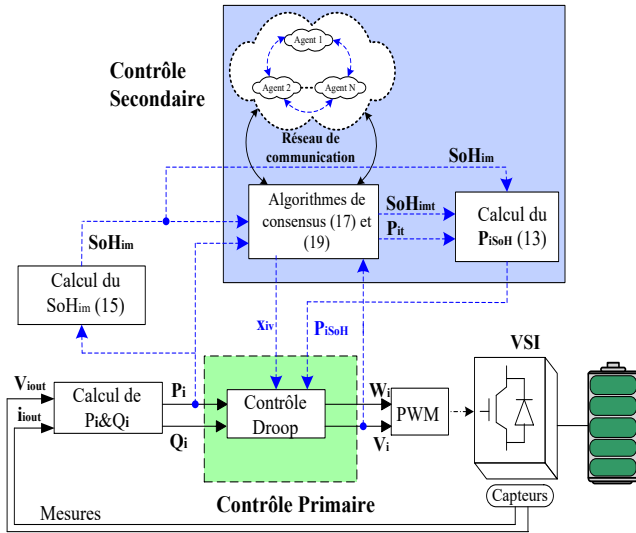


Fig. 3. Schéma global du contrôle proposé.

5. SIMULATIONS ET RESULTATS

Pour valider la stratégie proposée, une simulation MATLAB/Simulink est réalisée sur le système présenté sur la Fig. 1. Les paramètres de contrôle du système sont indiqués dans le Tableau 1.

Tableau 1. Paramètres du système MG.

Item	Symbole	Valeur
Puissance nominale DG1	P_{1n}, Q_{1n}	10 kW, 6 kVAR
Puissance nominale DG2	P_{2n}, Q_{2n}	8.5 kW, 3 kVAR
Puissance nominale DG3	P_{3n}, Q_{3n}	7 kW, 2 kVAR
Puissance nominale DG4	P_{4n}, Q_{4n}	32 kW, 8 kVAR
Capacité des DESUs	C_{batt}	110 Ah
Nombre de cellule	n_{cell}	132
Tension nominale cellule	V_{cell}	3.5 V
Fréquence/tension du MG	f_n/V_n	50 Hz/230 V
Gain de consensus en tension	K_{mean}	0.1
Déviation maximale de f & V	Δ_f/Δ_V	0.5 Hz/5V
SoC maximal des DESUs	SoC_{max}	80%
coefficient de convergence	k_s	5

La stratégie proposée est comparée à la méthode d'équilibrage du SoC utilisée dans [2]. Les SoHs initiaux des trois DESUs sont fixés respectivement à 97 %, 93 % et 90 %. La fréquence nominale du MG est fixée à 50 Hz. Les résultats obtenus sont reportés dans la Fig. 4 et montrent que les SoCs des DESUs sont égaux dans le contrôle de [2] mais pas dans la méthode proposée (Fig. 4 (a) et (b)). Cependant, les SoHs des DESUs sont bien égaux dans la méthode proposée (au bout de 1000 h de fonctionnement) ce qui n'est pas le cas du contrôle utilisé dans [2] (Fig. 4 (c) et (d)). Les puissances fournies par les DESUs dépendent du SoH pour la méthode proposée (Fig. 4 (e)) et du SoC (Fig. 4 (f)) pour la stratégie de [2]. Aussi, on peut remarquer que les fréquences (Fig. 4 (g) et (h)) et tensions (Fig. 4 (i) et (j)) des DGs restent à leurs valeurs nominales (50 Hz pour la fréquence et 230 V pour l'amplitude de la tension) dans les deux contrôles malgré la variation de la charge. La technique proposée permet d'assurer un équilibrage précis du SoH des DESUs réduisant la charge de maintenance mais aussi une restauration automatique de la fréquence des DGs, permettant de rendre le MG plus stable et plus sécurisé. Les états de santé après 1600 heures de fonctionnement sont présentés dans le Tableau 2.

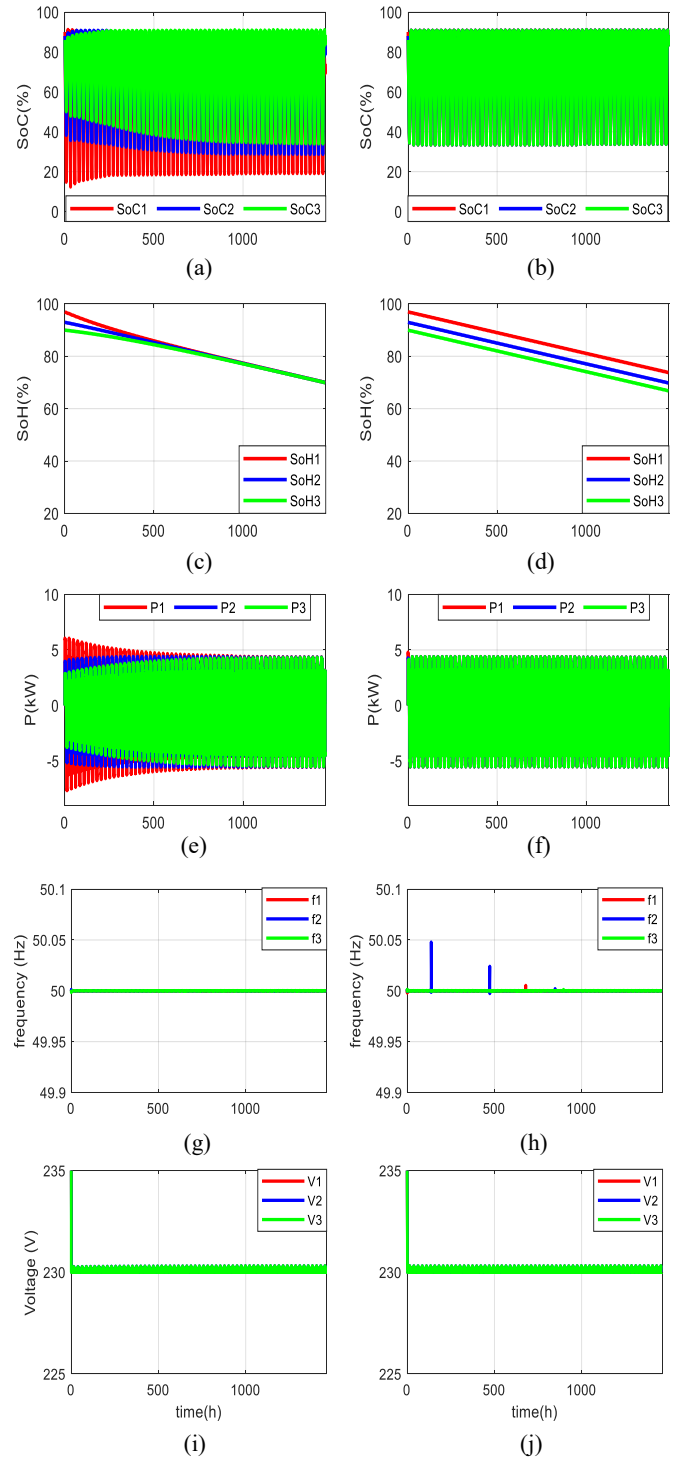


Fig. 4. Comparaison avec la stratégie utilisée dans [2] : (a) et (b) SoCs des DESUs; (c) et (d) SoHs des DESUs; (e) et (f) puissances des DESUs; (g) et (h) fréquences des DGs; (i) et (j) tension des DGs pour les deux contrôles.

Tableau 2. État de Santé des DESUs après 1600 heures de fonctionnement.

Item	Méthode proposée	Méthode utilisée dans [2]
SoH_1	70%	74%
SoH_2	70%	70%
SoH_3	70%	66%

6. CONCLUSIONS

Afin de réduire la charge de maintenance des DESUs et de maintenir la stabilité de la MG, cet article propose un nouveau contrôle distribué pour assurer un équilibrage du SoH des DESUs. En plus d'équilibrer le SoH des batteries, la méthode proposée participe à la stabilisation du MG en ramenant les tensions et les fréquences des DGs à leurs valeurs nominales. Le contrôle distribué proposé est validé par une simulation sous MATLAB/Simulink et est comparé à un contrôle d'équilibrage de SoC de la littérature. Les résultats de simulation obtenus, montrent l'efficacité du contrôle proposé à égaliser les SoHs des DESUs et ses contributions par rapport à ce qui se fait dans la littérature.

7. REFERENCES

- [1] S. V. M. Ouoba, A. Houari, and M. Machmoum, "A Distributed Stabilizing Economic Dispatch Control for Energy Storage Unit based Autonomous Microgrid," in *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/IECON49645.2022.9968874.
- [2] S. V. M. Ouoba, A. Houari, M. Machmoum, and J. M. Guerrero, "A novel resilient state of charge balancing method for distributed storage systems based autonomous microgrids," *Journal of Energy Storage*, vol. 55, p. 105439, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105439.
- [3] S. V. M. Ouoba, A. Houari, and M. Machmoum, "A Resilient Control for Distributed Energy Storage Units in an Islanded AC Microgrid," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. 1–1, 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2023.3261669.
- [4] Q. Wu, X. Zhu, L. Liu, S. Yu, and Y. Chen, "SOH Balancing Scheme of Distributed Battery Energy Storage System in AC Microgrid Based on Improved Droop Control," in *2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*, Feb. 2022, pp. 516–523. doi: 10.1109/ICoPESA54515.2022.9754386.
- [5] J. C. Forman, "Minimally Invasive Characterization of Lithium Iron Phosphate Battery Electrochemical and Health Models using Fisher Information and Optimal Experimental Design," Thesis, 2012. [Online]. Available: <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/95950>