

⑤④ ESTIMATION D'UN ÉTAT D'ÉNERGIE D'UNE BATTERIE.

②② Date de dépôt : 20.05.22.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *SAFRAN ELECTRICAL & POWER
SAS —FR, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE
COMPIEGNE Etablissement public FR et CENTRE
NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Etablissement public — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 24.11.23 Bulletin 23/47.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 10.05.24 Bulletin 24/19.

⑦② Inventeur(s) : VENDRAME, Fernanda et FORGEZ,
Christophe.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦③ Titulaire(s) : *SAFRAN ELECTRICAL & POWER
SAS, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE
COMPIEGNE Etablissement public, CENTRE
NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Etablissement public.*

⑦④ Mandataire(s) : GEVERS & ORES.



Description

Titre de l'invention : ESTIMATION D'UN ÉTAT D'ÉNERGIE D'UNE BATTERIE

Domaine technique de l'invention

[0001] La présente invention concerne un procédé d'estimation d'un état d'énergie d'une cellule d'une batterie, ainsi qu'un programme d'ordinateur, un dispositif et un aéronef associés.

Arrière-plan technologique

[0002] L'état d'énergie (de l'anglais « State Of Energy » également désigné par l'acronyme SOE) d'une cellule de batterie indique la quantité d'énergie disponible dans la cellule. Cette notion est donc différente de l'énergie totale stockée, puisqu'une partie de l'énergie totale stockée peut ne pas être utilisable et donc disponible.

[0003] Le SOE peut être exprimé en valeur absolue (Wh) ou relative par rapport à l'énergie maximale que peut avoir la batterie (%). Le SOE n'est pas une grandeur mesurable, donc il doit être estimé à partir de mesures disponibles sur la cellule : courant échangé au travers de bornes de la cellule, tension aux bornes de la cellule et température de la cellule.

[0004] Pour cela, il est connu d'utiliser un réseau de neurones donnant le SOE à un instant donné à partir du courant, de la tension et de la température à cet instant.

[0005] Cependant, un tel réseau de neurones n'est pas un système déterministe. Il est très difficile d'obtenir une certification dans le domaine aéronautique, en particulier, dans un aéronef hybride ou complètement électrique, lorsque la batterie est utilisée par le système propulsif.

[0006] L'invention a donc pour but de fournir une méthode alternative d'estimation d'un état d'énergie d'une cellule d'une batterie, pour laquelle une certification peut être obtenue.

Résumé de l'invention

[0007] Il est donc proposé un procédé d'estimation d'un état d'énergie d'une cellule d'une batterie pour un instant donné, la cellule présentant deux bornes, caractérisé en ce qu'il comporte :

- une réception de mesures pour l'instant donné d'une température de la cellule, d'une tension aux bornes de la cellule et d'un courant échangé par la cellule au travers de ses bornes ;
- une estimation d'une résistance interne de la cellule pour l'instant donné ;
- une estimation d'une tension de circuit ouvert de la cellule pour l'instant donné à partir de la tension et du courant mesurés, et de la résistance interne

estimée, par exemple en ajoutant à la tension mesurée, une tension de la résistance interne résultant d'un passage du courant mesuré dans la résistance interne ;

- une estimation d'une énergie totale délivrée par la cellule jusqu'à l'instant donné, à partir de la température et du courant mesurés, et de la tension de circuit ouvert estimée, en utilisant des associations prédéfinies entre des valeurs d'énergie totale délivrée par la cellule et des valeurs de température, de courant et de tension de circuit ouvert ;
- une estimation d'une énergie maximale pouvant être délivrée par la cellule, en utilisant les associations prédéfinies et en supposant que la température et le courant restent constants à leurs mesures pour l'instant donné ; et
- une estimation de l'état d'énergie de la cellule pour l'instant donné, en retranchant l'énergie totale délivrée estimée de l'énergie maximale estimée.

[0008] L'invention peut en outre comporter l'une ou plusieurs des caractéristiques additionnelles suivantes, selon toute combinaison techniquement possible.

[0009] Avantageusement, l'estimation de la résistance interne pour l'instant donné est réalisée par une mesure volt-ampérométrique.

[0010] Avantageusement également, l'estimation de la résistance interne à l'instant donné, comporte :

- une estimation préalable de la résistance interne pour l'instant donné à partir de la température et du courant mesurés à l'instant donné, en utilisant des associations prédéfinies entre des valeurs de la résistance interne et des valeurs de température et de courant ;
- une correction de l'estimation préalable en la multipliant par un rapport de correction entre :
 - une estimation de la résistance interne à un instant antérieur à partir d'une mesure volt-ampérométrique, et
 - une estimation de la résistance interne à l'instant antérieur à partir de la température et du courant mesurés à l'instant antérieur, en utilisant les associations prédéfinies entre des valeurs de la résistance interne et des valeurs de température et de courant.

[0011] Avantageusement également, l'estimation de la résistance interne à l'instant donné est réalisée indépendamment d'un état de charge de la cellule.

[0012] Avantageusement également, les associations prédéfinies entre des valeurs d'énergie totale délivrée par la cellule et des valeurs de température, de courant et de tension de circuit ouvert sont sous la forme d'une table.

[0013] Avantageusement également, la table donne l'énergie totale délivrée en fonction de la tension de circuit ouvert, à température et courant constants, pour plusieurs com-

binaisons de température et de courant.

[0014] Avantageusement également, l'énergie maximale est l'énergie totale délivrée pour une tension de circuit ouvert minimale prévue par les associations prédéfinies, à la température et au courant mesurés à l'instant donné.

[0015] Il est également proposé un programme d'ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur, caractérisé en ce qu'il comprend des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé selon l'invention, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[0016] Il est également proposé un dispositif d'estimation d'un état d'énergie d'une cellule d'une batterie pour un instant donné, la cellule présentant deux bornes entre lesquelles un système électrique est connecté, caractérisé en ce qu'il comporte :

- un module de réception, pour l'instant donné, de mesures d'une température de la cellule, d'une tension aux bornes de la cellule et d'un courant échangé par la cellule au travers de ses bornes ;
- un module d'estimation d'une résistance interne de la cellule pour l'instant donné ;
- un module d'estimation d'une tension de circuit ouvert de la cellule pour l'instant donné à partir de la tension et du courant mesurés, et de la résistance interne estimée, par exemple en ajoutant à la tension mesurée, une tension de la résistance interne résultant d'un passage du courant mesuré dans la résistance interne ;
- un module d'estimation d'une énergie totale délivrée par la cellule à partir de la température et du courant mesurés, et de la tension de circuit ouvert estimée, en utilisant des associations prédéfinies entre des valeurs d'énergie totale délivrée par la cellule et des valeurs de température, de courant et de tension de circuit ouvert ; et
- un module d'estimation d'une énergie maximale pouvant être délivrée par la cellule en supposant que la température et le courant restent constants à leurs mesures pour l'instant donné ; et
- un module d'estimation de l'état d'énergie de la cellule pour l'instant donné, en retranchant l'énergie totale délivrée estimée de l'énergie maximale estimée.

[0017] Il est également proposé un aéronef comportant :

- une batterie comportant au moins une cellule présentant deux bornes ;
- un capteur d'une température de la cellule ;
- un capteur d'un courant échangé par la cellule au travers de ses bornes ;
- un capteur d'une tension entre les bornes de la cellule ; et
- un dispositif d'estimation d'un état d'énergie de la cellule, selon l'invention.

Brève description des figures

- [0018] L'invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés dans lesquels :
- la [Fig.1] est une vue fonctionnelle d'un aéronef dans lequel l'invention est mise en œuvre,
 - la [Fig.2] est une vue fonctionnelle de modules d'un programme d'ordinateur d'un dispositif d'estimation d'un état d'énergie d'une cellule d'une batterie de l'aéronef de la [Fig.1],
 - la [Fig.3] est un graphique illustrant l'évolution d'une énergie totale délivrée par la cellule en fonction d'une tension de circuit ouvert de cette cellule, pour plusieurs combinaisons de température et de courant échangé par la batterie,
 - la [Fig.4] est un schéma électrique d'un modèle de la cellule de la batterie,
 - la [Fig.5] est un schéma bloc d'un procédé de calcul d'associations entre l'énergie totale et la tension de circuit ouvert, pour plusieurs combinaisons de température et de courant, à partir du modèle de la [Fig.4], et
 - la [Fig.6] est un schéma bloc d'un procédé d'estimation d'un état d'énergie de la batterie.

Description détaillée de l'invention

- [0019] En référence à la [Fig.1], un exemple d'un aéronef 100 dans lequel l'invention est mise en œuvre, va à présent être décrit.
- [0020] L'aéronef 100 comporte tout d'abord une turbomachine 102 présentant un arbre de sortie 104.
- [0021] L'aéronef 100 comporte en outre une soufflante 106 conçue pour propulser l'aéronef 100. La soufflante 106 est en particulier connectée à l'arbre de sortie 104 de la turbomachine 102 afin d'être entraînée par cette dernière.
- [0022] L'aéronef 100 comporte en outre une machine électrique 108 conçue par exemple pour fonctionner en moteur électrique pour entraîner l'arbre de sortie 104, à la place ou bien en complément de la turbomachine 102. Alternativement ou bien en complément, la machine électrique 108 est conçue pour fonctionner en génératrice pour fournir de l'énergie électrique à partir de la rotation de l'arbre de sortie 104.
- [0023] L'aéronef 100 comporte en outre une batterie 110 comportant au moins une cellule 111. Dans l'exemple décrit, une seule cellule 111 est prévue. La cellule 111 présente deux bornes 112, 114 entre lesquelles un système électrique est connecté. Le système électrique est conçu pour sélectivement se comporter en charge électrique et être alimenté électriquement par la batterie 110 et se comporter en source électrique pour recharger la batterie 110. Alternativement, le système électrique peut se comporter toujours en charge électrique ou bien toujours en source électrique. Le système

électrique comporte par exemple la machine électrique 108.

[0024] L'aéronef 100 comporte en outre un système 116 de surveillance de la cellule 111.

[0025] Le système de surveillance 116 comporte tout d'abord un capteur 118 d'une température T de la cellule 111.

[0026] Le système de surveillance 116 comporte en outre un capteur 120 d'un courant I échangé (c'est-à-dire fourni ou bien reçu) par la cellule 111 au travers de ses bornes 112, 114.

[0027] Le système de surveillance 116 comporte en outre un capteur 122 d'une tension U entre les bornes 112, 114 de la cellule 111.

[0028] Les capteurs 118, 120, 122 sont conçus pour fournir des mesures de respectivement la température T, le courant et la tension U, ces mesures étant soit directes soit indirectes par déduction à partir d'une ou plusieurs autres grandeurs physiques.

[0029] Le système de surveillance 116 comporte en outre un dispositif 124 de surveillance de la cellule 111. Le dispositif de surveillance 124 est en particulier conçu pour estimer un état de charge (de l'anglais « State Of Charge », également désigné par l'acronyme SOC) de la cellule 111, à partir de la température T, du courant I et de la tension U, respectivement mesurés par les capteurs 118, 120, 122.

[0030] Dans l'exemple décrit, le dispositif de traitement de données 124 est un système informatique comportant une unité 126 de traitement de données (telle qu'un microprocesseur) et une mémoire principale 128 (telle qu'une mémoire RAM, de l'anglais « Random Access Memory ») accessible par l'unité 126 de traitement de données. Le système informatique comporte en outre par exemple une interface réseau et/ou un support lisible par ordinateur, comme par exemple un support local (tel qu'un disque dur local 130) ou bien un support distant (tel qu'un disque dur distant et accessible via par l'interface réseau au travers d'un réseau de communication) ou bien encore un support amovible (tel qu'une clé USB, de l'anglais « Universal Serial Bus », ou bien un CD, de l'anglais « Compact Disc » ou bien un DVD, de l'anglais « Digital Versatile Disc ») lisible au moyen d'un lecteur approprié du système informatique (tel qu'un port USB ou bien un lecteur de disque CD et/ou DVD). Un programme d'ordinateur 132 contenant des instructions pour l'unité 126 de traitement de données est enregistré sur le support 130 et/ou téléchargeable via l'interface réseau. Ce programme d'ordinateur 132 est par exemple destiné à être chargé dans la mémoire principale 128, afin que l'unité 126 de traitement de données exécute ses instructions. Pour faciliter la description du programme d'ordinateur 132, les instructions seront décrites par la suite comme organisées en modules logiciels. Cependant, cette présentation ne préjuge pas de la forme du programme d'ordinateur, qui peut être quelconque.

[0031] Alternativement, tout ou partie de ces modules pourrait être implémenté sous forme de modules matériels, c'est-à-dire sous forme d'un circuit électronique, par exemple

micro-câblé, ne faisant pas intervenir de programme d'ordinateur.

[0032] En référence à la [Fig.2], un exemple de mise en œuvre du programme d'ordinateur 132 va à présent être décrit.

[0033] Le programme d'ordinateur 132 comporte tout d'abord un module 202 conçu pour recevoir, de la part des capteurs 118, 120, 122, des mesures $T(t)$, $U(t)$, $I(t)$ pour l'instant t de respectivement la température T , la tension U et le courant I . Par exemple, ces mesures $T(t)$, $U(t)$, $I(t)$ sont acquises à l'instant t . Alternativement, une ou plusieurs de ces mesures pourrait être acquise antérieurement à l'instant t et réutilisé pour l'instant t .

[0034] Le programme d'ordinateur 132 comporte en outre un module 204 conçu pour estimer une résistance interne R de la cellule 111 pour l'instant t , par exemple à partir de la mesure $T(t)$ de la température T et de la mesure $I(t)$ du courant I , de préférence indépendamment d'un état de charge (de l'anglais « State Of Charge » également désigné par l'acronyme SOC) de la cellule 111.

[0035] De préférence, le module 204 est conçu, pour au moins certains instants t , pour estimer la résistance interne R par une mesure volt-ampérométrique, par exemple par une division d'une variation de la tension U mesurée par une variation du courant I mesuré :

[Math.1]

$$R(t) = \Delta U(t) / \Delta I(t)$$

[0036] Par exemple, le programme d'ordinateur 132 peut comporter une table 205 associant des valeurs de la résistance interne R à des valeurs de la température T et du courant I , par exemple pour un état de charge SOC prédéfini et arbitraire de la cellule 111, par exemple 50%. La table 205 se présente par exemple sous la forme (le courant I est exprimé en courant nominal de la cellule, noté C pour taux de courant (de l'anglais « current rate »)) :

[Tableaux1]

R (Ω)	T (°C)	I (C)
0,1	25	1
...	...	...

[0037] Le module 204 peut alors être conçu pour calculer un rapport de correction K entre l'estimation $R(t)$ de la résistance R et une autre estimation $R_{\text{table}}(t)$ obtenue en utilisant la table 205 à partir de la mesure $T(t)$ de la température T et de la mesure $I(t)$ du courant I , par exemple par interpolation :

[Math.2]

$$K = R(t) / R_{\text{table}}(t)$$

[0038] Dans ce cas, pour d'autres instants t , le module 204 est par exemple conçu pour réaliser une estimation préalable $R_{\text{table}}(t)$ de la résistance interne R pour l'instant donné t à partir de la mesure $T(t)$ de la température T et de la mesure $I(t)$ du courant I , en utilisant la table 205. Par exemple, le module 204 est conçu pour déterminer l'estimation préalable $R_{\text{table}}(t)$ par interpolation. Le module 204 peut alors être conçu pour corriger l'estimation préalable $R_{\text{table}}(t)$ en la multipliant par le rapport K préalablement obtenu comme expliqué ci-dessus :

[Math.3]

$$R(t) = K \cdot R_{\text{table}}(t)$$

[0039] Il sera apprécié que les estimations de la résistance interne R à partir de la table 205 sont ainsi réalisées en supposant que l'état de charge SOC de la cellule 111 est à une valeur prédéfinie et arbitraire, même si l'état de charge réel de la cellule 111 à l'instant considéré est différent.

[0040] En outre, alternativement, les associations pourraient prendre la forme, à la place de la table 205, d'une formule liant la résistance interne R la température T et au courant I .

[0041] Du fait que la résistance interne R est mesurée au moins à certains instants, il est possible de tenir compte rapidement de la modification imprévisible de la résistance interne R au cours du temps, résultant du vieillissement de la cellule 111, et donc de la manière dont la batterie 110 est utilisée. Cette prise en compte rapide ne serait pas possible avec un réseau de neurones, qui est une « boîte noire » ne comportant donc pas un paramètre modifiable représentatif de la résistance interne. Au mieux, il faudrait prévoir un réentraînement du réseau de neurones pendant son utilisation, mais cela prendrait du temps et ne permettrait pas de suivre les modifications de la résistance interne R .

[0042] Le programme d'ordinateur 132 comporte en outre un module 206 conçu pour estimer une tension de circuit ouvert OCV de la cellule 111 pour l'instant t , à partir de la mesure $U(t)$ de tension U , de la mesure $I(t)$ du courant I et de l'estimation $R(t)$ de la résistance interne R . En particulier, le module 206 est conçu pour ajouter, à la mesure $U(t)$ de la tension U , une tension de la résistance interne R résultant du passage du courant I dans cette résistance interne R :

[Math.4]

$$\text{OCV}(t) = U(t) + R(t) \cdot I(t)$$

où $\text{OCV}(t)$ est l'estimation de la tension de circuit ouvert OCV pour l'instant (t) .

[0043] Le programme d'ordinateur 132 comporte en outre par exemple une table 208 associant des valeurs d'une énergie totale E_{tot} délivrée par la cellule 111, à des valeurs de la température T , des valeurs du courant I et des valeurs de la tension de circuit ouvert OCV. De préférence, la table donne l'énergie totale délivrée E_{tot} en fonction de

la tension de circuit ouvert OCV, à température T et courant I constants, pour plusieurs combinaisons de température T et de courant I . La table 208 se présente par exemple sous la forme :

[Tableaux2]

E_{tot} (Wh)	OCV (V)	T ($^{\circ}\text{C}$)	I (C)
NA	3,12	0	1
8,724	3,13	0	1
...	...	...	...
0,082	4,15	0	1
NA	4,16	0	1
NA	3,08	10	1
9,023	3,09	10	1
...	...	...	...
0,185	4,15	10	1
NA	4,16	10	1
...			

[0044] D'après le tableau ci-dessus, la tension de circuit ouvert OCV minimale à la température T de 0°C et au courant I de 1C est de 3,13 V et est associée à une énergie totale délivrée E_{tot} (correspondant donc à l'énergie maximale E_{max} pouvant être délivrée) de 8,724 J, puisqu'aucune énergie n'est associée (case « NA ») à la valeur précédente (3,12 V) de tension de circuit ouvert OCV.

[0045] Alternativement, les associations pourraient prendre la forme, à la place de la table 208, d'une formule liant l'énergie totale délivrée E_{tot} à la température T , le courant I et la tension de circuit ouvert OCV.

[0046] Le programme d'ordinateur 132 comporte en outre un module 210 conçu pour estimer l'énergie totale $E_{\text{tot}}(t)$ délivrée par la cellule 111 jusqu'à l'instant t , à partir de la mesure $T(t)$ de la température T , de la mesure $I(t)$ du courant I et de l'estimation OCV(t) de la tension de circuit ouvert OCV, en utilisant la table 208. Par exemple, le module 210 est conçu pour estimer l'énergie totale $E_{\text{tot}}(t)$ par interpolation.

[0047] Le programme d'ordinateur 132 comporte en outre un module 212 conçu pour estimer, pour l'instant t , une énergie maximale $E_{\text{max}}(t)$ pouvant être délivrée par la cellule 111, en supposant que la température T et le courant I restent constants à leur mesures $T(t)$, $I(t)$ pour l'instant t . Par exemple, le module 212 est conçu pour utiliser la table 208. En effet, pour chaque combinaison de température T et de courant I , la

tension de circuit ouvert OCV diminue pendant que l'énergie totale délivrée E_{tot} augmente, jusqu'à une valeur minimale en dessous de laquelle la cellule 111 n'est plus capable de fournir de l'énergie électrique. Ainsi, l'énergie maximale E_{max} est l'énergie totale délivrée E_{tot} pour la tension de circuit ouvert minimale OCV_{min} , à la température T et au courant I considérés. Ainsi, l'énergie maximale E_{max} peut être déduite de la table 208 en cherchant dans cette dernière, pour la température T et le courant I à leur mesures $T(t)$, $I(t)$, la tension de circuit ouvert minimale OCV_{min} et l'énergie totale délivrée E_{tot} associée.

- [0048] Le programme d'ordinateur 132 comporte en outre un module 214 conçu pour estimer l'état d'énergie SOE(t) de la cellule 111 pour l'instant t , en retranchant l'énergie totale délivrée $E_{\text{tot}}(t)$ à l'énergie maximale $E_{\text{max}}(t)$:

[Math.5]

$$SOE(t) = E_{\text{max}}(t) - E_{\text{tot}}(t)$$

- [0049] En référence à la [Fig.3], des exemples de courbes liant l'énergie totale délivrée E_{tot} à la tension de circuit ouvert OCV, pour plusieurs combinaisons de température T et de courant I sont illustrés. Ces courbes représentent donc les données enregistrées dans la table 208.

- [0050] En référence à la [Fig.4], un exemple d'un modèle 400 de la cellule 111 va à présent être décrit.

- [0051] Le modèle 400 comporte des blocs connectés en série entre les deux bornes 114, 116. La cellule 111 présente la tension U entre ces bornes 114, 116 et échange le courant I par ces bornes 114, 116.

- [0052] Un premier bloc comporte une source de tension U_{oc} représentant la tension de circuit ouvert de la cellule 111, c'est-à-dire la tension que présente cette cellule 111 lorsqu'elle est complètement relaxée.

- [0053] Un deuxième bloc comporte une résistance série R_s représentant toutes les contributions purement résistives, telles que l'électrolyte, les collecteurs de courant et les résistances de contact.

- [0054] Un troisième bloc comporte une résistance R_{surf} et une capacité C_{surf} en parallèle l'un de l'autre, représentant la résistance et la capacité de surface liée à la chute de tension entre la surface de la matière active et de l'électrolyte due au transfert de charge et à l'interphase électrolytique solide (de l'anglais « Solid Electrolyte Interphase » également désigné par l'acronyme SEI). La résistance R_{surf} et la capacité C_{surf} définissent ainsi une constante de temps $\tau_{\text{surf}} = R_{\text{surf}}C_{\text{surf}}$ liée aux phénomènes de surface (transfert de charge, SEI et double couche). Il s'agit d'une dynamique rapide, normalement inférieure à une seconde.

- [0055] n blocs (n supérieur ou égal à 1) comportent chacun une résistance R_{diff} et une capacité C_{diff} représentant des phénomènes de diffusion des ions de lithium dans

l'électrolyte et des atomes de lithium dans les deux électrodes. La résistance R_{diff} et la capacité C_{diff} de chacun de ces n blocs définit une constante de temps $\tau_{diff} = R_{diff}C_{diff}$ liée aux phénomènes de diffusion. Il s'agit d'une dynamique lente, de l'ordre de plusieurs secondes ou minutes.

[0056] Tous ces paramètres dépendent de l'état de charge SOC de la cellule 111, de la température T de la cellule 111 et du courant I dans la cellule 111, à l'exception de la source de tension U_{oc} qui ne dépend pas du courant I . Le modèle 400 comporte ainsi par exemple une table pour chacun d'eux, donnant la valeur du paramètre considéré en fonction de l'état de charge SOC, de la température T et, le cas échéant, du courant I .

[0057] Ainsi, dans le modèle 400, la résistance interne R de la cellule 111 est égale à la somme des résistances R_s , R_{surf} et R_{diff} des n blocs :

[Math.3]

$$R = R_s + R_{surf} + R_{diff, 1} + \dots + R_{diff, n}$$

[0058] En référence à la [Fig.5], un exemple de procédé 500 de détermination de la table 208 va à présent être décrit.

[0059] Au cours d'une étape 502, une valeur de température T et de courant I sont sélectionnés.

[0060] Au cours d'une étape 504, une décharge complète de la cellule 111 est simulée au moyen du modèle 400, en gardant constants la température T et le courant I à leurs valeurs sélectionnées.

[0061] Au cours d'une étape 506, une énergie électrique fournie pour la cellule et une énergie thermique dissipée par effet joule au cours du temps de la simulation sont calculés à partir du résultat de la simulation. L'énergie totale délivrée E_{tot} à chacun de plusieurs instants de la simulation est alors calculée comme la somme de l'énergie électrique fournie et de l'énergie thermique dissipée à l'instant de la simulation considéré.

[0062] Au cours d'une étape 508, la tension de circuit ouvert OCV est également calculée pour chacun des instants de la simulation, à partir du résultat de la simulation.

[0063] Au cours d'une étape 510, pour chacun des instants de la simulation, les valeurs d'énergie totale délivrée E_{tot} et de tension de circuit ouvert OCV associées, sont enregistrées dans la table 208, avec les valeurs de température T et courant I .

[0064] Le procédé 500 retourne alors à l'étape 502 pour la sélection de nouvelles valeurs de température T et de courant I .

[0065] En référence à la [Fig.6], un exemple d'un procédé 600 d'estimation de l'état d'énergie SOE(t) de la cellule 111 à un instant t , va à présent être décrit.

[0066] Au cours d'une étape 602, le module 202 reçoit les mesures $T(t)$, $U(t)$, $I(t)$ de la température T , la tension U et le courant I , pour l'instant t .

[0067] Au cours d'une étape 604, le module 204 estime la résistance interne $R(t)$ de la

cellule 111 pour l'instant t .

- [0068] Au cours d'une étape 606, le module 206 estime la tension de circuit ouvert OCV de la cellule 111 pour l'instant t , à partir de la mesure $U(t)$ de la tension U , de la mesure $I(t)$ du courant I et de l'estimation $R(t)$ de la résistance interne R .
- [0069] Au cours d'une étape 608, le module 210 estime l'énergie totale délivrée $E_{\text{tot}}(t)$ par la cellule 111 jusqu'à l'instant t , à partir de la mesure $T(t)$ de la température T , de la mesure $I(t)$ du courant I et de l'estimation OCV(t) de la tension de circuit ouvert OCV.
- [0070] Au cours d'une étape 610, le module 212 estime, pour l'instant t , l'énergie maximale $E_{\text{max}}(t)$ pouvant être délivrée par la cellule 111, en supposant que la température T et le courant I restent constants.
- [0071] Au cours d'une étape 612, le module 214 estime, pour l'instant t , l'état d'énergie SOE(t) de la cellule 111, en retranchant l'énergie totale délivrée $E_{\text{tot}}(t)$ à l'énergie maximale $E_{\text{max}}(t)$.
- [0072] En conclusion, on notera que l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits précédemment. Il apparaîtra en effet à l'homme de l'art que diverses modifications peuvent être apportées aux modes de réalisation décrits ci-dessus, à la lumière de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.
- [0073] Dans la présentation détaillée de l'invention qui est faite précédemment, les termes utilisés ne doivent pas être interprétés comme limitant l'invention aux modes de réalisation exposés dans la présente description, mais doivent être interprétés pour y inclure tous les équivalents dont la prévision est à la portée de l'homme de l'art en appliquant ses connaissances générales à la mise en œuvre de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé (600) d'estimation d'un état d'énergie (SOE) d'une cellule (111) d'une batterie (110) pour un instant donné (t), la cellule (111) présentant deux bornes (114, 116), caractérisé en ce qu'il comporte :

- une réception (602) de mesures pour l'instant donné (t) d'une température (T) de la cellule (111), d'une tension (U) aux bornes (112, 114) de la cellule (111) et d'un courant (I) échangé par la cellule (111) au travers de ses bornes (114, 116) ;
- une estimation (604) d'une résistance interne (R) de la cellule (111) pour l'instant donné (t) ;
- une estimation (606) d'une tension de circuit ouvert (OCV) de la cellule (111) pour l'instant donné (t) à partir de la tension (U) et du courant (I) mesurés, et de la résistance interne (R) estimée, par exemple en ajoutant à la tension (U) mesurée, une tension de la résistance interne (R) résultant d'un passage du courant (I) mesuré dans la résistance interne (R) ;
- une estimation (608) d'une énergie totale (E_{tot}) délivrée par la cellule (111) jusqu'à l'instant donné (t), à partir de la température (T) et du courant (I) mesurés, et de la tension de circuit ouvert (OCV) estimée, en utilisant des associations prédéfinies (208) entre des valeurs d'énergie totale (E_{tot}) délivrée par la cellule (111) et des valeurs de température (T), de courant (I) et de tension de circuit ouvert (OCV) ;
- une estimation (610) d'une énergie maximale (E_{max}) pouvant être délivrée par la cellule (111), en utilisant les associations prédéfinies (208) et en supposant que la température (T) et le courant (I) restent constants à leurs mesures pour l'instant donné (t) ; et
- une estimation (612) de l'état d'énergie (SOE) de la cellule (111) pour l'instant donné (t), en retranchant l'énergie totale délivrée (E_{tot}) estimée de l'énergie maximale (E_{max}) estimée.

[Revendication 2]

Procédé (600) selon la revendication 1, dans lequel l'estimation de la résistance interne (R) pour l'instant donné (t) est réalisée à partir d'une mesure volt-ampérométrique.

- [Revendication 3] Procédé (600) selon la revendication 1, dans lequel l'estimation (604) de la résistance interne (R) à l'instant donné (t), comporte :
- une estimation préalable de la résistance interne (R) pour l'instant donné (t) à partir de la température (T) et du courant (I) mesurés à l'instant donné (t), en utilisant des associations prédéfinies (205) entre des valeurs de la résistance interne (R) et des valeurs de température (T) et de courant (I) ;
 - une correction de l'estimation préalable en la multipliant par un rapport de correction (K) entre :
 - une estimation de la résistance interne (R) à un instant antérieur par une mesure volt-ampérométrique, et
 - une estimation de la résistance interne (R) à l'instant antérieur à partir de la température (T) et du courant (I) mesurés à l'instant antérieur, en utilisant les associations prédéfinies (205) entre des valeurs de la résistance interne (R) et des valeurs de température (T) et de courant (I).
- [Revendication 4] Procédé (600) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel l'estimation (604) de la résistance interne (R) à l'instant donné (t) est réalisée indépendamment d'un état de charge (SOC) de la cellule (111).
- [Revendication 5] Procédé (600) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel les associations prédéfinies (208) entre des valeurs d'énergie totale (E_{tot}) délivrée par la cellule (111) et des valeurs de température (T), de courant (I) et de tension de circuit ouvert (OCV) sont sous la forme d'une table.
- [Revendication 6] Procédé (600) selon la revendication 5, dans lequel la table donne l'énergie totale délivrée (E_{tot}) en fonction de la tension de circuit ouvert (OCV), à température (T) et courant (I) constants, pour plusieurs combinaisons de température (T) et de courant (I).
- [Revendication 7] Procédé (600) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel l'énergie maximale (E_{max}) est l'énergie totale délivrée (E_{tot}) pour une tension de circuit ouvert minimale (OCV_{min}) prévue par les associations prédéfinies (208), à la température (T) et au courant (I) mesurés à l'instant donné (t).
- [Revendication 8] Programme d'ordinateur (132) téléchargeable depuis un réseau de com-

munication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur, caractérisé en ce qu'il comprend des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé (600) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[Revendication 9]

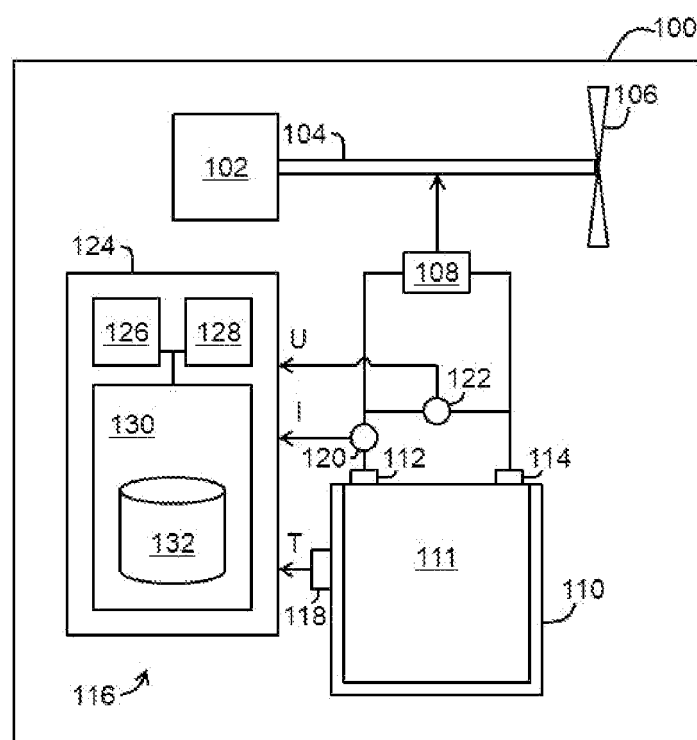
Dispositif d'estimation d'un état d'énergie (SOE) d'une cellule (111) d'une batterie (110) pour un instant donné (t), la cellule (111) présentant deux bornes (114, 116) entre lesquelles un système électrique (108) est connecté, caractérisé en ce qu'il comporte :

- un module (202) de réception, pour l'instant donné (t), de mesures d'une température (T) de la cellule (111), d'une tension (U) aux bornes (112, 114) de la cellule (111) et d'un courant (I) échangé par la cellule (111) au travers de ses bornes (112, 114) ;
- un module (204) d'estimation d'une résistance interne (R) de la cellule (111) pour l'instant donné (t) ;
- un module (206) d'estimation d'une tension de circuit ouvert (OCV) de la cellule (111) pour l'instant donné (t) à partir de la tension (U) et du courant (I) mesurés, et de la résistance interne (R) estimée, par exemple en ajoutant à la tension (U) mesurée, une tension de la résistance interne (R) résultant d'un passage du courant (I) mesuré dans la résistance interne (R) ;
- un module (210) d'estimation d'une énergie totale (E_{tot}) délivrée par la cellule (111) à partir de la température (T) et du courant (I) mesurés, et de la tension de circuit ouvert (OCV) estimée, en utilisant des associations prédéfinies (208) entre des valeurs d'énergie totale (E_{tot}) délivrée par la cellule (111) et des valeurs de température (T), de courant (I) et de tension de circuit ouvert (OCV) ;
- un module (212) d'estimation d'une énergie maximale (E_{max}) pouvant être délivrée par la cellule (111) en supposant que la température (T) et le courant (I) restent constants à leurs mesures pour l'instant donné (t) ; et
- un module (214) d'estimation de l'état d'énergie (SOE) de la cellule (111) pour l'instant donné (t), en retranchant l'énergie totale délivrée (E_{tot}) estimée de l'énergie maximale (E_{max}) estimée.

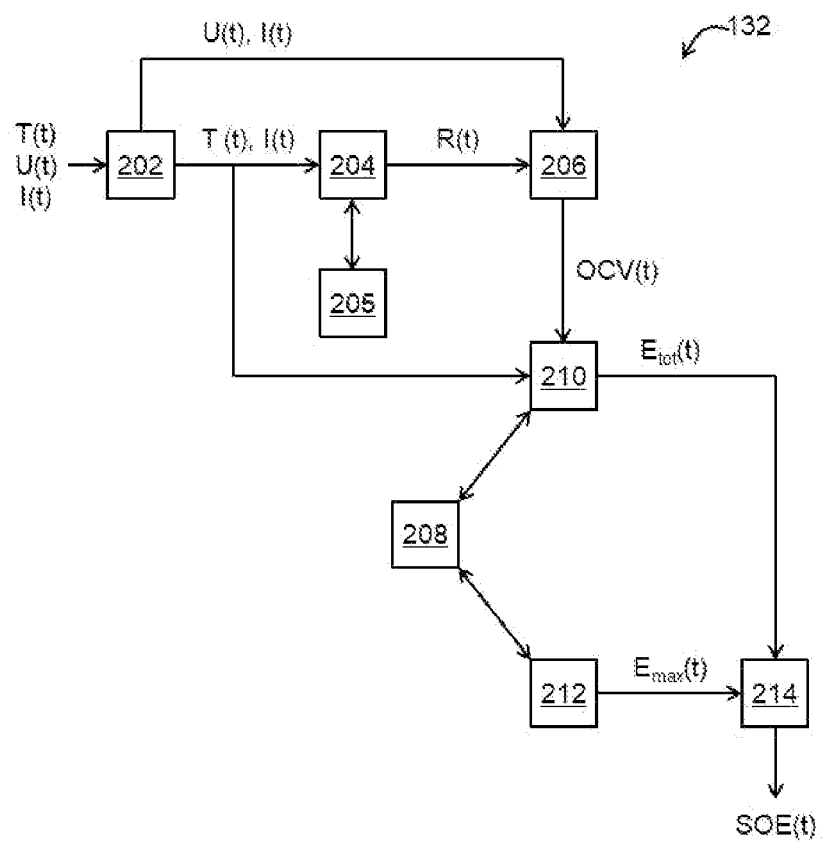
[Revendication 10] Aéronef (100) comportant :

- une batterie (110) comportant au moins une cellule (111) présentant deux bornes (112, 114) ;
- un capteur (118) d'une température (T) de la cellule (111) ;
- un capteur (120) d'un courant (I) échangé par la cellule (111) au travers de ses bornes (112, 114) ;
- un capteur (122) d'une tension (U) entre les bornes (112, 114) de la cellule (111) ; et
- un dispositif d'estimation d'un état d'énergie (SOE) de la cellule (111), selon la revendication 9.

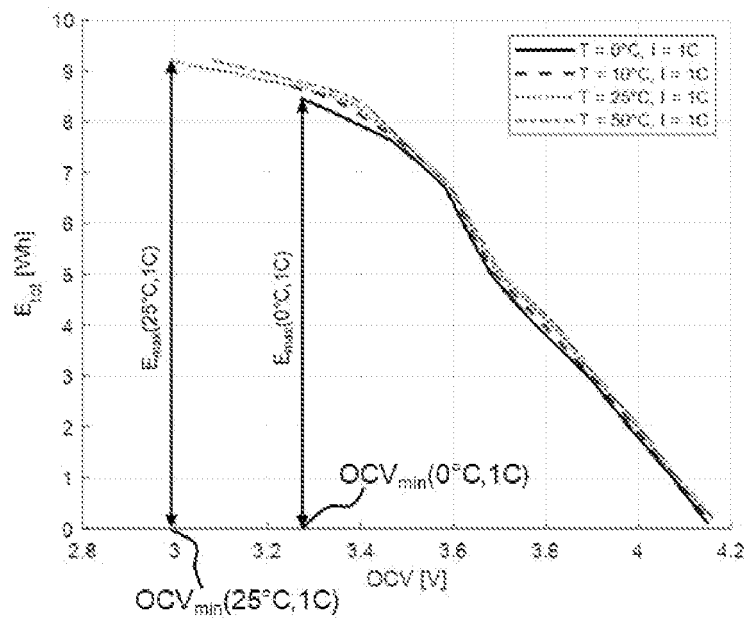
[Fig. 1]



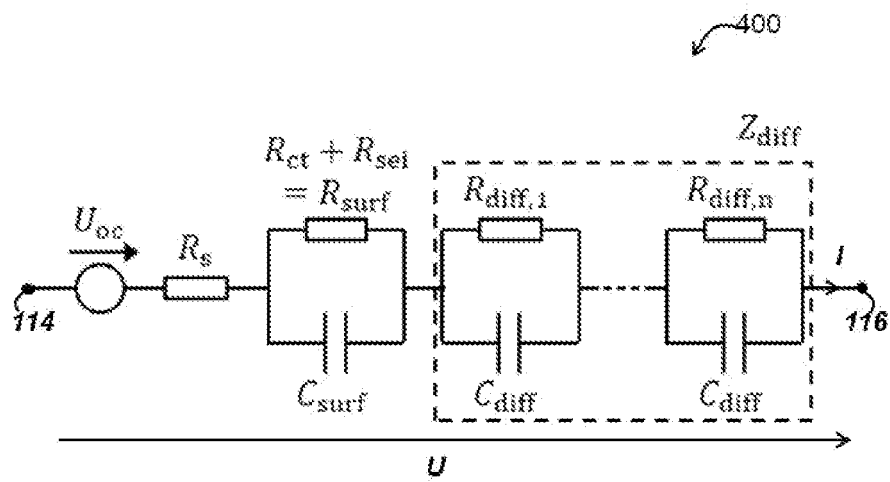
[Fig. 2]



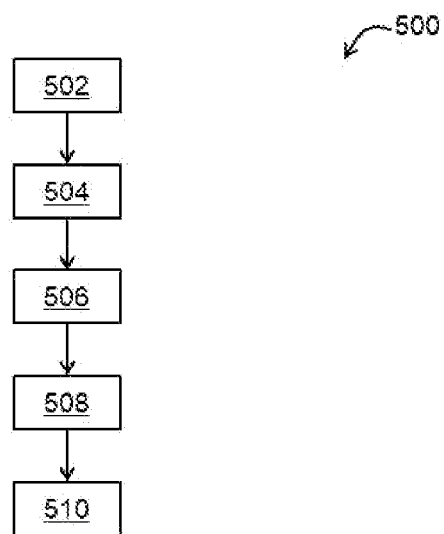
[Fig. 3]



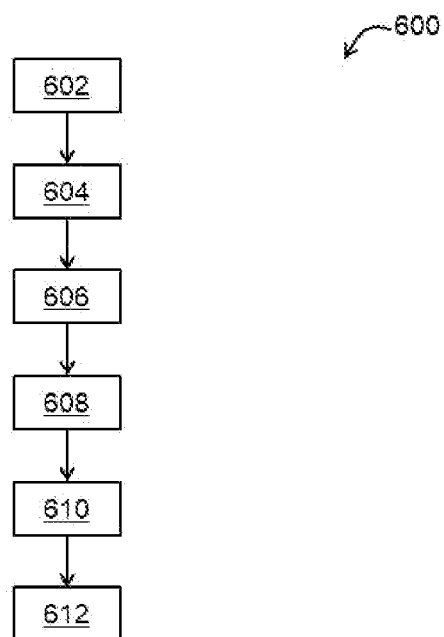
[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

MA L. ET AL: "State of Charge and State of Energy Estimation for Lithium-Ion Batteries Based on a Long Short-Term Memory Neural Network",
JOURNAL OF ENERGY STORAGE,
vol. 37, 1 mai 2021 (2021-05-01), page 102440, XP93036322,
NL
ISSN: 2352-152X, DOI:
10.1016/j.est.2021.102440
Extrait de l'Internet:
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21001924/pdf?md5=7038f08776d2d6318d0adb568405c9f6&pid=1-s2.0-S2352152X21001924-main.pdf>>

US 2016/083932 A1 (INOUE TAKESHI [JP] ET AL) 24 mars 2016 (2016-03-24)

WO 2020/131450 A1 (CUMMINS INC [US]; FAN GUODONG [US] ET AL.)
25 juin 2020 (2020-06-25)

WO 2021/254620 A1 (VOLVO TRUCK CORP [SE])
23 décembre 2021 (2021-12-23)

LI KAIYUAN ET AL: "A Practical Lithium-Ion Battery Model for State of Energy and Voltage Responses Prediction Incorporating Temperature and Ageing Effects",
IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, USA,
vol. 65, no. 8, 1 août 2018 (2018-08-01),
pages 6696-6708, XP011682138,
ISSN: 0278-0046, DOI:
10.1109/TIE.2017.2779411
[extrait le 2018-03-30]

Zheng Linfeng ET AL: "[Title Page] Novel Methods for Estimating Lithium-Ion Battery

State of Energy and Maximum Available
Energy",

,
1 janvier 2019 (2019-01-01), XP93036314,

Extrait de l'Internet:

URL: [https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/](https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/117841/4/2-s2.0-84973866023%20%20Novel%20Methods%20for%20Estimating%20Lithium-Ion%20Battery%20State%20of%20Energy%20and%20Maximum%20Available%20Energy%20PDF.pdf)

10453/117841/4/2-s2.0-84973866023%20%20Nov

el%20Methods%20for%20Estimating%20Lithium-

Ion%20Battery%20State%20of%20Energy%20and%

20Maximum%20Available%20Energy%20PDF.pdf

[extrait le 2023-03-30]

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES
NEANT