



(43) Date de la publication internationale
2 juin 2016 (02.06.2016)

(51) Classification internationale des brevets :
G01R 31/36 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2015/053240

(22) Date de dépôt international :
26 novembre 2015 (26.11.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1461616 28 novembre 2014 (28.11.2014) FR

(71) Déposant : RENAULT S.A.S. [FR/FR]; 13-15 quai Le Gallo, 92100 Boulogne-Billancourt (FR).

(72) Inventeurs : HEIRIES, Vincent; 140 rue du 8 mai 1945, 38430 Saint-Jean-de-Moirans (FR). LEIRENS, Sylvain; 4 rue Victor Lastella, 38000 Grenoble (FR).

(74) Mandataires : COLOMBO, Michel et al.; 310 bis avenue Berthelot, 69008 Lyon (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,

AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : AUTOMATIC METHOD FOR ESTIMATING THE STATE OF CHARGE OF A CELL OF A BATTERY

(54) Titre : PROCÉDE AUTOMATIQUE D'ESTIMATION DE L'ETAT DE CHARGE D'UNE CELLULE D'UNE BATTERIE

$$z_{k3} = \sum_{m=k-N}^{m=k-1} i_m$$
$$\hat{z}_{k3} = \frac{(SOC_k - SOC_{k-N})}{NT_e} \cdot 3600 \cdot C_{n,k3}$$

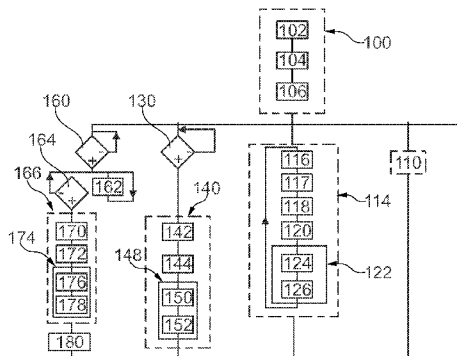


Fig. 10

(57) Abstract : The invention relates to a method for estimating the state of charge of a cell including a correction of a capacitance prediction $C_{n,k3}$ for said cell, wherein said correction comprises: acquiring (176), at time $k3$, a measurable physical quantity z_{k3} defined by the following relation: formula (I) where k is the time closest to time $k3$ and N is an integer greater than or equal to one, - calculating (176) a prediction z_{k3} of the measurable physical quantity z_{k3} using the following observation model: formula (II) where: - SOC_{k-N} is the state of charge of the cell at an earlier time $k-N$, - $C_{n,k3}$ is the prediction of the cell capacitance at time $k3$ calculated just before being corrected, and - correcting (178) the capacitance prediction $C_{n,k3}$ according to the difference between the acquired physical quantity z_{k3} and the prediction z_{k3} .

(57) Abrégé : Ce procédé d'estimation de l'état de charge d'une cellule comporte une correction d'une prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ de cette cellule, cette correction comportant : - l'acquisition (176), à l'instant $k3$, d'une grandeur physique mesurable z_{k3} définie par la relation suivante : formule (I) où k est l'instant le plus proche de l'instant $k3$ et N est un entier supérieur ou égal à un, - le calcul (176) d'une prédiction z_{k3} de la grandeur physique mesurable z_{k3} à l'aide du modèle d'observation suivant : formule (II) où : - SOC_{k-N} est l'état de charge de la cellule à un instant antérieur $k-N$, - $C_{n,k3}$ est la prédiction de la capacité de la cellule à l'instant $k3$ calculée juste avant d'être corrigée, et - la correction (178) de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ en fonction de l'écart entre la grandeur physique acquise z_{k3} et la prédiction z_{k3} .

PROCEDE AUTOMATIQUE D'ESTIMATION DE L'ETAT DE CHARGE D'UNE CELLULE D'UNE BATTERIE

[001] L'invention concerne un procédé automatique d'estimation de l'état de charge
5 d'une cellule d'une batterie ainsi qu'un support d'enregistrement et un système de gestion de batterie pour mettre en œuvre ce procédé. L'invention a également pour objet un véhicule automobile comportant ce système de gestion de batterie.

[002] Des procédés connus d'estimation de l'état de charge d'une cellule d'une batterie comportent :

10 a) l'acquisition, à un instant k , d'une valeur mesurée y_k de la tension entre des bornes de la cellule, et d'une intensité mesurée i_k du courant de charge ou de décharge de la cellule,

b) l'estimation de l'état de charge SOC_k de la cellule, à l'instant k , à partir de la valeur mesurée y_k , de l'intensité mesurée i_k et d'une capacité $C_{n,k3}$ de la cellule, cette
15 capacité $C_{n,k3}$, exprimée en Ah, représentant la quantité maximale d'énergie électrique stockable dans la cellule à l'instant $k3$, l'instant $k3$ étant l'instant auquel la capacité $C_{n,k3}$ a été estimée le plus proche de l'instant k , et

c) l'estimation de la capacité $C_{n,k3}$ à un instant $k3$, les instants $k3$ étant moins fréquent que les instants k , cette estimation comportant :

- 20
- le calcul d'une prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ à l'aide d'un modèle d'état qui relie la capacité $C_{n,k3}$ à la capacité $C_{n,k3-1}$ de cette même cellule à un instant précédent $k3-1$, puis
 - la correction de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ en fonction d'une intensité mesurée, à l'instant le plus proche de l'instant $k3$, du courant de charge ou de
25 décharge de la cellule.

[003] Un tel procédé est par exemple décrit dans le paragraphe 4.2 de la partie 3 de l'article suivant : L. Plett, et al. : « *Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs* », journal of Power Sources, 2004, page 252-292. Par la suite, cet article est désigné par l'abréviation « Plett
30 2004 ».

[004] De l'état de la technique est également connu de US2012/3168010A1 et US2012/133369A1.

[005] L'invention vise à améliorer le procédé décrit dans le paragraphe 4.2 de Plett 2004 afin d'augmenter la précision de l'estimation de l'état de charge de la cellule tout
35 en diminuant la puissance de calcul requise pour mettre en œuvre ce procédé. Elle a donc pour objet un tel procédé d'estimation conforme à la revendication 1.

[006] Dans le procédé revendiqué, le modèle d'observation pour calculer la prédiction \hat{Z}_{k3} est une fonction linéaire de la capacité $C_{n,k3}$. Par conséquent, le calcul de la prédiction \hat{Z}_{k3} n'est pas entaché d'erreurs liées à la linéarisation du modèle
40 d'observation autour de la valeur $C_{n,k3}$. A l'inverse, le modèle d'observation décrit au chapitre 4.2.2 de Plett 2004 est non linéaire et doit donc nécessairement être

linéarisé autour de la capacité $C_{n,k3}$. Une telle linéarisation se traduit nécessairement par des erreurs d'estimation sur la capacité corrigée $C_{n,k3}$. De plus, cette opération de linéarisation du modèle d'observation consomme de la puissance de calcul.

[007] Les modes de réalisation de ce procédé automatique d'estimation peuvent
5 comporter une ou plusieurs des caractéristiques des revendications dépendantes.

[008] Ces modes de réalisation du procédé automatique d'estimation présentent en outre les avantages suivants :

- Le fait de déclencher l'estimation de la capacité $C_{n,k3}$ automatiquement en réponse au franchissement d'un seuil permet d'adapter automatiquement la fréquence
10 d'exécution de cette estimation à l'utilisation actuelle de la cellule. Cela permet notamment d'éviter d'estimer la capacité $C_{n,k3}$ lorsque cela n'est pas nécessaire et donc de limiter la puissance de calcul requise pour exécuter ce procédé sans pour autant détériorer la précision de l'estimation de cette capacité. De plus, déclencher l'estimation de la capacité $C_{n,k3}$ seulement lorsqu'un seuil d'état de charge ou un seuil
15 de tension ou un seuil de quantité de charges débitées est franchi permet de réaliser une seule estimation par cycle de charge et de décharge de la cellule, ce qui est largement suffisant pour estimer avec précision cette capacité.

- Utiliser N mesures de l'intensité i_k réalisée entre deux estimations successives de la capacité $C_{n,k3}$ pour estimer cette capacité permet d'augmenter la précision de cette
20 estimation.

- Utiliser des premier et second seuils prédéterminés qui délimitent un cycle de décharges de la cellule presque complet permet d'estimer la capacité $C_{n,k3}$ en tenant compte de l'ensemble des valeurs mesurées durant ce cycle presque complet de décharge de la cellule. Cela augmente la précision de l'estimation de la capacité $C_{n,k3}$.

- Dans Plett 2004, la prédiction $C_{n,k3}$ est corrigée en fonction de la covariance du bruit sur la mesure d'une grandeur d_{k3} qui n'est pas mesurée. Dans ces conditions, il est très difficile de déterminer la covariance du bruit de mesure de cette grandeur d_{k3} . À l'inverse, dans le procédé revendiqué, c'est la covariance du bruit sur la mesure de l'intensité i_k qui est utilisée. Cette covariance du bruit de mesure de l'intensité i_k est
30 facile à déterminer expérimentalement par des tests réalisés sur l'ampèremètre utilisé pour mesurer l'intensité i_k ou à partir de données fournies par le constructeur de l'ampèremètre. Cela rend donc la mise en œuvre du procédé revendiqué beaucoup plus facile que la mise en œuvre du procédé décrit dans Plett 2004.

[009] L'invention a également pour objet un support d'enregistrement d'informations
35 comportant des instructions pour l'exécution du procédé automatique d'estimation ci-dessus lorsque ces instructions sont exécutées par un calculateur électronique.

[0010] L'invention a également pour objet un système de gestion d'une batterie conforme à la revendication 11.

[0011] Enfin, l'invention a également pour objet un véhicule automobile comportant
40 le système revendiqué de gestion de la batterie.

[0012] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en se référant aux dessins sur lesquels :

- 5 - la figure 1 est une illustration schématique partielle d'un véhicule automobile équipé d'une batterie électrique,
- la figure 2 est une illustration schématique d'un modèle électrique d'une cellule de la batterie du véhicule de la figure 1 ;
- la figure 3 est une illustration schématique d'un agencement d'estimateurs utilisé pour estimer l'état de charge d'une cellule de la batterie du véhicule de la figure 1,
- 10 - les figures 4 à 9 représentent des équations de différents modèles d'état et d'observation utilisés par les estimateurs de la figure 3 ;
- la figure 10 est un organigramme d'un procédé d'estimation de l'état de charge d'une cellule à l'aide des estimateurs de la figure 3 ;
- la figure 11 est un organigramme d'un procédé de détermination de l'état de charge
15 de la batterie du véhicule de la figure 1 ;
- la figure 12 est un organigramme d'un procédé de planification des instants de rafraîchissement des estimations des états de charge de différentes cellules d'une batterie ;
- la figure 13 est un chronogramme illustrant différents instants de
20 rafraîchissement planifiés à l'aide du procédé de la figure 12;
- la figure 14 est une illustration schématique d'un autre agencement d'estimateurs utilisé pour estimer l'état de charge d'une cellule de la batterie du véhicule de la figure 1;
- les figures 15 et 16 représentent, respectivement, un modèle d'état et un modèle
25 d'observation utilisé par les estimateurs de la figure 14 ;
- la figure 17 est un organigramme d'un procédé d'estimation de l'état de charge d'une cellule à l'aide des estimateurs de la figure 14 ;
- la figure 18 est une illustration d'un autre modèle d'état possible pour prédire la capacité et la résistance interne d'une cellule d'une batterie.

30 [0013] Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments. Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détail.

[0014] Dans cette description par « puissance de calcul », on désigne le nombre d'opérations à exécuter par un calculateur électronique. Ainsi, diminuer la puissance
35 de calcul signifie diminuer le nombre d'opérations à réaliser pour atteindre le même résultat ou un résultat de même nature.

[0015] La figure 1 représente un véhicule automobile 2 à tractions électriques plus connu sous le terme de « véhicule électrique ». Les véhicules électriques sont bien connus et seuls les éléments structurels nécessaires pour comprendre la suite de
40 cette description sont présentés. Le véhicule 2 comporte :

- un moteur électrique 4, apte à entraîner en rotation des roues motrices 6 pour faire rouler le véhicule 2 sur une chaussée 8, et

- une batterie 10 qui alimente en énergie électrique le moteur 4.

[0016] La batterie 10 comporte deux bornes 12, 14 de raccordement électrique et plusieurs cellules électriques raccordées électriquement entre ces bornes 12 et 14. Les bornes 12 et 14 sont raccordées aux charges électriques à alimenter. Ici, elles sont donc notamment raccordées au moteur électrique 4.

[0017] Pour simplifier la figure 1, seules quatre cellules électriques 18 à 21 sont représentées. Typiquement, ces cellules électriques sont regroupées en plusieurs étages et ces étages sont raccordés en série entre les bornes 12 et 14. Ici, seuls deux étages sont représentés. Le premier étage comporte les cellules 18 et 19, et le second étage comporte les cellules 20 et 21. Chaque étage comporte plusieurs branches raccordées en parallèle. Chaque branche d'un étage comporte une cellule électrique ou plusieurs cellules électriques en série. Ici, le premier étage comporte deux branches, et chaque branche comporte une seule cellule électrique. Le deuxième étage est structurellement identique au premier étage dans l'exemple représenté sur la figure 1.

[0018] Ici, toutes les cellules de la batterie 10 sont structurellement identiques aux tolérances de fabrication près. Par conséquent, seule la cellule 18 est maintenant décrite plus en détail.

[0019] La cellule 18 comporte deux bornes de raccordement électrique 30, 32 qui la raccorde électriquement aux autres cellules et aux bornes 12 et 14 de la batterie 10. La cellule 18 est aussi fixée mécaniquement, sans aucun degré de liberté aux autres cellules de la batterie 10 pour former ce que l'on appelle fréquemment un « pack » de cellules. La cellule 18 est capable de stocker de l'énergie électrique lorsqu'elle n'est pas utilisée. Cette énergie électrique stockée est ensuite utilisée pour alimenter le moteur 4, ce qui décharge la cellule 18. En alternance, la cellule 18 peut aussi recevoir de l'énergie électrique ce qui la charge. La décharge complète d'une cellule suivie de sa recharge complète constitue ce que l'on appelle un cycle de charge/décharge appelé simplement par la suite « cycle d'une cellule ».

[0020] La cellule 18 est une cellule de type connu, par exemple, il s'agit d'une cellule LiPB (Lithium-ion Polymer Battery) ou autre.

[0021] La cellule 18 se caractérise par une capacité nominale initiale C_n^{ini} , une résistance interne initiale RO^{ini} , une intensité I_{max} de courant débité, une tension maximale U_{max} , une tension minimale U_{min} et une fonction $OCV(SOC_k)$. La capacité C_n^{ini} est la capacité initiale de la cellule 18. La capacité d'une cellule représente la quantité maximale d'énergie électrique qui peut être stockée dans cette cellule. Cette capacité est exprimée en Ah. Au fur et à mesure que la cellule 18 vieillit, c'est-à-dire au fur et à mesure que le nombre de cycles de charge et de décharge augmente, la capacité de la cellule diminue. À l'instant k , la capacité nominale de la cellule 18 est notée $C_{n,k}$ par la suite.

[0022] La résistance interne initiale RO^{ini} est la valeur de la résistance interne de la cellule 18 avant que celle-ci ne commence à vieillir. La résistance interne d'une cellule est une grandeur physique que l'on retrouve dans la plupart des modèles électriques d'une cellule électrique. Lorsque la cellule vieillit, typiquement, la résistance interne augmente. À l'instant k , la résistance interne de la cellule 18 est notée RO_k .

[0023] I_{max} est l'intensité maximale du courant qui peut être délivrée par la cellule 18 sans l'endommager.

[0024] U_{max} est la tension maximale qui peut être présente en permanence entre les bornes 30 et 32 de la cellule sans l'endommager.

[0025] La tension U_{min} est la tension minimale entre les bornes 30 et 32 lorsque la cellule 18 est complètement déchargée. Par la suite, on considère que I_{max} , U_{max} , U_{min} sont des grandeurs physiques constantes qui ne varient pas au cours du temps.

[0026] $OCV(SOC_k)$ est une fonction prédéterminée qui retourne la tension à vide de la cellule 18 en fonction de son état de charge SOC_k . La tension à vide est la tension mesurable entre les bornes 30 et 32 après que la cellule 18 ait été isolée électriquement de toute charge électrique pendant deux heures.

[0027] L'état de charge à l'instant k de la cellule 18 est noté SOC_k . L'état de charge représente le taux de remplissage de la cellule 18. Il est égal à 100 % lorsque la quantité d'énergie électrique stockée dans la cellule 18 est égale à sa capacité $C_{n,k}$. Il est égal à 0 % lorsque la quantité d'énergie stockée dans la cellule 18 est nulle, c'est-à-dire qu'il ne peut plus être extrait d'énergie électrique de la cellule 18 pour alimenter une charge électrique.

[0028] Les paramètres C_n^{ini} , RO^{ini} , I_{max} , U_{max} , U_{min} et la fonction $OCV(SOC_k)$ sont des paramètres connus de la cellule. Par exemple, ils sont donnés par le constructeur de la cellule ou sont déterminés expérimentalement à partir de mesures réalisées sur cette cellule.

[0029] La batterie 10 comporte également pour chaque cellule :

- un voltmètre qui mesure la tension entre les bornes de cette cellule, et
- un ampèremètre qui mesure l'intensité du courant de charge ou de décharge de cette cellule.

[0030] Pour simplifier la figure 1, seuls un voltmètre 34 et un ampèremètre 36 de la cellule 18 ont été représentés.

[0031] Contrairement aux différents paramètres de la cellule 18 introduits précédemment, l'état de charge SOC_k de la cellule 18 n'est pas mesurable. Il doit donc être estimé. À cet effet, le véhicule 2 comporte un système 40 de gestion de la batterie 10 plus connu sous l'acronyme BMS (« Battery Management System »). Ce système 40 a notamment pour fonction de déterminer l'état de charge de la batterie 10 ainsi que l'état de santé de cette batterie. Pour déterminer cet état de charge et cet état de santé, le système 40 est capable d'estimer l'état de charge et l'état de santé de chaque cellule de la batterie 10. L'état de santé d'une cellule représente l'état d'avancement du vieillissement de cette cellule. Ici, l'état de santé d'une cellule,

à l'instant k , est noté SOH_k . Par la suite, il est mesuré par le rapport $C_{n,k}/C_n^{ini}$. Pour calculer l'état de santé d'une cellule, le système 40 est donc aussi capable d'estimer la capacité $C_{n,k}$ de cette cellule à l'instant courant k .

[0032] Pour réaliser ces différentes estimations, le système 40 est électriquement
5 raccordé à chaque voltmètre et chaque ampèremètre de la batterie 10 pour acquérir les mesures de la tension et de l'intensité du courant entre les bornes de chaque cellule.

[0033] Ici, le système 40 comporte une mémoire 42 et un calculateur électronique 44 programmable, apte à exécuter des instructions enregistrées dans la mémoire 42. À
10 cet effet, la mémoire 42 comporte les instructions nécessaires pour l'exécution des procédés des figures 10 à 12 et/ou de la figure 17. Cette mémoire 42 comporte aussi les valeurs initiales des différents paramètres nécessaires à l'exécution de ces procédés. La structure du système 40 est donc identiques ou similaire à celles des systèmes connus de gestion d'une batterie et n'est pas décrite plus en détail.

[0034] La figure 2 représente un modèle électrique 50 de la cellule 18. Ce modèle est connu sous le terme de « Modèle de Thévenin du premier ordre » ou « Lumped parameter model ». Il comporte successivement raccordé en série en partant de la
15 borne 32 jusqu'à la borne 30 :

- un générateur 52 de la tension à vide $OCV(SOC_k)$,
- 20 - un circuit RC parallèle 54, et
- une résistance interne 56 appelée par la suite, à l'instant k , « résistance interne RO_k ».

[0035] Le circuit 54 comporte un condensateur de capacité C_D raccordé en parallèle avec une résistance de valeur R_D . Par la suite, on considère que ces deux
25 paramètres C_D et R_D du modèle 50 sont connus et constants au cours du temps. La tension à l'instant k aux bornes du circuit 54 est notée $V_{D,k}$. La valeur à l'instant k de la tension entre les bornes 30 et 32 de la cellule 18 est notée y_k et l'intensité, au même instant, du courant de charge ou de décharge de la cellule 18 est notée i_k .

[0036] La figure 3 représente un premier mode de réalisation d'un agencement
30 d'estimateurs implémenté dans le système 40 pour estimer l'état de charge et l'état de santé de la cellule 18. Chaque estimateur est implémenté sous la forme d'un algorithme d'estimation exécuté par le calculateur. Ainsi, on parlera pas la suite aussi bien « d'exécution d'un estimateur » que « d'exécution d'un algorithme d'estimation ». Dans ce premier mode de réalisation, le système 40 comporte un estimateur 60 de
35 l'état de charge SOC_k et de la tension $V_{D,k}$ à partir de la valeur mesurée y_k de la tension et de l'intensité mesurée i_k . L'estimateur 60 est ici implémenté sous la forme d'un filtre de Kalman. Il utilise donc un modèle d'état 62 (figure 4) et un modèle d'observation 64 (figure 5). Dans ces figures 4 et 5, les équations de ces modèles sont représentées en utilisant les notations précédemment définies. Les notations
40 RO_{k2} et $C_{n,k3}$ représentent, respectivement, la capacité et la résistance interne de la cellule 18, respectivement, à des instants $k2$ et $k3$. Ces instants $k2$ et $k3$ sont définis par la suite. De plus, dans le modèle 62, x_k désigne le vecteur d'état $[SOC_k, V_{D,k}]^T$ à

l'instant k . Dans cette description, le symbole « T » désigne l'opération transposée mathématique. L'opération multiplication est représentée par l'opérateur « \cdot » ou « $*$ ».

[0037] Par la suite, on considère que l'origine des temps correspond à la valeur nulle de l'instant k . Dans ces conditions, l'instant k courant est égal à kT_e , où T_e est la période d'échantillonnage des mesures des ampèremètres et voltmètres de la batterie 10. Ainsi, T_e est la période de temps qui sépare deux instants quelconques successifs k et $k-1$ d'acquisition de la tension et de l'intensité du courant par le système 40. La période T_e est typiquement une constante comprise entre 0,1 s et 10 s. Ici, la période T_e est égale à 1 s à plus ou moins 20 % près. Par exemple, T_e est égale à une seconde.

[0038] Dans le modèle 62, w_k est un vecteur de bruit d'état. Ici, le bruit w_k est un bruit blanc gaussien centré. Ce bruit représente l'incertitude sur le modèle utilisé. La matrice de covariance, à l'instant k , du bruit w_k est notée Q_k . Elle est définie par la relation suivante : $Q_k = E(w_k * w_k^T)$, où $E(\dots)$ est la fonction espérance mathématique.

15 Le modèle 62 s'écrit également sous la forme $X_{k+1} = F_k X_k + B_k i_k + w_k$, où :

- F_k est la matrice de transition d'état à l'instant k ,
- B_k est le vecteur de commande à l'instant k .

[0039] Le modèle 62 permet notamment de prédire l'état de charge SOC_{k+1} à l'instant $k+1$ à partir de l'état de charge précédant SOC_k .

20 [0040] Le modèle 64 permet de prédire la valeur y_k de la tension à l'instant k à partir de l'état de charge SOC_k , de la tension $V_{D,k}$ et de l'intensité mesurée i_k . Dans ce modèle, v_k est un bruit de mesure blanc gaussien centré. La matrice de covariance du bruit v_k à l'instant k est notée R_k par la suite. Dans le cas particulier décrit ici, cette matrice R_k est une matrice à une seule colonne et à une seule ligne. Elle est définie par la relation $R_k = E(v_k * v_k^T)$. Ce bruit v_k est indépendant du bruit w_k et du vecteur d'état initial x_0 .

[0041] On notera que le modèle 64 est non linéaire, car la fonction $OCV(SOC_k)$ est généralement non linéaire. À cause de cela, l'estimateur 60 implémente la version étendue du filtre de Kalman, plus connu sous l'acronyme EKF (Extended Kalman Filter). Dans cette version étendue, on se ramène à un modèle linéaire d'observation de la forme $y_k = H_k X_k + RO_{k2} \cdot i_k + v_k$ en linéarisant le modèle 64 au voisinage du vecteur x_k . Typiquement, le modèle 64 est développé en série de Taylor au voisinage du vecteur x_k . Puis on néglige les contributions des dérivées à partir du second ordre. Ici, la matrice H_k est donc égale à la dérivée première de la fonction OCV au voisinage de l'état de charge SOC_k . Cette linéarisation du modèle 64 est typiquement réalisée pour chaque nouvelle valeur de l'état de charge SOC_k .

[0042] L'estimateur 60 a besoin de connaître la capacité $C_{n,k3}$ et la résistance interne RO_{k2} pour être capable d'estimer l'état de charge SOC_{k+1} . La capacité et la résistance interne de la cellule 18 varient au fur et à mesure qu'elle vieillit. Pour tenir compte de ce vieillissement, la capacité et la résistance interne de la cellule 18 sont estimées, respectivement, à des instants $k3$ et $k2$. Ici, un estimateur 66 estime la résistance interne RO_{k2} à partir de la valeur mesurée y_{k2} , de l'intensité mesurée i_{k2} et de l'état de

charge SOC_{k2} . Un autre estimateur 68 estime la capacité $C_{n,k3}$ à partir de l'intensité i_{k3} et de l'état de charge SOC_{k3} .

[0043] La résistance interne et la capacité de la cellule 18 varient plus lentement que son état de charge. Ainsi, pour limiter la puissance de calcul requise pour estimer l'état de charge de la cellule sans pour autant dégrader la précision de cette estimation, les estimateurs 66 et 68 sont exécutés moins fréquemment que l'estimateur 60. Par la suite, les instants d'exécution des estimateurs 66 et 68 sont notés, respectivement, $k2$ et $k3$ pour les distinguer des instants k . Ici, l'ensemble des instants $k2$ et l'ensemble des instants $k3$ sont des sous-ensembles de l'ensemble des instants k . Entre deux instants successifs $k2$ et $k2-1$ et entre deux instants successifs $k3$ et $k3-1$, il s'écoule donc plusieurs périodes T_e et plusieurs instants k .

[0044] Ces estimateurs 66 et 68 sont aussi implémentés chacun sous la forme d'un filtre de Kalman. L'estimateur 66 utilise un modèle d'état 70 (figure 6) et un modèle d'observation 72 (figure 7). Dans ces modèles, les bruits $w_{2,k2}$ et $v_{2,k2}$ sont des bruits blancs gaussiens centrés. Les covariances des bruits $w_{2,k2}$ et $v_{2,k2}$ sont notées, respectivement, $Q_{2,k2}$ et $R_{2,k2}$ par la suite. Le modèle 72 d'observation permet de prédire la valeur d'une grandeur physique u_{k2} directement mesurable. La grandeur physique u_{k2} est ici la somme des N dernières valeurs mesurées y_k . Elle est définie par la relation suivante :

$$u_{k2} = \sum_{m=k-N}^k y_k$$

[0045] N est un entier strictement supérieur à un qui est compté comme cela sera décrit plus loin. Dans la relation ci-dessus et dans le modèle 72, l'instant k est égale à l'instant $k2$.

[0046] Le modèle 72 tient compte non seulement de l'état de charge SOC_k , de la tension $V_{D,k}$ et de l'intensité mesurée i_k à l'instant $k = k2$ mais également des N précédentes estimations de l'estimateur 60 et des N précédentes intensités mesurées, comprises entre les instants $k2$ et $k2-1$. Le fait de prendre en compte les mesures et estimations intermédiaires entre les instants $k2$ et $k2-1$, permet d'augmenter la précision de l'estimation de la résistance interne RO_{k2} .

[0047] L'estimateur 68 utilise un modèle d'état 74 (figure 8) et un modèle d'observation 76. Dans les modèles 74 et 76, les bruits $w_{3,k3}$ et $v_{3,k3}$ sont des bruits blancs gaussiens centrés. Les covariances des bruits $w_{3,k3}$ et $v_{3,k3}$ sont notées respectivement $Q_{3,k3}$ et $R_{3,k3}$ par la suite. On remarquera que le modèle 76 est un modèle linéaire de sorte qu'un simple filtre de Kalman peut être utilisé pour l'estimateur 68 au lieu d'un filtre de Kalman étendu.

[0048] Le modèle 76 d'observation permet d'estimer une grandeur physique z_{k3} directement mesurable. La grandeur physique z_{k3} est ici la somme des N dernières intensités mesurées i_k . Elle est définie par la relation suivante :

$$z_{k3} = \sum_{m=k-N}^{m=k-1} i_m$$

[0049] Dans la relation ci-dessus et dans le modèle 76, l'instant k est égal à l'instant k3. Cette grandeur physique z_{k3} tient compte non seulement de l'intensité mesurée i_{k-1} à l'instant k-1 précédant l'instant k3 mais également de N précédentes intensités mesurées entre les instants k3 et k3-1. Ici, N est un entier strictement supérieur à un

5

qui est compté comme cela sera décrit plus loin. Il n'est pas nécessairement égal au N introduit dans le modèle 72. Le fait de prendre en compte des mesures et estimations intermédiaires entre les instants k3 et k3-1, permet d'augmenter la précision de l'estimation de la capacité C_{n,k3}.

[0050] Le fonctionnement des estimateurs 60, 66 et 68 va maintenant être décrit à l'aide du procédé de la figure 10 et dans le cas particulier de l'estimation de l'état de charge de la cellule 18.

10

[0051] Le procédé débute par une phase 100 de réglage des différentes matrices de covariance nécessaires pour exécuter les estimateurs 60, 66 et 68. Plus précisément, lors d'une opération 102, les matrices de covariance Q_k et R_k de l'estimateur 60 sont automatiquement réglées à l'aide des relations suivantes : Q_k = [N₀G_{0,k}(N₀)]⁻¹ et R_k = I, où :

15

- N₀ est un entier prédéterminé strictement supérieur à 1,
- I est la matrice identité, et
- G_{0,k}(N₀) est défini par la relation suivante :

20

$$G_{0,k}(N_0) = \sum_{i=0}^{N_0-1} (F_k^T)^i H_k^T H_k (F_k)^i$$

[0052] N₀ est généralement choisi lors de la conception du système 40 puis figé une fois pour toute. Généralement, N₀ est inférieur à 100. Par exemple, N₀ est compris entre 5 et 15. Ici, N₀ est choisi égal à 10.

[0053] Le fait d'utiliser les relations précédentes simplifie considérablement le réglage des matrices Q₀ et R₀ ainsi que le réglage des matrices Q_k et R_k comme on le verra pas la suite. En effet, le seul paramètre à choisir est la valeur de l'entier N₀.

25

[0054] Lors d'une opération 104, les covariances Q_{2,0} et R_{2,0} sont aussi réglées. Par exemple, Q_{2,0} est choisi égal à [(β*ROⁱⁿⁱ)/(3*N^{C_{ool}}*N_S)]², où :

- β est une constante choisie supérieure ou égale à 0,3 ou 0,5 et, de préférence, supérieur à 0,8 et généralement inférieure à trois,
- N^{C_{ool}} est le nombre prévu de cycles de charge et de décharge de la cellule 18 avant que celle-ci atteigne sa fin de vie, et

30

- N_s est le nombre de fois où la résistance interne est estimée par cycle de charge et de décharge de la cellule 18.

[0055] La constante β représente, exprimée en pourcentage divisé par 100, l'écart entre la valeur de la résistance interne initiale RO^{ini} et sa valeur en fin de vie.

5 Typiquement, β est fixé par l'utilisateur ou mesuré expérimentalement. N_{eol}^c est un nombre de cycles qui peut être mesuré expérimentalement ou obtenu à partir des données du constructeur de la cellule 18. N_s est fixé par le procédé d'estimation de l'état de charge mis en œuvre par le calculateur 44. Dans ce mode de réalisation, comme on le verra plus loin, la résistance interne est estimée une seule fois par cycle. Par conséquent, N_s est pris égale à 1.

[0056] A titre d'illustration, la covariance $R_{2,0}$ est choisie égale à $(2\varepsilon_m U_{max}/300)^2$, où ε_m est l'erreur maximale du voltmètre 34 exprimée en pourcentage.

[0057] Par la suite, les covariances $Q_{2,k2}$ et $R_{2,k2}$ sont considérées comme étant constantes et égales, respectivement, à $Q_{2,0}$ et $R_{2,0}$.

15 [0058] Lors d'une opération 106, les covariances $Q_{3,0}$ et $R_{3,0}$ sont réglées. Par exemple, la covariance $Q_{3,0}$ est prise égale à $[\gamma * C_n^{ini} / (3 * N_{eol}^c * N_s)]^2$, où γ représente, exprimée en pourcentage divisé par 100, l'écart entre la capacité C_n^{ini} et la capacité de la cellule 18 en fin de vie. γ est une constante choisie par l'utilisateur entre 0,05 et 0,8 et, de préférence, entre 0,05 et 0,3. Ici, $\gamma = 0,2$.

20 [0059] La covariance $R_{3,0}$ est par exemple choisie égale à $[2 * \varepsilon_{im} * I_{max} / 300]^2$, où ε_{im} est l'erreur maximale de l'ampèremètre 36 exprimé en pourcentage.

[0060] Par la suite, les covariances $Q_{3,k3}$ et $R_{3,k3}$ sont considérées comme étant constantes et prises égales, respectivement, à $Q_{3,0}$ et $R_{3,0}$.

25 [0061] Une fois les matrices de covariance réglées, l'estimation de l'état de charge de la cellule 18 peut commencer.

[0062] Lors d'une phase 110, à chaque instant k , le voltmètre 34 et l'ampèremètre 36 mesurent, respectivement, la valeur y_k et l'intensité i_k et ces mesures sont immédiatement acquises par le système 40 et enregistrées dans la mémoire 42. La phase 110 est réitérée à chaque instant k .

30 [0063] En parallèle, l'estimateur 60 exécute une phase 114 d'estimation de l'état de charge à l'instant k de la cellule 18.

[0064] Pour cela, lors d'une étape 116, l'estimateur 60 calcule une prédiction $S\hat{O}C_{k/k-1}$ et une prédiction $V_{D,k/k-1}$ de, respectivement, l'état de charge de la cellule 18 et la tension V_D aux bornes du circuit 54 à l'instant k . Dans les notations utilisées ici, l'indice $k/k-1$ indique que cette prédiction est faite en prenant en compte seulement 35 les mesures réalisées entre les instants 0 et $k-1$. On parle alors de prédiction a priori. L'indice k/k indique que la prédiction à l'instant k prend en compte l'ensemble des mesures réalisées entre les instants 0 et k . On parle alors de prédiction a posteriori. Les prédictions $S\hat{O}C_{k/k-1}$ et $V_{D,k/k-1}$ sont calculées à l'aide du modèle 62, de l'intensité 40 mesurée i_{k-1} et de la capacité $C_{n,k3}$. On notera que dans le modèle 62, la matrice F_{k-1} de transition d'état est constante quel que soit k et n'a donc pas besoin d'être réévaluée à chaque instant k .

[0065] Lors d'une étape 117, l'estimateur 60 calcule également la prédiction $P_{k/k-1}$ d'une matrice de covariance d'erreur d'estimation sur le vecteur d'état x_k . Typiquement, cela est réalisé à l'aide de la relation suivante :

$$P_{k/k-1} = F_{k-1}P_{k-1/k-1}F_{k-1}^T + Q_{k-1}$$

5 [0066] Ces différentes matrices F_{k-1} , $P_{k-1/k-1}$ et Q_{k-1} ont déjà été précédemment définies.

[0067] Ensuite, lors d'une étape 118, l'estimateur 60 construit la matrice H_k en linéarisant le modèle 64 autour des prédictions $\hat{S}OC_{k/k-1}$ et $V_{D,k/k-1}$.

[0068] Lors d'une étape 120, les matrices de covariance Q_k et R_k sont
10 automatiquement mises à jour. Ici, pour cela, l'étape 120 est identique à l'opération 102 en prenant en compte cette fois-ci la matrice H_k construite lors de l'étape 118.

[0069] Après cela, lors d'une étape 122, l'estimateur 60 corrige les prédictions $\hat{S}OC_{k/k-1}$ et $V_{D,k/k-1}$ en fonction d'un écart entre la valeur mesurée y_k et une valeur \hat{y}_k prédite à partir du modèle 64. Cet écart est connu sous le nom de « innovation ».

15 Cette étape 122 comprend typiquement :

- une opération 124 de calcul de la prédiction \hat{y}_k , puis

- une opération 126 de correction des prédictions $\hat{S}OC_{k/k-1}$ et $V_{D,k/k-1}$ et de la matrice $P_{k/k-1}$ pour obtenir les prédictions corrigées $\hat{S}OC_{k/k}$, $V_{D,k/k}$ et $P_{k/k}$.

[0070] Lors de l'opération 124, la prédiction \hat{y}_k est calculée à l'aide du modèle 64
20 dans lequel la valeur de l'état de charge est prise égale à $\hat{S}OC_{k/k-1}$ et la valeur de la tension $V_{D,k}$ est prise égale à $V_{D,k/k-1}$. L'écart entre la valeur mesurée y_k et sa prédiction \hat{y}_k est notée E_k par la suite.

[0071] De nombreuses méthodes existent pour corriger les estimations à priori $\hat{S}OC_{k/k-1}$ et $V_{D,k/k-1}$ à partir de l'innovation E_k . Par exemple, lors de l'opération 126, ces
25 estimations sont corrigées à l'aide du gain de Kalman K_k . Le gain K_k est donné par la relation suivante $K_k = P_{k/k-1}H_k^T(H_kP_{k/k-1}H_k^T + R_k)^{-1}$. Ensuite, les prédictions a priori sont corrigées à l'aide de la relation suivante : $x_{k/k} = x_{k/k-1} + K_kE_k$.

[0072] La matrice $P_{k/k-1}$ est corrigée à l'aide de la relation suivante :
 $P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_kH_kP_{k/k-1}$.

30 [0073] Les étapes 116 à 122 sont réitérées à chaque instant k où une nouvelle estimations de l'état de charge de la cellule 18 doit être réalisée. Lors de chaque nouvelle itération, le vecteur d'état x_{k-1} est initialisé avec les valeurs obtenues lors de la précédente itération de la phase 114 pour la cellule 18.

[0074] En parallèle, lors d'une étape 130, le calculateur 44 compare chaque nouvelle
35 mesure de l'intensité i_k à un seuil SH_i de courant prédéterminé. Tant que l'intensité mesurée ne dépasse pas ce seuil SH_i , l'exécution de l'estimateur 66 est inhibée. À l'inverse, dès que l'intensité i_k mesurée dépasse ce seuil SH_i , alors l'estimateur 66 est immédiatement exécuté. Le seuil SH_i est généralement supérieur à $I_{max}/2$ et, avantageusement supérieur à $0,8 \cdot I_{max}$ ou $0,9 \cdot I_{max}$.

40 [0075] L'estimateur 66 exécute une phase 140 d'estimation de la résistance interne RO_{k2} à l'instant $k2$. Ici, l'instant $k2$ est égal à l'instant k où l'intensité i_k franchit le seuil SH_i .

[0076] Pour cela, lors d'une étape 142, l'estimateur 66 calcule la prédiction a priori $\hat{R}_{k/k-1}$ de la résistance interne à partir du modèle 70.

[0077] Ensuite, lors d'une étape 144, l'estimateur 66 calcule la prédiction $P_{2,k2/k2-1}$ de la matrice de covariance de l'erreur d'estimation sur la résistance interne. Par exemple, cette prédiction est calculée à l'aide de la relation suivante : $P_{2,k2/k2-1} = P_{2,k2-1/k2-1} + Q_{2,0}$. On notera qu'ici, le modèle 72 est une fonction linéaire de la variable d'état. Il n'est donc pas nécessaire de la linéariser au voisinage de la prédiction $\hat{R}_{k2/k2-1}$ pour obtenir la matrice $H_{2,k2}$. Ici, cette matrice $H_{2,k2}$ est égale à $-N$.

[0078] Lors d'une étape 148, l'estimateur 66 corrige la prédiction $\hat{R}_{k2/k2-1}$ en fonction de l'écart entre la grandeur physique mesurée u_{k2} et une prédiction \hat{u}_{k2} de cette même grandeur physique. Ici, N est une constante prédéterminée choisie strictement à un et, de préférence, supérieure à 10 ou 30. La grandeur u_{k2} est acquise par l'estimateur 66 au fur et à mesure que les valeurs y_k sont mesurées et acquises.

[0079] Plus précisément, lors d'une opération 150, le calculateur 44 acquiert la grandeur mesurée u_{k2} et calcule la prédiction \hat{u}_{k2} . L'acquisition de la grandeur u_{k2} est réalisée en sommant les N dernières mesures de la valeur mesurée y_k . La prédiction \hat{u}_{k2} est calculée à l'aide du modèle 72. Dans ce modèle 72, la valeur RO_{k2} est prise égale à la valeur $RO_{k2/k2-1}$ précédemment calculée.

[0080] Ensuite, lors d'une opération 152, l'estimateur 66 corrige la prédiction $\hat{R}_{k2/k2-1}$ en fonction de l'innovation E_{k2} . L'innovation E_{k2} est égale à l'écart entre la grandeur mesurée u_{k2} et la grandeur prédite \hat{u}_{k2} . Par exemple, lors de l'opération 152, la même méthode que celle mise en œuvre lors de l'opération 126 est employée. Ainsi, cette opération 152 n'est pas décrite ici plus en détail. Ensuite, la nouvelle estimation $RO_{k2/k2}$ est utilisée lors des exécutions suivantes de l'estimateur 60 à la place de la précédente estimation $RO_{k2-1/k2-1}$.

[0081] Le fait de déclencher l'exécution de l'estimateur 66 uniquement lorsque l'intensité mesurée i_k est élevée permet d'accroître la précision de l'estimation de la résistance interne tout en diminuant en même temps la puissance de calcul nécessaire pour mettre en œuvre ce procédé. En effet, la précision de la mesure de ampèremètre est plus élevée lorsque l'intensité i_k est plus élevée.

[0082] Également en parallèle des phases 110 et 114, le procédé comporte une étape 160 lors de laquelle à chaque instant k , l'estimation SOC_k est comparée à un seuil haut prédéterminé SH_{soc} . Si l'estimation SOC_k descend en dessous de ce seuil SH_{soc} , alors le procédé se poursuit immédiatement par des étapes 162 et 164. Dans le cas contraire, l'étape 160 est réitérée au prochain instant k . Typiquement, le seuil SH_{soc} est compris entre 90 % et 100 %.

[0083] Lors de l'étape 162, le calculateur 44 commence par initialiser un compteur à zéro puis l'incrémente de 1 à chaque nouvelle mesure de l'intensité i_k depuis le début de cette étape. De plus, à chaque instant k , l'intensité mesurée i_k et l'estimation SOC_k générée au même instant sont enregistrées, associée à cet instant k , dans une base de données.

[0084] En parallèle de l'étape 162, lors de l'étape 164, le calculateur 44 compare chaque nouvelle estimation SOC_k à un seuil prédéterminé SL_{soc} . Le seuil SL_{soc} est par exemple compris entre 0 % et 10 %. Tant que l'estimation SOC_k reste supérieure à ce seuil SL_{soc} , l'étape 162 est réitérée à l'instant k suivant. Dans le cas contraire, dès que

5 l'estimation SOC_k pour la cellule 18 descend en dessous de ce seuil SL_{soc} alors, le calculateur 44 déclenche immédiatement l'exécution de l'estimateur 68 et arrête d'incrémenter le compteur. Ainsi, tant que ce seuil SL_{soc} n'est pas franchi, l'exécution de l'estimateur 68 est inhibée.

[0085] L'estimateur 68 estime, lors d'une phase 166, capacité $C_{n,k3}$ à l'instant k3. L'instant k3 est donc égal à l'instant k où l'exécution de l'estimateur 68 est déclenchée.

[0086] Comme pour la phase 140, étant donné que l'estimateur 68 n'est pas exécuté à chaque instant k, l'instant k3-1 ne correspond pas à l'instant k-1. Au contraire, les instants k3 et k3-1 sont séparés par un intervalle de temps supérieur ou égal à NT_e où N est le nombre compté lors de l'étape 162.

[0087] Les paramètres du filtre de Kalman de l'estimateur 68 sont initialisés avec les valeurs précédentes de ces paramètres obtenus à l'issue de la précédente itération à l'instant k3-1 de la phase 166.

[0088] La phase 166 comprend :

- 20 - le calcul, lors d'une étape 170, de la prédiction $C_{n,k3/k3-1}$ à l'aide du modèle 74,
- le calcul, lors d'une étape 172, de la prédiction $P_{3,k3/k3-1}$ de la matrice de covariance de l'erreur d'estimation de la capacité, et
- la correction, lors d'une étape 174, des prédictions $C_{n,k3/k3-1}$ et $P_{3,k3/k3-1}$.

[0089] Lors des étapes 172 et 174, la matrice d'observabilité $H_{3,k3}$ est égale à $[(SOC_k - SOC_{k-N}) * 3600 / (NT_e)]$. N est ici le nombre d'instant k écoulés entre l'instant où l'état de charge estimé est descendu en dessous du seuil SH_{soc} et l'instant où l'état de charge estimé est descendu en dessous du seuil SL_{soc} . La valeur N est égale à la valeur comptée lors de l'étape 162.

[0090] L'étape 174 comprend une opération 176 d'acquisition de la grandeur physique mesurée z_{k3} et de calcul de la prédiction \hat{z}_{k3} de la grandeur z_{k3} . L'acquisition de la grandeur z_{k3} consiste ici à calculer la somme des N dernières intensités mesurées entre les instants k-1 et k-N. La prédiction \hat{z}_{k3} est obtenue à partir du modèle 76.

[0091] Ensuite, lors d'une opération 178, l'estimateur 68 corrige la prédiction $C_{n,k3/k3-1}$ en fonction de l'écart entre la grandeur mesurée z_{k3} et la grandeur prédite \hat{z}_{k3} pour obtenir l'estimation a posteriori de la capacité $C_{n,k3/k3}$. Cette correction est par exemple réalisée comme décrit lors de l'étape 126.

[0092] Ensuite, la capacité $C_{n,k3/k3}$ est transmise à l'estimateur 60 qui l'utilise pour estimer l'état de charge de la cellule 18 aux instants suivants.

40 [0093] Le fait de déclencher l'exécution de l'estimateur 68 uniquement après que la cellule 18 se soit en grande partie déchargée permet d'accroître la précision de

l'estimation tout en diminuant en même temps la puissance de calcul nécessaire pour mettre en œuvre ce procédé.

[0094] À l'issue de la phase 166, lors d'une étape 180, le calculateur calcule l'état de santé SOH_{k3} l'instant $k3$ à l'aide de la formule suivante : $SOH_{k3} = C_{n,k3}/C_n^{ini}$.

5 [0095] La figure 11 représente un procédé de détermination de l'état de charge de la batterie 10. À l'instant k , l'état de charge de la batterie 10 est déterminé à partir de l'état de charge de chacune des cellules de cette batterie. Par exemple, cela est réalisé de la façon suivante. Lors d'une étape 190, le calculateur 44 détermine l'état de charge de chaque étage de la batterie en additionnant l'état de charge de chaque
10 cellule de cet étage.

[0096] Ensuite, lors d'une étape 192, l'état de charge de la batterie est pris égal au plus petit des états de charge d'un étage déterminé lors de l'étape 190.

[0097] Comme illustré par le procédé de la figure 11, la détermination de l'état de charge de charge de la batterie à chaque instant k nécessite de disposer d'une
15 estimation de l'état de charge pour chacune des cellules à l'instant k . Une première solution consiste donc à exécuter en parallèle, pour chacune des cellules, le procédé d'estimation de la figure 10 en exécutant à chaque instant k la phase 114. Toutefois, pour limiter la puissance de calcul requise, sans dégrader la précision de l'état de charge déterminé pour la batterie, il est aussi possible de planifier l'exécution des
20 estimations des états de charge des cellules comme décrit en référence au procédé de la figure 12.

[0098] Le procédé de la figure 12 est décrit dans le cas simplifié où l'on utilise seulement trois niveaux de priorité, appelés respectivement niveau élevé, niveau moyen et niveau faible de priorité. De plus, on prend comme hypothèse que l'état de charge d'une cellule dont le niveau de priorité est élevé doit être estimé à chaque
25 instant k et donc à une fréquence f_e . L'état de charge d'une cellule dont le niveau de priorité est moyen doit seulement être estimé avec une fréquence trois fois plus faible et donc à une fréquence $f_e/3$. Enfin, l'état de charge des cellules de niveau de priorité faible doit être estimé à une fréquence dix fois plus faible est donc à une fréquence
30 $f_e/10$. Dans cet exemple, pour les niveaux de priorité élevé et moyen, il existe un nombre de places limités connus à l'avance. En d'autres termes, le nombre de cellules affectées au niveau de priorité élevé est limité à un nombre maximal prédéterminé à l'avance. Il en est de même pour le nombre de cellules affectés au niveau de priorité moyen.

35 [0099] Pour planifier les instants auxquels doivent être rafraîchies les estimations de l'état de charge de chacune des cellules, le calculateur commence par affecter, lors d'une étape 198, un niveau de priorité à chaque cellule.

[00100] L'étape 198 débute par une opération 200 lors de laquelle le système 40 acquiert la valeur mesurée y_k de la tension entre les bornes de chacune des cellules.

40 [00101] Ensuite, lors d'une opération 202, si la valeur mesurée y_k est au-dessus d'un seuil haut SH_y ou, au contraire, en dessous d'un seuil bas SL_y , alors le calculateur 44 affecte à cette cellule le niveau de priorité élevé tant qu'il reste assez de place dans

ce niveau. Le seuil SH_y est supérieur ou égal à $0,9*U_{max}$ et, de préférence, supérieur à $0,95*U_{max}$. Le seuil SL_y est quant à lui supérieur ou égal à U_{min} , et inférieur à $1,1*U_{min}$, ou $1,05*U_{min}$. Il est important de rafraîchir fréquemment l'estimation de l'état de charge des cellules dont la tension est proche de U_{max} ou au contraire proche de U_{min} . En effet, une erreur sur l'estimation de l'état de charge d'une cellule dans une telle situation peut conduire à une dégradation des propriétés électriques et mécaniques de cette cellule.

5

[00102] Ensuite, pour les autres cellules, lors d'une opération 204, le calculateur 44 calcule l'écart de tensions entre la valeur mesurée actuelle y_k et une précédente valeur y_{k-x} , où X est un entier prédéterminé supérieur ou égal à un et généralement inférieur à 5 ou 10. Ici, $X = 1$.

10

[00103] Lors d'une opération 205, le calculateur 44 identifie des cellules jumelles. Des cellules sont considérées comme étant « jumelles » si, au même instant k, elles ont le même écart de tensions et la même valeur mesurée y_k . Pour cela, lors de l'étape 205, le calculateur 44 compare l'écart de tensions et la valeur mesurée y_k pour une cellule aux écarts de tensions et aux valeurs mesurées y_k pour les autres cellules au même instant afin d'identifier, parmi ces autres cellules, la ou les cellules jumelles de cette cellule. L'identifiant de cette cellule et les identifiants de la ou des cellules identifiées comme étant ses jumelles sont alors regroupés dans un ensemble qui est enregistré dans la mémoire 42. La comparaison ci-dessus est par exemple réalisée pour chacune des cellules de la batterie 10 dont l'identifiant n'a pas déjà été incorporé dans l'un des ensembles enregistrés de cellules jumelles. Par la suite, un niveau de priorité est affecté à une seule des cellules de chaque ensemble de cellules jumelles. Ainsi, l'opération 206 et les étapes 208 et 210 suivantes sont réalisées uniquement pour les cellules qui n'ont pas de cellule jumelle et pour une seule cellule de chaque ensemble de cellules jumelles.

15

20

25

[00104] Lors d'une opération 206, le calculateur classe les cellules par ordre décroissant de valeur absolue de l'écart calculé lors de l'opération 204. Puis, il affecte aux premières cellules de ce classement les places restantes associées à des niveaux de priorité élevés. Ensuite, il affecte les places restantes associées à un niveau de priorité moyen aux cellules suivantes dans ce classement. Enfin, il affecte aux dernières cellules de ce classement le niveau de priorité faible.

30

[00105] Une fois qu'un niveau de priorité a été affecté à chaque cellule, lors d'une étape 208, le calculateur 44 planifie les instants de rafraîchissement des estimations des états de charge des cellules en fonction de leur niveau de priorité. L'étape 208 est réalisée de manière à respecter la fréquence de rafraîchissement des estimations associée à chacun des niveaux de priorité. Pour cela, par exemple, le calculateur 44 réserve d'abord les instants auxquels les estimations des cellules de niveau de priorité élevé doivent être rafraîchies. Ensuite, il réserve les instants auxquels les estimations de l'état de charge des cellules de niveau de priorité moyen doivent être rafraîchies en tenant compte des instants de rafraîchissement déjà réservés. Enfin, il procède de même avec les cellules affectées d'un niveau de priorité faible.

35

40

[00106] Pour illustrer cela, on suppose qu'un niveau de priorité élevé a été affecté à la cellule 18, qu'un niveau de priorité moyen a été affecté aux cellules 19 et 20 et qu'un niveau de priorité faible a été affecté à la cellule 21. De plus, on impose que pendant une période T_e , le calculateur exécute au plus deux fois la phase 114 du procédé de la figure 10. Le résultat obtenu avec ces hypothèses est représenté sur la figure 13. Sur cette figure, les instants k à $k+11$ ont été représentés en abscisse. Au-dessus de chacun de ces instants k , deux cases symbolisent le fait que le calculateur 44 peut, à chaque instant k , exécuter deux fois la phase 114 du procédé de la figure 10. Dans chacune de ces cases, on a indiqué le numéro de la cellule pour lequel la phase 114 est exécutée. Lorsque aucun numéro ne figure dans cette case, cela signifie que le procédé de la figure 10 n'est pas exécuté et donc que la puissance de calcul épargnée peut être utilisée à d'autres fins comme, par exemple, l'exécution des estimateurs 66 et 68.

[00107] Enfin, lors d'une étape 210, pour chaque cellule affectée d'un niveau de priorité, le calculateur 44 exécute la phase 114 à l'instant planifié pour cette cellule. En dehors de ces instants planifiés, le calculateur inhibe l'exécution complète de la phase 114 pour cette cellule. De même, l'exécution de la phase 114 pour les cellules jumelles auxquelles aucun niveau de priorité n'a été affecté est également inhibé.

[00108] En parallèle, lors d'une étape 212, pour chaque cellule jumelle à laquelle aucun niveau de priorité n'a été affecté, l'estimation de l'état de charge de cette cellule est prise égale à la dernière estimation calculée lors de l'étape 210 pour une cellule jumelle de cette cellule. Ainsi, la phase 114 est exécutée pour une seule des cellules jumelles. Cela permet de réduire la puissance de calcul requise pour déterminer l'état de charge de batterie sans dégrader la précision de cette détermination.

[00109] Éventuellement, en parallèle de l'étape 210, à chaque instant k , le calculateur 44 exécute aussi une étape 214 de prédiction de l'état de charge pour chacune des cellules qui ne sont pas traitées lors de l'étape 210 à cet instant k . L'étape 214 consiste à exécuter seulement l'étape 116 de prédiction, sans exécuter l'étape 122 de correction, pour toutes les cellules pour lesquelles, au même instant, la phase 114 complète d'estimation n'est pas exécutée. En effet, l'étape 116 de prédiction est beaucoup moins gourmande en puissance de calcul que l'étape 122 et peut donc être exécutée, par exemple, à chaque instant k . Ainsi, lorsque l'étape 214 est mise en œuvre, on dispose à chaque instant k d'une nouvelle estimation de l'état de charge pour chacune des cellules de la batterie.

[00110] Les étapes 198 et 208 sont réitérées à intervalle régulier pour mettre à jour le niveau de priorité affecté à chacune de ces cellules et donc les fréquences de rafraîchissement de l'estimation de l'état de charge de ces cellules. Ce procédé de planification des instants de rafraîchissement des estimations des états de charge des cellules permet de limiter la puissance de calcul requise sans pour autant dégrader la précision de l'état de charge déterminé pour la batterie. En effet, le procédé de la figure 12 exploite le fait que les cellules dont les écarts de tensions

sont faibles sont des cellules qui se déchargent ou se chargent peu et donc dont l'état de charge ne varie pas rapidement. On peut donc estimer l'état de charge de ces cellules à une fréquence moins élevée sans que cela dégrade la précision de l'état de charge déterminé pour la batterie.

5 [00111] Au cours de l'exécution des procédés des figures 10 et 11, à chaque fois que l'état de charge SOC_k d'une cellule à un instant donné doit être utilisé pour un calcul, l'état de charge SOC_k est pris égal au dernier état de charge estimé ou prédit pour cette cellule. Autrement dit, on considère que l'état de charge reste constant entre deux instants successifs où il est estimé ou prédit.

10 [00112] On notera également qu'à chaque fois que le calculateur 44 exécute la phase 114 d'estimation pour une cellule, il récupère les informations nécessaires pour cette exécution à partir des valeurs obtenues à l'issue de la précédente exécution de cette phase pour la même cellule. C'est notamment le cas par exemple pour les variables d'état. On notera cependant que l'instant d'exécution précédent n'est alors pas
15 nécessairement l'instant $k-1$ mais peut être l'instant $k-3$ ou $k-10$ selon le niveau de priorité affecté à cette cellule.

[00113] De nombreux autres modes de réalisation du procédé d'estimation de l'état de charge d'une cellule sont possibles. Par exemple, la figure 14 représente un autre agencement d'estimateurs. Cet autre agencement est identique à celui de la figure 3
20 sauf que les estimateurs 66 et 68 sont remplacés par un seul estimateur 230. L'estimateur 230 estime simultanément la capacité et la résistance interne de la cellule 18. L'estimateur 230 est exécuté moins fréquemment que l'estimateur 60. Ici, on note k_4 les instants d'exécution de l'estimateur 230 et donc C_{n,k_4} et RO_{k_4} la capacité et la résistance interne estimée à l'instant k_4 . L'ensemble des instants k_4 est
25 un sous-ensemble des instants k .

[00114] L'estimateur 230 estime en même temps la capacité C_{n,k_4} et la résistance interne RO_{k_4} . Cet estimateur 230 implémente un filtre de Kalman qui utilise un modèle d'état 232 (figure 15) et un modèle d'observation 234 (figure 16).

[00115] Le fonctionnement de cet estimateur 230 va maintenant être décrit en
30 référence au procédé de la figure 17 et dans le cas particulier de la cellule 18. Ce procédé de la figure 17 est identique au précédent de la figure 10 sauf que les étapes 130 à 174 sont remplacées par des étapes 240, 242, 244 et une phase 246 d'estimation de la capacité et de la résistance interne.

[00116] Lors de l'étape 240, le calculateur 44 compare à chaque instant k la valeur mesurée y_k à un seuil haut SH_{y_2} . Typiquement, ce seuil SH_{y_2} est supérieur ou également à $0,8 \cdot U_{max}$ ou $0,9 \cdot U_{max}$. Les étapes 242 et 244 sont exécutées uniquement si valeur mesurée y_k descend en dessous de ce seuil SH_{y_2} .

[00117] Lors de l'étape 242, le calculateur 44 commence par initialiser un compteur à zéro puis incrémente ce compteur de 1 à chaque nouvel instant k . De plus, à chacun
40 de ces instants k , l'intensité mesurée i_k , la valeur y_k , l'état de charge SOC_k et la tension estimée $V_{D,k}$ sont enregistrés, associés à cet instant k , dans une base de données.

[00118] En parallèle de l'étape 242, lors de l'étape 244, le calculateur 44 compare, à chaque instant k , la nouvelle valeur mesurée y_k à un seuil bas SL_{y_2} de tension. Ce seuil SL_{y_2} est inférieur ou égal à $1,2*U_{min}$ ou à $1,1*U_{min}$ et supérieur ou égal à U_{min} .

[00119] Dès que la valeur mesurée y_k descend en dessous du seuil SL_{y_2} ,
5 l'incrémentatation du compteur lors de l'étape 242 est arrêtée et l'exécution de l'estimateur 230 est déclenchée. À l'inverse, tant que la valeur mesurée y_k reste supérieure à ce seuil SL_{y_2} , l'exécution de l'estimateur 230 est inhibée.

[00120] L'estimateur 230 exécute la phase 246. Comme précédemment, on note que les instants k_4 et k_4-1 sont séparés par un intervalle de temps supérieur ou également
10 à NT_e , où N est la valeur du compteur incrémenté lors de l'étape 242. Le fonctionnement de l'estimateur 230 se déduit du fonctionnement décrit précédemment pour les estimateurs 66 et 68. Il ne sera donc pas décrit ici plus en détail.

[00121] D'autres modèles électriques et donc d'autres modèles d'état peuvent être
15 utilisés pour estimer l'état de charge de la cellule 18. Par exemple, dans une variante simplifiée, le circuit 54 est omis. À l'inverse, un modèle électrique plus complexe peut contenir plusieurs circuits RC parallèles raccordés électriquement en série les uns avec les autres. Le modèle d'état de la cellule 18 doit alors être modifié en conséquence pour correspondre à ce nouveau modèle électrique de la cellule.
20 Toutefois, tout ce qui a été décrit précédemment s'applique sans difficulté avec un tel modèle d'état modifié. Pour des exemples de modèles d'état modifiés, le lecteur peut se référer à la demande WO2006057468.

[00122] Les paramètres R_D et C_D du modèle 50 peuvent aussi être estimés au lieu d'être considérés comme des paramètres constants prédéterminés. A cet effet, ces
25 deux paramètres R_D et C_D sont par exemple introduits dans le vecteur d'état x_k qui devient alors $[SOC_k, V_{D,k}, R_{D,k} \text{ et } C_{D,k}]^T$. Par exemple, le modèle d'état est modifié pour incorporer les deux équations suivantes $R_{D,k+1} = R_{D,k}$ et $C_{D,k+1} = C_{D,k}$.

[00123] Le vecteur d'état x_k peut aussi être complété par la température de la cellule de manière à estimer cette température en même temps que l'état de charge de cette
30 cellule.

[00124] La cellule peut aussi être équipée de capteurs supplémentaires tel qu'un capteur de température. Dans ce cas, le modèle d'observation est modifié pour tenir compte de ces grandeurs physiques mesurées supplémentaires. Le lecteur peut se
référer à la demande WO2006057468 pour des exemples de modèles d'observation
35 modifiés.

[00125] D'autres modèles électriques possibles pour modéliser la cellule électrique sont également présentés dans la partie 2 de Plett 2004, au chapitre 3.3.

[00126] L'ajustement automatique en continu des matrices de covariance R_k et Q_k peut être réalisé différemment. Par exemple, la méthode dite de « Covariance
40 Matching » décrite dans l'article suivant peut être appliquée : Mehra, R.K : « On the identification of variances and adaptive Kalman Filtering », Automatic Control, IEEE Transaction on, Volume 15, n°2, pages 175-184, avril 1970. Cette méthode s'applique

après un réglage initial des matrices R_0 et Q_0 , par exemple, comme décrit lors de l'opération 102.

[00127] Dans une autre variante, les matrices Q_0 , R_0 , Q_k et R_k ne sont pas réglées comme décrit en référence aux opérations 102 et 120. Par exemple, ces matrices
5 sont réglées en mettant en œuvre une méthode conventionnelle. Dans un cas simplifié, elles sont constantes. Par exemple, la matrice R_0 est alors réglée à partir des données fournies par le constructeur des capteurs ou à partir de tests réalisés sur ces capteurs et la matrice Q_0 par essais successifs.

[00128] L'étape 122 ou 178 de correction de la prédiction peut être réalisée
10 différemment. Par exemple, dans une méthode préférée, la correction de la prédiction de l'état de charge et de la tension $V_{D,k}$, est réalisée en minimisant une fonction de coût J quadratique qui comporte deux termes :

- un terme lié à l'erreur de prédiction de la valeur mesurée, et
- un autre terme lié à l'erreur d'estimation du vecteur d'état.

[00129] Cette méthode est décrite en détail au chapitre 10.5.2 du livre suivant : Y. Bar-Shalom, et Al. : « Estimation With Applications to Tracking and Navigation, Theory Algorithms and Software », Wiley Inter-science, 2001.

[00130] Dans une autre variante, l'estimateur 60 n'est pas implémenté sous la forme d'un filtre de Kalman. Par exemple, l'état de charge est estimée en modélisant son
20 évolution au cours du temps sous la forme d'un filtre RII (Réponse Impulsionnelle Infinie) dont les coefficients sont estimés par la méthode RLS (Recursive Least Square).

[00131] D'autres modèles d'état peuvent être utilisés pour estimer la résistance interne et la capacité de la cellule. Par exemple, le modèle 232 peut être remplacé
25 par un modèle 250, représenté sur la figure 18. Dans le modèle 250, α , β et γ sont des constantes dont les valeurs sont obtenues à partir de données du constructeur de la cellule ou mesurées expérimentalement. Typiquement :

- α est égal à 1 à plus ou moins 30 % près ou 10 % près,
- β est également égal à 1 à plus ou moins 30 % ou 10 %, et
- 30 - γ est typiquement compris entre 0,1 et 0,5. Par exemple, γ est égal à 0,2 à plus ou moins 30 % près ou 10 %.

[00132] Dans le modèle 250, N_k^c est égal au nombre de cycles de charge/décharge de la cellule réalisés avant l'instant k . Ce nombre de cycles est par exemple mesuré
35 en comptant le nombre de fois où l'état de charge de la cellule descend en dessous du seuil haut SH_{soc} puis en dessous du seuil bas SL_{soc} . $w_{d,k}^a$ est un bruit blanc gaussien centré. γ est l'écart, exprimé en pourcentage divisé par 100, entre la capacité initiale C_n^{ini} de la cellule et sa capacité en fin de vie. Ce modèle prend en compte le fait :

- que la résistance interne augmente au fur et à mesure que la cellule vieillit, et
- 40 - que la capacité de la cellule diminue au fur et à mesure que cellule vieillit .

[00133] De façon similaire, le modèle d'état 70 peut être remplacé par le modèle d'état suivant : $RO_{k2+1} = (\alpha + \beta N_{k2}^C / N_{EOL}^C) RO_{k2} + W_{2, k2}$, où les différents symboles de ce modèle ont déjà été précédemment définis.

[00134] Le modèle d'état 74 peut être remplacé par le modèle d'état suivant :
 5 $C_{n, k3+1} = (1 - \gamma N_{k3}^C / N_{EOL}^C) C_{n, k3} + V_{3, k3}$ où les différents symboles de ce modèle ont déjà été précédemment définis.

[00135] Selon le modèle d'observation utilisé par l'estimateur 68, la grandeur z_{k3} peut être calculée différemment. Par exemple, la grandeur z_{k3} est égale à la somme des N dernières intensités mesurées entre les instants k et k-N+1. Dans ce cas, lorsque N
 10 est égal à 1, $z_{k3} = i_{k3}$.

[00136] Ce qui a été décrit précédemment pour l'initialisation des matrices de covariance Q_k et R_k peut aussi être appliqué pour l'initialisation des matrices de covariance des estimateurs 68 et 230.

[00137] En variante, l'estimateur 68 n'est pas implémenté sous la forme d'un filtre de
 15 Kalman. Par exemple, la capacité est estimée en modélisant son évolution au cours du temps sous la forme d'un filtre RII (Réponse Impulsionnelle Infinie) dont les coefficients sont estimés par la méthode RLS (Recursive Least Square).

[00138] Les procédés des figures 10 et 17 peuvent être simplifiés en prenant N égal à une constante prédéterminée. Dans ce cas, N n'est pas compté et les étapes 160,
 20 162, 240 et 242 peuvent être omises. Par exemple, N est choisi égale à un ou, au contraire, strictement supérieur à 1 ou 5 ou 10.

[00139] Dans une autre variante, à chaque instant k entre les instants k3 et k3-1, seule l'étape 170 de calcul d'un prédiction $C_{n, k}$ est exécutée mais l'étape 174 de correction de cette prédiction n'est pas exécutée. Ainsi, on obtient une nouvelle
 25 prédiction de la capacité de la cellule à chacun de ces instants k tout en limitant la puissance de calcul requise. De façon similaire, à chaque instant k entre les instants k4 et k4-1, seule l'étape de calcul des prédictions de la capacité et de la résistance interne est exécutée sans exécuter l'étape de correction de ces prédictions. Ainsi, dans ces variantes, la capacité de la cellule est prédite à chaque instant k mais cette
 30 prédiction est corrigée uniquement aux instants k3 ou k4. L'algorithme d'estimation de cette capacité n'est donc que partiellement exécuté entre les instants k3 et k3-1 ou k4 et k4-1 et complètement exécuté uniquement à l'instant k3 ou k4.

[00140] A chaque instant k entre les instants k3 et k3-1 ou entre les instants k4 et k4-1, la capacité peut être estimée en exécutant un premier algorithme, puis à l'instant
 35 k3 ou k4, la capacité est estimée en exécutant un second algorithme différent du premier algorithme et nécessitant une puissance de calcul plus importante. Les premier et second algorithmes ne correspondent pas nécessairement, comme décrit précédemment, respectivement, à la seule étape 170 et à la phase 166 ou 246 d'un filtre de Kalman. Il peut aussi s'agir de deux algorithmes d'estimation complètement
 40 différents.

[00141] L'étape 166 ou 246 d'estimation de la capacité de la cellule peut être déclenchée en réponse au franchissement d'un seuil sur l'état de charge, comme

décrit en référence à la figure 10, ou en réponse au franchissement d'un seuil sur la tension comme décrit en référence à la figure 17. Ces étapes 166 et 246 peuvent aussi être déclenchées en réponse au franchissement d'un seuil de quantité de courant débité. Pour cela, à partir du moment où la tension ou l'état de charge de la cellule est descendu en dessous d'un seuil haut prédéterminé, à chaque instant k, le calculateur 44 calcule la quantité QC_k de courant débité à l'aide de la relation suivante : $QC_k = QC_{k-1} + i_k T_e$. Dès que QC_k dépasse un seuil haut SH_Q , alors la phase 166 ou 246 est exécutée. A l'inverse, tant que la quantité QC_k reste supérieure au seuil SH_Q , l'exécution des phases 166 ou 246 est inhibée. En variante, la quantité QC_k peut aussi être calculée sur une fenêtre glissante contenant les N derniers instants k, où N est une constante prédéterminée.

[00142] Dans un autre mode de réalisation, le déclenchement des estimations de la capacité et/ou de la résistance interne en réponse au franchissement d'un seuil est omis. Par exemple, ces estimations sont déclenchées à intervalle régulier. Cette intervalle régulier est égal à T_e si la puissance de calcul disponible est suffisante pour estimer cette capacité et cette résistance interne à chaque instant k.

[00143] De nombreux autres modes de réalisation du procédé de la figure 12 sont possibles. Par exemple, l'opération 205 peut être omise. Dans ce cas, aucune cellule jumelle n'est identifiée et l'étape 212 est aussi omise.

[00144] L'opération 202 peut être réalisée différemment. Par exemple, un seul des seuils haut et bas est utilisé. L'opération 202 peut aussi être omise.

[00145] Le nombre de niveaux de priorité peut être quelconque et supérieur à au moins deux ou trois. D'autres méthodes pour affecter un niveau de priorité aux cellules sont possibles. Par exemple, le niveau de priorité d'une cellule peut être calculé à l'aide d'une formule qui relie son niveau de priorité à son écart de tension et de sa tension. Dans ce dernier cas, les opérations de comparaison sont omises.

[00146] La méthode décrite pour associer des instants de rafraîchissement aux cellules en fonction de leurs niveaux de priorité n'est qu'un exemple. Tout autre procédé connu d'ordonnancement de tâches en fonction du niveau de priorité de ces tâches peut être adapté au cas décrit ici de l'ordonnancement des instants de rafraîchissement des estimations des états de charge des cellules.

[00147] La planification des instants de rafraîchissement de l'estimation de l'état de charge de chacune des cellules décrite en référence à la figure 12 peut être omise. Par exemple, cela sera le cas si la puissance de calcul nécessaire pour l'estimation de l'état de charge de chacune des cellules à chaque instant k est disponible.

[00148] En variante, le calculateur 44 comprend plusieurs sous-calculateurs programmables capables d'exécuter chacun et en parallèle, le procédé d'estimation de la figure 10 ou 17 pour des cellules respectives.

[00149] L'état de santé d'une cellule peut aussi être calculé à l'aide de la relation suivante : $SOH_k = RO_k / RO^{ini}$.

[00150] La batterie 10 peut être remplacée par tout type de batterie, comme par exemple, une batterie au plomb, une super-capacité ou une pile à combustible. Dans

ce cas, le modèle d'état et/ou le modèle d'observation de l'estimateur 60 peuvent éventuellement être adaptés pour tenir compte de la technologie de la batterie.

[00151] Ce qui a été décrit précédemment s'applique aussi au véhicule hybride, c'est-à-dire au véhicule dont l'entraînement des roues motrices est à la fois ou, en
5 alternance, assuré par un moteur électrique et un moteur thermique à combustion interne. Le véhicule 2 peut aussi être un camion, une moto ou un tricycle et de façon générale, tout véhicule capable de se déplacer en entraînant des roues motrices à l'aide d'un moteur électrique alimenté par une batterie. Par exemple, il peut s'agir d'un monte-charge.

10 [00152] La batterie 10 peut être rechargée par l'intermédiaire d'une prise électrique qui permet de la raccorder électriquement à un réseau de distribution d'électricité. La batterie 10 peut aussi être rechargée par un moteur thermique à combustion interne.

REVENDEICATIONS

1. Procédé automatique d'estimation de l'état de charge d'une cellule d'une batterie, ce procédé comportant :

- 5 a) l'acquisition (110), à un instant k, d'une valeur mesurée y_k de la tension entre des bornes de la cellule, et d'une intensité mesurée i_k du courant de charge ou de décharge de la cellule, et
- b) l'estimation (166 ; 246) d'une capacité $C_{n,k3}$ de la cellule à un instant k3, cette capacité $C_{n,k3}$, exprimée en Ah, représentant la quantité maximale d'énergie électrique stockable dans la cellule à l'instant k3, l'instant k3 étant l'instant auquel la capacité $C_{n,k3}$ a été estimée le plus proche de l'instant k, et les instants k3 étant moins fréquent que les instants k, cette estimation comportant :
 - 10 le calcul (170) d'une prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ à l'aide d'un modèle d'état qui relie la capacité $C_{n,k3}$ à la capacité $C_{n,k3-1}$ de cette même cellule à un instant précédent k3-1, puis
 - 15 la correction (174) de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ en fonction d'une intensité mesurée, à l'instant le plus proche de l'instant k3, du courant de charge ou de décharge de la cellule,
 - c) l'estimation (114) de l'état de charge SOC_k de la cellule, à l'instant k, à partir de la valeur mesurée y_k , de l'intensité mesurée i_k et de la capacité $C_{n,k3}$ de la cellule, caractérisée en ce que la correction de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ comporte :
 - 20 - l'acquisition (176), à l'instant k3, d'une grandeur physique mesurable z_{k3} définie par la relation suivante :

$$z_{k3} = \sum_{m=k-N}^{m=k-1} i_m$$

- où k est l'instant le plus proche de l'instant k3 et N est un entier supérieur ou égal à un, z_{k3} étant égale à i_{k-1} lorsque N est égal à un,
- 25 - le calcul (176) d'une prédiction \hat{z}_{k3} de la grandeur physique mesurable z_{k3} à l'aide du modèle d'observation suivant :

$$\hat{z}_{k3} = \frac{(SOC_k - SOC_{k-N})}{NT_e} . 3600 . C_{n,k3}$$

où :

- k est l'instant le plus proche de l'instant k3,
- 30 - SOC_{k-N} est l'état de charge de la cellule à l'instant antérieur k-N,
- $C_{n,k3}$ est, dans ce modèle d'observation, la prédiction de la capacité de la cellule à

l'instant k_3 calculée juste avant d'être corrigée, et

- la correction (178) de la prédiction de la capacité C_{n,k_3} en fonction de l'écart entre la grandeur physique acquise z_{k_3} et la prédiction \hat{z}_{k_3} calculée à partir du modèle d'observation.

5

2. Procédé selon la revendication 1 dans lequel :

- la correction de la prédiction de la capacité C_{n,k_3} est inhibée (164 ; 244) tant que la valeur d'un paramètre n'a pas franchi un premier seuil prédéterminé, ce paramètre étant choisi dans le groupe composé de la valeur mesurée y_k , de l'état de charge estimé SOC_k et d'une quantité Q_k de courant débité par la cellule entre l'instant k et un instant précédent, et

10

- la correction de la prédiction de la capacité C_{n,k_3} est déclenchée (164 ; 244) en réponse au fait que ce paramètre descend en dessous du premier seuil prédéterminé si le paramètre est la valeur mesurée y_k ou l'estimation de l'état de charge SOC_k , ou

15 monte au-dessus du premier seuil prédéterminé si ce paramètre est la quantité Q_k de courant débitée.

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel le procédé comprend le comptage (162 ; 242) du nombre d'itération de l'étape a) entre un instant t_1 où la

20 valeur mesurée y_k ou l'état de charge estimé SOC_k descend en dessous d'un second seuil prédéterminé et un instant t_2 suivant où la valeur mesurée y_k ou l'état de charge estimé SOC_k descend en dessous du premier seuil prédéterminé, puis lors de la correction (178) de la prédiction de la capacité C_{n,k_3} l'entier N est choisi égal au nombre d'itérations comptées entre les instants t_1 et t_2 et strictement supérieur à un.

25

4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel le premier seuil prédéterminé correspond à un état de charge de la cellule inférieur à 20 % et le second seuil prédéterminé correspond à un état de charge de la cellule supérieur à 90 %.

30

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le procédé comprend le réglage (106) de la covariance du bruit sur la mesure de l'intensité i_k puis la correction (178) de la prédiction de la capacité C_{n,k_3} en fonction de cette covariance du bruit sur la mesure de l'intensité i_k .

35

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel la correction de la prédiction de la capacité C_{n,k_3} en fonction de l'écart entre la grandeur physique acquise z_{k_3} et la prédiction \hat{z}_{k_3} calculée est réalisé à l'aide de la relation suivante : $C_{n,k_3/k_3} = C_{n,k_3/k_3-1} + K_{k_3}E_{k_3}$, où :

- $C_{n,k_3/k_3}$ est la prédiction corrigée de la capacité C_{n,k_3} ,

- $C_{n,k3/k3-1}$ est la prédiction, avant correction, de la capacité $C_{n,k3}$,
- E_{k3} est l'écart entre la grandeur physique acquise z_{k3} et la prédiction \hat{z}_{k3} calculée, et
- K_{k3} est le gain de Kalman calculé pour l'instant $k3$ en fonction de la covariance du bruit sur la mesure de l'intensité i_k .

5

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le modèle d'état utilisé lors du calcul de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ est le suivant : $C_{n,k3} = C_{n,k3-1}$, et le procédé comporte :

- le calcul (172) d'une prédiction de la covariance $P_{3,k3}$ de l'erreur d'estimation de la capacité $C_{n,k3}$ en fonction d'une covariance $Q_{3,0}$ du bruit de l'erreur de modélisation introduite par le modèle d'état utilisé, et
- le réglage (106) automatique de la covariance $Q_{3,0}$ à l'aide de la relation suivante : $Q_{d,k3} = [(\gamma C_n^{ini}) / (3N_{eol}^c N_s)]^2$, où :
 - γ est une constante prédéterminée dont la valeur est strictement inférieure à un et supérieure à zéro,
 - C_n^{ini} est la capacité maximale nominale de la cellule,
 - N_{eol}^c est le nombre de cycles de décharge de la cellule avant que celle-ci atteigne sa fin de vie, ce nombre étant prédéterminé,
 - N_s est le nombre d'itérations de l'étape c) dans un cycle de décharge de la cellule.

20

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les étapes a) et b) sont exécutées au moins N -fois entre les instants $k3$ et $k3-1$, où N est un nombre entier supérieur à trois.

25 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le procédé comporte également le calcul (180) de l'état de santé SOH_{k3} de la cellule à l'aide de la relation suivante : $SOH_{k3} = C_{n,k3} / C_n^{ini}$, où :

- $C_{n,k3}$ est la capacité de la cellule estimée à l'instant $k3$ le plus récent, et
- C_n^{ini} est la capacité maximale nominale de la cellule.

30

10. Support (42) d'enregistrement d'informations, caractérisé en ce qu'il comporte des instructions pour l'exécution d'un procédé d'estimation conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, lorsque ces instructions sont exécutées par un calculateur électronique.

35

11. Système de gestion d'une batterie équipé d'au moins une cellule, ce système comportant un calculateur électronique (44) programmé pour :

- a) acquérir, à un instant k , une valeur mesurée y_k de la tension entre des bornes de la cellule, et une intensité mesurée i_k du courant de charge ou de décharge de la cellule,

et

b) estimer une capacité $C_{n,k3}$ de la cellule à un instant $k3$, cette capacité $C_{n,k3}$, exprimée en Ah, représentant la quantité maximale d'énergie électrique stockable dans la cellule à l'instant $k3$, l'instant $k3$ étant l'instant auquel la capacité $C_{n,k3}$ a été estimée le plus proche de l'instant k et les instants $k3$ étant moins fréquent que les instants k , cette estimation comportant :

le calcul d'une prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ à l'aide d'un modèle d'état qui relie la capacité $C_{n,k3}$ à la capacité $C_{n,k3-1}$ de cette même cellule à un instant précédent $k3-1$, puis

10 la correction de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ en fonction d'une intensité mesurée, à l'instant le plus proche de l'instant $k3$, du courant de charge ou de décharge de la cellule,

c) estimer l'état de charge SOC_k de la cellule, à l'instant k , à partir de la valeur mesurée y_k , de l'intensité mesurée i_k et de la capacité $C_{n,k3}$ de la cellule,

15 caractérisée en ce que le calculateur électronique (44) est également programmé pour réaliser la correction de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ en exécutant les étapes suivantes :

- l'acquisition, à l'instant $k3$, d'une grandeur physique mesurable z_{k3} définie par la relation suivante :

$$z_{k3} = \sum_{m=k-N}^{m=k-1} i_m$$

20 où k est l'instant le plus proche de l'instant $k3$ et N est un entier supérieur ou égal à un, z_{k3} étant égale à i_{k-1} lorsque N est égal à un,

- le calcul d'une prédiction \hat{z}_{k3} de la grandeur physique mesurable z_{k3} à l'aide du modèle d'observation suivant :

$$\hat{z}_{k3} = \frac{(SOC_k - SOC_{k-N})}{NT_r} \cdot 3600 \cdot C_{n,k3}$$

où :

25 - k est l'instant le plus proche de l'instant $k3$,

- SOC_{k-N} est l'état de charge de la cellule à l'instant antérieur $k-N$,

- $C_{n,k3}$ est, dans ce modèle d'observation, la prédiction de la capacité de la cellule à l'instant $k3$ calculée juste avant d'être corrigée, et

30 - la correction de la prédiction de la capacité $C_{n,k3}$ en fonction de l'écart entre la grandeur physique acquise z_{k3} et la prédiction \hat{z}_{k3} calculée à partir du modèle d'observation.

12. Véhicule automobile comportant :

- au moins une roue motrice (6),

5 - un moteur électrique (4) apte à entraîner en rotation cette roue motrice pour déplacer le véhicule automobile,

- une batterie (10) comportant au moins une cellule (18-21) apte à stocker de l'énergie électrique et, en alternance, à restituer de l'énergie électrique pour alimenter le moteur électrique, cette cellule comportant deux bornes (30, 32) par l'intermédiaire desquelles elle est électriquement raccordée au moteur électrique,

10 - un voltmètre (34) raccordé électriquement entre les bornes de la cellule pour mesurer la tension entre ces bornes,

- un ampèremètre (36) raccordé en série avec la cellule électrique pour mesurer l'intensité du courant de charge ou de décharge de cette cellule, et

15 - un système (40) de gestion de la batterie raccordé au voltmètre et à l'ampèremètre, ce système de gestion comportant un calculateur électronique (44) programmable apte à estimer l'état de charge de la cellule de la batterie à partir des mesures du voltmètre et de l'ampèremètre,

caractérisé en ce que le système (40) de gestion de la batterie est conforme à la revendication 11.

20

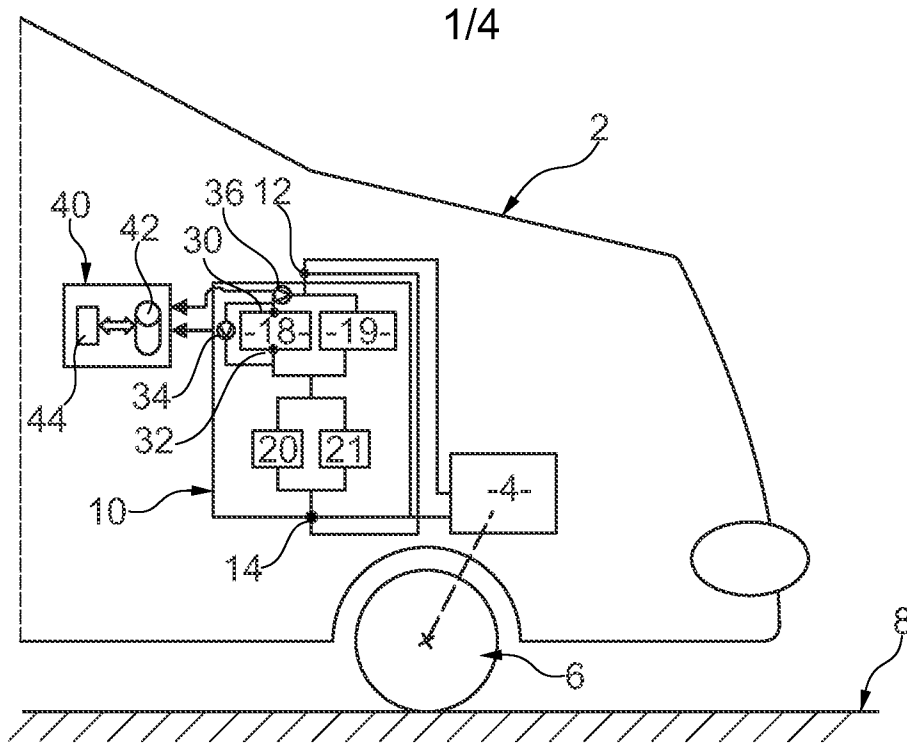


Fig. 1

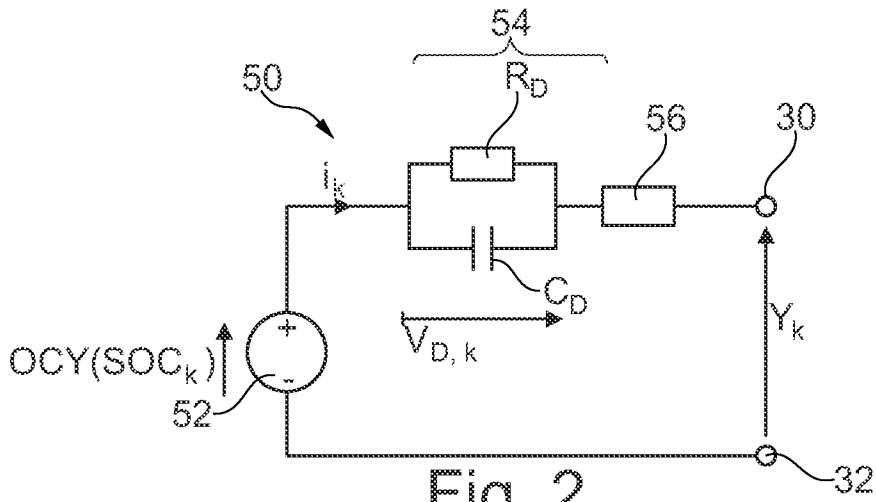


Fig. 2

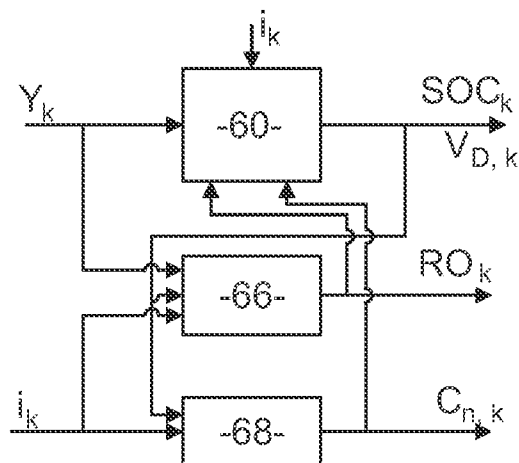


Fig. 3

$$62 \rightarrow x_{k+1} = \begin{bmatrix} \text{SOC}_{k+1} \\ V_{D, k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\text{Te}}{R_D \cdot C_D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{SOC}_k \\ V_{D, k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\text{Te}}{C_{n, k3}} \\ \frac{\text{Te}}{C_D} \end{bmatrix} \cdot i_k + w_k$$

Fig. 4

$$64 \rightarrow y_k = \text{OCV}(\text{SOC}_k) - V_{D, k} - R_{O, k2} i_k + v_k$$

Fig. 5

$$70 \rightarrow R_{O, k2+1} = R_{O, k2} + w_{2, k2}$$

Fig. 6

$$72 \rightarrow u_{k2} = \sum_{m=k-N}^k [\text{OCV}(\text{SOC}_m) - V_{D, m} - R_{O, k2} \cdot i_m] + v_{2, k2}$$

Fig. 7

$$74 \rightarrow C_{n, k3+1} = C_{n, k3} + v_{3, k3}$$

Fig. 8

$$76 \rightarrow z_{k3} = \frac{(\text{SOC}_k - \text{SOC}_{k-N})}{N \text{Te}} \cdot 3600 \cdot C_{n, k3} + v_{3, k3}$$

Fig. 9

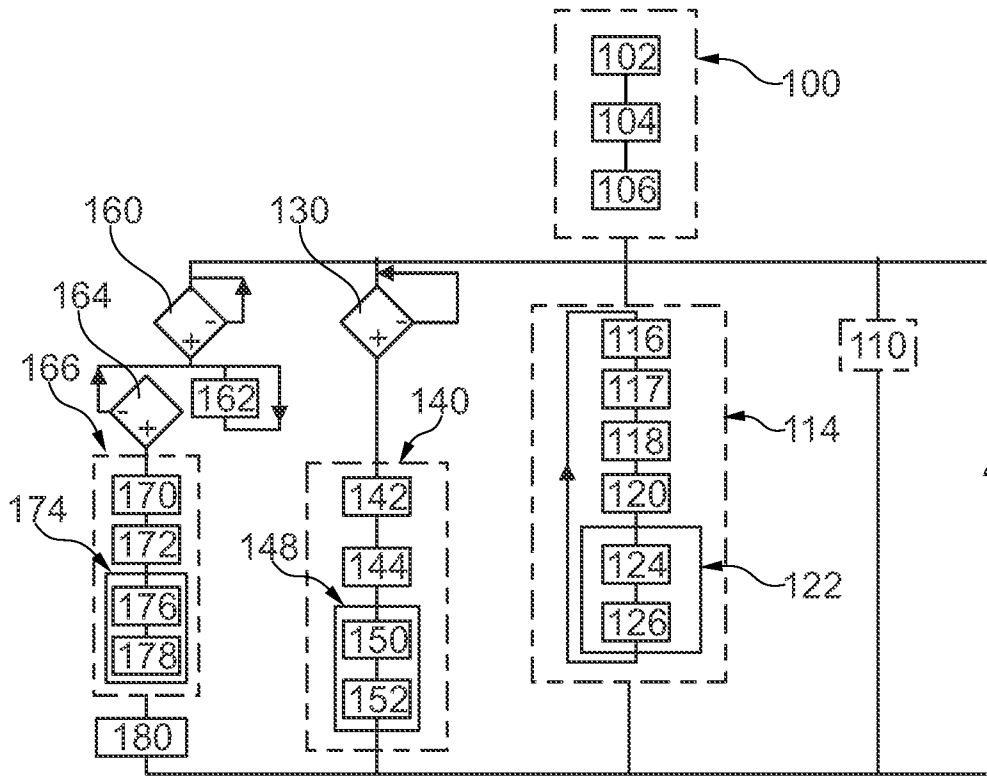


Fig. 10

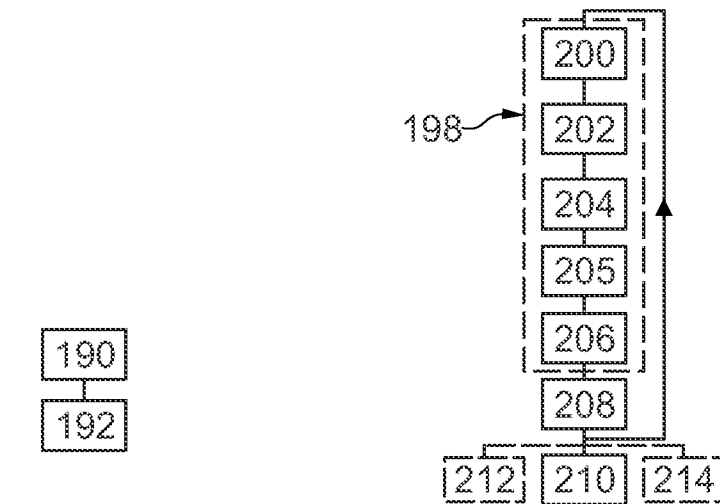


Fig. 11

Fig. 12

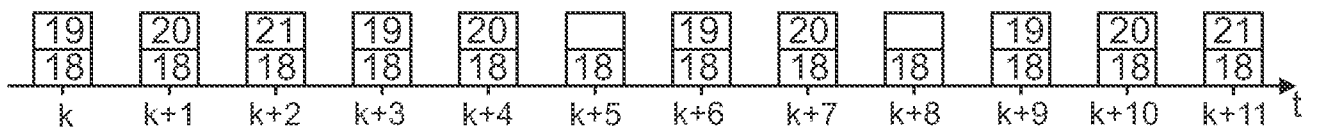


Fig. 13

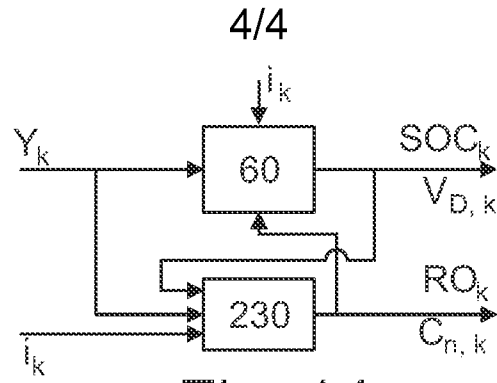


Fig. 14

232 →
$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} RO_{k4+1} \\ C_{n, k4+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} RO_{k4} \\ C_{n, k4} \end{bmatrix} + W_{d, k4}$$

Fig. 15

234 →
$$\begin{bmatrix} u_{k4} \\ z_{k4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=k-N}^k [OCV(SOC_m) - V_{D, m} - RO_{k4} \cdot i_m] \\ \frac{(SOC_k - SOC_{k-N})}{N \cdot Te} \cdot 3600 \cdot C_{n, k4} \end{bmatrix} + V_{d, k4}$$

Fig. 16

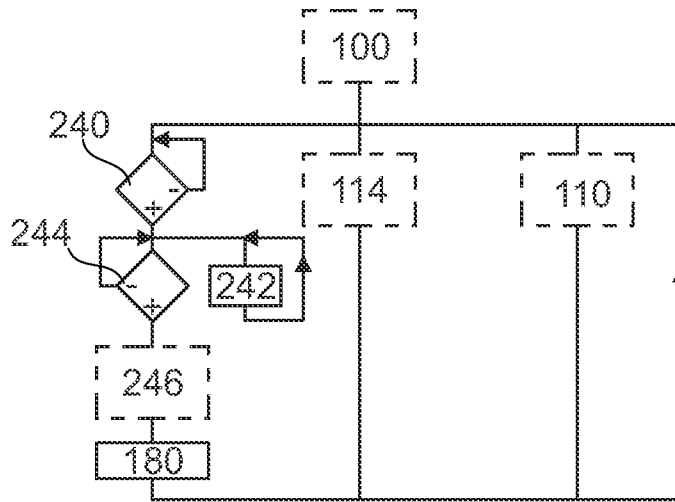


Fig. 17

250 →
$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} RO_{k4+1} \\ C_{n, k4+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha + \frac{\beta N_k^C}{N_{EOL}^C} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{\gamma \cdot N_k^C}{N_{EOL}^C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} RO_k \\ C_{n, k} \end{bmatrix} + W_{d, k}^a$$

Fig. 18

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2015/053240

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01R31/36
ADD.
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01R

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2012/316810 A1 (SYED ASIF A [US] ET AL) 13 December 2012 (2012-12-13) abstract; claims 1-20; figures 1-7 paragraph [0004] - paragraph [0006] paragraph [0015] - paragraph [0066] -----	1-12
A	US 2012/133369 A1 (JOHNSON KURT M [US] ET AL) 31 May 2012 (2012-05-31) abstract; claims 1-18; figures 1-7 paragraph [0008] paragraph [0017] - paragraph [0028] -----	1-12

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 25 February 2016	Date of mailing of the international search report 03/03/2016
---	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Nadal, Rafael
--	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2015/053240

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
US 2012316810	A1	13-12-2012	CN 102818997 A	12-12-2012
			DE 102012208609 A1	13-12-2012
			US 2012316810 A1	13-12-2012

US 2012133369	A1	31-05-2012	CN 102479980 A	30-05-2012
			DE 102011054778 A1	31-05-2012
			US 2012133369 A1	31-05-2012

<p>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01R31/36 ADD.</p>		
<p>Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB</p>		
<p>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</p>		
<p>Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01R</p>		
<p>Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche</p>		
<p>Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data, INSPEC</p>		
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</p>		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 2012/316810 A1 (SYED ASIF A [US] ET AL) 13 décembre 2012 (2012-12-13) abrégé; revendications 1-20; figures 1-7 alinéa [0004] - alinéa [0006] alinéa [0015] - alinéa [0066] -----	1-12
A	US 2012/133369 A1 (JOHNSON KURT M [US] ET AL) 31 mai 2012 (2012-05-31) abrégé; revendications 1-18; figures 1-7 alinéa [0008] alinéa [0017] - alinéa [0028] -----	1-12
<p><input type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</p>		
<p><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</p>		
<p>* Catégories spéciales de documents cités:</p>		
<p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p>	<p>"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément</p> <p>"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier</p> <p>"&" document qui fait partie de la même famille de brevets</p>	
<p>Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée</p> <p>25 février 2016</p>		<p>Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale</p> <p>03/03/2016</p>
<p>Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale</p> <p>Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016</p>		<p>Fonctionnaire autorisé</p> <p>Nadal, Rafael</p>

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2015/053240

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication	
US 2012316810	A1	13-12-2012	CN 102818997 A	12-12-2012
			DE 102012208609 A1	13-12-2012
			US 2012316810 A1	13-12-2012

US 2012133369	A1	31-05-2012	CN 102479980 A	30-05-2012
			DE 102011054778 A1	31-05-2012
			US 2012133369 A1	31-05-2012
