

Modélisation de systèmes physiques

Modélisation des batteries

Du système réel au modèle

Une batterie est un système multiphysique : les phénomènes électrochimiques produisent une tension et un courant, les pertes électriques génèrent de la chaleur, la température modifie les paramètres électriques, et le vieillissement modifie progressivement la capacité et la résistance interne.

Ici, l'objectif n'est pas de reproduire toute l'électrochimie. Il s'agit de construire le modèle le plus simple permettant de répondre à une question donnée.

- Dimensionnement énergétique : un modèle énergétique peut suffire.
- Calcul de chute de tension : une source de tension et une résistance interne peuvent suffire.
- Simulation dynamique : un modèle équivalent de Thévenin est préférable.
- Estimation du SOC dans un BMS : un modèle d'état et un observateur peuvent être nécessaires.
- Étude de l'échauffement : il faut coupler modèle électrique et modèle thermique.

Principe directeur : un bon modèle n'est pas le plus compliqué ; c'est celui dont la précision est suffisante pour l'usage visé

Rappels

Capacité, énergie et puissance

Q [Ah] : capacité électrique E [Wh] : énergie $\rightarrow P = U I$

Pour une première estimation :

$$E \approx U_{\text{nom}} \times Q_{\text{nom}}$$

Cette relation est approximative car la tension varie avec le SOC, le courant, la température et l'état de santé.

Montage série et parallèle

$\rightarrow$ Cellules en série : les tensions s'additionnent ; la capacité en Ah reste celle d'une cellule.

$\rightarrow$ Cellules en parallèle : les capacités en Ah s'additionnent ; la tension reste celle d'une cellule.

Un pack **NsP** est constitué de Ns cellules en série et Np branches en parallèle.

$$U_{\text{pack}} \approx N_s \cdot U_{\text{cell}} \quad \text{et} \quad Q_{\text{pack}} \approx N_p \cdot Q_{\text{cell}} \quad \text{alors} \quad E_{\text{pack}} \approx N_s \cdot N_p \cdot U_{\text{cell}} \cdot Q_{\text{cell}}$$

Rappels et exemple de batterie

Montage série et parallèle

→ Cellules en série : les tensions s'additionnent ; la capacité en Ah reste celle d'une cellule.

→ Cellules en parallèle : les capacités en Ah s'additionnent ; la tension reste celle d'une cellule.

Un pack **NsP** est constitué de N_s cellules en série et N_p branches en parallèle.

$$U_{\text{pack}} \approx N_s \cdot U_{\text{cell}} \quad \text{et} \quad Q_{\text{pack}} \approx N_p \cdot Q_{\text{cell}} \quad \text{alors} \quad E_{\text{pack}} \approx N_s \cdot N_p \cdot U_{\text{cell}} \cdot Q_{\text{cell}}$$

Exemple — lecture d'une fiche technique de cellule

Extrait d'une fiche technique constructeur pour une cellule cylindrique 18650 :

- Tension nominale : 3,7 V (plage 2,5–4,2 V)
- Capacité nominale : 2,0 Ah
- Résistance interne (AC, 1 kHz) : $\approx 18 \text{ m}\Omega$
- Masse : $\approx 45 \text{ g}$
- Courant de décharge continu maximal : 20 A
- Température de fonctionnement en décharge : -20 à $60 \text{ }^\circ\text{C}$



Rappels et exemple de calcul

Montage série et parallèle

- Cellules en série : les tensions s'additionnent ; la capacité en Ah reste celle d'une cellule.
- Cellules en parallèle : les capacités en Ah s'additionnent ; la tension reste celle d'une cellule.

Un pack **NsP** est constitué de Ns cellules en série et Np branches en parallèle.

$$U_{\text{pack}} \approx N_s \cdot U_{\text{cell}} \quad \text{et} \quad Q_{\text{pack}} \approx N_p \cdot Q_{\text{cell}} \quad \text{alors} \quad E_{\text{pack}} \approx N_s \cdot N_p \cdot U_{\text{cell}} \cdot Q_{\text{cell}}$$

Exemple — lecture d'une fiche technique de cellule

Extrait d'une fiche technique constructeur pour une cellule cylindrique 18650 :

- Tension nominale : 3,7 V (plage 2,5–4,2 V)
- Capacité nominale : 2,0 Ah
- Résistance interne (AC, 1 kHz) : $\approx 18 \text{ m}\Omega$
- Masse : $\approx 45 \text{ g}$
- Courant de décharge continu maximal : 20 A
- Température de fonctionnement en décharge : -20 à $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Pour un pack 4S3P assemblé à partir de cette cellule :

$$U_{\text{pack}} \approx 4 \times 3,7 = 14,8 \text{ V} ;$$

$$Q_{\text{pack}} \approx 3 \times 2,0 = 6,0 \text{ Ah} ;$$

$$E_{\text{pack}} \approx 14,8 \times 6 \approx 88,8 \text{ Wh}.$$

La masse des 12 cellules est d'environ $12 \times 45 = 540 \text{ g}$; le pack complet (BMS, connectique, boîtier) pèse en pratique 20 à 30 % de plus, si bien que la **densité énergétique** du pack (en **Wh/kg**) reste toujours inférieure à celle de la cellule seule



Exercice

Exercice 1 — Constitution d'un pack

On dispose de cellules Li-ion de tension nominale 3,6 V et de capacité 5 Ah. On souhaite réaliser un pack d'environ 48 V et 20 Ah.

- 1) Déterminer le nombre de cellules en série.
- 2) Déterminer le nombre de branches en parallèle.
- 3) Donner le nombre total de cellules.
- 4) Estimer l'énergie nominale du pack.



Les notions

Sensibilité thermique :

Elle recouvre à la fois la vitesse de dégradation à température élevée et la température de déclenchement de l'emballement thermique. Une cellule NMC ou NCA entre typiquement en emballement dès 150–210 °C, contre 270–300 °C pour une cellule LFP : à Cth et Rth comparables, un même défaut thermique laisse donc beaucoup moins de marge de sécurité sur une chimie NMC/NCA que sur du LFP.

Les notions

Capacité

Quantité d'électricité (exprimée en Ah) délivrée par un accumulateur au cours d'une décharge complète

Profondeur de décharge (Depth of Discharge - DOD)

Rapport entre la quantité d'électricité déjà extraite d'un accumulateur et sa capacité

État de charge (State of Charge - SOC)

$SOC = 1 - DOD$: estimation (en pourcentage) de la quantité d'électricité qui reste dans l'accumulateur divisée par la capacité.

Les notions

Courbe OCV(SOC)

NMC/NCA : V_{OC} varie nettement avec le SOC ($\approx 3,0\text{--}4,15\text{ V}$) $\rightarrow$ SOC estimable par simple mesure de tension au repos.

LFP : V_{OC} quasi plate ($\approx 3,20\text{--}3,30\text{ V}$) sur 10–90 % de SOC $\rightarrow$ la même incertitude de tension donne une bien plus grande incertitude sur le SOC ; on s'appuie alors surtout sur le comptage de Coulombs.

Sensibilité thermique et fenêtre de SOC

NMC/NCA : emballement thermique dès 150–210 °C, contre 270–300 °C pour le LFP $\rightarrow$ marge de sécurité plus réduite, à C_{th}/R_{th} comparables.

D'où des fenêtres de SOC différentes en usage : NMC souvent limité à 20–80/90 % (durée de vie, échauffement), LFP plus tolérant à un cyclage proche de 0–100 %.

Les notions

L'état de charge (SOC) de batterie est une quantité normalisée comprise entre 0 et 1 qui indique le niveau de charge d'une batterie à un moment donné. Un état de charge de 1 signifie que la batterie est complètement chargée, tandis qu'un état de charge de 0 signifie qu'elle est complètement déchargée.

L'état de charge des véhicules électriques est analogue à la jauge de carburant des véhicules thermiques conventionnels, fournissant aux conducteurs une indication de la quantité d'énergie restante dans la batterie ; un état de charge plus élevé signifie une plus grande autonomie. Connaître l'état de charge de batterie d'un véhicule permet à son conducteur de planifier plus efficacement ses déplacements et ses arrêts en station de recharge. L'état de charge de batterie se calcule comme suit :

$$SOC(t_1) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_n} \int_{t_0}^{t_1} I(\tau) \cdot d\tau \quad (\text{sans pertes})$$

où :

- $SOC(t_1)$ correspond à l'état de charge de batterie au moment exprimé en secondes.
- $SOC(t_0)$ correspond à l'état de charge de batterie au moment exprimé en secondes.
- $i(t)$ correspond au courant de batterie en A, avec la convention $I > 0$ en décharge (négatif en charge).
- η correspond au facteur d'efficacité coulombienne sans unité.
- C_{total} correspond à la capacité totale de batterie en Ah. Elle est définie comme la charge retirée à la batterie, entre l'état de pleine charge ($SOC = 1$) et l'état de pleine décharge ($SOC = 0$). La capacité totale de la batterie diminue au fur et à mesure que la batterie se dégrade avec le temps.

Les notions

$$SOC(t_1) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_n} \int_{t_0}^{t_1} I(\tau) \cdot d\tau \quad (\text{sans pertes})$$

$$\text{Devient : } SOC(t_1) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_n} \int_{t_0}^{t_1} I_{eff}(\tau) \cdot d\tau \quad (\text{avec pertes})$$

avec

- $I_{eff} = I$ si $I > 0A$ (décharge) ou $I_{eff} = \eta \cdot I$ si $I < 0A$ (charge)
- $SOC(t_1)$ correspond à l'état de charge de batterie au moment exprimé en secondes.
- $SOC(t_0)$ correspond à l'état de charge de batterie au moment exprimé en secondes.
- $i(t)$ correspond au courant de batterie en A, avec la convention $I > 0$ en décharge (négatif en charge).
- η correspond au facteur d'efficacité coulombienne sans unité.
- C_{total} correspond à la capacité totale de batterie en Ah. Elle est définie comme la charge retirée à la batterie, entre l'état de pleine charge ($SOC = 1$) et l'état de pleine décharge ($SOC = 0$). La capacité totale de la batterie diminue au fur et à mesure que la batterie se dégrade avec le temps.

Les notions

Il existe 2 méthodes de mesures du SOC (State of Charge)

- Mesure de l'état de charge par méthode OCV (Open Circuit Voltage)
- Mesure de l'état de charge par le compteur de Coulomb

Lien

Les notions

L'état de santé (State of Health – SOH)

Le SOH de la batterie correspond à sa capacité réelle comparée à celle d'origine. Il diminue au fil des cycles de décharge, d'une utilisation des batteries intensive, d'une mauvaise gestion des phases de charge et de décharge, ou encore à cause de conditions extrêmes. Cette perte de capacité réduit progressivement l'autonomie, même lorsque le SOC indique 100 %.

Le SOH se décline classiquement en deux indicateurs : le SOH en capacité ($\text{SOH}_{\text{capacité}} = Q_{\text{max,actuelle}} / Q_{\text{nominale}}$), qui traduit la perte d'énergie stockable (capacity fade), et le SOH en puissance, lié à l'augmentation de la résistance interne (power fade). Estimer le SOH en continu, sans interrompre l'usage de la batterie, est un problème plus difficile que l'estimation du SOC car les variations sont lentes (des centaines de cycles) et se superposent aux effets réversibles du SOC et de la température.

Les notions

L'état de santé (State of Health – SOH) - Plusieurs méthodes d'estimation coexistent :

Mesure directe de capacité : un cycle complet de charge/décharge contrôlé donne Q_{max} avec précision, mais impose d'immobiliser la batterie — utilisable en laboratoire ou lors d'une maintenance, rarement en usage réel.

Suivi de résistance interne : un test par échelon de courant ou une mesure d'impédance (spectroscopie d'impédance électrochimique, EIS) permet de suivre la dérive de R_0 , corrélée au power fade.

Analyse de capacité incrémentale (ICA) / tension différentielle (DVA) : on dérive dQ/dV (ou dV/dQ) le long d'une charge partielle ; les pics caractéristiques de cette courbe se déplacent et s'atténuent avec le vieillissement, sans nécessiter un cycle complet.

Approches à base de modèle : le modèle électrique équivalent (Thévenin) est couplé à un observateur récursif — filtre de Kalman étendu, filtre particulière — qui estime conjointement SOC et paramètres de vieillissement (Q_n , R_0) à partir des mesures courantes de tension et courant.

Approches data-driven : régression ou apprentissage automatique entraînés sur des portions de courbe de charge (souvent partielles) et des compteurs de cycles/température, pour prédire directement le SOH sans modèle physique explicite.

En pratique, un BMS (Battery Management System) embarqué combine souvent plusieurs de ces approches : un suivi de résistance à chaque cycle, recalé périodiquement par une capacité mesurée lors des charges complètes disponibles.

Exercice

Exercice 2 — Résistance interne et puissance disponible

Une batterie présente $V_{OC} = 13,2 \text{ V}$ et $R_0 = 35 \text{ m}\Omega$. Elle alimente une charge demandant 50 A . Dans cet exercice, la batterie est modélisée par un générateur parfait et la résistance interne de la batterie

- Calculer la tension aux bornes de la batterie.
- Calculer la puissance fournie à la charge.
- Calculer les pertes Joule internes.
- Calculer le rendement électrique instantané V_{bat}/V_{OC} .
- Reprendre les calculs pour 100 A et commenter.

Le SOC

Le State Of Charge représente la quantité de charge restante par rapport à une référence. Le SOC n'est pas directement mesurable comme une tension ou un courant : il doit être estimé.

$$SOC = Q_{\text{restante}} / Q_{\text{nominale}}$$

Avec la convention $I > 0$ en décharge :

$$\frac{dSOC}{dt} = - \frac{\eta \cdot I}{Q_n}$$

Si Q_n est exprimée en Ah et le temps en secondes : $\frac{dSOC}{dt} = - \frac{\eta \cdot I}{3600 \cdot Q_n}$

$$SOC(t) = SOC(0) - \int_0^t \frac{\eta \cdot I(\tau)}{3600 \cdot Q_n} \cdot d\tau$$

Cette équation constitue déjà un modèle dynamique à une variable d'état.

Exercice

Exercice 3 — Évolution du SOC

Une batterie de 100 Ah est initialement à SOC = 80 %. On néglige d'abord les pertes.

- Elle fournit 20 A pendant 90 min. Calculer le SOC final.
- Elle est ensuite rechargée à 10 A pendant 2 h avec un rendement coulombique de 95 %. Calculer le nouveau SOC.
- Quelle erreur de SOC apparaît après 10 h si le capteur de courant possède un offset constant de +0,20 A ?
- Expliquer pourquoi une estimation fondée uniquement sur l'intégration du courant dérive dans le temps.

Relation entre tension à vide et SOC

La tension à vide n'est pas constante. On écrit généralement :

$$V_{OC} = f(SOC, T)$$

Dans un modèle système, cette relation est souvent représentée par une table de correspondance (Lookup Table) issue d'essais ou de données constructeur.

La mesure de V_{OC} nécessite idéalement une période de repos afin que les phénomènes transitoires de polarisation se relaxent.

Exercice

Exercice 4 — Exploitation d'une table OCV–SOC

On dispose des points suivants à 25 °C :

SOC (%) = 0, 20, 40, 60, 80, 100 ;

V_{OC} (V) = 3,00 ; 3,45 ; 3,62 ; 3,72 ; 3,86 ; 4,15.

- Estimer V_{OC} à SOC = 70 % par interpolation linéaire.
- Une tension à vide de 3,79 V est mesurée. Estimer le SOC.
- Pourquoi une mesure de tension réalisée sous forte charge ne peut-elle pas être directement utilisée dans cette table ?

Modèle dynamique de Thévenin

Le modèle R_0 ne reproduit pas la relaxation observée après une variation de courant. On ajoute une branche R_1 – C_1 représentant une dynamique de polarisation.

$$V_{\text{bat}} = V_{\text{OC}}(\text{SOC}) - R_0 \cdot I - V_1$$

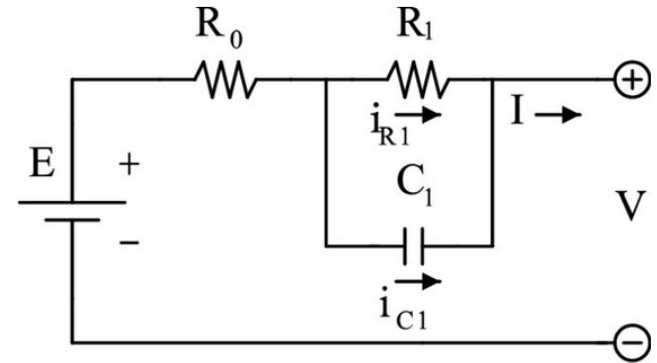
$$\frac{dV_1}{dt} = -V_1 \frac{1}{(R_1 \cdot C_1)} + \frac{I}{C_1}$$

$$\tau_1 = R_1 \cdot C_1$$

Le modèle possède alors au moins deux états : SOC et V_1 .

$$x = [\text{SOC} \quad V_1]^T$$

Des modèles à deux branches RC permettent de représenter plusieurs constantes de temps, au prix d'un nombre plus important de paramètres à identifier.



Modèle dynamique de Thévenin

Le modèle R_0 ne reproduit pas la relaxation observée après une variation de courant. On ajoute une branche R_1 – C_1 représentant une dynamique de polarisation.

$$V_{\text{bat}} = V_{\text{OC}}(\text{SOC}) - R_0 \cdot I - V_1$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{I}{C_1}$$

$$\tau_1 = R_1 \cdot C_1$$

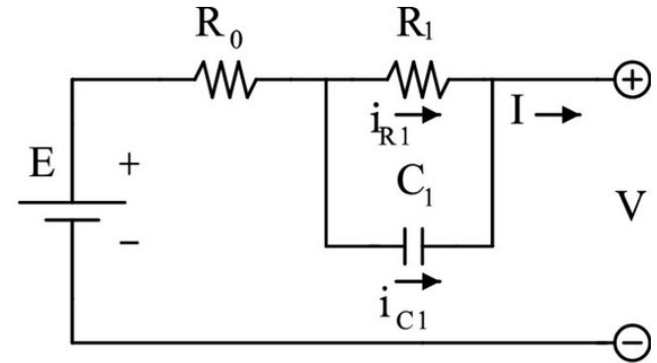
Le modèle possède alors au moins deux états : SOC et V_1 .

$$x = [\text{SOC} \quad V_1]^T$$

Des modèles à deux branches RC permettent de représenter plusieurs constantes de temps, au prix d'un nombre plus important de paramètres à identifier.

Réponse à un échelon de courant : Lors d'un échelon de courant, la chute instantanée permet d'identifier R_0 . L'évolution exponentielle qui suit permet d'identifier R_1 et C_1 .

$$R_0 \approx \Delta V_{\text{instantané}} / \Delta I ; R_1 \approx \Delta V_{\text{lent}} / \Delta I ; C_1 = \tau_1 / R_1$$



Exercice

Exercice 5 — Identification d'un modèle de Thévenin

À $t = 0$, le courant passe de 0 à 40 A. La tension passe instantanément de 3,90 V à 3,82 V, puis tend vers 3,74 V. On mesure que 63 % de la variation lente est réalisée après 20 s.

- Déterminer R_0 .
- Déterminer R_1 .
- Déterminer la constante de temps τ_1 .
- Déterminer C_1 .
- Écrire l'expression de $V_{\text{bat}}(t)$ pendant l'échelon en supposant V_{OC} constante.
- Expliquer ce que le modèle R_0 seul aurait été incapable de reproduire.

Modèle thermique

Les pertes internes échauffent la batterie. Un premier modèle thermique global peut être obtenu par bilan d'énergie :

$$C_{th} \cdot \frac{dT}{dt} = P_{pertes} - \frac{T - T_{amb}}{R_{th}}$$

Avec un modèle électrique simple :

$$P_{pertes} \approx R_0 \cdot I^2$$

Le couplage devient important puisque R_0 dépend de la température :

$$R_0 = f(\text{SOC}, T, \text{SOH})$$

Le système forme alors une boucle multiphysique : courant $\rightarrow$ pertes $\rightarrow$ température $\rightarrow$ paramètres électriques $\rightarrow$ tension et pertes.

Exercice

Exercice 6 — Échauffement

Une batterie est modélisée par $R_0 = 20 \text{ m}\Omega$, $C_{th} = 18 \text{ kJ/K}$ et $R_{th} = 0,50 \text{ K/W}$. La température ambiante vaut $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et le courant est constant à 80 A .

- Calculer la puissance thermique générée.
- Calculer la température d'équilibre selon ce modèle.
- Calculer la constante de temps thermique $\tau_{th} = R_{th} C_{th}$.
- Donner l'expression de $T(t)$ si $T(0) = T_{amb}$.
- Commenter les limites physiques de ce modèle.

Sécurité et emballement thermique

Le modèle thermique déjà étudié devient un outil de sécurité dès lors qu'on l'utilise pour anticiper un emballement thermique (thermal runaway) : un phénomène auto-entretenu où l'échauffement interne accélère des réactions exothermiques, qui accélèrent à leur tour l'échauffement.

- Sollicitation électrique excessive : surcharge, décharge profonde, court-circuit interne ou externe.
- Contrainte mécanique : choc, perforation, écrasement.
- Défaut thermique : exposition à une température ambiante élevée, défaillance du refroidissement.

Au-delà d'une température seuil (typiquement de l'ordre de 130–150 °C selon la chimie), la décomposition de l'électrolyte et la rupture du séparateur libèrent une énergie supplémentaire que le modèle linéaire ne représente plus : les pertes cessent d'être dues au seul terme $R_0 I^2$, une source de chaleur chimique s'ajoute. Le modèle électrothermique classique borne donc un domaine de validité, pas la réalité physique au-delà de ce seuil.

- Niveau cellule : séparateur à haute tenue thermique, évent de sécurité, PTC.
- Niveau module/pack : fusibles, disjoncteurs, isolation thermique entre cellules pour limiter la propagation.
- Niveau BMS : coupures sur seuils de tension, courant et température, redondance des capteurs.

Exercice

Exercice 7 — Emballement thermique

On reprend le modèle thermique de l'exercice 6 ($R_0 = 20 \text{ m}\Omega$, $C_{th} = 18 \text{ kJ/K}$, $R_{th} = 0,50 \text{ K/W}$, $T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). On considère qu'un emballement thermique devient possible à partir de $T_{seuil} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$.

- À partir du résultat de l'exercice précédent, la température d'équilibre à 80 A permet-elle d'atteindre T_{seuil} ? Commenter.
- Déterminer le courant constant minimal conduisant, à l'équilibre thermique, à T_{seuil} dans le cadre de ce modèle linéaire.
- Le modèle suppose R_{th} constant. Expliquer qualitativement pourquoi cette hypothèse devient de moins en moins réaliste à mesure que T se rapproche de T_{seuil} .
- Citer deux protections indépendantes qui devraient intervenir avant que la température ne s'approche de T_{seuil} .

État de santé : SOH et vieillissement

Le vieillissement d'une batterie se traduit notamment par une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne.

$\text{SOH}_{\text{capacité}} = Q_{\text{max,actuelle}} / Q_{\text{nominale}}$

Capacity fade : diminution de la quantité d'énergie stockable.

Power fade : augmentation de la résistance interne et diminution de la puissance disponible.

Le vieillissement dépend notamment de la température, du SOC moyen, de la profondeur des cycles, du courant et du temps.

Dans un modèle à long terme, Q_n et R_0 ne sont donc plus des constantes.

Exercice

Exercice 8 — Influence du vieillissement

Un pack de 60 kWh à l'état neuf possède désormais un SOH de capacité de 82 %. Sa résistance interne équivalente a augmenté de 40 %.

- Estimer l'énergie encore utilisable si l'on conserve la même fenêtre de SOC.
- Comparer les pertes Joule avant/après vieillissement pour un même courant.
- Expliquer pourquoi le vieillissement affecte à la fois l'autonomie et la puissance disponible.

Le BMS et l'estimation d'état

Le Battery Management System mesure certaines grandeurs et en estime d'autres. Il assure également les protections et l'équilibrage des cellules.

- Grandeurs mesurées : tensions, courant, températures.
- Grandeurs estimées : SOC, SOH, puissance disponible, parfois température interne.
- Actions : limitation de courant, ouverture de contacteurs, équilibrage, gestion thermique, communication.

Le SOC étant un état interne, des méthodes d'observation peuvent compléter le comptage de Coulombs : correction par OCV, observateurs, filtre de Kalman ou filtre de Kalman étendu pour un modèle non linéaire.

Étude de datasheet : un circuit BMS analogique

Les circuits BMS intégrés du commerce (par exemple les familles de moniteurs/protecteurs multi-cellules de type BQ769xx) combinent la mesure des tensions de cellules, la mesure de courant et des comparateurs de protection à seuils configurables. L'exercice suivant utilise des ordres de grandeur typiques de ce type de composant.

Exercice

Exercice 9 — Étude de datasheet et équilibrage passif

Un circuit BMS analogique protège un pack 13S (13 cellules en série). Sa datasheet indique : seuil de surtension cellule 4,25 V, seuil de sous-tension cellule 2,50 V, seuil de surintensité en décharge 60 A avec un délai de déclenchement de 10 ms, et un courant d'équilibrage passif de 80 mA par cellule.

- Deux cellules du pack affichent un déséquilibre de charge de 130 mAh en fin de charge. En supposant un courant d'équilibrage constant de 80 mA appliqué à la cellule la plus chargée, estimer la durée nécessaire pour résorber ce déséquilibre.
- Le pack subit un appel de courant de 65 A pendant 5 ms. Le BMS coupe-t-il l'alimentation ? Justifier à partir du délai de déclenchement donné.
- Expliquer pourquoi l'équilibrage passif dissipe de l'énergie, alors qu'un équilibrage actif (capacités ou inductances commutées) transfère cette énergie vers les cellules moins chargées.
- Relier le choix d'un seuil de sous-tension nettement supérieur à 0 V à la section 8 (SOH) du cours.

Illustration : filtre de Kalman pour le SOC

Le modèle de Thévenin fournit une équation d'état ; le **filtre de Kalman** l'exploite pour corriger l'estimation du SOC obtenue par comptage de Coulombs à l'aide d'une mesure de tension.

$$\text{Prédiction : } x_k|k-1 = A x_{k-1} + B I_k ; P_k|k-1 = A P_{k-1} A^T + Q$$

$$\text{Correction : } K_k = P_k|k-1 H^T (H P_k|k-1 H^T + R)^{-1}$$

$$x_k = x_k|k-1 + K_k (V_{\text{mesurée},k} - V_{\text{bat,estimée},k})$$

H traduit la sensibilité de la tension de sortie à l'état, en particulier $dV_{OC}/dSOC$ issue de la table du §5, linéarisée localement. Q traduit la confiance accordée au modèle (bruit de process), R la confiance accordée à la mesure (bruit de mesure).

Exercice

Exercice 10 — Une itération de filtre de Kalman

À un instant donné, l'estimation prédite du SOC est de 62,0 % avec une variance $P = 4,0$ (en %²). Une mesure de tension au repos donne, via la table OCV–SOC du §4, un SOC apparent de 65,0 %, avec une variance de mesure $R = 1,0$ (en %²). Dans ce cas simplifié, le gain de Kalman s'écrit $K = P / (P + R)$.

- Calculer le gain de Kalman K .
- Calculer le SOC corrigé après cette itération.
- Calculer la variance a posteriori $P' = (1 - K) P$.
- Commenter : qu'aurait donné une confiance R très supérieure à P (mesure peu fiable) ? Et l'inverse ?
- Expliquer en une phrase pourquoi cette approche est plus robuste, sur le long terme, qu'un comptage de Coulombs seul (voir §4.1).

Application : batterie couplée à une installation photovoltaïque

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{PV}} - P_{\text{charge}}$$

Avec une convention à préciser, le signe de P_{bat} indique charge ou décharge. Une première approximation du courant est :

$$I_{\text{bat}} \approx P_{\text{bat}} / V_{\text{bat}}$$

Le modèle permet ensuite de calculer l'évolution du SOC et de vérifier les limites de courant, tension, température et énergie.

Exercice 11 — Stockage photovoltaïque sur une journée

Une installation dispose d'une batterie nominale de 10 kWh, utilisable entre 20 % et 90 % de SOC. Le SOC initial à 8 h vaut 40 %. On néglige les pertes dans un premier temps. Entre 8 h et 12 h, le surplus PV moyen est de 1,5 kW ; entre 12 h et 16 h, il est de 2,0 kW ; entre 16 h et 20 h, la maison présente un déficit moyen de 1,2 kW.

- Calculer l'énergie échangée sur chacune des trois périodes.
- Déterminer le SOC à 12 h, 16 h et 20 h en tenant compte des limites 20–90 %.
- Quelle quantité d'énergie solaire ne peut pas être stockée ?
- Reprendre le raisonnement avec un rendement de charge de 94 % et un rendement de décharge de 95 %.
- Discuter l'intérêt d'augmenter la capacité de la batterie.

Sujet d'agrégation

Sujet