

Stockage électrochimique



*Stockage d'énergie et piles
à combustibles*

Bouakkaz Abderraouf

Département de génie
électrique

Faculté de technologie

Université 20 Aout 1955
(Skikda)

2.00

Avril 2022

Table des matières

Objectifs	3
I - Stockage électrochimique	4
1. Batteries	4
1.1. Batterie à usage solaire	4
1.2. Technologie de la batterie	4
1.3. Caractéristiques d'une batterie	7
1.4. Paramètres indicateurs de l'état de charge d'une batterie	8
1.5. Modes de charge d'une batterie	9
1.6. Modélisation de la batterie	10
2. Supra condensateurs	12
2.1. Rappel sur les condensateurs	12
2.2. Présentation d'un supra condensateur	13
2.3. Paramètres électriques d'un supra condensateur	14
2.4. Différentes familles des supra condensateurs	15
2.5. Applications des supra condensateurs	16
3. Exercices	18
3.1. Exercice : 01	18
3.2. Exercice : 02	18
3.3. Exercice : 03	18
3.4. Exercice : 04	18
3.5. Exercice : 05	18
3.6. Exercice : 06	18
Abréviations	20

Objectifs

Ce chapitre vise à:

- Maîtriser le principe de fonctionnement des systèmes de stockage électrochimiques ;
- Apprendre les différents applications des systèmes de stockage électrochimiques;
- Maîtriser les principes de fonctionnement de la conversion d'Hydrogène en électricité ;

I Stockage électrochimique

1. Batteries

Les batteries en tant que **stockage d'énergie électrochimique** sont très prometteuses dans une gamme d'applications à petite échelle tel que : appareils électroniques grand public portables tels que les téléphones portables, les manettes de jeu et les tablettes via mobile, aux applications à grande échelle telle que : les véhicules électriques, les chariots élévateurs, les bateaux et à l'alimentation de secours dans les centrales électriques à des applications basées sur le réseau à grande échelle pour **la stabilisation et l'équilibrage d'énergie dans les sources renouvelables intermittentes** comme l'énergie solaire et éolienne.

1.1. Batterie à usage solaire

Les systèmes de stockage d'énergie par batteries sont susceptibles d'avoir un impact significatif sur l'intégration à petite échelle de sources d'énergie renouvelables dans les bâtiments résidentielles et commerciaux, **l'éclairage publique, les micro-réseaux**, etc.... Ces technologies de stockage permettent non seulement d'améliorer les niveaux de consommation des sources d'énergie renouvelables, mais offrent également une gamme d'avantages techniques et économiques

Parmi les types de batteries existant sur les marchés figurent les batteries solaires, qui sont des batteries **dédiées aux applications d'énergie renouvelable** (spécifiquement conçues pour les applications d'énergie solaire ou éolienne). Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Les batteries utilisées avec des panneaux solaires ou une éolienne n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une autre batterie (batterie de voiture, par exemple), elles sont des batteries ont **un taux de décharge élevé** (décharge lente), **se déchargent plus progressivement** et **supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes**.

1.2. Technologie de la batterie

Une batterie comporte un ou plusieurs éléments, chacun doté d'une électrode positive (la cathode), d'une électrode négative (l'anode), d'un séparateur et d'un électrolyte. Selon les composants chimiques et les matières utilisées pour ces éléments, les propriétés de la batterie seront différentes et auront un impact sur la quantité d'énergie stockée et délivrée, la puissance fournie ainsi que sur le nombre de cycles de charges et de décharges.

Les fabricants de batteries recherchent constamment des systèmes électrochimiques plus économiques, plus denses, plus légers et plus puissants. Cependant il existe plusieurs technologies des batteries qui sont:

1.2.1. Batteries au plomb

Les batteries plomb-acide sont les systèmes de batteries rechargeables les plus anciens et les plus largement utilisés aujourd'hui, principalement en raison de l'attachement de l'industrie automobile à la chimie plomb-acide.

Il existe essentiellement deux types de batteries plomb-acide, à savoir (i) le type plomb-acide ouvert et (ii) le type plomb-acide fermé (scellé).

a) Les batteries au plomb ouvertes

La batterie plomb-acide ouvert utilise aujourd'hui essentiellement la conception développée par Faure en 1881. Elle se compose d'un conteneur à plusieurs plaques immergés dans un bassin d'acide sulfurique dilué (batteries à électrolyte liquide).

La recombinaison est minimale, de sorte que l'eau est consommée pendant toute la durée de vie de la batterie et les batteries peuvent émettre des gaz corrosifs et explosifs en cas de surcharge.

Ces batteries nécessitent **un entretien régulier** consistant à refaire le niveau de l'électrolyte, à l'aide d'eau distillée ou déminéralisée, qui doit recouvrir les plaques de quelques millimètres. A faire tous les mois, selon la fréquence d'utilisation et la température ambiante.

i Les batteries fermées

Les batteries plomb-acide fermées (parfois dites étanches) sont apparues pour la première fois dans le commerce au début des années 1970. Bien que les réactions principales de la cellule scellée soient les mêmes que celles des autres formes de batteries plomb-acide, la principale différence réside dans le processus de recombinaison qui se produit dans la cellule scellée lorsqu'elle atteint sa pleine charge.

Au contraire des batteries plomb-acide ouvert, les batteries plomb-acide fermées **ne permet aux gaz de s'échapper**, ni de faire l'entretien par ajout d'eau.

Il existe deux types de batteries plomb-acide fermées: Batteries sèches au Gel et les batteries sèches AGM.

i Les batteries Gel

La batterie au gel est obtenue en mélangeant du gel de silice avec un électrolyte, ce qui l'amène à se mettre en forme sous forme de gélatine.

Cette technologie des batteries a tendance à supplanter les autres modèles à base de plomb en raison de ses caractéristiques plus efficaces. Sur le marché solaire, il est considéré comme l'évolution haut de gamme des batteries plomb-acide.

Elles supportent également mieux les décharges profondes. À 50 % de décharge, elles peuvent durer plus de 1000 cycles. En termes de durée de vie, cela représente entre 6 et 10 ans pour une application solaire.

Notez néanmoins que la batterie gel supporte mal une vitesse élevée de charge et de décharge. Il lui faut donc une application en décharge lente pour optimiser son nombre de cyclages. De plus, elle présente un prix élevé : environ le double de la batterie plomb ouvert. Il faudra également la conserver dans un lieu frais ou climatisé.

i Les batteries AGM

Les batteries AGM utilise un séparateur en fibre de verre fine pour absorber et retenir l'électrolyte liquide. Elle se présente sous la forme d'une batterie au plomb scellée. Son principal avantage est le fait qu'elle ne nécessite pas

d'entretien. Elle présente en plus l'intérêt d'être étanche et de ne pas dégager d'hydrogène ni de chaleur durant les cycles de charge ou de décharge. Plus adaptée aux utilisations quotidiennes, elle peut faire l'objet d'une utilisation régulière, sans que ses performances en soient affectées.

Comme toutes les batteries au plomb, la batterie AGM est particulièrement sensible à l'élévation de la température. Elle est également plus chère que sa version au plomb ouvert et présente une faible durée de vie en cyclage en plus de présenter une profondeur de décharge de 80 % en général.

1.2.2. Accumulateur Nickel-Cadmium

Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) peuvent également être considérées comme une technologie mature. La structure principale de ces batteries contient une plaque d'électrode positive en hydroxyde de nickel, une plaque d'électrode négative en hydroxyde de cadmium, un séparateur et un électrolyte alcalin. Bien que leur densité énergétique soit supérieure à celle des batteries plomb-acide correspondantes, l'auto-décharge est plus importante. Les décharges profondes et une période de service considérable, contrebalançant le coût d'investissement élevé respectif, sont les caractéristiques les plus positives de la technologie ; Les faibles taux d'efficacité et les préoccupations environnementales concernant la toxicité du cadmium sont les caractéristiques les plus négatives de la technologie.

1.2.3. Accumulateur Nickel-Métal Hydrure

Les batteries nickel-hydrure métallique (NiHM) sont similaires à la technologie éprouvée des batteries nickel-cadmium, sauf qu'une électrode négative absorbant l'hydrogène est utilisée à la place de l'électrode à base de cadmium. Cela élimine le cadmium, un matériau toxique, tandis que cette substitution augmente la capacité électrique de la batterie.

Les batteries NiHM ont une durée de vie plus longue que les batteries Li-ion. La caractéristique de décharge plate, l'excellent taux élevé, la longue durée de vie et la tolérance aux abus ont fait du NiHM le premier choix pour une utilisation dans les véhicules électriques hybrides (HEV^{*}). Cependant, l'obstacle important pour les applications HEV^{*} est le taux élevé d'auto-décharge, perdant 5 à 20 % de sa capacité dans les 24 premières heures après une charge complète. Les batteries NiHM coûtent actuellement à peu près le même prix que les batteries lithium-ion.

1.2.4. Batteries au Lithium

Les batteries lithium-ion, proposées pour la première fois dans les années 1960, sont devenues réalité lorsque Bell Labs a développé une anode en graphite utilisable pour fournir une alternative au lithium métal (batterie au lithium). Les premières batteries lithium-ion commerciales ont été produites par Sony en 1990. Depuis lors, de meilleurs développements de matériaux ont conduit à de vastes améliorations en termes de densité énergétique (passée de 75 à 200Wh/kg) et de durée de vie (augmentée jusqu'à 10 000 cycles).

L'efficacité des batteries Li-ion est proche de 100 %, ce qui est un avantage important par rapport aux autres batteries. Ils ont une constante de temps de charge et de décharge rapide définie comme le temps nécessaire pour atteindre 90 % de la puissance nominale de la batterie, soit environ 200 ms, avec une efficacité aller-retour relativement élevée de 78 % en 3 500 cycles. Les batteries lithium-ion sont devenues la technologie de stockage la plus importante dans les domaines des applications portables et mobiles (par exemple, ordinateur portable, téléphone portable, vélo électrique et voiture électrique) depuis environ 2000.

Le principal obstacle est le coût élevé (900 à 1 300 \$/kWh) en raison d'un emballage spécial et des circuits internes de protection contre les surcharges. Étant donné que les batteries lithium-ion sont actuellement encore chères, elles ne peuvent rivaliser avec les batteries au plomb que dans les applications qui nécessitent des temps de décharge courts.

1.3. Caractéristiques d'une batterie

Une batterie au plomb se caractérise essentiellement par :

- **Tension électrique** : La tension, ou potentiel (en volts), est un paramètre important. Fixée par le potentiel d'oxydo-réduction du couple redox utilisé, elle est de l'ordre d'un à quelques volts pour un élément. En pratique des tensions plus élevées sont requises, typiquement de 12, 24 voire 48 V. Il suffit alors de raccorder des éléments du même type en série pour augmenter la tension, au sein d'une batterie d'accumulateurs.
- **Charge électrique** : La charge électrique (la quantité d'électricité emmagasinée par l'accumulateur) est exprimée en Ah (ou mAh : (milli) ampère-heure). Dans la pratique, elle se mesure en multipliant un courant constant (en ampères) par le temps de charge/décharge (en heures).
- **Énergie stockée** : L'énergie stockée dans la batterie est égale à sa charge électrique multipliée par la tension moyenne sous laquelle cette charge est déchargée. L'énergie stockée se mesure habituellement en watts-heures (Wh).

La capacité de la batterie ou bien énergie stockée dans la batterie est calculer par:

$$W = Q \times V$$

où W (en Wh) est l'énergie stockée, V (en volts V) est la tension aux bornes de la batterie, Q est la quantité d'électricité stockée en Ampère heure (Ah).

- **Débit maximum** : Le débit maximum, ou courant de pointe, d'un accumulateur se mesure en ampères. Il est généralement spécifié en amplitude et en durée et est généralement largement supérieur au débit permanent autorisé.
- **Résistance interne** : La résistance interne, exprimée en ohms, est la résistance qui provoque une chute de tension lors de la charge et de la décharge, induisant des pertes par effet joule. La résistance interne limite les courants de charge et de décharge.
- **Taux de charge et de décharge (C rate)** : Le taux de charge et de décharge (C rate) d'une batterie est défini par le temps nécessaire pour que la batterie se charge ou se décharge complètement. L'unité de charge est le rapport entre le courant de charge en A et la capacité C en Ah. Une valeur de 0,5 C correspond à 0,5 A pour une capacité de 1 Ah, ou à 1 A pour une capacité de 2 Ah. Dans les deux cas précédents, la charge dure 2 h.

Le taux de charge et décharge énergie est calculer par :

$$E_{max} = Q / C_r$$

où (en Ah) est l'énergie stockée, Q est la quantité d'électricité stockée en Ampère heure (Ah).

Le temps de charge ou de décharge d'une batterie évolue selon le taux de charge et de décharge (C rate) comme suit :

$$t = 1 / C_r$$

Exemple : Une batterie a une capacité 2300mAh et un taux de charge/décharge = 0,5C
2300mAh = 2.3Ah, donc le courant de charge et décharge égale 0,5C x 2,3Ah = 1,15A.

- **Efficacité énergétique** : L'utilisation de la batterie à travers charge puis décharge donne lieu à des pertes. Ces pertes sont caractérisées par une efficacité énergétique.

- **Densité** : La densité de puissance en pointe, ou puissance spécifique, correspond à la puissance maximale rapportée à la masse de l'accumulateur (exprimée en watts par kilogramme, W/kg). De la même manière, on peut calculer la puissance rapportée au volume, moins usitée. Cette puissance spécifique est surtout fonction inverse de la résistance interne de l'accumulateur.
- **Viellissement et usure** : Le vieillissement et l'usure entraînent une perte progressive de la capacité des batteries avec le temps (plusieurs années) et l'usage (plusieurs centaines ou milliers de cycles de charge et de décharge). Ils sont souvent fortement dépendant des conditions d'emploi (amplitude du cyclage, température de stockage et d'utilisation).

1.4. Paramètres indicateurs de l'état de charge d'une batterie

Définition : État de charge

L'état de charge est le **niveau de charge** d'une batterie électrique par rapport à **sa capacité**. Les unités du l'état de charge sont des points de pourcentage (0 % = vide ; 100 % = plein). Une autre forme de la même mesure est la profondeur de décharge, l'inverse de l'état de charge (100 % = vide ; 0 % = plein). L'état de charge est normalement utilisé pour discuter de l'état actuel d'une batterie en cours d'utilisation, tandis que la profondeur de décharge est le plus souvent utilisé pour discuter de la durée de vie de la batterie après une utilisation répétée.

Habituellement, l'état de charge ne peut pas être mesuré directement, mais il existe cinq méthodes pour déterminer l'état de charge indirectement.

1.4.1. Méthode chimique

Cette méthode ne fonctionne qu'avec des batteries qui permettent d'accéder à un électrolyte liquide, telles que les batteries plomb-acide non scellées. La densité ou le pH de l'électrolyte peut être utilisé pour faire référence au l'état de charge de la batterie.

Les hydromètres sont utilisés pour calculer la gravité spécifique d'une batterie. Pour trouver la densité, il faut mesurer le volume de l'électrolyte et le peser. La densité est alors donnée par (masse d'électrolyte [g] / volume d'électrolyte [ml]) / (densité d'eau, soit 1 g / 1 ml).

1.4.2. Méthode de tension

Cette méthode convertit une lecture de la tension de la batterie en SoC^* , en utilisant la courbe de décharge connue (tension vs. SoC^*) de la batterie. Cependant, la tension est plus significativement affectée par le courant de la batterie (en raison de la cinétique électrochimique de la batterie) et la température. Cette méthode peut être rendue plus précise en compensant la lecture de tension par un terme de correction proportionnel au courant de la batterie et en utilisant une table de correspondance de la tension en circuit ouvert de la batterie en fonction de la température.

1.4.3. Méthode d'intégration du courant

Cette méthode, également appelée « comptage de coulombs », calcule le SoC en mesurant le courant de la batterie et en l'intégrant dans le temps. Aucune mesure ne pouvant être parfaite, cette méthode souffre d'une dérive à long terme et d'un manque de point de référence : par conséquent, le SoC doit être recalibré régulièrement, par exemple en réinitialisant le SoC à 100 % lorsqu'un chargeur détermine que la batterie est complètement chargée

1.4.4. Filtrage de Kalman

Pour pallier les inconvénients de la méthode de tension et de la méthode d'intégration de courant, un filtre de Kalman peut être utilisé. La batterie peut être modélisée avec un modèle électrique que le filtre de Kalman va utiliser pour prédire la surtension, due au courant. En combinaison avec le comptage coulomb, il peut faire une estimation précise de l'état de charge. La force d'un filtre de Kalman est qu'il est capable d'ajuster sa confiance sur la tension de la batterie et le comptage de coulombs en temps réel.

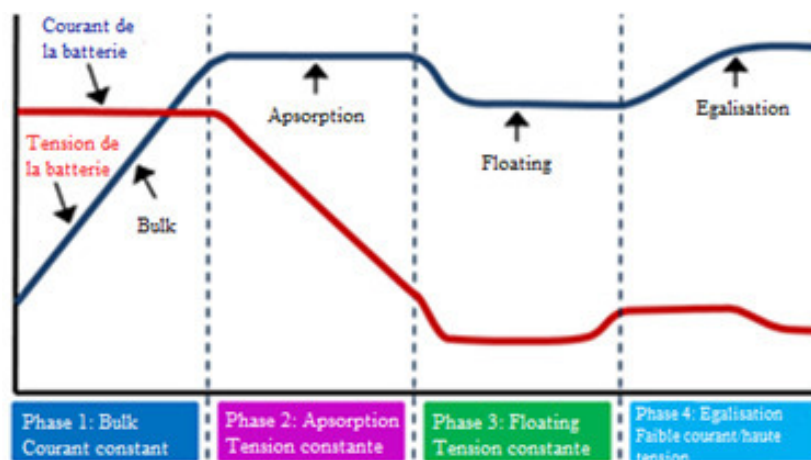
1.4.5. Méthode de pression

Cette méthode peut être utilisée avec certaines batteries NiHM, dont la pression interne augmente rapidement lorsque la batterie est chargée. Plus communément, un pressostat indique si la batterie est complètement chargée.

1.5. Modes de charge d'une batterie

Il existe quatre modes de charge différents, bulk, absorption, floating et égalisation :

- **Mode bulk (Bulk charge mode):** C'est la première phase de charge, le chargeur impose un courant limité et constant par contre la tension monte rapidement, puis plus lentement. La batterie peut absorber de 10 à 20% de sa capacité par heure (environ 80% de la capacité de la batterie est restituée dans la région à courant constant).
- **Mode absorption (Absorption mode):** C'est la deuxième phase de charge, à partir d'un certain seuil, le courant commence à diminuer et la tension reste constante. Cette tension est maintenue jusqu'à la charge complète de la batterie (C'est dans cette région que les derniers 20 % de capacité de la batterie sont restitués).
- **Mode flottante (Float mode):** Cette phase intervient lorsque la batterie est chargée (le chargeur de batterie passe en mode flottant). La tension est réduite et maintenue à une valeur d'entretien plus basse, destinée à compenser l'auto-décharge de la batterie (Cette tension maintiendra la condition de charge complète dans la batterie sans faire bouillir notre électrolyte ou surcharger la batterie).
- **Mode égalisation (Equalization mode):** Ce mode n'est utilisé que pour les batteries au plomb ouvert (non étanche). Il sert à brasser l'électrolyte en supprimant la stratification. La tension est très élevée durant cette phase et d'une durée déterminée. Son but est l'entretien et le prolongement de la durée de vie de la batterie. Le mode d'égalisation peut durer de quelques heures à plus de 24 heures selon les circonstances.

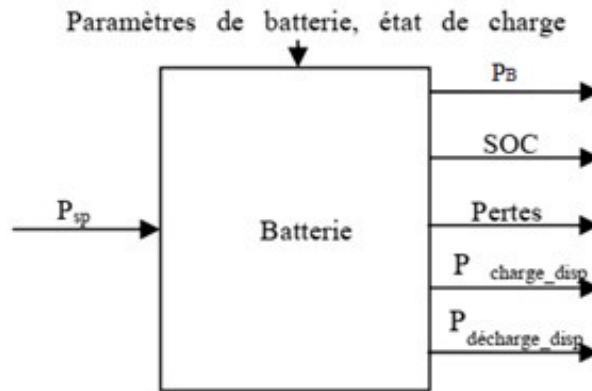


Les modes de charge de la batterie.

1.6. Modélisation de la batterie

Spécifications fonctionnelles

La donnée d'entrée est la puissance de consigne (P_{sp} , positive en décharge, négative en charge). Les données sortantes sont la puissance réelle de batterie (P_B), l'état de charge (SOC), les pertes de la batterie, la puissance de décharge disponible et puissance de charge disponible.



Présentation du modèle de la batterie.

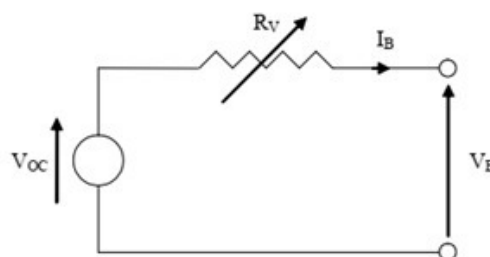
Physiquement, les contraintes suivantes doivent être respectées :

- La puissance de décharge ne doit pas dépasser la puissance limite,
- La puissance de charge ne doit pas provoquer pas de surtensions ($V \leq V_{max}$)
- Le courant de charge ne dépasse pas une valeur limite ($I \leq I_{lim}$)

1.6.1. Circuit équivalent

La modélisation des batteries peut être effectuée de nombreuses manières en fonction des exigences et de la précision du système. Il s'agit notamment des modèles électrochimiques, des modèles numériques de dynamique des fluides, des modèles d'éléments finis et des modèles équivalents électriques.

Circuit électrique équivalent est le modèle qui représente les différents paramètres et caractéristiques de la batterie par des équations électriques. La figure (2.3) présente le circuit électrique équivalent d'un modèle simple d'une batterie.



Circuit équivalent de la batterie (modèle simple)

Un modèle simple se compose de V_{OC} comme la tension de la batterie en circuit ouvert (à vide) et d'une résistance variable qui dépend de l'état de charge de la batterie. V_B est la tension aux bornes de la batterie. La résistance variable R_V varie en fonction de l'état de charge de la batterie :

$$R_V = R_I + K \frac{Q_{max}}{Q}$$

Où :

R_I : est la résistance interne (Ω)

K : Facteur de tension de polarisation (Ω)

I_B : Courant de batterie (A)

Q_{max} : Capacité maximale de la batterie(Ah)

Q : Charge instantanée de la batterie(Ah) est donnée par :

$$Q = Q_0 - \eta_C \int_0^t I_B dt$$

2. Supra condensateurs

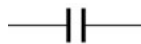
2.1. Rappel sur les condensateurs

🔍 Définition

Le condensateur est un composant électronique élémentaire qui stocke des charges électriques et les libère lorsque cela est requis par le circuit.

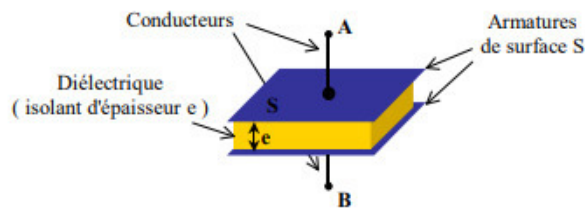
2.1.1. Symbole

Le symbole d'un condensateur dans un circuit est présenté par :



2.1.2. Constitution

Les condensateurs sont constitués de deux armatures conductrices (appelées électrodes) en influence totale et séparées par un isolant polarisable (ou diélectrique). Sa propriété principale est de pouvoir stocker des charges électriques opposées sur ses armatures. La valeur absolue de ces charges est proportionnelle à la valeur absolue de la tension qui lui est appliquée.



Constitution d'un condensateur.

2.1.3. Applications et utilisations

Le condensateur est utilisé principalement pour :

- Stabiliser une alimentation électrique (il se décharge lors des chutes de tension et se charge lors des pics de tension) ;
- Traiter des signaux périodiques (filtrage...) ;
- Séparer le courant alternatif du courant continu, ce dernier étant bloqué par le condensateur;
- Stocker de l'énergie, auquel cas on parle de super-condensateur.

2.1.4. Caractéristiques d'un condensateur

Le condensateur est caractérisé par le coefficient de proportionnalité entre charge et tension, appelé capacité électrique et exprimé en farads (F). La relation caractéristique d'un condensateur idéal est :

$$i = C \frac{du}{dt}$$

Où :

: l'intensité du courant électrique qui passe par le composant, exprimée en ampères (A) ;

la dérivée de la tension par rapport au temps (V/s).

$$Q=C \times U$$

Où :

: est la charge stockée sur sa borne positive (qui s'exprime en coulombs),

: la capacité électrique du condensateur (farads),

: la tension aux bornes du composant (volts).

2.1.5. Associations de condensateurs

a) Condensateurs associés en parallèle

Lorsque plusieurs condensateurs sont associés en parallèle, la capacité totale se calcule en additionnant la capacité de chacun des condensateurs.

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3$$

Dans cette équation les différentes capacités sont C_1 , C_2 et C_3 , tandis que C_{total} représente la capacité totale équivalente.

b) Condensateurs associés en série

Lorsque les condensateurs sont associés en série, la capacité totale se calcule à l'aide du formulaire suivant:

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Cette équation stipule que l'inverse de la capacité totale est égal à la somme des inverses de chaque capacité.

2.2. Présentation d'un supra condensateur

Définition

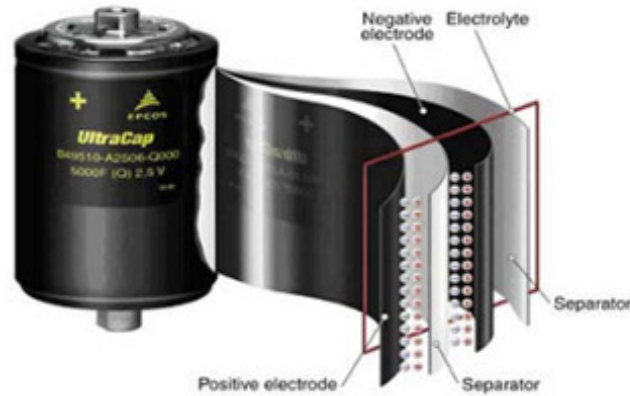
Les condensateurs électrochimiques, également appelés super-condensateurs (SC) ou ultra-condensateurs (UC), sont des condensateurs de grande capacité avec une valeur de capacité beaucoup plus élevée que les autres condensateurs, mais avec des limites de tension inférieures, qui comblent le fossé entre les condensateurs électrolytiques et les batteries rechargeables. Il stocke généralement 10 à 100 fois plus d'énergie par unité de volume ou de masse que les condensateurs électrolytiques, peut accepter et fournir une charge beaucoup plus rapidement que les batteries et tolère beaucoup plus de cycles de charge et de décharge que les batteries rechargeables.

2.2.1. Constitution :

Les super-condensateurs se composent de deux électrodes métalliques (généralement en aluminium) séparées par une membrane perméable aux ions (séparateur) et d'un électrolyte reliant ioniquement les deux électrodes. Lorsque les électrodes sont polarisées par une tension appliquée, les ions dans l'électrolyte forment des doubles couches

électriques de polarité opposée à la polarité de l'électrode. Par exemple, les électrodes polarisées positivement auront une couche d'ions négatifs à l'interface électrode/électrolyte avec une couche d'équilibrage de charge d'ions positifs adsorbant sur la couche négative. L'inverse est vrai pour l'électrode polarisée négativement.

De plus, en fonction du matériau de l'électrode et de la forme de la surface, certains ions peuvent imprégner la double couche devenant des ions spécifiquement adsorbés et contribuer avec une pseudo capacité à la capacité totale du super-condensateur.



Principe d'assemblage des super condensateurs.

2.3. Paramètres électriques d'un supra condensateur

- **Capacitance** : C'est la valeur pour laquelle le condensateur a été conçu. La valeur d'un composant réel doit être dans les limites données par la tolérance spécifiée.
- **Tension de fonctionnement** : Les supra condensateurs sont des composants basse tension. Un fonctionnement sûr nécessite que la tension reste dans les limites spécifiées. La tension nominale est la tension continue maximale ou la tension d'impulsion de crête qui peut être appliquée en continu et rester dans la plage de température spécifiée. Les condensateurs ne doivent jamais être soumis à des tensions continuellement supérieures à la tension nominale.
- **Résistance interne** : La charge/décharge d'un supra condensateur est liée au mouvement des porteurs de charge (ions) dans l'électrolyte à travers le séparateur jusqu'aux électrodes et dans leur structure poreuse. Des pertes se produisent pendant ce mouvement qui peuvent être mesurées en tant que résistance interne. La résistance interne dépend du temps et augmente pendant la charge/décharge.
- La résistance interne peut être calculée à partir de la chute de tension au moment de la décharge, en commençant par un courant de décharge constant. La résistance peut être calculée par :

$$R_i = \frac{\Delta V_2}{I_{discharge}}$$

- **Capacité énergétique** : L'énergie (exprimée en Joule) qui peut être stockée dans un condensateur est donnée par la formule :

$$W_{max} = \frac{1}{2} \cdot C_{total} \cdot V^2$$

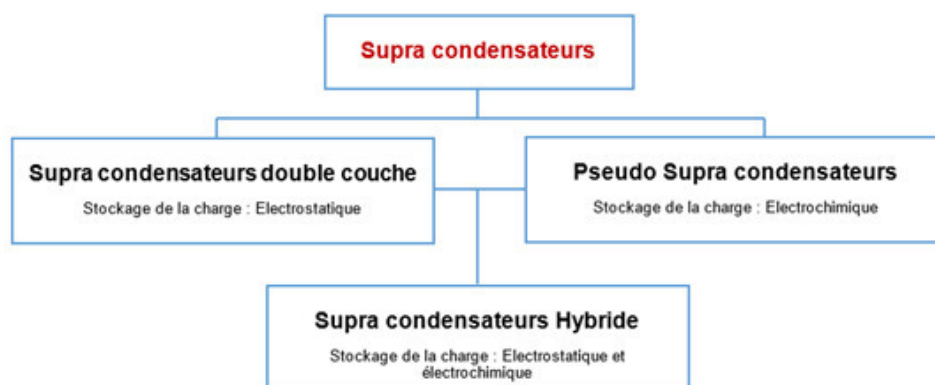
- **Durée de vie** : Étant donné que les supra condensateurs ne reposent pas sur des changements chimiques dans les électrodes (sauf pour ceux avec des électrodes en polymère), les durées de vie dépendent principalement

du taux d'évaporation de l'électrolyte liquide. Cette évaporation est généralement fonction de la température, de la charge de courant, de la fréquence du cycle de courant et de la tension. La charge actuelle et la fréquence du cycle génèrent de la chaleur interne, de sorte que la température déterminant l'évaporation est la somme de la chaleur ambiante et interne. Cette température est mesurable en tant que température centrale au centre d'un corps de condensateur. Plus la température à cœur est élevée, plus l'évaporation est rapide et plus la durée de vie est courte. Cette évaporation entraîne généralement une diminution de la capacité et une augmentation de la résistance interne.

- **Auto-décharge** : Le stockage de l'énergie électrique dans la double couche sépare les porteurs de charge dans les pores par des distances de l'ordre des molécules. Sur cette courte distance, des irrégularités peuvent se produire, entraînant un petit échange de porteurs de charge et une décharge progressive. Cette auto-décharge est appelée courant de fuite. La fuite dépend de la capacité, de la tension, de la température et de la stabilité chimique de la combinaison électrode/électrolyte. À température ambiante, les fuites sont si faibles qu'elles sont spécifiées comme le temps d'auto-décharge.

2.4. Différentes familles des supra condensateurs

Selon la nature du matériau utilisé pour les électrodes, les supra condensateurs sont classés principalement en deux familles : les supra condensateurs électrostatiques utilisent une capacité électrostatique double couche et les supra condensateurs électrochimiques utilisent une pseudo-capacité électrochimique pour stocker l'énergie électrique. Comme il existe une troisième catégorie appelée supra condensateur hybride, c'est un mélange des deux types, ce qui permet d'exploiter les avantages et d'atténuer les inconvénients des supra condensateurs électrochimiques double couche et des pseudo-condensateurs. La figure 2.6 montre la classification principale des supra condensateurs.



Les types des super condensateurs

2.4.1. Supra condensateurs double couche

Les condensateurs à double couche sont construits à partir de deux plaques de carbone, et un diélectrique. Les supra condensateurs électrochimiques à double couche (SEDC) stockent les charges dans des doubles couches électriques formées près des interfaces électrode/électrolyte par voie électrostatique et il n'y a pas de transmission de charges entre les plaques et les électrolytes. Le condensateur électrique à double couche prend en charge l'accumulation électrostatique réversible d'ions à la surface d'une électrode poreuse.

2.4.2. Pseudo supra condensateurs

Pseudo supra condensateurs est le stockage électrochimique de l'énergie électrique obtenue par le transfert des charges électrique faradique entre l'électrolyte avec des réactions redox. Cette procédure faradique peut permettre

aux pseudo-condensateurs d'atteindre des capacités et une énergie 10 à 100 fois supérieures à celles des supra condensateurs électrostatique à double couche.

2.4.3. Supra condensateurs hybride

Les supra condensateurs hybrides, sont essentiellement un mélange d'une électrode de type batterie faradique (pseudo-condensateurs) et d'une électrode de type condensateur à double couche électrique non faradique. Utilisant à la fois des procédures faradiques et non faradiques pour stocker les charges, les condensateurs hybrides ont des concentrations d'énergie et de puissance supérieures à EDLC* (condensateurs électrochimiques à double couche) privés des dépenses de constance de direction et offrent une aptitude qui a limité la réalisation de pseudo-condensateurs.

2.5. Applications des supra condensateurs

Les supra condensateurs ne prennent pas en charge les applications à courant alternatif. Les supra condensateurs présentent des avantages dans les applications où une grande quantité d'énergie est nécessaire pendant une période relativement courte, où un nombre très élevé de cycles de charge/décharge ou une durée de vie plus longue est requis.

Les applications typiques vont de courants milliampères ou milliwatts de puissance pendant quelques minutes à plusieurs ampères ou plusieurs centaines de kilowatts de puissance pendant des périodes beaucoup plus courtes.

2.5.1. Equilibrage en tension

Les supra condensateurs peuvent stabiliser les fluctuations de tension des lignes électriques en agissant comme des amortisseurs. Les systèmes éoliens et photovoltaïques présentent une offre fluctuante évoquée par des rafales ou des nuages que les super condensateurs peuvent tamponner en quelques millisecondes.

Exemple : Micro-réseaux

Les micro-réseaux sont généralement alimentés par une énergie propre et renouvelable. Cependant, la majeure partie de cette production d'énergie n'est pas constante tout au long de la journée et ne correspond généralement pas à la demande. Les supra condensateurs peuvent être utilisés pour le stockage sur micro-réseau afin d'injecter instantanément de l'énergie lorsque la demande est élevée et que la production baisse momentanément, et pour stocker de l'énergie dans les conditions inverses. Ils sont utiles dans ce scénario, car les micro-réseaux produisent de plus en plus d'électricité en courant continu et les condensateurs peuvent être utilisés dans les applications en courant continu et en courant alternatif. Les supra condensateurs fonctionnent mieux en conjonction avec des batteries chimiques. Ils fournissent un tampon de tension immédiat pour compenser les charges d'alimentation changeant rapidement en raison de leur taux de charge et de décharge élevé grâce à un système de contrôle actif. Une fois la tension tamponnée, elle passe par un onduleur pour fournir du courant alternatif au réseau. Il est important de noter que les super condensateurs ne peuvent pas fournir une correction de fréquence sous cette forme directement dans le réseau.

2.5.2. Récupération d'énergie

Les super-condensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie temporaires appropriés pour les systèmes de récupération d'énergie. Dans les systèmes de récupération d'énergie, l'énergie est collectée à partir de sources ambiantes ou renouvelables, par exemple un mouvement mécanique, des champs lumineux ou électromagnétiques, et convertie en énergie électrique dans un dispositif de stockage d'énergie.

2.5.3. Incorporation dans les batteries

L'Ultra Batterie est une batterie hybride au plomb rechargeable et un super-condensateur. Sa construction de cellule contient une électrode positive de batterie au plomb standard, un électrolyte d'acide sulfurique standard et une électrode négative à base de carbone spécialement préparée qui stocke l'énergie électrique avec une capacité à double couche. La présence de l'électrode de super-condensateur altère la chimie de la batterie et lui offre une protection significative contre la sulfatation en état de charge partielle à haut débit, qui est le mode de défaillance typique des cellules plomb-acide régulées par valve utilisées de cette manière. La cellule résultante fonctionne avec des caractéristiques au-delà d'une cellule plomb-acide ou d'un super-condensateur, avec des taux de charge et de décharge, une durée de vie, une efficacité et des performances améliorés.

3. Exercices

3.1. Exercice : 01

Parmi les batteries au plomb on trouve:

- Les batteries Gel
- La batterie plomb-acide ouvert
- Les batteries lithium-ion
- Les batteries NiHM
- Les batteries AGM.

3.2. Exercice : 02

Une batterie d'accumulateurs se décharge complètement en 20 heures lorsqu'elle débite 10 Ampères. Quelle est la capacité de la batterie en ampères-heures.

3.3. Exercice : 03

Une batterie d'accumulateurs se décharge complètement en 20 heures lorsqu'elle débite 10 Ampères. Quelle est la capacité de la batterie en ampères-heures.

3.4. Exercice : 04

Les phases de charge d'une batterie sont :

Absorption

Égalisation

Floating

Bulk

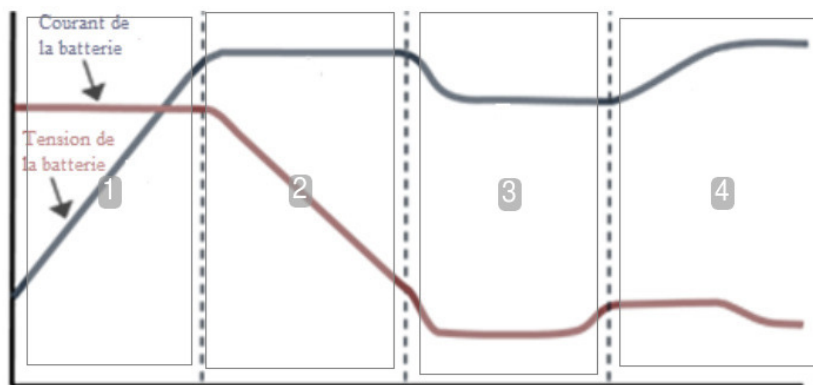
3.5. Exercice : 05

Complétez les mots manquants par les mots suivantes : *énergie renouvelable; batteries ; batteries solaires*

Les sont des dédiées aux applications d'

3.6. Exercice : 06

Indiquez sur l'image ci-dessous les différents mode de charge d'une batterie suivante : bulk ; Mode flottante



Modes de charge d'une batterie

Abréviations

EDLC : Electrochemical double-layer capacitors

HEV : Hybrid electric vehicles

SoC : State of charge