



Mieux exploiter la récolte d'énergie

Révolutionner l'IoT avec des solutions de stockage d'énergie durables | Grâce à leur longue durée de vie et à leur capacité à charger aussi bien des courants ultra faibles qu'élevés, les supercondensateurs haute énergie constituent une solution de stockage d'énergie idéale pour les applications IoT et l'électronique portable autonome: ils permettent d'assurer une alimentation continue et sans maintenance.

CLARA MOLDOVAN, VICTORIA MANZI-OREZZOLI

La croissance de l'Internet des objets (Internet of Things, IoT) observée au cours des dernières années promet de révolutionner de multiples secteurs, en permettant aux dispositifs intelligents de collecter et d'échanger des données, améliorant ainsi l'efficacité et la connectivité. À l'échelle mondiale, plus de 75 milliards d'appareils interconnectés devraient ainsi être en service dans les villes, les maisons et l'agriculture d'ici 2030. Leur déploiement reste toutefois encore limité par les systèmes de stockage d'énergie.

Les batteries traditionnelles telles que les batteries lithium-ion présentent en effet des limitations significatives: pertes énergétiques lors des cycles de charge-décharge, dégradation rapide des matériaux, et performances insuffisantes pour les pics de puissance élevés nécessaires à la transmission efficace et rapide des données. Pour assurer la durabilité des applications IoT, des solutions de stockage d'énergie optimisées sont donc cruciales: celles-ci doivent assurer une opération continue, réduire les remplacements des batteries, et être compatibles avec les techniques de

récolte d'énergie afin de prolonger la durée de vie des dispositifs IoT et donc de limiter leur impact environnemental. Elles améliorent ainsi la fiabilité des réseaux IoT en stabilisant l'alimentation et en permettant de meilleures stratégies de gestion de l'énergie.

Si l'intégration de solutions de stockage d'énergie efficaces est essentielle pour la croissance des applications IoT, elle l'est aussi pour atteindre les objectifs de développement durable, en améliorant l'efficacité énergétique, en réduisant les empreintes carbone et en favorisant l'intégration des sources

d'énergie renouvelables dans les réseaux intelligents. En réponse à ces défis, les supercondensateurs associés à des systèmes de récolte d'énergie offrent une solution efficace et durable pour couvrir les besoins énergétiques croissants des dispositifs modernes.

Repousser les limites du stockage d'énergie

Les supercondensateurs double couche sont des dispositifs de stockage d'énergie électrochimiques qui stockent l'énergie de manière électrostatique (figure 1a) : ils exploitent l'adsorption des ions négatifs de l'électrolyte sur l'électrode chargée positivement. Ils offrent une haute densité de puissance et une durée de vie pouvant atteindre jusqu'à un million de cycles de charge-décharge. Les supercondensateurs hybrides (figure 1b), contrairement aux supercondensateurs standards, intègrent en outre des réactions chimiques d'oxydoréduction. Leurs mécanismes incluant une pseudocapacité redox, ils combinent les caractéristiques des supercondensateurs et des batteries, ce qui leur permet d'augmenter leur densité d'énergie. De plus, contrairement aux batteries Li-ion (figure 1c) - dont la capacité est déterminée par l'intercalation du lithium dans l'électrode de graphite -, les supercondensateurs n'impliquent pas de réaction redox chimique globale lors de la charge ou de la décharge, éliminant ainsi les risques de sécurité liés à la formation de dendrites, et peuvent fonctionner à des températures plus étendues.

Comme illustré dans la figure 2, les supercondensateurs hybrides offrent un compromis idéal : ils présentent des performances intermédiaires, entre les supercondensateurs et les batteries, avec une densité de puissance supérieure aux batteries classiques. Ils comblent ainsi un écart de performance crucial pour de nombreuses applications actuelles.

Enfin, des supercondensateurs hybrides haute énergie ont été développés par la start-up Swistor. Leur particularité réside dans l'utilisation d'électrolytes haute tension et d'électrodes de nanocarbone optimisées pour correspondre parfaitement à l'électrolyte, améliorant ainsi les performances et l'efficacité des supercondensateurs. Cette particularité les positionne, dans la figure 2, à la

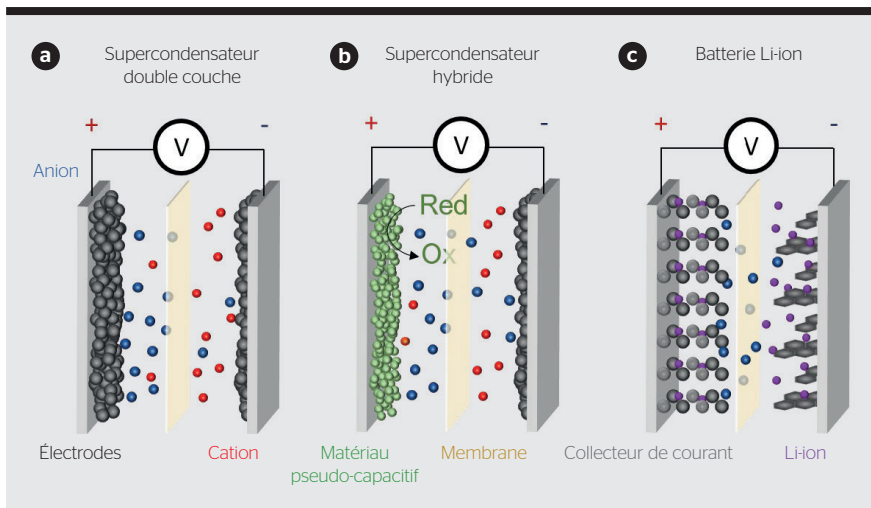


Figure 1 Les différents dispositifs de stockage d'énergie capacitive : a) le supercondensateur double couche, b) le supercondensateur hybride, et c) la batterie Li-ion.

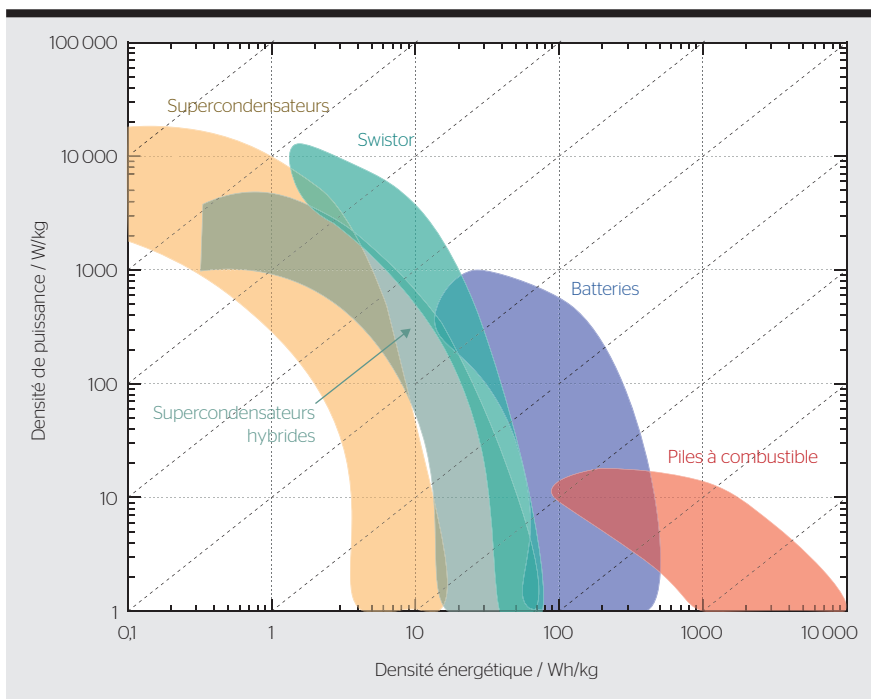


Figure 2 Diagramme de Ragone comparant la densité énergétique et la densité de puissance de divers dispositifs de stockage d'énergie.

droite de la courbe des supercondensateurs hybrides, et leur permet de fournir des pics de puissance élevés en cas de nécessité ainsi que de disposer d'une haute densité énergétique [1-3].

Les supercondensateurs boostent la récolte d'énergie

Les supercondensateurs bénéficient de multiples avantages par rapport aux batteries. Ils peuvent, par exemple, supporter plus de 500 000 cycles de charge-décharge, contre 500 à 1000 pour les batteries Li-ion. Leur **longue**

durée de vie réduit donc considérablement les besoins en matière de remplacement et d'entretien, abaissant ainsi les coûts opérationnels [4].

Les supercondensateurs peuvent aussi être intégrés plus efficacement avec des sources d'énergie très variables, et ce, spécifiquement dans les applications avec de **faibles courants de charge** telles que la récolte d'énergie piézoélectrique, radiofréquence, ou photovoltaïque (PV) avec une faible luminosité, où ils présentent l'avantage de se charger plus rapide-

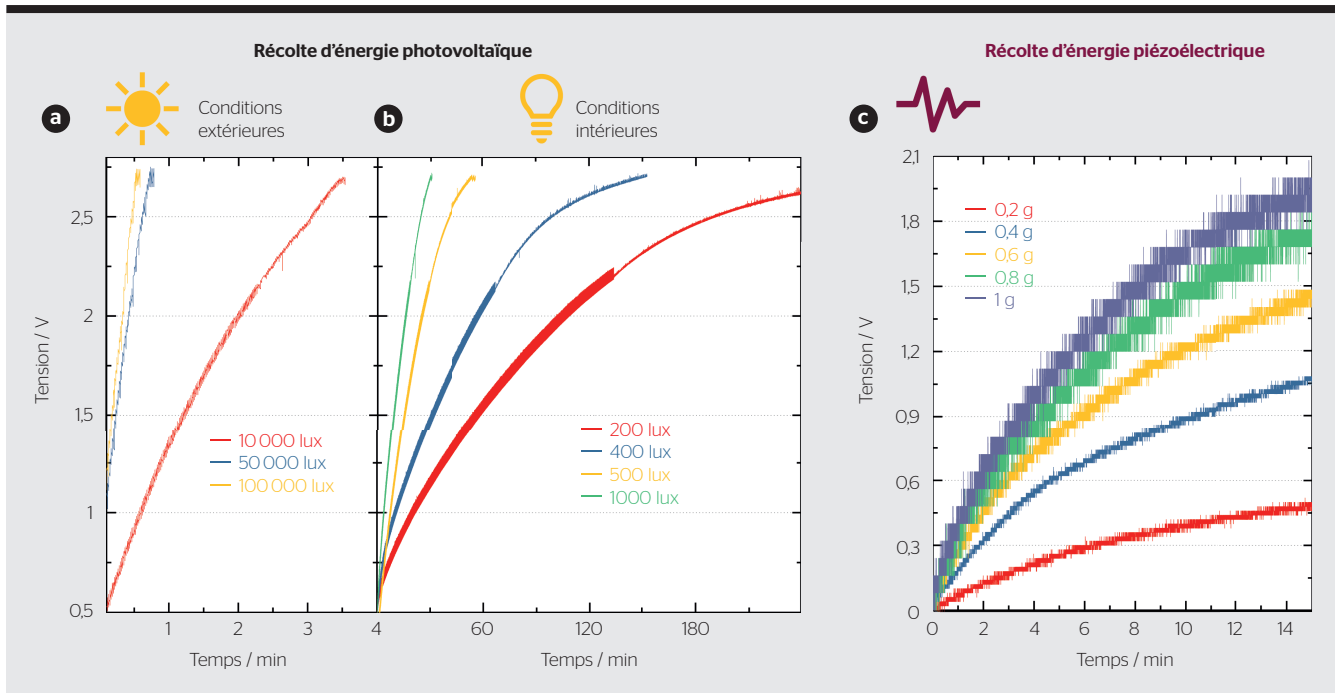


Figure 3 Caractéristiques de charge d'un supercondensateur : **a)** de 200 mF avec une cellule solaire dans des conditions de lumière extérieure intense et **b)** dans des conditions de faible luminosité intérieure, et **c)** de 50 mF avec trois dispositifs piézoélectriques soumis à des vibrations à une fréquence cible pour les applications automobiles.

ment que les batteries lithium-ion. Leur faible résistance interne permet en outre une **absorption et une libération rapide de l'énergie** sans pertes significatives [5]. Il leur est ainsi possible, à source égale, de récolter plus d'énergie qu'un système classique, et donc d'améliorer l'efficacité globale et la disponibilité énergétique. Les supercondensateurs offrent aussi de **hautes densités de puissance**, allant jusqu'à 20 kW/kg, bien supérieures aux 100 à 1000 W/kg typiquement fournis par les batteries. L'avantage réside principalement dans le fait que le système sera capable de fournir de très forts pics de puissance de façon discontinue, typiquement nécessaires lors de la communication d'un système IoT [6] ou de la transmission de grandes quantités de données sur de longues distances.

De plus, les supercondensateurs ne contiennent pas de produits chimiques nocifs tels que le lithium, le plomb ou le cadmium. Ils sont aussi plus faciles à recycler, ce qui permet de **réduire l'impact environnemental** des processus d'élimination et de recyclage.

Enfin, les supercondensateurs peuvent fonctionner à des températures extrêmes, allant de -40°C à $+85^{\circ}\text{C}$. Cette **robustesse** les rend idéaux pour une utilisation dans des

environnements difficiles tels que les stations de surveillance à distance.

Les caractéristiques énumérées ci-dessus et leur rentabilité font des supercondensateurs une solution idéale pour améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes IoT autonomes.

Utilisation avec la récolte d'énergie PV ou piézoélectrique

Les études de cas décrites ci-après montrent comment l'intégration de supercondensateurs avec de petites cellules photovoltaïques ou des dispositifs piézoélectriques peut améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité de divers systèmes IoT, tout en leur permettant de disposer d'une autonomie prolongée et en réduisant la nécessité d'une maintenance fréquente.

La **figure 3** montre la charge d'un supercondensateur Swistor de 200 mF avec une cellule solaire PowerFilm Solar LL200-2.4-37, et ce, à la fois dans des conditions extérieures avec une forte intensité lumineuse (**figure 3a**) et dans des conditions intérieures avec une faible luminosité (**figure 3b**) – une plage que les batteries ne peuvent pas couvrir. La charge d'un supercondensateur de 50 mF avec un système de récolte d'énergie piézoélectrique – avec des courants extrêmement faibles de

l'ordre de quelques microampères – est également démontrée dans la **figure 3c** : pour ce faire, trois dispositifs piézoélectriques (à base de PZT) de Mide Technology ont été connectés en parallèle et soumis à des vibrations à une fréquence de 86 Hz, similaires à celles observées à l'intérieur d'une voiture à différentes vitesses de croisière et dans diverses conditions d'accélération et de freinage.

Pour la première étude de cas, correspondant aux applications alimentées par une lumière intérieure faible (100 à 200 lx), le supercondensateur a été dimensionné de sorte à pouvoir fournir l'énergie et la puissance de quelques microwatts nécessaires pour soutenir le pic de charge d'un capteur d'humidité et de température Humigadget SHT3x, enregistrant des données toutes les 5 min et les transmettant avec Bluetooth Low Energy (BLE). La **figure 4** montre que le supercondensateur est en outre capable de stocker l'énergie pendant les périodes de faible luminosité afin de maintenir le fonctionnement continu du capteur. Ce dimensionnement permet ainsi non seulement de répondre aux besoins énergétiques immédiats, mais aussi de garantir une alimentation stable et fiable pendant les périodes sans lumière directe.

Une preuve de concept similaire a été démontrée par Swistor, en collaboration avec Renault Technologies et l'Institut national de recherche et développement en microtechnologies (IMT) de Bucarest, pour un capteur alimenté par un dispositif piézoélectrique récoltant l'énergie des vibrations d'une voiture. Ce capteur de faible puissance fonctionne en continu, autant en présence de vibrations – quand le véhicule roule – que lorsqu'il est arrêté à un feu. Cette démonstration a prouvé le potentiel de ces technologies pour alimenter une fonctionnalité de sécurité dans une voiture sans avoir à tirer un câble supplémentaire vers l'emplacement du capteur, ce qui ajouterait de la complexité au système. En effet, les supercondensateurs permettent de récolter et de stocker l'énergie générée par les vibrations du véhicule, même à de très faibles intensités, et de l'utiliser pour alimenter des capteurs de sécurité essentiels. Cette approche non seulement réduit les coûts et la complexité de l'installation, mais améliore aussi la fiabilité et la durabilité des systèmes de sécurité des véhicules.

La flexibilité et la résilience des supercondensateurs, démontrées par ces expériences, constituent des atouts majeurs pour leur intégration dans diverses applications IoT (figure 5), et en particulier dans des environnements où les conditions en matière d'énergie peuvent fluctuer considérablement.

Impact et perspectives d'avenir

Grâce à l'intégration de technologies avancées de récolte et de stockage d'énergie telles que les cellules solaires et les supercondensateurs, les dispositifs IoT peuvent fonctionner de manière autonome avec une durée de vie de plus de 20 ans. Ces innovations permettent ainsi de réduire les coûts et d'accélérer le déploiement des systèmes IoT dans tous les domaines.

Les supercondensateurs à haute densité d'énergie ouvrent en outre une nouvelle gamme d'applications auparavant impossibles à couvrir. Grâce à leur capacité à stocker et à délivrer de grandes quantités d'énergie rapidement, ils permettent le développement de dispositifs nécessitant des rafales d'énergies élevées, comme les capteurs de sécurité avancés et les systèmes de

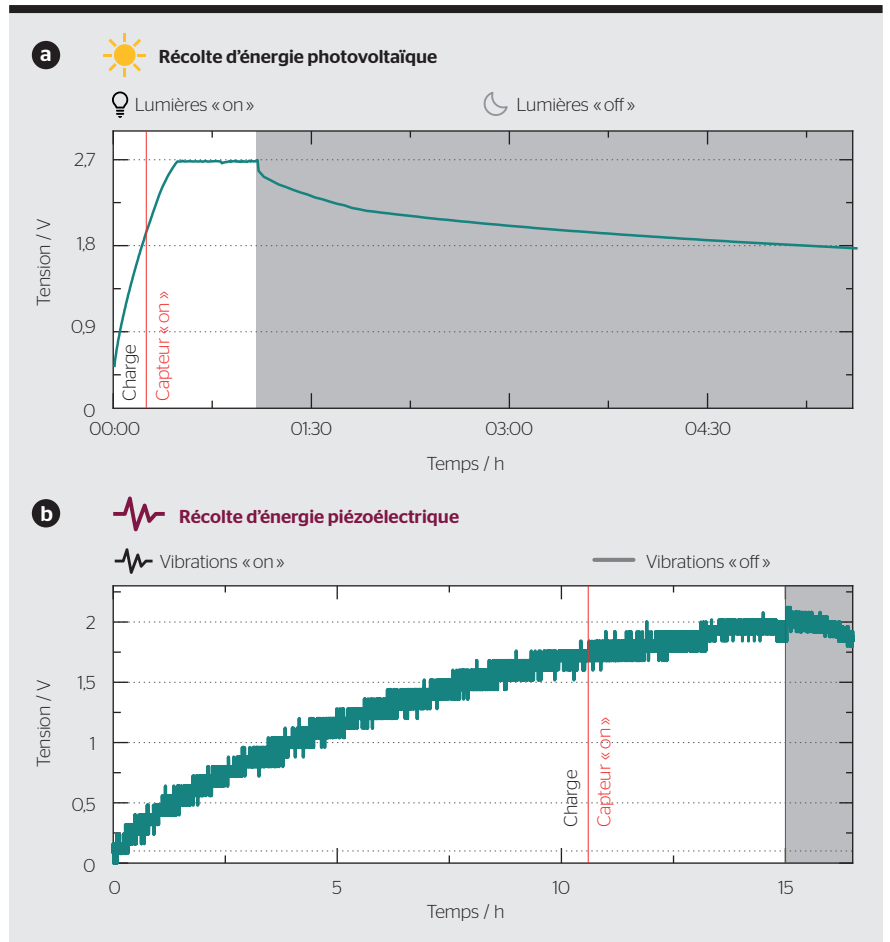


Figure 4 Caractéristiques des supercondensateurs pendant et après la charge ainsi qu'avant et pendant le fonctionnement continu d'un capteur enregistrant et transmettant des données toutes les 5 min : **a)** avec un dispositif de récolte d'énergie photovoltaïque et **b)** avec un système de récolte d'énergie piézoélectrique.

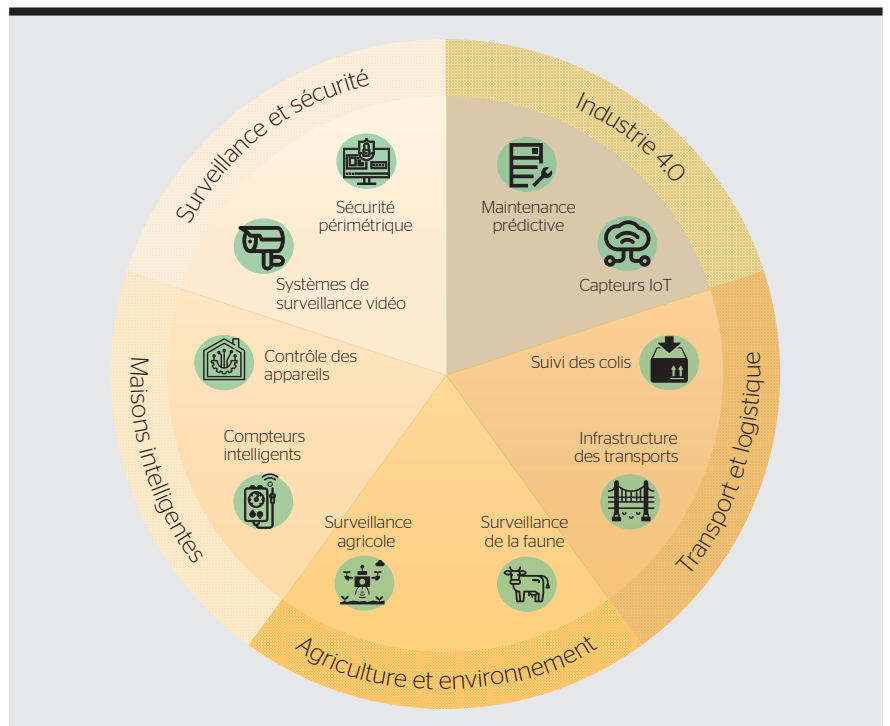


Figure 5 Applications des supercondensateurs dans des systèmes IoT autonomes.

communication à longue portée. Cette caractéristique unique leur confère un avantage certain par rapport aux batteries traditionnelles, et ce, particulièrement dans des environnements où des performances énergétiques élevées et des cycles de charge-décharge rapides sont essentiels.

À l'avenir, l'impact des supercondensateurs continuera de croître en même temps que celui des technologies de récolte d'énergie et des dispositifs IoT. La réduction des besoins de maintenance, l'amélioration de la durabilité des systèmes et la capacité à opérer dans des environnements variés ouvrent la voie à de nouvelles innovations et appli-

cations. L'adoption généralisée des supercondensateurs pourrait transformer la gestion de l'énergie, rendant les systèmes plus robustes, autonomes et écologiques. Les recherches et développements continus dans ce domaine promettent de faire des supercondensateurs un élément clé du monde IoT de demain.

Références

- [1] J. R. Miller, A. Burke, «Electrochemical Capacitors: Challenges and Opportunities for Real-World Applications», *Electrochemical Society Interface* 17, p. 53-57, 2008. iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F08081F
- [2] D. Linden, T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, McGraw-Hill, 2002.
- [3] P. Simon, Y. Gogotsi, «Materials for electrochemical capacitors», *Nature Materials* 7(11), p. 845-854, 2008. doi.org/10.1038/nmat2297

- [4] M. Hassanalieragh et al., «UR-SolarCap: An Open Source Intelligent Auto-Wakeup Solar Energy Harvesting System for Supercapacitor-Based Energy Buffering», *IEEE Access*, Vol. 4, p. 542-557, 2016. ieeexplore.ieee.org/document/7389331
- [5] M. Anand, A. Nagaraj, «Low Power Energy Harvesting & Supercapacitor Storage», *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 6, p. 30-35, 2013. iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Vol6-issue4/DO643035.pdf
- [6] A. Riaz et al., «Review on Comparison of Different Energy Storage Technologies Used in Micro-Energy Harvesting, WSNs, Low-Cost Microelectronic Devices: Challenges and Recommendations», *Sensors* 21(15), Basel, p. 5041, 2021. [doi: 10.3390/s21155041](https://doi.org/10.3390/s21155041)

Auteurs

Clara Moldovan est CEO de Swistor.
→ Swistor SA, 1007 Lausanne
→ clara.moldovan@swistor.com

Victoria Manzi Orezzoli est responsable technique chez Swistor.
→ victoria.manzi@swistor.com

IN KÜRZE

Die geerntete Energie besser nutzen

Das IoT mit nachhaltigen Energiespeicherlösungen revolutionieren

Weltweit sollen bis 2030 über 75 Milliarden vernetzte Geräte in den Städten, Häusern und in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Ihr Einsatz wird jedoch nach wie vor durch Energiespeichersysteme eingeschränkt. In diesem Zusammenhang stellen Superkondensatoren eine effiziente und nachhaltige Lösung dar.

Doppelschicht-Superkondensatoren sind elektrochemische Energiespeicher, die die Adsorption negativer Ionen aus dem Elektrolyt an der positiv geladenen Elektrode nutzen. Sie bieten eine wesentlich höhere Leistungsdichte als Batterien und haben eine Lebensdauer von bis zu einer Million Lade-/Entladezyklen. Hybride Superkondensatoren integrieren zudem chemische Redox-Reaktionen und vereinen so die Eigenschaften von Superkondensatoren und Batterien, was ihre Energiedichte erhöht. Im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Batterien können sie zudem bei Temperaturen von -40°C bis +85°C betrieben werden.

Das Start-up-Unternehmen Swistor hat nun eine Lücke geschlossen und hybride Superkondensatoren mit hoher Energiedichte entwickelt: Diese verwenden Hochspannungselektrolyten und Nanokohlenstoff-Elektroden, die so optimiert sind, dass sie perfekt zum Elektrolyten passen. Dadurch sind ihre Energiedichte und Effizienz höher als bei Standard-Hybrid-Superkondensatoren. Zudem können sie höhere Leistungsspitzen liefern, wie sie typischerweise bei der Kommunikation eines IoT-Systems oder der Übertragung grosser Datenmengen über lange Strecken erforderlich sind. Kombiniert mit Energiegewinnungstechnologien wie Photovoltaik oder Piezoelektrik können diese neuen hybriden Superkondensatoren die Energieeffizienz und Nachhaltigkeit von IoT-Systemen verbessern und ihnen gleichzeitig eine längere Autonomie ermöglichen. Die kontinuierliche Forschung und Entwicklung in diesem Bereich verspricht, Superkondensatoren zu einem Schlüsselement in der IoT-Welt von morgen zu machen.

Datendienstleistungen für Energieversorger



Wir unterstützen EVU/VNB kompetent in den Bereichen:

- Mess- und Energiedatenmanagement (Strom, Gas, Wärme, Wasser)
- Metering und Zählerfernauslesung
- Visualisierung, Auswertung und Reporting und Portale
- Energieprognosen, Energieabrechnung von EVG / ZEV
- Datenschutz und Datensicherheit (ISO 27001 zertifiziert)
- Arbeitsunterstützung und Support

Sysdex AG

Im Schörl 5
CH-8600 Dübendorf

Tel. 044 537 83 10
www.sysdex.ch

NEUTRAL



SICHER



ZUVERLÄSSIG