

1.3.3 Volant d'inertie (FES : Flywheel Energy Storage)

1.3.3.1 Définition et constitution

A) Définition

Un volant d'inertie permet de stocker de l'énergie en convertissant de l'énergie cinétique de rotation en électricité et inversement.

B) Constitution

Il est constitué :

- d'un volant d'inertie (masse : anneau ou tube) ;
- des paliers ;
- d'une machine électrique ;
- d'une électronique de puissance associée et ;
- d'une enceinte de protection.

Le volant d'inertie est mis en rotation autour d'un axe, fixe en général, (fig.1.5).

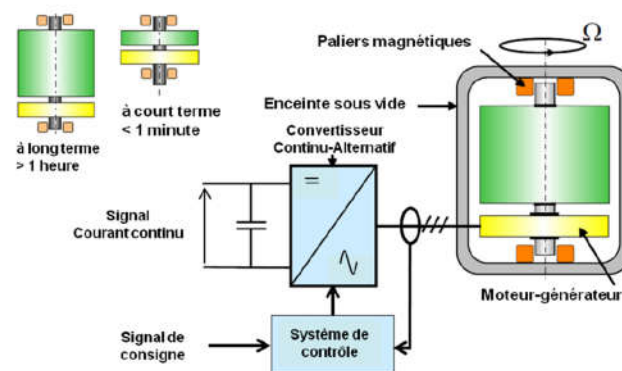


Fig. 1.5 Le volant d'inertie

C) Les paliers

Concernant les paliers, on distingue deux types de contacts :

- mécanique (réalisé par paliers à billes) et ;
- magnétique (paliers actifs, passifs ou supraconducteurs).

Les paliers mécaniques sont les plus utilisés car leur coût est plus faible que les paliers magnétiques. Cependant, ils sont sensibles à l'usure mécanique et génèrent des pertes non négligeables. Les dispositifs à suspension magnétique sont nécessaires dès que les durées de stockage dépassent 24 heures. L'enceinte de confinement est nécessaire pour assurer la protection de l'environnement en cas de défaillance du volant. Elle doit présenter des propriétés de tenue mécanique élevées car elle maintient les paliers et doit supporter la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur (le vide est nécessaire dans l'enceinte pour limiter les effets aérodynamiques à vitesse élevée). Le volant d'inertie est accéléré ou freiné par un moteur-générateur électrique qui permet ainsi d'effectuer les charges et décharges du système (transformation réversible d'énergie électrique en énergie mécanique).

D) Topologie

Les volants d'inertie sont principalement utilisés dans le stockage stationnaire pour répondre à des demandes de puissance importantes sur de courtes durées. On a deux topologies:

- les volants d'inertie basse vitesse : ce sont les systèmes les plus matures, ils mettent en jeu des masses importantes dans des matériaux lourds type acier. Leur vitesse de rotation est inférieure à 10 000 tr/min (tours par minute);
- les volants d'inertie haute vitesse : ils utilisent des matériaux plus légers type fibre de carbone ou de verre. Ils ont des vitesses de rotation pouvant aller jusqu'à 50 000 tr/min. La figure 1.5. Représente un exemple d'un volant d'inertie.

1.3.3.2 Principe de fonctionnement

Le principe est comme suit:

- en phase de stockage : Durant la période d'excès d'énergie ou d'un surplus, l'énergie électrique est utilisée pour alimenter un moteur électrique. Ce moteur convertit cette énergie entrante en énergie cinétique, ce qui augmente la vitesse de rotation de la masse;
- en phase stationnaire (la masse continue à tourner après la coupure du courant alimentant le moteur); c'est-à-dire de conservation de l'énergie, la vitesse de rotation de la masse doit être maintenue constante. L'apport d'énergie est alors minimale et ne fait que compenser les pertes liées au frottement ;
- en phase de déstockage ou de restitution, le générateur convertit l'énergie mécanique en électricité, freinant ainsi la masse.

1.3.3.3 Energie emmagasinée

L'énergie stockée augmente avec la masse et est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. Elle s'exprime par:

L'énergie cinétique emmagasinée s'exprime par :

$$W = \frac{1}{2} J \Omega^2 \quad (1.2)$$

où

J est le moment d'inertie (en kg.m²) et Ω la vitesse angulaire de rotation en rad/s.

L'énergie massique du volant seul vaut :

$$\frac{W}{M} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (1.3)$$

Avec

ρ est la masse volumique du matériau, et K un facteur dépendant de la forme du volant (K = 0,5 pour un cylindre à paroi mince).

Il est intéressant d'utiliser pour la construction du volant, des matériaux à haute résistance à la traction max σ (due à la force centrifuge) capables de vitesses périphériques élevées. Les meilleurs matériaux sont les composites à fibres de carbone (structures bobinées) capables d'atteindre des vitesses périphériques de 1500 m.s⁻¹ correspondant à une puissance de 100 Wh.kg⁻¹. Mais ces matériaux sont très coûteux. Pour minimiser le volume, des matériaux massifs de type acier à haute résistance offrent un bon compromis énergie volumique/ coût. Il faut adjoindre au volant des auxiliaires (paliers magnétiques, enceinte sous vide, moteur/générateur...) qui conduisent à des valeurs de puissance plus proches de 5 à 25 Wh.kg⁻¹. La puissance impulsioneuse de ces dispositifs peut être élevée : 2 kW.kg⁻¹ avec une durée de décharge de l'ordre de la minute. Les premières applications furent dans les transports (bus et tramways pour récupérer l'énergie de freinage ou pour éviter les systèmes de captation du courant).

1.3.3.4 Minimisation des pertes

Un critère capital pour le fonctionnement d'un volant est la capacité à minimiser les pertes d'énergie lors de la phase stationnaire. Pour ce faire, il est nécessaire de limiter les frottements subis par la masse en rotation. Parmi les solutions utilisées, on peut citer : l'utilisation de roulement à bille haute performance, l'enfermement de la masse dans une enceinte sous vide, la suspension magnétique de la masse, etc.

1.3.3.4 Avantages

- haut rendement (environ 80% de l'énergie absorbée pourra être restituée) ;
- phase de stockage très rapide par rapport à une batterie électrochimique ;
- temps de réponse très court, permet de réguler la fréquence du réseau ;
- aucune pollution : ni combustible fossile, ni produits chimiques ;
- technologie fiable, peu d'entretien.

1.3.3.5 Inconvénients

- temps de stockage limité (environ 15 minutes) ;

- le stockage d'énergie par volant d'inertie est utile pour la régulation et l'optimisation énergétique d'un système, il ne permet pas d'obtenir une durée d'autonomie importante comme les batteries électrochimiques ou le stockage d'énergie par pompage/turbinage.

1.3.3.6 Installations

Les deux plus grandes installations, d'une puissance de 20 MW chacune, se trouvent aux États-Unis. L'utilisation des volants d'inertie est mondiale :

- une centrale de 5 MW dédiée au lissage de la production électrique d'éoliennes a été construite au Canada, en Ontario ;
- l'aéroport de Mexico City est équipé d'un système d'alimentation sans coupure utilisant des volants d'inertie ;
- l'île de Kodiak Island, en Alaska, en est également équipée afin de stabiliser ce réseau isolé ;
- le métro de Rennes utilise un volant d'une masse de 2,5 tonnes. Il permet, en récupérant l'énergie pendant les phases de freinage (alors qu'elle était précédemment dissipée sous forme de chaleur) de la restituer pendant les phases d'accélération, et ainsi d'économiser environ 230 MWh par an.
- En 2009, les écuries (Ensemble des coureurs automobiles courant pour une même marque) Ferrari et McLaren ont intégré à leurs véhicules de Formule 1 un volant d'inertie ou SREC (Système de Récupération d'Énergie Cinétique). L'objectif était de récupérer l'énergie pendant le freinage et de la restituer pendant certaines phases d'accélération. L'intérêt du SREC est une accélération plus intense que celles des voitures non équipées. L'inconvénient est, outre les coûts de développement, le poids du système qui pénalise la performance de la voiture. Ce système a notamment permis à Kimi Räikkönen de gagner le grand prix de Belgique en 2009 au volant de sa Ferrari.

1.3.3.7 Présent et futur

Entre 2011 et 2030, on estime à environ 330 GW la future augmentation des capacités de stockage reliées aux réseaux électriques (hors stockage mobile type batteries de voitures, de téléphones, etc.), toutes technologies et tailles de stockages confondues. La part réservée aux applications de petites et moyennes tailles (correspondant au marché couvert par les volants d'inertie) serait de 141 GW, soit 43% du total. Ces chiffres sont à comparer à la capacité mondiale de stockage d'énergie de 141 GW en 2010, dont plus de 99% provient de STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage). Il est à noter que cette prédominance des STEP n'est pas forcément représentative de l'attractivité des technologies. Les STEP ont par essence des puissances importantes et tendent donc à être surreprésentées dans les comparaisons globales de puissance installée par rapport aux technologies de faible et moyenne puissance.

1.3.3.8 Applications

Les applications possibles pour les volants d'inertie sont nombreuses. Parmi elles figurent :

- la régulation de fréquence et le soutien en tension sur les réseaux électriques : maintenir la fréquence et la tension autour de valeurs moyennes et dans des limites définies par l'opérateur du réseau ;
- le lissage de la production des énergies renouvelables : compenser les fluctuations de la production électrique liées à l'intermittence de la source d'énergie (passage d'un nuage, fin d'une rafale de vent, etc.) ;
- le suivi de charge : accompagner de façon temporaire les variations journalières d'appel de puissance sur le réseau électrique, par exemple en début ou fin d'heure de pointe, le temps que des modes de production à grande échelle démarrent ou s'arrêtent ;
- les applications décentralisées : optimiser l'utilisation de l'énergie par récupération de l'énergie de freinage de métros ou de l'énergie potentielle de pesanteurs de grues ou garantir l'alimentation sans coupure (UPS – Uninterruptible Power Supply) qui consiste à assurer le relai entre l'instant de l'incident et le démarrage du générateur de secours.

1.4 Le stockage électrochimique

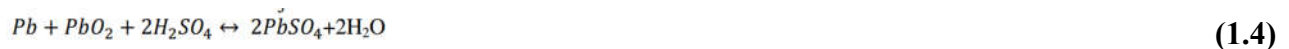
1.4.1 Principe

Le stockage électrochimique de l'énergie est un moyen de conserver l'énergie électrique sous forme chimique et ensuite la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Les batteries utilisées comme réserve massive d'énergie peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge. Leur utilisation se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne (ou autre), notamment pour le lissage de la charge journalière en stationnaire. Quelques batteries au plomb peuvent répondre à ce besoin, de même que des batteries au sodium ou lithium-ion, mais ce sont surtout les batteries à flux qui font l'objet d'études pour le stockage massif à ce jour.

En effet, la notion de durée de vie liée au nombre de cycles de charge/décharge entre en ligne de compte pour l'utilisation des batteries en stationnaire : les batteries à flux peuvent revendiquer plus de 10 000 cycles, contre quelques centaines pour les batteries au plomb, voire quelques milliers pour les nouvelles batteries sodium (NaS et Zebra). Les systèmes de stockage électrochimique sont généralement composés d'un ensemble de batteries qui cumule la puissance de chaque unité. Leur attractivité repose sur leur flexibilité et leur réactivité.

1.4.2 Batteries au plomb (lead-acid batteries)

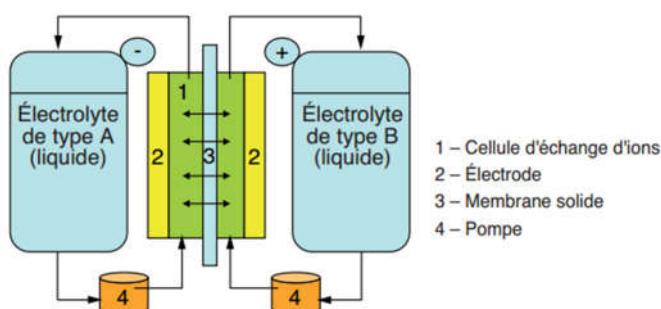
La batterie au plomb-acide est la technologie la plus ancienne et la plus utilisée dans le monde. Elle se caractérise par l'utilisation des deux électrodes : l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb PbO_2 et l'électrode négative de plomb Pb qui se transforment en sulfate de plomb (qui est une espèce toxique) en libérant du courant électrique. En raccordant en série plusieurs éléments, il est alors possible d'obtenir la tension souhaitée. La réaction mise en jeu est la suivante :



La tension aux bornes d'un accumulateur varie de 1,7V (état de charge minimum) à 2,5V (état de charge maximum).

1.4.3 Batteries à flux

Une batterie à flux est constituée de deux réservoirs reliés à une cellule électrochimique formée de deux solutions électrolytiques séparées par une membrane. Le liquide est pompé à travers la cellule électrochimique où les échanges ioniques à travers la membrane permettent d'établir un courant électrique tout comme pour une batterie classique, la différence majeure étant que l'énergie est stockée dans des réservoirs qui contiennent les deux solutions électrolytiques plutôt que dans les électrodes. La quantité totale d'énergie électrique que peut générer la batterie est alors fonction de la taille des réservoirs. Les électrolytes circulent à travers une cellule d'échange d'ions dont les deux compartiments sont séparés par une membrane solide (figure 1.6). Les électrolytes peuvent également fonctionner comme liquides caloporteurs*, facilitant ainsi la régulation de température, alors que les batteries conventionnelles dépendent d'une conduction passive de la chaleur, conduisant à des températures élevées à l'intérieur des cellules.



* Un fluide **caloporteur** (ou caloripporteur) est un fluide (gaz ou liquide) qui permet le transport de chaleur entre plusieurs sources de température.

Fig.1.6 Principe d'une batterie à flux Source :

Avantages

- possibilité de pouvoir dimensionner la puissance et la capacité énergétiques indépendamment, ce qui permet d'avoir des batteries pouvant se décharger durant plusieurs heures voire plusieurs jours à n'importe quelle puissance (ce qui n'est pas le cas des batteries classiques par exemple);
- adaptées au lissage des pics de demande du réseau électrique; □ adaptées à l'équilibrage de charge;
- adaptées au stockage de l'énergie générée irrégulièrement par les centrales solaires et éoliennes.

Inconvénient

- La faible densité énergétique par unité de volume.

Applications

- Deux des trois plus grandes installations de batteries à flux pour le stockage à grande échelle sont japonaises. Les deux ont une puissance de 15 MW chacune et sont à Hokkaido.

1.4.4 Batteries sodium/soufre (NaS)

Les électrodes liquides sont des formes ioniques de sodium (pôle négatif) et de soufre (pôle positif), l'électrolyte solide intermédiaire est une céramique d'alumine bêta (L'alumine, ou oxyde d'aluminium, est un composé chimique de formule Al_2O_3 , formant un composite céramique contenant de l'alumine beta ou beta " de métal alcalin de sodium) et la température nécessaire est comprise entre 290 et 390 °C.

Applications

Plus de 190 systèmes sont installés au Japon, dont le plus performant a été mis en service en 2008 en liaison avec la ferme éolienne de Rokkasho et affiche une puissance de 34 MW. Une installation expérimentale de 1MW de puissance, développée par EDF et NGK, a été construite fin 2009 à la Réunion pour soutenir le réseau électrique de l'île en période de pointe.

1.4.5 Batteries lithium-ion

La batterie lithium-ion est un accumulateur électrochimique qui utilise le lithium sous une forme ionique. Le fonctionnement de la batterie lithium-ion repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive en graphite et une électrode négative en oxyde métallique. Cet échange se fait au sein d'un électrolyte liquide (Fig.1.7). La R&D s'intensifie sur des batteries Li-ion stationnaires de capacité compatible avec le stockage temporaire d'énergie renouvelable. Ainsi, on peut citer à titre d'exemple le projet européen STORE visant à mettre en service en 2013 un système de stockage (produit par Saft) capable de restituer 1MW/3 h sur l'île espagnole de Grande Canarie. Le plus important démonstrateur à ce jour se trouve en Chine, à Zhangbei ; il a été mis en service fin 2011 et allie un système de batteries Li-ion (produit par BYD) d'une capacité de 20 à 36 MW sur 4 à 6 h avec une production éolienne de 100 MW et une production solaire de 40 MW.

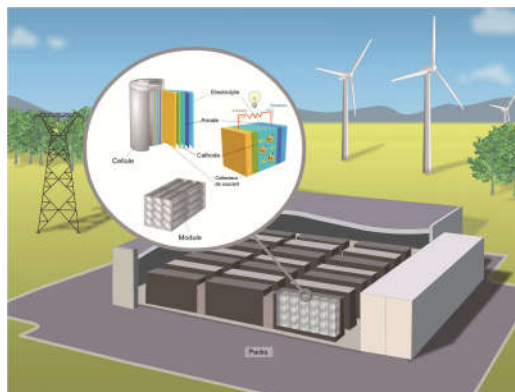


Fig.1.7 Station de batterie lithium-ion,

Avantages

- sa forte densité énergétique (énergie par unité de volume);
- son importante énergie massique (énergie par unité de masse).
- son autodécharge réduit;
- sa profondeur de décharge (plus de 90%);
- sa durée de vie importante.

1.5 Stockage électrostatique : Les supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage électrochimique de l'énergie électrique à très grande durée de vie. Leurs densités d'énergie et de puissance en font des systèmes intermédiaires entre batteries et condensateurs diélectriques traditionnels.

Un supercondensateur est constitué de deux électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons. L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces, on parle de formation d'une double couche électrochimique : une couche de charges positives et une couche de charges négatives.

1.6 Classification selon leur utilisation

Les moyens de stockage peuvent être classés en trois catégories:

1.4.1 Stockage de l'énergie à grande échelle ou gestion de l'énergie

Ces moyens sont utilisés pour découpler les périodes de production et de consommation de l'énergie pendant plusieurs heures.

1.4.2 Génération distribuée ou relais de puissance

Ces moyens sont utilisés pour l'écrêtement des pointes de consommation. Le stockage est utilisé quelques secondes ou minutes pour assurer la continuité de service quand par exemple on passe d'un moyen de production à un autre.

1.4.3 La qualité de puissance ou objectif fiabilité

L'énergie stockée est seulement utilisée pour quelques secondes ou moins, quand nécessaire, pour assurer une continuité de qualité d'approvisionnement.

Les tableaux 1.1 et 1.2 donnent les paramètres et les technologies des différentes catégories respectivement.

Tableau 1.1 Les paramètres des différentes catégories

Catégorie	Puissance décharge	Temps décharge	Energie stockée
Stockage grande échelle	10-1000MW	1-8h	10-8000MWh
Génération distribuée	0.1 -2MW	0.5-4h	50-8000kWh
Qualité de puissance 1	-2MW	1-30s	0.03-16.7kWh

Tableau 1.2 Technologies considérées pour chaque application

Stockage grande échelle	Génération distribuée	Qualité de puissance
Batteries acide/plomb	Batteries acide/plomb	Batteries acide/plomb
Batteries Na/S	Batteries Na/S	Batteries Li-ion
Regenesys	Batteries Ni/Cd	Volant d'inertie haute vitesse
Batteries Zn/Br	Batteries Li-ion	Volant d'inertie faible vitesse
Batteries Ni/Cd	Batteries Zn/Br	Micro-SMES
Air comprimé (CAES)	Batteries V-redox	Super-capacités
Pompage eau (PSH)	Volant d'inertie haute vitesse	
	Air comprimé (CAES)	
	Piles à combustible	
	Moteur hydrogène	

Références

- [1] Bernard MULTON, Stockage de l'énergie électrique pour la production décentralisée d'électricité (connectée au réseau ou en site isolé), Master Recherche STS IST SPEE Paris 11 – ENS Cachan Module K16, France, février 2010.
- [2] Robert A. Huggins, Energy Storage Fundamentals, Materials and Applications, Second Edition, Springer International Publishing Switzerland 2010, 2016.
- [3] Antonio Luque and Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Chapter 20, John Wiley & Sons, Ltd. , 2011.
- [4] Fabien Faure ; Suspension magnétique pour volant d'inertie, Energy Technology perspectives 2014, <https://www.Explainthatstuff.com/flywheels.html>
- [5] <https://www.connaissancedesenergies.org/world-energy-outlook-2019-differents-scenarios-mais-toujours-beaucoupdenergies-fossiles-191113>.
- [6] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie>.