

ENJEUX DU STOCKAGE DE L'ÉNERGIE POUR UN HAUT NIVEAU DE FIABILITÉ DES SYSTÈMES SOLAIRES EN MILIEUX DÉSERTIQUES

RÉSUMÉ

Les progrès récents dans les technologies de batteries rechargeables (les batteries dites secondaires) changent la donne en s'adaptant efficacement aux environnements désertiques. Cependant, une large gamme de types de batteries, ajoutée à l'option d'un système de gestion de l'énergie, a rendu plus complexe la compréhension de ce qui fait vraiment une différence dans le choix d'une batterie.

Un vaste programme de recherche et développement a été entrepris entre 2012 et 2014 avec un laboratoire de recherche français (Laboratoire du Stockage de l'Électricité [LSE]) appartenant à l'Institut National de l'Énergie Solaire [INES]. L'objectif était doubler la durée de vie d'une batterie à technologie NiMH, dans des conditions climatiques extrêmes représentatives des pays émergents. Ce document présente les résultats de tests de vieillissement accélérés réalisés sur la technologie NiMH, et souligne l'importance de la gestion de cette dernière pour atteindre un service de 10 ans sans interruption.



L'environnement désertique est l'un des climats les plus rudes auxquels les technologies de batterie doivent faire face



Faible pluviométrie

C'est le facteur le plus évident. Certains déserts reçoivent moins de 10 centimètres de pluie par an, et cette pluie vient en brefs torrents qui s'évaporent rapidement de la surface du sol. Même si l'humidité ne représente pas un sujet majeur, elle doit être prise en considération pour éviter la corrosion, qui induit une augmentation de l'impédance de la batterie, dégradant son rendement [3].



Radiation solaire & Températures extrêmes

La température est le facteur le plus sensible auquel une batterie doit faire face. Dans certaines zones, comme au Moyen-Orient, en Afrique du Nord (MENA) ou encore en Afrique subsaharienne, on peut s'attendre à une augmentation de la température jusqu'à 58,0°C pendant la journée avant de retomber à 10 °C pendant la nuit [1-3].



Tempêtes de sable & Vents violents

Certains vents comme le «Seistan», vent du désert en Iran et en Afghanistan soufflent en permanence jusqu'à 120 jours. En Arabie Saoudite, les vents soufflent en moyenne de 3,2 à 4,8 km/h et peuvent atteindre 112 à 128 km/h en début d'après-midi [4]. Pour les systèmes solaires autonomes, le poids d'une batterie peut être déterminant lorsque ce dernier est fixé à plusieurs mètres de hauteur.



MOTS CLÉS

Environnement désertiques, batterie Ni-MH, Pack énergie solaire, systèmes solaires autonomes, technologie de batterie résistant à la chaleur, système de gestion de l'énergie, tests de vieillissement accélérés, fiabilité de la batterie, durée de vie de la batterie

^A Sunna Design SA, Centre de services Technowest, 17 rue du commandant Charcot, 33290 Blanquefort – France

*+33 (0)6 35 92 50 28 / +33 (0)5 56 57 18 47 / thomas@sunna-design.fr

+33 (0)6 17 99 19 07 / +33 (0)5 56 57 18 47 / raphael@sunna-design.fr

STOCKAGE POUR APPLICATIONS SOLAIRES / BATTERIES AU PLOMB

Il s'agit de la plus ancienne technologie de stockage rechargeable. En raison de son coût attractif et de sa grande disponibilité, la batterie au plomb est le choix le plus facile et le moins cher pour de nombreuses applications. Cependant, sa durée de vie est limitée lorsqu'elle est soumise à la fois à de hautes températures et à une profondeur de décharge élevée (> 80% de DOD). Bien que largement utilisée pour les applications solaires, elle n'est que rarement dotée d'un système de gestion intelligente de l'énergie permettant d'éviter toute interruption de service. De plus, la haute température implique toujours une durée de vie limitée et donc une maintenance technique régulière (remplacement de la batterie).



– Jeu de batteries Sonnenschein VRLA pour applications solaires
L'une des meilleures batteries au plomb sur le marché est la Valve de Régulation Lead-Acid (technologie VRLA, Plomb) adaptée aux applications solaires. Le taux d'auto-décharge est inférieur à 2% par mois à 20 °C. Toutefois, l'auto-décharge double pour chaque augmentation de la température de 10 °C [6].

CARACTÉRISTIQUES DE PERFORMANCE ET SYSTÈME DE GESTION DE LA BATTERIE (BMS)

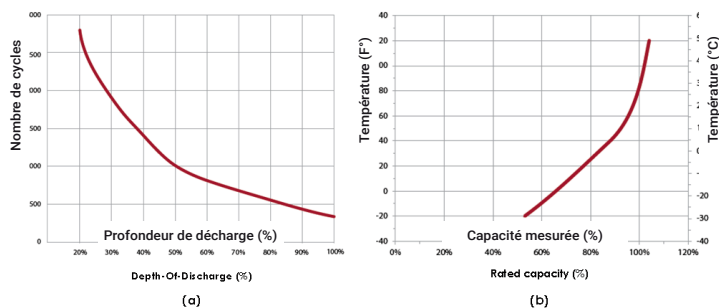


Fig. 1 – Caractéristiques de performance d'une batterie VRLA-AGM en cyclage profond: (A) Cycle VS profondeur de décharge, (b) Température vs capacité nominale

Comme de nombreuses technologies de batterie, la température et le cyclage profond restent les premiers ennemis. Leurs effets sur les performances de la batterie sont illustrés par la fig. 1 [7]. Selon l'étude menée, 80% de profondeur de décharge ne doit pas être dépassée pour maintenir l'espérance de vie maximum.

“Les batteries au plomb doivent être bien gérées (BMS intelligent) et protégées de la chaleur pour être conformes aux applications solaires en milieu désertique”.

Selon le fabricant, la baisse de la durée de vie d'une batterie VRLA soumise à une température élevée et une décharge profonde peut être activée par trois mécanismes de défaillance [6,8-9]:

Pertes de matière active en raison de décharge profonde (> 80% des DOD)

L'effet de la réaction chimique répétitive de la matière active dans le réseau de plaques a tendance à réduire la cohésion, induisant ainsi un déplacement de la matière active dans le fond de la batterie.

Corrosion de l'électrode positive

Ce phénomène se produit lorsque la batterie atteint la charge maximum, à savoir une haute tension. Le risque est de lancer un processus d'oxydation lent mais continu qui aboutit à la désintégration de l'électrode positive (réseau de plaques).

Mécanisme de sulfatation

Ce phénomène bien connu se produit lors de la décharge de la batterie. La masse active dans les électrodes positive et négative est transformée en de très petits cristaux de sulfate, formant une couche imperméable qui ne peut être reconverti en matière active. La capacité nominale diminue jusqu'à ce que la batterie devienne inutile.

RECYCLAGE & APPROVISIONNEMENT

A l'heure actuelle, la plupart des batteries VRLA (Plomb) sont largement disponibles et presque entièrement recyclable. Plusieurs plates-formes de recyclage internationales existent (comme l'European Recycling Platform - ERP). Mais elles sont rarement accessibles dans les pays émergents, et la valeur des composants étant très faible, le taux global de recyclage des batteries dans les régions éloignées est proche de zéro. Le risque pour la santé est élevé lorsque les piles sont ouvertes ou laissées dans des décharges.

^A Sunna Design SA, Centre de services Technowest, 17 rue du commandant Charcot, 33295 Blanquefort Cedex – France

*+33 (0)6 35 92 50 28 / +33 (0)5 56 57 18 47 / thomas@sunna-design.fr

+33 (0)6 17 99 19 07 / +33 (0)5 56 57 18 47 / raphael@sunna-design.fr

STOCKAGE POUR APPLICATIONS SOLAIRES / BATTERIES AU NICKEL

Les batteries NiMH sont devenues très populaires au cours de la dernière décennie, en particulier pour les applications industrielles ou les véhicules hybrides. Il y a eu beaucoup d'améliorations réussies des performances grâce aux efforts réalisés sur les alliages de stockage de l'hydrogène, pour obtenir une densité d'énergie plus élevée, une activation plus rapide, une meilleure capacité de débit et un coût moindre [11]. Ceci a positionné le NiMH comme un bon candidat pour des systèmes autonomes et photovoltaïques, en particulier en ce qui concerne l'éclairage public solaire [12].



Exemple de batterie de 12 V Ni-MH [13]

Les applications solaires peuvent espérer une durée de vie de près de 5 à 7 ans si l'on considère une moyenne de 50% de DOD et environ 30°C sur 24 heures de fonctionnement (40°C pendant la journée, 20°C pendant la nuit).

CARACTÉRISTIQUES DE PERFORMANCE ET SYSTÈME DE GESTION DE LA BATTERIE (BMS)

Le NiMH couvre des niveaux d'énergie intéressants (55 à 70 Wh/kg) et couvre l'une des plus large plages de température que les technologies de batteries rechargeables peuvent supporter (-40°C à + 70°C). Cette technologie sans maintenance intègre une soupape de sécurité en cas d'augmentation de température de la cellule et présente de très bonnes propriétés thermiques, sans effet de mémoire.

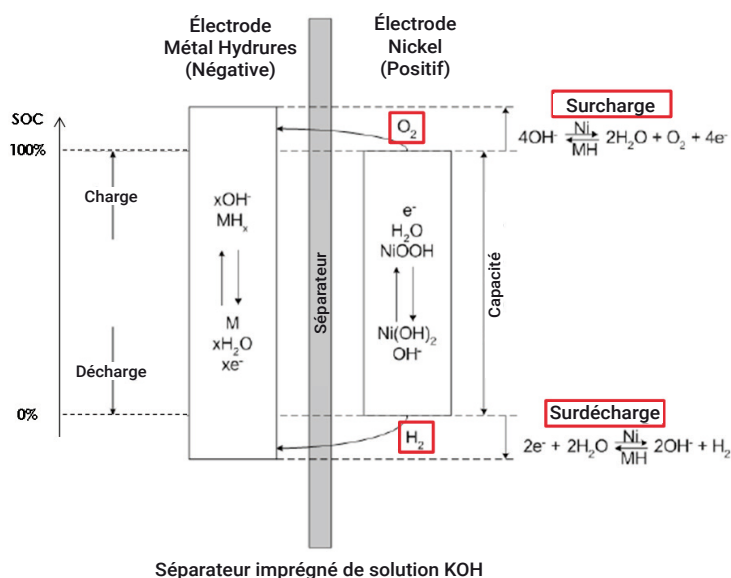


Fig. 2 – Représentation schématique des réactions primaires et secondaires de cellules NiMH

Le problème du NiMH est souvent son coût d'achat (850 à 1050 \$ / kWh). Mais sa résistance à la chaleur et au cyclage profond conduit à une durée de vie incomparable, ce qui rend le coût total de possession inférieur à celui des technologies moins chères (voir p.6).

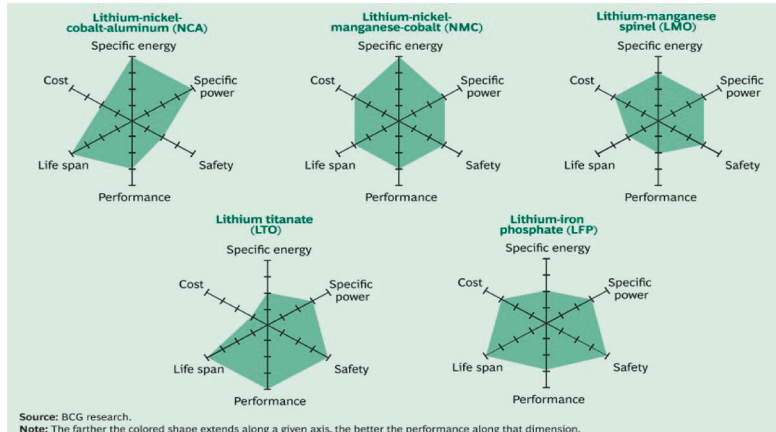
RECYCLAGE & APPROVISIONNEMENT

Les batteries NiMH contiennent des métaux précieux comme le nickel (~ 45%). Ceci est un fort encouragement au recyclage, étant donné que le métal conserve sa valeur même à la fin de la vie de la batterie. De plus, il peut être reconditionné en matière active pour de nouvelles batteries. De cette façon, la boucle «de la batterie à la batterie» est bouclée et joue un rôle majeur dans la réduction des coûts. Des acteurs majeurs à travers le monde tels que Sanyo-Panasonic, Matsushita ou ARTS énergie (SAFT) fabriquent des technologies NiMH.

“Le NiMH est la technologie de stockage la plus adaptée pour les applications solaires à long terme soumises à haute température (jusqu'à 70°C) et dans un environnement désertique”

STOCKAGE POUR APPLICATIONS SOLAIRES / BATTERIES AU LITHIUM

Les batteries Li-ion représentent une technologie relativement nouvelle avec un énorme potentiel en termes d'énergie spécifique et de cycle de vie, sans effet mémoire. Parmi elles, une large gamme de technologies a été développée, tirant leur nom de leurs oxydes cathodiques. La Fig. 3 montre une comparaison entre les cinq principales technologies Li-ion [18]. La variété des options rend le choix très compliqué lorsque l'on souhaite s'assurer que la batterie correspond au mieux à l'application et est correctement utilisée.



Les batteries au lithium ont encore à surmonter des problèmes majeurs de sécurité avant d'être compatibles avec l'environnement désertique chaud et sec

Comme le montre cette figure, la meilleure technologie pour les petites applications photovoltaïques soumis à un environnement hostile en termes de durée de service, de performance en matière de sécurité et de coût est le LiFePO₄ (LFP). Néanmoins, la température et le cyclage profond peuvent dégrader ses performances. La température de fonction standard LFP va de -20°C à +60°C.

CARACTÉRISTIQUES DE PERFORMANCE ET SYSTÈME DE GESTION DE LA BATTERIE

Une étude récente a été menée par le CEA-INES sur les cellules LiFePO₄ asiatiques à faible coût dans l'éclairage public solaire [19]. Un cyclage de vieillissement photovoltaïque adapté à la norme CEI 61427 (initialement conçu pour les batteries au plomb) a été réalisé (Fig. 4).

Les pertes de capacité sont très élevées (de 5 à 20% après seulement 100 décharges) et la dispersion technologique entre fabricants ne permet pas d'assurer la fiabilité et la durée de vie en conditions réelles, en particulier en ce qui concerne les applications solaires hors réseau. Cependant, il est intéressant de souligner leur capacité à résister aux pics de température supérieurs à 90°C (température d'emballage thermique).

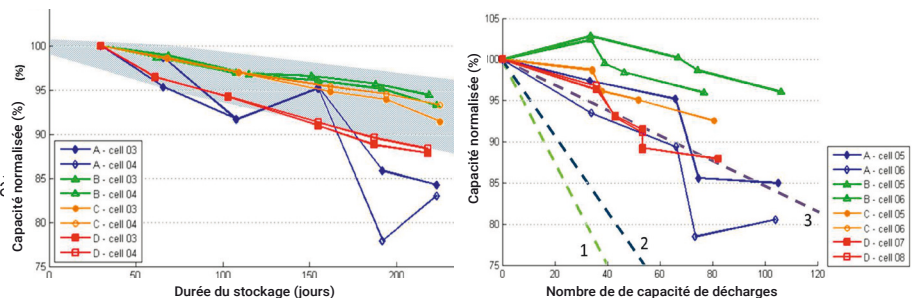


Fig. 4 – tests de vieillissement accéléré des cellules LiFePO₄ bas de gamme en provenance de 4 fabricants asiatiques: (a) Calendrier des résultats de vieillissement à 45°C, (b) Résultats des cycles de vieillissement avec tendances pour trois types de batteries au plomb (pointillés): 1 = batterie classe de classe solaire, 2 = batterie VRLA spirale, 3 = batterie tubulaire

Le LFP est connu pour être un produit dont la cathode reste très stable thermiquement. Un emballement thermique peut cependant être détecté pour certaines cellules bas de gamme, sur des tests combinés notamment (surcharge + chaleur par exemple). C'est la raison pour laquelle les problèmes de sécurité demeurent un sujet majeur en ce qui concerne le transport aérien. Récemment (février et Mars 2015), Delta Air Lines et United Airlines, deux grandes compagnies aériennes américaines, ont interdit les expéditions des batteries au lithium-ion [22].

RECYCLAGE & APPROVISIONNEMENT

Jusqu'à ce jour, les ressources de lithium sont largement disponibles et peuvent répondre à la demande du marché. Cependant, environ 70% des dépôts mondiaux de lithium sont situés dans la région de l'Argentine, de la Bolivie et du Chili. Des troubles ou instabilités politiques peuvent grandement affecter l'offre et avoir un impact sur le prix des batteries. Il y a aussi un enjeu en terme de communication quant à l'approvisionnement en lithium dans ces pays, soulevant des questions d'éthique sur le travail d'extraction réalisé par la population locale dans des conditions qui attirent de plus en plus l'attention des journalistes.

Bien que les batteries au lithium soient recyclables à 98%, l'industrie du traitement est principalement située en Europe et aux États-Unis. De plus, ces batteries ne contenant que 0,8% de lithium en réalité, le recyclage a peu de valeur ajoutée. Les métaux lourds contenus dans les batteries représentent un danger grave pour la santé lorsqu'elles sont ouvertes ou laissées en plein nature.

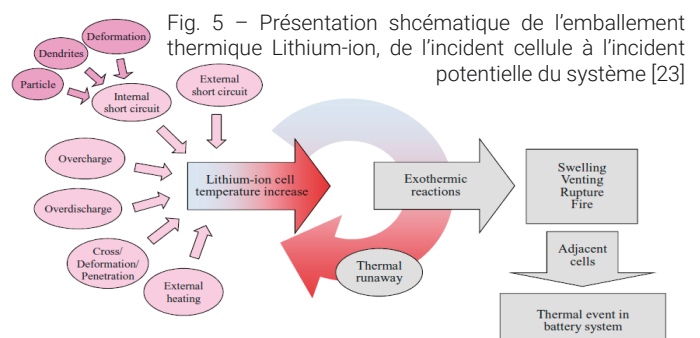


Fig. 5 – Présentation schématisée de l'emballage thermique Lithium-ion, de l'incident cellule à l'incident potentielle du système [23]

TECHNOLOGIES DE STOCKAGE POUR LE SOLAIRE / COMPARAISON DES BATTERIES

	NiMH	VRLA (Plomb)	LFP
Energie spécifique (Wh/kg)	55 - 70	30-50	100-130
Cycle de vie @ 20°C (80% de la capacité initiale), valeur dépendant grandement du fabricant	1000 to > 3000	300 - 1500	1000 - 3000
Efficacité aller-retour (%)	70-90	80 - 85	90 - 95
Autodécharge/mois (@ 20°C)	15 to 30% (non linéaire ⇒ Bien inférieur quand 70% du SOC) ¹	< 5%	< 10% ¹
Voltage cellule (nominal)	1.2V	2V	3.2V
Courant de charge - pic - meilleur résultat	5C 0.5C ou moins	5C 0.2C	> 2C 1C ou moins
Température d'opération	-40°C / +70°C	-20°C / +50°C	-20°C / +60°C
température de début d'emballlement thermique (LiFePO4 only)	-	-	~ 100°C ^{1,2}
Coût moyen (\$/kWh) ¹	850 - 1050	300 - 500	700 – 800 (Fabricants de qualité seulement)
Fabricants	Sanyo-Panasonic, Matsushita, Saft, BASF	Exide, Sonnenshein	A123 System, Sony, K2 Energy
Avantages majeurs	Excellente résistance à la chaleur, BMS faible coût, Longue durée de vie sous un climat chaud et en cyclage profond, Sans danger	Bas coût, Technologie mature	Energie spécifique importante, Haute qualité aller-retour
Désavantages majeurs	Taux d'autodécharge coût	Faible énergie spécifique Sensible aux températures et cyclages profonds	La sécurité (risque d'emballlement thermique pour les technologies à faible coût), Le coût élevé BMS ¹ , Sensible aux températures et cyclages profonds
Recyclable	Bon (45% de nickel, matériau de valeur)	Très bon	Moyen (peu de matériaux de valeur)
Utilisation commerciale depuis	1990	1970	2008

¹ Selon le fabricant (la qualité de la batterie, la dispersion technologique, ...)

² En fonction de la vitesse de chauffage et des conditions de test. Certaines publications indiquent des températures d'emballlement supérieures à 170 ° C, mais ces résultats sont largement débattus au sein de la communauté scientifique

PRINCIPALES CONSIDÉRATIONS POUR LE CHOIX D'UNE BATTERIE DANS LE SOLAIRE

FACTEURS AFFECTANT LA DURÉE DE VIE

Plusieurs facteurs influent sur les caractéristiques de fonctionnement d'une batterie et sur son cycle de vie. En ce qui concerne les applications solaires, trois facteurs importants doivent être pris en compte pour la gestion de la batterie :

- la température de la batterie - En stockage et en condition de fonctionnement,
- la profondeur de décharge (DOD) - légèrement liée à l'application (LOAD) et à la technologie de la batterie,
- le système de gestion de la batterie: La gestion de la charge et de la décharge est l'élément clé qui conditionne la durée de vie. Les méthodes de détection de fin de charge et de fin de décharge évitent les problèmes de surcharges et de sur-décharge.

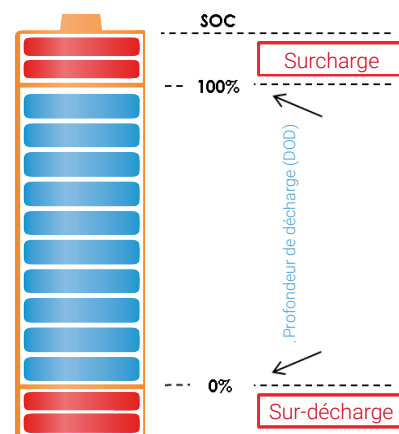


Fig. 6 – vue schématique d'une cellule de batterie en fonctionnement

FACTEURS AFFECTANT LE COÛT TOTAL DE POSSESSION (TCO)

Lors de l'achat d'une batterie à décharge profonde spécialement conçue pour les applications solaires, il y a plusieurs facteurs qui doivent être pris en compte pour déterminer le coût total de possession sur la durée de vie, afin d'aider les décideurs à choisir la technologie la plus adaptée :

Prix de vente

Une batterie à faible coût est toujours attractive. C'est le cas des technologies au plomb décrites précédemment. Cependant, si le coût de la batterie est au détriment de la qualité et de la durée de vie de la batterie, le coût pour l'utilisateur final sera fortement augmenté dans le temps en raison des remplacements fréquents.

Capacité

C'est le premier facteur de dimensionnement d'un système à énergie solaire. Selon le fabricant et la technologie choisie, les batteries à faible coût peuvent avoir une dispersion technologique largement supérieure à 10-15%.

Plage de tension

La plage de tension de la batterie doit être considérée pour vérifier qu'elle correspond bien aux exigences du système (module solaire et charge). En outre, il est important de noter que le vieillissement peut conduire à la diminution de la tension, invalidant ainsi le minimum requis pour l'application, alors que la capacité nominale serait encore suffisante.

Profondeur de charge et plage de température d'utilisation

Comme souligné précédemment, ces deux facteurs affectent fortement la durée de vie de la batterie. Plus ils sont élevés, plus la durée de vie de la batterie sera impactée.

Marque & disponibilité internationale

Le choix la batterie d'une marque de renommée mondiale est important puisque les utilisateurs finaux peuvent bénéficier de l'expertise et/ou des expériences du fournisseur sur des applications similaires. Une entreprise réputée peut également mettre à disposition les tests de vieillissements accélérés qui garantissant la performance et le cycle de vie du système, éprouvés dans un environnement spécifique.

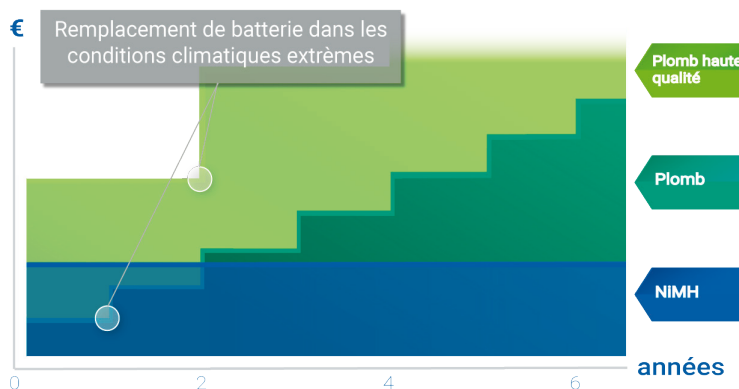


Fig. 7 – coût total de possession vs années de service: comparaison avec NiMH & Plomb

^A Sunna Design SA, Centre de services Technowest, 17 rue du commandant Charcot, 33295 Blanquefort Cedex – France

*+33 (0)6 35 92 50 28 / +33 (0)5 56 57 18 47 / thomas@sunna-design.fr

+33 (0)6 17 99 19 07 / +33 (0)5 56 57 18 47 / raphael@sunna-design.fr

EXPÉRIENCE TERRAIN SUR BATTERIES NiMH ET VRLA DANS DES CONDITIONS D'EXPLOITATION DIFFICILES : LES APPLICATIONS D'ÉCLAIRAGE SOLAIRE / TEST DE FIABILITÉ DE DEUX ANS POUR COMPARAISON DE LA PERFORMANCE

CONTEXTE & OBJECTIFS

Le choix de la technologie de batterie est crucial car elle est l'élément le plus sensible des systèmes solaires. C'est la raison pour laquelle Sunna Design a choisi de challenger la technologie NiMH 12V/10Ah via des tests de vieillissement accélérés simulant des environnements où la technologie photovoltaïque est la plus efficace. Une étude comparative a été lancée sur la technologie de stockage au plomb étanche VRLA 12V/25Ah qui est largement utilisée par les acteurs asiatiques pour fournir des solutions d'éclairage solaire à faible coût en environnement extérieur.

“Un système de gestion de batterie intelligente est le point clé pour assurer la durée de vie de la batterie. Sunna Design prévoit un 10 ans de durée de vie pour ses lampadaires solaires NiMH en milieu désertique”.

RÉSULTATS ET DISCUSSION: AVANTAGES CLÉS DE LA GESTION INTELLIGENTE DE L'ÉNERGIE DANS UN DISPOSITIF D'ÉCLAIRAGE SOLAIRE

Sunna Design et le CEA-INES ont conduit des tests de vieillissement accélérés et de performances sur les batteries 12V. La Fig. 8 présente les résultats.

Ils soulignent la nécessité de prêter attention aux méthodes utilisées pour détecter la fin de charge afin de prévenir le vieillissement prématuré. Il est également important de souligner la forte influence de la combinaison du cyclage profond et de la haute température sur la batterie au Plomb. Selon ces résultats, le VRLA atteint son critère de défaillance (5Ah de la capacité nominale) en seulement 80 jours avec une gestion intelligente. Les méthodes de gestion standard pour VRLA sont basées sur le seuil de tension (déconnexion sur un seuil en tension) par rapport à la fin de charge.

Pour la technologie Ni-MH, une gestion standard conduit à 258 jours de durée de vie dans les mêmes conditions de vieillissement accélérées. En utilisant le système de gestion de Sunna, 9,37 années de durée de vie peuvent être atteintes en tenant compte des mêmes critères de défaillance que les batteries VRLA, i.e. 5Ah comme seuil de capacité résiduelle.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Trois facteurs d'accélération ont été choisis pour réaliser cette étude:

- Cyclage profond: 90% de DOD a été appliqué au NiMH et VRLA afin de bénéficier d'un dimensionnement précis du système,
- Un régime de C/5 en charge et en décharge, i.e. 2A pour 12V pour les topologies de systèmes d'éclairage solaires, compte tenu du fait qu'ils sont généralement faits de petits modules ne fournissant pas plus de 2,2A, au maximum de leur capacité. Ce taux implique 2,4 cycles par jour de vieillissement.
- Une température moyenne de 45°C pendant la journée et la nuit a été choisie pour simuler les pires cas, sur la base des données réelles maximales observées dans les pays ciblés.

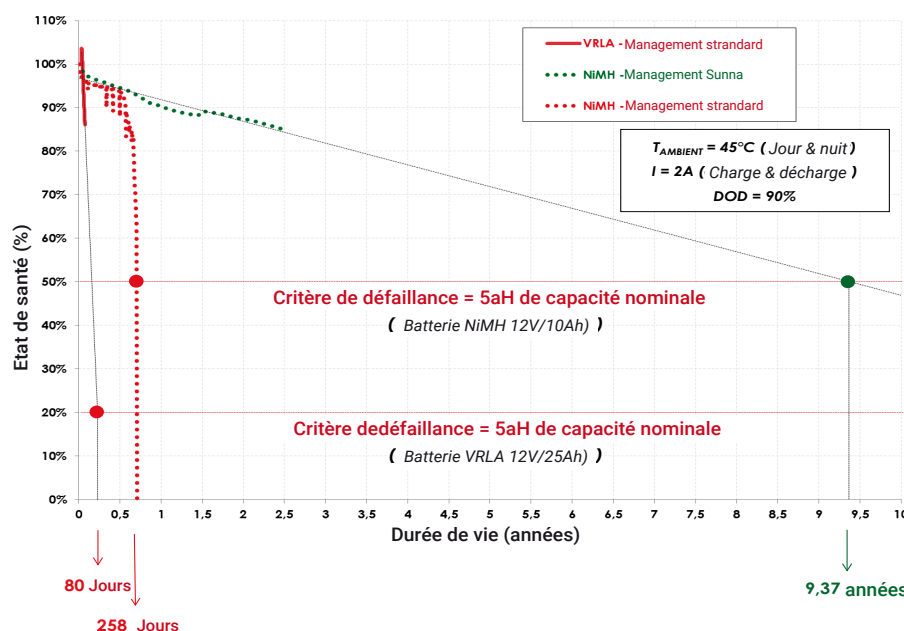


Fig. 9 – Comparaison de batteries Plomb et NiMH - tests de vieillissement accéléré (45 ° C / 2A / 90% de DOD) utilisant des systèmes de gestion standard (30% de surcharge) et le système de gestion Sunna (surcharge évitée)

^A Sunna Design SA, Centre de services Technowest, 17 rue du commandant Charcot, 33295 Blanquefort Cedex – France

*+33 (0)6 35 92 50 28 / +33 (0)5 56 57 18 47 / thomas@sunna-design.fr

+33 (0)6 17 99 19 07 / +33 (0)5 56 57 18 47 / raphael@sunna-design.fr

RÉFÉRENCES

- [1] "World Energy Outlook Special Report : Africa Energy Outlook," International Energy Agency (IEA), Oct. 2014.
- [2] (2014). The World Bank. Available: <http://data.worldbank.org/>
- [3] M. Carlowicz, "Where Is the Hottest Place on Earth? It Lies Somewhere Between Folklore and Science, the Desert and the City," The Earth Observatory - NASA, 2012.
- [4] A. M. Mahbub, R. Rehman, J. Meyer, and L. M. Al-Hadhrami, "Wind speed and power characteristics at different heights for a wind data collection tower in Saudi Arabia," World Renewable Energy Congress, pp. 4082-4089, 2011.
- [5] A. Oberhofer and P. Meisen, "Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration," Global Energy Network Institute (GENI), 2012.
- [6] T. Reddy, Linden's Handbook of Batteries, 4th Edition: McGraw Hill Professional, 2010.
- [7] "Product Line Sheet (VRLA)," TROJAN, pp. 1-2, 2013.
- [8] R. Vader. (2011). Energy Unlimited.
- [9] A. Delaille, "Développement de méthodes d'évaluation de l'état de charge et de l'état de santé des batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques," Ph.D, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2006.
- [10] R. Lizotte, "Data Center VRLA Battery End-of-Life Recycling Procedures," White Paper 36 - Schneider Electric, 2011.
- [11] Y. Liu, H. Pan, M. Gao, and Q. Wang, "Advanced hydrogen storage alloys for Ni/MH rechargeable batteries," Journal of Materials Chemistry, vol. 21, pp. 4743-4755, 2011.
- [12] S. Senyarich, "Innovative solar street lighting (SSL) batteries put conventional designs in the shade," Saft Specialty Battery Group, pp. 1-11, 2012.
- [13] SAFT, "High Temperature Series Nickel-Metal Hydride VHT F," Datasheet.
- [14] J. J. C. Kopera, "Considerations for the Utilization of NiMH Battery Technology in Stationary Applications," White paper COBASYS, pp. 1-10, 2005.
- [15] S. N. Begum, V. S. Muralidharan, and C. A. Basha, "Electrochemical investigations and characterization of a metal hydride alloy (MmNi_{3.6}Al_{0.4}Co_{0.7}Mn_{0.3}) for nickel metal hydride batteries," Journal of Alloys and Compounds, vol. 467, pp. 124-129, 2009.
- [16] X. Li, Y. Song, L. Wang, T. Xia, and S. Li, "Self-discharge mechanism of Ni-MH battery by using acrylic acid grafted polypropylene separator" International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35, pp. 3798-3801, 2010.
- [17] J. Tytgat, "Li-ion and NiMH battery recycling at Umicore" in EC/EPoSS/ERTRAC Expert Workshop 2009 - Batteries and Storage Systems for the Fully Electric Vehicle, 2009.
- [18] A. Dinger, R. Martin, X. Mosquet, M. Rabl, D. Rizoulis, M. Russo, and G. Sticher, "Batteries for Electric Cars" The Boston Consulting Group, pp. 1-18, 2010.
- [19] J. Jousse, E. Lemaire, N. Ginot, C. Batard, and J.-F. Diouris, "Assessment of lithium ion LiFePO₄ cells usage in photovoltaic standalone systems," in Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE 2013, pp. 1530-1535.
- [20] M. C. Niculut and C. Veje, "Analysis of the thermal behavior of a LiFePO₄ battery cell," in 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2012), 2012, pp. 1-8.
- [21] A. Kumar, "The Lithium Battery Recycling Challenge", 2014
- [22] J. Lowy, "United Airlines says it won't accept rechargeable battery shipments, citing safety concerns" U.S. News & World report, 2015.
- [23] F. Larsson and B.E. Mellander, "Abuse by external heating, overcharge and short circuiting of commercial lithium-ion battery cells" J. Electrochemical Soc. 161 (10) pp. A1611-A1617, 2014.