

Bartosz WAŚKOWICZ¹

Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki,
Instytut Inżynierii Elektrycznej (1)

Analiza właściwości wybranych technologii magazynowania energii elektrycznej

Streszczenie: W artykule opisano zagadnienia związane z właściwościami technologii magazynowania energii elektrycznej. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów porównano właściwości ogniw kwasowych VRLA, litowych LiFePO₄, superkondensatorowych EDLC oraz hybrydowych LIC. Artykuł zawiera również rekomendacje autora w zakresie wykorzystywania określonych typów ogniw dla różnych aplikacji energetycznych.

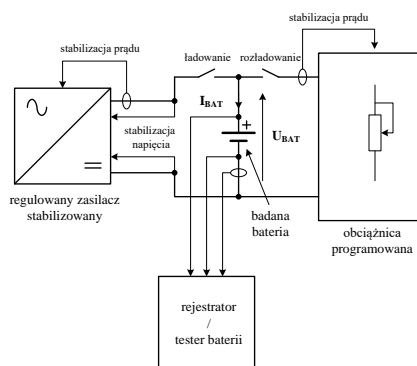
Słowa kluczowe: magazyn energii, superkondensator, ogniwa bateryjne

Wstęp

Zwiększający się udział źródeł rozproszonych energii elektrycznej, które mogą negatywnie oddziaływać na system elektroenergetyczny, konieczność zapewnienia wysokiej niezawodności dostaw energii jak i jakości energii elektrycznej wymuszają poszukiwania rozwiązań umożliwiających eliminację ww. zjawisk. Uwzględniając powyższe celem artykułu jest charakterystyka właściwości wybranych typów magazynów: i) z ogniwami kwasowymi typu VRLA; ii) ogniwami typu LiFePO₄; iii) superkondensatorowych typu EDLC (Electric Double Layer Capacitor); iv) superkondensatorowych typu LIC (Lithium Ion Capacitor). Analiza właściwości systemów magazynowania będzie poparta wynikami badań eksperymentalnych. W ramach weryfikacji eksperymentalnej przebadane i porównane będą następujące właściwości: energia oddana, pobrana z zasobnika, jego rzeczywista pojemność i sprawność na podstawie charakterystyk ładowania i rozładowania dla różnych prądów. Ponadto artykuł zawiera koszty inwestycyjne, koszty w odniesieniu do żywotności oraz rekomendacje autora w zakresie wykorzystania analizowanych typów magazynów dla różnych aplikacji.

Układ pomiarowy

Badania wykonano w układzie składającym się z regulowanego zasilacza stabilizowanego do ładowania magazynów, obciążnicy oraz rejestratora (Rys.1).



Rys. 1. Schemat uproszczony układu pomiarowego.

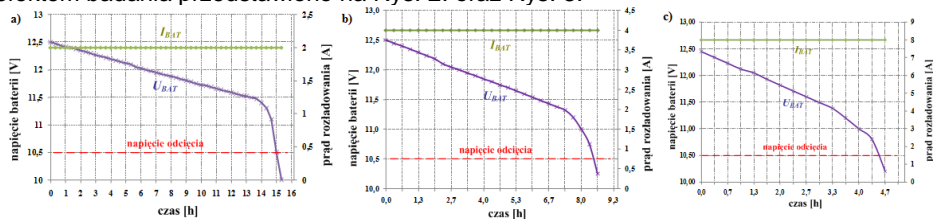
Ogniwa kwasowe typu VRLA

Ogniwa kwasowe typu VRLA są szeroko używane w pojazdach elektrycznych. Akumulatory tego typu mają najniższy koszt inwestycyjny, lecz jest to równoważone z niską liczbą cykli, których ilość jest uzależniona od poziomu rozładowywania [3]. Pod wpływem czasu ulegają one samorozładowaniu i co ważne są wrażliwe na zmiany temperatury. Najbardziej charakterystyczną wadą, wynikającą z chemicznej natury opisywanych akumulatorów jest ich zasiarczenie, które występuje, gdy akumulator zostaje pozostawiony w stanie rozładowania na długi odcinek czasu. Efektem tego jest zmniejszenie pojemności i zwiększona rezystancja wewnętrzna [3].

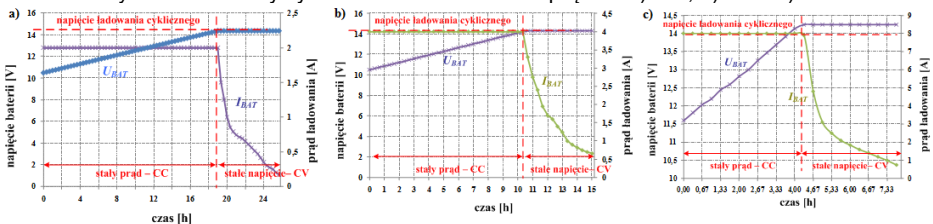
Tabela 1. Parametry techniczne badanych akumulatorów.

| Parametr | | Wartość |
|---|-----|-------------|
| Napięcie nominalne: | | 12V |
| Pojemność nominalna | | 40 Ah |
| Pojemność dla 25°C i napięcia odcięcia 10,5 V | 20h | 40 Ah |
| | 10h | 38 Ah |
| | 5h | 34 Ah |
| Rezystancja wewnętrzna akumulatora naładowanego | | 7,8 mΩ |
| Maksymalny prąd ładowania | | 13,0 A |
| Maksymalny prąd rozładowania | | 410 A (5 s) |

Charakterystyki ładowania i rozładowania akumulatorów dla różnych prądów będące efektem badania przedstawiono na Rys. 2. oraz Rys. 3.



Rys. 2. Charakterystyki czasowa rozładowania akumulatorów prądem a) 20h, b) 10h i c) 5h.



Rys. 3. Charakterystyki czasowa ładowania akumulatorów prądem a) 20h, b) 10h i c) 5h.

Ogniwa kwasowe VRLA - wyznaczenie pojemności i sprawności

Na podstawie charakterystyk ładowania i rozładowania wyznaczono pojemność akumulatorów a następnie porównano z wartościami pojemności podanymi przez producenta (Tab. 1).

$$(1) \quad C_X = \frac{\tau \cdot \sum_{n=1}^k I_{BAT}(n)}{3600}$$

gdzie:

- C_X – wyznaczona pojemność akumulatora odpowiednio C_C – w procesie ładowania oraz C_D – w procesie rozładowania [Ah];
- $I_{BAT}(n)$ – wartość n – tej próbki prądu akumulatora [A];
- τ – okres próbkowania [s];
- k – numer ostatniej próbki.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Jako moment zakończenia procesu ładowania przyjęto chwilę, w której prąd ładowania zmniejszy swoją wartość poniżej 10% wartości prądu I_{BAT_CC} . Moment zakończenia procesu rozładowania przyjęto chwilę, w której napięcie akumulatora zmniejszy swoją wartość poniżej wartości napięcia odcięcia U_{BAT_MIN} . W obu przypadkach prąd baterii jest całkowany z uwzględnieniem znaku. Wyznaczone w procesie rozładowania wartości pojemności akumulatora porównane zostały z wartościami podanymi w karcie katalogowej przez producenta (C_p). Na tej podstawie oszacowany został błąd δ_C wyznaczania pojemności wg zależności:

$$(2) \quad \delta_C = \frac{|C_p - C_D|}{C_p} \cdot 100\%$$

$$(3) \quad \delta_C = \frac{|C_p - C_C|}{C_p} \cdot 100\%$$

Oszacowano także sprawność magazynowania energii w badanych akumulatorach wg zależności:

$$(4) \quad \eta_C = \frac{C_D}{C_C} \cdot 100\%$$

Wyniki dotyczące wyznaczonych wartości pojemności oraz sprawności magazynowania energii zestawiono w tabeli 2. Jak można zauważyć pojemności przy określonych warunkach prądowych są różne a tendencja tych różnic nie zawsze się pokrywa z danymi producenta. Można zauważyć zasadę, wg której ładowanie większym prądem powoduje mniejszą pojemność.

Tabela 2. Wyniki badania pojemności akumulatorów ($T_{amb} = 23^\circ\text{C}$).

| Parametr | Prąd C5 (5h) | | | Prąd C10 (10h) | | | Prąd C20 (20h) | | |
|----------------|--------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| | C_C | C_D | C_P | C_C | C_D | C_P | C_C | C_D | C_P |
| Pojemność [Ah] | 41 | 34,6 | 34 | 47,9 | 34,7 | 38 | 41,7 | 30,7 | 40 |
| Błąd [%] | X | 1,7 | | X | 8,7 | | X | 23,3 | |
| Sprawność [%] | 84,3 | | X | 72,4 | | X | 73,6 | | X |

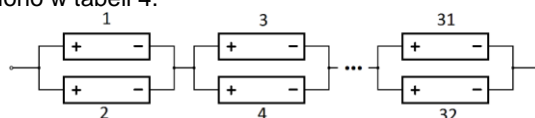
Ogniwa LIFEP04

Ogniwa LiFePO₄ z uwagi na swoją stabilność chemiczną i cieplną mają duży potencjał, jeżeli chodzi o możliwe zastosowania [4]. Charakteryzuje je duża żywotność dochodząca do 2000 cykli, wysoka wydolność prądowa, a ich energia właściwa i gęstość energii wynoszą odpowiednio około 150 Wh/kg i 400Wh/l [5].

Tabela 3. Parametry techniczne badanych magazynów energii typu LiFePO₄ oraz układu BMS.

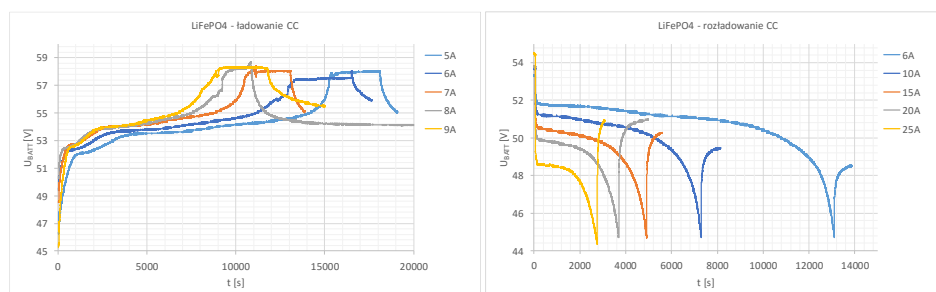
| Parametry elektryczne | LiFePO ₄ | BMS | HGX-D138 |
|----------------------------|---------------------|---|--------------|
| Nominalne napięcie | 3,2 V _{DC} | Napięcie ładowania | 57,6 V |
| Napięcie krytyczne | 4,2 V _{DC} | Maksymalny ciągły prąd ład./rozład. | 80 A |
| Pojemność nominalna | 10 Ah | Zabezpieczenie przez przeładowaniem | 3,90±0,025 V |
| Rezystancja wewnętrzna | < 6 mΩ | Czas wykrycia przeładowania | 0,5~2,0 s |
| Max. napięcie ładowania | 3,65 ± 0,5 V | Próg „zwolnienia” wykrycia przeładowania | 3,80±0,05 V |
| Min. napięcie rozładowania | 2,5 – 2,0 V | Zabezpieczenie przed rozładowaniem | 2,00±0,05 V |
| Rekomendowany prąd ład. | 1C (10A) | Czas wykrycia rozładowania | 50~200 ms |
| Max. prąd ładowania | 2C (20A) | Próg „zwolnienia” wykrycia rozładowania | 2,30±0,1 V |
| Max. prąd impulsowy | 10C (100A) | Napięcie, przy którym włącza się balansowanie (dla pojedynczego ogniwa) | 3,60±0,025 V |
| Max. ciągły prąd rozład. | 3C (30A) | Prąd balansowania dla pojedynczego ogniwa | 72± 10 mA |
| Standardowy prąd rozład. | 1C (10A) | | |

Powyższe cechy sprawiają, że specjaliści przewidują znaczny wzrost wykorzystania ogniw LiFePO4 i powolne wypieranie ogniw litowo-jonowych. Główną wadą ogniw jest ich wrażliwość na nadmierne naładowanie i rozładowanie, dlatego staje się konieczne użycie układów nadzorujących ich pracę [5]. Ogniwa te są wrażliwe na przekroczenie maksymalnego i minimalnego napięcia znamionowego, dlatego wymagają stosowania układów nadzoru. Ładowanie i rozładowanie magazynów energii LiFePO4 przeprowadzone zostało dla różnych wartości prądów (rys. 5) Czasy ładowania magazynów energii od stanu rozładowania (U_{BATT_min}) do stanu pełnego naładowania (U_{BATT_max}) zestawiono w tabeli 4.



Rys. 4. Schemat połączenia 32 ogniw typu LiFePO4.

Stan rozładowania U_{BATT_min} ustalono na 45 V_{DC} mając na uwadze napięcia progowe dedykowanego systemu nadzoru baterii. Poniżej tego napięcia dalsze rozładowywanie magazynu energii może wpłynąć na żywotność ogniw. Stan pełnego naładowania ustalono na 58,1 V_{DC} i wynika to z nastaw systemu BMS. Napięcie końcowe (U_{BATT_max}) oraz czas ładowania zapisany w tabeli 4 zostały wyznaczone w momencie, w którym prąd ładowania zmniejszył swoją wartość poniżej 10% maksymalnego prądu ładowania. Napięcie U_{BATT_max} jest to napięcie po uprzednim maksymalnym naładowaniu. Napięcie U_{BATT_min} jest to wartość napięcia dla ostatniej próbki prądu. Przerwa pomiędzy ładowaniem a rozładowaniem wynosi kilkanaście minut lub dobę.



Rys. 5. Rodziny charakterystyk czasowych ładowania i rozładowania zasobnika LiFePO4.

Tabela 4. Zestawienie czasów pełnego ładowania i rozładowania dla różnych prądów.

| ładowanie | | | | rozładowanie | | | |
|-----------|-----------------|-----------------|-------|--------------|-----------------|-----------------|-------|
| I [A] | U_{BATT_min} | U_{BATT_max} | t [s] | I [A] | U_{BATT_max} | U_{BATT_min} | t [s] |
| 5 | 46,25 | 57,9 | 16110 | 6 | 53,05 | 44,75 | 13040 |
| 6 | 49,5 | 57,4 | 13417 | 10 | 53,2 | 44,7 | 7230 |
| 7 | 48,55 | 57,95 | 15511 | 15 | 52,15 | 44,75 | 4849 |
| 8 | 50,3 | 58,2 | 9892 | 20 | 51,55 | 44,7 | 3630 |
| 9 | 45,25 | 58,3 | 9335 | 25 | 50,9 | 44,35 | 2702 |

Ogniwa kwasowe VRLA - wyznaczenie pojemności i sprawności

Na podstawie charakterystyki ładowania i rozładowania wyznaczono pojemność magazynów energii (tabela 5) oraz błąd wyznaczania pojemności. Energię E obliczono na podstawie sumy energii z próbek pomiarowych. Wyznaczone w procesie rozładowania i ładowania wartości energii magazynów energii LiFePO4 odniesione zostały z wartościami podanymi w karcie katalogowej przez producenta. Na tej

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

podstawie oszacowany został błąd wyznaczania pojemności δ_C i δ_D obliczony wg równań (2) oraz (3). Wyniki przedstawiono w tabeli 4. Oszacowano także sprawność magazynowania energii (gdzie E_D i E_C to wartości energii odpowiednio ładowania i rozładowania prądem o wartości 5 A):

$$(7) \quad \eta_c = \frac{E_D}{E_C} \cdot 100\% = \frac{1065,83}{1148,06} \cdot 100\% = 92,8\%$$

Jak wynika z obliczeń dla ładowania i rozładowania magazynów energii prądem o wartości 6 A sprawność wynosi 92,83%. Do obliczeń w tabeli 4 wykorzystuje się watogodzinną pojemność zmianową magazynów energii (Wh). Podawana przez producenta wartość pojemności amperogodzinnej (Ah) wynosi 20 Ah (dwa równoległe stringi 16 ogniw o pojemności znamionowej 10 Ah i napięciu znamionowym 3,2 V każde). Pojemność watogodzinną można, więc wyznaczyć wg zależności:

$$(8) \quad E_{Wh} = E_{Ah} \cdot U_{nom} = 20 \cdot 51,2 = 1024Wh$$

Tabela 5. Obliczenia pojemności zasobnika LiFePO4 na podstawie charakterystyk rozładowania i ładowania.

| Rozładowanie | | | | | Ładowanie | | | | |
|--------------|-------|---------------|------------|----------------|-----------|-------|---------------|------------|----------------|
| I [A] | T [s] | E_D [Wh] | E_N [Wh] | δ_D [%] | I [A] | T [s] | E_C [Wh] | E_N [Wh] | δ_C [%] |
| | | (suma próbek) | | (wzór 2) | | | (suma próbek) | | (wzór 3) |
| 6 | 13040 | 1065,83 | 1024 | 4,08 | 5 | 16110 | 1165,4 | 1024 | 13,81 |
| 10 | 7230 | 1053,09 | | 2,84 | 6 | 13417 | 1148,06 | | 12,12 |
| 15 | 4849 | 1015,71 | | 0,81 | 7 | 15511 | 1154,73 | | 12,77 |
| 20 | 3630 | 985,36 | | 3,77 | 8 | 9892 | 1122,5 | | 9,62 |
| 25 | 2702 | 913,77 | | 10,76 | 9 | 9335 | 1175,63 | | 14,81 |

* energia E i błąd δ zostały obliczone dla 2 wersji: na podstawie wzorów (2) i (3) oraz na podstawie próbek

Superkondensatory EDLC

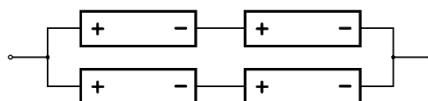
Zasobniki superkondensatorowe opierają się na zupełnie innej zasadzie działania niż poprzednio opisane magazyny, co odzwierciedlają ich charakterystyki ładowania i rozładowania i moc znamionowa. Mają one podobne właściwości, jak tradycyjne kondensatory [2], lecz od 10 do 100 razy większą pojemność. W tego typu zasobnikach nie zachodzi reakcja chemiczna a jedynie między elektrodami gromadzony jest ładunek elektryczny, nie dochodzi również do degradacji elektrod nawet przy całkowitym rozładowaniu [8]. Dzięki temu żywotność zasobników superkondensatorowych często przekracza 1000000 cykli, a często czynnikiem decydującym o czasie działania superkondensatora jest czas jego używania, który średnio wynosi 12 lat [8]. Ten typ magazynów wykorzystywany jest najczęściej przy krótkotrwałej wymianie energii [1]. Charakteryzują się gęstością mocy około 10000W/kg, lecz niską gęstością energii wynoszącą około 5 Wh/kg [1][6].

Superkondensatory EDLC są najczęściej spotykanym typem superkondensatorów [7], podobnie jak tradycyjne kondensatory wykazują liniową zależność napięcia od stopnia naładowania i ich zakres napięciowy sięga od zera do napięcia znamionowego. Jest to problematyczne z punktu widzenia układów przekształtników, które nie są w stanie wykorzystywać całej energii z powodu niewystarczającego współczynnika transformacji napięciowej i prądowej. Poniżej opisano superkondensatorowy magazyn energii NESSCAP model: EMHSR-0166C0-048R0S o parametrach podanych w tabeli 6.

Magazyny zostały połączone jak na rysunku 7. Łączna pojemność badanych magazynów energii wynosi 212,4 Wh.

Tabela 6. Parametry techniczne badanych superkondensatorowych zasobników energii.

| Parametry elektryczne | EMHSR-0166C0-048R0S |
|--|-----------------------------|
| Nominalne napięcie | 48,0 V _{DC} |
| Napięcie krytyczne (1 sekundowe) | 51,3 V _{DC} |
| Tolerancja pojemności (maksymalna) | 0 – 20% |
| Tolerancja pojemności (średnia) | 3 – 8% |
| DC-ESR (maksymalna) | 5,6 mΩ |
| DC-ESR (średnia) | 3,1 mΩ |
| Prąd upływu (poniżej 36 V) | 5,2 mA |
| Prąd upływu (powyżej 36 V) | 45 - 59 mA |
| Maksymalny prąd impulsowy (jedenorazowy) | 2000 A |
| Maksymalna energia | 53,1 Wh (166 F) |
| Wytrzymałość w temp. pokojowej | 10 lat |
| Ilość cykli | 1 mln |
| Magazynowanie | 2 lata (nie naładowany) |
| Temp. pracy | -40 ~ 65°C |
| Temp. przechowywania | -40 ~ 70°C (nie naładowane) |



Rys. 7. Połączenie 4 magazynów super kondensatorowych.

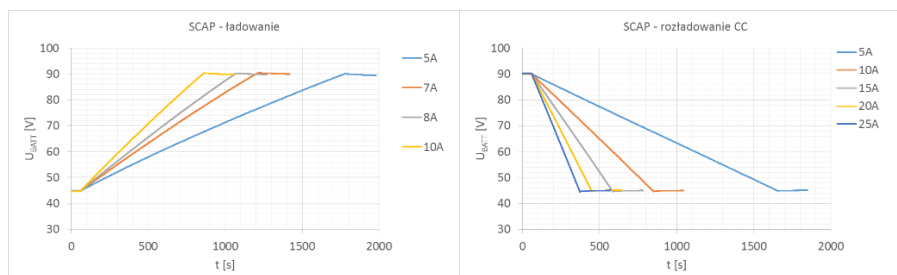
Ładowanie i rozładowanie superkondensatorowych magazynów energii przeprowadzone zostało z wartościami prądów: 5, 7, 8, 10 A dla ładowania i 5, 10, 15, 20 i 25A przy rozładowaniu. Czasy pełnego ładowania i pełnego rozładowania zestawiono w tabeli 7. Stan rozładowania U_{BATT_min} przyjęto jako połowę maksymalnego napięcia U_{BATT_max} mając na uwadze, że podczas współpracy z przekształtnikiem DC/DC roboczy zakres napięć będzie mieścił się w przedziale $U_{BATT_max} \div \frac{1}{2} U_{BATT_max}$. Oznacza to, że pojemność nominalna zasobnika o konfiguracji z rysunku 7 i przyjętym roboczym zakresie napięć (45 – 90 V) wynosi $C = 166$ F oraz $E_N = 140$ Wh.

Tabela 7. Zestawienie czasów pełnego ładowanie i rozładowania dla różnych wartości prądów.

| Ładowanie | | | | Rozładowanie | | | |
|-----------|-----------------|-----------------|--------|--------------|-----------------|-----------------|--------|
| I [A] | U_{BATT_min} | U_{BATT_max} | t [s] | I [A] | U_{BATT_max} | U_{BATT_min} | t [s] |
| 5 | 44,8 | 90,05 | 1721,4 | 5 | 89,75 | 45,85 | 1588,8 |
| 7 | 45 | 90,45 | 1156,2 | 10 | 90,1 | 44,65 | 789,3 |
| 8 | 45,05 | 90,25 | 1013,1 | 15 | 90,1 | 44,5 | 527,4 |
| 10 | 45,1 | 90,3 | 804 | 20 | 90,15 | 44,65 | 390,9 |
| | | | | 25 | 90,1 | 44,45 | 313,8 |

Poniżej przedstawiono charakterystyki ładowania i rozładowania w zakresie napięć (45 – 90 V) dla różnych prądów.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 8. Rodziny charakterystyk rozładowania i ładowania superkondensatorowego magazynu energii.

Współczynnik determinacji R^2 dla przebiegu ładowania wynosi 0,996 a rozładowania 0,999 co pozwala praktycznie przyjąć te przebiegi za liniowe.

Wyznaczanie rzeczywistej pojemności zasobnika EDLC

Na podstawie charakterystyki ładowania i rozładowania wyznaczono pojemność magazynów energii (tabela 8) oraz błąd wyznaczania pojemności. Energię E obliczono dwoma sposobami: na podstawie wzoru (9) oraz na podstawie sumy energii z każdej próbki pomiarowej.

$$(9) \quad E = C \cdot \frac{U_{BATT_max}^2 - U_{BATT_min}^2}{2}$$

gdzie

E_D, E_C – wartość obliczonej energii przy rozładowaniu (E_D) i ładowaniu (E_C);

U_{BATT_max} – napięcie po skończeniu procesu ładowania lub napięcie początkowe w procesie rozładowania (tabela 2 i 3);

U_{BATT_min} – napięcie po skończeniu procesu rozładowania lub napięcie początkowe w procesie ładowania (tabela 2 i 3);

Energia, która może być wykorzystana przez interfejsy energoelektroniczne OZE w przypadku baterii superkondensatorów jest funkcją różnicy kwadratów początkowego i końcowego napięcia rozładowania, co ilustruje powyższy wzór. Wyznaczone podczas rozładowania i ładowania wartości energii magazynów energii LIC zostały odniesione do wartości podanych w karcie katalogowej. Na tej podstawie oszacowany został błąd wyznaczania pojemności δ_C i δ_D obliczony wg równań (X). Wyniki przedstawiono w tabeli 8.

$$(10) \quad \delta_D = \frac{|E_N - E_D|}{E_N} \cdot 100\%$$

$$(11) \quad \delta_C = \frac{|E_N - E_C|}{E_N} \cdot 100\%$$

Oszacowano także sprawność magazynowania energii w badanych akumulatorach dla jednego przypadku. Do wzoru (12) podstawiono wartości energii wyliczone na podstawie wzorów (9):

$$(12) \quad \eta_C = \frac{E_D}{E_C} \cdot 100\% = \frac{137,25}{140,68} \cdot 100\% = 97,5\%$$

Oraz na podstawie sumy próbek:

$$(13) \quad \eta_c = \frac{147,28}{166,84} \cdot 100\% = 88,3\%$$

Jak wynika z obliczeń dla ładowania i rozładowania magazynów energii prądem o wartości 5 A sprawność wynosi 97,5% dla pojemności liczonej ze wzoru (13) i 88,3% dla pojemności liczonej z sumy próbek.

Tabela 8. Obliczenia pojemności magazynów energii na podstawie charakterystyk.

| ŁADOWANIE | | | | | | ROZŁADOWANIE | | | | | | | |
|-----------|-------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|-------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| I [A] | t [s] | E _{C1} [Wh] | E _{C2} [Wh] | E _N [Wh] | δ _{C1} [%] | δ _{C2} [%] | I [A] | t [s] | E _{D1} [Wh] | E _{D2} [Wh] | E _N [Wh] | δ _{D1} [%] | δ _{D2} [%] |
| 5 | 1721 | 140,68 | 166,84 | 140 | 0,5 | 19,2 | 5 | 1589 | 137,25 | 147,28 | 140 | 2 | 5,2 |
| 7 | 1156 | 141,93 | 155,21 | | 1,4 | 10,9 | 10 | 789,3 | 141,28 | 149,08 | | 0,9 | 6,5 |
| 8 | 1013 | 141 | 153,01 | | 0,7 | 9,3 | 15 | 527,4 | 141,51 | 148,65 | | 1,1 | 6,2 |
| 10 | 804 | 141,1 | 152,49 | | 0,8 | 8,9 | 20 | 390,9 | 141,41 | 147,64 | | 1 | 5,5 |
| | | | | | | | 25 | 313,8 | 141,61 | 147,77 | | 1,2 | 5,5 |

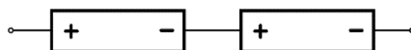
* E_{C1} i E_{D1} ze wzoru 9; E_{C2} i E_{D2} ze sumy próbek; δ_{C1}, δ_{D1} ze wzorów 10,11; δ_{C2}, δ_{D2} ze sumy próbek

Superkondensatory LIC

Superkondensatory typu LIC (Lithium Ion Capacitor) to magazyny, które łączą dynamikę i gęstość mocy EDLC ze zwiększoną energią z 5 Wh/kg do około 20 Wh/kg [8]. Podobnie jak te opisane powyżej ich poziom naładowania zależy liniowo od napięcia (Rys. 10). Różnią się jednak zakresem napięciowym wynoszącym ok. 40% napięcia znamionowego, co gwarantuje pełne wykorzystanie zgromadzonej energii. Inne właściwości, takie jak niska rezystancja wewnętrzna, wysokie prądy ładowania i rozładowania, energia niższa od baterii elektrochemicznych i duże koszty inwestycyjne jak są analogiczne jak w superkondensatorach typu EDLC. Badany jest tutaj superkondensator litowo-jonowy (ang. Lithium Ion Capacitors – LIC) o parametrach podanych w tabeli 9. W badaniach wykorzystano baterię z dwoma połączonymi szeregowo zasobnikami (Rys. 10).

Tabela 9. Obliczenia pojemności magazynów energii na podstawie charakterystyk.

| Parametry elektryczne | Model EAS Endurance EX33 |
|---------------------------------|--|
| Pojemność | 275 F |
| Maksymalne napięcie | 45,6 V |
| Minimalne napięcie | 26,4 V |
| Maksymalna magazynowana energia | 52,8 Wh |
| Maksymalna moc chwilowa | 17 kW |
| Waga | 5,6 kg |
| Wymiary | 264 mm x 167 mm x 155 mm (h) (razem z zaciskami) |
| Temp. pracy | -30°C / +70°C (temp. obudowy) |
| Temp. przechowywania | -40°C / +80°C |



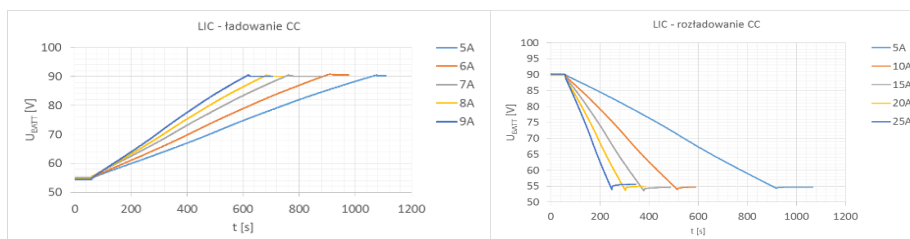
Rys. 10. Schemat połączenia magazynu energii LIC.

Ładowanie magazynów energii typu LIC przeprowadzone zostało metodą stałoprądową (CC) z wartościami prądów: 5, 6, 7, 8, 9 A (rysunek 11). Czasy ładowania

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

magazynów energii od stanu rozładowania (U_{BATT_min}) do stanu pełnego naładowania (U_{BATT_max}) zestawiono w tabeli 10.

Wartości minimalne i maksymalne napięcia kontrolowane są przez dedykowany układ nadzoru baterii (Battery Management System – BMS). Ładowanie i rozładowanie magazynów energii przedstawione zostało na rysunku 11.



Rys. 11. Rodzina charakterystyk ładowania i rozładowania magazynu energii

Współczynnik determinacji R^2 dla przebiegu ładowania i rozładowania wynosi 0,999 co pozwala praktycznie przyjąć te przebiegi za liniowe.

Tabela 10. Zestawienie czasów ładowania i rozładowania dla różnych wartości prądów.

| Ładowanie | | | | Rozładowanie | | | |
|-----------|-----------------|-----------------|-------|--------------|-----------------|-----------------|-------|
| I [A] | U_{BATT_min} | U_{BATT_max} | t [s] | I [A] | U_{BATT_max} | U_{BATT_min} | t [s] |
| 5 | 54,7 | 90,2 | 1017 | 5 | 90,1 | 55,6 | 861 |
| 6 | 54,8 | 90,6 | 851 | 10 | 89,8 | 54,8 | 457 |
| 7 | 55,1 | 90,1 | 703 | 15 | 89,7 | 54,5 | 320 |
| 8 | 54,9 | 90,1 | 626 | 20 | 89,5 | 54,5 | 245 |
| 9 | 54,5 | 90,1 | 559 | 25 | 89,7 | 54,6 | 190 |

Wyznaczanie rzeczywistej pojemności zasobnika

Obliczenia wykonano identycznie jak w przypadku zasobnika EDLC a wyniki przedstawiono w tabeli 11. Oszacowano także sprawność magazynowania energii w badanych akumulatorach wg wzoru (17) dla jednego wybranego przypadku. Do wzoru podstawiono wartości energii E_D i E_C dla ładowania i rozładowania prądem o wartości 5 A:

$$(17) \quad \eta_c = \frac{E_D}{E_C} \cdot 100\% = \frac{87,12}{102,34} \cdot 100\% = 85,1\%$$

Jak wynika z obliczeń dla ładowania i rozładowania magazynu prądem o wartości 5 A sprawność wynosi 85,1%.

Tabela 11. Obliczenia pojemności magazynów energii na podstawie charakterystyk.

| ŁADOWANIE | | | | | | ROZŁADOWANIE | | | | | | | |
|-----------|-------|---------------|---------------|------------|-------------------|-------------------|-------|-------|---------------|---------------|------------|-------------------|-------------------|
| I [A] | t [s] | E_{c1} [Wh] | E_{c2} [Wh] | E_N [Wh] | δ_{c1} [%] | δ_{c2} [%] | I [A] | t [s] | E_{D1} [Wh] | E_{D2} [Wh] | E_N [Wh] | δ_{D1} [%] | δ_{D2} [%] |
| 5 | 1017 | 102,34 | 100,74 | 105,6 | 3,08 | 4,6 | 5 | 861 | 87,12 | 101,69 | 105,6 | 17,5 | 3,7 |
| 6 | 851 | 103,11 | 103,36 | | 2,36 | 2,12 | 10 | 457 | 91,78 | 100,79 | | 13,09 | 4,55 |
| 7 | 703 | 99,24 | 100,93 | | 6,02 | 4,42 | 15 | 320 | 96,13 | 100,56 | | 8,97 | 4,77 |
| 8 | 626 | 100,86 | 101,74 | | 4,49 | 3,66 | 20 | 245 | 98 | 97,97 | | 7,2 | 7,22 |
| 9 | 559 | 101,04 | 102,26 | | 4,32 | 3,16 | 25 | 190 | 95,2 | 96,37 | | 9,84 | 8,74 |

Oznaczenia w tabeli:

E_N – energia nominalna podana przez producenta; E_D – energia wyznaczona przy rozładowaniu;
 E_C – energia wyznaczona przy ładowaniu; δ_C – błąd wyznaczania pojemności przy ładowaniu;
 δ_D – błąd wyznaczania pojemności przy rozładowaniu; I – prąd ładowania / rozładowania;
 t – czas ładowania / rozładowania. * E_{C1} i E_{D1} – wzór 9; E_{C2} E_{D2} – suma próbek; δ – wzory 10, 11

Koszty

Jednym z podstawowych zagadnień związanych z wykorzystaniem zasobników energii w systemach prosumenckich jest określenie kosztów magazynowania energii. Koszt ten uwzględniać powinien zarówno koszt inwestycyjny dla danej technologii jak i żywotność. Żywotność akumulatorów jest zależna od stopnia cyklicznego rozładowania, dlatego fakt ten należy wziąć także pod uwagę. Koszt magazynowania energii w zasobniku można wyznaczyć z uproszczonej zależności:

$$(19) \quad K_{ES} = \frac{K_I}{DOD \cdot N_{ES(DOD)} \cdot C_{N(kWh)}}$$

gdzie:

K_{ES} – koszt magazynowania energii [PLN/kWh];

K_I – koszt inwestycyjny;

$C_{N(kWh)}$ – pojemność znamionowa akumulatora [kWh];

$N_{ES(DOD)}$ – żywotność akumulatora [cykle] przy średniej wartości stopnia cyklicznego rozładowania;

DOD – średni stopień cyklicznego rozładowania [0 – 1];

Tabela 12. Koszty różnych technologii magazynowania energii.

| Typ | koszt inwestycyjny [PLN/kWh] | koszt magazynowania [PLN/kWh] na cykl |
|---------|------------------------------|---------------------------------------|
| VRLA | 1400 | 2,78 |
| LIFEPO4 | 3600 | 2,27 |
| EDLC | 175000 | 0,17 |
| LIC | 150000 | 0,15 |

W kwestii kosztów widać wyraźną różnicę między opisywanymi technologiami, jeśli chodzi o obszar zastosowania. Magazyny typu VRLA i LiFePO₄ nadają się jako źródło ciągłego zasilania z czego VRLA jest tańsze w przeliczeniu na energię a LiFePO₄ ma większą ilość cykli, gęstość mocy i gęstość energii. Obie te technologie znajdują zastosowanie w pojazdach elektrycznych, takich jak samochody, wózki widłowe i inne. Stosowanie superkondensatorów jest ograniczone przez ich wysoką cenę i niską energię do zastosowań wykorzystujących ich dużą dynamikę. Do zastosowań takich zaliczają się np. układy hamowania odzyskowego w pojazdach elektrycznych. Stosuje się je również razem z innymi źródłami zasilania w celu krótkotrwałego dostarczania mocy szczytowej lub w systemach magazynowania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych o dużej zmienności.

Wnioski

Opisane technologie różnią się zasadą działania, parametrami (tabela 13), kosztami i zastosowaniem. Akumulatory VRLA to dojrzała technologia, szeroko stosowana w samochodach spalinowych, wózkach widłowych i innych. Główną zaletą tych akumulatorów jest dużo niższa cena względem innych technologii. Nowoczesne zastosowania często rezygnują z akumulatorów kwasowych z powodu ich niskiej liczby cykli, dużej masy, niskiej sprawności i dużej zmienności pojemności zależnej od prądu ładowania i temperatury. Ogniwa LiFePO₄ to stosunkowo młoda technologia i główne swoje zastosowanie znalazła w nowoczesnych samochodach elektrycznych. Swoimi parametrami

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

zbliżone są do baterii litowo-jonowych, lecz mają od nich większą gęstość energii oraz są stabilniejsze chemicznie i mniej szkodliwe dla środowiska. Ogniwa te są wrażliwe na przekroczenie zakresu znamionowego napięcia roboczego, dlatego wymagają stosowania układów nadzoru. Superkondensatory rzadko stosowane są jako jedyne źródło zasilania, wyłącznie w zastosowaniach specjalizowanych. Zwykle stosuje się je jako dopełnienie systemów zasilania czy magazynów energii wykorzystujące inną technologię, do redukcji wysokoczęstotliwościowych zakłóceń w zasilaniu ze względu na dużą dynamikę. Superkondensatory zapewniają również większą moc chwilową, co często pozwala na zmniejszenie mocy głównego źródła zasilania, co niesie za sobą oszczędności. LIC to specyficzna odmiana superkondensatorów charakteryzująca się około 4-krotnie większą gęstością energii względem EDLC i węższym zakresem napięcia roboczego. Przez co jeszcze lepiej nadają się do systemów podtrzymania i redukcji zakłóceń sieciowych. Opisane technologie są ciągle rozwijane, co prowadzi do dalszej poprawy ich parametrów i obniżenia kosztów otwierając tym samym nowe obszary zastosowań.

Tabela 13. Wybrane parametry opisywanych technologii.

| Typ | Gęstość mocy | Gęstość energii | Sprawność | Liczba cykli | Koszt [PLN/kWh] | Koszt/cykl |
|---------|--------------|-----------------|-----------|--------------|-----------------|------------|
| VRLA | 80 W/kg | 40 Wh/kg | 75 % | >1000 | 1400 | 2,8 |
| LiFePO4 | 250 W/kg | 140 Wh/kg | 95 % | 2000 | 3600 | 2,3 |
| EDLC | 5000 W/kg | 5 Wh/kg | >95 % | 1000000 | 175000 | 0,18 |
| LIC | 3000 W/kg | 20 Wh/kg | >95 % | 1000000 | 150000 | 0,15 |

Literatura:

1. C. Abbey, G. Joos, „*Supercapacitor energy storage for wind energy applications*” - Industry Applications, IEEE Transactions on, 2007
2. Sergio Vazquez, Srdjan M. Lukic, Eduardo Galvan, Leopoldo G. Franquelo, Juan M. Carrasco, „*Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications*”, Industrial Electronics, IEEE, 2010
3. J. Larminie and J. Lowry, „*Electric Vehicle Technology Explained*”, Wydanie 1-sze, Wiley, Nowy York, 2003
4. Low Wen Yao, Aziz, J. A., „*High capacity lifepo4 battery model with consideration of nonlinear capacity effects*”, 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia
5. Edward James William II, Vishu Gupta, Matthew Huff, Ondrej Linda, Jasper Nance, Herbert Hess, Milos Manicr, Freeman Rufus, Ash Thakker, Justin Govar, "A Comparative Study of Lithium Poly-Carbon Monofluoride (Li/CFx) and Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) Battery Chemistries for State of Charge Indicator Design", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)
6. M. Jayalakshmi, K. Balasubramanian, "Simple Capacitors to Supercapacitors - An Overview", International Journal of Electrochemical Science, 4 October 2008
7. Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1513–1522, Elsevier
8. H. Gualous, G. Alcicek, Y. Diab, A. Hammar, P. Venet, K. Adams, M. Akiyama, C. Marumo, "ESSCAP'2008 – Lithium Ion capacitor characterization and modelling", ESSCAP'08 – 3rd European Symposium on Supercapacitors and Applications

Autor: mgr inż. Bartosz Waškowicz; Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, e-mail: B.Waskowicz@iee.uz.zgora.pl