

**Marcin JARNUT¹, Grzegorz BENYSEK¹,
Jacek KANIEWSKI¹, Szymon WERMIŃSKI¹**

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej (1)

Zasobniki energii z akumulatorami przepływowymi typu ZnBr

Streszczenie. *W artykule przedstawiono właściwości zasobników energii z akumulatorami przepływowymi typu ZnBr. Omówiono zasadę działania akumulatorów przepływowych, tryby pracy, specyficzne wymagania w zakresie eksploatacji oraz zastosowania tego typu magazynów energii we współczesnych systemach elektroenergetycznych.*

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, zasobniki energii, akumulatory przepływowe

Wprowadzenie

Zmieniająca się struktura wytwarzania energii elektrycznej we współczesnych systemach elektroenergetycznych, a szczególnie coraz powszechniejsze wykorzystanie źródeł odnawialnych o niespokojnej charakterystyce mocy wyjściowej, wymaga stosowania nowych technik regulacji w stosunku do istniejących elementów systemu, a także stosowania nowych rozproszonych technologii energetycznych w zakresie np. magazynowania energii. Zastosowanie zasobników energii w sieciach dystrybucyjnych, a zwłaszcza w Prosumenckich Mikroinstalacjach Energoelektrycznych (PME) pozwala na zmniejszenie negatywnego oddziaływania OZE na profile napięciowe promieniowych sieci dystrybucyjnych poprzez:

- stabilizację mocy prowadzącą do zmniejszenia dynamicznego oddziaływania OZE objawiającego się szybkimi wahaniami napięcia (zjawisko migotania światła);
- zmianę profilu dobowego mocy mikroinstalacji prowadzącą do eliminacji długotrwałego wzrostu napięcia na końcu linii promieniowej wywołanego brakiem korelacji profilu obciążenia linii zasilających odbiorców bytowych i profilu generacji źródeł fotowoltaicznych przyłączonych do tej linii.

Zaletą stosowania takich układów jest brak konieczności chwilowego ograniczania mocy OZE, brak konieczności generacji dodatkowej mocy biernej w celu regulacji napięcia w sieciach promieniowych [1] (voltage droop) oraz możliwość zwiększenia konsumpcji własnej energii z OZE w warunkach niskiej opłacalności jej transferu do sieci.

Akumulatory przepływowe

Ze względu na znaczny koszt inwestycyjny oraz stosunkowo niewielką żywotność cykliczną powszechnie stosowane obecnie akumulatory kwasowe, wykorzystywane do budowy zasobników energii w systemach OZE stopniowo zastępowane są zasobnikami wykonanymi w nowych technologiach. Prace badawcze i rozwojowe prowadzone są w kierunku opracowania technologii charakteryzującej się jednocześnie: dużą gęstością energii, dużą gęstością mocy, wysoką żywotnością cykliczną i kalendarzową oraz niskim kosztem inwestycyjnym i eksploatacyjnym. Dotychczas większość tych cech jednocześnie osiągalna była jedynie w drogich zasobnikach hybrydowych zawierających dwa moduły równoległe: „wolny” (długookresowy) – akumulatorowy i „szybki” (krótkookresowy) – superkondensatorowy. W chwili obecnej wdrażane są rozwiązania łączące w jednej strukturze cechy rozwiązań hybrydowych. Dużą dynamikę rozładowania cyklicznego (0,5C) oraz dużą głębokość rozładowania cyklicznego

(DOD=100%) przy zachowaniu wielokrotnie wyższej żywotności niż w akumulatorach kwasowych z elektrolitem ciekłym (10 tys. cykli w stosunku do 500 cykli) osiągnięto w akumulatorach przepływowych typu RFB (Redox Flow Batteries), które stanowią odrębną, szybką rozwijaną technologię magazynowania energii. Cechami zasobników, które są brane pod uwagę przy wyborze technologii magazynowania energii w systemach prosumenckich są także podatność na wpływ parametrów otoczenia (szczególnie temperatury), bezpieczeństwo użytkowania oraz oddziaływanie na środowisko zewnętrzne w warunkach normalnej eksploatacji.

Obecnie w dostępnych rynkowo akumulatorach przepływowych stosuje się trzy podstawowe typy elektrolitów [3]:

- wanadowy w akumulatorach VRB (Vanadium Redox Battery);
- cynkowo-bromkowy w akumulatorach ZnBr (Zink Bromine Battery);
- siarczkowo-bromkowy w akumulatorach PSBB (Polysulphide Bromine Battery).

Ze względu na dobre właściwości dynamiczne (prąd 0,5C) oraz stosunkowo niewielki koszt, w porównaniu z zasobnikami wykonanymi w innych technologiach, duży potencjał implementacyjny w zastosowaniach do mikroinstalacji OZE upatrywany jest zwłaszcza w akumulatorach przepływowych typu ZnBr.

Tabela 1. Zestawienie charakterystycznych parametrów akumulatorów przepływowych [3].

Parametr	Typ baterii przepływowej		
	VRB	ZnBr	PSBB
Pojemność [MWh]	0,5 – 6	0,01 – 3	do 120
Moc [MW]	do 3 MW	do 500 kW	do 15 MW
Sprawność [%]	65 – 85	65 – 75	75
Napięcie ogniwa [V]	1,2	1,85	1,5
Gęstość mocy ogniwa [W/m ²]	800	1000	800
Koszt inwestycyjny	[PLN/kWh]	2000 – 5600	600 – 4000
	[PLN/kW]	1600 – 6000	2800 – 10000
Żywotność	kalendarzowa [lata]	20	20
	cykliczna [cykl]	10000	3000
Koszt eksploatacyjny [PLN/kWh]	0,2 – 0,56	0,2 – 1,33	0,23 – 0,28
Gęstość masowa energii [Wh/kg]	10 – 50	10 – 90	10 – 50

Akumulator przepływowy typu ZnBr

W baterii ZnBr wykorzystywane są dwa rozdzielone strumienie uwodnionego elektrolitu cynkowo-bromowego ZnBr₂ umieszczonego w dwóch oddzielnych zbiornikach i przepływające wokół elektrod kompozytowych (plastikowo-węglowych) umieszczonych po dwóch stronach mikroporowatej, jonowo selektywnej membrany poliolefinowej (polimer węglowodorowy). Elektrolit po stronie anody jest czystym roztworem wodnym ZnBr₂, natomiast elektrolit po stronie katody zawiera dodatkowo aminy wykorzystywane do utrzymania bromu w roztworze podczas procesu ładowania. W tak utworzonym ogniwie zachodzą reakcje [3]:

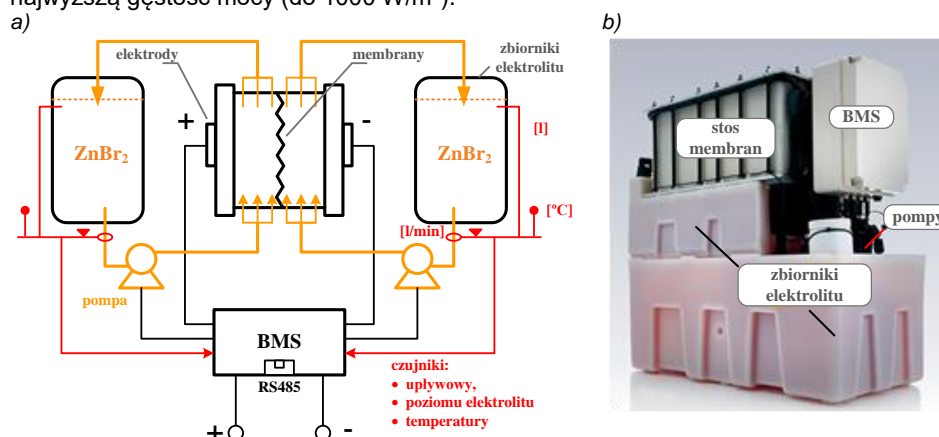
- na anodzie: $Zn^{0}_{(s)} \rightarrow Zn^{2+}_{(aq)} + 2e^{-}$ (rozładowanie) $E^0 = 0,763 \text{ V (} 25^{\circ}\text{C)}$
- na katodzie: $Br_{2(aq)} + 2e^{-} \rightarrow 2Br^{-}_{(aq)}$ (rozładowanie) $E^0 = 1,087 \text{ V (} 25^{\circ}\text{C)}$
- w całym ogniwie: $ZnBr_{2(aq)} \leftrightarrow Zn^0 + Br_{(aq)}$ $E^0_{cell} = 1,850 \text{ V (} 25^{\circ}\text{C)}$

gdzie: (aq) roztwór wodny; (s) metal w postaci stałej.

Podczas rozładowania, w wyniku reakcji chemicznej, jony cynku ($Zn^{2+}_{(aq)}$) formowane na anodzie i jony bromu ($2Br^{-}_{(aq)}$) formowane na katodzie rekombinują w bromek cynku ZnBr₂. W trakcie reakcji w ogniwie generowane jest napięcie 1,85 V. Ogniwa dla uzyskania wyższych napięć znamionowych łączy się w stosy podobnie jak w przypadku ogniw paliwowych. Podczas ładowania na ścianie anody odkłada się, w postaci cienkiej warstwy, metaliczny cynk $Zn^0_{(s)}$, który służy jako substrat w reakcji podczas

IX Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

rozładowania. Dla uniknięcia zalegania cynku na elektrodzie mogącego prowadzić w dłuższej perspektywie do „zapchania” membrany wymagane jest cykliczne całkowite rozładowanie baterii, pozwalające na skuteczne oczyszczenie anody. Pozwala to zachować wysoką żywotność ogniw ZnBr (powyżej 2000 cykli). Sprawność akumulatora ZnBr nie przekracza 75% i wynika z ubytku energii na pracę pomp cyrkulacyjnych oraz na reakcje pasożytnicze. Baterie ZnBr charakteryzują się najwyższym napięciem ogniw (1,85 V) spośród produkowanych akumulatorów przepływowych oraz mają wśród nich najwyższą gęstość mocy (do 1000 W/m²).



Rys. 1. Akumulator przepływowy typu ZnBr: a) schemat uogólniony; b) przykład komercyjnego wykonania akumulatora przepływowego - ZBM2 (RedFlow).

Pojemność energetyczna baterii ZnBr zależy od pojemności zbiorników elektrolitu, ale także od sumarycznej powierzchni membran przekładającej się na ilość cynku który może zostać skoncentrowany na elektrodach w procesie ładowania. Z kolei moc zależy głównie od powierzchni membran.

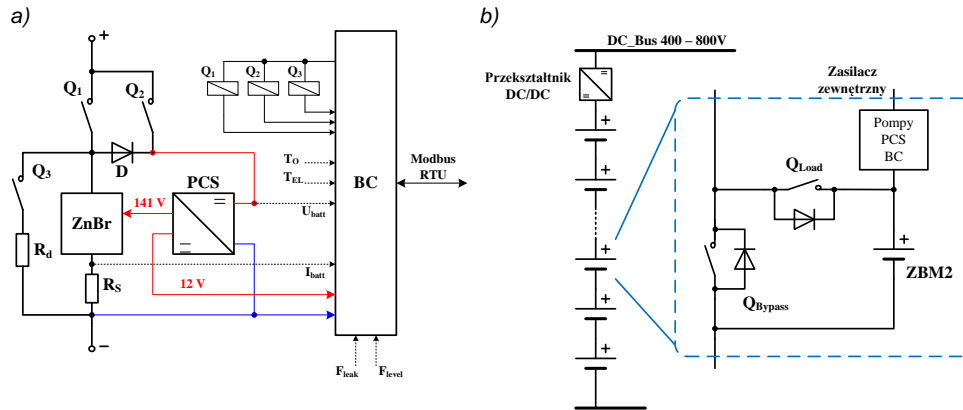
Eksploatacja akumulatorów ZnBr wymaga spełnienia specyficznych wymagań związanych z wentylacją pomieszczenia akumulatorowni (180 m³/h) ze względu przede wszystkim na wysoką aktywność korozyjną bromu (ale także jego toksyczność), a także ze względu na możliwość powstawania wodoru w pasożytniczych procesach chemicznych uwodnionego elektrolitu ZnBr₂. Akumulatory te wymagają ponadto aktywnych systemów chłodzenia elektrolitu do utrzymania stabilności wiązań aminowo-bromowych, utrzymujących brom w elektrolicie, w warunkach gdy temperatura otoczenia przekroczy 35°C.

Układ nadzoru baterii przepływowej ZnBr

System nadzoru baterii przepływowej ze względu na specyfikę pracy jest nieco bardziej skomplikowany od systemów nadzoru baterii elektrochemicznych z elektrolitem stacjonarnym. Uproszczony schemat takiego układu przedstawiono na rys.2a. System nadzoru baterii (Battery Management System – BMS), składa się z dwóch podstawowych modułów funkcjonalnych [4]:

- układu pomiarowo-decyzyjnego BC (Battery Controller), odpowiedzialnego za akwizycję danych pomiarowych takich jak: prąd (I_{batt}) i napięcie (U_{batt}) baterii, temperatura otoczenia (T_{O}) i elektrolitu (T_{EL}), stan naładowania baterii (SOC). Układ ten odpowiada także za sterowanie elementami wykonawczymi, detekcję wycieku

(F_{leak}) lub ubytku (F_{level}) elektrolitu oraz za komunikację z systemami zewnętrznymi (Modbus RTU);



Rys. 2. Schemat uproszczony układu BMS akumulatora przepływowego ZBM2: a) do pracy w baterii równoległej; b) z dodatkowymi łącznikami obejściowymi w rozwiązaniach do pracy w połączeniu łańcuchowym.

- układu wykonawczego zawierającego: przetwornik energoelektroniczny PCS (Power Converter Solution) wytwarzający napięcie do zasilania układu pomiarowo-decyzyjnego (12 V DC) oraz do zasilania pomp cyrkulacyjnych elektrolitu (141 V DC) i cewek łączników elektromechanicznych; łączniki elektromechaniczne prądu stałego Q1, Q2 i Q3 do zmiany trybu pracy baterii; rezystor rozładowczy Rd do rozładowania baterii w cyklu serwisowym; boczny rezystancyjny Rs wykorzystywany do pomiaru prądu baterii; diodę blokującą D wykorzystywaną do blokowania ładowania baterii w stanie pełnego naładowania lub w cyklu poprzedzającym cykl serwisowy.

Ze względu na specyfikę pracy baterii przepływowej ZnBr, BMS pełni funkcje:

- zabezpieczeniowe polegające na awaryjnym odłączeniu baterii od zacisków ładowarki/obciążenia przy przeciążeniu (w przypadku badanej baterii ZBM2 o pojemności 10 kWh jest to 5 kW przy rozładowaniu i 2,5 kW przy ładowaniu), przerwaniu pracy baterii i wygenerowaniu alarmu w przypadku wycieku elektrolitu (czujnik upływowy) lub obniżeniu jego poziomu poniżej minimum (czujnik poziomu). Praca baterii jest przerywana także w przypadku przekroczenia temperatur krytycznych tzn. $T_O < T_{min} = 10^{\circ}C$ lub $T_{EL} > T_{max} = 50^{\circ}C$.
- eksploatacyjne polegające na monitorowaniu bieżących parametrów baterii, na komunikacji z układami zewnętrznymi (np. przetwornikiem DC/AC) oraz na okresowym wymuszaniu cykli serwisowych.

Systemy BMS baterii przepływowych nie zawierają modułów wyrównywania napięć.

Tryby pracy baterii przepływowej ZnBr

Bateria przepływowa może znajdować się w jednym dwóch podstawowych trybów pracy:

- tryb pracy normalnej (RUN mode) kiedy jest możliwe zarówno ładowanie jak i rozładowywanie baterii mocą w zakresie: $-3 \text{ kW} (5 \text{ kW}_{peak}) < P_{batt} < 2,5 \text{ kW}$ (wartość ujemna dla rozładowania);
- tryb serwisowy (STOP mode) kiedy ogniwa baterii są odłączone od zacisków zewnętrznych na skutek wystąpienia przeciążenia lub podania zbyt wysokiego napięcia z przetwornika (oba przypadki wymagają resetowania odpowiednich

IX Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

rejestrów BC), występuje on także po każdych 120 h (co 5 dni) pracy pomp cyrkulacyjnych (cykl serwisowy na oczyszczanie membran). W trybie tym możliwe jest jedynie rozładowanie baterii najpierw przez wewnętrzny układ chłodzenia (w przypadku ZBM2 poniżej 30 V), a następnie po załączeniu łącznika Q3 przez rezystor rozładowczy R_d (do napięcia 0 V).

W celu uniknięcia marnotrawienia energii na kilka godzin przed planowanym cyklem serwisowym następuje zablokowanie funkcji ładowania poprzez wyłączenie łącznika Q_1 i załączenie łącznika Q_2 co dzięki diodzie blokującej D pozwala jedynie na rozładowywanie baterii. Do serwisowego trybu pracy bateria przechodzi automatycznie w przypadku wystąpienia opisanych sytuacji. Może być on także wywołany przez użytkownika np. w przypadku transportu baterii, lub czynności związanych z uruchamianiem baterii: opróżniania lub napełniania zasobników elektrolitem. Cykl serwisowy związany z oczyszczaniem membran (self-maintenance cycle) wymaga obecności napięcia z zewnętrznego źródła (przekształtnika) do zasilania modułów PCS i BC i trwa od 0,5 h, w przypadku baterii wcześniej rozładowanej, do nawet 20 h w przypadku gdy bateria musi być rozładowana wewnątrz systemu BMS. Po cyklu serwisowym, przed załączeniem baterii do trybu pracy normalnej, występuje jeszcze krótki cykl pośredni (ok. 15 min.) polegający na modulowanej cyrkulacji elektrolitu pozwalającej na usunięcie z elektrolitu pęcherzyków powietrza (bubble purge). Mając na względzie fakt, że podczas cyklu serwisowego bateria jest odłączona od zacisków zewnętrznych, zauważyć można, że dyspozycyjność baterii ZnBr zależy od odpowiedniej komunikacji BMS z przekształtnikiem. Komunikacja ta umożliwia także przełączenie baterii do trybu uśpienia (Float mode) będącego trybem pośrednim pomiędzy trybem pracy normalnej i trybem pracy serwisowej. W trybie tym przy braku napięcia z zewnętrznego źródła i braku obciążenia blokowana jest praca ciągła pomp cyrkulacyjnych. Są one załączane sporadycznie na bardzo krótki czas co pozwala zredukować zużycie energii wewnątrz baterii. Tryb taki może być wymuszony gdy nie jest planowane wykorzystanie zasobnika przez dłuższy czas. Konsumpcja własna baterii przepływowej ZBM2 wyznaczona w badaniach wyniosła ok. 70 W w trybie pracy normalnej, co oznacza pełne samorozładowanie baterii o pojemności $C_{batt} = 10 \text{ kWh}$ w ciągu 6 dni (średnia intensywność samorozładowania $0,7\% C_{batt} / \text{h}$). W trybie Float mode średnia intensywność samorozładowania jest dziesięciokrotnie mniejsza i wynosi $0,07\% C_{batt} / \text{h}$.

Konfiguracje baterii z akumulatorami przepływowymi

Akumulatory przepływowe podobnie jak i inne rodzaje ogniw umożliwiają łączenie w baterie o konfiguracji łańcuchowej w celu zwiększenia napięcia pracy lub o konfiguracji równoległej w celu zwiększenia wydajności prądowej. O ile w przypadku tej drugiej nie jest wymagana żadna modyfikacja BMS, to połączenie łańcuchowe, ze względu na występowanie cyklu serwisowego wymaga wprowadzenia dodatkowych łączników obejściowych (Q_{Bypass} na rys. 2b) zwierających akumulator w trybie STOP mode. Prowadzi to niestety do obniżenia napięcia całego łańcucha, co w skrajnych przypadkach doprowadzić może do jego wyłączenia. Dodatkowo niekoordynowane występowanie cykli serwisowych poszczególnych akumulatorów tworzących baterię w połączeniu łańcuchowym znacznie zmniejsza dyspozycyjność takiej baterii. Sytuacja taka nie występuje w bateriach o konfiguracji łańcuchowej zbudowanych w oparciu o inne ogniwa elektrochemiczne (kwasowe, litowe). W ich przypadku czynności serwisowe takie jak np. wyrównywanie napięć prowadzone są przez układ BMS baterii bez wyłączania z eksploatacji poszczególnych ogniw. W przypadku baterii o konfiguracji równoległej, w wyniku wywołania trybu serwisowego jednego z akumulatorów

przepływowym, zmniejszeniu ulega jedynie jej wydajność prądowa. Akumulatory przepływowe łączyć można w konfiguracji mieszanej szeregowo-równoległej z tym zastrzeżeniem, że każdy łańcuch powinien być wyposażony w oddzielny przekształtnik DC/DC.

Model zastępczy baterii przepływowej ZnBr

Ocenę właściwości energetycznych akumulatorów w technologii przepływowej przeprowadzono na podstawie badań jakim poddano jeden z niewielu dostępnych komercyjnie akumulatorów o parametrach charakterystycznych dla mikroinstalacji prosumenckich (pojemność do 10 kWh). Parametry charakterystyczne akumulatora Redflow ZBM2 zawierającego 2 równoległe stopy po 30 ogniw zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry baterii przepływowej ZBM2.

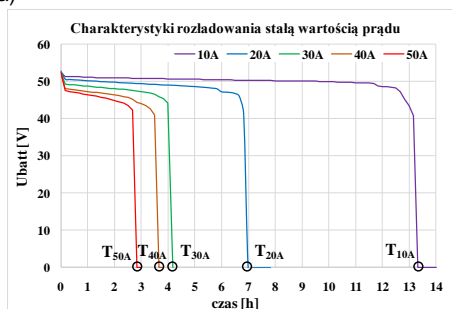
Parametr	Wartość	
Napięcie znamionowe	48 V	
Pojemność znamionowa C_{batt}	10 kWh (208Ah)	
Sprawność magazynowania energii	do 80%	
Moc znamionowa	Ładowanie	2,5 kW; 0,25C
	Rozładowanie	3 kW (5 kWp); 0,33C (0,5C)
Żywotność gwarantowana	2000 cykli (100% DOD)	
Masa i wymiary zewnętrzne (szer x wys x gł)	240 kg; 400 x 400 x 800 mm	

Baterię poddano cyklicznemu ładowaniu i rozładowywaniu prądami o wartościach od 10 do 50 A (0,05C do 0,25C). Zestawione charakterystyki czasowe napięcia i prądu baterii przedstawiono na rys.3a

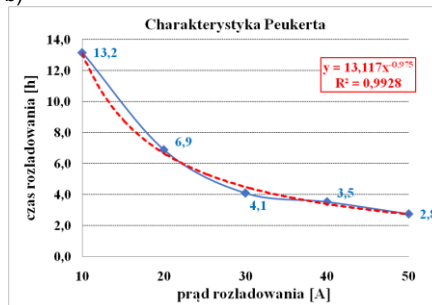
Zmiana pojemności baterii - współczynnik Peukerta

W bateriach elektrochemicznych występuje zjawisko zmniejszenia pojemności przy wysokich wartościach prądów ładowania/rozładowania nazywane zjawiskiem Peukerta.

a)



b)



Rys. 3. Charakterystyki rozładowania akumulatora przepływowego: a) napięcia akumulatora przy prądach rozładowania o stałej wartości 10 – 50A; b) charakterystyka Peukerta.

Zjawisko to jest szczególnie widoczne w akumulatorach kwasowych z elektrolitem ciekłym typu FLA (Flooded Lead Acid), trochę mniej w akumulatorach kwasowych typu VRLA i prawie niewidoczne w akumulatorach litowych [5]. Wartość współczynnika Peukert'a k , wyznaczona z zależności (1), w odróżnieniu od akumulatorów kwasowych ($k = 1,1 \div 1,6$) i litowych ($k = 1,02 \div 1,1$) przyjmuje wartości mniejsze od jeden (średnia wartość $k = 0,98$).

IX Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

$$(1) \quad k = \frac{\log T_2 - \log T_1}{\log I_1 - \log I_2}$$

gdzie: T_1, T_2 – czasy rozładowania przy prądzie o wartości odpowiednio I_1 oraz I_2 .

Oznacza to, że akumulator przepływowy wykazuje mniejsze straty dodatkowe (osiąga wyższe sprawności magazynowania) przy wyższych wartościach prądu ładowania/rozładowania. Spowodowane jest stratami mocy na pracę pomp obiegowych, które mają wartość niezależną od prądu ładowania/rozładowania i przy małych prądach ładowania/rozładowania są większe od strat omicznych na rezystancji wewnętrznej R_w akumulatora. Współczynnik Peukerta pozwala na korektę estymacji przewidywanego czasu pracy baterii uwzględniającą przede wszystkim aktualną wartość prądu rozładowania. Czas ten można także określić pośrednio z charakterystyki Peukerta pokazanej na rys.3b lub obliczyć ze wzoru gdzie zmienna x jest wartością prądu

Rezystancja wewnętrzna akumulatora przepływowego

Rezystancja wewnętrzna została wyznaczona na podstawie wyników testu dynamicznego rozładowania prądem impulsowym o wartościach $10 \div 50$ A. Rezystancja wewnętrzna R_w wyznaczona z zależności (2) wykazuje niewielki trend spadkowy przy wzroście wartości prądu rozładowania ($R_w = 0,12 \Omega$ dla 10 A i $R_w = 0,094 \Omega$ dla 50 A).

$$(2) \quad R_w = \frac{\Delta U_{batt}}{\Delta I_{batt}}$$

gdzie: ΔU_{batt} – oznacza spadek napięcia wywołany skokową zmianą prądu rozładowania ΔI_{batt} .

Wartość średnia rezystancji wewnętrznej w rozpatrywanym zakresie prądów obciążenia wyniosła $R_w = 0,103 \Omega$.

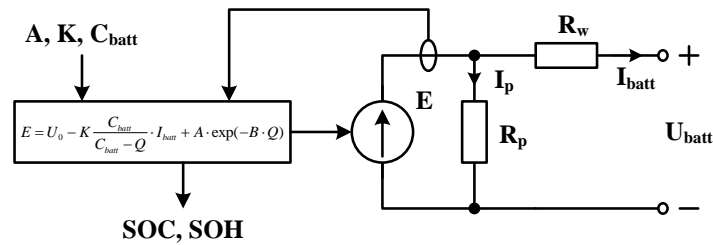
Równanie Shepherd'a akumulatora przepływowego

Najczęściej stosowanym modelem matematycznym baterii elektrochemicznych jest model oparty na równaniu Shepherd'a (3) definiującym aktualną wartość napięcia otwartego obwodu [6, 7]. Zmodyfikowaną wersję tego równania uwzględniającą starty generowane przez pompy cyrkulacyjne przedstawia zależność (3):

$$(3) \quad E = U_0 - K \frac{C_{batt}}{C_{batt} - Q} \cdot (I_{batt} - I_p) + A \cdot \exp(-B \cdot Q)$$

gdzie: U_{oc} – napięcie otwartego obwodu w aktualnym stanie naładowania akumulatora [V]; U_0 – stała napięciowa baterii [V], Q – aktualny stan rozładowania [Ah]; A, B, K – współczynniki równania Shepherd'a.

Poszczególne elementy równania Shepherd'a wyznacza się z charakterystyki rozładowania akumulatora wybraną wartością prądu, w przypadku badanego akumulatora ZBM2 była to wartość 0,05C. W zaproponowanym na rys. modelu zastępczym uwzględniono także stratę energii na pracę pomp cyrkulacyjnych elektrolitu. Na podstawie badań stwierdzono, że strata ta, w normalnym trybie pracy akumulatora, jest stała i ma wartość ok. 72 W. Odpowiada to wartości prądu $I_p = 1,5$ A (przy znamionowej wartości napięcia na zaciskach akumulatora $U_{batt,n} = 48$ V). W obliczeniach uwzględniono także maksymalną, dostępną w pracy cyklicznej wartość pojemności, która wynosi $Q_{max} = 80\% C_{batt}$ i wynika ze sprawności akumulatora.



Rys.4. Schemat uogólniony modelu zastępczego baterii przepływowej.

Wartości odczytane z charakterystyki rozładowania: pojemność przy napięciu nominalnym $Q_n = 157$ Ah; pojemność w strefie ekspotencjalnej $Q_{exp} = 0,001$; napięcie w stanie pełnego naładowania $U_{batt_full} = 52,45$ V; napięcie na końcu strefy ekspotencjalnej $U_{exp} = 51,25$ V. Do wyznaczenia pozostałych wielkości korzysta się przy tym z zależności:

- aktualny stan rozładowania (z uwzględnieniem pracy pomp):

$$(4) \quad Q = \int_0^t (I_{batt} - I_p) \cdot dt$$

- stan naładowania – State of Charge (SOC):

$$(5) \quad SOC(t) = \frac{C_{batt} - \int_0^t (I_{batt} - I_p) \cdot dt}{C_{batt}}$$

- spadek napięcia w strefie ekspotencjalnej:

$$(6) \quad A = U_{batt_full} - U_{exp}$$

- stan rozładowania na końcu strefy ekspotencjalnej (po trzech stałych czasowych):

$$(7) \quad B = \frac{3}{Q_{exp}}$$

- napięcie polaryzacji K:

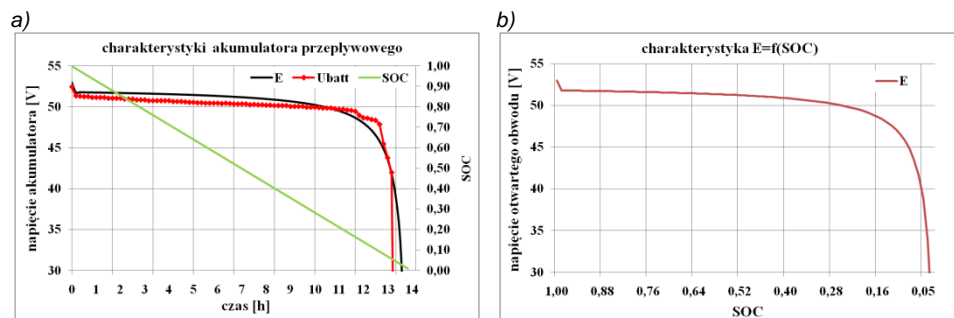
$$(8) \quad K = \frac{(U_{batt_full} - U_n + A \cdot e^{(-B \cdot Q_n)^{-1}}) \cdot (Q_{max} - Q_n)}{Q_n}$$

- stała napięciowa U_0 :

$$(9) \quad U_0 = U_{batt_full} + K + R_w \cdot I_{batt} - A$$

Wyznaczone na podstawie powyższych równań wartości współczynników występujących w zależności (3) stanowiącej de facto model matematyczny akumulatora przepływowego wynoszą odpowiednio: $A = 1,2$; $B = 900$; $K = 0,0621$; $U_0 = 52,41$. Modele matematyczne baterii są wykorzystywane w układach nadzoru baterii do określania aktualnego stanu naładowania jak również predykcji czasu rozładowania baterii [8].

IX Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 5. Charakterystyki rozładowania akumulatora przepływowego: a) charakterystyka napięcia E otwartego obwodu wyznaczona ze zmodyfikowanego równania Shepherd'a oraz charakterystyka napięcia U_{batt} baterii zmierzona przy prądzie rozładowania $I_{batt}=10A$; b) charakterystyka napięcia otwartego obwodu w funkcji stanu naładowania akumulatora.

Model powinien jak najdokładniej odzwierciedlać rzeczywistą charakterystykę napięcia E otwartego obwodu baterii tak aby można było np. uniknąć zbędnego jej wyłączenia przez zabezpieczenia nad- i podnapięciowe BMS, co prowadzi zwykle do nieoptymalnego wykorzystania pojemności zasobnika zwłaszcza w układach o połączeniu łańcuchowym bez układów wyrównywania napięć. Z tego względu sterowanie w tych układach prowadzi się na podstawie wartości estymowanej E (charakterystyka $E = f(SOC)$ na rys.5b), a nie wartości U_{batt} zmierzonej na zaciskach akumulatora. Jak można zauważyć na rys.5a charakterystyki wyznaczone na podstawie zaproponowanego zmodyfikowanego równania Shepherd'a wykazują dużą zbieżność z charakterystyką rzeczywistą baterii.

Podsumowanie

Akumulatory przepływowe jako nowa technologia, ze względu na niski koszt magazynowania energii jak również dobre właściwości dynamiczne parametry (rozładowanie prądem 0,5C) stanowią dobrą alternatywę dla stosowanych obecnie i dojrzałych rynkowo akumulatorów w technologiach kwasowych i litowych. Trzeba natomiast mieć świadomość specyficznych wymagań eksploatacyjnych, co w przypadku systemów małoskalowych takich jak systemy prosumenckie stanowi może barierę w ich rozpowszechnieniu. Akumulatory przepływowe charakteryzują się wysokim współczynnikiem samorozładowania (ok. 0,7% / h) związanym z występowaniem stałych strat energii generowanych przez pompy cyrkulacyjne elektrolitu dlatego nie zaleca się ich stosowania w systemach gwarantowanego zasilania. Trzeba mieć także świadomość ograniczeń związanych z ich łączeniem w rozległe baterie o konfiguracji łańcuchowej lub mieszanej. Niezaprzeczną zaletą baterii przepływowych jest możliwość długotrwałego pozostawania w stanie pełnego rozładowania bez uszczerbku na żywotności, co w przypadku akumulatorów kwasowych i litowych prowadzi do ich szybkiej degradacji. Do opisu charakterystyk ładowania baterii przepływowej wykorzystać można te same metody co do innych technologii elektrochemicznych ze stojącym elektrolitem, z tym zastrzeżeniem, że wymagają one pewnej korekty. Zaproponowana modyfikacja metody Shepherd'a pozwala na estymację napięcia baterii z zadowalającą dokładnością, choć autorzy zakładają dalsze prace nad jej poprawą. W przypadku baterii przepływowej, bardziej niż w przypadku innych akumulatorów elektrochemicznych wskazana jest

komunikacja pomiędzy przekształtnikiem sprzęgającym baterię z resztą systemu a systemem BMS baterii.

Podziękowania

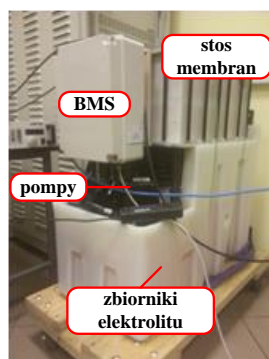
Badania wykonane w ramach projektu badawczego GEKON o akronimie REWIPROMIEN finansowanego ze środków NCBiR i NFOŚiGW na podstawie umowy nr GEKON1/02/213877/31/2015

Literatura

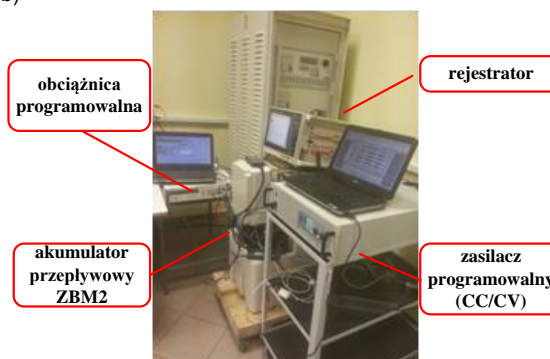
1. Marcin Jarnut, Grzegorz Benysek, *Mikroinstalacje OZE w systemie dystrybucyjnym nN*, Innowacyjne materiały i technologie w elektrotechnice : innowacje kierunkiem rozwoju elektrotechniki XXI w. - i-MITEL 2014 [Dokument elektroniczny] : VIII konferencja naukowo-techniczna. Lubniewice, Polska, 2014
2. Siraj Sabihuddin, Aristides E. Kiprakis and Markus Mueller, *A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies*, *Energies*, 2015, 8, 172-216
3. Petra de Boer, Jillis Raadschelders, *Flow batteries*, KEMA, June 2007, dostępne na: <http://www.leonardo-energy.org>
4. Redflow Limited, *ZBM2 - Installation and operational manual*, Redflow, Australia, 2015
5. Dennis Doerffel, Suleiman Abu Sharkh, *A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries*, *Journal of Power Sources*, Volume 155, Issue 2, 21 April 2006, pages 395–400.
6. Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications*, *World Electric Vehicle Journal* Vol. 3, 2009, pages 289–298
7. S.M. Mousavi G. M. Nikdel, *Various battery models for various simulation studies and applications*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 2014, 477–485
8. Yong Tian, Bizhong Xia, Mingwang Wang, Wei Sun, Zhihui Xu, *Comparison Study on Two Model-Based Adaptive Algorithms for SOC Estimation of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*, *Energies* 2014, 7, 8446-8464

Dodatek

a)



b)



Rys. 6. a) Badany akumulator przepływowy ZBM2; b) widok stanowiska pomiarowego.

Autorzy: dr inż. Marcin Jarnut, prof. dr hab. inż. Grzegorz Benysek, dr inż. Jacek Kaniewski, mgr inż. Szymon Wermiński, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: m.jarnut@iee.uz.zgora.pl, g.benysek@iee.uz.zgora.pl, j.kaniewski@iee.uz.zgora.pl, s.werminski@iee.uz.zgora.pl