

Rafał SETLAK
Politechnika Śląska, Gliwice

ALGORYTM DOBORU POJEMNOŚCI AKUMULATORÓW DO STACJONARNYCH ZASOBNIKÓW ENERGII

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozwiązanie problemu doboru pojemności stacjonarnych zasobników energii w systemach zasilania potrzeb własnych SZPW. Rozwiązanie- nowy algorytm został wdrożony w przedsiębiorstwie, w którym do tej pory stosowano uproszczone metody doboru pojemności zasobników wykorzystujące jedynie informacje o napięciu znamionowym, czasie trwania wyładowania, prądzie obciążenia ciągłego i doraźnego. Nowy algorytm wykorzystuje dodatkowo funkcje: pojemności od temperatury, pojemności od prądu wyładowania, żywotności od głębokości wyładowania. Algorytm oblicza też wskaźnik LCOE (ang. levelized cost of electricity). Porównanie starej metody doboru pojemności z nowym algorytmem pokazało, że dla tych samych danych wejściowych tradycyjna metoda przeszacowywała pojemność zasobnika energii.

Słowa kluczowe: akumulator, pojemność akumulatora, stacjonarny zasobnik energii, LCOE

BATTERY CAPACITY SELECTING ALGORITHM FOR STATIONARY ENERGY STORAGE SYSTEM

Summary: The article presents a problem solution of selecting the capacity of batteries for stationary energy storage in the own needs supply systems (SZPW). The new algorithm has been implemented in a company that uses simplified methods of capacity selection, which used only: rated voltage, discharge time, continuous load current, immediate load current. The new algorithm additionally uses functions: capacity from temperature, capacity from discharge current, lifetime from discharge depth. The algorithm also calculates the LCOE index. Comparison of the old method of capacity selection with the new algorithm saved in the form of a calculation program showed that for the same input data for calculations, the traditional method overestimated the capacity of the energy storage system. This resulted in increased investment costs.

Keywords: battery, battery capacity, stationary energy storage, LCOE

1. WSTĘP

W obiektach przemysłowych często stosuje się systemy zasilania, które podczas przerw w dostawach energii elektrycznej pełnią rolę źródeł energii dla wytypowanych obwodów z

odbiornikami. W zakładach przemysłowych szczególnie ważne jest nieprzerwane zasilanie wielu odbiorników ważnych z punktu widzenia bezpieczeństwa i ciągłości procesów np. układów zabezpieczeń i nadzoru, układów napędowych aparatury rozdzielczej, układów wentylacji czy oświetlenia awaryjnego. Wymienione elementy tworzą tzw. układy potrzeb własnych. Do ich zasilania służą systemy nazywane systemami zasilania potrzeb własnych SZPW, które podczas bezawaryjnej pracy zasilają odbiorniki. Zasilanie jest realizowane zazwyczaj za pomocą przekształtników AC/DC (także równolegle połączonych). Równolegle do wyjść prostowników dołącza się równolegle zasobniki stacjonarne energii [2]. Nadal do takich baterii najchętniej stosuje się akumulatory kwasowo-ołowiowe co wynika z ich niskiego kosztu zakupu, stosunkowo dużej niewrażliwości na błędy w użytkowaniu, znajomości ich technologii i bezpieczeństwa obsługi. Wadami akumulatorów kwasowo ołowiowych są: niska sprawność cykliczna (dla SZPW około 70, niska gęstość mocy (ok. 70 W/kg), niska trwałość cykliczna (dla pełnych cykli może być poniżej 500cykli), długi czasy ładowania, wrażliwość na warunki środowiskowe.

W SZPW i układach zasilania rezerwowego mogą znajdować się zarówno odbiorniki prądu stałego jak i prądu przemiennego a napięcia zasilania DC wynoszą zazwyczaj: 24V, 48V, 110V, 220V lub w przypadku napięcia zmiennego: 230V.

2. GENEZA POWSTANIA ALGORYTMU

Firmy oferujące usługi doboru pojemności i typów stacjonarnych zasobników energii do układów SZPW w swoich obliczeniach stosują jedynie podstawowe zależności opisujące związki pomiędzy napięciem, prądem pobieranym przez odbiornik (do tego zakłada się, że prąd nie zmienia wartości podczas wyładowania-co jest bardzo dużym uproszczeniem, które znacznie przeszacowuje pojemność zasobnika oraz podwyższa koszt inwestycyjny oraz obniża zyski z inwestycji), czasem wyładowania a wynikającą z nich pojemnością zasobnika energii [3]. Pomijane są jednak ważne aspekty takie jak:

- wpływ temperatury na pojemność rzeczywistą w otoczeniu pracującej baterii akumulatorów (np. w szafie, w której są zamontowane),
- różne technologie wykonania elektrod, separatorów i formy wiązania elektrolitu,
- wpływ głębokości wyładowania w danym cyklu pracy na żywotność cykliczną,
- aspekty ekonomiczne: koszt magazynowanej energii w zależności od trybu pracy

Mając na uwadze te aspekty, zachodzi potrzeba opracowania algorytmu doboru pojemności stacjonarnego zasobnika energii, który to algorytm mógłby być wykorzystywany przez dedykowany program komputerowy i umożliwiłby wielokryterialny dobór pojemności

magazynów energii w Systemach Zasilania Potrzeb Własnych o napięciu 110 DC oraz 220 V DC. Założeniem było, aby opracowany algorytm uwzględniał:

- rodzaj źródła, typ oraz ilość ogniw/akumulatorów,
- zmienny profil zapotrzebowania na energię elektryczną,
- temperatury występujące w miejscu zabudowy,
- koszt inwestycji i eksploatacji, spodziewany czas pracy,
- aspekty ochrony środowiska.

3. DANE WEJŚCIOWE ALGORYTMU

W dotychczasowym podejściu doboru pojemności zasobnika energii danymi wejściowymi do obliczeń były [3]:

- a) wybór napięcia znamionowego $U_n = 110$ DC lub 220 V DC,
- b) wymagany czas pracy z baterii akumulatorów (np. $h=120$ min),
- c) współczynnik starzenia (np. $k_b=1,15$).

Tok obliczeń był następujący:

- a) Obliczenie prądu obciążenia ciągłego baterii I_{on} na podstawie bilansu mocy odbiorników P_{on}

$$C_{120min} = k_b h (I_{on} + I_{od}) \quad (1)$$

- b) Obliczenie prądu obciążenia doraźnego baterii w stanach awaryjnych I_{od} na podstawie bilansu mocy odbiorników P_{od}

$$I_{od} = \frac{P_{od}}{U_n} \quad (2)$$

- c) Obliczenie pojemności baterii C_{120min} w czasie h

$$C_{120min} = k_b h (I_{on} + I_{od}) \quad (3)$$

Tak prowadzone obliczenia, w których nie uwzględnia się szeregu zjawisk zmiany pojemności zasobnika energii powodują przeszacowanie pojemności zasobnika, podwyższają koszt inwestycyjny oraz redukują zyski z inwestycji.

4. ALGORYTM DOBORU POJEMNOŚCI AKUMULATORÓW DO ZASOBNIKÓW STACJONARNYCH

Aby projektant mógł poprawnie dobrać pojemność zasobnika energii dla SZPW w opracowanym algorytmie uwzględniono dodatkowe zależności:

- a) wpływu temperatury otoczenia na pojemność rzeczywistą,
- b) wpływu wartości prądu wyładowania na dostępną pojemność rzeczywistą,

- c) wpływu przedziału dopuszczalnych głębokości wyładowań (DoD) na ilość zmagazynowanej energii przy danym DoD w całym cyklu życia (LC) aż do chwili gdy $C_{rzecz}=0,8C_n$ (co jest informacją dla służb technicznych, że akumulator należy wymienić lub poddać reenergetyzacji),
- d) wpływu głębokości wyładowania (DoD) w zadanym cyklu pracy na żywotność cykliczną (liczbę cykli LC, po których np.: $C_{rzecz}=0,85C_n$),
- e) kosztu magazynowanej energii w zależności od trybu pracy (wartości prądu wyładowania oraz czasu wyładowania)-współczynnik LCOE (levelized cost of electricity).

Dodatkowo założono, że projektant powinien mieć możliwość wykonywania obliczeń dla różnych technologii wykonania elektrod, separatorów i form wiązania elektrolitu (np. OPZV, OPZS, SLA AGM, SLA GEL wg [7]).

W opracowanym algorytmie danymi wejściowymi, które projektant ma możliwość zadawania są:

- a) spodziewany prąd ciągły wyładowania I_{on} (podawany na podstawie pomiarów),
- b) spodziewany prąd doraźny wyładowania I_{od} (podawany na podstawie pomiarów),
- c) spodziewany czas wyładowania h , np.: 120 min (podawany na podstawie pomiarów lub przyjmowany wg wymagań danego zakładu pracy),
- d) liczba załączeń doraźnego prądu wyładowania (na podstawie obserwacji),
- e) czas t_d załączenia doraźnego prądu wyładowania (na podstawie obserwacji),
- f) cena rynkowa akumulatora/ogniwa (np. jako wartość uśredniona dla kilku producentów wykonania w danej technologii lub cena wytypowanego typu zasobnika danego producenta) o obliczonej pojemności

Ponadto założono, że projektant powinien mieć możliwość zmiany i wprowadzania własnych danych (np. zamiast danych predefiniowanych lub dodania własnych charakterystyk):

- a) względna pojemność użyteczna w funkcji względnego prądu wyładowania [4], [5], [6]- przykładowy przebieg funkcji pokazano na rysunku 1,
- b) liczba cykli wyładowania w funkcji DoD - przykładowe dane zastosowane w algorytmie pokazano w tabeli 1,
- c) pojemność użyteczna w funkcji temperatury otoczenia [1]- przykładowe dane zastosowane w algorytmie pokazano w tabeli 2,
- d) zakres DoD akumulatora, dla którego uzyskuje się największą żywotność cykliczną- przykładowe dane zastosowane w algorytmie pokazano w tabeli 3.

Ważnym wynikiem dla projektanta jest współczynnik LCOE (levelized cost of electricity), który algorytm oblicza z zależności:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{W_t + K_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4)$$

gdzie:

W_t - Koszt inwestycji w roku t ,

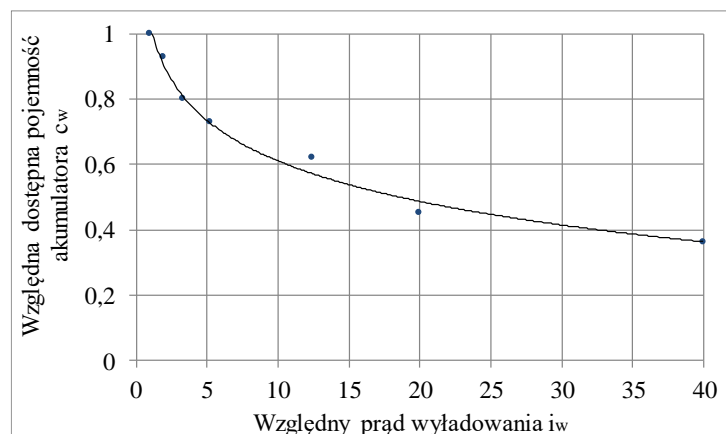
K_t - Koszt konserwacji i serwisu w roku t ,

F_t - Koszt energii pobranej z sieci w roku t ,

r - Roczna efektywna stopa dyskontowa

E_t - Ilość energii zmagazynowanej i oddanej w cyklach w roku t ,

n - resurs zasobnika



Rys.1. Względna pojemność użyteczna w funkcji względnego prądu wyładowania (dane własne)

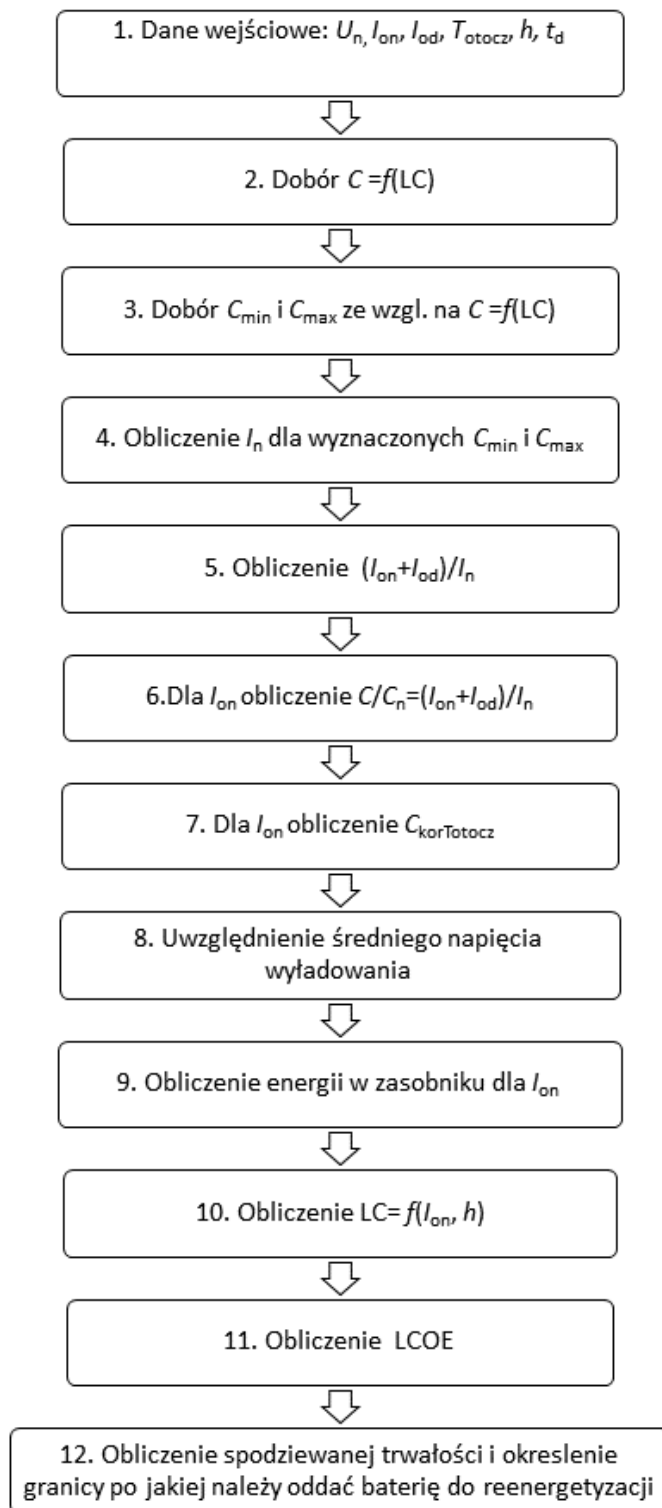
Fig.1. Relative useful capacity in function of the relative discharge current (own data)

Dane akumulatorów, które wykorzystano do opracowania charakterystyk, na podstawie których wyznaczono zależności pokazane w tabelach 1, 2, 3 oparto na dokumentacjach producentów akumulatorów i ogniw, m.in.: Trojan GEL/AGM, RITAR OPzV/OPzS, Hoppecke OPzV, Europower OPzV [7]. Aby opracować zależności reprezentatywne dla danej technologii brano pod uwagę charakterystyki akumulatorów w zakresie pojemności od 50Ah do 3000Ah.

Tabela 1.

Uśredniona $LC = f(\text{DoD})$ dla dwóch wybranych technologii OPZV i SLA GEL

Głębokość wyładowania DoD	Ilość cykli dla akumulatora w technologii OPZV	Ilość cykli dla akumulatora w technologii SLA GEL
0,2	5900	4150
0,3	4700	2800
0,4	3350	2200
0,5	2600	1700
0,6	1950	1450
0,7	1700	1250
0,7	1450	970



Rys.2. Algorytm doboru pojemności akumulatorów do stacjonarnych zasobników energii
Fig.2. The algorithm for selecting the battery capacity for stationary energy storage

Tabela 2.

Procentowa pojemność użyteczna wybranej populacji akumulatorów (dla wybranych dwóch wartości prądu I_n oraz $4I_n$) w funkcji temperatury otoczenia

Temperatura otoczenia $T_{otocz}, ^\circ\text{C}$	Procentowa pojemność użyteczna dla I_n , %	Procentowa pojemność użyteczna dla $4I_n$, %
-20	62	42
0	85	65
5	90	70
10	94	74
20	100	80
30	105	85
40	107	87

Tabela 3.

Przykładowy zakres DoD akumulatora, dla którego uzyskuje się największą żywotność cykliczną wybranej populacji akumulatorów

Oznaczenie technologii akumulatora	Minimalna wartość DoD	Maksymalna wartość DoD
OPzV	0,7	0,4
OPzS	0,65	0,45
SLA AGM	0,5	0,3
SLA GEL	0,7	0,4

Graficzną postać opracowanego algorytmu doboru pojemności akumulatorów do stacjonarnych zasobników energii pokazano na rysunku 2.

5. WERYFIKACJA DZIAŁANIA ALGORYTMU DOBORU POJEMNOŚCI AKUMULATORÓW DO ZASOBNIKÓW STACJONARNYCH

Aby zweryfikować działanie algorytmu (wg rys. 2) porównano wyniki obliczeń metodą tradycyjną (wg wzorów 1, 2, 3) oraz wyniki uzyskane z opracowanego programu zawierającego algorytm. W obu przypadkach zastosowano dane wejściowe:

- d) napięcie znamionowe $U_n = 220 \text{ V DC}$,
- e) wymagany czas pracy z baterii akumulatorów $h = 120 \text{ min}$,
- d) współczynnik starzenia $k_b = 1,15$,
- e) prąd obciążenia ciągłego baterii $I_{on} = 8 \text{ A}$,
- f) prąd obciążenia doraźnego baterii w stanach awaryjnych $I_{od} = 27,3 \text{ A}$.

W wyniku obliczeń metodą tradycyjną (wg wzorów 1, 2, 3) obliczono wymaganą pojemność dla celów zasilania obwodów 220V DC w czasie 2 godzin wyładowania na poziomie 80Ah i dobrano ostatecznie pojemność 150Ah.

Wyniki obliczeń za pomocą opracowanego algorytmu zaprezentowano w tabeli 4 oraz na rysunku 3.

Tabela 4.

Obliczona za pomocą algorytmu pojemność dla celów zasilania obwodów 220V DC w czasie 2 godzin wyładowania

Oznaczenie technologii akumulatora	Minimalna pojemność C, Ah	Maksymalna pojemność C, Ah
OPzV	51	71
OPzS	51	72
SLA AGM	50	70
SLA GEL	62	85

Podaj orientacyjną cenę akumulatora/ogniwa w danej technologii wykonania		Obliczony koszt jednostkowy (na ogniwo/akumulator) zgromadzonej energii w cyklu życia dla pojemności		
Cena za ogniwo/akumulator		Minimalnej	Optymalnej	Maksymalnej
Śr. cena technologii	1500 zł	1,64 zł/kWh	1,44 zł/kWh	1,14 zł/kWh
Dla OPzV	1700 zł	2,66 zł/kWh	2,33 zł/kWh	1,57 zł/kWh
Dla OPzS	1600 zł	3,30 zł/kWh	2,14 zł/kWh	1,68 zł/kWh
Dla SLA GEL	1234 zł	2,98 zł/kWh	2,69 zł/kWh	1,81 zł/kWh
Dla SLA AGM	1000 zł	2,98 zł/kWh	2,25 zł/kWh	1,78 zł/kWh

Spodziewana trwałość				
Maksymalna liczba cykli nie więcej niż		Bateria powinna być oddana do reenergetyzacji po uzyskaniu w testach pojemności wartości		
Obl. wartość referencyjna		Minimalna	Optymalna	Maksymalna
Dla OPzV	1985	44,60 Ah	49,75 Ah	68,50 Ah
Dla OPzS	2190	40,75 Ah	44,60 Ah	57,08 Ah
Dla SLA GEL	1246	40,75 Ah	49,75 Ah	57,08 Ah
Dla SLA AGM	1416	40,75 Ah	44,60 Ah	57,08 Ah

Rys.3. Widok okna programu z wynikami doboru pojemności akumulatorów – wyznaczenie trwałości
Fig.3. Program window view with results of battery capacity calculations- durability

6. WNIOSKI

Opisywany algorytm powstał na zlecenie firmy zajmującej się doбором pojemności stacjonarnych zasobników energii. Aby poprawnie dobrać (pod względem energetyczno-ekonomicznym) pojemność zasobnika energii dla SZPW w opracowanym algorytmie uwzględniono zależności, które do tej pory nie były brane pod uwagę, np.:

- wpływ temperatury (np. w szafie) na pojemność rzeczywistą,
- wpływ wartości prądu wyładowania na dostępną pojemność rzeczywistą,
- wpływ DoD na ilość zmagazynowanej energii w całym cyklu życia (LC),
- koszt magazynowanej energii w zależności od trybu pracy
- możliwość obliczeń dla różnych technologii akumulatorów i ogniw, np. OPzV, OPzS, SLA AGM, SLA GEL.

Porównanie wyników metody tradycyjnej i wg algorytmu pokazały, że można dobierać niższe pojemności zasobników (dla wskazanych danych uzyskano: 50Ah do 72 Ah wobec 80Ah dla metody tradycyjnej) co zwiększy opłacalność inwestycji. Opracowany algorytm daje projektantowi także o wiele większe możliwości obliczeniowe, np. przez zadawanie znanych charakterystyk wskazanego przez klientów producenta. Program został wdrożony do działalności gospodarczej.

BIBLIOGRAFIA

1. Czerwiński A.: Akumulatory, baterie, ogniwa. WKŁ, Warszawa 2005
2. Dmowski A., Biczek P., Dzik T.: Systemy zasilania potrzeb własnych elektroenergetyki z ogniwami paliwowymi, WE, Rok LXXIV 2006 nr 9
3. Materiały techniczne i dokumentacja projektowa przekazana do Umowy WB-216/RE3/2017 między Zamawiającym a Wydziałem Elektrycznym Politechniki Śląskiej
4. Kałuża E., Setlak R.: Wyznaczanie charakterystyk akumulatorów trakcyjnych, XXVI Sešit Katedry Teoretické Elektrotechniky, 2004 Ostrava, str. 42-45
5. Kałuża E., Setlak R., Piksa P.: Wyznaczanie parametrów energetycznych kwasowych ogniwo trakcyjnych stosowanych w lokomotywach dołowych, WE, 12/2005,
6. Setlak R., Wrzesień Ł.: Badania metody okresowej depolaryzacji płyt do ładowania akumulatorów kwasowo-ołowiowych małej pojemności. ELEKTRYKA Zeszyt 4, 2008
7. Katalogi techniczne producentów: TROJAN, HOPPECKE, RITAR, EUROPOWER

Dr inż. Rafał SETLAK

Politechnika Śląska

Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Zakład Maszyn Elektrycznych w Transporcie

Ul. Akademicka 10

44-100 Gliwice

Tel. (32) 237 12 58; rafal.setlak@polsl.pl