

XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa
AKTUALNE PROBLEMY W ELEKTROENERGETYCE APE'15

Jastrzębia Góra, 17–19 czerwca 2015

OPTYMALNY DOBÓR PARAMETRÓW ELEKTROCHEMICZNEGO MAGAZYNU ENERGII

Jarosław KORPIKIEWICZ^{1,2}

1. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk
tel.: 58 349 82 11; fax: 58 341 76 85; e-mail: j.korpikiewicz@ien.gda.pl
2. Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej

Streszczenie: Obecnie coraz częściej sygnalizowana jest możliwość wykorzystania magazynów energii w SEE. Tryb pracy lub sposób wykorzystania został nazwany strategią wykorzystania magazynu. W artykule wybrano jedną z nich – pracę programową. Opisano algorytm sterowania nadrzędnego magazynem dla wybranej strategii. Przedstawiono przykładowe testy algorytmu. Zaprezentowano wyniki symulacji. Inwestor może mieć dylemat, jak dobrać parametry magazynu pracującego w danej strategii. Na podstawie wyników symulacji wyznaczono techniczno – ekonomiczne wskaźniki optymalizacji.

Słowa kluczowe: magazyny energii, optymalizacja, dobór parametrów, smart grid.

1. WSTĘP

1.1. Parametry techniczne i eksploatacyjne magazynów

Problem doboru parametrów magazynu przyłączonego do SEE jest złożony. W celu jego rozwiązania należy określić parametry techniczno-eksploatacyjne magazynu energii, wybrać jego strategię wykorzystania. Dla tej strategii należy opracować algorytm optymalizacyjny, ustalający harmonogram pracy magazynu, określony wartościami mocy ładowania/rozładowania w poszczególnych godzinach. Umożliwia to wykonanie symulacji pracy magazynu. W celu realizacji symulacji przygotowano dane wejściowe – ceny energii elektrycznej (TGE S.A.) za dany okres.

Tablica 1. Definicja podstawowych parametrów technicznych i eksploatacyjnych magazynów energii

Lp.	Nazwa parametru	Opis
1	Pojemność całkowita (nominalna) zasobnika Q_n	Ilość energii możliwej do zgromadzenia w zasobniku, wyrażona w MWh
2	Pojemność użytkowa zasobnika Q_u	Wykorzystywana część pojemności całkowitej zasobnika dla realizacji danej strategii, w MWh. Niekiedy wygodniej operować jest ilorazem Q_u/Q_n .
3	Stopień rozładowania zasobnika energii DOD (ang. Depth of Discharge)	Głębokość stanu rozładowania zasobnika, wyrażony w % pojemności nominalnej (całkowitej). Stopień naładowania zasobnika jest parametrem komplementarnym tj. $SOC = 100\% - DOD$, w%.
4	Sprawność cyklu magazynowania energii η_{cyklu}	Sprawność pełnego cyklu ładowania i rozładowania zasobnika energii zdefiniowana następująco (przyjęto sterowanie mocą z rozdzielczością godzinową): $\eta_{cyklu} = \frac{\text{energia oddana do sieci}}{\text{energia pobrana z sieci}} = \frac{\sum_{g=1}^r P_{rozl,g} \cdot t_g}{\sum_{d=1}^l P_{lad,d} \cdot t_d} \quad (1)$ gdzie: $P_{rozl,g}$ – moc oddawana do sieci [MW] w czasie t_g [h], r – liczba godzin rozładowania, l – liczba godzin ładowania, $P_{lad,d}$ – moc pobierana z sieci [MW] w czasie t_d [h].
5	Charakterystyka czasu życia zasobnika	Maksymalna ilość cykli ładowania / rozładowania zasobnika w całym okresie jego eksploatacji, w zależności od stopnia rozładowania DOD
6	Maksymalna moc ładowania P_{lad}	Maksymalna moc ciągła, którą magazyn można ładować. Wartość mierzona od strony prądu przemiennego, MW
7	Maksymalna moc rozładowania P_{rozl}	Maksymalna moc ciągła, którą magazyn można rozładowywać. Wartość mierzona od strony prądu przemiennego, MW

Powyżej przedstawiono w tabeli 1 definicje parametrów magazynu energii wykorzystywanego w SEE. A parametry techniczne typowe przedstawiono w tabeli 2. Porównując parametry techniczne różnych technologii możemy stwierdzić, że najmniejszą sprawnością i żywotnością cechują się ogniwa kwasowo-ołowiowe. Ogniwa litowo-jonowe oznaczają się dużymi mocami ładowania i rozładowania, co może być przydatne np. do wyrównywania obciążeń oraz arbitrażu. Ogniwa NaS mogą mieć zastosowanie w strategiach, w których głównym parametrem użytkowym jest pojemność.

Żywotność (liczba cykli) ściśle zależy od głębokości rozładowania i technologii magazynu. Wadą elektrochemicznych magazynów energii jest duży spadek ich żywotności przy wzroście wartości głębokości rozładowania. Praca magazynu z mniejszymi głębokościami rozładowania powoduje, że dla celów użytkowych wykorzystana zostaje tylko część całkowitej pojemności magazynu równa wartościowo głębokości rozładowania. Zatem żywotność oraz możliwość pełnego wykorzystania magazynu są cechami wzajemnie sprzecznymi.

Tablica 2. Parametry techniczne magazynów elektrochemicznych

Parametr	NaS	Li-ion	PbAcid
Pojemność MWh	10		
Maksymalna moc ładowania MW	1,4	10	2
Maksymalna moc rozładowania MW	1,4	30	4
Sprawność cyklu %	85	95	75

Aby zbadać możliwości zastosowania magazynów energii w SEE należy zdefiniować sposób pracy (rolę) magazynu określoną jako strategię wykorzystania, opracować algorytm pracy (sterowania) magazynu pracującego w danej strategii oraz przeprowadzić symulację.

1.2. Strategie wykorzystania magazynów w SEE

Strategią nazywamy tryb pracy lub sposób wykorzystania zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych.

Jedną z licznych strategii jest praca programowa. Polega ona na zakupie energii po niższych cenach (ładowanie) i sprzedaży w godzinach o wyższych cenach.

2. ALGORYTM STEROWANIA

W celu realizacji strategii pracy programowej zwanej również arbitrażem opracowano algorytm uwzględniający ograniczenia na pojemność, moc ładowania, moc rozładowania oraz przyjęto typowe wartości parametrów dla ogniwo ołowiowo-kwasowych, litowo-jonowych oraz NaS (tabela 4). Danymi wejściowymi są ceny energii elektrycznej zanotowane na Towarowej Giełdzie Energii S.A. (TGE) na podstawie Rynku Dnia Następnego (RDN) w latach 2009÷2013. Sesje na Rynku Dnia Następnego występują z rozdzielczością godzinową. W algorytmie założono, że znany jest wektor cen na dobę następną – wówczas opracowany zostaje harmonogram tj. wektor mocy magazynu dla poszczególnych godzin następczej doby. Z powyższego wynikają następujące założenia algorytmu:

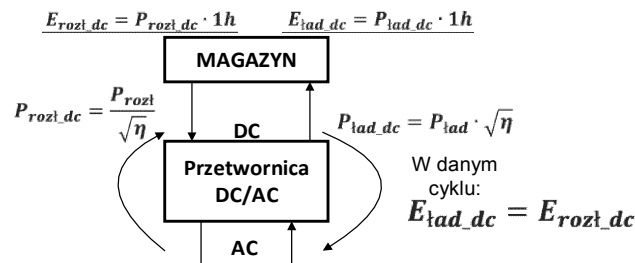
- okres podstawowy optymalizacji – 24 h tzn. bilans energetyczny wyznaczany jest w ciągu jednej doby tj. cała energia zgromadzona musi zostać wykorzystana w ramach tej samej doby.
- dane wejściowe: 24-godzinny wektor cen energii elektrycznej, parametry magazynu,
- optymalizowany jest harmonogram pracy magazynu ze względu na zysk operacyjny.

Względny zysk operacyjny jest określony:

$$zysk_{wz} = \frac{ceny_r(indR) \cdot P_{rozl} - ceny_l(indL) \cdot P_{lad}}{P_{roz} \cdot 1h} \quad (2)$$

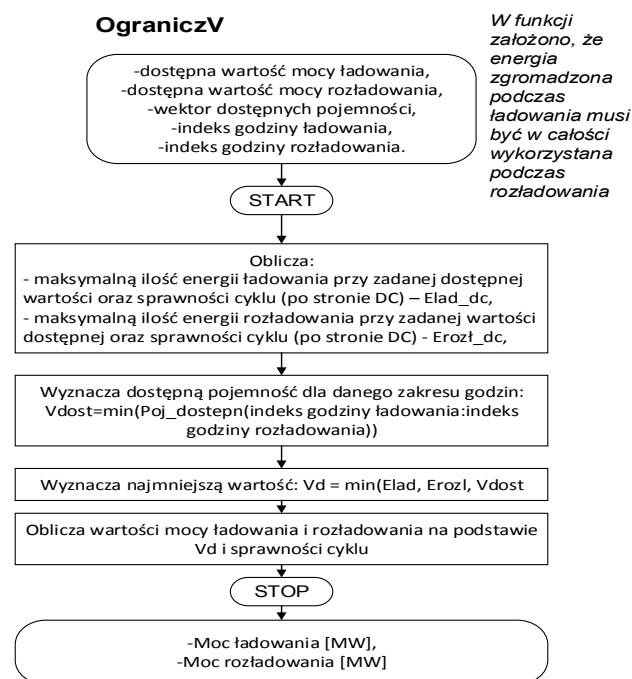
- gdzie: *indR* – nr godziny rozładowania,
indL – nr godziny ładowania,
P_{rozl} – wartość mocy rozładowania wyznaczona przez funkcję *OgraniczV* MW,
P_{lad} – wartość mocy ładowania wyznaczona przez funkcję *OgraniczV* MW,
ceny_r – dobowy wektor cen dla rozładowania,
ceny_l – dobowy wektor cen dla ładowania.

ceny_r i *ceny_l* służą również do kontroli dostępności mocy.



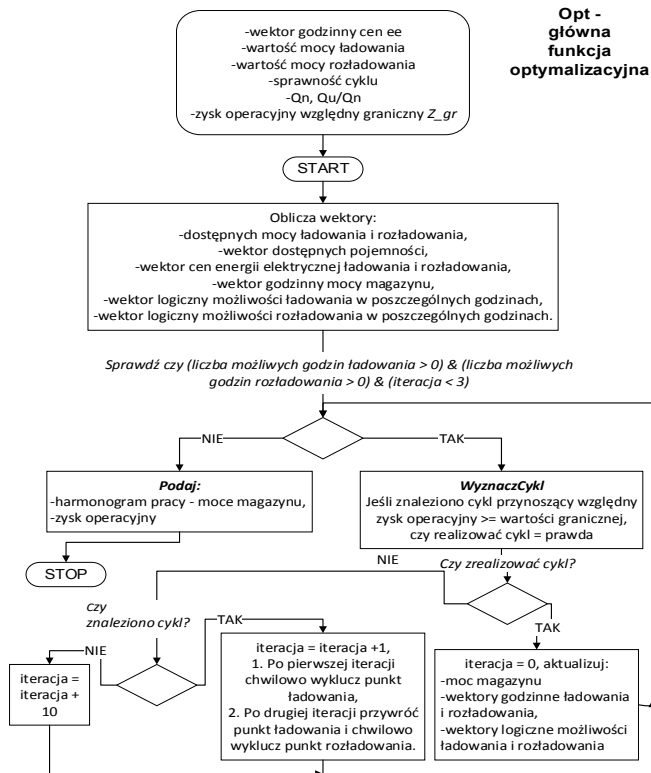
- gdzie:
P_{lad_dc} – wartość mocy ładowania po stronie DC, MW.
P_{rozl_dc} – wartość mocy rozładowania po stronie DC, MW.
 η – sprawność cyklu ładowania i rozładowania, [-].
P_{lad} – wartość mocy czynnej ładowania po stronie AC, MW.
P_{rozl} – wartość mocy czynnej rozładowania po stronie AC, MW.
E_{lad_dc} – energia zgromadzona w magazynie podczas ładowania mocą *P_{lad}* w czasie 1h, MWh; po stronie DC,
E_{rozl_dc} – energia pobrana z magazynu (zmniejszająca stan naładowania) podczas rozładowania z mocą *P_{rozl}* w czasie 1h, MWh; po stronie DC

Rys. 1. Model pracy magazynu dla jednego cyklu (para godzin ładowania i rozładowania)

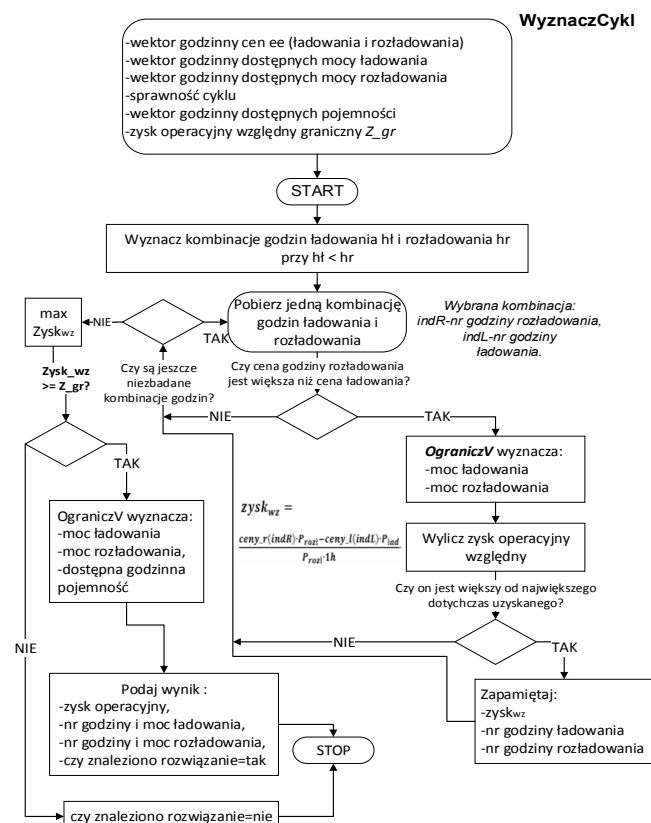


Rys. 2. Algorytm funkcji wyznaczającej moce ładowania i rozładowania cyklu – OgraniczV

Funkcja *Opt* (rys. 3) pobiera 24-godzinny wektor cen, i generuje 24-godzinny wektor mocy magazynu. Zewnętrzna funkcja wywołuje ją iteracyjnie dla każdej doby i zapisuje wyniki. Funkcja *Opt* kontroluje wykorzystanie zasobów (pojemności, mocy ładowania lub rozładowania w danej godzinie) i jeśli są one dostępne wywoływana jest iteracyjnie funkcja *WyznaczCykl* (rys. 4). Służy ona do wyznaczenia najlepszej pary godzin zakupu i sprzedaży oraz ich mocy z uwzględnieniem ograniczeń oraz odnotowania zużycia zasobów. Jeżeli proponowany cykl ma względny zysk operacyjny większy lub równy granicznemu jest on zatwierdzany. W celu wyznaczenia wartości mocy zgodnie z bilansem i ograniczeniami funkcja *WyznaczCykl* wywołuje funkcję *OgraniczV* (rys. 2). Wyznacza ona możliwe moce ładowania i rozładowania z uwzględnieniem ograniczeń parametrów magazynu, dostępnych zasobów i wyżej przedstawionego modelu. Podczas obliczeń bilansowych straty zostały przeniesione do przetwornicy i rozłożone równomiernie pomiędzy ładowanie i rozładowanie. Model ten przedstawiono na rys. 1.



Rys. 3. Struktura głównej funkcji optymalizacyjnej Opt



Rys. 4. Algorytm funkcji wyznaczającej cykl ładowania – rozładowania

3. SYMULACJA

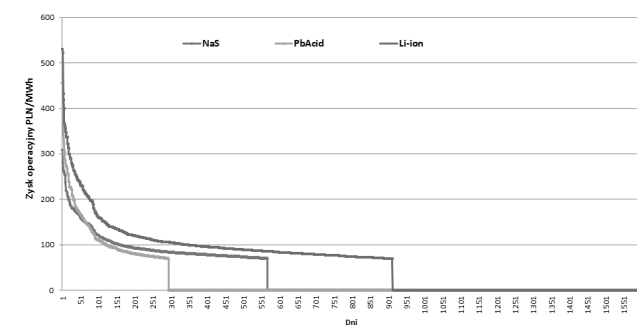
Pierwsza symulacja została wykonana dla względnego zysku granicznego 70 PLN/MWh i pełnym wykorzystaniu pojemności znamionowej. Wyniki tej symulacji zostały przedstawione w tablicach 3, 4 i na rys. 5.

Tablica 3. Symulacja pracy magazynów dla wybranego dnia przy realizacji arbitrażu

Godzina	Cena energii PLN/MWh	NaS		Li-ion		PbAcid	
		P MW	E MWh	P MW	E MWh	P MW	E MWh
0	165,60						
1	155,56						
2	146,64	-1,4	1,29	-0,26	0,25	-2	1,84
3	146,05	-1,4	2,58	-10	10	-2	3,69
4	147,65	-1,4	3,87		10	-2	5,53
5	159,85		3,87		10		5,53
6	210,31		3,87		10		5,53
7	204,22		3,87		10		5,53
8	220,08		3,87		10		5,53
9	229,65		3,87		10		5,53
10	230,26		3,87		10		5,53
11	243,67		3,87		10		5,53
12	246,84		3,87		10		5,53
13	247,56		3,87		10		5,53
14	227,86		3,87		10		5,53
15	210,68		3,87		10		5,53
16	232,29		3,87		10		5,53
17	259,38	1,4	2,35	9,75		4	1,19
18	250,30	1,4	0,84				1,1
19	249,28	0,77					
20	235,66						
21	200,78						
22	209,48						
23	182,24						
Zysk dobowy PLN		289,02		1 029,53		432,17	

Tablica 4 Test algorytmu wyznaczającego harmonogram pracy magazynu

Godzina	Cena energii PLN/MWh	krok 1		krok 2		krok 3		krok 4		krok 5		krok dodat.	
		Pmag MW	P_DC MW	Pmag MW	P_DC MW	Pmag MW	P_DC MW	Pmag MW	P_DC MW	Pmag MW	P_DC MW	suma Pmag	Pmag MW
0	165,60												
1	155,56												-0,74
2	146,64			-0,25	-0,23	-0,23	0,23	-1,15	-1,06	-1,29	1,29		
3	146,05	-1,40	1,29			-1,29	1,52		-1,29	2,58		-1,29	1,29
4	147,65		1,29			1,52		2,58	-0,49	-0,46	3,04	-0,91	-0,84
5	159,85		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
6	210,31		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
7	204,22		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
8	220,08		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
9	229,65		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
10	230,26		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
11	243,67		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
12	246,84		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
13	247,56		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
14	227,86		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
15	210,68		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
16	232,29		1,29			1,52		2,58			3,04		3,87
17	259,38	1,19	1,29		0,21	0,23	1,52		0,98	1,06	1,06	1,52	1,52
18	250,30												1,52
19	249,28								0,42	0,46	1,52		1,52
20	235,66											0,77	0,84
21	200,78											0,84	0,84
22	209,48											0,77	0,63
23	182,24												
Prozł / Plad		0,85		0,85		0,85		0,85		0,85		0,85	0,85
energia sprzedana		1,19		0,21		0,98		0,42		0,77		0,84	0,63
zysk operacyjny PLN		104,19		18,24		76,23		32,17		58,19		41,75	41,75
zysk operacyjny wzgl PLN/MWh		87,56		86,86		77,79		76,59		75,57		66,27	66,27



Rys. 5. Uporządkowany wykres przychodu dla arbitrażu cenowego magazynów

Tablica 5. Wyniki symulacji pracy magazynu względnym zysku operacyjnym granicznym 15 PLN/MWh

Q _u /Q _n %	NaS		Li-ion		PbAcid	
	Zysk op. tys. PLN	Żywotność lata	Zysk op. tys. PLN	Żywotność lata	Zysk op. tys. PLN	Żywotność lata
10	102,3	> 20	138,0	> 20	65,7	> 20
20	197,2	> 20	276,1	> 20	130,6	> 20
30	284,0	> 20	414,1	> 20	193,6	> 20
40	354,9	> 20	552,2	> 20	254,5	15
50	417,1	> 20	690,2	15,2	309,9	12
60	466,3	19,9	828,3	10,2	356,4	10
70	500,7	15,6	966,3	7,6	401,7	8,5
80	524,2	12,6	1 104,3	6,3	439,6	7,4
90	532,5	10,4	1 242,4	5	475,3	6,5
100	536,0	8,8	1 379,3	3,8	499,6	5,9

Tablica 6. Wyniki symulacji pracy magazynu względnym zysku operacyjnym granicznym 70 PLN/MWh

Względny zysk operacyjny graniczny = 70 PLN/MWh, Q _n = 10 MWh						
Q _w /Q _n %	NaS		Li-ion		PbAcid	
	Zysk op. tys. PLN	Żywotność lata	Zysk op. tys. PLN	Żywotno ść lata	Zysk op. tys. PLN	Żywotno ść lata
10	60,7	> 20	99,5	> 20	32,9	> 20
20	112,4	> 20	199,1	> 20	65,5	> 20
30	154,4	> 20	298,6	> 20	97,0	> 20
40	182,7	> 20	398,1	> 20	127,4	> 20
50	204,1	> 20	497,7	> 20	154,4	> 20
60	217,7	> 20	597,2	19	175,6	> 20
70	223,7	> 20	696,7	14,4	196,3	> 20
80	227,4	> 20	796,3	12	214,2	> 20
90	229,3	> 20	895,8	9,6	231,5	> 20
100	230,3	> 20	994,3	7,2	242,9	> 20

Tablica 7. Wyniki symulacji pracy magazynu względnym zysku operacyjnym granicznym 100 PLN/MWh

Względny zysk operacyjny graniczny = 100 PLN/MWh, Q _n = 10 MWh						
Q _w /Q _n %	NaS		Li-ion		PbAcid	
	Zysk op. tys. PLN	Żywotność lata	Zysk op. tys. PLN	Żywotno ść lata	Zysk op. tys. PLN	Żywotno ść lata
10	34,8	> 20	54,4	> 20	22,4	> 20
20	65,0	> 20	108,7	> 20	44,6	> 20
30	90,1	> 20	163,1	> 20	66,4	> 20
40	106,4	> 20	217,4	> 20	87,5	> 20
50	118,9	> 20	271,8	> 20	106,5	> 20
60	126,4	> 20	326,1	> 20	122,4	> 20
70	129,3	> 20	380,5	> 20	138,0	> 20
80	131,3	> 20	434,8	> 20	152,2	> 20
90	132,6	> 20	489,2	> 20	166,0	> 20
100	133,2	> 20	543,1	18,4	175,1	> 20

Druga symulacja odbywała się przy różnych wartościach pojemności użytkowej i stałej pojemności znamionowej oraz różnych wartościach względnym granicznego zysku operacyjnego. Jej wyniki zaprezentowano w tab. 5, 6 i 7.

4. EKONOMICZNE I TECHNICZNE WSKAŹNIKI OPTIMALIZACJI

Na podstawie wyników można zaobserwować, że najważniejszymi parametrami są zysk operacyjny i żywotność. Pozostałe wielkości mają znaczenie drugoplanowe. Zatem wskaźnikami optymalizacji są:

- zysk operacyjny – różnica przychodu ze sprzedaży energii elektrycznej po wyższych cenach a kosztami zakupu energii po cenach niższych. Jest wyliczany na podstawie harmonogramu pracy magazynu i wektora cen energii elektrycznej. Uwzględnia on sprawność cyklu,
- żywotność – okres żywotności.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W pierwszej symulacji dla wybranej doby o niezbyt zróżnicowanych cenach tylko magazyn li-ion był w stanie wykorzystać w pełni swoją pojemność (tab. 3). Jest to spowodowane tym, że magazyny li-ion mają największe wartości względne P_{lad}/Q_n oraz P_{rozl}/Q_n . Zatem w ciągu jednej

(o najniższej cenie) godziny mogą się naładować prawie w pełni i rozładować (o najwyższej cenie). Również zysk dobowy jest największy, co wynika z najlepszej jego sprawności i największej ilości energii.

Ze względu na sprawność magazynu li-ion mogą znaleźć najwięcej dni, w których wypracują zysk operacyjny. Wynika to z tego, że już przy mniejszym zróżnicowaniu cen algorytm znajdzie rozwiązania. Rysunek 5 to uporządkowane malejąco dobowe zyski operacyjne dla całego okresu symulacji. Zatem najwięcej dni pracuje magazyn li-ion, następnie NaS a najmniej PbAcid. To koreluje się z wartościami sprawności cyklu. Jednak względne moce są większe w PbAcid niż NaS dlatego zyski operacyjne również są w tej relacji.

W drugiej symulacji największa wartość zysku operacyjnego jest generowana przez magazyn li-ion, niezależnie od wartości względnego zysku i Q_w/Q_n (tab. 5–7). Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 7 można stwierdzić, że wartość zysku operacyjnego granicznego 100 PLN/MWh jest za wysoka ponieważ w każdej technologii względny czas pracy jest niski tj. $\leq 22\%$. Oznacza to, że przy takiej wartości granicznej algorytm nie był w stanie znaleźć wiele rozwiązań spełniające ograniczenia. Co skutkuje wysoką żywotnością. Względny czas pracy jest zależny od wartości granicznego zysku względnego lecz nie zależy od tego jaką część pojemności znamionowej stanowi pojemność użytkowa. W przypadku wartości granicznej 15 PLN/MWh widać wyraźny wpływ głębokości rozładowania (Q_w/Q_n) na żywotność.

Kryterium głównym jest zysk operacyjny lecz przy zachowaniu żywotności np. wymiana akumulatorów co 5 lat. Jest to typowy problem optymalizacji wielokryterialnej w sensie Pareto. Do tego celu można użyć algorytmów ewolucyjnych z niszowaniem[1]. Po otrzymaniu frontu Pareto należy wybrać jedno rozwiązanie wykorzystując dowolną metodę lub kryterium np. maksymalizacji zysku operacyjnego. Kolejnym etapem prac będzie zbadanie możliwości efektywnego zastosowania algorytmów ewolucyjnych do optymalizacji zysku operacyjnego i żywotności za pomocą zysku względnego granicznego, Q_w/Q_n oraz rodzaju technologii.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Białaszewski T.: Wielokryterialna optymalizacja parametryczna z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych. Pomorskie Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Gdańsk 2007.

THE OPTIMAL CHOICE OF PARAMETERS OF THE ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE

Currently, the possibilities of using energy storage in power system are indicated more often. The mode or method of use the energy storage determines its operation strategy. This paper concerns one of possible strategies – trade load leveling. Supervisory control algorithm for the energy storage has been described for selected strategy. The article presents the results of the simulation. The investor may have a dilemma, how to select the parameters of the storage for operations in the strategy. Based on simulation results the technical-economic optimization indicators has been determined.

Keywords: energy storage, optimization, select parameters, smart grid