

Technical Capacity and Economic Aspects of Using Energy Storage Systems for Balancing Variable Renewable Energy

Author

Tomasz Pakulski

Keywords

Electrochemical energy storage, wind generation, RES variability compensation

Abstract

Development of wind generation, besides its positive aspects related to the use of renewable energy, is a challenge in terms of operational security and economy of the National Power System (NPS). The uncertain and variable nature of wind generation sources (WG) entails the need to ensure by the TSO adequate power reserves, necessary to maintain the stable power system operation. Entities involved in energy trading from these sources incur additional balancing costs of unplanned production deviations. Continuous rise of WG installed capacity causes increase the problems associated with power system balancing. One of the solution may be energy storage systems.

The paper presents the results of analyses of the possible use of electrochemical energy storage systems to balance WG variability as a tool to support the power system operation planning, in order to reduce the operating costs of the NPS. The method of determining the preferred types of electrochemical energy storage systems, basis on the technical and economic optimisation indicators was shown in this article.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2017108

Received: 02.02.2017

Accepted: 27.03.2017

Available online: 30.03.2017

1. Introduction

Currently there are several types of electrochemical energy storage systems commercially available in the world, which are used along with renewable energy sources. The main ones are the three types of electrochemical storage systems: sodium-sulphur (NaS), lithium-ion (Li-ion) and lead-acid (Pb-Acid). Storage units

depending on the types may have quite different characteristics. Generally, they could be categorised as *high power* (Pb-Acid, Li-ion) or *high capacity* (NaS, Pb-Acid). The size of the energy storage system, operational requirements, leading application strategy of charging and discharging may be different depending on location, user requirements, etc.

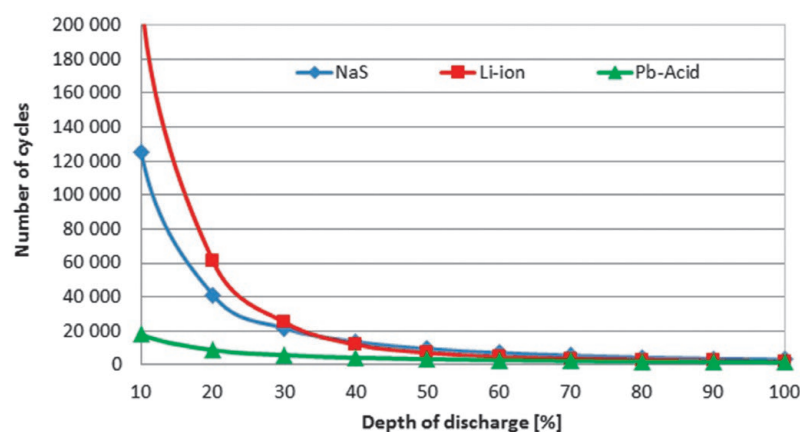


Fig. 1. Number of cycles depending on the depth of discharge [1–5]

The main objective of the research was to present the method for determining the preferred types and the required technical parameters of electrochemical energy storage systems, basis on the technical and economic optimisation, taking into account:

- Lifetime characteristics of the storage units resulting from the number of charge/discharge cycles and the depth of discharge (DOD)
- Efficiency of the charge/discharge cycle
- The size of capital expenditure.

Fig. 1 shows the lifetime of selected types of electrochemical energy storage devices.

In the assumed period of n -years, if the storage device works at a low DOD, it means that it will have sufficient capacity and its lifetime will lengthen, but significantly higher expenses will be incurred for its purchase. Conversely, the storage device will have insufficient capacity, the cost of its installation will be lower, but its lifetime will shorten, which will result in the need for multiple battery replacements within the assumed period of time. The proposed method will make it possible to find an optimal solution from a technical and financial point of view.

Tab. 1 shows the selected technical and financial parameters adopted as assumptions to carry out the energy storage systems operation simulation for compensating:

- WG forecasting errors in the short- and medium-term horizon
- 15-minute gradients of WG power changes.

2. Balancing the variability of renewable generation

2.1. Compensation for forecasting errors in the short-term horizon

The strategy involves the use of energy storage systems to compensate for the differences between the forecast and actual production volume from sources, which have large fluctuations in production over time (wind generation, photovoltaics). The purpose of the storage system is to supplement to the set (scheduled) level of generation from renewable sources or take over the excess production in relation to the forecasts reported in the schedule in the horizon of an hour. The storage system requires

Parameter	NaS	Li-ion	Pb-Acid
Storage capacity-to-discharge power ratio	7.2	2.0	2.5
Round trip energy storage efficiency [%]	90	95	85
Lifetime [cycles] at DOD of 80%	4500	5000	1500
Lifetime [cycles] at DOD of 100%	3000	4000	1000
Capital expenditure, USD million/MW	3.2	1.8	1.2

Tab. 1. Selected parameters of different electrochemical energy storage types

relatively small capacity, substantial power and a gradient of charging/discharging power, resulting from the significant fluctuations in the power supplied to the grid by the sources. A small capacity results from the assumption that in the long time horizon, the energy consumed and supplied to the network will be mutually compensated.

2.2. Compensation for forecasting errors in the medium-term horizon

Forecast error for renewable generation in the medium term (the next day) may result from a systematic forecasting error or be the result of underestimation or overestimation of numerical weather forecasts. The use of energy storage systems to compensate for WG forecast errors will support the power system operation, in particular optimising the selection of generation units in regard to the security of the system and the costs of electricity generation. The storage unit requires greater capacity than in the case of compensating for short-term forecasting errors, and a lower rated power and gradient of changes of the power consumed or supplied to the grid. This is due to the fact that even a small systematic error in forecasting generation taking place over a long time horizon leads to relatively large volumes of mistakenly scheduled production. The idea of using energy storage to compensate for forecasting errors, in order to maintain the assumed energy production profile, is shown in Fig. 2.

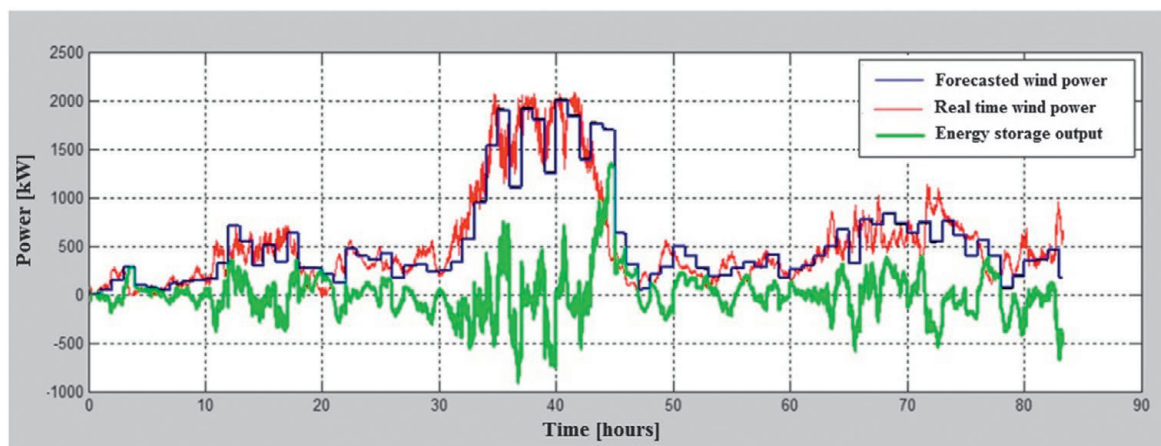


Fig. 2. The use of energy storage for compensating renewable generation errors [6]

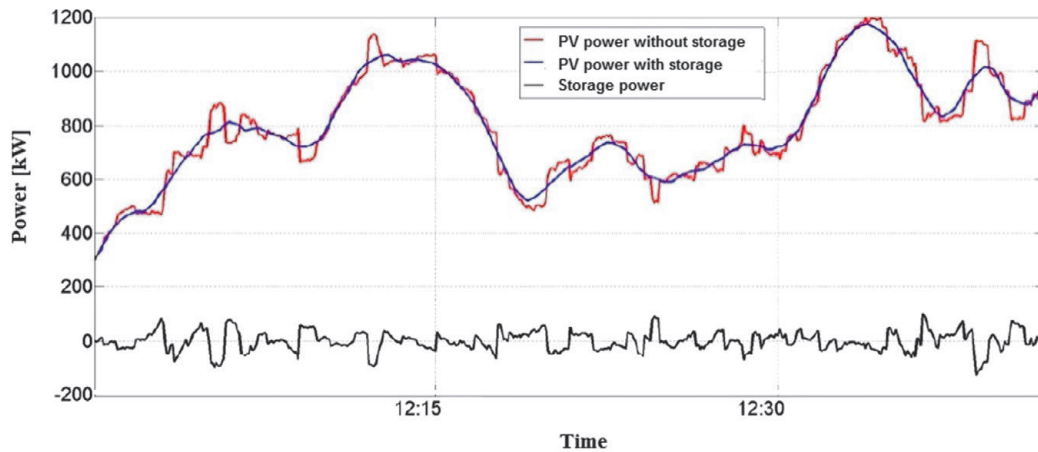


Fig. 3. The use of energy storage to compensate for fluctuations in renewable energy production [7]

2.3. Compensation for the gradient of changes in wind generation

The aim of energy storage operation is to reduce or eliminate the problem of rapid fluctuations in output power, and enabling efficient power balancing in the given network area. The purpose of these measures is to avoid the costs associated with starting up secondary reserves and the provision of other ancillary services in the power system, in order to balancing temporary supply and demand. The main task of the energy storage control system is to compensate for a 15-minute variability of renewable generation, taking into account the current power system demand. The idea is illustrated in Fig. 3.

3. Indicators of technical and economic optimisation

The following indicators were used in order to evaluate and optimise the sizing and technical parameters of the energy storage system:

- Technical indicator W_T – determines the cost of storing 1 MWh of energy over the energy storage lifetime. For an optimal solution, the indicator reaches a minimum value.

$$W_T = \frac{Ki}{\left(\frac{Eo}{Eo + En}\right)^2 \cdot Eo \cdot Tr} \quad [\text{PLN/MWh}]$$

where:

Ki – capital expenditures [PLN], Eo – the volume of energy stored during the year [MWh/year], Tr – period of the energy storage lifetime for the required number of cycles [years], En – volume of energy not stored during the year [MWh/year].

Volume of energy not stored is determined as all requested charging/discharging energy storage which have not been realized due to:

- insufficient energy storage charging/discharging power;
- lack of storage capacity (full discharging or recharging of the storage unit)
- Financial indicator W_F – determines the cost of storing 1 MWh of energy within a predetermined n -year long time period of the storage system's lifetime (including multiple batteries installation of the storage system in the case of a shorter

lifetime). For an optimal solution, the indicator reaches a minimum value.

$$W_F = \frac{Ki + n \cdot s \cdot Ki}{Eo \cdot Tsk} \quad [\text{PLN/MWh}]$$

where:

Ki – capital expenditures [PLN], n – the number of replacements of batteries in the assumed analysis period, s – share of batteries purchase costs in total energy storage system capital expenditures, Eo – the volume of energy stored during the year [MWh], Tsk – coefficient correcting the actual lifetime of the storage unit in a manner analogous to the coefficient discounting the value of money [years].

Optimal selection of basic technical parameters of electrochemical storage units was made according to the technical and financial indicator, defined as:

$$W = \sqrt{W_T \cdot W_F} \quad [\text{PLN/MWh}]$$

The simulation results enabled determine the required power and capacity of the energy storage system and to indicate their lifetime as a function of the number of executed cycles and depth of discharge (DOD).

4. Simulation results

4.1. Compensating for forecasting errors

Historical data describing the WG variability in the given network area were used to carry out an analysis of energy storage system used to compensate for forecasting errors in the short- and medium-term horizon. Forecast errors were calculated for individual time intervals and the energy storage mode was determined (charging or discharging), assuming that the forecast error is fully compensated by the energy storage system.

The results show a statistical underestimation wind generation forecasts. Actual wind power output was statistically higher than previously forecasted. In the case of energy storage it will result increase operation time in charging mode (accumulation of wind generation surplus). This systematic forecast's error may lead to

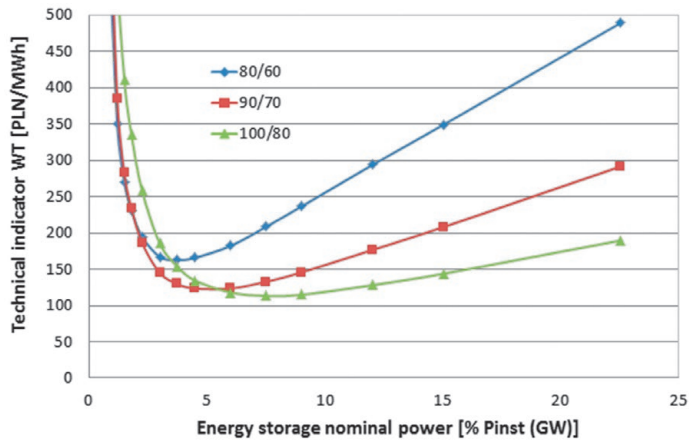


Fig. 4. Technical indicator W_T (NaS)

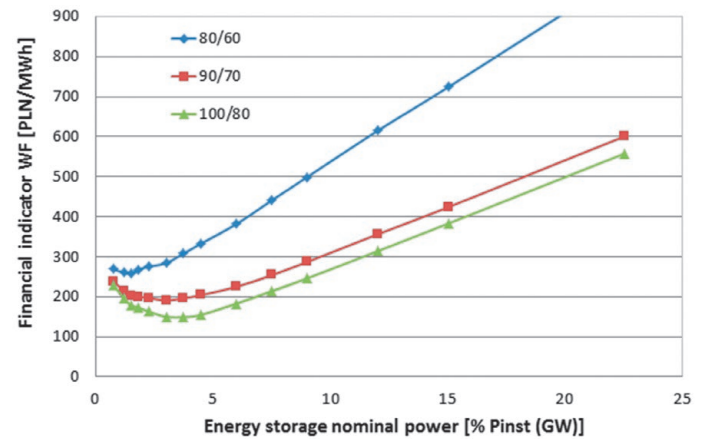


Fig. 5. Financial indicator W_F (NaS)

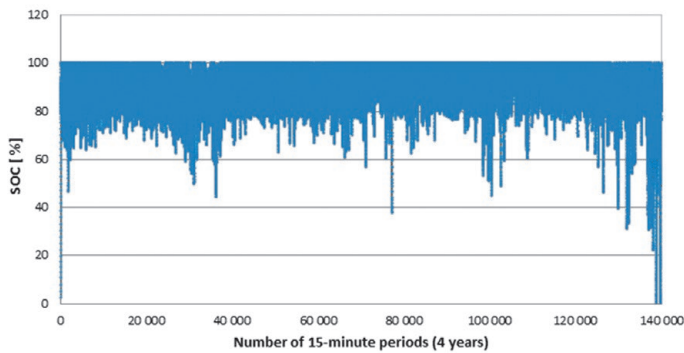


Fig. 6. SOC level for power optimisation of the energy storage according to indicator W_T (NaS)

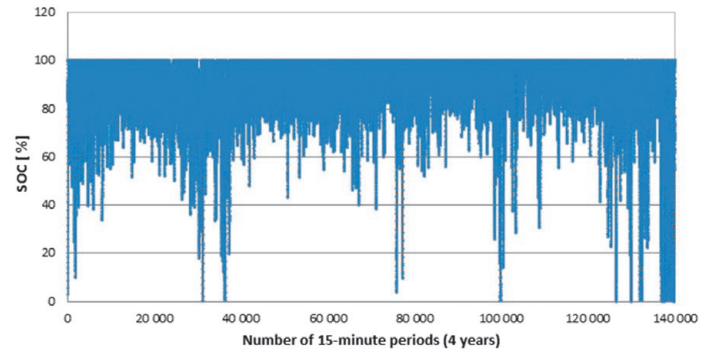


Fig. 7. SOC level for power optimisation of the energy storage according to indicator W_F (NaS)

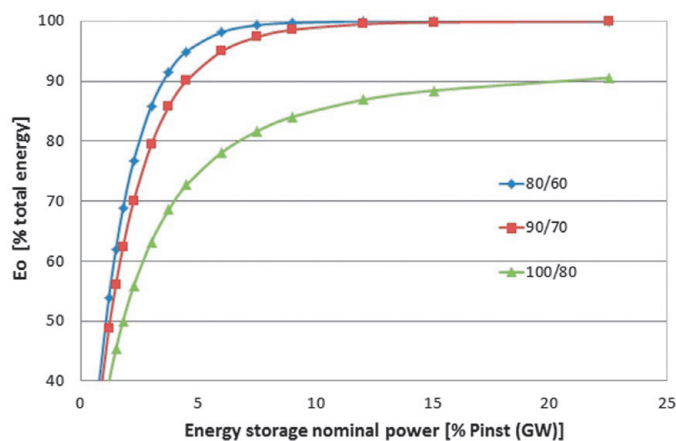


Fig. 8. Energy stored – % of the total energy requests (NaS)

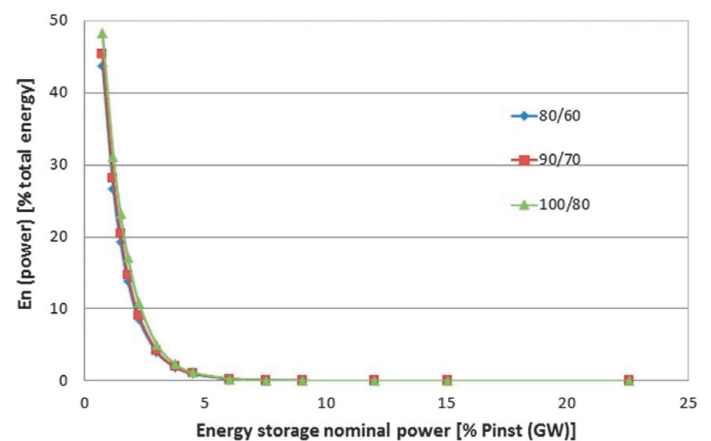


Fig. 9. Energy not stored – exceeding the nominal power of the storage system (NaS)

oversizing energy storage parameters (in particular its capacity) if wind power generation deviations with the same sign occur for a longer period of time. To compensate for this adverse phenomenon, in the simulation algorithm uses a correction energy storage discharging/charging upon reaching a certain SOC level (e.g. 80/60). As an optimum indicate the solution for which obtained the minimum value of the optimization indices.

Fig. 4–7 shows the characteristics of optimisation indicators and states of charge (SOC) of a sodium-sulphur (NaS) energy storage system in the analysed period of time.

Fig. 8–13 and Tab. 2 show the required parameters of a NaS storage system for compensating for short term forecast errors according to the technical and financial criterion.

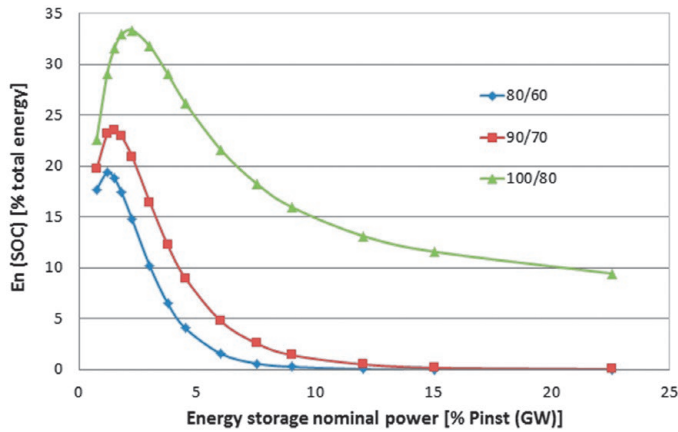


Fig. 10. Energy not stored – exceeding the nominal capacity of the storage system (NaS)

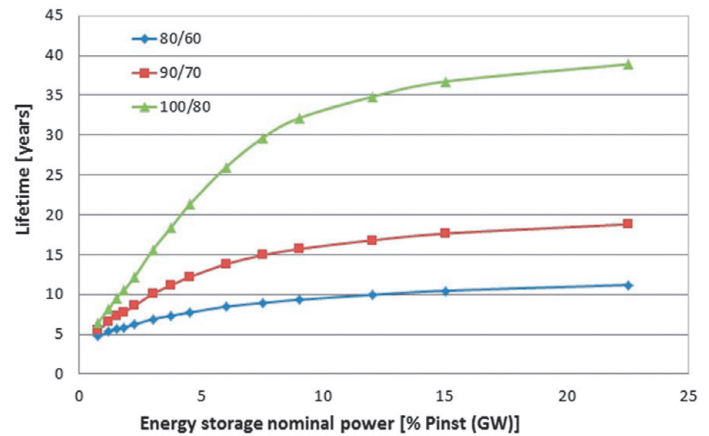


Fig. 11. Lifetime of the storage system (NaS)

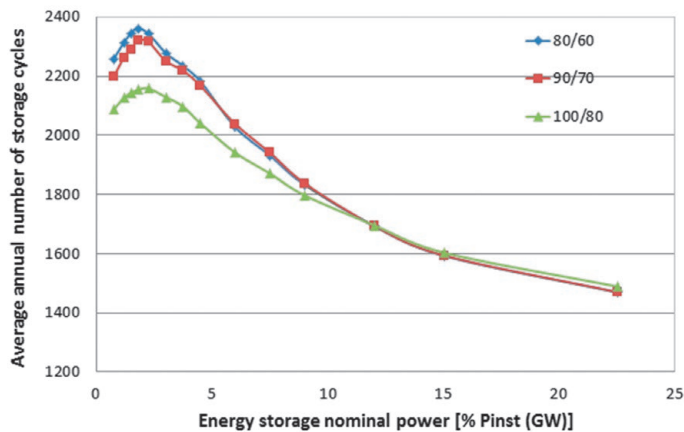


Fig. 12. Average annual number of storage cycles (NAS)

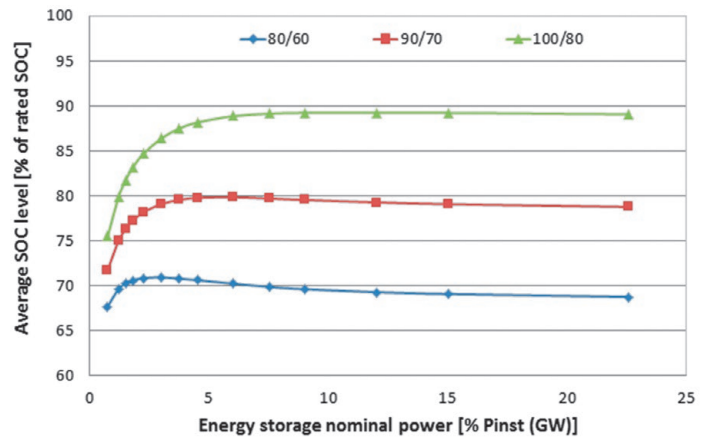


Fig. 13. Average SOC level (NaS)

Parameter		NaS	Li-ion	Pb-Acid
Energy storage nominal power [MW/100 MW (GW)]	Technical criterion	5–8	44–61	8–12
	Financial criterion	3–4	13–17	2–8
	Technical and financial criterion	4–5	25–30	5–10
Capacity	Discharge multiplicity P	7.2	2.0	2.5
Energy stored	% of energy requests	80	79	80
Lifetime	years	11–20	>20	3–5
Average SOC level	% of rated capacity	84	92	84

Tab. 2. Required technical parameters of individual storage systems used for compensating for short-term WG forecasting errors

Parameter		NaS	Li-ion	Pb-Acid
Energy storage nominal power [MW/100 MW (GW)]	Technical criterion	33–51	142–214	45–53
	Financial criterion	6–7	35–41	23–30
	Technical and financial criterion	14–16	69–75	37–45
Capacity	Discharge multiplicity P	7.2	2.0	2.5
Energy stored	% of energy requests	81	86	73
Lifetime	years	>20	>20	8–12
Average SOC level	% of rated capacity	84	85	88

Tab. 3. Required technical parameters of individual storage systems used for compensating for medium-term WG forecasting errors

Tab. 3 shows the required technical parameters of selected types of storage systems for compensating for errors in wind generation forecasts in the medium-term horizon.

4.2. Compensating for the variability of wind generation

The aim of the simulation was to analyse the possibility of using energy storage systems to compensate WG variability, as a

secondary reserve ancillary service. It was assumed that the main task of the storage system will be covering 15-minute gradients of changes in the balance of energy production and consumption, if they exceed the value observed without the participation of wind generation in covering the consumers' demand for power. The simulation assumed that the energy storage system will be used only in situations in which the variability of wind generation will have a negative impact on the power system operation,

Parameter		NaS	Li-ion	Pb-Acid
Energy storage nominal power [MW/100 MW (GW)]	Technical criterion	3–6	13–21	3–8
	Financial criterion	1–2	5–6	4–6
	Technical and financial criterion	2–3	8–12	3–6
Capacity	Discharge multiplicity P	7.2	2.0	2.5
Energy stored	% of energy requests	81	80	78
Lifetime	years	>20	>20	6–9
Average SOC level	% of rated capacity	91	93	91

Tab. 4. Required technical parameters of individual storage systems used for compensating for WG variability

i.e. will increase the amount of secondary reserves required to be maintained in the power system, according to the formula:
 $|\Delta PL| < |\Delta PL + \Delta GW|$ (simultaneous decrease in demand for power and increase in wind generation, or increase in demand for power and decrease in wind generation), wherein:

- $\Delta GW > 0$ – charging of the storage system
- $\Delta GW < 0$ – discharging of the storage system, wherein:
 ΔPL – change in demand for power, MW
 ΔGW – change of wind generation, MW.

Tab. 4 summarises the required technical storage system parameters in the strategy of compensating for the variability of wind generation.

5. Summary and conclusions

The paper presents a method for determining the preferred types of electrochemical energy storage systems based on:

- energy storage nominal power related to wind generation installed capacity indicators (MW_{ES}/MW_{GW})
- required capacity of the energy storage system (Q) in relation to its power (P),

determined on the basis of technical and economic optimisation, taking into account:

- Lifetime characteristics of the storage unit resulting from the number and depth of charging/discharging cycles
- Efficiency of the charge/discharge cycle
- The size of capital expenditure.

Simulations made it possible to determine in an estimated way the required power and capacity of the storage systems and determine their lifetime at the specified number of cycles and depth of discharge.

Tab. 5 shows the required technical parameters of storage units used for individual strategies of their use.

The findings has shown that the preferred type of electrochemical energy storage in applications for compensating for variability of renewable energy generation (in particular wind power) is a storage system, whose storage capacity is the multiplicity of its charging/discharging power. Taking into account the energy storage types commercially available on the market, these primarily include sodium sulphur (NaS) storage units and

Parameter	Compensation strategy	NaS	Li-ion	Pb-Acid
Energy storage nominal power [MW/100 MW (GW)]	Short-term forecasting errors of WG	4–5	25–30	5–10
	Medium-term forecasting errors of WG	14–16	69–75	37–45
	Gradient of changes in wind generation	2–3	8–12	3–6
Lifetime, years	Short-term forecasting errors of WG	16	>20	4
	Medium-term forecasting errors of WG	>20	>20	10
	Gradient of changes in wind generation	>20	>20	8

Tab. 5. Required technical parameters of individual storage systems used for balancing the variability of wind generation

higher capacity lithium-ion storage units (Li-Ion High Capacity). The lowest values of the technical and financial indicators (PLN/MWh) were achieved for these technologies, which indicates the highest project effectiveness among all electrochemical energy storage technologies considered and analysed.

The effectiveness of the project decreases with the reduction of the storage systems capacity in relation to its rated power. In the case of a lithium-ion storage system, to obtain the required capacity it is necessary to oversize its power multiple times relative to the power required to provide the ancillary service.

The simulations assumed compensation for variation in WG over a wide area. In the case of WF distributed over a smaller geographic area because of the lack of occur the smoothing effect, we may expect more relative (percentage) forecast errors and gradients of changes in production [8]. This will require the installation of greater power and capacity of the storage system per WG installed capacity unit.

Intensive development of renewable energy and decreasing investment costs of the construction of energy storage systems means that in the future energy storage systems may become an important provider of ancillary services in the NPS, allowing for compensating for changes in the WG in the given network area, reducing the share of conventional generation sources.

REFERENCES

1. Battery storage for renewables: Market status and technology outlook, International Renewable Energy Agency, January 2015.
2. Renewables and electricity storage: A technology roadmap for REmap 2030, International Renewable Energy Agency, June 2015.
3. Commercialisation of energy storage in Europe: A fact-based analysis of the implications of projected development of the European electric power system towards 2030 and beyond for the role and commercial viability of energy storage, March 2015.
4. N. Liu, M. Wimar, "The wide-area energy storage and management system – battery storage evaluation, US DOE, Pacific Northwest National Laboratory", Richland, Washington 2009

5. M. Kintner-Meyer, P. Balducci, "Energy storage for power systems applications: A regional assessment for the Northwest Power Pool (NWPP) US DOE", Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, April 2010.
 6. H. Vikelgaard, "Vestas & Energy Storage 2012", Vestas, April 2012.
 7. J. Johnson, "Initial Operating Experience of the La Ola 1,2 MW Photovoltaic System, Sandia Report", October 2011.
 8. P. Nørgaard, H. Holttinen, "A multi-turbine power curve approach", RISØ National Laboratory, Denmark, VTT, 2005, Finland.
-

Tomasz Pakulski

Research Institute, Gdańsk Branch of the Institute of Power Engineering

e-mail: t.pakulski@ien.gda.pl

Graduated in electrical engineering from the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdańsk University of Technology (2005). Now a technical and engineering specialist in the Department of Strategy and System Development. His professional interests include issues of power system operation and development of conventional and renewable energy sources, ancillary and regulation services, forecasting, and Smart Grid actions and initiatives.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 89–95. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Możliwości techniczne i aspekty ekonomiczne wykorzystania zasobników energii dla bilansowania zmiennej generacji OZE

Autor

Tomasz Pakulski

Słowa kluczowe

elektrochemiczny magazyn energii, generacja wiatrowa, kompensowanie zmienności OZE

Streszczenie

Rozwój generacji wiatrowej oprócz pozytywnych aspektów związanych z wykorzystaniem energii odnawialnej stanowi wyzwanie z punktu widzenia bezpieczeństwa i ekonomiki funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Niepewny i zmienny charakter źródeł generacji wiatrowej (GW) pociąga za sobą konieczność zapewnienia przez OSP odpowiednich rezerw mocy, niezbędnych dla zachowania stabilnej pracy sieci. Podmioty zaangażowane w handel energią z tych źródeł ponoszą dodatkowe koszty bilansowania nieplanowanych odchyłen produkcji. Ciągły wzrost mocy zainstalowanej GW powoduje nasilenie problemów związanych z bilansowaniem systemu, a rozwiązaniem mogą być zasobniki energii.

W artykule przedstawiono wyniki analiz dotyczących możliwości wykorzystania elektrochemicznych zasobników energii do bilansowania zmienności GW jako narzędzia wspomagającego planowanie pracy systemu i służącego obniżeniu kosztów funkcjonowania KSE. Zaprezentowano sposób wyznaczania preferowanych typów elektrochemicznych zasobników energii, określanych na podstawie techniczno-ekonomicznych wskaźników optymalizacyjnych.

Data wpływu do redakcji: 02.02.2017

Data akceptacji artykułu: 27.03.2017

Data publikacji online: 30.03.2017

1. Wstęp

Na świecie dostępnych jest wiele rodzajów elektrochemicznych magazynów energii elektrycznej, które są wykorzystywane do współpracy ze źródłami odnawialnymi. Za dominujące można uznać trzy typy zasobników elektrochemicznych: sodowo-siarkowy (NaS), litowo-jonowy (Li-ion) oraz kwasowo-ołowiowy (Pb-Acid). Magazyny w zależności od wykonania mogą posiadać dosyć zróżnicowane parametry. Generalnie można by je sprowadzić do kategorii *high power* (Pb-Acid, Li-ion) oraz *high capacity* (NaS, Pb-Acid).

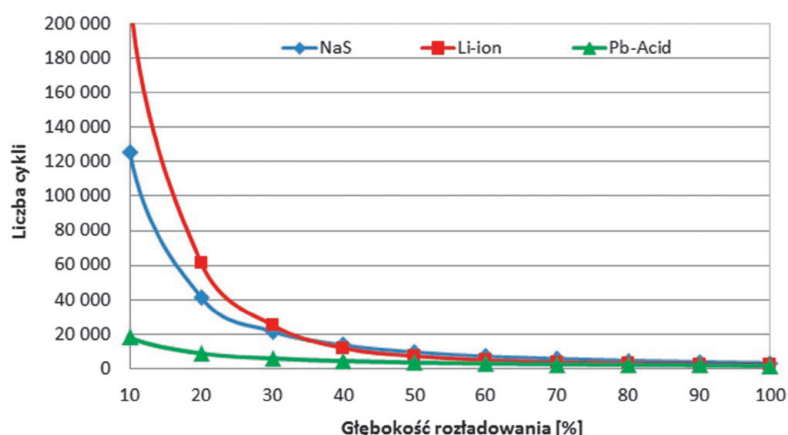
Wielkość zastosowanego magazynu energii, wymagania eksploatacyjne, wiodąca strategia wykorzystania mogą być różne w zależności m.in. od lokalizacji i wymagań użytkownika.

Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie sposobu wyznaczania preferowanych typów oraz pożądanych parametrów technicznych elektrochemicznych zasobników energii określonych na podstawie techniczno-ekonomicznej optymalizacji uwzględniającej, m.in.:

- charakterystyki czasu życia zasobnika wynikające z liczby cykli ładowania/rozładowania oraz stopnia rozładowania DOD (ang. *depth of discharge*)
- sprawności cyklu ładowanie/rozładowanie
- wielkość nakładów inwestycyjnych.

Na rys. 1 przedstawiono charakterystyki czasu życia wybranych typów elektrochemicznych zasobników energii.

W założonym okresie czasu *n*-lat, w przypadku gdy zasobnik będzie pracować w niskim zakresie DOD – oznacza to, że będzie miał on wystarczającą pojemność – wydłuży się jego żywotność, ale poniesione zostaną znacznie wyższe wydatki na jego zakup. W sytuacji odwrotnej zasobnik będzie miał niewystarczającą pojemność, niższe byłyby koszty jego



Rys. 1. Liczba cykli w zależności od głębokości rozładowania [1–5]

Parametr	NaS	Li-ion	Pb-Acid
Stosunek pojemność zasobnika/moc rozładowania	7,2	2,0	2,5
Sprawność cyklu magazynowania energii [%]	90	95	85
Czas życia [cykle] przy 80% DOD	4500	5000	1500
Czas życia [cykle] przy 100% DOD	3000	4000	1000
Nakład inwestycyjny, mln USD/MW	3,2	1,8	1,2

Tab. 1. Parametry technologii magazynowania energii z zasobnikiem elektrochemicznym

instalacji, ale skróci się jego żywotność, co spowoduje konieczność wielokrotnej wymiany akumulatorów w założonym okresie czasu. Przeprowadzona analiza umożliwi znalezienie rozwiązania optymalnego z technicznego oraz finansowego punktu widzenia.

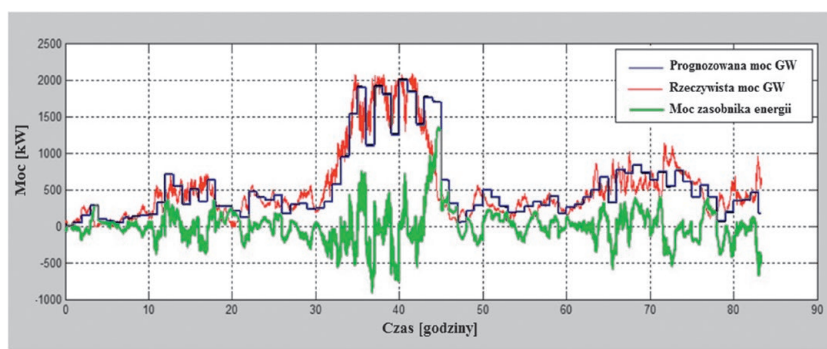
W tab. 1 przedstawiono wybrane parametry techniczne oraz finansowe przyjęte

jako założenia do przeprowadzenia symulacji pracy zasobników energii w strategiach kompensowania:

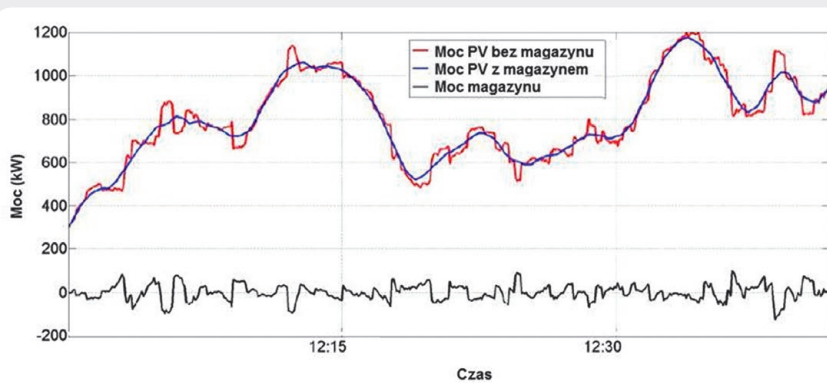
- błędów prognoz GW w horyzoncie krótko- oraz średnioterminowym
- 15-minutowych gradientów zmian mocy GW.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 89–95. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 2. Wykorzystanie zasobnika energii do kompensacji błędów generacji odnawialnej [6]



Rys. 3. Wykorzystanie zasobnika energii do kompensacji wahań produkcji odnawialnej [7]

2. Bilansowanie zmienności generacji odnawialnej

2.1. Kompensowanie błędów prognoz w horyzoncie krótkoterminowym

Strategia zakłada wykorzystanie zasobników energii do kompensacji odchyleń pomiędzy prognozowaną a rzeczywistą wielkością produkcji źródeł, które cechują się dużymi wahaniami produkcji w czasie (generacja wiatrowa, fotowoltaika). Zadaniem magazynu jest uzupełnienie do zadanego (zgrafikowanego) poziomu generacji ze źródeł odnawialnych lub przejęcie nadmiarowej produkcji w stosunku do wartości prognozy zgłoszonej w grafiku pracy w horyzoncie godziny. Od zasobnika wymagana jest stosunkowo niewielka pojemność i znaczna moc oraz gradient zmiany mocy pobieranej/oddawanej do sieci, wynikające ze znacznych wahań mocy oddawanej do sieci przez źródła. Niewielka pojemność wynika z założenia, że w dłuższym horyzoncie czasu energia pobrana i oddana do sieci będą się wzajemnie kompensowały.

2.2. Kompensowanie błędów prognoz w horyzoncie średnioterminowym

Błędy prognoz generacji odnawialnej w średnim horyzoncie czasowym (na dobę następną) mogą wynikać z systematycznego błędu prognoz lub być efektem niedoszacowania lub przeszacowania numerycznych prognoz pogody. Wykorzystanie magazynów energii do kompensacji błędów prognozy generacji wiatrowej pozwoli wspomagać prowadzenie ruchu w sieci,

w szczególności optymalizować dobór do pracy jednostek wytwórczych ze względu na bezpieczeństwo pracy systemu oraz koszty wytwarzania energii elektrycznej. Od zasobnika wymagana jest większa pojemność niż w przypadku kompensowania krótkoterminowych błędów prognoz oraz mniejsze: moc nominalna i gradient zmiany mocy pobieranej lub oddawanej do sieci. Wynika to z faktu, że nawet niewielki systematyczny błąd prognozy generacji popełniony w dłuższym horyzoncie czasu prowadzi do stosunkowo dużych wolumenów błędnie zgrafikowanej produkcji. Ideę wykorzystania zasobnika energii do kompensowania błędów prognoz, w celu utrzymania założonego profilu produkcji energii, przedstawiono na rys. 2.

2.3. Kompensowanie gradientów zmian generacji wiatrowej

Zadaniem zasobników energii jest ograniczenie lub wyeliminowanie problemu związanego z szybkimi wahaniami mocy wyjściowej oraz umożliwienie skutecznego bilansowania mocy w danym obszarze sieci. Efektem działań jest uniknięcie kosztów związanych z uruchomieniem rezerwy wtórnej w sieci oraz ze świadczeniem innych usług regulacyjnych mających na celu bilansowanie chwilowej podaży i popytu. Zadaniem systemu sterowania zasobnikiem jest kompensowanie 15-minutowej zmienności generacji odnawialnej z uwzględnieniem aktualnego zapotrzebowania na moc w systemie. Ideę przedstawiono na rys. 3.

3. Wskaźniki techniczno-ekonomiczne optymalizacji

W celu oceny i optymalizacji doboru wielkości oraz parametrów technicznych zasobnika posłużono się następującymi wskaźnikami:

- wskaźnik techniczny W_T – określa koszt magazynowania 1 MWh energii w całym okresie życia zasobnika. Dla rozwiązania optymalnego wskaźnik osiąga wartość minimalną.

$$W_T = \frac{K_i}{\left(\frac{E_o}{E_o + E_n}\right)^2 \cdot E_o \cdot T_r} \text{ [PLN/MWh]}$$

gdzie:

K_i – nakład inwestycyjny [PLN], E_o – wolumen energii obsługiwanej przez zasobnik energii w ciągu roku [MWh/rok], T_r – okres czasu życia zasobnika dla wymaganej liczby cykli [lata], E_n – wolumen energii nieobsługiwanej przez zasobnik w ciągu roku [MWh/rok].

Przez energię nieobsługowaną rozumiane są żądania pracy zasobnika w trybie ładowania lub rozładowania, które nie zostały zrealizowane ze względu na:

- niedostateczną moc zasobnika w trybie generacji lub poboru mocy
- brak zdolności magazynowania (całkowite rozładowanie lub naładowanie zasobnika)
- wskaźnik finansowy W_F – określa koszt zmagazynowania 1 MWh energii w założonym n -letnim okresie życia zasobnika (z uwzględnieniem wielokrotnej instalacji zasobnika w przypadku krótszego czasu życia). Dla rozwiązania optymalnego wskaźnik osiąga wartość minimalną.

$$W_F = \frac{K_i + n \cdot s \cdot K_i}{E_o \cdot T_{sk}} \text{ [PLN/MWh]}$$

gdzie:

K_i – nakład inwestycyjny [PLN], n – liczba wymian akumulatorów w ciągu przyjętego okresu analizy, s – udział kosztów zakupu akumulatorów w całkowitych nakładach inwestycyjnych na budowę systemu magazynowania energii, E_o – wolumen energii obsługiwanej przez zasobnik energii [MWh], T_{sk} – współczynnik korygujący rzeczywisty czas życia zasobnika w sposób analogiczny do współczynnika dyskontującego wartość pieniądza w czasie [lata].

Optymalnego doboru podstawowych parametrów technicznych zasobników elektrochemicznych dokonywano według wskaźnika techniczno-finansowego, zdefiniowanego jako:

$$W = \sqrt{W_T \cdot W_F} \text{ [PLN/MWh]}$$

Wyniki symulacji pozwoliły wyznaczyć wymaganą moc i pojemność zasobnika oraz określić ich czas życia w funkcji zrealizowanej liczby cykli oraz głębokości rozładowania zasobnika (DOD).

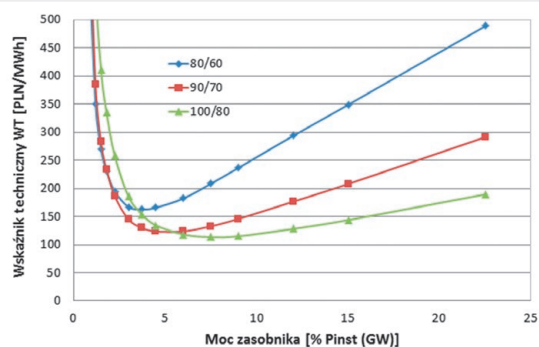
4. Wyniki symulacji

4.1. Kompensowanie błędów prognoz

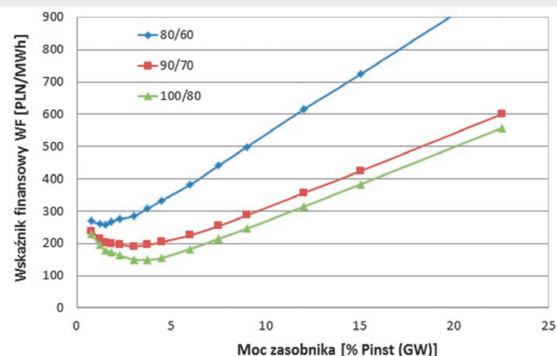
Do przeprowadzenia analiz pracy zasobnika energii zastosowanego do kompensowania błędów prognoz w horyzoncie krótko- oraz średnioterminowym wykorzystano historyczne dane opisujące zmienność GW w danym obszarze sieci. Dla poszczególnych

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 89–95. When referring to the article please refer to the original text.

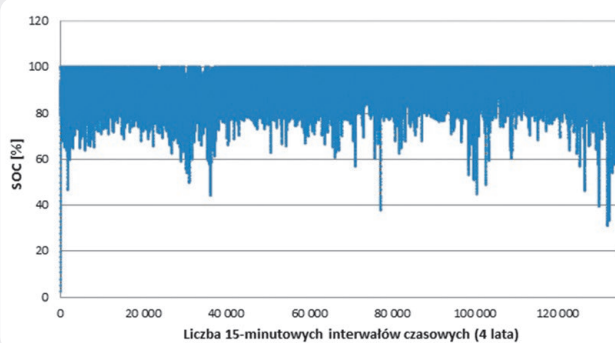
PL



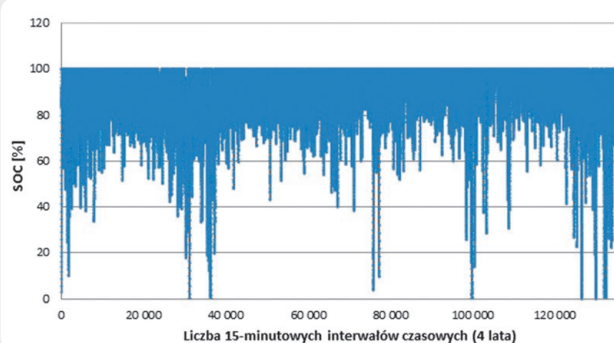
Rys. 4. Wskaźnik techniczny W_T (NaS)



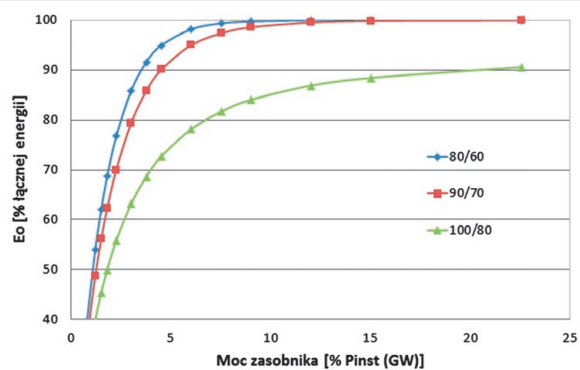
Rys. 5. Wskaźnik finansowy W_F (NaS)



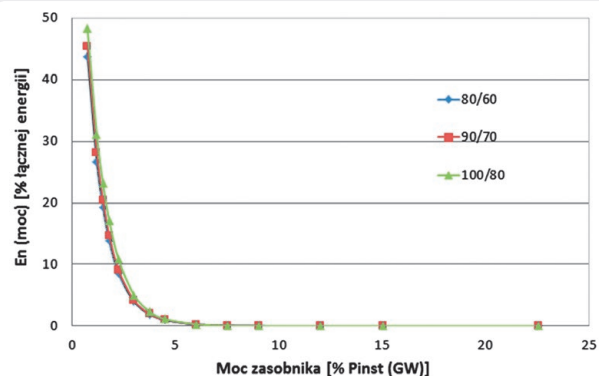
Rys. 6. Poziom SOC dla optymalizacji mocy zasobnika wg wskaźnika W_T (NaS)



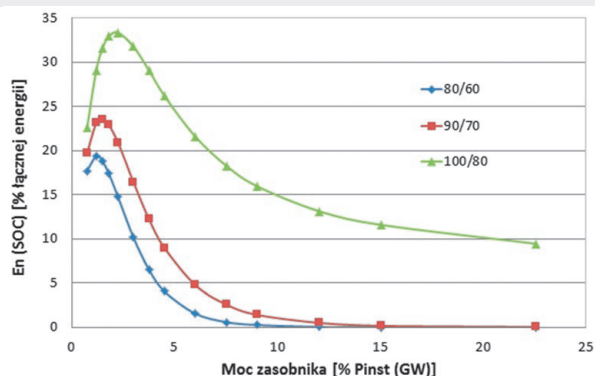
Rys. 7. Poziom SOC dla optymalizacji mocy zasobnika wg wskaźnika W_F (NaS)



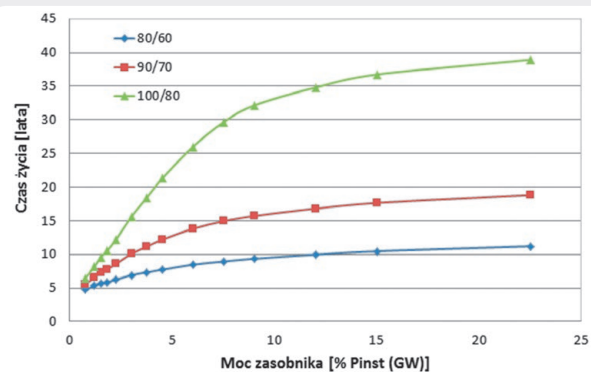
Rys. 8. Energia obsłużona przez zasobnik – % łącznej energii żądań (NaS)



Rys. 9. Energia nieobsłużona – przekroczenie mocy nominalnej zasobnika (NaS)



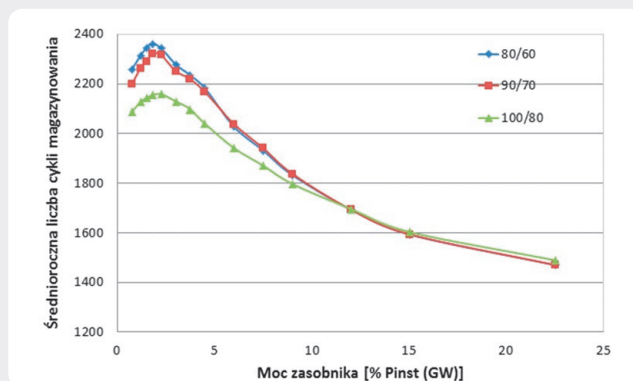
Rys. 10. Energia nieobsłużona – przekroczenie pojemności nominalnej zasobnika (NaS)



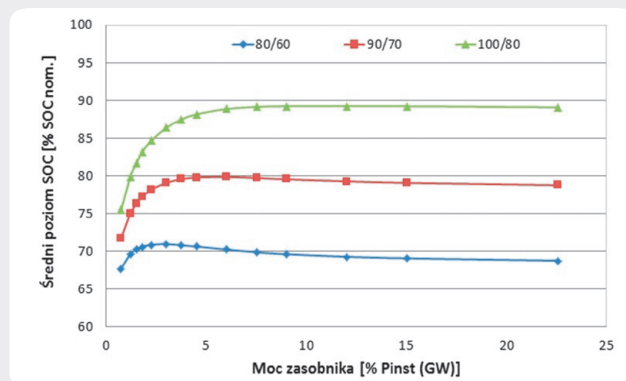
Rys. 11. Czas życia zasobnika (NaS)

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 89–95. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 12. Średnioroczna liczba cykli magazynowania (NaS)



Rys. 13. Średni poziom SOC (NaS)

przedziałów czasu obliczono błąd prognozy oraz określono reżim pracy zasobnika, zakładając, że błąd prognozy jest w całości kompensowany przez zasobnik energii.

Badania wykazały, że w analizowanym okresie rzeczywista moc oddawana do sieci była statystycznie wyższa od planowanej, co w przypadku zasobnika będzie skutkowało zwiększeniem czasu pracy w trybie

ładowania. Tego typu błąd systematyczny prognozy może doprowadzić do przewymiarowania pojemności zasobnika, gdyby odchyłki o jednakowym znaku występowały przez dłuższy okres. W celu skompensowania tego niekorzystnego zjawiska zastosowano w algorytmie symulacyjnym korekcyjne rozładowanie/ładowanie zasobnika po osiągnięciu ustalonego poziomu SOC (np. 80/60). Za optymalne wskazano rozwiązanie, dla którego uzyskano minimalną wartość wskaźników optymalizacyjnych.

Na rys. 4–7 przedstawiono dla zasobnika sodowo-siarkowego (NaS) charakterystyki wskaźników optymalizacyjnych oraz poziomów naładowania magazynu SOC (ang. *state of charge*) w rozpatrywanym okresie.

Na rys. 8–13 oraz w tab. 2 przedstawiono pożądane parametry zasobnika NaS do kompensowania błędów prognoz krótkoterminowych według kryterium techniczno-finansowego.

W tab. 3 przedstawiono pożądane parametry techniczne wybranych typów zasobników do kompensowania błędów prognoz generacji wiatrowej w horyzoncie średnioterminowym.

4.2. Kompensowanie zmienności generacji wiatrowej

Celem symulacji była analiza możliwości wykorzystania magazynów energii do świadczenia usługi kompensowania zmienności GW, która miałaby charakter rezerwy wtórnej. Założono, że zadaniem magazynu będzie pokrywanie 15-minutowych gradientów zmian bilansu wytworzenia i zużycia energii, jeżeli przekraczają one wartości obserwowane bez udziału generacji wiatrowej w pokrywaniu zapotrzebowania odbiorców na moc. W przeprowadzonej symulacji założono więc, że magazyn energii będzie wykorzystany wyłącznie w sytuacjach, w których zmienność generacji wiatrowej będzie miała negatywny wpływ na pracę sieci, tj. zwiększała wielkość rezerwy wtórnej wymaganej do utrzymania w systemie, zgodnie z zależnością: $|\Delta PL| < |\Delta PL + \Delta GW|$ (równoczesny spadek zapotrzebowania na moc i wzrost generacji wiatrowej lub wzrost zapotrzebowania na moc i spadek generacji wiatrowej), przy czym:

- $\Delta GW > 0$ – ładowanie zasobnika
- $\Delta GW < 0$ – rozładowanie zasobnika,

Parametr		NaS	Li-ion	Pb-Acid
Moc zasobnika [MW/100 MW GW]	kryterium techniczne	5–8	44–61	8–12
	kryterium finansowe	3–4	13–17	2–8
	kryterium techniczno-finansowe	4–5	25–30	5–10
Pojemność	krotność P rozł.	7,2	2,0	2,5
Energia	% energii żądań	80	79	80
Żywotność	lata	11–20	>20	3–5
Średni poziom SOC	% pojemności nominalnej	84	92	84

Tab. 2. Pożądane parametry techniczne poszczególnych zasobników wykorzystanych do kompensowania krótkoterminowych błędów prognoz GW

Parametr		NaS	Li-ion	Pb-Acid
Moc zasobnika [MW/100 MW GW]	kryterium techniczne	33–51	142–214	45–53
	kryterium finansowe	6–7	35–41	23–30
	kryterium techniczno-finansowe	14–16	69–75	37–45
Pojemność	krotność P rozł.	7,2	2,0	2,5
Energia	% energii żądań	81	86	73
Żywotność	lata	>20	>20	8–12
Średni poziom SOC	% pojemności nominalnej	84	85	88

Tab. 3. Pożądane parametry techniczne poszczególnych zasobników wykorzystanych do kompensowania średnioterminowych błędów prognoz GW

Parametr		NaS	Li-ion	Pb-Acid
Moc zasobnika [MW/100 MW GW]	kryterium techniczne	3–6	13–21	3–8
	kryterium finansowe	1–2	5–6	4–6
	kryterium techniczno-finansowe	2–3	8–12	3–6
Pojemność	krotność P rozł.	7,2	2,0	2,5
Energia	% energii żądań	81	80	78
Żywotność	lata	>20	>20	6–9
Średni poziom SOC	% pojemności nominalnej	91	93	91

Tab. 4. Pożądane parametry techniczne poszczególnych zasobników wykorzystanych do kompensowania zmienności generacji wiatrowej

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 89–95. When referring to the article please refer to the original text.

PL

gdzie:

ΔPL – zmiana zapotrzebowania na moc odbiorców, MW

ΔGW – zmiana mocy generacji wiatrowej, MW.

W tab. 4 zestawiono pożądane parametry techniczne zasobników w strategii kompensowania zmienności generacji wiatrowej.

5. Podsumowanie i wnioski

W referacie zaprezentowano sposób wyznaczania preferowanych typów elektrochemicznych zasobników energii w oparciu o:

- wskaźnik mocy zasobnika energii do mocy zainstalowanej GW (MW_{ES}/MW_{GW})
- wymaganą pojemność zasobnika energii (Q) w relacji do jego mocy (P)

określonych na podstawie techniczno-ekonomicznej optymalizacji uwzględniającej m.in.:

- charakterystyki czasu życia zasobnika wynikającego z liczby i głębokości cykli ładowania/rozładowania
- sprawności cyklu ładowanie/rozładowanie
- wielkość nakładów inwestycyjnych.

Symulacje pozwoliły w przybliżony sposób określić wymaganą moc i pojemność zasobnika oraz wyznaczyć ich czas życia przy określonej liczbie cykli i stopniu rozładowania DOD.

W tab. 5 przedstawiono pożądane parametry techniczne zasobników wykorzystanych do poszczególnych strategii ich zastosowania.

Badania wykazały, że preferowanym typem elektrochemicznego magazynowania energii do zastosowań kompensowania zmienności generacji OZE (w szczególności generacji wiatrowej) jest zasobnik, którego pojemność magazynowania stanowi wielokrotność mocy ładowania/rozładowania. Biorąc pod uwagę technologie dostępne na rynku, mogą to być przede wszystkim zasobniki sodowo-siarkowe (NaS) oraz litowo-jonowe o wyższej pojemności (Li-ion High Capacity). Dla wymienionych technologii uzyskano najniższe wartości wskaźników technicznego oraz finansowego (PLN/MWh), co wskazuje na najwyższą efektywność przedsięwzięcia spośród wszystkich rozpatrywanych i analizowanych technologii elektrochemicznego magazynowania energii.

Parametr	Strategia kompensowania	NaS	Li-ion	Pb-Acid
Moc zasobnika [MW/100 MW GW]	krótkoterminowych błędów prognoz GW	4–5	25–30	5–10
	średnioterminowych błędów prognoz GW	14–16	69–75	37–45
	gradientów zmian generacji wiatrowej	2–3	8–12	3–6
Czas życia, lata	krótkoterminowych błędów prognoz GW	16	>20	4
	średnioterminowych błędów prognoz GW	>20	>20	10
	gradientów zmian generacji wiatrowej	>20	>20	8

Tab. 5. Pożądane parametry techniczne poszczególnych zasobników wykorzystanych do bilansowania zmienności generacji wiatrowej

Efektywność przedsięwzięcia pogarsza się wraz ze zmniejszeniem pojemności zasobnika w stosunku do jego mocy nominalnej. W przypadku zasobnika litowo-jonowego w celu osiągnięcia wymaganej pojemności niezbędne jest wielokrotne przewymiarowanie jego mocy w stosunku do mocy wymaganej dla świadczenia usługi.

Przeprowadzone symulacje zakładały kompensowanie zmienności GW rozmieszczonej na rozległym obszarze. W przypadku FW rozmieszczonych na mniejszym geograficznie obszarze ze względu na brak efektu wygładzania (ang. *smoothing effect*) należy oczekiwać większych względnych (procentowych) błędów prognoz oraz gradientów zmian produkcji [8]. Będzie to wymagało instalacji większej mocy i pojemności zasobnika na jednostkę mocy farm wiatrowych. Intensywny rozwój energetyki odnawialnej oraz zmniejszające się nakłady inwestycyjne na budowę zasobników energii powodują, że magazyny energii mogą w przyszłości stać się ważnym dostawcą usług regulacji w KSE, pozwalając na kompensowanie zmian GW w danym obszarze sieci, zmniejszając udział klasycznych źródeł wytwórczych.

Bibliografia

1. Battery storage for renewables: Market status and technology outlook, International Renewable Energy Agency, styczeń 2015.
2. Renewables and electricity storage: A technology roadmap for REmap 2030, International Renewable Energy Agency, czerwiec 2015.

3. Commercialization of energy storage in Europe: A fact-based analysis of the implications of projected development of the European electric power system towards 2030 and beyond for the role and commercial viability of energy storage, marzec 2015.
4. Liu N., Wimar M., The wide-area energy storage and management system – battery storage evaluation, US DOE, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 2009
5. Kintner-Meyer M., Balducci P., Energy storage for power systems applications: A regional assessment for the Northwest Power Pool (NWPP) US DOE, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, kwiecień 2010.
6. Vinkelgaard H., Vestas & Energy Storage 2012, Vestas, kwiecień 2012.
7. Johnson J., Initial Operating Experience of the La Ola 1,2 MW Photovoltaic System, Sandia Report, październik 2011.
8. Nørgaard P., Holttinen H., A multi-turbine power curve approach, RISØ National Laboratory, Denmark, VTT, Finland 2005.

Tomasz Pakulski

mgr inż.

Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk

e-mail: t.pakulski@ien.gda.pl

Absolwent Politechniki Gdańskiej Wydziału Elektrotechniki i Automatyki, kierunek elektrotechnika (2005). Zatrudniony na stanowisku specjalisty inżynierino-technicznego w Zakładzie Strategii i Rozwoju Systemu. Jego zawodowe zainteresowania obejmują problematykę pracy systemu elektroenergetycznego oraz rozwoju klasycznych i odnawialnych źródeł energii, usługi systemowe i regulacyjne, prognozowanie, działania i inicjatywy Smart Grid.