

Qualitative Indicators Used to Select the Placement and Parameters of Energy Storage Installed in the Distribution Network

Authors

Agata Szultka
 Robert Małkowski
 Seweryn Szultka

Keywords

electrical energy quality, distribution networks, energy storage

Abstract

The technology related to energy storage has developed in recent years. Continuous improvement of the solutions available on the market resulted in wider usability of energy storage. They are also increasingly used in a distribution network. This study contains a synthesised description of physical features of the energy storage used in distribution networks. Several criteria of algorithms used to determine the placement and parameters of energy storage are discussed. In a synthesised manner, the usability level of the given storage type to achieve the assumed optimisation criterion is shown.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2017407

Received: 21.03.2017

Accepted: 28.06.2017

Available online: 23.07.2018

1. Introduction

The continuous development of electrical energy storage results in increased functional performance and successive lowering of prices. All this causes distribution network operators to increasingly consider its application to improve the qualitative parameters of the electrical energy. To date, many algorithms have emerged worldwide to determine both the placement and parameters of storage. The optimisation of parameters and placement of energy storage in the distribution network requires considering not only the benefits of improvement in electrical energy quality parameters or gains related to energy trading, but also the costs due to the installation and operation of the storage. In this paper, an effort was made to systematise the qualitative indicators of the optimisation methods used to select the placement and parameters of energy storage. Energy storage was compared for usability to improve energy quality depending on the adopted optimisation criterion.

2. Types of energy storage and their application possibilities

In the distribution network, there are three most widely used types of energy storage: battery packs, super-capacitor and

flywheels. The fourth type of storage is the superconductive magnetic energy storage – SMES. For economic reasons (very high cost), practical application of this type of storage in the distribution network is very limited. Bearing this in mind, only the first three types of storage were the focus of this paper. Each of these storage types has other dynamic properties and thus application possibilities. In Tab. 1 selected features of energy storage are shown for several of the most common types of battery packs (NaS, Li-on, PbSO₄), a super-capacitor and a flywheel. Battery packs, compared to a super-capacitor or a flywheel, feature a significantly lower number of charge/discharge cycles, as well as a lower self-discharge rate. Thus, installing this type of battery packs will be more suitable for long-term energy storage tasks (several hours) than for tasks related to quick adjustment of energy quality parameters (e.g. frequency, voltage).

Flywheels feature very long life and power density. Disadvantages include middle energy storage values and high self-discharge rate. They are also useful in applications that require feeding or receiving very high power in a short time, with a large number of charge/discharge cycles and short-term energy storage.

A super-capacitor, compared to a battery pack, can complete a very high number of cycles. Moreover, it features a high power

	NaS battery	Battery	Battery	Super-condenser	Flywheel
Energy density Wh/kg	100–250	60–200	30–45	1–15	5–30
Energy density Wh/l	150–300	200–350	50–100	10–20	20–80
Power density W/l	120–160	100–3500	90–700	40,000–120,000	5000
Charging time	1 min – 8 h	1 min – 8 h	1 min – 8 h	ms – min	s – h
Discharge time	30 min – 8 h	15 min – 4 h	10 s – 4 h	< 30 s	s – min
Self-discharge	10%/day	5%/month	0.1–0.4%/day	up to 25% in the first 48 h	5–15%/h
Efficiency %	75–80	83–86	70–85	85–94	80–95
Number of cycles	5000–10,000	1000–5000	500–2000	10 ⁴ –10 ⁶	several million
Discharge depth %	to 100	to 100	70	75	75
Service life	15–20 years	5–20 years	5–15 years	15 years	15–20 years
Installation cost PLN/kWh	2000–40,000	1200–32,000	400–1000	40,000–80,000	4000

Tab. 1. Summary of properties of selected energy storage [1, 2]

density, combined with a low energy density. It is used for short-term energy storage related to high charge/discharge power density. Supercapacitors are increasingly installed in hybrid mode with battery packs to increase battery life and expand the adjustment range of the entire system.

3. Application possibilities of selected storage for improving the distribution network operation quality

Energy storage can improve network operation quality in various situations. Selected issues related to distribution network operation are discussed. The varied nature of network operation disturbances and dynamic properties of storage determines the application of a specific type of storage, as described below.

a. Load balancing

Load **balancing** consists in active power generation or consumption by storage during load peaks or valleys. Load **balancing** contributes to the improvement of network operation by reducing losses, increasing local voltage stability or eliminating overloads. Two storage operation criteria may be distinguished:

1. Peak Shaving – Fig. 1a
2. Load Levelling – Fig. 1b.

To fulfil the objective of shifting the peak load to the night valley, it is more beneficial to use battery packs, while in the case of reducing the peak load at node, it is possible to use a flywheel or a super-capacitor. The qualitative indicator is the maximum power reduction at node to P_{max} [4–7].

b. Energy quality improvement

In the National Power System, electrical energy quality requirements are described in the Distribution Network Maintenance and Operation Manual (Polish: *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, IRIESD*). Failure to meet the energy quality parameters results in the operator being subject to fines. To avoid additional costs, the operator may fit the distribution system with energy storage to support network operation. The following criteria may be applied:

3. **reduction of voltage at the nodes**, at which voltage exceeds the upper limit (defined by IRIESD). This criterion is used mainly in networks with a high penetration of micro-sources. This assumption should be met when using minimum power and energy storage units installed in great numbers. The indicator of proper optimisation operation is correct voltage at all nodes of the network:

$$V_i \leq V_{max} \quad (1)$$

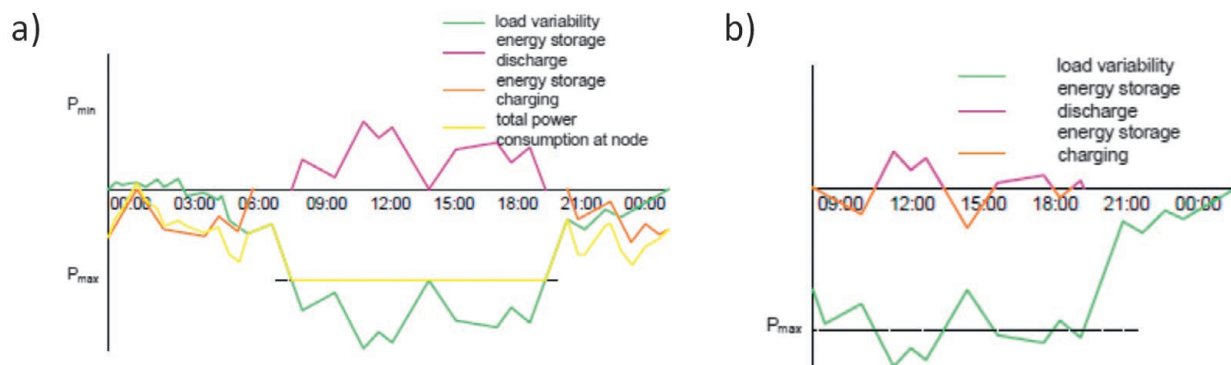


Fig. 1. An example of load balancing, a) peak shaving, b) load levelling [3]

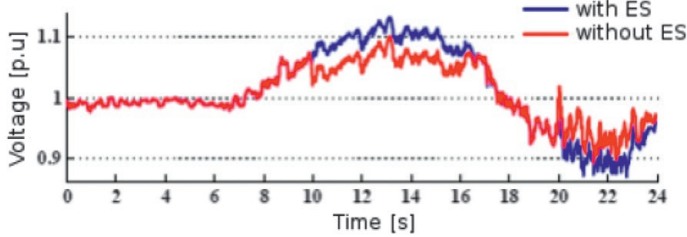


Fig. 2. Impact of improvement of voltage level at node by using energy storage [15]

4. **increase of voltage at the nodes**, at which voltage drops below the lower limit. This criterion is applied to rural networks, in which line lengths are considerable, and high load networks. The criterion consists in installing the minimum number of storage units, while meeting the requirement:

$$V_i \geq V_{min} \quad (1)$$

where: V_i – voltage at node i of the network, V_{max} – minimum voltage that can occur at the node [4, 5, 8–14].

A graphical illustration of using energy storage (ES) to adjust voltage at the node is shown in Fig. 2.

c. **higher current harmonics and load unbalance compensation** (Fig. 3). The criterion value is the THD value at each phase and the current (load) difference between phases [16–18].

d. **Frequency adjustment**

One electrical energy quality parameter is frequency. The permissible frequency deviation range is relatively small [38]. Frequency deviation is a result of disruption of active power balance in the system. The basic objects used to maintain the active power balance are generation units. They are involved in primary and/or secondary adjustment.

The energy collected in energy storage can be also used in frequency adjustment. Then the operational criterion of storage adjustment systems would be frequency deviation. Energy storage can be involved in primary adjustment in both the basic and extended adjustment range. An example of the frequency adjustment strategy adopted for a flywheel is shown in Fig. 4.

e. **Operation with Renewable Energy Sources (RES)**

The increasing saturation of renewable energy sources, installed in the distribution network, in many cases resulted in significant changes in its operational characteristics. The high total power of renewable energy sources can cause periodical changes of the typical direction of energy transmission from the MSP to the consumers. In extreme cases, it may lead to overloads of network

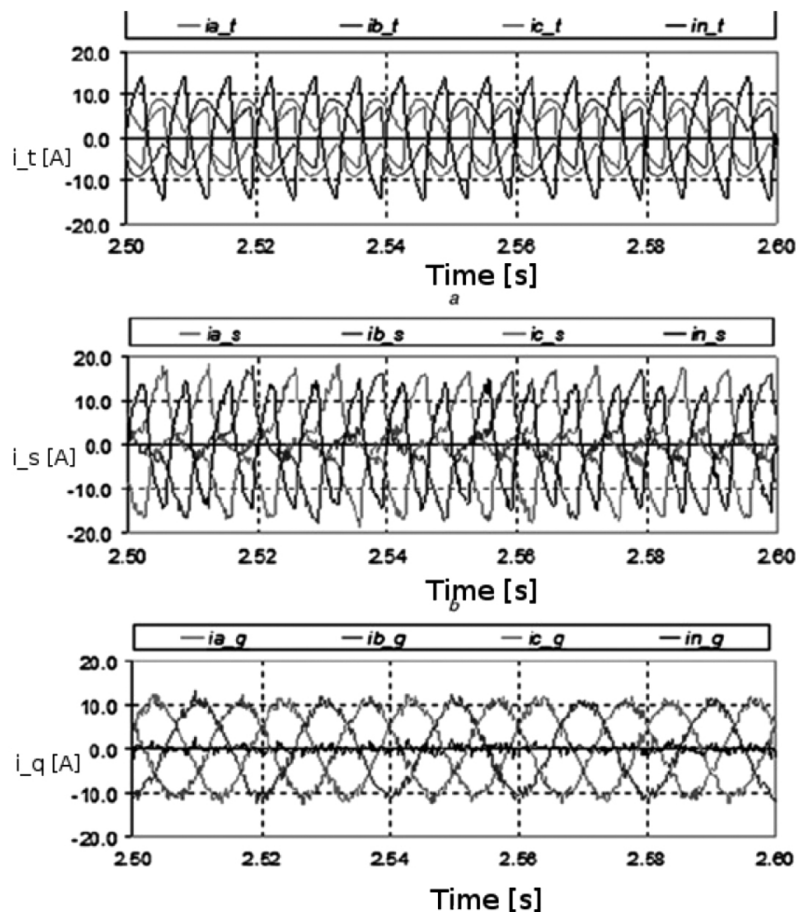


Fig. 3. Example of application of energy storage in higher harmonics and current unbalance compensation, i_t – current of load, i_s – energy storage current, i_q – supply network current [18]

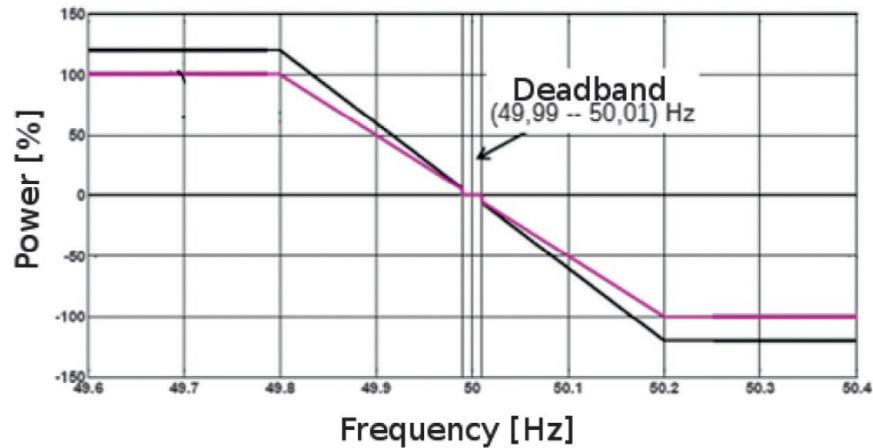


Fig. 4. An example of the frequency adjustment strategy adopted for a flywheel [19]

components (transformer lines). Energy storage adjustment criteria, e.g.:

- reverse power flow reduction in radial networks with large numbers of RES, in particular by the supply transformer [20]
- shifting electrical energy generation to peak periods, which enables maximising electrical energy generation from renewable energy sources [21]
- reduction of stochastic RES power variability and increase in local energy safety security of the network [18–22]
- reduction of errors resulting from wrong weather forecasts [25, 26].

It is possible to reduce the above-mentioned problems significantly. The above-mentioned criteria can be used as optimisation criteria.

f. Emergency power supply

Energy storage can be used as intervention sources for emergency power supply. In this case, the criteria to consider include: priority consumer supply security, SAIDI and SAIFI supply reliability indicators, optionally help in system reconstruction (option to supply small generation units). Since the main operating condition for emergency sources is standby at full charge, the most suitable is storage with a low self-discharge rate.

g. Overload elimination

An increased demand for electrical energy in the case of an under-capitalised network infrastructure results in increased

power losses and often enough in a significant overload of its components. Installing energy storage can be an interesting option of network upgrade. Proper selection of storage power and placement can prevent or postpone network reconstruction, as well as eliminate transmission component overloads. To select energy storage placement and parameters, the following criteria can be used:

- reduction of losses in the distribution network is very often an optimisation criterion. Installing energy storage can prevent the flow of the collected energy through network transmission components, in particular if storage is located near the consumer. The essence of this criterion is that the placement of energy storage is to ensure the least possible losses due to power distribution. The qualitative indicator are energy losses, which can be directly converted into profits for the operator [5, 7, 9, 11, 13, 27–30].
- increased throughput of transmission lines – elimination of the most overloaded transmission elements in networks [31, 32].

g. Programmed operation

In this case the optimisation criterion is based on utilising periodical variability of energy prices. It is linked to the purchase (storage charging) of energy at a lower price, i.e. during load valleys, and sale of energy (storage discharge) at a higher price, i.e. during load peaks [5, 14, 28, 32]. The optimisation of storage size is determined by the price difference and the placement

	NaS battery	Li-on battery	Lead-acid battery	Super-capacitor	Flywheel
Load balancing	+	+	+	-/+	-/+
Energy quality improvement	-/+	-/+	-	+	+
Frequency adjustment	-	-/+	-	+	+
Operation with RES	-/+	+	-	-/+	-/+
Emergency power supply	-	+	+	-/+	-
Overload elimination	-/+	+	-/+	-/+	-/+
Programmed operation	+	+	+	-	-

Tab. 2. The usability level of a specific type of storage according to the adopted optimisation criterion

should be selected to prevent introducing additional electrical energy quality disturbances caused by storage operation.

Tab. 2 contains a summary of the above-described criteria for selecting storage with an indication of the usability of the level of a given type of storage for the adopted optimisation criterion.

4. Costs due to the installation of energy storage

Apart from the already-mentioned criteria, every storage placement and size optimisation algorithm includes the cost criterion. The cost of installation and operation of each of the discussed storage types is different and optimisation algorithms aim at minimising this amount. The cost of storage consists of fixed and variable costs [1]:

a. Fixed costs:

- power [kW]
- storage energy [kWh]
- efficiency [%]
- self-discharge rate [%/day]
- maximum discharge depth [%]
- storage installed power cost [PLN/kWh]
- converter costs [PLN/kW]

b. Variable costs:

- number of cycles [1/day]
- service life [years]
- interest rate [%]
- usage costs [%/year]
- electrical energy cost [PLN/kWh].

Fixed costs are related to such characteristics of storage as: self-discharge rate and maximum discharge depth, which depends on the selection of storage type. The selection of the type is determined by the needs and application possibilities. In optimising the selection of energy storage parameters and placement, the following should be included as factors generating fixed costs:

- number of energy storage units installed in the network. This is the basic criterion used in optimisation. It is assumed that the required qualitative parameters or intended profit (in case of programmed operation) should be met at the least possible fixed cost, including with the smallest number of installed energy storage units [9, 11, 27, 28, 34]
- total installed capacity and total power of energy storage [9, 20].
- variable costs depend on external factors, i.e. electrical energy costs or the interest rate, which are independent and of which the value cannot be influenced in the optimisation of energy storage parameters and placement. Other above-mentioned costs depend on usage intensity. To reduce variable costs in optimisation, the following can be included:
- minimisation of charge/discharge cycles (criterion used mainly for battery packs). The idea of optimisation is to obtain the maximum profits related to network operation improvement in exchange for the cost of the least possible consumption of energy storage
- discharge depth (criterion used both for battery packs and flywheel) [11, 12, 28, 32, 35–37].

5. Summary

The comparison of energy storage available on the market (Tab. 1) that can be installed in a distribution network points to diverse physical properties of each type of storage. This is also connected to different application possibilities of each type of energy storage. In this paper, the possibilities of using storage to meet certain general criteria were described: load balancing, energy quality improvement, frequency adjustment, operation with RES, emergency power supply, load elimination or programmed operation. A specific type of storage was assigned to each criterion analysed. The main components of costs related to the installation and operation of storage were described and the main methods of reducing them were discussed.

REFERENCES

1. Fuchs G. et al., "Technology overview on electricity storage", ISEA Aachen Juni, 2012.
2. Szczerbowski R., Ceran B., "Możliwości i perspektywy magazynowania energii w generacji rozproszonej" [Opportunities and prospects for energy storage in distributed generation], *Logistyka* [Logistics] 2014, No. 4.
3. Rui H., Wellssow W.H., "Assessing distributed storage management in LV grids using the smart grid metrics framework", PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.
4. Barnes A.K. et al., "Placement of energy storage coordinated with smart PV inverters", Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES, 2012.
5. Qing Z. et al., "Optimal siting & sizing of battery energy storage system in active distribution network", Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES, 2013.
6. Deeba S. et al., "Evaluation of Technical and Financial Benefits of Battery-Based Energy Storage Systems in Distribution Networks", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10, Issue 8, 2016.
7. Thrampoulidis C., Bose S., Hassibi B., "Optimal placement of distributed energy storage in power networks", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 61, No. 2, 2016.
8. Marra F. et al., "Energy storage options for voltage support in low-voltage grids with high penetration of photovoltaic", Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on, 2012.
9. Giannitrapani A. et al., "Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Issue 99, 2016.
10. Nazari Pouya H. et al., "Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation", 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015.
11. Nick M., Cherkaoui R., Paolone M., "Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 72, 2015.
12. Barnes A.K., Balda C., "Placement of distributed energy storage via multidimensional scaling and clustering", Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2014 International Conference on, 2014.

13. Karanki S.B. et al., "Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, 2013.
14. Abad M.S.S. et al., "Optimal sizing of distributed energy storage with consideration of demand response in distribution systems", Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on, 2016.
15. Lamberti F. et al., "Impact analysis of distributed PV and energy storage systems in unbalanced LV networks", PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.
16. Chua K.H. et al., "Energy storage system for mitigating voltage unbalance on low-voltage networks with photovoltaic systems", *IEEE Transactions on Power Delivery Journal*, Vol. 27, No. 4, 2012.
17. Joshi K.A., Pindoriya N.M., "Day-ahead dispatch of Battery Energy Storage System for peak load shaving and load leveling in low voltage unbalance distribution networks", 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015.
18. Wasiak I., Pawelek R., Mienski R., "Energy storage application in low-voltage microgrids for energy management and power quality improvement", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, No. 3, 2014.
19. Wandelt F. et al., "Comparison of flywheels and batteries in combination with industrial plants for the provision of Primary Control Reserve", PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.
20. Zhang Y. et al., "Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10, Issue 8, 2016.
21. Torchio M., Magni L., Raimondo D.M., "A mixed integer SDP approach for the optimal placement of energy storage devices in power grids with renewable penetration", American Control Conference (ACC), 2015.
22. Nguyen N.T. et al., "Sensitivity analysis on locations of Energy Storage in power systems with wind integration", Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on, 2015.
23. Sun Q. et al., "Optimal Placement of Energy Storage Devices in Microgrids via Structure Preserving Energy Function", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 12, No. 3, 2016.
24. Gantz J.M., Amin S.M., Giacomoni A.M., "Optimal mix and placement of energy storage systems in power distribution networks for reduced outage costs", 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.
25. Bludszuweit H., Domínguez-Navarro J.A., "A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 3, 2011.
26. Jabr R.A., Karaki S., Korbane J.A., "Robust multi-period OPF with storage and renewables", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 5, 2015.
27. Zhao H. et al., "Optimal siting and sizing of Energy Storage System for power systems with large-scale wind power integration", PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.
28. Giannitrapani A. et al., "Algorithms for placement and sizing of energy storage systems in low voltage networks", 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2015.
29. Grillo S., Pievatolo A., Tironi E., "Optimal Storage Scheduling Using Markov Decision Processes", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 7, Issue 2, 2016.
30. Fan Z., Lei Z., "Study on power energy storage allocation of weak power distribution grid with high-density distributed generation integration", Electricity Distribution (CICED), 2016 China International Conference on, 2016.
31. Pandžić H., "Near-optimal method for siting and sizing of distributed storage in a transmission network", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 5, 2015.
32. Bose S. et al., "Optimal placement of energy storage in the grid", 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2012.
33. Gonçalves J., Neves L., Martins A.G., "Multiobjective Methodology for Assessing the Location of Distributed Electric Energy Storage", European Conference on the Applications of Evolutionary Computation, 2015.
34. Nick M., Cherkaoui R., Paolone M., "Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 5, 2014.
35. Mohammadi F. et al., "Allocation of Centralized Energy Storage System and Its effect on Daily Grid Energy Generation Cost", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, Issue 3, 2017.
36. Wogrin S., Gayme D.F., "Optimizing storage siting, sizing, and technology portfolios in transmission-constrained networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 6, 2015.
37. Wang L. et al., "Coordination of Multiple Energy Storage Units in a Low-Voltage Distribution Network", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 6, 2015.
38. "Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci" [Conditions for using and operating the grid, and planning its development], IRIESP 2012.



Agata Szultka

Gdańsk University of Technology

e-mail: agata.szultka@pg.gda.pl

Graduated with an MSc. degree from the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology (2015). Currently a PhD student at the Department of Power Engineering. Her interests include problems related to power system operation, energy quality improvement and energy storage.

Robert Małkowski

Gdańsk University of Technology

e-mail: robert.malkowski@pg.gda.pl

He graduated with an MSc. degree from the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology (1999). Four years later he got his PhD. Currently he is an employee of the Department of Power Engineering at Gdańsk University of Technology and a member of the LINTE² team.

At present his research interests are focused around the problems related to the control of power system operation, including in particular the issues connected to the adjustment of voltage levels and passive power distribution in the power system.

Seweryn Szultka

Gdańsk University of Technology

e-mail: seweryn.szultka@pg.gda.pl

PhD student at the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology. Graduate of power engineering at the Faculty of Mechanics and electrical engineering of the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology. His research interests include smart buildings, electrical systems and in particular heat exchange in electrical equipment.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 86–92. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Wskaźniki jakościowe wykorzystywane przy wyborze lokalizacji oraz parametrów zasobników energii instalowanych w sieciach dystrybucyjnych

Autorzy

Agata Szultka
Robert Małkowski
Seweryn Szultka

Słowa kluczowe

jakość energii elektrycznej, sieci dystrybucyjne, zasobniki energii

Streszczenie

W ostatnich latach nastąpił rozwój technologii związanej z magazynowaniem energii. Ciągłe udoskonalanie dostępnych na rynku rozwiązań spowodowało poszerzenie możliwości wykorzystania zasobników energii. Coraz częściej znajdują one zastosowanie również w sieci dystrybucyjnej. Niniejsze opracowanie zawiera syntetyczny opis właściwości fizycznych zasobników energii stosowanych w sieciach dystrybucyjnych. Omówiono również wiele kryteriów stosowanych w algorytmach wykorzystywanych w celu określenia lokalizacji i parametrów zasobników energii. W syntetyczny sposób pokazano poziom przydatności danego typu zasobnika do realizacji przyjętego kryterium optymalizacyjnego.

Data wpływu do redakcji: 21.03.2017

Data akceptacji artykułu: 28.06.2017

Data publikacji online: 23.07.2018

1. Wstęp

Ciągły rozwój technologii zasobników energii elektrycznej skutkuje zwiększeniem ich wydajności, funkcjonalności i sukcesywnym spadkiem cen. Wszystko to powoduje, że operatorzy sieci dystrybucyjnych coraz częściej rozważają ich zastosowanie w celu poprawy parametrów jakościowych dostarczanej energii. Do tej pory powstało na świecie wiele algorytmów pozwalających wyznaczyć miejsca lokalizacji, jak i parametry zasobnika. Optymalizacja parametrów i lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej wymaga nie tylko uwzględnienia korzyści płynących z poprawy parametrów jakościowych energii elektrycznej czy zysków związanych z obrotem energią, ale także kosztów, jakie pociąga za sobą instalacja i eksploatacja zasobnika. W artykule podjęto próbę usystematyzowania wskaźników jakościowych wykorzystywanych w metodach optymalizacyjnych, stosowanych przy wyborze lokalizacji oraz parametrów zasobników energii. Dokonano porównania zasobników energii pod względem możliwości ich wykorzystania do poprawy jakości energii w zależności od przyjętego kryterium optymalizacji.

2. Rodzaje zasobników energii oraz ich możliwości aplikacji

W sieci dystrybucyjnej najczęściej mają zastosowanie trzy rodzaje zasobników energii: baterie akumulatorów, superkondensatory oraz koła zamachowe. Czwartym typem zasobnika jest nadprzewodnikowy zasobnik energii – SMES (ang. *Superconductive Magnetic Energy Storage*). Ze względów ekonomicznych (bardzo wysoki koszt) praktyczne zastosowanie instalacji tego typu w sieci

dystrybucyjnej jest bardzo ograniczone. Mając to na uwadze, w artykule skupiono się jedynie na pierwszych trzech typach zasobników. Każdy z wymienionych zasobników charakteryzuje się innymi właściwościami dynamicznymi, przez co również możliwościami aplikacyjnymi. W tab. 1 przedstawiono wybrane cechy zasobników energii dla kilku najbardziej rozpowszechnionych rodzajów baterii akumulatorów (NaS, Li-on, PbSO₄), superkondensatora oraz koła zamachowego. Baterie akumulatorów w porównaniu z superkondensatorem czy kołem zamachowym charakteryzują się znacznie mniejszą liczbą cykli ładowania/rozładowania, a także posiadają mniejszy współczynnik samorozładowania. Wobec tego zainstalowanie baterii akumulatorów będzie bardziej adekwatne do zadań związanych z magazynowaniem energii w dłuższych okresach czasu (rzędu paru godzin) niż do zadań związanych z szybką regulacją parametrów jakościowych energii (np. częstotliwości, napięcia).

Koła zamachowe charakteryzuje bardzo wysoka żywotność i gęstość mocy. Do wad możemy zaliczyć przeciętne wartości magazynowanej energii oraz wysoki współczynnik samorozładowania. Sprawdzają się w zastosowaniach, które wymagają dostarczenia lub odebrania bardzo dużej mocy w krótkim czasie, z dużą liczbą cykli ładowania/rozładowania i krótkim okresem magazynowania energii.

Superkondensator w porównaniu z baterią akumulatorów jest w stanie wykonać bardzo dużą liczbę cykli. Oprócz tego charakteryzuje się dużą gęstością mocy, ale za to niską gęstością energii. Ma zastosowanie przy krótkoterminowym magazynowaniu energii, związanym z dużą gęstością mocy ładowania/rozładowania. Coraz częściej

superkondensatory instaluje się hybrydowo z bateriami akumulatorów, w celu przedłużenia żywotności baterii oraz zwiększenia zakresu regulacyjnego całej instalacji.

3. Możliwości zastosowania wybranych zasobników do poprawy jakości pracy sieci dystrybucyjnej

Zasobniki energii mogą poprawiać jakość pracy sieci w różnych sytuacjach. Omówione zostaną wybrane zagadnienia związane z pracą sieci dystrybucyjnej. Różnorodny charakter zaburzeń w pracy sieci oraz właściwości dynamicznych zasobników determinuje zastosowanie konkretnego typu zasobnika, co opisano poniżej.

a. Wyrównywanie obciążeń

Wyrównywanie obciążeń polega na generacji lub poborze mocy czynnej przez zasobnik, odpowiednio w czasie szczytu lub doliny obciążenia. Wyrównywanie obciążenia wpływa na poprawę pracy sieci, m.in. poprzez zmniejszenie strat, zwiększenie lokalnej stabilności napięciowej lub też eliminację przeciążeń. Możemy wyróżnić dwa kryteria działania zasobnika:

- pokrywanie szczytowych obciążeń w systemie (ang. *Peak Shaving*) – rys. 1a
- przesunięcie obciążenia na okresy pozaszczytowe (ang. *Load Levelling*) – rys. 1b.

Do realizacji celu, jakim jest przenoszenie szczytowego obciążenia na dolinę nocną, korzystniejsze jest zastosowanie baterii akumulatorów, a w przypadku ograniczenia szczytowego obciążenia w węźle możliwe jest zastosowanie koła zamachowego bądź superkondensatora. Wskaźnikiem jakościowym jest ograniczenie maksymalnej mocy w węźle do P_{\max} [4–7].

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 86–92. When referring to the article please refer to the original text.

PL

b. Poprawa jakości energii

W KSE wymagania jakościowe energii elektrycznej opisano w *Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej* (IRiESD). Niedotrzymanie parametrów jakościowych energii skutkuje nałożeniem na operatora kar finansowych. W celu uniknięcia dodatkowych kosztów operator może zainstalować w sieci dystrybucyjnej zasobniki energii, które wspomogą pracę sieci. Możliwe jest zastosowanie następujących kryteriów:

- **zmniejszenie wartości napięcia w węzłach**, w których napięcie osiąga wartość przekraczającą górną dopuszczalną granicę (zdefiniowaną przez IRiESD). Kryterium to stosowane głównie w sieciach o dużej penetracji mikroźródeł. Założenie powinno zostać spełnione przy użyciu jak najmniejszej mocy i licznie zainstalowanych zasobników energii, a wskaźnikiem poprawności działania optymalizacji jest poprawna wartość napięcia we wszystkich węzłach w sieci:

$$V_i \leq V_{\max} \quad (1)$$

- **zwiększenie wartości napięcia w węzłach**, w których napięcie osiąga wartość poniżej dolnej dopuszczalnej granicy. Kryterium jest stosowane w sieciach wiejskich, gdzie długości linii są znaczne, a także w sieciach mocno obciążonych. Kryterium stanowi zainstalowanie jak najmniejszej liczby

zasobników przy jednoczesnym spełnieniu kryterium:

$$V_i \geq V_{\min} \quad (2)$$

gdzie: V_i — napięcie w i -tym węzle w sieci, V_{\max} — napięcie minimalne, jakie może występować w węzle [4, 5, 8–14].

Ilustrację graficzną efektów zastosowania zasobnika energii (ZE) do regulacji napięcia w węzle pokazano na rys. 2.

- **kompensacja wyższych harmonicznych prądu oraz kompensacja asymetrii obciążenia** (rys. 3). Wartością kryterialną jest wartość współczynnika THD w każdej fazie oraz różnica prądu (obciążenia) między fazami [16–18].

c. Regulacja częstotliwości

Jednym z parametrów jakościowych energii elektrycznej jest częstotliwość. Zakres dopuszczalnych odchyłek częstotliwości jest stosunkowo niewielki [38]. Odchyłka częstotliwości jest wynikiem zaburzenia bilansu mocy czynnej w systemie. Podstawowymi obiektami wykorzystywanymi do utrzymania bilansu mocy czynnej są jednostki wytwórcze. Biorąc one udział w regulacji pierwotnej i/lub wtórnej.

Energia zgromadzona w zasobnikach energii może być również wykorzystana w procesie regulacji częstotliwości. W takiej sytuacji kryterium działania układów regulacji zasobników byłaby odchyłka częstotliwości.

Zasobniki energii mogą brać udział w regulacji pierwotnej zarówno w podstawowym, jak i rozszerzonym paśmie regulacji. Przykład strategii regulacji częstotliwości przyjętej dla koła zamachowego pokazano na rys. 4.

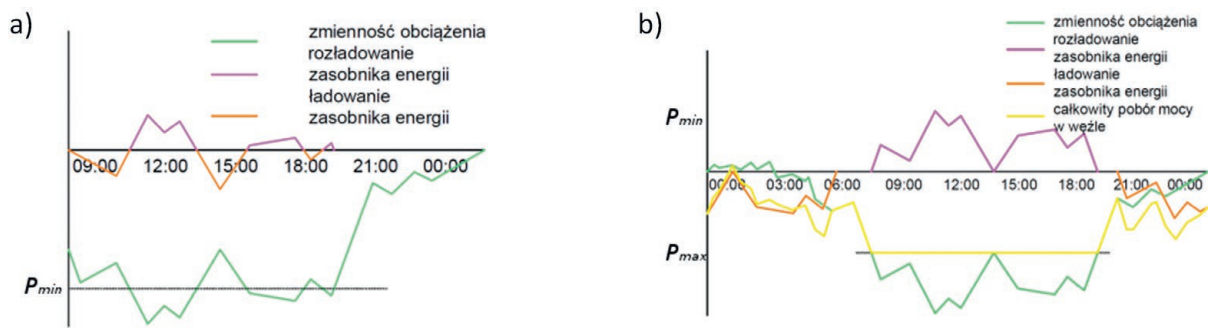
d. Praca z OZE

Wzrost nasycenia odnawialnych źródeł energii, instalowanych w sieci dystrybucyjnej, w wielu przypadkach przyczynił się do istotnych zmian w charakterze jej pracy. Duża sumaryczna moc źródeł odnawialnych może powodować okresowe zmiany typowego kierunku przesyłu energii od GPZ do odbiorcy. W skrajnych przypadkach może to prowadzić do przeciążeń elementów sieci (linii transformatorów). Kryteria regulacji zasobników energii, np.:

- ograniczenie przepływu odwrotnego mocy w sieciach promieniowych z dużą liczbą OZE, zwłaszcza przez transformator zasilający [20]
- przesunięcie produkcji energii elektrycznej na okresy szczytowe, dzięki temu można zmaksymalizować wytwarzanie energii elektrycznej przez źródła odnawialne [21]
- zmniejszenie stochastycznej zmienności mocy OZE i zwiększenie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego sieci [18–22]
- zmniejszenie błędów wynikających z błędnych prognoz pogody [25, 26].

	Bateria NaS	Bateria Li-on	Bateria kwasowo-olowiowa	Superkondensator	Koło zamachowe
Gęstość energii Wh/kg	100–250	60–200	30–45	1–15	5–30
Gęstość energii Wh/l	150–300	200–350	50–100	10–20	20–80
Gęstość mocy W/l	120–160	100–3500	90–700	40 000–120 000	5000
Czas ładowania	1 min – 8 h	1 min – 8 h	1 min – 8 h	ms–min	s – godz.
Czas rozładowania	30 min – 8 h	15 min – 4 h	10 s – 4 h	< 30 s	s – min
Samorozładowanie	10%/dzień	5%/msc	0,1–0,4%/dzień	do 25% w pierwszych 48 h	5–15%/h
Sprawność %	75–80	83–86	70–85	85–94	80–95
Liczba cykli	5000–10 000	1000–5000	500–2000	10 ⁴ –10 ⁶	kilka milionów
Głębokość rozładowania %	do 100	do 100	70	75	75
Czas życia	15–20 lat	5–20 lat	5–15 lat	15 lat	15–20 lat
Koszt instalacji PLN/kWh	2000–40 000	1200–32 000	400–1000	40 000–80 000	4000

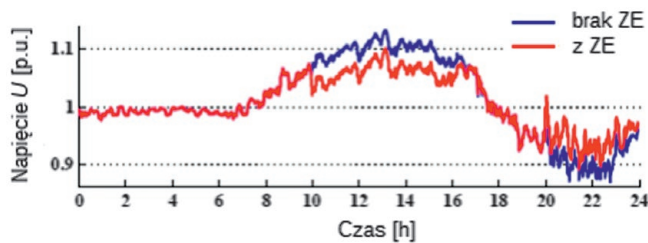
Tab. 1. Przegląd właściwości wybranych zasobników energii [1, 2]



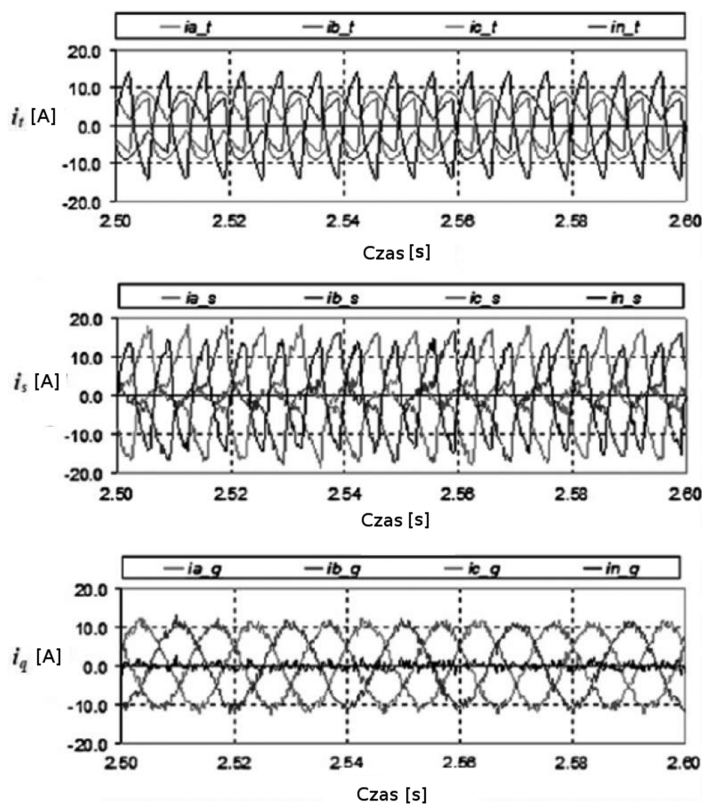
Rys. 1. Wyrównywanie obciążeń; a) ograniczenie szczytowego obciążenia, b) przeniesienie szczytowego obciążenia na dolinę nocną [3]

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 86–92. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 2. Efekt poprawy poziomu napięć w węzle w wyniku zastosowania zasobnika energii [15]



Rys. 3. Przykład zastosowania zasobników energii do kompensacji wyższych harmonicznych oraz asymetrii prądów, i_t – wpadkowy prąd odbioru, i_s – prąd zasobnika energii, i_q – prąd sieci zasilającej [18]

Możliwe jest znaczne ograniczenie wspomnianych problemów. Wymienione kryteria mogą być stosowane jako kryteria optymalizacji.

e. Zasilanie awaryjne

Zasobniki energii można wykorzystać jako źródła interwencyjne do zasilania awaryjnego. Należy przy tym uwzględnić takie kryteria, jak: pewność zasilania odbiorców

priorytetowych, wskaźniki niezawodności zasilania SAIDI i SAIFI, ewentualnie pomoc w odbudowie systemu (możliwość zasilenia małych jednostek wytwórczych). Ponieważ głównym stanem pracy dla źródeł awaryjnych jest stan oczekiwania w stanie pełnego naładowania, najlepiej sprawdzą się do tego celu zasobniki o niskim współczynniku samorozładowania.

f. Eliminacja przeciążeń

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w sytuacji niedoinwestowania infrastruktury sieciowej skutkuje wzrostem strat mocy i niejednokrotnie znacznym przeciążeniem jej elementów. Instalacja zasobników energii może stanowić ciekawą alternatywę dla modernizacji sieci. Właściwy dobór mocy i lokalizacji zasobnika pozwoli uniknąć lub odroczyć w czasie przebudowę sieci, a także zlikwidować przeciążenia elementów przesyłowych. W celu doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii można wykorzystać następujące kryteria:

- zmniejszenie strat w sieci dystrybucyjnej stanowi bardzo często kryterium optymalizacji. Instalacja zasobnika energii pozwala na uniknięcie przepływu zgromadzonej energii przez elementy przesyłowe sieci, zwłaszcza jeżeli zasobnik umieszczony jest blisko odbiorcy. Istotą tego kryterium jest także umieszczenie zasobników energii, aby w wyniku rozprawy mocy w sieci uzyskać jak najmniejsze straty. Wskaźnikiem jakościowym są straty energii, które bezpośrednio można przeliczyć na korzyści dla operatora [5, 7, 9, 11, 13, 27–30].
- zwiększenie przepustowości ciągów przesyłowych – wyeliminowanie najbardziej przeciążonych elementów przesyłowych w sieciach [31, 32].

g. Praca programowa

Kryterium optymalizacyjne w tym przypadku opiera się na wykorzystaniu okresowej zmienności cen energii. Wiąże się ona z zakupem (ładowaniem zasobnika) energii po niższej cenie, czyli w czasie doliny obciążenia, a sprzedażą energii (rozładowywanie zasobnika) po wyższej cenie, czyli w czasie szczytu obciążenia [5, 14, 28, 32]. Optymalizacja wielkości zasobnika jest uwarunkowana różnicą cen, a lokalizacja powinna być tak dobrana, aby nie wprowadzać do sieci dodatkowych zakłóceń jakości energii elektrycznej spowodowanych pracą zasobnika.

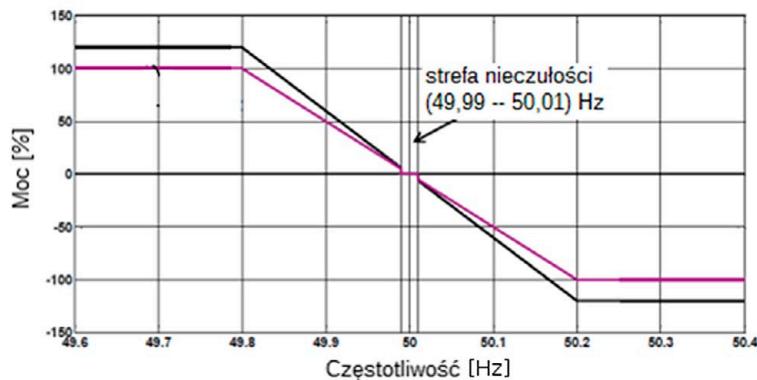
W tab. 2 zestawiono opisane powyżej kryteria doboru zasobników ze wskazaniem

	Bateria NaS	Bateria Li-on	Bateria kwasowo-ołowiowa	Superkondensator	Koło zamachowe
Wyrównywanie obciążeń	+	+	+	-/+	-/+
Poprawa jakości energii	-/+	-/+	-	+	+
Regulacja częstotliwości	-	-/+	-	+	+
Praca z OZE	-/+	+	-	-/+	-/+
Zasilania awaryjne	+	+	+	-/+	-
Eliminacja przeciążeń	-/+	+	-/+	-/+	-/+
Praca programowa	+	+	+	-	-

Tab. 2. Poziom przydatności konkretnego typu zasobnika do przyjętego kryterium optymalizacyjnego

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 86–92. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 4. Przykład strategii regulacji częstotliwości przyjętej dla koła zamachowego [19]

poziomu przydatności danego typu zasobnika do przyjętego kryterium optymalizacyjnego.

4. Koszty wynikające z instalacji zasobników energii

Poza wymienionymi już kryteriami, każdy algorytm optymalizujący lokalizację i wielkość zasobnika uwzględnia kryterium kosztowe. Koszt instalacji i eksploatacji każdego z omawianych typów zasobników jest inny, a algorytmy optymalizacyjne dążą do minimalizacji sumy kosztów. Na koszt zasobnika składają się koszty stałe oraz koszty zmienne [1]:

a. Koszty stałe:

- moc [kW]
- energia zasobnika [kWh]
- sprawność [%]
- współczynnik samorozładowania [%/dzień]
- maksymalna głębokość rozładowania [%]
- koszt zainstalowanej mocy zasobnika [PLN/kWh]
- koszty przekształtnika [PLN/kW]

b. Koszty zmienne:

- liczba cykli [1/dzień]
- czas życia [lata]
- stopa procentowa [%]
- koszty użytkowania [%/rok]
- koszt energii elektrycznej [PLN/kWh].

Koszty stałe związane są z takimi cechami zasobnika, jak: współczynnik samorozładowania i maksymalna głębokość rozładowania, które są związane z doбором rodzaju zasobnika. Dobór rodzaju zdeterminowany jest przez potrzeby oraz możliwości aplikacyjne. W optymalizacji doboru parametrów oraz lokalizacji zasobników energii jako czynniki odpowiedzialne za koszty stałe należy uwzględnić:

- liczbę zasobników energii zainstalowanych w sieci. Jest to podstawowe kryterium wykorzystywane przy optymalizacji. Zakłada się, że osiągnięcie wymaganych parametrów jakościowych energii lub zamierzonego zysku (w przypadku pracy programowej) powinno odbyć się przy jak najmniejszym koszcie stałym, czyli także przy jak najmniejszej liczbie zainstalowanych zasobników energii [9, 11, 27, 28, 34]
- zainstalowaną sumaryczną pojemność oraz sumaryczną moc zasobników energii [9, 20].

Koszty zmienne zależą od czynników zewnętrznych, tj. koszt energii elektrycznej czy stopa procentowa, które są niezależne i na ich wartości nie można wpłynąć przy optymalizacji parametrów i lokalizacji zasobników energii. Pozostałe wymienione koszty zmienne zależą od intensywności użytkowania. W celu ograniczenia kosztów zmierzających w optymalizacji można uwzględnić:

- minimalizację wykonywanych cykli ładowania/rozładowania (kryterium stosowane głównie dla baterii akumulatorów). Ideą optymalizacji jest uzyskanie maksymalnych zysków związanych z poprawą pracy sieci, w zamian za koszt jak najmniejszego zużycia zasobnika energii
- głębokość rozładowania (kryterium stosowane zarówno dla baterii akumulatorów, jak i koła zamachowego) [11, 12, 28, 32, 35–37].

5. Podsumowanie

Porównanie dostępnych na rynku zasobników energii (tab. 1), które można zainstalować w sieci dystrybucyjnej, wskazuje na odmienne fizyczne właściwości każdego z rodzajów zasobników. Wiąże się to także z różnymi możliwościami aplikacyjnymi każdego typu zasobnika energii. W artykule opisano możliwości wykorzystania zasobników do spełnienia odpowiednich kryteriów ogólnych: wyrównania obciążen, poprawy jakości energii, regulacji częstotliwości, pracy z OZE, zasilania awaryjnego, eliminacji obciążeń lub pracy programowej. Dla każdego z omawianych kryteriów przyporządkowano konkretny rodzaj zasobnika. Opisano główne składniki kosztów związanych z instalacją i eksploatacją zasobników, a także omówiono główne sposoby ich ograniczania.

Bibliografia

1. Fuchs G. i in., Technology overview on electricity storage, ISEA Aachen Juni, 2012.
2. Szczerbowski R., Ceran B., Możliwości i perspektywy magazynowania energii w generacji rozproszonej, *Logistyka* 2014, nr 4.
3. Rui H., Wellsow W.H., Assessing distributed storage management in LV grids

using the smart grid metrics framework, PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.

4. Barnes A.K. i in., Placement of energy storage coordinated with smart PV inverters, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES, 2012.
5. Qing Z. i in., Optimal siting & sizing of battery energy storage system in active distribution network, Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES, 2013.
6. Deeba S. i in., Evaluation of Technical and Financial Benefits of Battery-Based Energy Storage Systems in Distribution Networks, *IET Renewable Power Generation* 2016, Vol. 10, Issue 8.
7. Thrampoulidis C., Bose S., Hassibi B., Optimal placement of distributed energy storage in power networks, *IEEE Transactions on Automatic Control* 2016, Vol. 61, No. 2.
8. Marra F. i in., Energy storage options for voltage support in low-voltage grids with high penetration of photovoltaic, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on, 2012.
9. Giannitrapani A. i in., Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks, *IEEE Transactions on Smart Grid* 2016, Issue 99.
10. Nazaripouya H. i in., Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015.
11. Nick M., Cherkaoui R., Paolone M., Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2015, Vol. 72.
12. Barnes A.K., Balda C., Placement of distributed energy storage via multidimensional scaling and clustering, Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2014 International Conference on, 2014.
13. Karanki S.B. i in., Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, 2013.
14. Abad M.S.S. i in., Optimal sizing of distributed energy storage with consideration of demand response in distribution systems, Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on, 2016.
15. Lamberti F. i in., Impact analysis of distributed PV and energy storage systems in unbalanced LV networks, PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.
16. Chua K.H. i in., Energy storage system for mitigating voltage unbalance on low-voltage networks with photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Power Delivery Journal* 2012, Vol. 27, No. 4.
17. Joshi K.A., Pindoriya N.M., Day-ahead dispatch of Battery Energy Storage System for peak load shaving and load leveling in low voltage unbalance distribution networks, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015.
18. Wasiak I., Pawelek R., Mienski R., Energy storage application in low-voltage

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 86–92. When referring to the article please refer to the original text.

PL

- microgrids for energy management and power quality improvement, *IET Generation, Transmission & Distribution* 2014, Vol. 8, No. 3.
19. Wandelt F. i in., Comparison of flywheels and batteries in combination with industrial plants for the provision of Primary Control Reserve, PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.
 20. Zhang Y. i in., Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration, *IET Renewable Power Generation* 2016, Vol. 10, Issue 8.
 21. Torchio M., Magni L., Raimondo D.M., A mixed integer SDP approach for the optimal placement of energy storage devices in power grids with renewable penetration, American Control Conference (ACC), 2015.
 22. Nguyen N.T. i in., Sensitivity analysis on locations of Energy Storage in power systems with wind integration, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on, 2015.
 23. Sun Q. i in., Optimal Placement of Energy Storage Devices in Microgrids via Structure Preserving Energy Function, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2016, Vol. 12, No. 3.
 24. Gantz J.M., Amin S.M., Giacomoni A.M., Optimal mix and placement of energy storage systems in power distribution networks for reduced outage costs, 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.
 25. Bludszuweit H., Domínguez-Navarro J.A., A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty, *IEEE Transactions on Power Systems* 2011, Vol. 26, No. 3.
 26. Jabr R.A., Karaki S., Korbane J.A., Robust multi-period OPF with storage and renewables, *IEEE Transactions on Power Systems* 2015, Vol. 30, No. 5.
 27. Zhao H. i in., Optimal siting and sizing of Energy Storage System for power systems with large-scale wind power integration, PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, 2015.
 28. Giannitrapani A. i in., Algorithms for placement and sizing of energy storage systems in low voltage networks, 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2015.
 29. Grillo S., Pievatolo A., Tironi E., Optimal Storage Scheduling Using Markov Decision Processes, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2016, Vol. 7, Issue 2.
 30. Fan Z., Lei Z., Study on power energy storage allocation of weak power distribution grid with high-density distributed generation integration, Electricity Distribution (CICED), 2016 China International Conference on, 2016.
 31. Pandžić H., Near-optimal method for siting and sizing of distributed storage in a transmission network, *IEEE Transactions on Power Systems* 2015, Vol. 30, No. 5.
 32. Bose S. i in., Optimal placement of energy storage in the grid, 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2012.
 33. Gonçalves J., Neves L., Martins A.G., Multiobjective Methodology for Assessing the Location of Distributed Electric Energy Storage, European Conference on the Applications of Evolutionary Computation, 2015.
 34. Nick M., Cherkaoui R., Paolone M., Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support, *IEEE Transactions on Power Systems* 2014, Vol. 29, No. 5.
 35. Mohammadi F. i in., Allocation of Centralized Energy Storage System and Its effect on Daily Grid Energy Generation Cost, *IEEE Transactions on Power Systems* 2017, Vol. 32, Issue 3.
 36. Wogrin S., Gayme D.F., Optimizing storage siting, sizing, and technology portfolios in transmission-constrained networks, *IEEE Transactions on Power Systems* 2015, Vol. 30, No. 6.
 37. Wang L. i in., Coordination of Multiple Energy Storage Units in a Low-Voltage Distribution Network, *IEEE Transactions on Smart Grid* 2015, Vol. 6, No. 6.
 38. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci, IRIESP, 2012.

Agata Szultka

mgr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: agata.dzionk@pg.gda.pl

Ukończyła studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2015). Aktualnie odbywa studia doktoranckie w Katedrze Elektroenergetyki. Jej zainteresowania obejmują problemy związane z pracą sieci elektroenergetycznej, poprawą jakości energii oraz z magazynowaniem energii.

Robert Małkowski

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: robert.malkowski@pg.gda.pl

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (1999). Cztery lata później uzyskał stopień doktora. Aktualnie jest pracownikiem Katedry Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej oraz członkiem zespołu laboratorium LINTE². Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół problemów dotyczących sterowania pracą systemu elektroenergetycznego, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z regulacją poziomów napięć oraz rozplywu mocy biernej w systemie elektroenergetycznym.

Seweryn Szultka

mgr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: seweryn.szultka@pg.gda.pl

Doktorant na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki. Absolwent kierunku energetyka na Wydziale Mechanicznym oraz absolwent kierunku elektrotechnika na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W obszarze badań zajmuje się budynkami inteligentnymi, instalacjami elektrycznymi, a w szczególności wymianą ciepła w urządzeniach elektrycznych.