

Technical Aspects of Battery Energy Storage Design in the Light of Experience from the GEKON Project Implementation

Authors

Jacek Jemielity
Łukasz Czapla
Paweł Rozenkiewicz

Keywords

battery energy storage systems (BESS), battery management system (BMS), frequency control

Abstract

The article discusses practical aspects related to the design, installation, and commissioning of battery energy storage, which are new, little-known elements of the power system. The experience gathered in Puck during the launch of the first battery energy storage in the National Power System implemented as part of the national research project GEKON, has been related to the knowledge available in publications on this industry’s development in the world.

DOI: 10.12736/issn.2330-3022.2019203

Received by the editor: 16.05.2019
Received in revised form: 29.04.2019, 02.05.2019
Accepted: 16.05.2019
Available online: 30.10.2019

1. Introduction

There are many pilot project of battery energy storage systems (BESS) now implemented in the Polish National Power System. BESS storage deployment enables the system operator to implement numerous features. Authors point out the need to adapt a storage design’s technical assumptions to its planned applications and the potential sources of income to ensure this expensive investment’s economic profitability.

2. Designing battery energy storage

The number of new BESS storages with various technologies, scales, and purposes is growing worldwide. The storages are operated as separate grid assets or in conjunction with other power system elements (e.g. hybrid generators) [1]. Their appearance has led to the spread of the notion that storage deployment is a multidimensional technical, economic, and legal issue. The development of the BESS system industry depends on building solid foundations for project requirements formulation. With a cursory understanding of the technology, for example, limited to a list of technical performance parameters under various conditions, the executives who decide about the project launch, scale, and objectives are sometimes in a difficult situation, because they do not know the questions they should ask to make an informed decision. Clear guidelines are needed to evaluate the design, so that it is properly priced and feasible, and the designed installation will be of adequate performance. Besides, the existing risk factors should be assessed and valued.

2.1. Technical risk

In a BESS system, not only the choice of the basic technology is important, but also the certainty that the entire system, consisting of components from different manufacturers, will work reliably under real conditions throughout its life cycle. In Tab. 1 the battery energy storage components are listed. At present, despite the huge demand for batteries, production capacity investment in this sector is considered to be at high risk, because it is not clear which technology will be prevailing in the future. This is the reason for the insufficient battery supply. Technological and price changes come quickly. For example, the price of Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) has fallen so much that it is an alternative to lithium batteries, and at the same

No	CONTAINER	DC BATTERY COMPARTMENT	AC/DC CONVERSION SYSTEM	ENERGY MANAGEMENT SYSTEM
1.	Electrical wiring	DC switches	Energy converter	Local SCADA
2.	Control	Protections	Protections	Function library
3.	Air conditioning and ventilation	BMS	AC switches	Communication
4.	Fire protection	Battery modules	MV/LV transformer	Recording

Tab. 1. Battery energy storage components

time this technology adds some flexibility to the project since the VRFB battery current is determined by the reactors' parameters and configuration, and the battery capacity depends on the electrolyte tank sizes, so the storage power and capacity can be shaped more independently. Besides, VRFB batteries have a huge life expectancy of about 40 years, and for the first 20 years of use, they show virtually no signs of wear. Their capacity doesn't decrease with an increasing number of charging cycles, which is the case in lithium batteries.

A necessary element of the technical risk assessment is the possibility of ensuring constant availability of the storage, with declared technical parameters, when in terms of their reliability the BESS system components are connected like battery cells in chains, i.e. in series. Warranty coverage typically focuses on two areas: removing manufacturing defects and maintaining system performance. As their experience grows, operators and other customers will be more able to tie the legitimate project costs and possible penalties to the system performance and reliability. The most protected, most expensive and critical storage component is the battery. Exceeding the maximum allowable battery cell voltage and/or temperature leads to the cell's destruction, which can have such a spectacular form as self-ignition. Unfortunately, a burning lithium cell cannot be extinguished. Therefore, a robust and reliable battery management system (BMS) is extremely important.

2.2. Economic risk

In light of the BESS storage applications available with consideration of the operational requirements and costs, supporting the storage's market roles should be based on an in-depth analysis of the factors limiting its operation (power availability, battery charge management, battery performance degradation). In Tab. 2 the basic energy storage applications are listed and categorized depending on the time scale, into those aiming at energy transfer over time, and at power changes (in real-time).

Appropriate storage financing may require fulfilling several applications at the same time, and such an appropriate storage parameters selection that makes it feasible is an optimization task.

Good engineering practice has a long-term effect on device performance. A system's *round-trip efficiency* (RTE) depends primarily on the technology chosen, but an improper design can reduce its RTE and limit its availability. In addition to rising costs of operation and maintenance, the reduced availability may directly affect the ability to fulfill the energy purchase or service provision contract.

Also, market evolution and/or imposed regulations may negatively affect future energy storage profitability. An example is the modification of the signal of grid voltage frequency's quick control, which made difficult the charge management of storages under such regulation in the network of the American company PJM [2] and resulted in the revenues from existing installations reduced by up to 70%.

Besides, there is a technical risk associated with the implementation of new technologies with a limited set of prior experience. Depending on supply and demand, future energy prices may

INSTANTANEOUS POWER CHANGE	ENERGY TRANSFER OVER TIME
Frequency control Voltage control Local stability improvement RES penetration increase Frequency drop Synthetic inertia	Arbitration RES output transfer over time Peak power cost reduction Power profile optimization Grid flexibility increase Grid investment delay

Tab. 2. Energy storage applications

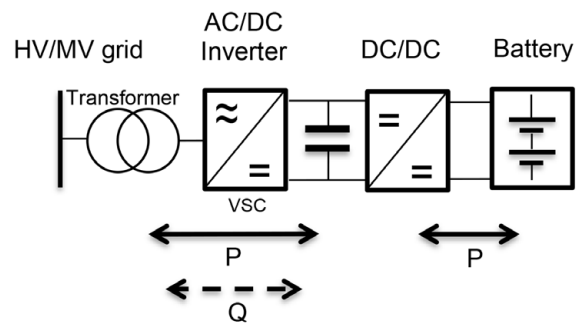


Fig. 1. BESS/grid interface

differ significantly from the current prices, which may also be strongly related to the storage location. The elimination of line overloads caused by the renewable generation may cause the occurrence of differences in prices strongly dependent on the location. Similarly, large photovoltaic generation outputs can periodically result in negative energy prices in some grid nodes, which can be now observed, for example, in California [3].

3. Battery energy storage design

BESS storage is connected to the grid the same way as RES sources, as shown in Fig. 1, with the difference that the active power flow direction depends on the set reference value and the battery charge.

Every battery energy storage is designed individually to meet the needs, so individual storage facilities differ in design. The energy storage installed in Puck, as part of the GEKON project, consists of two containers in which 2/3 of the capacity is occupied by the air-conditioned cell compartments (photo 1). Four cell chains (196 LiFe cells each) are installed in each container and supervised by BMS.

Based on the prior experience, it can be concluded that the optimal housing for a battery compartment would be a refrigerated sea container or a ready-made cold chamber because these devices are manufactured in series and as such are relatively cheap and resistant to changing weather conditions. Versions with a redundancy of refrigeration units are available. However, a design of the energy converter as a separate external unit would eliminate the problem of its ventilation and cooling.

3.1. Battery

Currently, the most common in battery energy storages are lithium cells, connected in series into chains and then in parallel. A cell's characteristics depend on its temperature, age and chemical composition (Tab. 3). Cells should come from one production



Photo 1. View of an energy storage container

series, and the battery module and module rack design should ensure the same operating temperature of all cells in the chain. Before the chain assembly, the cells should be classified according to their characteristics, otherwise, the BMS system may not be able to equalize the individual cell charges during operation.

When designing a storage, the BMS ability to eliminate the cell characteristics dispersion should be checked. In a parallel connection of the cell chains, it should be also checked if the

differences between currents in individual chains are not too large. Simulation tests on a dynamic battery model are advisable, with consideration of the parameter dispersion the temperature impact, to assess the design adequacy. This may be useful if the BESS is to dynamically change the power flow value and direction, e.g. for power/voltage stabilization at a solar farm connection point. Battery models and methods of their parameterization are described in the literature [5, 6]. In a model, the physicochemical phenomena in the cell are replaced by a readable electric equivalent, as in Fig. 2, where a typical lithium-ion cell model is shown. The left part of the figure represents the battery capacity, while the right part maps the cell's $U-I$ characteristics at its operation.

PARAMETER	VALUE
Nominal voltage	3.2V
Capacity	400 Ah
Operating voltage range	min. 2.8 V/max. 3.8 V
Deep disch./char. voltage	2.5V/4V
Optimal charge current (disch.)	<200 A
Max. charge current (disch.)	<1,200 A
Max. operating temperature	65°C
Dimensions [mm]	461 x 285 x 65
Weight	13.5 kg

Tab. 3. Parameters for a single battery cell – LiFeYPO4 (3.2 V/400 Ah)

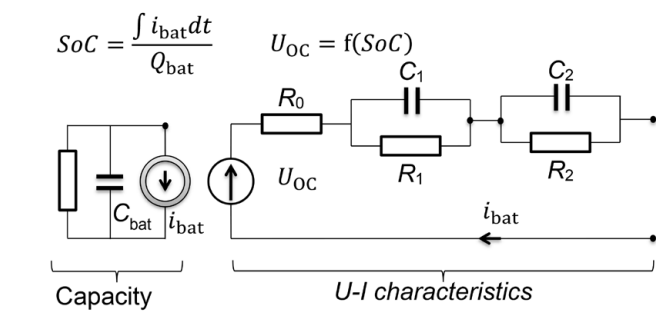


Fig. 2. The electric equivalent of a cell model: C_{bat} – cell capacity, U_{OC} – open-circuit voltage, R_0 – internal resistance, R_1, C_1, R_2, C_2 – elements modeling physico-chemical processes responsible for dynamic voltage drop at the cell [5, 6]

3.2. BMS battery management system

BMS monitors individual battery parameters, primarily the voltages, charge and discharge currents, and each cell temperature. The BMS in an energy storage for the power sector has two important functions: it determines the battery's state of charge (SoC), and balances its cells, i.e. compensates for differences in the states of charge of individual cells, caused by the parameter dispersion or differences in the cell temperatures. The balancing functionality protects the cell against overcharging or discharging.

To determine the SoC, the current is integrated while the cell chain is charging and discharging. The functionality of cell balancing is based on equalizing the SoC of individual cells in the battery chains. This is important because if one cell has reached a critically high or low charge, as a result, the entire chain must

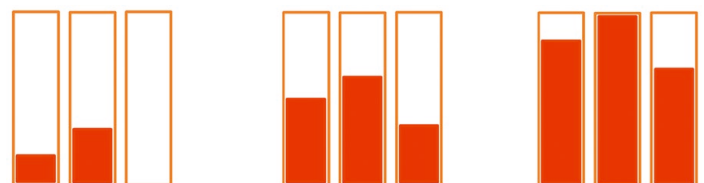


Fig. 3. Battery capacity limitation due to the cell SoC imbalance

be set aside from further charging or discharging (Fig. 3) [4]. The battery shown in the picture can be neither fully discharged (left), nor recharged (right).

Such a cell SoC imbalance reduces the battery’s capacity, which in turn shortens its life cycle. Without proper SoC management of cells, chains, and containers, the storage cannot effectively fulfill its intended functions. Proven BMS solutions should be relied on, for example, the ready-made modules recommended by battery cell manufacturers.

3.3. Energy conversion and power output system

Each energy storage must contain a bi-directional energy converter. When a battery is charged, a suitably actuated converter converts AC electricity (from the AC circuit with the transformer connected to the grid) to DC electricity (to the DC circuit containing the battery cells). When a battery is discharged, the process looks the opposite.

To be able to provide system services, an energy converter should be provided with a communication interface through which the active and reactive power setpoints can be remotely set, as well as the frequency set point in the island mode. A converter should also enable a smooth change of the energy transfer direction at operation.

Contemporary energy storages may have high nominal powers of the order of single mega-volt-amperes, which causes many complications related to the design of a suitably large converter. It seems more advantageous to install several converters in parallel, each of which can supply a separate chain of cells. This solution is cheaper, simpler and more flexible because it facilitates the charge control of individual cell chains, and in the event of a chain failure does not turn off the entire container.

For the island operation and artificial inertia function, the energy converter’s rated power must be oversized.

3.4. Energy storage Supervision from the local SCADA system

The local SCADA system enables storage operation control by switching storage operation modes, remote actuation of switches in the DC circuit (containing battery cell chains) and sending control signals to the energy converter, such as converter on/off, active and reactive power setpoints, frequency setpoint, voltage set point (Fig. 4).

Another function of this system is monitoring and recording of signals of failures, interlocks, warnings and operating statuses for the energy storage key components, i.e. BMS system, energy converter, and air conditioning.

The local SCADA system also enables communication with master systems that provide remote supervision over the energy storage.

4. System service provision

One of the most important issues when planning the construction of an energy storage is the proper assessment of the project’s financial profitability. An energy storage can successfully provide many system services, which at the right tariffs can ensure the costly project’s profitability. The main system services to be implemented in a storage should be provided for already at the design stage so that all storage components are properly selected.

The main services include: participation in frequency control, smoothing active power waveforms generated by distributed sources [7], reduction of electricity demand peaks or operation as a voltage and frequency source (for island operation of a separate fragment of the power network). In many countries, voltage frequency control is the most easily available source of income that warrants BESS projects’ economic profitability.

4.1. Grid voltage frequency control

Power system frequency control by energy storage has some advantages, the most important of which is the extremely short

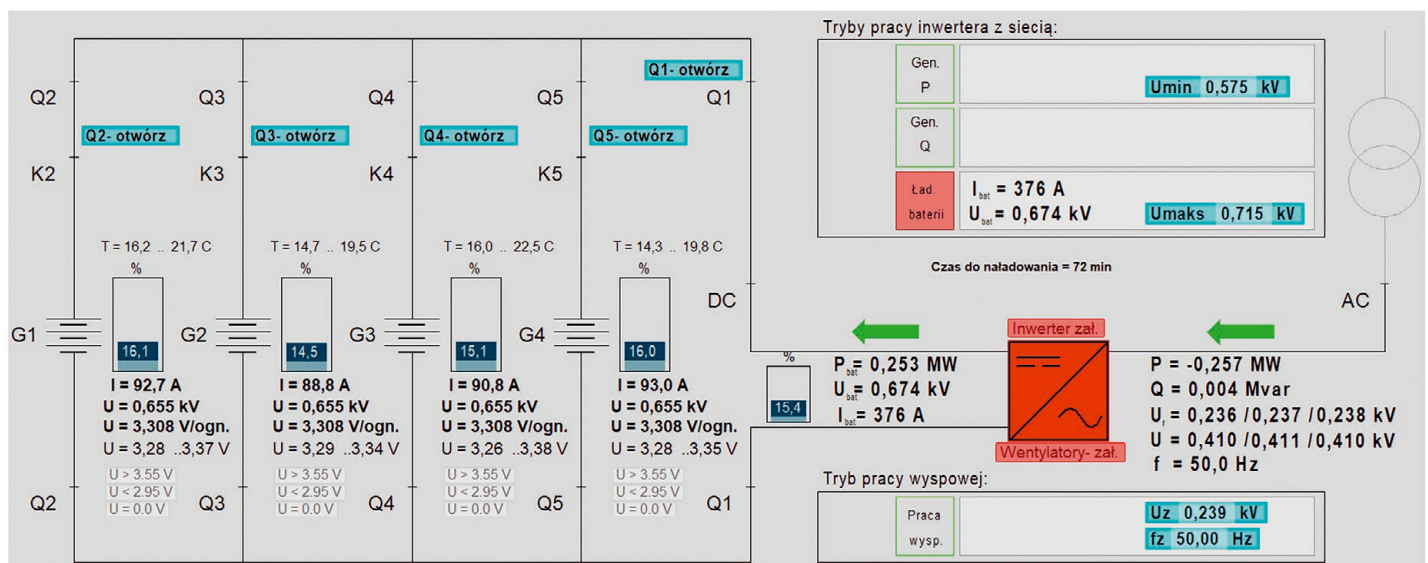


Fig. 4. Local SCADA screen showing a single storage container diagram in Puck energy storage level – battery charging

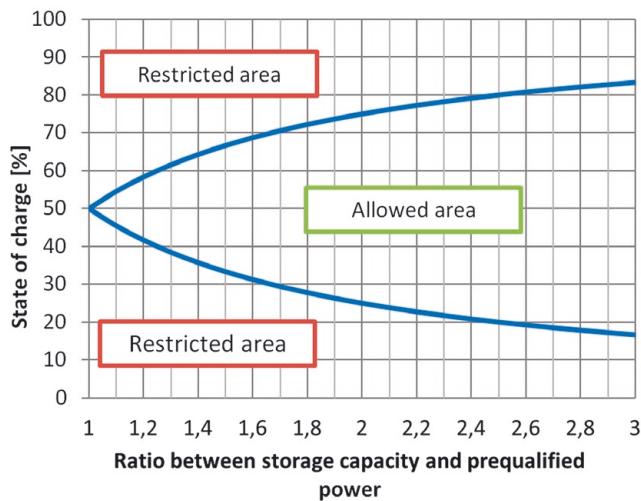


Fig. 5. Permissible battery charge of an energy storage participating in the grid voltage's primary control [10]

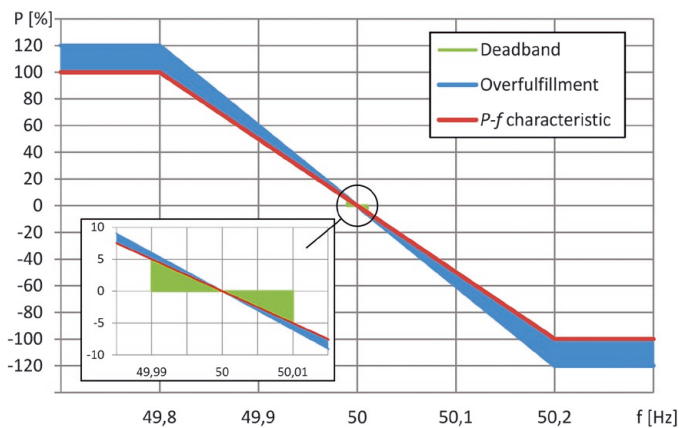


Fig. 6. P - f curve and selected degrees of freedom that enable storage battery charge management [11]

time to reach full regulatory power, for batteries amounting to several hundred milliseconds, while it takes traditional backup power sources tens of seconds. This is even more beneficial in the conditions of falling inertia of the power systems in which traditional power sources are replaced by renewable sources. The adopting appropriate legal regulations and opening of the control services market for all entities capable of supplying the declared control power within the required time have allowed the inclusion of battery energy storage in the process of primary and secondary frequency control in Western European countries. On the German control services market, the most beneficial for battery energy storages owners is to use them for primary frequency control, as this ensures continuous and constant profits [8].

The primary control service in Germany can be provided by any source that has passed the qualification process, and control power auctions are held via the internet platform www.regel-leistung.net. Each bidder declares the power they are ready to supply as part of the service and its price in EUR/MW. The bids are sorted by the lowest price per 1 MW and as many bids are accepted as to satisfy the demand for control power. Each

such contract lasts seven days. Primary control power capacity demand in Germany is around 600 MW. Entities located in any country of the combined control services market (France, Switzerland, Austria, Germany, Belgium, the Netherlands) may cover part of the demand for control power of other countries in the market. Primary control power capacity demand within the combined service market is 1470 MW [9].

According to the requirements adopted by German transmission system operators, the battery state of charge of any energy storage participating in the primary frequency control and not cooperating with other generating sources should ensure continuous operation for 30 minutes with the output declared at the auction. Therefore, if there is no frequency disturbance at a given time, the battery charge of the energy storage should correspond to the values determined by the curves shown in Fig. 5. If a frequency disturbance has occurred, the storage state of charge should return to the value determined by the curves within 2 hours of the disturbance occurrence. The disturbance is any frequency deviation above ± 50 mHz over 15 minutes, ± 100 mHz over 5 minutes, or ± 200 mHz, at which the deviation duration is irrelevant [10].

The primary frequency control is the task of the individual frequency controllers of each generation sources, which work according to linear P - f characteristic. The operators of the German transmission system allow certain degrees of freedom in the battery energy storage operation, as shown in Fig. 6, i.e. dead-band (storage may or may not respond to a frequency deviation of less than ± 10 Hz), overfulfillment (response to a frequency deviation may reach up to 120% of the response from the linear P - f characteristic), or reduced time of response to a frequency deviation (response to a frequency deviation must occur within 30 s), which allow maintaining the required battery state of charge. The most important degree of freedom, without which it would be impossible to maintain the required battery state of charge, is the purchase/sale of energy on the electricity market through planned transactions.

In the process of designing a battery energy storage system that is to take part in the primary frequency control process, it is therefore important not only to select its basic design parameters, but also to determine the control power capacity that will be offered on the market, to implement degrees of freedom, with particular consideration of energy market transactions (charge at which the will to sell/purchase will be notified, amount of energy purchased at one time). To maximize the storage owner's profit, it is also necessary to develop appropriate auction strategies based on price forecasts on the control services market. The storage owner's profit from the provision of the services will be affected primarily by the price set on the control services market, as well as the provision of the services detailing legal regulations and technical requirements, which may affect the storage battery aging rate.

5. Summary

Proper energy storage implementation is a complex technical, economic, and legal issue. Storage design should foresee in advance the functions to be performed, because the possibility

of implementing some network services requires the appropriate selection of parameters of the components used, for example, appropriate energy converter oversizing. The most easily available source of income that warrants the economic viability of BESS projects is the frequency control service, however, it should be remembered that the system needs in this respect are limited.

REFERENCES

1. Sasano E. et al., Demonstration projects for providing ancillary services using three different types of large-scale battery systems, CIGRE 2018, Paris, C2-112.
2. Maloney P., Is the bloom off the RegD rose for battery storage in PJM? [online], <https://www.utilitydive.com/news/is-the-bloom-off-the-regd-rose-for-battery-storage-in-pjm/503793/> [access: 10.08.2019].
3. Opening the Box of Energy Storage, *IEEE Electrification*, Vol. 6, No. 3, 2018.
4. Cai H., Hu G., Consensus-based Distributed Package-level State-of-charge Balancing for Grid-connected Battery Energy Storage System, 12th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), Kathmandu, Nepal, June 1–3, 2016.
5. Chen M., Rincón-Mora G., Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance, *IEE Trans. On Energy Conversion*, No. 21 (2), 2006, pp. 504–511.
6. Stroe A.I. et al., Lithium-Ion Battery Dynamic Model for Wide Range of Operating Conditions, OPTIM 2017 and ACEMP Conferences, pp. 660–666.
7. Araiza Jr. J. et al., Grid energy-storage projects, *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 6, No. 3, 2018.
8. Zeh A. et al., Fundamentals of Using Battery Energy Storage Systems to Provide Primary Control Reserves in Germany, *Batteries Journal*, Vol. 2, No. 3, 2016.
9. Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung [online], <https://www.regelleistung.net> [access: 10.08.2019].
10. German Transmission System Operators, Anforderungen an die Speicherkapazität bei Batterien für die Primärregelleistung, 2015.
11. German Transmission System Operators, Eckpunkte und Freiheitsgrade bei Erbringung von Primärregelleistung, 2014.

Jacek Jemielity

Institute of Power Engineering Research Institute in Warsaw, Gdańsk Branch
 e-mail: jjemielity@ien.gda.pl

A graduate of the Faculty of Electrical Engineering of the Gdańsk University of Technology, Master of Science in automation and electrical metrology. In 1989–1993 an assistant researcher at the Gdańsk University of Technology, where he dealt with metrology of non-electric quantities. Since 1993 a research assistant at the Institute of Power Engineering in Gdańsk, Department of Power System Automation. He researches and implements automatic voltage control in the transmission and distribution grid. He manages projects and is personally involved in the development of software and algorithms in the field of automation devices, implementation of communication standards as well as remote supervision and control systems. He is a co-author of a proprietary control and data acquisition system deployed in dozens of locations.

Łukasz Czapla

Institute of Power Engineering Research Institute in Warsaw, Gdańsk Branch
 e-mail: l.czapla@ien.gda.pl

Graduated in electrical drive automation from the Faculty of Electrical and Control Engineering at the Gdańsk University of Technology. He completed post-graduate studies in nuclear power (2010). Since 2009 a research and technical specialist in the Gdańsk branch of the Institute of Power Engineering. In his work, he primarily develops proprietary SCADA-type software intended for the power sector, manages projects of the implementation of automatic voltage control systems, and participates in research projects implemented in the field of energy.

Paweł Rozenkiewicz

Institute of Power Engineering Research Institute in Warsaw, Gdańsk Branch
 e-mail: p.rozenkiewicz@ien.gda.pl

Graduated as engineering bachelor in power engineering, specialization: energy markets and energy systems (2011), and as master of science in electrical engineering, specialization: power engineering (2012) from the Faculty of Electrical and Control Engineering at the Gdańsk University of Technology. Since 2013 a research assistant in the Gdańsk Branch of Institute of Power Engineering. His areas of interest include automatic voltage and reactive power control, flow calculations and issues related to the power system stability.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 36–41. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Techniczne aspekty projektowania bateryjnych magazynów energii w świetle doświadczeń z realizacji projektu GEKON

Autorzy

Jacek Jemielity
Łukasz Czapla
Paweł Rozenkiewicz

Słowa kluczowe

bateryjne magazyny energii (BESS), system zarządzania baterią (BMS), regulacja częstotliwości

Streszczenie

Artykuł przybliży praktyczne aspekty związane z projektowaniem, instalacją i uruchomieniem bateryjnych magazynów energii, które są nowymi, mało znanymi elementami systemu elektroenergetycznego. Doświadczenia zebrane podczas uruchamiania pierwszego w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) magazynu w Pucku, realizowanego w ramach krajowego projektu badawczego GEKON, zostały odniesione do wiedzy dostępnej w publikacjach omawiających rozwój branży na świecie.

Data wpływu do redakcji: 16.05.2019

Data wystawienia recenzji: 29.04.2019, 02.05.2019

Data akceptacji artykułu: 16.05.2019

Data publikacji online: 30.10.2019

1. Wstęp

W KSE realizowanych jest obecnie wiele projektów pilotażowych dotyczących wykorzystania bateryjnych magazynów energii (ang. *Battery Energy Storage System* – BESS). Instalacja magazynu BESS daje operatorowi systemu możliwość implementacji wielu funkcji. Autorzy zwracają uwagę na konieczność dostosowania założeń technicznych projektowanego magazynu do jego planowanych zastosowań i potencjalnych źródeł dochodu, zapewniających ekonomiczną opłacalność tej kosztownej inwestycji.

2. Projektowanie bateryjnych magazynów energii

Na świecie rośnie liczba wdrożeń dotyczących magazynów BESS zróżnicowanych pod względem technologii, skali i przeznaczenia. Magazyny funkcjonują jako oddzielne zasoby sieciowe lub w połączeniu z innymi elementami SEE (np. hybrydowe generatory) [1]. Ich pojawienie się doprowadziło do upowszechnienia świadomości, że wdrożenie magazynu jest wielowymiarowym zagadnieniem technicznym, ekonomicznym i prawnym. Rozwój branży systemów BESS zależy od zbudowania solidnych podstaw do formułowania wymagań projektowych. Przy pobieżnym zrozumieniu technologii, na przykład ograniczonym do listy osiągnięć technicznych w różnych warunkach, kadry kierownicze decydujące o rozpoczęciu, skali i celach projektu są czasem w trudnej sytuacji, ponieważ nie znają pytań, jakie należałoby zadać, aby uzyskać komfort w podejmowaniu decyzji. Potrzebne są czytelne wskazówki do oceny projektu, aby był prawidłowo wyceniony i wykonalny, a zaprojektowana instalacja uzyskała odpowiednią wydajność. Dodatkowo należy oszacować i wycenić występujące czynniki ryzyka.

2.1. Ryzyko techniczne

W systemie BESS ważny jest nie tylko wybór podstawowej technologii, ale pewność,

LP.	KONTENER	PRZEDZIAŁ BATERYJNY DC	SYSTEM KONWERSJI AC/DC	SYSTEM ZARZĄDZANIA ENERGIĄ
1.	Instalacja elektryczna	Łączniki DC	Przekształtnik energii	SCADA lokalna
2.	Sterowanie	Zabezpieczenia	Zabezpieczenia	Biblioteka funkcji
3.	Klimatyzacja i wentylacja	BMS	Łączniki AC	Komunikacja
4.	Ochrona ppoż.	Moduły baterii	Transformator SN/nn	Rejestracja

Tab. 1. Elementy bateryjnego magazynu energii

że cały system, składający się z komponentów różnych producentów, będzie działał niezawodnie w rzeczywistych warunkach, przez cały okres jego eksploatacji. W tab. 1 wymienione są elementy bateryjnego magazynu energii.

Obecnie, mimo ogromnego zapotrzebowania na baterie, inwestycje produkcyjne w tym sektorze są uważane za obarczone dużym ryzykiem, ponieważ nie jest jasne, która technologia będzie wiodąca w przyszłości. Jest to przyczyna niewystarczającej podaży baterii. Zmiany technologiczne i zmiany cen następują szybko. Przykładowo cena baterii przepływowych Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) spadła na tyle, że stanowią one alternatywę dla baterii litowych, a jednocześnie technologia ta wprowadza do projektu pewną elastyczność: natężenie prądu baterii VRFB określają parametry i konfiguracja reaktorów, a pojemność baterii zależy od wielkości zbiorników z elektrolitem, więc moc i pojemność magazynu mogą być kształtowane bardziej niezależnie. Dodatkowo baterie VRFB mają ogromną trwałość, liczoną na ok. 40 lat, przy czym przez pierwsze 20 lat eksploatacji praktycznie nie wykazują śladów zużycia. Nie występuje w nich zjawisko zmniejszającej się pojemności przy rosnącej liczbie cykli ładowania, które występuje w bateriach litowych. Koniecznym elementem oceny ryzyka

technicznego jest możliwość zapewnienia stałej dostępności magazynu, przy zadeklarowanych parametrach technicznych, w warunkach, gdy niezawodnościowo elementy systemu BESS są połączone tak jak ogniwa baterii w łańcuchach, czyli szeregowo. Zakres gwarancji zazwyczaj koncentruje się na dwóch obszarach: usuwaniu wad produkcyjnych i utrzymaniu wydajności systemu. Wraz z rosnącymi doświadczeniami operatorzy i inni klienci będą w większym stopniu wiązać uzasadnione koszty projektu oraz ewentualne kary z wydajnością i niezawodnością systemu.

Najbardziej chronionym, najdroższym i newralgicznym elementem magazynu jest bateria. Przekroczenie granicznych dozwolonych parametrów napięcia na ogniwie baterii lub jego temperatury prowadzi do zniszczenia ogniwa, które może mieć tak spektakularną formę, jak samozapłon. Niestety, płonącego ogniwa litowego nie można ugasić. Dlatego odporny i niezawodny system zarządzania baterii (ang. *Battery Management System* – BMS) jest niezwykle istotny.

2.2. Ryzyko ekonomiczne

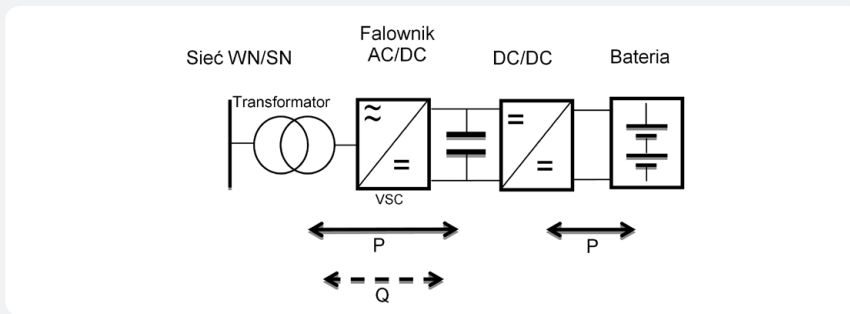
W świetle możliwych zastosowań magazynu BESS, z uwzględnieniem wymagań eksploatacyjnych i kosztów, wspieranie ról rynkowych magazynu powinno opierać się

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 36–41. When referring to the article please refer to the original text.

PL

ZMIANA MOCY CHWILOWEJ	TRANSFER ENERGII W CZASIE
Regulacja częstotliwości Regulacja napięcia Poprawa stabilności lokalnej Zwiększenie penetracji OZE Spadek częstotliwości Syntetyczna inercja	Arbitraż Przesunięcie w czasie energii z OZE Redukcja kosztu mocy szczytowej Optymalizacja profilu mocy Zwiększenie elastyczności sieci Opóźnienie inwestycji sieciowych

Tab. 2. Zastosowania magazynów energii



Rys. 1. Schemat interfejsu magazynu BESS z siecią

na dogłębnej analizie czynników ograniczających jego działanie (dostępność mocy, zarządzanie stopniem naładowania baterii, degradacja parametrów baterii). W tab. 2 zapisano podstawowe zastosowania magazynów energii, skategoryzowane, w zależności od skali czasowej, na te dotyczące przeniesienia energii w czasie oraz dotyczące zmian mocy (w czasie rzeczywistym).

Odpowiednie finansowanie magazynu może wymagać wypełniania kilku funkcji jednocześnie, a dobór parametrów magazynu, tak aby było to możliwe, jest zadaniem z zakresu optymalizacji.

Dobra praktyka inżynierska oddziałuje w długim okresie na pracę urządzenia. Wydajność energetyczna systemu (ang. *round-trip efficiency* – RTE) jest zależna przede wszystkim od wybranej technologii, ale niewłaściwa konstrukcja może zmniejszyć RTE i ograniczyć dostępność systemu. Poza rosnącymi kosztami eksploatacji i konserwacji, zmniejszenie dostępności może bezpośrednio wpłynąć na możliwość wypełnienia zapisów umowy zakupu energii lub umowy o świadczeniu usług.

Również ewolucja rynku lub narzucone regulacje mogą wpłynąć negatywnie na rentowność magazynowania energii w przyszłości. Przykładem może być dokonana modyfikacja sygnału szybkiej regulacji częstotliwości napięcia sieci, która spowodowała utrudnienia w zarządzaniu stanem naładowania magazynów energii pracujących w takiej regulacji w sieci amerykańskiej firmy PJM [2], a w rezultacie obniżyła dochody istniejących instalacji nawet o 70%. Ponadto pojawia się ryzyko techniczne związane z wdrażaniem nowych technologii o ograniczonym zbiorze zebranych doświadczeń. W zależności od podaży i popytu przyszłe ceny energii mogą znacznie różnić się od cen obecnych, co dodatkowo może mieć silny związek z lokalizacją magazynu. Likwidacja przeciążeń linii wywołana generacją odnawialną może być przyczyną występowania różnic w cenach silnie zależnych

od lokalizacji. Podobnie duże ilości generacji fotowoltaicznej mogą skutkować okresowo ujemnymi cenami energii w niektórych węzłach sieci, co można na bieżąco obserwować np. w Kalifornii [3].

3. Budowa baterijnego magazynu energii

Magazyn BESS jest podłączony do sieci w sposób analogiczny do źródeł odnawialnych, co przedstawiono na rys. 1, z tą różnicą, że kierunek przepływu mocy czynnej zależy od zadanej wartości referencyjnej i stopnia naładowania baterii.

Każdy baterijny magazyn energii jest projektowany indywidualnie do potrzeb, zatem poszczególne magazyny różnią się między sobą wykonaniem. Magazyn energii zainstalowany w Pucku, w ramach projektu GEKON, składa się z dwóch kontenerów, w których 2/3 pojemności zajmują klimatyzowane przedziały na ogniwa (fot. 1). W każdym z kontenerów zainstalowane są łącznie cztery łańcuchy ogniwa (każdy po 196 ogniwa LiFe), nad którymi nadzór sprawuje BMS.

Bazując na zebranych doświadczeniach, można stwierdzić, że optymalną obudową dla przedziału baterijnego byłby morski

kontener chłodnia lub gotowa komora chłodnicza, ponieważ urządzenia te są produkowane seryjnie, dlatego są względnie tanie i odporne na zmienne warunki pogodowe. Dostępne są wykonania z redundancją agregatów chłodniczych. Natomiast wykonanie przekształtnika energii w formie do użytku zewnętrznego usunęłoby problem jego wentylacji i chłodzenia.

3.1. Bateria

Obecnie w bateryjnych magazynach energii najczęściej stosowane są ogniwa litowe, łączone szeregowo w łańcuchy, a następnie równolegle. Charakterystyka ogniwa zależy od temperatury, wieku i składu chemicznego (tab. 3). Ogniwa powinny pochodzić z jednej serii produkcyjnej, a konstrukcja modułu baterijnego i stojaka na moduły powinna zapewniać jednakową temperaturę pracy wszystkich ogniw w łańcuchu. Przed montażem łańcucha należy dokonać klasyfikacji ogniw pod względem charakterystyk, w przeciwnym wypadku system BMS może nie mieć możliwości wyrównania stopnia naładowania poszczególnych ogniw w trakcie pracy.

Projektując magazyn, należałoby sprawdzić zdolność BMS do zlikwidowania rozrzutu charakterystyk ogniw. W równoległym połączeniu łańcuchów ogniwa należy dodatkowo sprawdzić, czy nie występują zbyt duże różnice natężeń prądów w poszczególnych łańcuchach. Warto wykonać badania symulacyjne z wykorzystaniem dynamicznego modelu baterii, z uwzględnieniem rozrzutu parametrów i wpływu temperatury, aby ocenić adekwatność projektu. Może to być przydatne, jeżeli magazyn BESS ma dynamicznie zmieniać wartość i kierunek przepływu mocy, np. przy stabilizacji mocy/napięcia w punkcie podłączenia farmy fotowoltaicznej. Modele baterii i sposoby ich parametryzacji są opisane w literaturze [5, 6]. Zjawiska fizyko-chemiczne zachodzące w ogniwie są w modelu zastąpione czytelnym ekwiwalentem elektrycznym, jak na rys. 2, gdzie przedstawiono typowy model ogniwa litowo-jonowego. Lewa część rysunku reprezentuje pojemność baterii, podczas gdy prawa odwzorowuje charakterystykę $U-I$ ogniwa w trakcie pracy.

3.2. System zarządzania baterią BMS

BMS monitoruje poszczególne parametry baterii, przede wszystkim napięcia, prądy ładowania i rozładowania oraz temperaturę



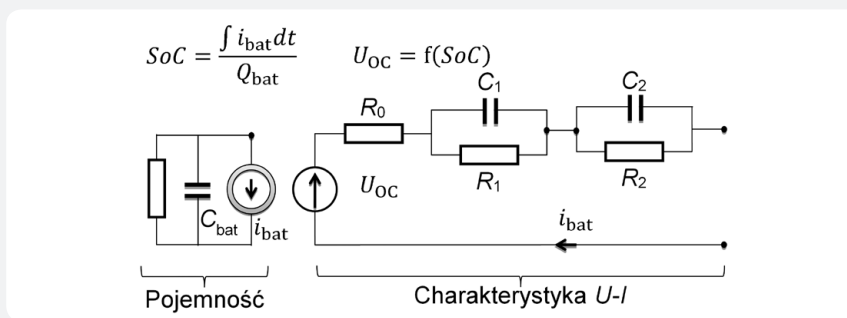
Fot. 1. Widok jednego z kontenerów wchodzącego w skład magazynu energii

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 36–41. When referring to the article please refer to the original text.

PL

PARAMETR	WARTOŚĆ
Napięcie nominalne	3,2 V
Pojemność	400 Ah
Zakres napięcia pracy	min. 2,8 V / maks. 3,8 V
Napięcie głębokiego rozład./naład.	2,5 V / 4 V
Optymalny prąd ładowania (rozład.)	<200 A
Maks. prąd ładowania (rozład.)	<1200 A
Maks. temperatura pracy	65°C
Wymiary [mm]	461 x 285 x 65
Waga	13,5 kg

Tab. 3. Zestawienie parametrów pojedynczego ogniwa baterii – dla typu LiFeYPO4 (3,2 V/400 Ah)



Rys. 2. Ekwivalent elektryczny modelu ogniwa: C_{bat} – pojemność ogniwa, U_{OC} – napięcie w obwodzie otwartym, R_0 – rezystancja wewnętrzna, R_1, C_1, R_2, C_2 – elementy modelujące procesy fizyko-chemiczne odpowiedzialne za dynamiczny spadek napięcia na ogniwie [5, 6]



Rys. 3. Ograniczenie pojemności baterii poprzez brak balansowania SoC ogniw

wszystkich ogniw. BMS w magazynach energii dla energetyki realizuje dwie ważne funkcje: określa stan naładowania baterii (ang. *state of charge* – SoC) i balansuje ogniwa baterii, czyli wyrównuje różnice w stanie naładowania poszczególnych ogniw, spowodowane m.in. przez rozrzut parametrów czy różnice w temperaturze ogniw. Funkcjonalność balansowania stanowi zabezpieczenie przed nadmiernym naładowaniem lub rozładowaniem ogniw. Do wyznaczenia SoC wykonuje się całkowanie prądu w trakcie ładowania i rozładowywania łańcucha ogniw. Funkcjonalność balansowania ogniw CBC polega na wyrównaniu stopnia naładowania poszczególnych ogniw w łańcuchach baterii. Jest to istotne, ponieważ jeżeli jedno z ogniw osiągnie krytycznie wysoki lub niski poziom naładowania, w efekcie cały łańcuch musi być odstawiony z dalszego ładowania lub rozładowania (rys. 3) [4]. Przedstawionej na rysunku baterii nie da się do końca rozładować (po lewej) ani naładować (po prawej).

Taka nierównowaga SoC ogniw zmniejsza pojemność baterii, co w efekcie skraca cykl jej życia. Bez właściwego zarządzania SoC ogniw, łańcuchów i kontenerów magazyn nie może efektywnie spełniać zakładanych funkcji. Należy bazować na sprawdzonych rozwiązaniach BMS, na przykład gotowych modułów polecanych przez producentów ogniw baterii.

3.3. System przekształcania energii i wyprowadzenie mocy z magazynu

Każdy magazyn energii musi zawierać dwukierunkowy przekształtnik energii. W trakcie ładowania baterii odpowiednio wysterowany przekształtnik przetwarza energię elektryczną o napięciu przemienne (z obwodu AC z transformatorem przyłączonym do sieci) na energię o napięciu stałym (do obwodu DC zawierającego ogniwa baterii). W trakcie rozładowywania baterii proces wygląda odwrotnie. Ze względu na możliwość świadczenia usług systemowych przekształtnik energii powinien być wyposażony w interfejs

komunikacyjny, przez który można zdalnie wprowadzać zadaną moc czynną i bierną, a w trybie pracy wyspowej częstotliwość. Przekształtnik powinien również umożliwiać płynną zmianę kierunku przesyłania energii w trakcie pracy.

Współcześnie budowane magazyny energii osiągają duże moce znamionowe rzędu pojedynczych megawoltamperów, powoduje to wiele komplikacji związanych z budową odpowiednio dużego przekształtnika. Bardziej korzystne wydaje się zainstalowanie kilku przekształtników pracujących równolegle, z których każdy może zasilać osobny łańcuch ogniw. Rozwiązanie to jest tańsze, prostsze i bardziej elastyczne, gdyż ułatwia kontrolę stanu naładowania poszczególnych łańcuchów ogniw, a w razie awarii łańcucha nie unieruchamia całego kontenera.

Do realizacji pracy wyspowej oraz funkcji sztucznej inercji konieczne jest przewymiarowanie mocy znamionowej przekształtnika energii.

3.4. Nadzór nad magazynem energii z poziomu lokalnego systemu SCADA

Lokalny system SCADA umożliwia sterowanie pracą magazynu poprzez przełączanie trybów pracy magazynu, zdalne wysterowanie łączników w obwodzie DC (zawierającym łańcuchy ogniw baterii) oraz wysyłanie sygnałów sterowniczych do przekształtnika energii, takich jak: załącz/wyłącz przekształtnik, zadaną moc czynna i bierna, zadaną częstotliwość, zadane napięcie (rys. 4).

Kolejną funkcją tego systemu jest monitorowanie i rejestrowanie sygnałów dotyczących awarii, blokad, ostrzeżeń i stanu pracy dla kluczowych podzespołów magazynu energii, tj. systemu BMS, przekształtnika energii czy klimatyzacji.

Lokalny system SCADA magazynu umożliwia również realizację łączności z systemami nadrzędnymi, sprawującymi zdalny nadzór nad pracą magazynu energii.

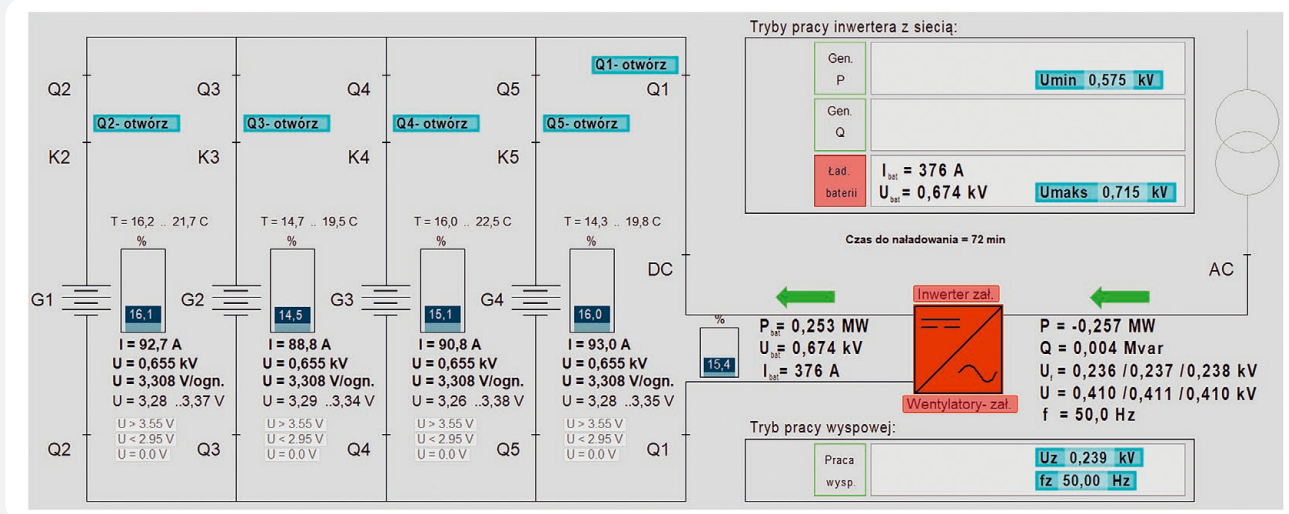
4. Realizacja usług systemowych

Jedną z ważniejszych kwestii podczas planowania budowy magazynu energii jest właściwa ocena finansowej opłacalności przedsięwzięcia. Magazyn energii może z powodzeniem realizować wiele usług systemowych, które przy odpowiednich taryfach są w stanie zapewnić opłacalność tej kosztownej inwestycji. Główne usługi systemowe, które mają być wdrożone w magazynie, powinny być przewidziane już na etapie projektowania, aby wszystkie komponenty magazynu zostały odpowiednio dobrane.

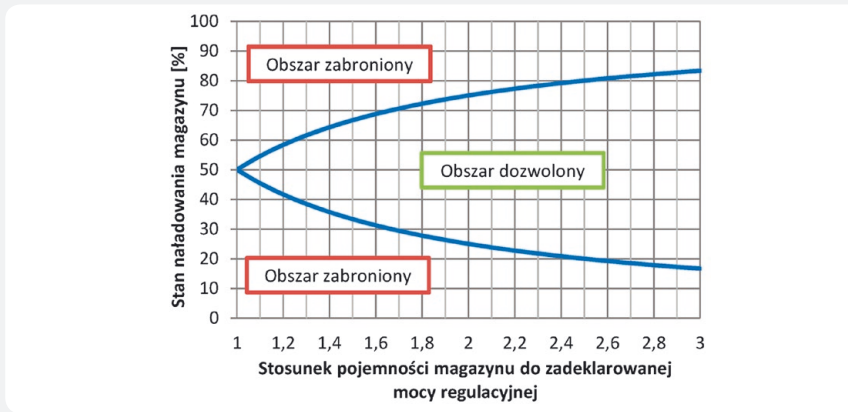
Do głównych usług należą: udział w regulacji częstotliwości, możliwość wygładzania przebiegów mocy czynnej produkowanej przez źródła rozproszone [7], redukcja szczytów zapotrzebowania na energię elektryczną lub praca jako źródło napięcia i częstotliwości (dla pracy wyspowej wydzielonego fragmentu sieci elektroenergetycznej). Regulacja częstotliwości napięcia sieci jest w wielu krajach najłatwiej dostępnym źródłem dochodu gwarantującym opłacalność ekonomiczną projektów BESS.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 36–41. When referring to the article please refer to the original text.

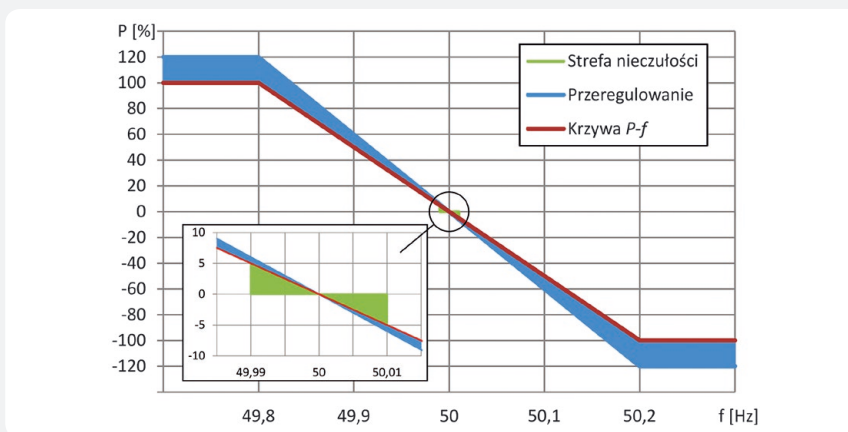
PL



Rys. 4. Ekran lokalnego systemu SCADA pokazujący schemat pojedynczego kontenera magazynu w Pucku. Stan magazynu – ładowanie baterii



Rys. 5. Dopuszczalny stan naładowania baterijnego magazynu energii, biorącego udział w pierwotnej regulacji częstotliwości napięcia sieci [10]



Rys. 6. Krzywa P-f oraz wybrane stopnie swobody, umożliwiające zarządzanie stanem naładowania baterii magazynu [11]

4.1. Funkcja regulacji częstotliwości napięcia sieci

Wykorzystanie bateryjnych magazynów energii do regulacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym ma pewne

zalety, z których najważniejszą jest nadzwyczajnie krótki czas osiągnięcia pełnej mocy regulacyjnej, wynoszący dla baterii kilkaset milisekund, podczas gdy dla tradycyjnych źródeł mocy rezerwowej czas ten wynosi

dziesiątki sekund. Jest to korzystne tym bardziej w warunkach spadającej inercji systemów elektroenergetycznych, w których tradycyjne źródła mocy są zastępowane źródłami odnawialnymi.

Ustanowienie odpowiednich regulacji prawnych i otwarcie rynku usług regulacyjnych dla wszystkich podmiotów zdolnych do dostarczenia zadeklarowanej mocy regulacyjnej w wymaganym przedziale czasu pozwoliło na włączenie bateryjnych magazynów energii w proces pierwotnej i wtórnej regulacji częstotliwości w krajach Europy Zachodniej. W warunkach niemieckiego rynku usług regulacyjnych najbardziej korzystne dla podmiotów będących właścicielami bateryjnych magazynów energii jest wykorzystanie ich do pierwotnej regulacji częstotliwości, ponieważ zapewnia to ciągłe i stałe zyski [8].

Usługę regulacji pierwotnej w Niemczech mogą świadczyć źródła, które przejdą proces kwalifikacji, a aukcje na moc regulacyjną odbywają się poprzez platformę internetową www.regelleistung.net. Każdy z oferentów deklaruje moc, jaką gotów jest dostarczyć w ramach usługi i cenę wyrażoną w euro/MW. Oferty są sortowane według najniższej ceny za 1 MW i akceptowana jest taka liczba ofert, która pozwoli na zaspokojenie zapotrzebowania na moc regulacyjną. Czas trwania kontraktu wynosi siedem dni. Zapotrzebowanie na moc regulacji pierwotnej w Niemczech wynosi około 600 MW. Podmioty zlokalizowane w krajach połączonego rynku usług regulacyjnych (Francja, Szwajcaria, Austria, Niemcy, Belgia, Holandia) mogą pokrywać część zapotrzebowania na moc regulacyjną innych krajów biorących udział w rynku. Zapotrzebowanie na moc regulacji pierwotnej w ramach połączonego rynku usług wynosi 1470 MW [9]. Według wymagań przyjętych przez niemieckich operatorów systemu przesyłowego stan naładowania baterijnego magazynu energii, biorącego udział w pierwotnej regulacji częstotliwości i niewspółpracującego z innymi źródłami wytwórczymi, powinien zapewniać ciągłą pracę z mocą zadeklarowaną na aukcji przez okres 30 minut. W związku

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 36–41. When referring to the article please refer to the original text.

PL

z tym, jeżeli nie występuje w danym czasie zaburzenie przebiegu częstotliwości, stan naładowania baterijnego magazynu energii powinien odpowiadać wartościom określonym przez krzywe przedstawione na rys. 5. Jeżeli zaburzenie częstotliwości wystąpiło, to stan naładowania magazynu powinien wrócić do wartości określonej przez krzywe w czasie 2 godzin od chwili wystąpienia zaburzenia. Za zaburzenie uznaje się odchyłkę częstotliwości powyżej: ± 50 mHz trwającą ponad 15 minut, ± 100 mHz trwającą ponad 5 minut lub ± 200 mHz, przy której czas trwania odchyłki nie ma znaczenia [10].

Za proces pierwotnej regulacji częstotliwości odpowiadają indywidualne regulatory poszczególnych źródeł wytwórczych, które pracują według liniowej krzywej P - f . Operatorzy niemieckiego systemu przesyłowego dopuszczają pewne stopnie swobody w pracy baterijnego magazynu energii, przedstawione na rys. 6, tj.: strefę nieczułości (magazyn może, ale nie musi odpowiadać na odchyłkę częstotliwości mniejszą niż ± 10 mHz), przeregulowanie (odpowiedź na odchyłkę częstotliwości może wynosić maksymalnie 120% odpowiedzi wynikającej z liniowej krzywej P - f), czy skrócenie czasu reakcji na odchyłkę częstotliwości (odpowiedź na odchyłkę częstotliwości musi nastąpić w czasie do 30 s), które umożliwiają utrzymanie wymaganego stanu naładowania baterii. Najważniejszym stopniem swobody, bez którego zastosowania utrzymanie wymaganego stanu naładowania baterii byłoby niemożliwe, jest zakup/sprzedaż energii na rynku energii poprzez transakcje planowane.

W procesie projektowania baterijnego magazynu energii, który ma brać udział w procesie pierwotnej regulacji częstotliwości, ważny jest więc nie tylko dobór jego podstawowych parametrów

konstrukcyjnych, ale także określenie mocy regulacyjnej, która będzie oferowana na rynku, implementacja stopni swobody, ze szczególnym uwzględnieniem transakcji na rynku energii (stan naładowania, przy którym zgłaszana będzie chęć sprzedaży/zakupu, ilość kupowanej jednorazowo energii). W celu maksymalizacji zysku właściciela magazynu konieczne jest także opracowanie odpowiednich strategii aukcyjnych wykorzystujących prognozy cen na rynku usług regulacyjnych. Na zysk właściciela magazynu konieczne jest także świadczenie usługi wpływ przede wszystkim będzie miała cena, jaka ustalą się na rynku usług regulacyjnych, a także regulacje prawne i wymagania techniczne definiujące szczegółowo świadczenie usługi, które mogą mieć wpływ m.in. na szybkość starzenia się baterii magazynu.

5. Podsumowanie

Poprawne wdrożenie magazynu energii jest złożonym zagadnieniem technicznym, ekonomicznym i prawnym. Projekt magazynu powinien z góry uwzględniać funkcje, które mają być realizowane, gdyż możliwość implementacji niektórych usług sieciowych wymaga odpowiedniego dobrania parametrów zastosowanych podzespołów, na przykład odpowiedniego przewymiarowania przekształtnika energii. Najłatwiej dostępnym źródłem dochodu, gwarantującym opłacalność ekonomiczną projektów BESS, jest usługa regulacji częstotliwości, jednak należy pamiętać, że potrzeby systemu w tym zakresie są ograniczone.

Bibliografia

1. Sasano E. i in., Demonstration projects for providing ancillary services using three different types of large-scale battery systems, CIGRE 2018, Paris, C2-112.

2. Maloney P., Is the bloom off the RegD rose for battery storage in PJM? [online], <https://www.utilitydive.com/news/is-the-bloom-off-the-regd-rose-for-battery-storage-in-pjm/503793/> [dostęp: 10.08.2019].
3. Opening the Box of Energy Storage, *IEEE Electrification* 2018, Vol. 6, No. 3.
4. Cai H., Hu G., Consensus-based Distributed Package-level State-of-charge Balancing for Grid-connected Battery Energy Storage System, 12th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), Kathmandu, Nepal, 1–3 June 2016.
5. Chen M., Rinc'on-Mora G., Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance, *IEE Trans. On Energy Conversion* 2006, No. 21(2), s. 504–511.
6. Stroe A.I. i in., Lithium-Ion Battery Dynamic Model for Wide Range of Operating Conditions, Konferencje OPTIM 2017 i ACEMP, s. 660–666.
7. Araiza Jr. J. i in., Grid energy-storage projects, *IEEE Electrification Magazine* 2018, Vol. 6, No. 3.
8. Zeh A. i in., Fundamentals of Using Battery Energy Storage Systems to Provide Primary Control Reserves in Germany, *Batteries Journal* 2016, Vol. 2, No. 3.
9. Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung [online], <https://www.regelleistung.net> [dostęp: 10.08.2019].
10. German Transmission System Operators, Anforderungen an die Speicherkapazität bei Batterien für die Primärregelleistung, 2015.
11. German Transmission System Operators, Eckpunkte und Freiheitsgrade bei Erbringung von Primärregelleistung, 2014.

Jacek Jemielity

mgr inż.

Institut Energetyki Instytut Badawczy z siedzibą w Warszawie, Oddział Gdańsk
e-mail: j.jemielity@ien.gda.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej, magister inżynier specjalności: automatyka i metrologia elektryczna. W latach 1989–1993 był zatrudniony na stanowisku asystenta na Politechnice Gdańskiej, gdzie zajmował się metrologią wielkości nieelektrycznych. Od 1993 roku pracuje w Instytucie Energetyki w Gdańsku, w Zakładzie Automatyki Systemów Energetycznych, jako asystent naukowy. Zajmuje się badaniami i wdrażaniem automatycznej regulacji napięcia w sieci przesyłowej i dystrybucyjnej. Zarządza projektami i jest osobiście zaangażowany w rozwój oprogramowania i algorytmów w dziedzinie urządzeń automatyki, wdrażania standardów komunikacji oraz układów zdalnego nadzoru i sterowania. Jest współautorem firmowego systemu sterowania i akwizycji danych, wdrożonego w kilkadziesiąt lokalizacjach.

Łukasz Czaplą

mgr inż.

Institut Energetyki Instytut Badawczy z siedzibą w Warszawie, Oddział Gdańsk
e-mail: l.czapla@ien.gda.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, w specjalności: automatyka napędu elektrycznego. Ukończył studia podyplomowe w specjalności: energetyka jądrowa (2010). Od 2009 roku jest zatrudniony w gdańskim oddziale Instytutu Energetyki na stanowisku specjalisty badawczo-technicznego. W swojej pracy przede wszystkim rozwija firmowe oprogramowanie typu SCADA, przeznaczone do zastosowania w energetyce, kieruje projektami dotyczącymi wdrażania układów automatycznej regulacji napięcia oraz uczestniczy w projektach badawczych realizowanych w dziedzinie energetyki.

Paweł Rozenkiewicz

mgr inż.

Institut Energetyki Instytut Badawczy z siedzibą w Warszawie, Oddział Gdańsk
e-mail: p.rozenkiewicz@ien.gda.pl

Studia inżynierskie na kierunku energetyka, specjalność: rynki energii i systemy energetyczne (2011), oraz masterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność: elektroenergetyka (2012), ukończył na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Od 2013 roku jest zatrudniony w Instytucie Energetyki Oddział Gdańsk. Do obszarów jego zainteresowań należą: automatyczna regulacja napięcia i mocy biernej, obliczenia rozprężowe oraz zagadnienia związane ze stabilnością systemu elektroenergetycznego.