

Miroslaw PAROL<sup>1</sup>, Agnieszka MACIEJKO<sup>2</sup>, Bartłomiej ARENDARSKI<sup>3</sup>Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki (1)  
innogy Stoen Operator Sp. z o. o. (2), Fraunhofer Institute IFF, Magdeburg (3)

doi:10.15199/48.2020.06.01

## Systemy magazynowania energii w sieciach elektroenergetycznych niskich napięć

**Streszczenie.** W artykule omówione zostało zagadnienie magazynowania energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych niskich napięć. Najpierw przedstawiona została charakterystyka systemów magazynowania energii możliwych do zainstalowania w sieciach nn. Następnie opisane zostały zagadnienia techniczno-ekonomiczne dotyczące systemów magazynowania energii elektrycznej, tj. w szczególności, na podstawie niemieckich źródeł literaturowych, wymagania techniczne dotyczące przyłączenia oraz pracy magazynów energii w sieciach nn. W dalszej kolejności zostały przedstawione, w oparciu o te same źródła literaturowe, przykładowe schematy przyłączenia magazynów energii do sieci. Następnie zostały przedstawione wyniki przykładowych obliczeń optymalizacyjnych odnośnie do mocy rozładowania lub ładowania magazynu energii dla różnych trybów pracy demonstracyjnej mikrosieci oraz różnych możliwych do przyjęcia funkcji kryterialnych.

**Abstract.** This paper focuses on methods of storing electricity in low voltage distribution grids. First, the characteristics of energy storage systems suitable for installation in low voltage grids are described. Then, technical and economic issues related to electrical energy storage systems as well as the technical requirements for connecting and operating energy storage systems in low voltage grids are described based in particular on a survey of German literature. Next, model schemes for connecting energy storage systems to the grid based on the same German literature are presented. Finally, the results of sample optimization calculations of energy storage systems' charging and discharging power in different modes of operation of demonstration microgrid with a variety of selectable criterion functions are discussed. (**Energy storage systems in low voltage electric power grids**).

**Słowa kluczowe:** sieci elektroenergetyczne, niskie napięcie, zasobniki energii, magazynowanie energii.

**Keywords:** electric power grids, low voltage, energy storages, storing of energy.

### Wstęp

Z uwagi na dokonujące się zmiany w elektroenergetyce światowej oraz krajowej, związane głównie z przyłączaniem rozproszonych źródeł energii do sieci dystrybucyjnych (w szczególności odnawialnych źródeł energii – OZE), jak również z przewidywanym rozwojem elektromobilności oraz zakładanym powstawaniem w przyszłości mikrosieci niskiego napięcia, zarówno liczba zasobników (magazynów) energii elektrycznej jak i ich znaczenie będą rosły. Należy się więc spodziewać, że liczba zasobników energii elektrycznej przyłączanych do sieci dystrybucyjnych niskich napięć, w tym sieci zarządzanych przez Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD), będzie coraz większa.

Zagadnienie magazynowania energii elektrycznej ma również bezpośredni związek z tematem efektywności energetycznej, a co za tym idzie z oszczędnym gospodarowaniem energią elektryczną.

Dotychczas w publikacjach omawiane były najczęściej różne technologie magazynowania energii elektrycznej pod kątem ich cech charakterystycznych. Mało jest natomiast publikacji dotyczących zasad przyłączenia zasobników energii elektrycznej do sieci oraz ich współpracy z siecią. Chcąc choć w części wypełnić tę lukę, w niniejszym artykule omówiono pokrótce te zagadnienia w odniesieniu do sieci niskich napięć, w oparciu głównie o niemieckie źródła literaturowe. Ponadto, przedstawiono i omówiono, na podstawie tych samych wytycznych niemieckich, możliwe (przykładowe) schematy przyłączenia zasobników energii do sieci nn w różnych sytuacjach. Artykuł kończy się podsumowaniem i przedstawieniem wniosków.

Zagadnienia poruszane w niniejszym artykule była przedmiotem rozważań przedstawionych w referacie [1].

### Charakterystyka systemów magazynowania energii elektrycznej

Charakterystyka różnych stosowanych i możliwych do wykorzystania technologii magazynowania energii elektrycznej została dokonana w wielu publikacjach m.in. w [1- 4]. W szczególności należy wspomnieć o publikacji [2], zawierającej kompletny i aktualny przegląd tych technologii.

Mając na uwadze magazyny energii elektrycznej, które są lub mogą być potencjalnie stosowane w sieciach dystrybucyjnych niskich napięć, można wymienić:

- baterie akumulatorów,
- zasobniki wodoru lub metanu,
- superkondensatory,
- nadprzewodnikowe magnetyczne zasobniki energii,
- kinetyczne zasobniki energii,
- kompresyjne (pneumatyczne) zasobniki energii.

Śród wymienionych, baterie akumulatorów oraz zasobniki wodorowe/metanowe należą do grupy elektrochemicznych systemów magazynowania energii elektrycznej, superkondensatory i nadprzewodnikowe magnetyczne zasobniki energii do kategorii magazynów elektrycznych, zaś kinetyczne i kompresyjne zasobniki energii należą do mechanicznych systemów magazynowania energii [1-3].

Biorąc pod uwagę technikę magazynowania, rozróżnia się dwa sposoby magazynowania energii: bezpośrednie oraz pośrednie [1, 3, 5]. W pierwszym przypadku magazynowanie energii odbywa się w polu elektrycznym (superkondensatory) lub w polu magnetycznym (nadprzewodnikowe magnetyczne zasobniki energii). Z kolei w drugim przypadku energia elektryczna jest

przekształcana na inny rodzaj energii i magazynowana w tej postaci. W praktyce dotyczy to konwersji energii elektrycznej na energię mechaniczną (kinetyczne i kompresyjne zasobniki energii) lub na energię chemiczną (baterie akumulatorów, zasobniki wodoru/metanu).

Wymienione zasobniki energii charakteryzują się różnymi parametrami techniczno-ekonomicznymi oraz właściwościami eksploatacyjnymi. Poniżej zostały przedstawione najważniejsze cechy charakterystyczne wymienionych technologii magazynowania energii elektrycznej.

### **Baterie akumulatorów i zasobniki wodoru lub metanu**

Są to obecnie najczęściej stosowane urządzenia służące do magazynowania energii elektrycznej w sieciach i instalacjach odbiorczych niskich napięć. Można w nich stosować, jako człony baterii, akumulatory wykorzystujące różne technologie [1-3]. Przy czym w elektroenergetyce stosuje się najczęściej (lub można stosować): akumulatory kwasowo-ołowiowe, niklowo-kadmowe, litowo-jonowe, wysokotemperaturowe (siarkowo-sodowe lub zbudowane na bazie chloru sodu i niklu), przepływowo (redox-flow). Obecnie najbardziej rozpowszechnione są akumulatory kwasowo-ołowiowe. Coraz częściej są też instalowane baterie akumulatorów litowo-jonowych. Osobną grupę magazynów elektrochemicznych stanowią zasobniki wodoru i metanu. Te ostatnie oraz akumulatory przepływowe są przykładem systemów z zewnętrznym magazynowaniem energii. Pozostałe wymienione powyżej należą do grupy systemów z wewnętrznym magazynowaniem energii.

Baterie akumulatorów oraz zasobniki wodoru/metanu mogą być budowane na dowolną moc i pojemność. Należy jednak zapewnić odpowiednio długi czas ich pracy mierzony w oczekiwanych latach życia (użytkowania) i maksymalnych liczbach cykli ładowania/rozładowania. Warto też podkreślić, że żywotność techniczna tych układów mocno zależy od sposobu i warunków ich eksploatacji: sposobów ładowania, głębokości rozładowania, temperatury użytkowania itp. [1-3].

Zgodnie z [2, 4], sprawności akumulatorów wynoszą: około 70% dla akumulatorów kwasowych-ołowiowych, do 95% dla akumulatorów litowo-jonowych, do 75% dla akumulatorów wysokotemperaturowych i przepływowych oraz do 40% dla zasobników wodoru/metanu. Do wad najczęściej stosowanych akumulatorów kwasowych-ołowiowych zalicza się [1, 4]: dużą zależność parametrów elektrycznych od temperatury otoczenia, długie czasy ładowania (wynoszące nawet do kilkunastu godzin) oraz niezbyt dużą osiąganą liczbę cykli ładowania/rozładowania (około 1000). Z kolei liczba cykli ładowania/rozładowania dla akumulatorów litowo-jonowych typu NMC/SKI podana w [6] wynosi 13000. Duża jest również liczba tych cykli dla akumulatorów wysokotemperaturowych [2].

Jeśli chodzi o koszty zakupu na kilowat mocy zainstalowanej, to najtańsze są akumulatory kwasowo-ołowiowe, następnie akumulatory litowo-jonowe oraz akumulatory wysokotemperaturowe. O wiele droższe są akumulatory przepływowe i zasobniki wodoru/metanu [2].

### **Superkondensatory**

Ze względu na bardzo szybkie ładowanie i rozładowanie, superkondensatory są urządzeniami, które są zwykle stosowane jako zasobniki energii [2]. Natomiast z uwagi na wysoki stopień samorozładowania, służą głównie do magazynowania dużych ilości energii elektrycznej w krótkim okresie czasu; są stosowane najczęściej do poprawy jakości energii [1-3]. Dzięki specyficznej budowie, charakteryzują się bardzo dużymi pojemnościami wynoszącymi nawet od kilku do kilkunastu tysięcy faradów.

Superkondensatory charakteryzują się m.in.

następującymi parametrami [1-4]: bardzo wysoką sprawnością do 95%, możliwością wielokrotnego ładowania i rozładowania bez pogorszenia swoich właściwości, parametrami elektrycznymi nie pogarszającymi się wraz z liczbą cykli ładowania/rozładowania, możliwością dostarczania bardzo dużych prądów rozładowania, długim czasem życia. Koszty zakupu tych urządzeń na kilowat mocy zainstalowanej są podobne jak dla akumulatorów wysokotemperaturowych [2].

Tego typu zasobniki energii, oprócz poprawy jakości energii elektrycznej, mogą być również stosowane w przypadku gwałtownych zmian zapotrzebowania na moc, trudnych lub niemożliwych do skompensowania za pomocą baterii akumulatorów [1].

### **Nadprzewodnikowe magnetyczne zasobniki energii**

Urządzenia te są obecnie na etapie badań i z takich samych powodów jak w przypadku superkondensatorów są zwykle stosowane jako zasobniki energii do magazynowania dużych ilości energii elektrycznej w krótkich okresach czasu [2]. W przypadku tych systemów (SMES), energia elektryczna jest magazynowana w polu magnetycznym cewek indukcyjnych, które są wykonane z materiałów nadprzewodzących [1, 3, 4].

Cechują się one następującymi właściwościami [1,3,4, 7]: bardzo dużymi sprawnościami (do około 95%), bardzo małymi stratami mocy w uzwojeniu, bardzo dużymi wartościami oddawanego prądu (rzędu kiloamperów) oraz prze-noszonych mocy (rzędu megawatów) w krótkim okresie czasu, przewidywanym długim czasem eksploatacji (do 30 lat).

### **Kinetyczne i kompresyjne zasobniki energii**

Kinetyczne (wirujące) zasobniki energii są wykonywane jako koła zamachowe, tj. masy obracające się wokół własnej osi [1-3]. W urządzeniu tego typu energia elektryczna zostaje zamieniona na energię mechaniczną i zmagazynowana w masie wirującego ciała. Aby dokonać tej zamiany, koło zamachowe musi być sprzęgnięte z siecią (instalacją) elektryczną za pośrednictwem maszyny elektrycznej oraz przekształtnika energoelektronicznego. Maszyna ta musi mieć właściwość bezzwłocznego przechodzenia od pracy silnikowej do pracy generatorowej i odwrotnie. Służą głównie do magazynowania dużych ilości energii elektrycznej w krótkim okresie czasu. Liczba cykli ładowania/rozładowania jest praktycznie nieograniczona (rzędu miliona) [2].

Rozróżnia się dwa rodzaje kół zamachowych [1, 4]: wolnoobrotowe (prędkość do około 10000 min<sup>-1</sup>) oraz szybkoobrotowe (prędkość rzędu 100000 min<sup>-1</sup>).

Koła zamachowe charakteryzują się m.in. [1-5, 8, 9]: bardzo dużą sprawnością – wynoszącą do 90-95%, możliwością szybkiego oddania dużej mocy (do kilkudziesięciu sekund), długim czasem eksploatacji.

Kompresyjne (pneumatyczne) systemy magazynowania energii, to zasobniki energii ze sprężonym powietrzem (CAES) [2, 3]. W urządzeniu tego typu energia elektryczna zostaje zamieniona na energię mechaniczną i zmagazynowana w sprężonym powietrzu w zbiorniku, najczęściej naturalnym (np. wyrobisku kopalnianym). Sprawność tych systemów wynosi [2]: około 30% dla systemów diabatyicznych oraz do około 70% dla systemów adiabatyicznych.

### **Systemy magazynowania energii w mikrosieciach**

Informacje na temat wybranych technologii magazynowania energii elektrycznej, które mogą znaleźć zastosowanie w mikrosieciach niskiego napięcia, zostały podane m.in. w [1, 5, 8, 10].

## **Zagadnienia techniczno-ekonomiczne dotyczące systemów magazynowania energii elektrycznej**

### **Wymagania techniczne dotyczące przyłączenia systemów magazynowania energii w Niemczech**

Przedstawione poniżej wymagania techniczne odnoszące się do przyłączenia systemów magazynowania energii do sieci dystrybucyjnych niskich napięć zostały opracowane na podstawie wytycznych niemieckich [11, 12] i przedstawione w [1]. Należy wspomnieć, że związane z tym aspekty techniczne i prawne dotyczące pracy i przyłączenia źródeł generacji rozproszonej do sieci dystrybucyjnych niskich napięć zostały omówione w [13].

Podczas projektowania przyłącza systemu magazynowania energii i/lub instalacji odbiorcy z funkcją magazynowania energii, muszą być spełnione techniczne warunki przyłączenia określone przez OSD, jak również wymagania norm VDE-AR-N-4100 [14] i VDE-AR-N-4105 [15].

Podmiot odpowiedzialny za budowę instalacji elektrycznej w celu przyłączenia magazynu energii powinien zwrócić szczególną uwagę na poprawny dobór przekroju przewodu i prawidłowy dobór zabezpieczenia tej instalacji. Nie jest dopuszczalne przyłączenie magazynu energii do obwodu końcowego (odbiorczego) instalacji.

Nie jest dopuszczalny w Niemczech pobór energii elektrycznej z sieci w celu ładowania magazynu, a następnie jej dostarczenie z powrotem do sieci (w trybie rozładowania), aby domagać się określonych należności (rekompensat) finansowych, np. tak jak to jest przewidziane dla odnawialnych źródeł energii lub jednostek kogeneracyjnych.

Magazyny energii powinny być zasadniczo projektowane i przyłączane do sieci jako symetryczne jednostki trójfazowe. Przyłączenie jednofazowego systemu magazynowania energii jest generalnie możliwe w przypadku jego mocy nieprzekraczającej 4,6 kVA. Przy czym, tę wartość graniczną stosuje się do całości mocy dostarczanej i pobieranej w punkcie przyłączenia do sieci.

Jeśli chodzi o układy automatyki zabezpieczeniowej systemów magazynowania energii, to w trybie ich ładowania i rozładowania należy zapewnić zgodność z wymaganiami zawartymi w rozdziale 6 normy VDE-AR-N 4105 [15].

### **Wymagania techniczne dotyczące pracy systemów magazynowania energii w Niemczech**

Podobnie jak w punkcie poprzednim, przedstawione poniżej wymagania techniczne dotyczące pracy systemów magazynowania energii przyłączonych do sieci dystrybucyjnych niskich napięć zostały opracowane na podstawie wytycznych niemieckich [11, 12] i przedstawione w [1].

Oдноśnie do mocy bierniej, w trybie rozładowania magazynów energii stosuje się odpowiednie zapisy zawarte w normie VDE-AR-N 4105 [15]. Z kolei, w trybie ich ładowania zakłada się, że (zgodnie z VDE-AR-N 4100 [14]) dla mocy powyżej 5%  $P_n$  współczynnik mocy  $\cos\varphi$  jest z przedziału 0,95<sub>indukcyjny</sub> do 1.

Według zapisów zawartych w wytycznych [12], magazyny energii muszą uczestniczyć w dynamicznym wsparciu sieci, zgodnie z podrozdziałem 5.7.3 normy VDE-AR-N 4105.

Ograniczenie mocy czynnej można osiągnąć albo przez odpowiedni dobór elementów składowych systemu magazynowania dla ustalonej, odpowiedniej wartości mocy czynnej, albo przez użycie odpowiedniego urządzenia pomiarowego (sensora) do sterowania pracą urządzeń elektrycznych, na podstawie zmierzonych wartości średnich 10 minutowych.

W celu regulacji mocy czynnej w przypadku wzrostu lub obniżenia częstotliwości, w zakresie od 47,5 Hz do 52,5 Hz, należy stosować środki regulacyjne wymienione w [12].

Aby spełnić wymagania dotyczące żądania określonych

należności finansowych (rekompensat), podczas pracy jednostki wytwórczej i magazynu energii w tym samym punkcie przyłączenia do sieci, muszą być spełnione następujące warunki [12]:

- w przypadku magazynu energii, który nie pobiera mocy z sieci publicznej – jeśli magazyn energii jest przeznaczony do zasilania sieci publicznej, to nie może on pobierać energii elektrycznej z sieci do swojego ładowania;
  - w przypadku magazynu energii, który nie dostarcza mocy do sieci publicznej – jeśli magazyn energii jest przeznaczony do pobierania mocy z sieci publicznej, to nie może on z powrotem dostarczać pobranej energii elektrycznej do tej sieci.
- W przypadku pracy wyspowej sieci niskiego napięcia powinny zachodzić następujące okoliczności [12]:
- instalacja odbiorcy z magazynem energii jest odłączana od sieci publicznej;
  - magazyn energii jest ładowany z lub rozładowywany do instalacji wewnętrznej odbiorcy;
  - zarządzanie mocą czynną odbiorcy powinno być oparte na analizie jego stanów obciążenia;
  - działanie równoległe (synchroniczne) sieci pracującej w trybie wyspowym z siecią publiczną jest dopuszczalne w czasie nie przekraczającym 100ms.

### **Zagadnienia ekonomiczne dotyczące systemów magazynowania energii**

W pracy [2] przedstawione zostało, na podstawie [16], uzasadnienie ekonomiczne dotyczące stosowania magazynów energii elektrycznej oraz zwiększenia użyteczności systemów magazynowania w sieciach typu Smart Grids. Uzasadnienia tego dokonano z punktu widzenia:

- dystrybutorów energii elektrycznej,
  - odbiorców,
  - wytwórców energii elektrycznej w OZE.
- Ponadto, w [2] dokonano podziału (na podstawie [17]) usług systemowych, które mogą zapewnić systemy magazynowania energii, tj. usług:
- w skali całego systemu elektroenergetycznego,
  - w zakresie infrastruktury (sieci) przesyłowej,
  - w zakresie infrastruktury (sieci) dystrybucyjnej,
  - pomocniczych na różnych poziomach napięć systemu elektroenergetycznego,
  - w zakresie zarządzania energią po stronie odbiorcy.

Warto podkreślić, że w pracy [2] podane zostały również podstawowe zasady wymiarowania systemów magazynowania energii oraz zaprezentowano możliwe scenariusze rozwoju technologii magazynowania energii do roku 2050 (na podstawie [18]). Analiza ekonomiczna inwestycji i kosztów operacyjnych magazynowania energii elektrycznej została przedstawiona w [19].

### **Przykładowe schematy przyłączenia magazynów energii do sieci nn**

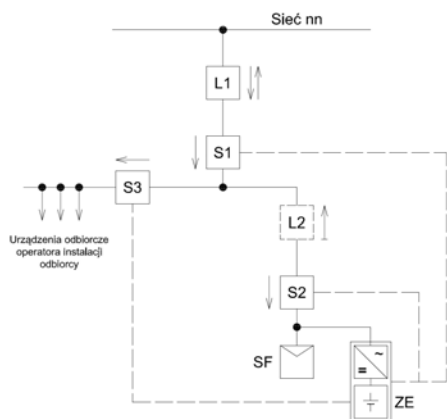
W dalszej części artykułu zostały zamieszczone przykładowe schematy przyłączenia magazynów energii do sieci niskich napięć oraz ich opisy, zaczerpnięte z wytycznych [11, 12].

### **System magazynowania energii zlokalizowany w torze generacji mocy (magazyn nie pobierający mocy z sieci publicznej)**

W tym wariantcie (rys. 1), opisanym w [1], magazyn energii jest przyłączony na stałe do instalacji wytwórczej i opomiarowany razem ze źródłem przez licznik L2. Sensory S1 i S2 monitorują te same przepływy mocy co liczniki L1 i L2. Sensor S3 monitoruje przepływ mocy w torze poboru mocy.

W prezentowanym wariantcie, w którym magazyn energii nie pobiera mocy z sieci publicznej, w torze generacji mocy energia elektryczna może być pobierana z sieci jedynie w celu zasilania instalacji wytwórczej. Magazynu energii nie można ładować, kiedy przepływ mocy czynnej odbywa się w kierunku układu generator/magazynu energii ( $L2 P > 0$ ).

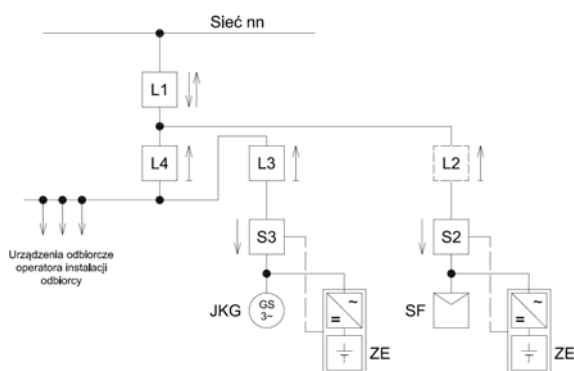
Sterowanie mocą czynną odbywa się na podstawie odczytów z sensora S1 zlokalizowanego po stronie poboru mocy lub przez sensor S3 znajdujący się w torze poboru mocy i sensor S2 zlokalizowany w torze generacji mocy.



Rys. 1. System magazynowania energii zlokalizowany w torze generacji mocy (L – licznik, S – sensor, SF – system fotowoltaiczny, ZE – magazyn (zasobnik) energii) [1]; opracowano na podstawie [12]

### System magazynowania energii zlokalizowany w torze generacji mocy (magazyn nie pobierający mocy z sieci publicznej) z dodatkową jednostką wytwórczą - kogeneracyjną

Wspomniane wcześniej wymagania można generalnie stosować do koncepcji obejmujących wiele instalacji wytwórczych (elektrowni) z systemami magazynowania energii. Na rys. 2 pokazano dodatkową jednostkę wytwórczą - kogeneracyjną z zainstalowanym systemem magazynowania energii.



Rys. 2. System magazynowania energii zlokalizowany w torze generacji mocy z dodatkową jednostką wytwórczą - kogeneracyjną (JKG); opracowano na podstawie [12]

W tym wariantcie, w którym magazyn energii nie pobiera mocy z sieci publicznej, moc czynna nie może płynąć z sieci w kierunku magazynów energii (tj. sensory S2 i S3 monitorują kierunek przepływu energii do odpowiedniego zasobnika energii (rys. 2), zatem gdy  $L2 P > 0$ ,  $L3 P > 0$ ).

### System magazynowania energii zlokalizowany w torze generacji mocy (magazyn nie dostarczający mocy do

### sieci publicznej) dla instalacji PV o mocy mniejszej od 10 kW<sub>p</sub> i mniejszej niż 10 MWh/rok kalendarzowy

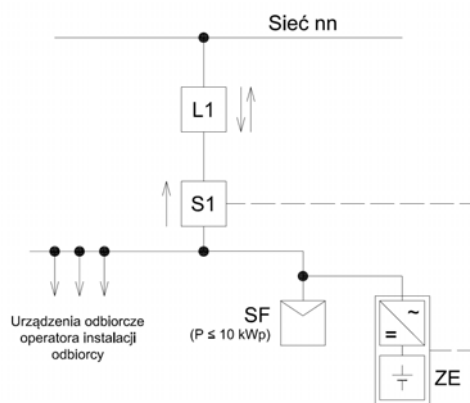
W tym wariantcie (rys. 3), opisanym w [1], magazyn energii jest przyłączony na stałe do instalacji wytwórczej i opomiarowany razem ze źródłem przez licznik L1. Instalacja wytwórcza ma moc mniejszą od 10 kW<sub>p</sub>. Sensor S1 monitoruje ten sam przepływ mocy co licznik L1.

W omawianym wariantcie, w którym magazyn energii nie dostarcza mocy do sieci publicznej, nie można pozwolić, aby zasobnik ten przy rozładowaniu oddawał energię z powrotem do sieci. Zasobnik energii może być zatem rozładowywany tylko w takim stopniu, aby jakkolwiek moc czynna nie przepływała z zasobnika do sieci ( $L1 P > 0$ ).

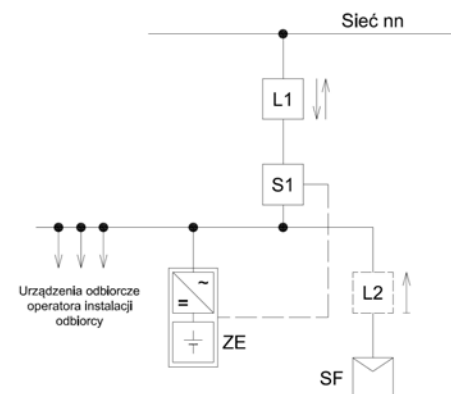
Sterowanie mocą czynną odbywa się na podstawie odczytów z sensora S1.

### System magazynowania energii zlokalizowany w torze poboru mocy (standardowy)

W prezentowanym wariantcie (rys. 4), opisanym w [1], magazyn energii nie jest przyłączony do instalacji wytwórczej. Sensor S1 monitoruje ten sam przepływ mocy co licznik L1.



Rys. 3. System magazynowania energii zlokalizowany w torze generacji mocy, instalacja PV o mocy  $\leq 10$  kW<sub>p</sub> [1]; opracowano na podstawie [12]



Rys. 4. System magazynowania energii zlokalizowany w torze poboru mocy [1]; opracowano na podstawie [12]

Należy wybrać jeden z dwóch możliwych wariantów pracy systemu magazynowania energii:

- magazyn energii nie pobiera mocy z sieci publicznej jeśli zakłada się, że energia generowana w instalacji wytwórczej i przejściowo przechowywana w systemie magazynowania energii będzie wprowadzona do sieci publicznej, to magazyn energii nie może być ładowany z sieci publicznej. Magazyn nie może więc być ładowany,

kiedy moc czynna płynie w kierunku układu generator/magazyn energii/odbiorca ( $L1 P \rightarrow 0$ );

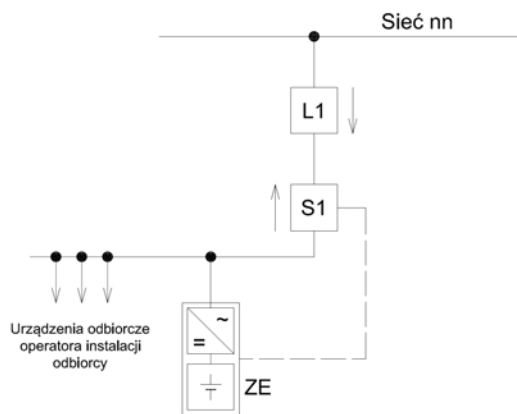
- magazyn energii nie dostarcza mocy do sieci publicznej

jeśli zakłada się, że magazyn energii będzie ładowany z sieci publicznej, to należy podjąć odpowiednie działania, aby zapewnić, że magazyn nie dostarczy z powrotem energii do sieci w czasie jego rozładowania. Magazyn energii nie może więc być rozładowywany, kiedy moc czynna płynie w kierunku sieci ( $L1 P \rightarrow 0$ ).

Sterowanie mocą czynną odbywa się na podstawie odczytów z sensora S1 zlokalizowanego po stronie poboru mocy.

### System magazynowania energii zlokalizowany w torze poboru mocy, bez instalacji wytwórczej

Ten wariant przyłączenia systemu magazynowania energii (rys. 5) powinien służyć do odciążenia sieci. Ładowanie magazynu energii z sieci odbywa się głównie w przypadku zbyt dużego obciążenia sieci (spowodowanego np. nadprodukcją energii z OZE) lub w celu obniżenia częstotliwości sieci w przypadku jej zbyt wysokiej wartości. Przechowywana w magazynie energia elektryczna może zostać pozostawiona do dyspozycji urządzeń znajdujących się w instalacji odbiorcy. Zasadniczo, magazyn energii może być zarówno ładowany z sieci, jak również może on dostarczać energię do sieci.



Rys. 5. System magazynowania energii zlokalizowany w torze poboru mocy, bez instalacji wytwórczej; oprac. na podstawie [12]

W wariantcie, w którym magazyn przy rozładowywaniu nie może oddawać energii do sieci publicznej (np. aby uniknąć mieszania taryf), należy zastosować sensor S1, jak to przedstawiono na rys. 5. Sensor ten uniemożliwia rozładowanie magazynu do sieci publicznej. Sensor S1 monitoruje ten sam przepływ mocy co licznik L1. Nie wolno więc rozładowywać zasobnika, kiedy moc czynna przepływa w kierunku sieci ( $L1 P \rightarrow 0$ ).

Sterowanie mocą czynną odbywa się na podstawie odczytów z sensora S1.

### Praca magazynu energii w mikro sieci

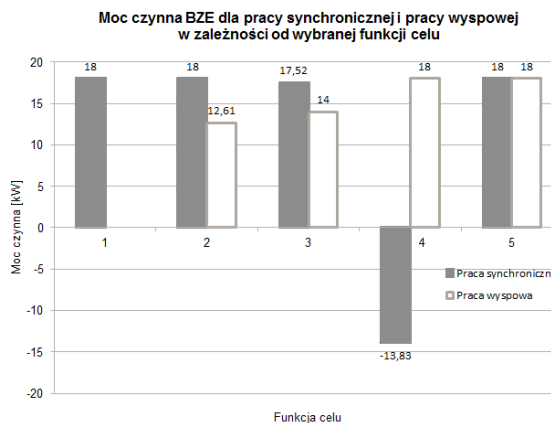
Tematyka magazynowania energii była m.in. rozważana podczas realizacji międzynarodowego projektu badawczego RIGRID (Rural Intelligent Grid - Inteligentne Sieci Elektroenergetyczne na obszarach wiejskich) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) [20]. Prowadzone w ramach tego projektu badania, odnośnie do rozważanej tu tematyki, dotyczyły m.in. optymalizacji pracy mikro sieci niskiego napięcia, w tym obliczeń optymalizacyjnych przeprowadzonych dla instalacji demonstracyjnej, opisanej w [20]. Instalacja ta została

zlokalizowana na terenie oczyszczalni ścieków. Celem prowadzonych obliczeń była optymalizacja konfiguracji oraz stanów pracy rozważanej mikro sieci w trybie symulacyjnym, z wykorzystaniem scentralizowanej logiki sterowania, dla różnych funkcji kryterialnych. Elementami składowymi tej mikro sieci były m.in. zestaw paneli fotowoltaicznych, spalinyowy agregat prądowłórczy oraz baterijny zasobnik energii (BZE).

W procesie optymalizacji możliwy był wybór różnych funkcji kryterialnych [20]. Dotyczą one np.: (1) minimalizacji ilości energii importowanej z sieci operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) do mikro sieci; (2) minimalizacji wartości całkowitych strat mocy czynnej w mikro sieci; (3) maksymalizacji wielkości energii generowanej w mikroźródłach opartych na odnawialnych źródłach energii (OZE); (4) minimalizacji wielkości energii generowanej w mikroźródłach opartych na nieodnawialnych źródłach energii; (5) minimalizacji wartości całkowitych (stałych i zmiennych) kosztów działania mikro sieci. Należy zaznaczyć, że funkcja kryterialna 1 była dostępna jedynie wtedy, gdy mikro sieć pracowała w trybie synchronicznym (połączonym) z siecią OSD. Ponadto, oprócz standardowych w takich przypadkach ograniczeń, w procesie optymalizacji wprowadzone zostały dodatkowe ograniczenia wynikające z przyjętej umownej mocy czynnej oraz maksymalnej dopuszczalnej wartości współczynnika  $\text{tg}\varphi$ .

W przypadku rozważanej demonstracyjnej mikro sieci niskiego napięcia, nie był dopuszczalny eksport mocy z mikro sieci do sieci OSD. BZE mógł pracować ze współczynnikiem mocy  $\cos\varphi$  różnym od wartości 1,0. Maksymalna moc czynna zasobnika wynosiła 18 kW. Należy też wspomnieć, że obliczenia optymalizacyjne mogły być prowadzone dla przedziału czasowego o dowolnej długości w czasie doby.

Wyniki przykładowych obliczeń optymalizacyjnych [20] odnośnie do mocy rozładowania lub ładowania BZE dla różnych trybów pracy mikro sieci oraz różnych możliwych do przyjęcia funkcji kryterialnych dla wybranego interwału czasowego doby, przy założonym poziomie generacji w mikroźródłach oraz wielkości obciążenia mikro sieci, zostały pokazane na rys. 6. Obliczenia optymalizacyjne zostały przeprowadzone dla środy w okresie letnim dla przedziału czasowego zaczynającego się o godz. 12.00. Agregat prądowłórczy mógł pracować jedynie w trybie pracy wyspowej mikro sieci. Jak widać, wartość mocy rozładowania/ładowania zasobnika zależy (czego się należało spodziewać) od wybranej funkcji kryterialnej oraz od trybu pracy mikro sieci (synchroniczna lub wyspowa).



Rys. 6. Moc czynna rozładowania lub ładowania BZE w wybranym interwale czasowym doby, w zależności od trybu pracy zasobnika oraz przyjętej funkcji kryterialnej

## Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wybrane aspekty zagadnienia magazynowania energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych niskich napięć. W szczególności: krótko scharakteryzowano różne systemy magazynowania energii możliwe do zainstalowania w sieciach nn; przedstawiono, na podstawie wytycznych niemieckich, wymagania techniczne dotyczące przyłączania magazynów energii do sieci nn oraz wymagania dotyczące pracy tych magazynów; zaprezentowano, również w oparciu o wytyczne niemieckie, przykładowe schematy przyłączania magazynów energii do sieci niskich napięć, łącznie z ich opisem. Ponadto, przedstawiono zagadnienie pracy magazynu energii w mikrosieci niskiego napięcia.

Na podstawie informacji zawartych w niniejszym artykule oraz w oparciu o ogólną wiedzę dotyczącą rozważanego tematu, można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski [1, 20]:

- przedstawione zagadnienia wskazują na dość dużą ich szczegółowość, odnoszącą się zarówno do wymagań dotyczących przyłączania magazynów energii do sieci nn oraz ich pracy, jak i różnych schematów przyłączenia tych magazynów do sieci, zawartych w wytycznych niemieckich;
- należałoby rozważyć, czy podobne wytyczne dotyczące magazynów energii elektrycznej nie powinny zostać opracowane przez operatorów krajowych systemów dystrybucyjnych, bądź przez Polskie Towarzystwo Prądu i Rozdziału Energii Elektrycznej;
- wydaje się, że rola i znaczenie systemów magazynowania energii elektrycznej przyłączanych do sieci dystrybucyjnych, w tym sieci niskich napięć, będą w najbliższych latach coraz większe. Główną przyczyną tego stanu rzeczy będzie w szczególności coraz większa liczba rozproszonych źródeł energii, w tym OZE, przewidywany rozwój elektromobilności oraz powstawanie w przyszłości mikrosieci niskiego napięcia;
- powstawanie coraz większej liczby magazynów energii elektrycznej pozwoli na uzyskanie istotnej poprawy w zakresie szeroko rozumianej efektywności energetycznej;
- wartość mocy rozładowania/ladowania magazynu energii, przyłączonego do demonstracyjnej mikrosieci niskiego napięcia, w danym interwale czasowym doby, przy założonym poziomie generacji w mikroźródłach oraz wielkości obciążenia tej mikrosieci, ściśle zależy od wybranej w procesie optymalizacji funkcji kryterialnej oraz od trybu pracy mikrosieci (synchroniczna lub wyspowowa).

## Podziękowania

W niniejszym artykule wykorzystano wyniki uzyskane w trakcie realizacji projektu RIGRID (Rural Intelligent Grid). Projekt ten był realizowany w ramach inicjatywy ERA-Net Smart Grids Plus, przy wsparciu Programu Horyzont 2020 Unii Europejskiej. Publikacja artykułu została sfinansowana ze środków Politechniki Warszawskiej przeznaczonych na działalność naukowo-badawczą.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Mirosław Parol, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: miroslaw.parol@jen.pw.edu.pl; mgr inż. Agnieszka Maciejko, innogy Stoen Operator Sp. z o. o., ul. Piękna 46, 00-672, Warszawa, E-mail: Agnieszka.Maciejko@innogy.com; dr inż. Bartłomiej Arendarski, Fraunhofer Institute IFF, Magdeburg, E-Mail: Bartlomiej.Arendarski@iff.fraunhofer.de

## LITERATURA

- [1] Parol M.: Magazynowanie energii w sieciach dystrybucyjnych niskich napięć. *Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej „Optymalizacja w Elektroenergetyce OPE'15”*, Konstancin-Jeziorna, 7 października 2015, 201-211
- [2] Komarnicki P., Arendarski B., Ramczykowski M.: Scenariusze rozwoju technologii magazynowania energii. W: *E-mobilność: wizje i scenariusze rozwoju*. Pod red. J. Gajewskiego, W. Paprockiego i J. Pieriegud, Centrum Myśli Strategicznych, Sopot 2017, 120-145
- [3] Paska J.: *Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
- [4] Bednarek K., Kasprzyk L.: Zasobniki energii w systemach elektrycznych – część 1. Charakterystyka problemu. <http://ever.eu/uploads/article/40/zasobniki-energii-w-systemach-elektrycznych-czesc-1-charakterystyka-problemu.pdf>
- [5] *Mikrosieci niskiego napięcia. Praca zbiorowa pod redakcją Mirosława Parola*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013
- [6] StoraXe® Home & Small Business Battery storage. System with 19, 28 or 47 kWh. ads-tec GmbH, Nürtingen, Germany
- [7] Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V.: Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), Issues 6-7
- [8] Lasseter R., Akhil A., Marnay Ch., Stephens J., Dagle J., Guttromson R., Meliopoulos A. S., Yinger R., Eto J.: White Paper on Integration of Distributed Energy Resources: “The CERTS MicroGrid Concept”, April 2002, <https://certs.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-50829.pdf>
- [9] Zarębski T.: Problemy magazynowania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł. *Energetyka*, 2008, Nr 3
- [10] Rokicki Ł.: Stabilność napięciowa w mikrosieciach niskiego napięcia. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Warszawska – Wydział Elektryczny, Warszawa 2013
- [11] Connecting and operating storage units in low voltage networks. VDE – FNN, June 2013
- [12] Anschluss und Betrieb von Speichern am Niederspannungsnetz. VDE, FNN – Hinweis, April 2019
- [13] Parol M.: Aspekty techniczne i prawne dotyczące pracy i przyłączania źródeł generacji rozproszonej do sieci dystrybucyjnych niskich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 89 (2013), Nr 5, 326-330
- [14] VDE-AR-N 4100 Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Niederspannung), VDE – FNN, April 2019
- [15] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, Entwurf Juli 2017, VDE – FNN
- [16] Electric Energy Storage. White Paper, IEC, Geneva 2011, <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>
- [17] US Department of Energy, Quadrennial Technology Review 2015: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities, [https://energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/quadrennial-technology-review-2015\\_1.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/quadrennial-technology-review-2015_1.pdf)
- [18] International Energy Agency (IEA), Technology Roadmap Energy Storage, OECD/IEA, 2014, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergystorage.pdf>
- [19] Komarnicki P., Lombardi P., Styczynski Z.: *Electric Energy Storage Systems: Flexibility Options for Smart Grids*. (eBook), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2017.
- [20] Raporty merytoryczne z realizacji międzynarodowego projektu badawczego RIGRID (Inteligentne Sieci Elektroenergetyczne na obszarach wiejskich) w latach 2016-2018. Prace niepublikowane.