

# Zasobniki energii oraz dwukierunkowe przekształtniki energoelektroniczne jako podstawa systemu zarządzania energią (SEMS)

**Streszczenie.** W artykule wyjaśniono istotność wdrożenia systemu zarządzania energią (SEMS) dla obiektów i instalacji o pewnych ograniczeniach. Pokazano przykładowe możliwości zastosowania systemu na poziomie komercyjnym i przemysłowym, a także z uwzględnieniem miejskiej trakcji elektrycznej i nowoczesnych obiektów kubaturowych. Przedstawiono wybrane scenariusze pracy systemu oraz główne jego elementy.

**Abstract.** This article explains the importance of implementing the energy management system (SEMS) for objects and installations with certain limitations. Examples of possible applications of the system are presented at both commercial and industrial level and they also take into consideration urban electric traction and modern cubature facilities. The article reveals selected scenarios of the system operation and its main elements. (Energy storage devices and bidirectional power electronic converters as the basis of a smart energy management system (SEMS)).

**Słowa kluczowe:** dwukierunkowe przekształtniki, SEMS, ładowarki EV, zasobniki energii.

**Keywords:** bidirectional power electronic converters, SEMS, EV chargers, energy storage devices.

## Wstęp

Od kilku lat zauważalny jest wzrost zainteresowania zasobnikami energii oraz systemami dystrybucji i zarządzania sieciami prądu stałego (DC). Związane jest to między innymi z trendem rozwoju coraz bardziej powszechnych odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz dążeniu do bezemisyjnych lub niskoemisyjnych środków transportu [1]. Konstruowanie współczesnych pojazdów elektrycznych (EV – ang. electric vehicle) nie byłoby możliwe bez rozwoju technologii zasobników akumulatorowych. Promowane technologie z napędami opartymi o wodorowe ogniwa paliwowe, wymagają stosowania akumulatorów celem stabilizacji obwodów zasilania pojazdu [2]. Ciągłe dążenie do zwiększania stosunku pojemności do masy i objętości zasobników akumulatorowych przy zachowaniu coraz to większej liczby cykli ładowania i rozładowania jest obecnie standardowym działaniem [3]. Obserwowany kierunek postępu technologicznego wzmacnia fakt rozwoju łączników energoelektronicznych. Pojawienie się współczesnych półprzewodników z azotku galu (GaN) oraz z węgla krzemu (SiC) pozwalają na wzrost sprawności, zmniejszenie masy i objętości przekształtników [4].

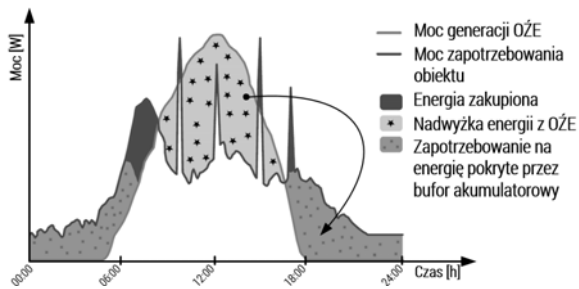
Trendy rynkowe oraz uregulowania prawne wielu państw wskazują, że w najbliższej przyszłości wzrastać będzie liczba pojazdów EV, a co za tym idzie wzrośnie liczba publicznych punktów ładowania EV. W Polsce wymagania dotyczące tego obszaru reguluje ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych [5, 6]. Kierunek rozwoju związany z montowaniem stacji i punktów ładowania EV w sąsiedztwie instalacji OZE oraz innych źródeł i odbiorów energii elektrycznej otwiera pewne możliwości optymalizacji. Funkcjonowanie takich urządzeń lub instalacji obarczone jest często dodatkowymi stratami mocy na drodze przekształcania energii. Przykładem takiego układu może być instalacja fotowoltaiczna (PV) z przekształtnikiem DC/AC zasilająca przydomową stację ładowania EV z przekształtnikiem AC/DC oraz DC/DC [7]. Ponadto układy działające poza wspólnym systemem zarządczym mogą pracować nieoptymalnie pod względem minimalizacji strat mocy. Wykorzystując pomiar prądu w punkcie zasilenia obiektu możliwe jest ograniczenie mocy ładowania EV w momencie zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną budynku. Możliwość systemu zarządzania energią (SEMS – ang. smart energy

management system) rosną w miarę dołączania kolejnych źródeł i odbiorów energii elektrycznej.

## Potrzeby rynku

Na poziomie konsumenckim wspomniany problem instalacji PV i przydomowej stacji ładowania można przenieść do centrum gęsto zabudowanego miasta, gdzie osiągnięcie wymaganej przez odbiorcę wartości mocy przyłączeniowej jest niemożliwe ze względów ograniczeń infrastruktury. Dodatkowo w przypadku oddalonej zabudowy na końcu linii energetycznej w ośrodkach wiejskich nadal występują problemy z ciągłością dostawy oraz jakością energii elektrycznej [8]. Znaczenie nadmienionych problemów nasila fakt rozwoju elektromobilności. Czas ładowania samochodu elektrycznego o pojemności magazynu energii 50 kWh i mocy ładowarki pokładowej (AC) 1,9 kW wynosi nawet 36 godzin. Wykorzystując stacje ładowania (DC) o mocy 50 kW możliwe jest skrócenie czasu do 1 godziny [9]. Jednak instalacja szybkiej ładowarki wiąże się z koniecznością doprowadzenia do punktu zasilania obiektu mocy wynikającej z znamionowej mocy ładowarki powiększonej o zapotrzebowanie budynku i innych odbiorów. Jedno z proponowanych rozwiązań związane jest z zastosowaniem akumulatorowego magazynu energii pełniącego rolę bufora energii. W czasie zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną głównym źródłem energii byłby magazyn energii. Z kolei w przedziałach czasu, w których zapotrzebowanie na energię byłoby mniejsze, magazyn energii byłby doładowywany z sieci elektroenergetycznej z mocą chwilową wynikającą z różnicy wartości mocy przyłączeniowej i wartości chwilowej zapotrzebowania obiektu. Przy rozwinięciu koncepcji o OZE zasobnik mógłby pełnić rolę magazynu energii w chwilach, gdy możliwa jest generacja mocy z OZE i pokrywać zapotrzebowanie na energię w momentach, gdy generacja mocy jest niska lub niemożliwa (rys. 1).

Z powodu powszechnego stosowania hamowania elektrodynamicznego w pojazdach trakcji miejskiej wartość napięcia na danym odcinku sieci może niebezpiecznie wzrosnąć. Po osiągnięciu pewnej wartości napięcia określonej przez parametry sieci następuje zwarcie biegunów odbieraka poprzez rezystor hamowania. Rezystor wytraca nadmiar energii kinetycznej pojazdu dopóki wartość napięcia nie zmniejszy się do wartości dopuszczalnej [11].



Rys. 1. Przykładowe przebiegi zapotrzebowania i generacji mocy przedstawiające koncepcję wykorzystania OZE oraz magazynu energii w postaci bufora systemu SEMS

W chwili, gdy pojazd jest jedyny na danym odcinku zasilania znaczna ilość energii ulega konwersji na energię cieplną w rezystorze hamowania. Energia ta może zostać wykorzystana przez inny pojazd poruszający się na tym samym odcinku, a także z wykorzystaniem systemu SEMS może w pewnym stopniu pokryć zapotrzebowanie na energię elektryczną obiektów takich jak biura, warsztaty i budynki pomocnicze zajezdni. Możliwe jest także zastosowanie takiego układu (SEMS) w mniejszej skali na potrzeby zasilania oświetlenia, banerów reklamowych, tablic z rozkładami linii, czy biletomatów na pętlach i przystankach.

W przypadku trolejbusowego transportu miejskiego opartego na pojazdach trakcyjnych z pokładowymi magazynami energii elementy systemu SEMS pozwalają na wydłużenie linii komunikacji miejskiej. Wydłużanie linii może być realizowane bez konieczności rozbudowy trakcji elektrycznej, która ze względów infrastrukturalnych jest często bardzo utrudniona lub niemożliwa. Realizacja polega na instalowaniu stacjonarnych i niepowiązanych z siecią trakcyjną urządzeń w odpowiednich, oddalonych lokalizacjach, które pozwolą na doładowanie magazynu energii trolejbusu. Doładowanie ma pozwolić na bezproblemowy powrót do obszaru występowania odcinków trakcji elektrycznej. Zasada działania takiego układu jest zbliżona do wspomnianego układu stacji ładowania EV i bufora w postaci akumulatorowego magazynu energii. Jednak ładowanie magazynu energii znajdującego na pokładzie trolejbusu nie odbywa się poprzez przekształtnik zewnętrzny, a poprzez przekształtnik z obwodem transformatorowym znajdujący się również na pokładzie pojazdu. Związane jest to z minimalizacją stopni przekształcania oraz z koniecznością skrócenia czasu ładowania do wymaganego minimum. Stacjonarny układ zainstalowany w dedykowanym kontenerze lub budynku wyposażony jest w akumulatorowy magazyn energii, który doładowywany jest poprzez dwa stopnie przekształtników: AC/DC i DC/DC z sieci elektroenergetycznej. Drugi stopień DC/DC zapewnia separację galwaniczną sieci elektroenergetycznej od obwodów ładowania stacjonarnego magazynu energii. Układ TBC-01 realizujący omawianą koncepcję został zrealizowany we współpracy PKT Gdynia oraz spółki AREX. Dzięki zastosowaniu stacjonarnego magazynu energii zrealizowano bezawaryjne ładowanie trolejbusu Solaris Trollino 12 Electric z mocą o wartości ponad 100 kW (610 V, 165 A). Warto zaznaczyć, że maksymalna moc ładowania stacjonarnego zasobnika wynosi 40 kVA i może być regulowana w zależności od zapotrzebowania i wartości mocy przyłączeniowej w danym punkcie sieci.

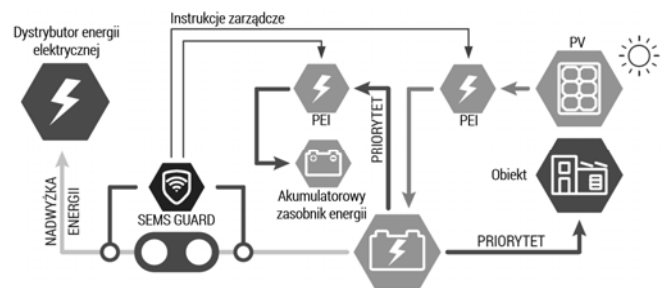
Za pomocą odpowiednich interfejsów energoelektronicznych (PEI – ang. Power Electronic Interface) możliwe jest zgromadzenie odpadowej energii ciepłej lub promieniowania w zasobniku energii [12].

Energia elektryczna pochodząca z takich procesów może zostać wykorzystana do innych celów podnosząc przy tym sprawność całego systemu, a tym samym realnie wpływając na obniżenie kosztów. Rozszerzając dynamikę zasobnika akumulatorowego poprzez dołączenie do niego superkondensatorowego (SC) zasobnika energii realnie jest pokrycie chwilowego zapotrzebowania na energię elektryczną na potrzeby procesów przemysłowych. Powstały w ten sposób układ hybrydowy (HESS – ang. Hybrid Energy Storage System) pozwala także na zwiększenie cykliczności akumulatorowej części modułu. Dodatkowo wykorzystanie takiego zasobnika pozwala na zminimalizowanie fluktuacji zmian napięcia zasilania niezbędnego do przeprowadzenia cyklicznych oraz dynamicznych procesów technologicznych, a także w przypadku generacji mocy wytwórczej przez zespoły elektrowni wiatrowych [13].

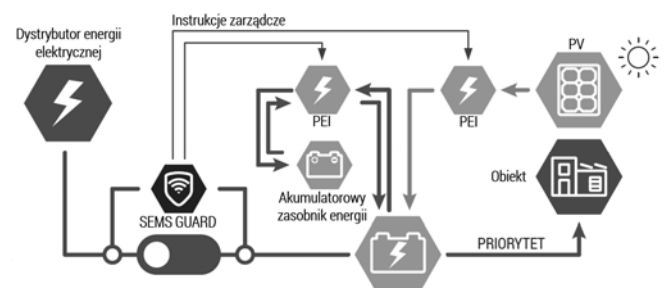
### Przykładowe scenariusze pracy

Przedstawione potrzeby rynku wprost przekładają się na odpowiednie konfiguracje i scenariusze pracy systemu. Scenariusz 1 pokazany na rysunku 2 dotyczy sytuacji, gdy generacja mocy z wykorzystaniem PV przewyższa zapotrzebowanie na energię elektryczną obiektu. Nadwyżka energii wykorzystywana jest do doładowywania lokalnego zasobnika, zgodnie z zaplanowaną strategią ładowania. Istniejąca różnica wartości mocy zapotrzebowania obiektu i doładowywania magazynu energii może być odsprzedawana dystrybutorowi energii elektrycznej.

Scenariusz 2 zilustrowany na rysunku 3 zaistnieje, gdy dostawa energii z pewnych powodów jest niemożliwa lub nie spełnia wymaganych parametrów jakości energii elektrycznej. Ocena przejścia w tryb pracy wyspowej może zostać podjęta na podstawie granicznych wartości parametrów jakości energii elektrycznej zadanych w układzie SEMS GUARD. Tryb pracy możliwy jest do zrealizowania, gdy dostępny jest zasobnik energii oraz inne źródła energii elektrycznej. Możliwości systemu SEMS zwiększają się z każdym kolejnym źródłem i konfigurowalnym odbiorem energii poprzez zastosowanie odpowiednich przekształtników PEI.

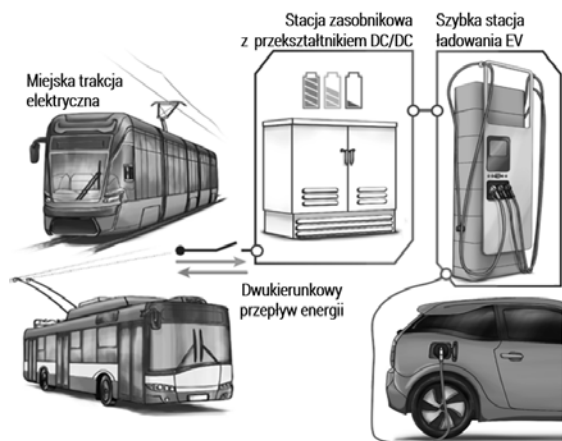


Rys. 2. Scenariusz 1 – praca dzienna z nadwyżką energii



Rys. 3. Scenariusz 2 – praca dzienna, wyspowa

Kolejny scenariusz pracy związany jest z wykorzystaniem miejskiej trakcji trolejbusowej lub tramwajowej. Na rysunku 4 ilustracyjnie pokazano przykład realizacji układu. Koncepcja polega na magazynowaniu energii pochodzącej z hamowania elektrodynamicznego pojazdów trakcyjnych. Realizowana strategia sterowania przekształtnika pozwala na zmniejszenie zmian napięcia odcinka trakcji.



Rys. 4. Wykorzystanie miejskich sieci trakcyjnych do zasilania szybkich stacji ładowania pojazdów EV

Dodatkowo możliwe jest wykorzystanie obwodu wtórnego przekształtnika do zasilania wolnostojącej szybkiej ładowarki EV.

#### Elementy systemu

Zasobnik energii jest jednym z podstawowych elementów systemu SEMS. W zależności od zastosowania, dostępnej objętości i wymaganych parametrów elektrycznych możliwe jest wykorzystanie m.in. akumulatorów litowo-jonowych w technologii LFP, NMC i LTO, a także kwasowo ołowiowych [3]. Do wykonania magazynu energii wykonanego przy okazji wspomnianej współpracy z PKT Gdynia o pojemności 65 kWh wykorzystano ogniwa w technologii LFP.

Zastosowanie odpowiednich urządzeń PEI umożliwia także wykorzystanie energii zgromadzonej w innych zasobnikach, np. hybrydowych HESS i kinetycznych [13]. Odpowiednie przekształtniki energoelektroniczne pozwalają na zasilanie systemu SEMS nie tylko ze źródeł OZE, ale m.in. z generatorów spalinyowych, czy ogniw paliwowych.

Różnorodność zastosowania sprawia, że układy przekształtnikowe muszą być konfigurowalne pod względem elektrycznych parametrów wejściowych i wyjściowych z ograniczeniami wynikającymi z konstrukcji układu. Zastosowanie wymusza cechy układu, które musi spełnić przekształtnik. Cechy te mogą być związane m.in. z topologią, zrealizowanymi algorytmami sterowania, użytymi materiałami izolacyjnymi oraz wymaganiami zawartymi w dedykowanych normach przedmiotowych. W systemie SEMS w zależności od aplikacji występują przekształtniki sieciowe AC/DC, DC/DC obniżające i podwyższająco-obniżające napięcie bez oraz z obwodem transformatorowym [7]. Zasadniczą cechą układów przekształtnikowych jest możliwość dwukierunkowego przepływu energii. Właściwość ta pozwala na przepływ energii z sieci elektroenergetycznej lub trakcyjnej do magazynu energii i odwrotnie. Ładowarka EV posiadająca taką funkcjonalność przy zastosowaniu odpowiedniego zasilania obiektu (rys. 2).

#### Podsumowanie

Modernizacja sieci dystrybucyjnych oraz inwestycje w jednostki wytwórcze jest procesem długotrwałym, dlatego należy spodziewać się, że sposobem na zmniejszenie konsumpcji energii będzie sukcesywny wzrost cen sprzedaży energii elektrycznej oraz subwencje rządowe ukierunkowane na lokalne zasobniki energii i OZE.

Rozwój technologii oraz dążenie do niskoemisyjnych lub bezemisyjnych pojazdów transportu grupowego i zbiorowego otwiera możliwości tworzenia wysokosprawnych i konfigurowalnych systemów zarządzania energią. Za pomocą przekształtników energoelektronicznych możliwe jest zrealizowanie żądań przez wymagane scenariusze pracy. Wzrost liczby pojazdów EV może zmienić podejście do istniejących w infrastrukturze miejskiej instalacji energetycznych tj. tramwajowych i trolejbusowych sieci trakcyjnych.

Wszystkie te czynniki determinują rozwój autonomicznych systemów energetycznych związanych z obiektem, które w dużym stopniu ograniczą zużycie energii elektrycznej oraz zmniejszą zapotrzebowanie na moc zamówioną.

**Autorzy:** mgr inż. Paweł Milewski, E-mail: [pawel.milewski@arex.pl](mailto:pawel.milewski@arex.pl); mgr inż. Tomasz Buda, E-mail: [tomasz.buda@arex.pl](mailto:tomasz.buda@arex.pl); dr Gerard Wiśniewski, E-mail: [gerard.wisniewski@arex.pl](mailto:gerard.wisniewski@arex.pl), Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o., ul. Hutnicza 3, 81-212 Gdynia.

#### LITERATURA

- [1] Badea N., Badea G. V.: Low Emission Infrastructure for Powered EVs, 2019 Electric Vehicles International Conference (EV), Bucharest, (2019).
- [2] Sorlei I.-S., Bizon N., Thounthong P., Varlam M., Carcadea E., Culcer M., Ilescu M., Raceanu M.: Fuel Cell Electric Vehicles— A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies, *Energies* 2021, 14(1), 252.
- [3] Miao Y., Hynan P., von Jouanne A., Yokochi A.: Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements, *Energies*, 12(6), (2019), 1074.
- [4] Czyż P., Reinke A., Michna M.: Zastosowanie tranzystorów GaN w wysokoczęstotliwościowych przekształtnikach DC/DC, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2017), R. 93, nr 1, s. 333-338.
- [5] Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych z 11 stycznia 2018, Dz.U. 2018 poz. 317.
- [6] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 26 czerwca 2019 r. w sprawie wymagań technicznych dla stacji ładowania i punktów ładowania stanowiących element infrastruktury ładowania drogowego transportu publicznego, Dz.U. 2019 poz. 1316.
- [7] Barlik R., Nowak M.: *Energoelektronika. Elementy, podzespoły, układy, OWPW*, Warszawa, (2014).
- [8] Woźniak M.: Zrównoważona gospodarka energetyczna na obszarach wiejskich w Polsce, *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, (2018), 21(1), s. 69-84.
- [9] Yilmaz M., Krein P. T., Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles, *IEEE Trans. Power Electron.*, (2013), 28, (5), pp. 2151– 2169.
- [10] Bielecka A., Wojciechowski D.: Stability Analysis of Shunt Active Power Filter with Predictive Closed-Loop Control of Supply Current, *Energies* (2021), 14(8), 2208.
- [11] Skibicki J.: Pojazdy elektryczne, część II, WPG, Gdańsk, (2012).
- [12] Sadiqu M. N. O., Omotoso A. A., Musa M. S., Power Electronic Interface, *IJTSRD*, Dec. (2019), 2456-6470, pp. 21-23.
- [13] Zhang Z., Zhang B., Wang D., Li P., Rong Y., Battery/supercapacitor HESS applied in DC microgrid, *Archives of Electrical Engineering*, (2020), 69(2), pp. 379-388.
- [14] Chwaleba A., Poniński M.: *Metrologia elektryczna*, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, (1998).
- [15] Kuśmierk Z. Korczyński M., J.: Measurement and Instrumentation – Why Needed in Engineering Education, 14<sup>th</sup> International EAEEIE Conference Educational, Inovations in EIE, Gdańsk, June (2003), s. 1-5.