OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Tadeusz DASZCZYŃSKI[1], Michał POŁECKI[2], Łukasz ROKICKI[3], Marcin SZEWCZYK[4], Szymon STOCZKO[5], Robert WÓJTOWICZ[6], Kamil PRZYGODA[7]

ORCID: [1]0000-0002-6262-0286, [2]0000-0002-8605-6501, [3]0000-0003-3539-708X, [4]0000-0003-3699-5559, [5]0000-0001-6161-8515, [6]0000-0003-1735-7148, [7]0009-0004-9263-8999

DOI: 10.15199/48.2026.07.24

Model techniczno-systemowy wspólnot energetycznych przyszłości jako narzędzia integracji lokalnych odnawialnych źródeł energii i redukcji ubóstwa energetycznego

A technical and systemic model of energy communities of the future as a tool for integrating local renewable energy sources and reducing energy poverty

[1]Tadeusz Daszczyński, Instytut Elektroenergetyki / Zakład Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej, Warsaw University of Technology
[2]Michał Połecki, Instytut Elektroenergetyki / Zakład Sieci i Systemów Elektroenergetycznych, Warsaw University of Technology
[3]Łukasz Rokicki, Instytut Elektroenergetyki / Zakład Sieci i Systemów Elektroenergetycznych, Warsaw University of Technology
[4]Marcin Szewczyk, Instytut Elektroenergetyki / Zakład Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej, Warsaw University of Technology
[5]Szymon Stoczko, Instytut Elektroenergetyki / Zakład Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej, Warsaw University of Technology
[6]Robert Wójtowicz, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy
[7]Kamil Przygoda, Instytut Elektroenergetyki / Zakład Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej, Warsaw University of Technology

Adres do korespondencji: tadeusz.daszczynski@pw.edu.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia kompleksowe ujęcie roli lokalnych wspólnot energetycznych jako kluczowego elementu transformacji energetycznej. Wskazano, że rozwój zdecentralizowanych struktur wytwórczych, opartych na OZE, wymaga spójnego podejścia technicznego i systemowego, umożliwiającego ich efektywną integrację z infrastrukturą elektroenergetyczną. Zaprezentowano autorski model testowy mikrosieci przeznaczony do badań eksperymentalnych i analiz symulacyjnych. Model umożliwia weryfikację algorytmów sterowania, scenariuszy pracy wyspowej, optymalizacji zużycia energii oraz analiz wpływu lokalnej generacji na parametry jakościowe energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: wspólnota energetyczna, transformacja energetyczna, mikrosieć, OZE

Abstract: This article presents a comprehensive approach to the role of local energy communities as a key element of the energy transition. It highlights that the development of decentralized generation structures based on renewable energy sources requires a coherent technical and systemic approach, enabling their effective integration with the power infrastructure. A proprietary microgrid test model is presented, designed for experimental research and simulation analyses. The model enables verification of control algorithms, islanding scenarios, energy consumption optimization, and analyses of the impact of local generation on electricity quality parameters.

Keywords: energy community, energy transition, microgrid, RES

Wstęp

System elektroenergetyczny przechodzi gwałtowną zmianę paradygmatu [1]: od dominacji scentralizowanej generacji mocy, zainstalowanej w konwencjonalnych elektrowniach zawodowych, do dynamicznie rosnącego udziału generacji rozproszonej, zainstalowanej w mikrosieciach. Mikrosieci są lokalnymi, autonomicznymi lub półautonomicznymi podsystemami wydzielonymi z sieci operatora systemu dystrybucyjnego (sieci OSD), integrującymi odnawialne źródła energii (OZE) z magazynami energii oraz sterowanymi energoelektronicznie odbiornikami. Mikrosieci umożliwiają elastyczne zarządzanie przepływami mocy na poziomie lokalnym, stabilizację napięcia i częstotliwości (w układzie autonomicznym) w warunkach zmiennej generacji OZE, a także umożliwiają autonomiczne funkcjonowanie wydzielonych części systemu w trybie wyspowym w przypadku zakłóceń współpracy z siecią OSD, co zwiększa niezawodność i odporność całego systemu elektroenergetycznego.

Ze względu na charakter mikrosieci jako podsystemów z dużym udziałem OZE, konieczne jest prognozowanie generacji energii z uwzględnieniem lokalnych warunków pogodowych. Zmienność generacji stanowi wyzwanie dla bilansowania produkcji i konsumpcji mocy w sieciach OSD, szczególnie w kontekście zapewnienia stabilności, a tym samym niezawodności całego systemu warunkującej ciągłość dostaw energii do odbiorców końcowych (blackout 2025 w Hiszpanii [2]). W odpowiedzi przedsiębiorstwa energetyczne,

klastry i huby energetyczne wdrażają zaawansowane technologie, umożliwiające dynamiczne zarządzanie zasobami sieciowymi, generacją, magazynowaniem i konsumpcją energii, co stanowi fundament funkcjonowania współczesnych, inteligentnych sieci elektroenergetycznych (Smart Grids, wirtualne elektrownie) [3]. Od strony regulacyjnej, wymagania te zawarte są w zapisach kodeksu sieci NC RfG w zakresie przyłączania jednostek wytwórczych (Network Code Requirements for Generators) [4], które zgodnie z wymaganiami OSD muszą być spełnione w węzłach przyłączeniowych mikrosieci do sieci OSD.

Powyższe działania (transformacja energetyczna) są skorelowane z regulacjami Unii Europejskiej i krajowymi [5, 6], a także z międzynarodowymi i krajowymi inicjatywami operatorów systemów dystrybucyjnych i przesyłowych [7], realizowanymi w celu zapewnienia niezawodności i elastyczności przy dynamicznie zmieniającej się strukturze generacji mocy.

Początek 2026 r. w Polsce przyniósł znaczące obniżenie temperatury oraz presję popytową energii elektrycznej. Od 1 stycznia do 16 lutego 2026 r. PSE nierynkowo zredukowały łącznie 11 030,3 MW mocy PV z powodu bilansowania KSE oraz 67,4 MW z powodu ograniczeń systemowych [8]. Wartość utraconej produkcji mocy PV jest to wartość zbliżona do mocy dużej elektrowni konwencjonalnej, która w tym przypadku „wypadła" wyłącznie z powodu konieczności utrzymania stabilności systemu elektroenergetycznego. Jest to więc istotny problem operacyjny w Polsce.

Węzeł przyłączeniowy mikrosieci do sieci OSD zbudowany jest z rozdzielnic średniego napięcia (SN) wyposażonych w urządzenia telemechaniki (wyłączniki SN z odpowiednio szybkimi układami napędowymi) oraz sterowników polowych i koncentratorów danych, a także transformatorów SN/nN. Sterowniki polowe podlegają dynamicznemu rozwojowi, zyskując coraz bardziej rozbudowane i zaawansowane funkcje w zakresie zarządzania inteligentnymi sieciami elektroenergetycznymi:

- monitorowanie i kontrola parametrów sieci [3] oraz wymiana danych z systemami SCADA OSD (IEC 61850) [8]
- zabezpieczeniowe umożliwiając automatyczną reakcję na zakłócenia.

Realizacja przez sterowniki polowe tych funkcji może skutkować wyłączeniem zarówno poszczególnych źródeł OZE w ramach mikrosieci, jak i całej mikrosieci. Działanie takie jest wysoce niepożądane z punktu widzenia wykorzystania lokalnych OZE. Obecnie nie istnieją rozwiązania w punktach przyłączenia mikrosieci do sieci OSD, które mogłyby przeciwdziałać takim wyłączeniom.

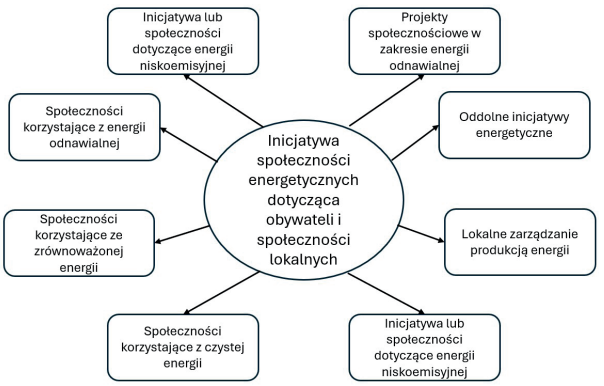
Według szacunków Instytutu Badań Strukturalnych problem ubóstwa energetycznego w Polsce dotyczy 12% gospodarstw domowych, czyli 4,6 mln osób. Wśród osób ubogich energetycznie znaczna liczba (2,5 mln) jest jednocześnie uboga dochodowo, podczas gdy 2,1 mln doświadcza ubóstwa energetycznego pomimo braku ubóstwa dochodowego. Pokazuje to, że ubóstwa energetycznego nie należy traktować jedynie jako pochodnej ubóstwa dochodowego, lecz jako odrębny wymiar deprywacji w zakresie dostępu do energii elektrycznej.

Głównym celem niniejszej publikacji jest opracowanie i analiza modelu testowego (szkoleniowego) dla koncepcji techniczno-systemowej wspólnot energetycznych przyszłości. Celem modelu jest przedstawienie potencjalnych korzyści wynikających z zastosowania rozszerzonej komunikacji OSD z mikrosieciami w kontekście wzrostu bezpieczeństwa oraz ograniczenia ubóstwa energetycznego w ramach wspólnot energetycznych.

Przegląd rozwiązań technicznych dla lokalnych wspólnot energetycznych

Społeczności energetyczne odgrywają kluczową rolę w europejskiej transformacji energetycznej, przyciągając inwestycje prywatne, zyskując poparcie społeczne dla projektów energetycznych i ułatwiając długoterminowe korzystanie ze źródeł odnawialnych [9, 10, 11]. W literaturze istnieje wiele definicji i terminów dotyczących inicjatyw OZE prowadzonych przez obywateli i społeczności lokalne, których różnorodność pokazano na Rys. 1.

Generalnie wspólnoty (społeczności) energetyczne dzieli się na scentralizowane, zdecentralizowane i rozproszone. Dodając klasyfikację uwzględniającą tożsamości i cele społeczności, można je podzielić na jednorodne społeczności energetyczne (homogenous energy communities – HEC), mieszane społeczności energetyczne (mixed energy communities – MEC)



Rys. 1. Inicjatywa społeczności energetycznych dotycząca obywateli i społeczności lokalnych [10]

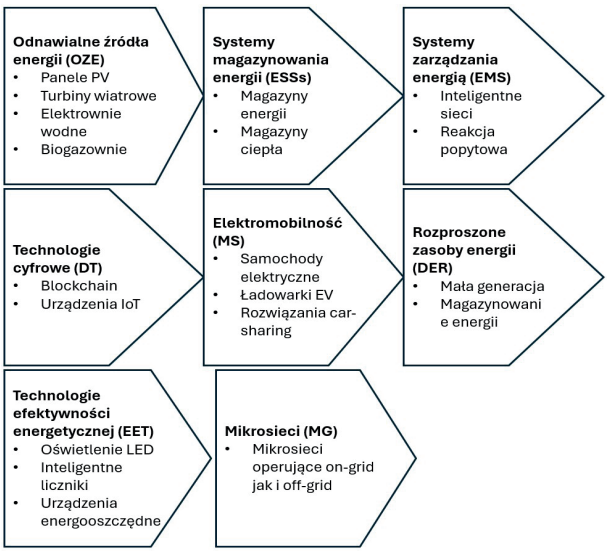
i samowystarczalne społeczności energetyczne (self-sufficient energy communities – SEC) [12].

Wspólnoty energetyczne wykorzystują wiele różnych technologii do osiągnięcia istotnego celu ogólnego, który polega na zapewnianiu swoim członkom określonych korzyści. Te korzyści to głównie środowiskowe, ekonomiczne i społeczne, przy jednoczesnym promowaniu OZE, efektywności energetycznej i dzielenia się energią. Podstawowe technologie stosowane w społecznościach energetycznych zostały pokazane na Rys. 2. Mogą one ze sobą współdziałać i przenikać w złożony i różnorodny sposób dla sprostania rosnącemu zapotrzebowaniu na energię. Różne technologie są stale opracowywane w celu bardziej efektywnego i zrównoważonego pozyskiwania, przetwarzania, dystrybucji, magazynowania i użytkowania energii.

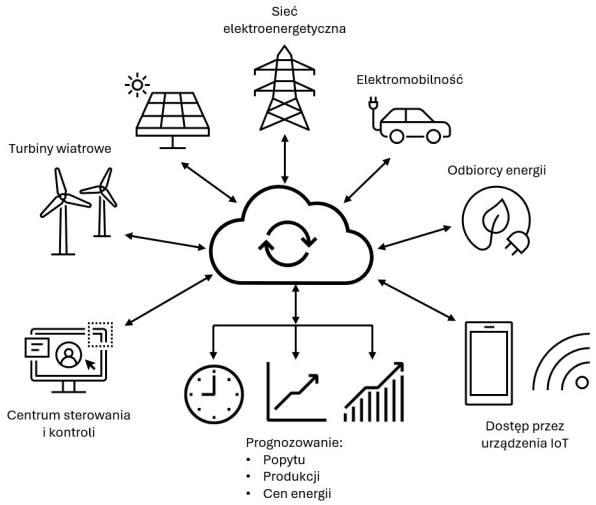
Jedną z takich ciekawych innowacyjnych technologii jest wirtualna elektrownia (Virtual Power Plant – VPP) – Rys. 3. Łączy ona ze sobą wiele rozproszonych geograficznie jednostek wytwórczych (konwencjonalnych jak i OZE), magazyny energii oraz odbiorców i konsumentów. W ten sposób połączone jednostki mogą utworzyć zoptymalizowany ekosystem, gdzie można dynamicznie planować i dostosowywać produkcję oraz inteligentnie handlować na rynku energii minimalizując koszty [14, 15].

Analiza wyników z modelu testowego

W związku z tym, że społeczność energetyczna może charakteryzować się jednym, wieloma lub też brakiem Lokalnych Obszarów Bilansowania (LOB), zaproponowano model testowy z wymianą energii zarówno wewnątrz LOB, jak i pomiędzy LOB i KSE [16]. Ogólną zasadę funkcjonowania wymiany energii pokazano na Rys. 4.



Rys. 2. Wykorzystanie różnych technologii dla społeczności energetycznych [13]

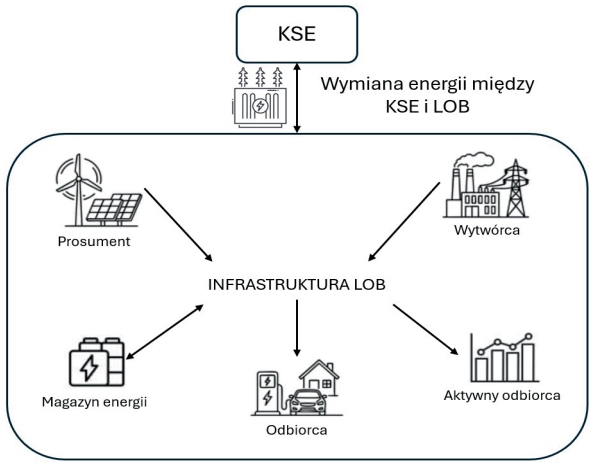


Rys. 3. Ogólna koncepcja działania i funkcjonowania wirtualnej elektrowni

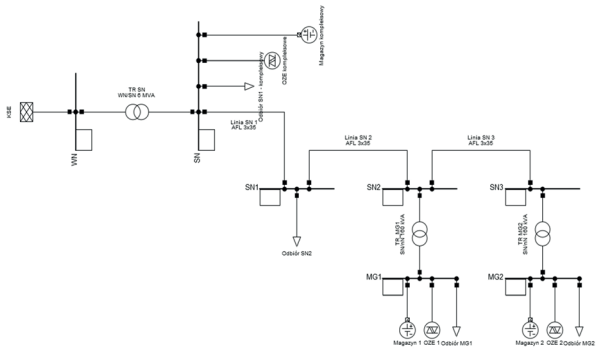
Celem wykonanych badań jest przedstawienie potencjalnych korzyści wynikających z zastosowania rozszerzonej komunikacji OSD z mikrosieciami. Model testowy, na którym przeprowadzono badania składał się z układu zasilania GPZ poprzez transformator WN/SN, jednego ciągu liniowego odchodzącego od rozdzielni SN oraz dodatkowych elementów przyłączonych bezpośrednio do szyn stacji SN. Elementy przyłączone bezpośrednio modelują kompleksowe działanie dużej grupy odbiorów, mikroinstalacji PV oraz magazynów energii. Model sieci testowej przedstawiono na Rys. 5.

W ramach badań przeanalizowano cztery warianty obliczeniowe. Obliczenia przeprowadzono w horyzoncie dobowym. Autorzy starali się tak dobrać dane aby pokazać korzyści wynikające ze skoordynowanej strategii pracy magazynów energii elektrycznej w celu optymalnego wykorzystania infrastruktury sieciowej.

Wariant 1 – sieć pasywna, to wariant badań, w którym odłączono wszystkie źródła oraz magazyny energii. Pozostawione odbiory mają charakterystyczny pro-



Rys. 4. Ogólna koncepcja wymiany energii między LOP i KSE [16]



Rys. 5. Model testowy sieci w programie PowerFactory

fil zapotrzebowania i w przypadku przedstawionym w badaniach przeciążają transformator w GPZ w godzinach od 17 do 21. Obciążenie procentowe transformatora GPZ przedstawiono na Rys. 6.

Wariant 2 – sieć z przyłączonymi źródłami OZE, bez wsparcia magazynów energii. Duże nasycenie źródłami PV sieci SN skutkuje eksportem energii elektrycznej ze strony sieci testowej do KSE. Na Rys. 7 zaznaczono obszar eksportu energii jako kolor czerwony. Ponadto źródła OZE tylko nieznacznie wpłynęły na przeciążenie transformatora i nadal ono występuje w godzinach od 18 do 21. Dodatkowo można zauważyć zwiększoną stromość obciążenia profilu w godzinach od 17 do 19. Może ona stanowić trudność w pracy jednostek konwencjonalnych pracujących w sieci KSE.

Wariant 3 – sieć z przyłączonymi źródłami OZE oraz magazynami energii. Łączna moc zainstalowana magazynów wynosi 13,3MW (z tego 0,9 MW stanowią magazyny lokalne, a 12,4 MW magazyn kompleksowy). Łączna pojemność magazynów wynosi 17,75 MWh (z tego 1,2 MWh stanowią magazyny lokalne, a 16,95 MWh magazyn kompleksowy). Pojemność magazynów dobrano w taki sposób, aby nie uległy one przeładowaniu ani rozładowaniu w dobowym cyklu pracy. Praca magazynów energii znacząco wpływa na pracę sieci dystrybucyjnej i wzrost autokonsumpcji. Algorytm sterowania magazynem miał jako funkcję celu magazynowanie energii ze źródeł OZE i przygotowanie się do kolejnej doby pracy. Praca magazynu rozwiązuje zatem problem eksportu do sieci WN, ale nie ogranicza przeciążenia transformatora w stacji GPZ. Zgromadzona w magazynach energia jest przechowywana na następną dobę. Z Rys. 8 można zauważyć, że spada także obciążenie transformatora od godziny 22 do końca doby. W tym czasie magazyn się rozładowuje.

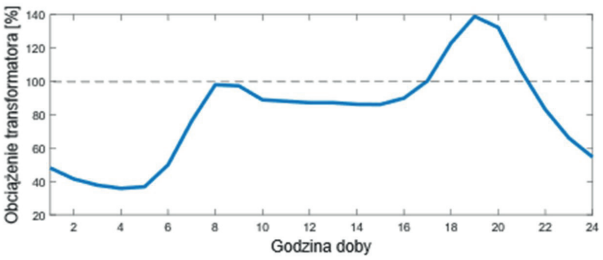
Omówione warianty 1–3 nie zawierały elementu komunikacji magazynów energii, źródeł i odbiorów z OSD. Oznacza to, że nie mogły świadczyć usług związanych z poprawą warunków pracy infrastruktury sieciowej, do której są przyłączone. Jest to powód dlaczego podstawowy problem techniczny przeciążającego się transformatora nie został rozwiązany.

Wariant 4 – sieć z przyłączonymi źródłami OZE oraz magazynami energii realizującymi działania związane z poprawą działania infrastruktury sieciowej. W wariancie 4 układy sterowania w mikrosieciach otrzymały wskazanie dotyczące pracy magazynów energii. Dzięki temu nie tylko zwiększono autokonsumpcję jak w wariancie 3, ale także zniesiono przeciążenie transformatora – Rys. 9.

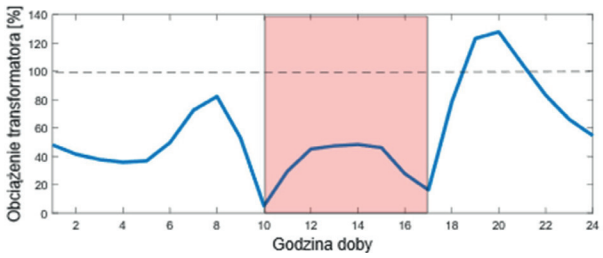
Na Rys. 10 przedstawiono porównanie mocy generowanych do sieci (wartości dodatnie) i mocy pobieranych z sieci (wartości ujemne) przez magazyny energii elektrycznej. Najważniejsze okresy pracy magazynów w wariancie 4 to ładowanie magazynów w godzinach od 9 do 17 oraz rozładowywanie magazynów energii w godzinach od 17 do końca doby. Ładowanie magazynów ogranicza eksport energii do sieci oraz przygotowuje zasób energii na szczyt wieczorny.

Wnioski

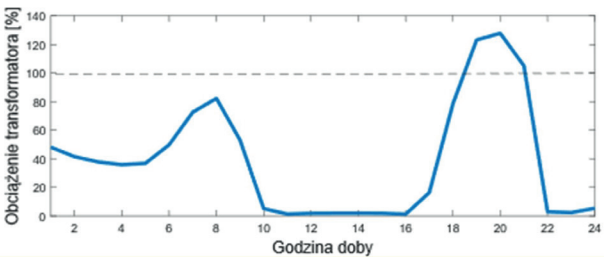
Przedstawione warianty obliczeń pokazują, że ograniczenie przeciążeń elementów sieciowych jest możliwe. Realizacja postawionego celu była możliwa dopiero, kiedy strategia sterowania magazynami mikrosieci była skoordynowana z warunkami pracy stacji GPZ.



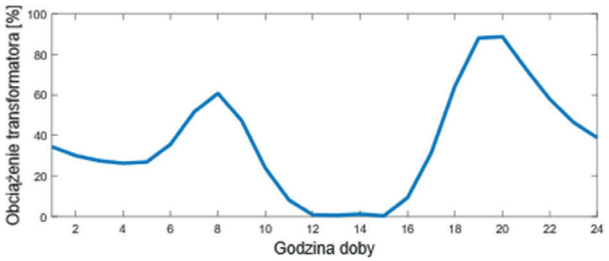
Rys. 6. Obciążenie procentowe transformatora w stacji GPZ w wariancie 1



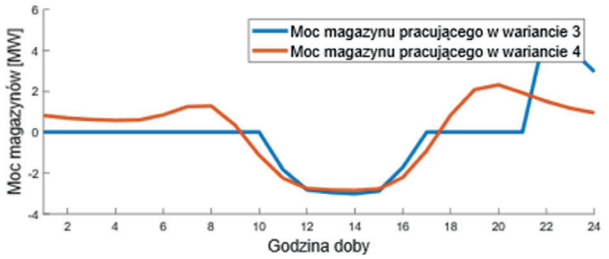
Rys. 7. Obciążenie procentowe transformatora w stacji GPZ w wariancie 2



Rys. 8. Obciążenie procentowe transformatora w stacji GPZ w wariancie 3



Rys. 9. Obciążenie procentowe transformatora w stacji GPZ w wariancie 4



Rys. 10. Porównanie mocy magazynów pracujących w wariantach 3 i 4

Współdziałanie operatorów mikrosieci i OSD pozwala zatem na optymalizację wykorzystania zasobów w dynamicznych warunkach pracy.

W niniejszym artykule poruszono regulacyjność magazynów energii jako typowego elementu mikrosieci służącego do poprawy warunków pracy elementów sieciowych. Dalsze badania mogą obejmować bardziej złożone algorytmy, w tym regulację rozproszoną, oraz zwiększenie wykorzystania regulacyjności mikrosieci o sterowane źródła wytwórcze (mikroturbiny gazowe, ogniwa paliwowe, etc.) oraz regulowane odbiory.

Innym, nieporuszonym w badaniach, zagadnieniem jest bilansowanie się KSE. Nadprodukcja z OZE może prowadzić w pewnych przypadkach do nadmiarowych wyłączeń w konwencjonalnych jednostkach wytwórczych, narażając je na koszty związane z ponowny uruchomieniem po okresie produkcji z OZE. Uniknięcie tak alokowanych kosztów możliwe jest przy wykorzystaniu sygnałów sterowania dla pracy mikrosieci.

Zastosowanie urządzeń komunikacji w złączach SN/nN pozwala nie tylko na współpracę mikrosieci z OSD ale także koordynację działań mikrosieci pomiędzy sobą w sposób uwzględniający niezawodność pracy mikrosieci w przypadku konieczności przejścia do pracy wyspowej.

Wyniki analiz potwierdzają, że właściwie zaprojektowane i zarządzane mikrosieci w ramach wspólnot energetycznych mogą istotnie zwiększyć autokonsumpcję energii z OZE, poprawić bezpieczeństwo energetyczne na poziomie lokalnym oraz przyczynić się do redukcji ubóstwa energetycznego poprzez obniżenie kosztów dostaw energii i stabilizację cen. Artykuł stanowi ilustrację rozwoju koncepcji techniczno-systemowych wspierających zrównoważoną transformację sektora elektroenergetycznego.

Treść tego artykułu została wygłoszona podczas Konferencji "System Elektroenergetyczny: Bezpieczeństwo Operacyjne i Rynkowe" w 2026 roku (SEBOR'26).

Przyjęto: 08.04.2026, **zaakceptowano:** 12.06.2026, **opublikowano:** 21.07.2026

LITERATURA

[1] Machowski J., Białek J.W., Bumby J.R., Power System Dynamics: Stability and Control, John Wiley & Sons, 2020; ISBN: 978-1119526346
[2] Cetinkaya U., i in., Technical Analysis and Strategic Insights from the 2025 Spain Blackout, International Conference on Smart Grid, 2025, DOI: 10.1109/icSmartGrid66138.2025.11071817
[3] Efstratiadi M-A. i in., A Novel Holistic Energy Management System Incorporating PV Generation and Battery Storage for Commercial Customers, IEEE Trans. Sustainable Energy, 2024; DOI: 10.1109/TSTE.2024.3353224
[4] Rozporządzenie Komisji UE 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r., Kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresieprzyłączania jednostek wytwórczych do sieci (RfG), https://www.pse.pl/kodeksy/rfg [online, dostęp 01.11.2025]
[5] European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/ [online, dostęp 01.11.2025]
[6] Europe Fit for the Digital Age, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/ [online, dostęp 01.11.2025]
[7] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego w sprawie rynku wewnętrznego energii elektrycznej 2019/943 wraz z późniejszymi zmianami (2024/1747)
[8] https://globenergia.pl/ponad-11-gw-mocy-do-piachu-system-nie-dzwignal-generacji/ [online, dostęp: 18.02.2026]
[9] Norma IEC 61850, „Communication networks and systems in substations", 2007
[10] Dóci G.; Vasileiadou E.; Petersen A.C., Exploring the Transition Potential of Renewable Energy Communities, Futures, 2015, 66, pp. 85–95
[11] Ahmed S., Ali A., D'Angola A., A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations, Sustainability, 2024; 16(5):1749. https://doi.org/10.3390/su16051749
[12] N. J. Bąk i inni, „Manual Społeczności energetycznych", PLZ Spółdzielnia, Warszawa 2022
[13] Canizes B.; Costa J.; Bairrão D., Vale Z., Local Renewable Energy Communities: Classification and Sizing, Energies, 2023, 16, 2389
[14] Lazaroiu A. C., Roscia M., Lazaroiu G. C., Siano P., Review of Energy Communities: Definitions, Regulations, Topologies, and Technologies, Smart Cities, 2025, 8(1), 8. https://doi.org/10.3390/smartcities8010008
[15] N. Naval, J.M. Yusta, Virtual power plant models and electricity markets - A review, Renew Sustain Energy Rev, 149 (2021), 111393, 10.1016/j.rser.2021.111393
[16] H.M. Rouzbahani, H. Karimipour, L. Lei, A review on virtual power plant for energy management, Sustain Energy Technol Assess, 47 (2021), 101370, 10.1016/j.seta.2021.101370
[17] T. Chmiel, J. Paska, A. Sobolewska, K. Wawrzyniak, 1. Rozwiązania dla energetyki lokalnej. Propozycja dla społeczności energetycznych, Raport NCAE, Warszawa, październik 2025