

doi:10.15199/48.2024.02.08

Mikrosieci – mikrosystemy energetyczne zasilające odbiorców energii. Stan aktualny i perspektywy rozwoju

Streszczenie. Artykuł dotyczy ważnego zagadnienia, jakim są mikrosieci – mikrosystemy energetyczne służące do zasilania odbiorców energii. Najpierw opisano różnego rodzaju mikrosieci: mikrosieci AC, mikrosieci DC, hybrydowe mikrosieci AC/DC oraz wielonośnikowe mikrosieci energetyczne. Następnie scharakteryzowano dotychczasowe prace dotyczące mikrosieci w Zakładzie Sieci i Systemów Elektroenergetycznych PW oraz aktualne prace badawcze i wyzwania na przyszłość, a także perspektywy rozwoju mikrosieci. Artykuł zakończono podsumowaniem i sformułowaniem wniosków.

Abstract. The paper concerns important issue, what are microgrids – energy micro-systems serving for supply of energy receivers. First various kinds of microgrids: AC microgrids, DC microgrids, hybrid AC/DC microgrids, and multi-carrier energy microsystems have been characterized. Then up to now works concerning microgrids realized in Division of Electrical Power Network and Systems at Warsaw University of Technology, current scientific works, challenges to the future, and development perspectives of microgrids were characterized. At the end of the paper summary and conclusions have been included. (Microgrids – energy micro-systems supplying energy receivers. Current state and development perspectives).

Słowa kluczowe: sieci dystrybucyjne, struktury, rozwój, mikrosieci.

Keywords: distribution grids, structures, development, microgrids.

Wstęp

W ostatnich latach sformułowano wiele różnorodnych wymagań stawianych pod adresem elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych, opisanych m.in. w [1 - 3]. W celu spełnienia choćby niektórych z tych wymagań, zaproponowano kilka nowatorskich koncepcji odnoszących się do przyszłościowych struktur i zasad funkcjonowania sieci dystrybucyjnych. Wśród tych koncepcji na pierwszym miejscu znajduje się idea inteligentnych elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych (smart power distribution grids – SPDG), obejmująca swoim zakresem mikrosieci średnich i niskich napięć oraz wirtualne elektrownie [1 - 3]. SPDG jest systemem, który z założenia ma zarządzać w sposób inteligentny pracą wszystkich podmiotów, które uczestniczą w procesie wytwarzania, przesyłu, dystrybucji, magazynowania i użytkowania energii elektrycznej. Zasadniczym celem działania SPDG jest dostarczanie energii elektrycznej odbiorcom w sposób możliwie najbardziej bezpieczny, niezawodny, efektywny ekonomicznie i nieszkodzący środowisku naturalnemu.

W niniejszym artykule główny nacisk położono na zagadnienie mikrosieci, pokrótce scharakteryzowano mikrosieci niskiego napięcia prądu przemiennego (AC), mikrosieci prądu stałego (DC), mikrosieci hybrydowe (AC/DC) oraz mikrosieci energetyczne wielonośnikowe. Analizie poddano stan aktualny prowadzonych prac badawczych i wdrożeniowych, w oparciu o doświadczenia Zakładu Sieci i Systemów Elektroenergetycznych Politechniki Warszawskiej (ZSiSE PW), a także wyzwania i perspektywy rozwojowe dotyczące mikrosieci.

Artykuł zakończono podsumowaniem i przedstawieniem wniosków dotyczących rozważanej tematyki.

Niniejszy artykuł jest rozszerzeniem referatu pt. „Mikrosieci - nowe struktury zasilania odbiorców energii. Stan aktualny i perspektywy rozwoju” zaprezentowanego przez jego autora na Konferencji Naukowo-Technicznej „100 lat Badań i Kształcenia w Elektrotechnice”, która odbyła się w dniach 6-7 czerwca 2022 roku na Politechnice Warszawskiej w Warszawie.

Mikrosieci niskiego napięcia prądu przemiennego

Mikrosieć niskiego napięcia prądu przemiennego (AC) jest autonomicznym mikrosystemem elektroenergetycznym [1 - 4], który może obejmować swoim zakresem źródła

wytwarzania energii elektrycznej (mikroźródła), magazyny energii, odbiory mocy elektrycznej, urządzenia sterujące oraz łączące je linie niskich napięć (nN). Wśród mikroźródeł najczęściej wymienia się [1 - 4]: mikroinstalacje, rozwiązania wykorzystujące odnawialne nośniki energii (mikroturbiny wiatrowe, mikroinstalacje fotowoltaiczne, mikroturbiny na biopaliwa, małe turbiny wodne), a także ogniwa paliwowe. Spotykane są również małe spalinowe agregaty prądotwórcze.

Jeśli chodzi o magazyny energii w mikrosieciach AC, to najczęściej są to [1 - 3]: baterie akumulatorów różnego typu, koła zamachowe oraz superkondensatory.

Rozróżnia się dwa rodzaje odbiorów mocy i energii [1 - 4], tj. odbiory sterowalne i odbiory niesterowalne.

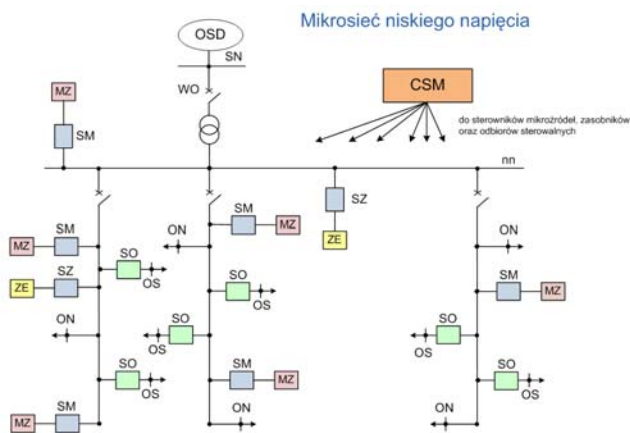
Należy w tym miejscu wspomnieć o samochodach elektrycznych lub samochodach z napędem hybrydowym [1, 2, 5, 6], które z jednej strony są odbiorami energii elektrycznej (w trybie ładowania akumulatorów), a z drugiej mogą dostarczać energię do sieci dystrybucyjnej (w trybie rozładowania akumulatorów). Mogą więc pełnić rolę mobilnych magazynów energii.

Warto podkreślić, że przyłączanie niektórych mikroźródeł, a także magazynów energii oraz odbiorów sterowalnych do sieci nN odbywa się przy użyciu przekształtników energoelektronicznych.

Istotną kwestią jest relacja zachodząca między mikrosiecią a siecią Operatora Systemu Dystrybucyjnego (OSD). Pod tym względem mikrosieć może pracować równolegle (synchronicznie) z siecią OSD lub może działać w trybie wyspowym. Z punktu widzenia sieci OSD, mikrosieć AC można traktować jako sterowalny, zagregowany odbiór mocy lub jako źródło wytwórcze [1 - 3].

Biorąc pod uwagę funkcjonowanie mikrosieci, rozróżnia się dwie strategie sterowania jej pracą [1, 2, 4], tj. sterowanie scentralizowane oraz sterowanie zdecentralizowane (rozproszone). W trybie sterowania scentralizowanego istnieje centralny sterownik mikrosieci (CSM) oraz sterowniki lokalne (mikroźródła – SM, zasobników (magazynów) energii – SZ, sterowalnych odbiorów mocy – SO). Natomiast, w trybie sterowania zdecentralizowanego „inteligentne” sterowniki lokalne (przy braku sterownika centralnego) powinny mieć zdolność do komunikowania się ze sobą i odpowiedniego działania.

Przykładową mikrosieć niskiego napięcia AC pracującą w trybie sterowania zcentralizowanego pokazano na Rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowa mikrosieć AC oraz sposób jej przyłączenia do sieci OSD (CSM – centralny sterownik mikrosieci, MZ – mikroźródło, ZE – zasobnik (magazyn) energii, OS – odbiór sterowalny, ON – odbiór niesterowalny, SM – sterownik mikroźródła, SZ – sterownik zasobnika energii, SO – sterownik odbioru, WO – wyłącznik oddzielający mikrosieć od sieci OSD) [1]; oprac. na podstawie [2]

Mikrosieci niskiego napięcia prądu stałego

Zasada pracy mikrosieci prądu stałego (DC) i jej struktura zostały opisane m.in. w [1, 7].

W przypadku mikrosieci DC mikroźródła (w zależności od ich rodzajów) są przyłączane do „szyny” DC za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych DC/DC lub DC/AC, zaś magazyny energii za pośrednictwem przekształtników DC/DC. Większość odbiorów jest przyłączanych za pomocą przekształtników DC/AC, niektóre zaś są przyłączane bezpośrednio lub za pomocą przekształtników DC/DC [1, 7].

Panuje powszechne przeświadczenie, że użycie przekształtników energoelektronicznych powinno poprawić właściwości regulacyjne mikrosieci DC. Układ sterowania pracą tej mikrosieci, podobnie jak dla mikrosieci AC, może być scentralizowany lub zdecentralizowany. Mikrosieć DC może pracować w trybie równoległym z siecią dystrybucyjną AC lub w trybie oddzielnym (wyspowym). Zalety i wady obu trybów pracy są tu podobne jak w przypadku mikrosieci AC [1, 7].

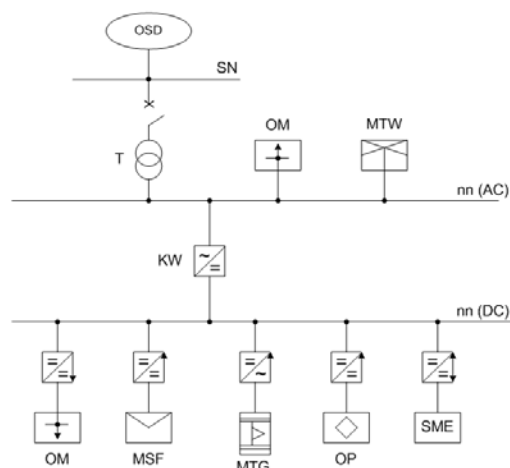
Hybrydowe mikrosieci AC/DC

Uważa się, że perspektywicznymi rozwiązaniami w zakresie mikrosieci są hybrydowe mikrosieci AC/DC, które sprzyjają integracji infrastruktury DC z istniejącymi systemami AC [1, 8].

Na Rysunku 2 została przedstawiona przykładowa hybrydowa mikrosieć AC/DC opracowana w RWTH Aachen.

Zastosowaniu przesyłu energii elektrycznej za pomocą technologii DC sprzyja wiele okoliczności, wymienionych m.in. w [1, 8, 9]. Okoliczności te przyczyniają się właśnie do powstawania hybrydowych mikrosystemów AC/DC, w których dwukierunkowe konwertery sprzęgają ze sobą „szynę” AC i DC (Rys. 2). Sterowanie konwerterem sprzęgającym jest jednym z najważniejszych zagadnień dla zapewnienia odpowiedniej stabilności działania systemu hybrydowego i możliwości dostarczania przez ten system energii do odbiorców [1, 8].

Hybrydowe mikrosieci AC/DC są traktowane jako optymalne podejście systemowe, gdyż łączą one główne zalety mikrosieci AC i mikrosieci DC [1].



Rys. 2. Przykładowa hybrydowa mikrosieć AC/DC opracowana w RWTH Aachen (OM – odbiór mocy, MTW – mikroturbozespół wiatrowy, KW – dwukierunkowy konwerter sprzęgający AC/DC, MSF – mikrosystem fotowoltaiczny, MTG – mikroturbina gazowa, OP – ogniwo paliwowe, SME – system magazynowania energii) [1]; oprac. na podstawie [8]

Charakterystyka różnych topologii (struktur) hybrydowych mikrosieci AC/DC, obejmujących mikrosieć DC i mikrosieć AC, oraz połączonych z konwencjonalną siecią elektroenergetyczną AC została przedstawiona w [9]. Z kolei, w artykule [10] zaprezentowano metody sterowania stosowane w przypadku hybrydowej mikrosieci AC/DC pracującej w trybie wyspowym.

Wielonośnikowe mikrosieci energetyczne

Innym perspektywicznym rozwiązaniem w zakresie mikrosieci są wielonośnikowe mikrosieci energetyczne (WME). Są to rozwiązania zapewniające zintegrowaną dostawę na poziomie lokalnym energii elektrycznej, ciepła i chłodu [1, 11]. Rozwiązania te mają sprzyjać minimalizacji kosztów zużycia wszystkich dostępnych nośników energii i pozwalać na uzyskanie znaczącego efektu synergii. Uważa się, że odpowiednie połączenie charakterystycznych cech różnych nośników energii może pozwolić na osiągnięcie znacznych korzyści technicznych i ekonomicznych [1, 11].

WME, jako system lokalnej dostawy energii, obejmuje swoim zakresem: źródła, zasobniki i odbiory różnych postaci energii. Najczęściej nośnikami energii w WME są [1, 11]: energia elektryczna, gaz, ciepło, chłód, promieniowanie słoneczne oraz ruch powietrza.

WME, w celach optymalności działania, powinna w czasie swojej pracy spełniać dwa podstawowe warunki [1]:

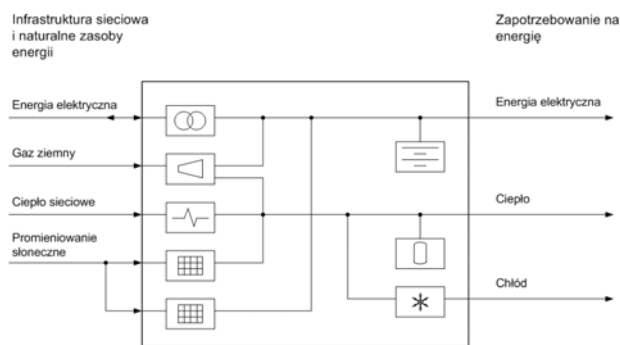
- dostarczać poszczególne nośniki energii na poziomie wymaganym przez odbiorców,
- realizować ściśle określoną funkcję celu w przyjętym okresie optymalizacji.

Podstawowym elementem strukturalnym mikrosieci wielonośnikowej jest tzw. koncentrator energetyczny. Pełni on rolę interfejsu między elementami infrastruktury odnoszącej się do wytwarzania, rozdziału i zużycia poszczególnych nośników energii [1, 11, 12]. Pierwotna koncepcja koncentratora energetycznego (*energy hub*) została przedstawiona w pracach [13, 14].

Przykładową strukturę koncentratora energetycznego pokazano na Rysunku 3.

Jak widać, elementami składowymi koncentratora energetycznego są następujące urządzenia (Rys. 3): transformator SN/nN, mikroturbina gazowa, wymiennik ciepła, kolektor słoneczny, system fotowoltaiczny, bateria akumulatorów, zasobnik gorącej wody (c.w.u.), absorpcyjna wytwarzacz chłodu. Koncentrator energetyczny służy do

realizacji funkcji konwersji, magazynowania i rozdziału różnych nośników energii.



Rys. 3. Schemat poglądowy koncentratora energetycznego [1]; oprac. na podstawie [11]

Optymalizacja struktur WME jest zasadniczym zadaniem wykonywanym podczas ich projektowania.

Dotychczasowe prace dotyczące mikrosieci w Zakładzie Sieci i Systemów Elektroenergetycznych PW

Przez ostatnich 19 lat w Zakładzie Sieci i Systemów Elektroenergetycznych Politechniki Warszawskiej zostało wykonanych dużo prac badawczych i publikacji dotyczących mikrosieci niskiego napięcia. W szczególności były to rozprawy doktorskie, projekty badawcze, monografie i rozdziały w monografiach, artykuły do czasopism i referaty na konferencje, a także prace dyplomowe. Warto podkreślić, że zdecydowana większość zrealizowanych prac dotyczyła mikrosieci niskiego napięcia prądu przemiennego. Tematyka hybrydowych mikrosieci AC/DC była i jest rozwijana przez Łukasza Rokickiego, zaś tematyka wielonośnikowych mikrosieci energetycznych była rozwijana głównie przez Jacka Wasilewskiego.

Należy wspomnieć, że pod kierunkiem autora niniejszego artykułu zostały przygotowane trzy rozprawy doktorskie dotyczące tematyki mikrosieci.

Pierwsza rozprawa [15] była poświęcona zagadnieniu optymalizacji kosztów bilansowania energii elektrycznej w mikrosieci współpracującej z siecią rozdzielczą spółki dystrybucyjnej. Dowiedziono w niej, że rozwiązanie tego zadania może być źródłem istotnych korzyści ekonomicznych dla zarządcy mikrosieci (właścicieli mikroźródeł) jak i spółki dystrybucyjnej, w obszarze działania której znajduje się analizowana mikrosieć. Może być także źródłem oszczędności dla odbiorców przyłączonych do mikrosieci. W rozprawie zostało przedstawione rozwiązanie problemu zarówno dla bilansowania strefowego i międzystrefowego wewnątrz mikrosieci, jak i bilansowania międzystrefowego ze spółką dystrybucyjną.

Druga rozprawa [16] dotyczyła tematu pracy mikrosieci w systemie elektroenergetycznym. Okazało się, iż rozwiązanie zadań optymalizacyjnych występujących podczas pracy mikrosieci w trybie synchronicznym może się przyczynić do poprawy efektywności ekonomicznej w czasie jej eksploatacji. Z kolei opracowanie odpowiednich strategii sterowania pracą mikrosieci w trybie wyspowym jest niezbędne do celu zapewnienia poprawnego jej funkcjonowania.

Trzecia rozprawa [17] odnosiła się do optymalizacji konfiguracji i stanów pracy hybrydowych mikrosystemów elektroenergetycznych niskiego napięcia AC/DC. Zostało w niej dowiedzione, że opracowanie i rozwiązanie modeli dotyczących wspomnianego zadania (przy użyciu sztucznych systemów immunologicznych) może się

przyczynić do wzrostu efektywności procesu przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, wzrostu wykorzystania odnawialnych nośników energii, a także poprawy jakości zasilania w energię elektryczną odbiorców.

Autor niniejszego artykułu był także kierownikiem dwóch zespołowych projektów badawczych poświęconych tematyce mikrosieci.

Pierwszy projekt badawczy krajowy, finansowany przez MNiSW, dotyczył analizy stanów pracy elektroenergetycznych sieci rozdzielczych niskich napięć z zainstalowanymi źródłami generacji rozproszonej. W ramach tego projektu zrealizowano następujące zadania: określono warunki współpracy mikrosieci z sieciami rozdzielczymi zarządzanymi przez spółki dystrybucyjne, opracowano metody i oparte na nich algorytmy sterowania pracą mikrosieci w trybie pracy synchronicznej i autonomicznej, przeprowadzono przykładowe obliczenia rozplywowe, zwarciove i optymalizacyjne oraz dokonano analizy stanów przejściowych w testowej mikrosieci.

Drugim wykonywanym projektem badawczym był projekt międzynarodowy, finansowany przez NCBiR, o nazwie „Rural Intelligent Grid (RIGRID)” – nazwa polska „Inteligentne Sieci Elektroenergetyczne na obszarach wiejskich”. Projekt ten był realizowany w latach 2016 – 2018 przez międzynarodowe konsorcjum, którego liderem był Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF z Niemiec. Politechnika Warszawska – Instytut Elektroenergetyki była jednym z uczestników konsorcjum z Polski, zaś autor niniejszego artykułu był kierownikiem zespołu wykonawców ze strony Instytutu Elektroenergetyki PW w tym projekcie. Liderem konsorcjum krajowego we wspomnianym projekcie była firma Electrum Sp. z o.o. Warto wspomnieć, że projekt RIGRID zdobył w 2019 roku nagrodę *Runner-up* (inaczej *Second Best*) w międzynarodowym konkursie Award of Excellence organizowanym przez ISGAN (International Smart Grids Action Network).

Realizacja wymienionych projektów badawczych, jak również wcześniejsze i późniejsze prace badawcze dotyczące mikrosieci (wykonywane w ZSiSE PW) pozwoliły na powstanie dużej liczby publikacji: monografii i rozdziałów w monografiach, artykułów do czasopism i referatów na konferencje, m.in. [1 - 3, 11 - 12, 18 - 23], których autorami lub współautorami byli obecni lub byli pracownicy ZSiSE PW.

Jeśli chodzi o artykuły do czasopism oraz referaty na konferencje o tematyce mikrosieci, to w latach 2004 – 2022 w ZSiSE PW zostało wykonanych około 25 takich publikacji. Tematyka tych artykułów i referatów była bardzo różnorodna i obejmowała m.in. takie zagadnienia, jak:

- mikrosieci – nowe, przyszłościowe struktury sieci rozdzielczych (dystrybucyjnych),
- automatyka zabezpieczeniowa oraz resynchronizacja mikrosieci,
- analiza stanów ustalonych działania mikrosieci,
- prognozowanie ultrakrótkoterminowe zapotrzebowania na moc dla celów optymalnego sterowania w mikrosieci,
- mikrosieć niskiego napięcia w centrum badawczo-edukacyjnym,
- optymalizacja wymiany energii między mikrosiecią i siecią przedsiębiorstwa elektroenergetycznego (spółki dystrybucyjnej),
- optymalne sterowanie w mikrosieciach,
- stabilność napięciowa w mikrosieciach niskiego napięcia,
- ochrona przeciwporażeniowa w mikrosieciach niskiego napięcia,

- aspekty rynkowe i prawne funkcjonowania mikro sieci niskiego napięcia,
- zagadnienia implementacyjne dotyczące algorytmów optymalnego sterowania w mikro sieciach niskiego napięcia,
- optymalne sterowanie pracą mikro sieci niskiego napięcia na obszarach wiejskich funkcjonujące w oparciu o logikę sterowania scentralizowanego,
- interaktywne narzędzie do planowania optymalnych struktur nowoprojektowanych mikro sieci niskiego napięcia,
- zagadnienia modelowania stanów ustalonych inteligentnych, hybrydowych mikrosystemów energetycznych,
- optymalizacja struktury wytwórczo-zasobnikowej wielonośnikowej mikro sieci z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu koncentratora energetycznego,
- sterowanie przekształtnikiem energoelektronicznym AC/DC w hybrydowej mikro sieci niskiego napięcia.

W ZSiSE PW w latach 2009 – 2022 zostało też wykonanych kilkanaście prac dyplomowych inżynierskich oraz magisterskich, w których projektowane i analizowane były mikro sieci. Osobami kierującymi tymi pracami był autor niniejszego artykułu oraz Łukasz Rokicki. Prace te obejmowały następujące tematy:

- ochrona przeciwporażeniowa w mikro sieciach niskiego napięcia,
- stabilność napięciowa w mikro sieciach niskiego napięcia,
- praca wyspowa mikro sieci niskiego napięcia,
- projekt mikro sieci niskiego napięcia (zasilającej obszar wiejski; zdolnej do długotrwałej pracy wyspowej, zlokalizowanej na obszarze o słabo rozwiniętej infrastrukturze elektroenergetycznej; w zakładzie przemysłowym; zasilającej osiedle mieszkaniowe; ze znacznym udziałem mikroturbin wiatrowych; zasilającej kompleks budynków biurowych; zasilającej osiedle domów jednorodzinnych),
- projekt hybrydowej mikro sieci niskiego napięcia AC/DC zasilającej zakład przemysłowy,
- sterowanie zasobnikiem energii w mikro sieci niskiego napięcia, zdolnej do długotrwałej pracy wyspowej,
- wpływ mikro sieci niskiego napięcia na pracę sieci dystrybucyjnej średniego napięcia,
- harmoniczne w mikro sieciach niskiego napięcia prądu przemiennego,
- optymalizacja doboru magazynów energii w testowej mikro sieci niskiego napięcia z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego,
- analiza skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w mikro sieciach niskiego napięcia pracujących wyspowo,
- niezawodność zasilania w mikro sieciach niskiego napięcia prądu przemiennego,
- projekt mikro sieci oddalonej, bazującej na źródłach fotowoltaicznych.

Mikro sieci – aktualne prace badawcze

Stan aktualnych prac badawczych w zakresie mikro sieci można określić na podstawie realizowanych obecnie projektów badawczych, rozpraw doktorskich oraz pojawiających się publikacji (monografii, artykułów i referatów). Poniżej zostały zaprezentowane zagadnienia poruszone w latach 2019 – 2022 w artykułach opracowanych z dużym, bardzo dużym lub całkowitym udziałem pracowników ZSiSE PW [18 – 23]:

- optymalne sterowanie pracą wiejskich mikro sieci niskiego napięcia,

- efektywne podejście do rozproszonego optymalnego sterowania pracą wiejskich mikro sieci niskiego napięcia,
- optymalne zarządzanie mocą i energią w mikro sieciach niskiego napięcia przy użyciu algorytmów ewolucyjnych i magazynowania energii,
- prognozowanie ultrakrótkoterminowe (10-sekundowe) zapotrzebowania na moc odbiorów o dużej zmienności poboru mocy dla potrzeb sterowania pracą mikro sieci,
- optymalizacja konfiguracji i stanów pracy hybrydowej mikro sieci niskiego napięcia AC/DC przy użyciu algorytmu selekcji klonalnej,
- zaawansowane metody prognostyczne dotyczące 5-minutowej generacji mocy w systemie PV dla potrzeb sterowania pracą mikro sieci.

Prace wdrożeniowe w zakresie mikro sieci

Istotnym aspektem prowadzonych prac wdrożeniowych w zakresie mikro sieci są projektowane i budowane instalacje pilotażowe dotyczące tego zagadnienia. Informacje na temat wybudowanych instalacji pilotażowych za granicą zostały podane w wielu publikacjach, m.in. w [2].

Warto w tym kontekście wspomnieć, że w ramach wspomnianego już projektu RIGRID została wybudowana i przetestowana pilotażowa krajowa mikro sieć niskiego napięcia prądu przemiennego, zlokalizowana w Gminie Puńsk. Mikro sieć ta została umiejscowiona na terenie oczyszczalni ścieków i zawierała instalację PV, spalinowy agregat prądotwórczy, litowo-jonowy magazyn energii oraz odbiory technologiczne i ogólnego przeznaczenia charakterystyczne dla oczyszczalni. Wspomniana mikro sieć była połączona z siecią dystrybucyjną SN należąca do OSD.

Wyzwania na przyszłość i perspektywy rozwoju mikro sieci

Część istotnych wyzwań naukowych i praktycznych dotyczących mikro sieci AC została przedstawiona w [1 -4]. Są to m.in. takie zagadnienia, jak:

- oddzielenie mikro sieci od sieci OSD i jej ponowna synchronizacja (resynchronizacja),
 - praca wyspowa mikro sieci,
 - prognozowanie ultrakrótkoterminowe generacji i zapotrzebowania na moc w mikro sieci,
 - projektowanie i rozwój mikro sieci,
 - optymalizacja pracy mikro sieci.
- Należałoby tu w szczególności zwrócić uwagę na takie zagadnienia, jak:
- praca wyspowa mikro sieci (w kontekście jakości energii, odbudowy struktury mikro sieci po wyeliminowaniu ewentualnych uszkodzeń w jej obrębie, działania układów automatyki zabezpieczeniowej oraz skuteczności ochrony przeciwporażeniowej);
 - sterowanie pracą mikro sieci w warunkach rozproszonej struktury właścicielskiej;
 - wybór właściwej strategii (trybu) sterowania pracą mikro sieci – sterowanie scentralizowane czy zdecentralizowane (rozproszone);
 - budowa algorytmów i opracowanie na ich podstawie systemów informatycznych do zarządzania pracą mikro sieci w trybie rzeczywistym obejmujących m.in. prognozowanie ultrakrótkoterminowe zapotrzebowania na moc, prognozowanie ultrakrótkoterminowe generacji mocy w OZE, optymalizację działania magazynów energii, optymalne zarządzanie pracą odbiorów sterowalnych;
 - budowa specjalnych systemów zarządzania energią, pozwalających na optymalne sterowanie procesem

ładowania i rozładowania akumulatorów zainstalowanych w samochodach elektrycznych.

W przypadku hybrydowych mikro sieci AC/DC należałoby się koncentrować głównie na poprawie działania algorytmów rozdziału obciążenia pomiędzy źródła przyłączone do „szyn” AC i DC systemu hybrydowego [1]. Dodatkowo, przewiduje się prowadzenie badań [8] mających na celu odpowiednie sterowanie konwerterem sprzęgającym, pod kątem zapewnienia odbiorcom odpowiedniej jakości energii. Chodzi o to, aby poziom odkształcenia harmonicznymi napięcia na „szynie” AC, które wynika z obecności odbiorów nieliniowych oraz poziom niesymetrii napięcia zasilającego były do pominięcia.

Należy przewidywać stosunkowo duże perspektywy rozwojowe dotyczące wielonośnikowych mikro sieci energetycznych. Perspektywy te wynikają m.in. z zapisów odpowiednich dokumentów prawnych, takich jak „Polityka Energetyczna Polski do roku 2040” czy „Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku”. W przypadku mikro sieci wielonośnikowych jest też kilka wyzwań związanych z ich pracą. Do rozwiązania są m.in. następujące zadania [1, 11, 13]:

- określenie liczby oraz rodzajów nośników energii, które powinny być zużywane przez poszczególne koncentratory;
- określenie sposobu przekształcania nośników energii wewnątrz poszczególnych koncentratorów;
- harmonogramowanie pracy odbiorów sterowalnych;
- opracowanie metody sterowania przepływami mocy pomiędzy poszczególnymi koncentratorami.

Analizując perspektywy rozwoju mikro sieci, należy również wspomnieć o możliwej współpracy i wieloaspektowych interakcjach zachodzących między mikro siecią i budynkami (domami), które określa się mianem inteligentnych. W budynkach tego typu jest dużo zaawansowanych systemów automatyki budynkowej oraz odpowiednie systemy zarządzania. Ponadto na poziomie budynków inteligentnych dochodzi do procesów integracji i zarządzania energią, z uwzględnieniem takich aspektów, jak generacja energii w OZE, magazynowanie energii, sterowanie poborem mocy przez odbiory sterowalne, ładowanie pojazdów elektrycznych itp. W kontekście możliwego rozwoju mikro sieci na terenach miejskich należy też wspomnieć o rozwijanej i upowszechnianej od co najmniej kilku lat koncepcji *Smart Cities*. Z kolei w przypadku obszarów wiejskich definiuje się koncepcję *Smart Villages*. Obydwie te koncepcje niewątpliwie będą kształtować przyszły obraz mikro sieci i wyznaczać możliwe perspektywy ich rozwoju.

Podsumowanie i wnioski

Prowadzone są już od wielu lat prace badawcze i wdrożeniowe związane z mikrosystemami energetycznymi służącymi do zasilania odbiorców energii. Wiąże się to bezpośrednio z coraz większą liczbą wymagań kierowanych pod adresem elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. Jednym z możliwych kierunków rozwoju tych sieci jest koncepcja mikro sieci.

W artykule dokonano krótkiej charakterystyki różnych rodzajów mikro sieci: mikro sieci AC, mikro sieci DC, hybrydowych mikro sieci AC/DC oraz wielonośnikowych mikro sieci energetycznych. Ponadto, scharakteryzowano dotychczasowe prace dotyczące mikro sieci wykonane w Zakładzie Sieci i Systemów Elektroenergetycznych PW, aktualnie prowadzone prace badawcze, prace wdrożeniowe w zakresie mikro sieci, a także wyzwania na przyszłość i perspektywy rozwoju mikro sieci.

Wydaje się, że dużą szansę rozwoju w najbliższym czasie oprócz mikro sieci AC mają hybrydowe mikro sieci AC/DC oraz wielonośnikowe mikro sieci energetyczne.

W dalszych pracach dotyczących mikro sieci należałoby koncentrować się głównie wokół zagadnień związanych ze współpracą mikro sieci z inteligentnymi budynkami (domami). W tym względzie szczególną uwagę należałoby zwrócić na koncepcję *Smart Cities* w miastach oraz koncepcję *Smart Villages* na wsiach.

Warto też zwrócić uwagę na fakt, że koncepcja mikro sieci może być swoistym remedium na aktualne problemy i wyzwania związane z przyłączaniem coraz większej liczby rozproszonych (w tym odnawialnych) źródeł energii do sieci dystrybucyjnych SN i nN.

Podziękowania

Autor kieruje słowa podziękowania pod kierunkiem dr. inż. Jacka Wasilewskiego za udostępnienie poglądowego schematu koncentratora energetycznego mikro sieci wielonośnikowej.

Autor: prof. dr hab. inż. Mirosław Parol, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: miroslaw.parol@pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Parol M.: Mikro sieci - przyszłościowe struktury sieci dystrybucyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), Nr 8, 1-5
- [2] Baczyński D., Księżyk K., Parol M., Piotrowski P., Wasilewski J., Wójtowicz T., *Mikro sieci niskiego napięcia. Praca zbiorowa pod redakcją Mirosława Parola*. Monografia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013
- [3] Parol M.: Inteligentne sieci elektroenergetyczne. *Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „INVENTION. Innowacyjność w Elektroenergetyce”*, Ustroń, 25-26 październik 2007, *Energetyka*, 2007, Zeszyt tematyczny nr XIII, 121-126
- [4] 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, <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>, April 2002
- [5] Dickerman L., Harrison J.: A New Car, a New Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8 (2010), No. 2, 55-61
- [6] Geske M., Komarnicki P., Stotzer M., Styczyński Z.: Modeling and Simulating of Electric Car Penetration in the Distribution Power System – Case Study. *Proceedings of the International Symposium “Modern Electric Power Systems MEPS’10”*, September 20-22, 2010, Wrocław, pages: 1-6
- [7] Biczal P.: *Integracja rozproszonych źródeł energii w mikro sieciach prądu stałego*. Prace Naukowe „Elektryka”, z. 142, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012
- [8] Hybrid AC/DC Microgrids: A Bridge to Future Energy Distribution Systems; <https://www.acs.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-ACS/Forschung/Abgeschlossene-Projekte/~euwe/HYBRID-AC-DC-MICROGRIDS-A-BRIDGE-TO-FUT/lid/1/>
- [9] Unamuno E., Barrena J. A.: Hybrid ac/dc microgrids – Part I: Review and classification of topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (2015), Dec. 2015, 1251-1259
- [10] Guangqian Ding, Feng Gao, Song Zhang, Poh Chiang Loh, Blaabjerg F.: Control of hybrid AC/DC microgrid under islanding operational conditions. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2 (2014), September 2014, issue 3, 223-232
- [11] Wasilewski J.: Steady-state Modelling Issues of Smart Hybrid Energy Microsystems. *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) 2013*, May 5-8, 2013, Wrocław, pages: 1-4
- [12] Wasilewski J.: Optymalizacja struktury wytwórczo-zasobnikowej wielonośnikowej mikro sieci z wykorzystaniem

- zmodyfikowanego modelu koncentratora energetycznego. *Rynek Energii*, 116 (2015), nr 1, 37-49
- [13] Geidl M., Andersson G.: Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems. *European Transactions on Electrical Power*, 16 (2006), issue 5, 463-477
- [14] Geidl M., Koeppel G., Favre-Perrod P., Klockl B., Andersson G., Frohlich K.: Energy hubs for the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5 (2007), No. 1, 24-30
- [15] Sikora A.: Optymalizacja kosztów bilansowania energii elektrycznej w mikrosieci współpracującej z siecią rozdzielczą spółki dystrybucyjnej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska Wydział Elektryczny, Warszawa 2008
- [16] Księżyk K.: Praca mikrosieci w systemie elektroenergetycznym. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska Wydział Elektryczny, Warszawa 2010
- [17] Rokicki Ł.: Optymalizacja konfiguracji i stanów pracy hybrydowych mikrosystemów elektroenergetycznych niskiego napięcia AC/DC z wykorzystaniem sztucznych systemów immunologicznych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska Wydział Elektryczny, Warszawa 2019
- [18] Parol M., Rokicki Ł., Parol R.: Towards optimal operation control in rural low voltage microgrids. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 67 (2019), No 4, 799-812, <https://doi.org/10.24425/bpasts.2019.130189>
- [19] Parol M., Kapler P., Marzecki J., Parol R., Połacki M., Rokicki Ł.: Effective approach to distributed optimal operation control in rural low voltage microgrids. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 68 (2020), No 4, 661-678, <https://doi.org/10.24425/bpasts.2020.134178>
- [20] Parol M., Księżyk K., Wójtowicz T., Wenge Ch., Balischeckowski S., Arendarski B.: Optimum management of power and energy in low voltage microgrids using evolutionary algorithms and energy storage. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119 (2020), No. 105886, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105886>
- [21] Parol M., Piotrowski P., Kapler P., Piotrowski M.: Forecasting of 10-Second Power Demand of Highly Variable Loads for Microgrid Operation Control. *Energies*, 14 (2021), No 5, 1290, 1-29, <https://doi.org/10.3390/en14051290>
- [22] Rokicki Ł.: Optimization of the Configuration and Operating States of Hybrid AC/DC Low Voltage Microgrid Using a Clonal Selection Algorithm with a Modified Hypermutation Operator. *Energies*, 14 (2021), No 19, 6351, 1 – 24, <https://doi.org/10.3390/en14196351>
- [23] Piotrowski P., Parol M., Kapler P., Fetliński B.: Advanced Forecasting Methods of 5-Minute Power Generation in a PV System for Microgrid Operation Control. *Energies*, 15 (2022), No 7, 2645, 1-23, <https://doi.org/10.3390/en15072645>