

Mikrosieci – przyszłościowe struktury sieci dystrybucyjnych

Streszczenie. Artykuł dotyczy ważnego zagadnienia, jakim są przyszłościowe struktury sieci dystrybucyjnych. Najpierw opisano wybrane przyszłościowe koncepcje rozwoju elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. Następnie scharakteryzowano różnego rodzaju mikrosieci: mikrosieci AC, mikrosieci DC, hybrydowe mikrosieci AC/DC oraz wielonośnikowe mikrosieci energetyczne. Artykuł zakończono podsumowaniem i sformułowaniem wniosków.

Abstract. The paper concerns important issue of future structures of distribution grids. First selected future development concepts of electrical power distribution grids have been described. Then different kinds of microgrids: AC microgrids, DC microgrids, hybrid AC/DC microgrids, and multi-carrier energy microsystems have been characterized. At the end of the paper summary and conclusions have been included. (**Microgrids - future structures of distribution grids**).

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

Keywords: distribution grids, structures, development, microgrids.

Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować coraz większą liczbę stawianych wymagań, które formułuje się pod adresem elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych.

Wymagania te obejmują m.in. [1+4]:

- zwiększenie bezpieczeństwa zasilania energią elektryczną (poprawę niezawodności zasilania i jakości dostarczanej energii);
- zwiększenie elastyczności pracy sieci dystrybucyjnej;
- stworzenie właściwych warunków, pozwalających na przyłączenie do sieci dystrybucyjnej coraz większej liczby rozproszonych, w tym odnawialnych, źródeł energii oraz umożliwienie lokalizowania tam zasobników energii elektrycznej;
- stworzenie warunków umożliwiających korzystanie z dobrodziejstw wynikających z liberalizacji rynku energii elektrycznej, w tym z nowych usług systemowych oraz nowych – elastycznych taryf;
- wprowadzenie nowoczesnych systemów sterowania pracą sieci dystrybucyjnych z wykorzystaniem dostępnych technologii teleinformatycznych;
- zwiększenie efektywności przesyłu energii poprzez ograniczenie strat sieciowych oraz zarządzanie „załóczeniami”, tj. miejscami, w których występuje maksymalne wykorzystanie przepustowości istniejących gałęzi sieci;
- ograniczenie poziomu emisji różnego rodzaju zanieczyszczeń środowiska naturalnego, itd.

Aby umożliwić spełnienie choćby części z wymienionych wymagań, proponuje się różnego rodzaju nowatorskie koncepcje dotyczące przyszłościowych struktur i zasad funkcjonowania sieci dystrybucyjnych. Koncepcje te obejmują np. takie idee jak [1+4]:

- elektroenergetyczną sieć dystrybucyjną funkcjonującą podobnie do sposobu działania sieci Internet,
- aktywną sieć dystrybucyjną,
- mikrosieci średnich i niskich napięć,

- wykorzystanie samochodów elektrycznych jako mobilnych magazynów (zasobników) energii w sieci dystrybucyjnej,
- wirtualne elektrownie,
- inteligentne elektroenergetyczne sieci dystrybucyjne.

W artykule omówiono pokrótce część z tych koncepcji. Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienie mikrosieci, scharakteryzowano mikrosieci niskiego napięcia prądu przemiennego (AC), mikrosieci prądu stałego (DC), mikrosieci hybrydowe (AC/DC) oraz mikrosieci energetyczne wielonośnikowe.

Niniejszy artykuł jest rozszerzeniem prezentacji pt. „Mikrosieci – przyszłościowe struktury sieci rozdzielczych” przedstawionej przez jego autora na II Kongresie Elektryki Polskiej, który odbywał się w dniach 1-2 grudnia 2014 roku w Warszawie.

Wybrane przyszłościowe koncepcje rozwoju elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych Elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna działająca podobnie do sieci Internet

Rozwój generacji rozproszonej prowadzi do [1, 2, 4]:

- powstania dużej liczby węzłów generatorowych, dostarczających moc (energię) do sieci;
- dwukierunkowych przepływów mocy w sieci dystrybucyjnej;
- konieczności instalowania nowych urządzeń technicznych (np. elementów FACTS), umożliwiających bezpośrednie sterowanie przepływami mocy w sieci.

Sposób działania urządzeń FACTS odpowiada zasadzie działania routerów w sieci Internet.

W artykule [5] pisząc o sieci elektroenergetycznej użyto pojęcia „sieć cyfrowa” (ang. *digital grid*), której struktura byłaby oparta na sieci Internet. Z kolei w [6] mowa jest o tym, że wymiana energii produkowanej w domach, biurach i fabrykach odbywałaby się w „energetycznym Internecie”, będącym odpowiednikiem tradycyjnego Internetu.

Aby sieć elektroenergetyczna mogła działać podobnie do sieci Internet, konieczne byłoby opracowanie odpowiedniego protokołu zarządzającego procesem wymiany informacji na temat: zapotrzebowania odbiorów na moc, dyspozycyjności źródeł wytwórczych i zasobników energii oraz różnych zdarzeń zachodzących w sieci.

Reasumując, system sterowania scentralizowanego sieci dystrybucyjnej należałoby zastąpić systemem sterowania rozproszonego.

Aktywne sieci dystrybucyjne

Aktywna sieć dystrybucyjna [1, 2, 4] to sieć aktywnie zarządzana, współdziałająca ze swoimi odbiorcami. Sieć taka powinna z założenia dostarczać jedynie odpowiednie połączenia między punktami zasilania oraz punktami poboru mocy i nie powinna bezpośrednio odpowiadać za dostawę mocy do odbiorców.

Założenia co do struktury i sposobu pracy aktywnych sieci dystrybucyjnych przedstawiają się następująco [1,2,4]:

- sieć dystrybucyjna będzie siecią wielokrotnie zamkniętą, w odróżnieniu od obecnie dominujących sieci promieniowych;
- będą istnieć lokalne obszary automatycznego sterowania, zwane ogniwami;
- usługi systemowe będą wyspecyfikowanymi atrybutami połączeń sieciowych; usługi te zostaną zdefiniowane dla poszczególnych odbiorców i będą przez nich opłacane.

Samochody elektryczne jako mobilne magazyny energii dla sieci dystrybucyjnych

Samochody elektryczne lub z napędem hybrydowym z punktu widzenia elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej mogą pełnić podwójną rolę [1, 7, 8]: z jednej strony są odbiornikami energii elektrycznej (podczas ładowania baterii akumulatorów w publicznych stacjach lub w domach), zaś z drugiej są w stanie dostarczać energię do sieci (w czasie przyłączenia do stacji ładowania lub do gniazda przyłączeniowego w domu). Są więc specyficznym, mobilnym magazynem energii.

Istotnymi problemami do rozwiązania w przypadku tej koncepcji są [1]:

- budowa ogólnodostępnych stacji ładowania samochodów elektrycznych bądź specjalnych gniazd przyłączeniowych w budynkach mieszkalnych,
- budowa specjalnych systemów zarządzania energią, które będą w stanie optymalnie sterować procesem ładowania i rozładowania akumulatorów zainstalowanych w tych samochodach.

Inteligentne sieci elektroenergetyczne

Smart Power Grids [1, 4] to system, który w sposób inteligentny steruje działaniami podmiotów uczestniczących w wytwarzaniu, przesyłaniu, dystrybucji, magazynowaniu i użytkowaniu energii elektrycznej. Celem działania tego systemu jest dostarczanie energii elektrycznej do odbiorców w sposób niezawodny, bezpieczny, efektywny ekonomicznie i ekologiczny. Podstawą koncepcji Smart Power Grids są zaawansowane technologie teleinformatyczne.

W sensie koncepcyjnym, idei Smart Power Grids odpowiada droga rozwoju sieci elektroenergetycznych identyfikowana terytorialnie jako [1, 9, 10]: HAN (Home Area Network) → LAN (Local Area Network) → WAN (Wide Area Network).

Mikrosieci niskiego napięcia prądu przemiennego

Mikrosieć niskiego napięcia prądu przemiennego (AC) [1, 2, 3, 4, 11] to autonomiczny mikrosystem energetyczny, obejmujący swoim zakresem źródła wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, zasobniki energii, odbiory mocy elektrycznej i ciepła oraz urządzenia sterujące. Wszystkie one połączone są między sobą liniami elektroenergetycznymi nn.

Mikrosieci mogą pracować synchronicznie z siecią OSD oraz jako całkowicie niezależne wyspy.

Najczęściej stosowanymi źródłami wytwórczymi w mikrosieciach prądu przemiennego są [1, 2, 3, 4, 11]:

- ogniwa paliwowe, charakteryzujące się wysoką sprawnością i niską emisją zanieczyszczeń, stosowane przy skojarzonym wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła;
- mikroturbiny, zwykle na gaz naturalny (ewentualnie na propan lub paliwa ciekłe);
- rozwiązania oparte na odnawialnych nośnikach energii (mikroelektrownie fotowoltaiczne, mikroturbiny wiatrowe, mikroturbiny na biopaliwa, małe turbiny wodne).

Zasobnikami energii w mikrosieciach AC są najczęściej [1÷4]: baterie akumulatorów, koła zamachowe, superkondensatory.

Wśród odbiorów mocy i energii rozróżnia się [1, 3, 11]: odbiory sterowalne i odbiory niesterowalne.

Należy zaznaczyć, że przyłączanie mikroźródeł, zasobników oraz odbiorów sterowalnych do sieci odbywa się często za pośrednictwem urządzeń energoelektronicznych.

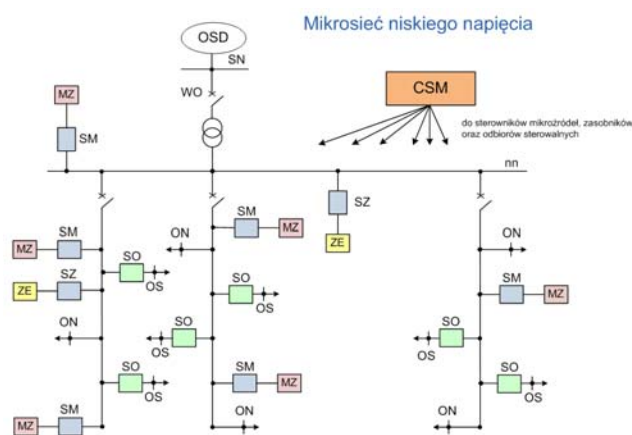
Mikrosieć AC z punktu widzenia OSD może być traktowana jako sterowalny odbiór (prosument), który może pracować jako zagregowany odbiór lub źródło wytwórcze [1÷4]. Może także świadczyć usługi systemowe, wspierając w tym zakresie elektroenergetyczną sieć dystrybucyjną. Rozróżnia się dwie strategie sterowania pracą mikrosieci [1, 11]: sterowanie scentralizowane oraz sterowanie rozproszone.

W przypadku sterowania scentralizowanego funkcjonują: sterownik centralny mikrosieci oraz sterowniki lokalne (mikroźródła, zasobniki energii, sterowalnych odbiorów mocy). Z kolei podczas sterowania rozproszonego: „inteligentne” sterowniki powinny umieć komunikować się ze sobą; w tym celu można wykorzystać np. system wieloagentowy.

Istotnymi wyzwaniami naukowymi i praktycznymi dotyczącymi mikrosieci AC są [1, 3, 11]:

- automatyka zabezpieczeniowa,
- ochrona przeciwporażeniowa,
- oddzielenie mikrosieci od sieci OSD i jej ponowna synchronizacja (resynchronizacja),
- praca wyspowa,
- prognozowanie krótkoterminowe wytwarzania i zapotrzebowania na moc w mikrosieci,
- projektowanie i rozwój mikrosieci,
- optymalizacja pracy mikrosieci.

Przykładowa mikrosieć niskiego napięcia prądu przemiennego została pokazana na Rysunku 1.



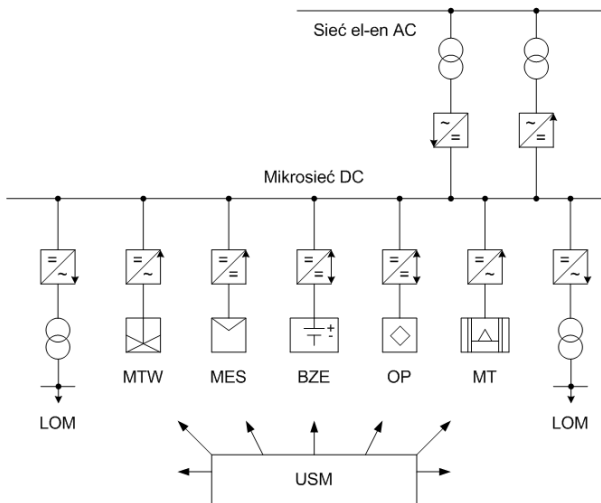
Rys. 1. Przykładowa mikrosieć AC oraz sposób jej przyłączenia do sieci OSD (CSM – centralny sterownik mikrosieci, MZ – mikroźródło, ZE – zasobnik energii, OS – odbiór sterowalny, ON – odbiór niesterowalny, SM – sterownik mikroźródła, SZ – sterownik zasobnika energii, SO – sterownik odbioru, WO – wyłącznik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

Mikrosieci niskiego napięcia prądu stałego

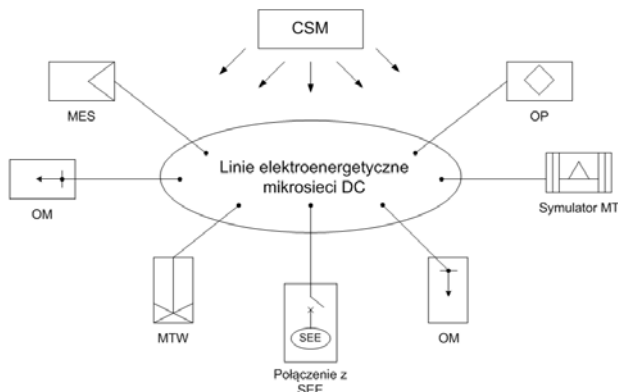
Schemat blokowy przykładowej mikrosieci prądu stałego (DC) został pokazany na Rysunku 2.

Struktura i zasada pracy mikrosieci prądu stałego została opisana m.in. w [12÷15].

W przypadku mikrosieci prądu stałego (DC) mikroźródła będą przyłączone do „szyny” prądu stałego za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych typu DC/AC lub DC/DC, zaś zasobniki energii za pośrednictwem przekształtników DC/DC. Większość odbiorów energii będzie przyłączonych za pomocą przekształtników typu DC/AC, tylko niektóre będą przyłączone bezpośrednio lub za pomocą przekształtników typu DC/DC [12].



Rys. 2. Schemat blokowy mikrosieci prądu stałego (USM – układ sterowania mikrosieci DC, LOM – lokalny odbiór mocy, MTW – mikroturbozespół wiatrowy, MES – mikroelektrownia słoneczna, BZE – bateryjny zasobnik energii, OP – ogniwo paliwowe, MT – mikro-turbina gazowa); opracowano na podstawie [12]



Rys. 3. Przykładowa laboratoryjna mikrosieć DC w ZEiGE IEn PW (CSM – centralny sterownik mikrosieci, MES – mikroelektrownia słoneczna, OP – ogniwo paliwowe, OM – odbiór mocy, MTW – mikroturbozespół wiatrowy, MT – mikro-turbina gazowa); opracowano na podstawie [12]

„Szyna” prądu stałego może być połączona z elektroenergetyczną siecią dystrybucyjną prądu przemiennego (AC) za pośrednictwem falowników i prostowników (Rys. 2).

Zastosowanie przekształtników energoelektronicznych powinno przyczynić się do poprawy właściwości regulacyjnych mikrosieci DC. Bardzo istotnym zagadnieniem jest układ sterowania pracą mikrosieci, który, podobnie jak w przypadku mikrosieci AC, może być scentralizowany lub rozproszony. Mikrosieć DC może pracować w trybie połączonym z siecią dystrybucyjną AC lub w trybie wydzielonym. Sieć dystrybucyjna AC stanowi dla mikrosieci DC rezerwę zasilania w przypadku deficytu

mocy w mikrosieci oraz może stanowić odbiór mocy w przypadku nadmiaru mocy w mikrosieci [12].

Przykładowa laboratoryjna mikrosieć DC, opracowana i zbudowana w Zakładzie Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej (ZEiGE IEn PW), została pokazana na Rysunku 3.

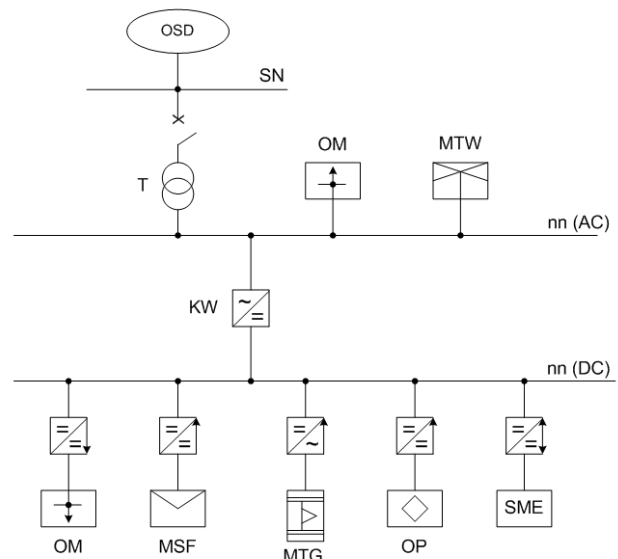
Jej podstawą są następujące mikroźródła [12]:

- ogniwo paliwowe o mocy 2,4 kW,
- elektrownia słoneczna o mocy 2,0 kW,
- mikro-turbina wiatrowa o mocy 0,75 kW.

Mikrosieci hybrydowe

Dzięki osiągnięciom technologicznym w zakresie konwersji, wytwarzania, przesyłu i wykorzystania energii elektrycznej, jej przesył za pomocą prądu stałego (DC) znalazł ponowne zastosowanie [16]. Mikrosieci są traktowane jako obiecujący element składowy przyszłych inteligentnych systemów dystrybucyjnych. Oczekuje się, że technologie DC będą w nich odgrywać bardzo istotną rolę. W szczególności dotyczy to hybrydowych mikrosieci AC/DC, które mogą sprzyjać procesowi integracji technologii DC z istniejącymi systemami elektroenergetycznymi AC [16].

Przykład hybrydowej mikrosieci AC/DC, opracowanej w RWTH Aachen, został pokazany na Rysunku 4.



Rys. 4. 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 – mikro-turbina gazowa, OP – ogniwo paliwowe, SME – system magazynowania energii); opracowano na podstawie [16]

Zastosowaniu przesyłu energii elektrycznej za pomocą technologii DC sprzyja wiele okoliczności. Należą do nich m.in. [16, 17]:

- generowanie przez niektóre rozproszone źródła wytwórcze energii w postaci prądu stałego;
- konstrukcja niektórych zasobników oraz odbiorników energii, w których występuje prąd stały lub które prawidłowo pracują na prądzie stałym i są połączone z systemami AC poprzez konwertery (wzrastająca liczba urządzeń prądu stałego);
- możliwość wyeliminowania wielu etapów konwersji AC/DC i DC/AC, co mogłoby pozwolić na znaczące zmniejszenie kosztów elementów składowych sieci i strat mocy oraz na zwiększenie niezawodności pracy układów sieciowych;

- brak mocy biernej;
- niewystępowanie w systemach DC harmonicznych oraz niesymetrii napięć i prądów;
- brak konieczności synchronizacji fazy.

Oprócz wymienionych korzyści, istnieje jednak kilka czynników, które utrudniają powszechne stosowanie systemów DC. Należą do nich m.in. [16]:

- niski poziom standaryzacji (normalizacji) rozwiązań dla systemów prądu stałego;
- stosunkowo małe doświadczenie przemysłowe;
- kwestie dotyczące bezpieczeństwa użytkownika oraz zabezpieczeń;
- bariera mentalna związana ze zmianą paradygmatu zasilania - z prądu przemiennego na prąd stały.

Wymienione okoliczności prowadzą do powstawania hybrydowych systemów AC/DC, w których „szyny” AC i DC są połączone ze sobą poprzez sprzęgające je dwukierunkowe konwertery (Rys. 4). Sterowanie konwerterem sprzęgającym, stanowiącym swoisty most energetyczny między stronami AC i DC, jest zagadnieniem krytycznym dla zapewnienia odpowiedniej stabilności działania i wykorzystania potencjału systemu hybrydowego do poprawy jakości dostawy energii do odbiorców [16].

Uważa się, że mikrosieci są jednym z kluczowych obszarów zastosowań, w których hybrydowe systemy AC/DC mogą się sprawdzić i przyczynić do znaczących korzyści [16]. Zgodnie z poglądami wyrażonymi w [17], hybrydowe mikrosieci AC/DC są obecnie „na fali wznoszącej” jako optymalne podejście systemowe, gdyż łączą one główne zalety mikrosieci AC i mikrosieci DC.

W badaniach prowadzonych w Instytucie Automatyzacji Systemów Elektroenergetycznych RWTH Aachen [16], główną uwagę zwrócono na aspekt ilościowy dotyczący poprawy efektywności energetycznej, do której mogą doprowadzić w budynkach hybrydowe systemy AC/DC, jak również na sterowanie konwerterem sprzęgającym, w celu poprawy stabilności pracy i jakości energii w mikrosieci. W szczególności pracuje się nad poprawą działania algorytmów rozdziału obciążenia pomiędzy źródła przyłączone do „szyn” AC i DC systemu hybrydowego. Dodatkowo, prowadzone badania [16] mają na celu umożliwienie sterowania konwerterem sprzęgającym w taki sposób, aby odkształcenie harmonicznymi napięcia na „szynie” AC, wynikające z funkcjonowania nieliniowych odbiorów, oraz niesymetria napięcia były pomijalnie małe.

W artykule [17] dokonano przeglądu różnych topologii (struktur) hybrydowych mikrosieci AC/DC, w których podstawą działania jest sprzęgnięcie ze sobą mikrosieci AC i mikrosieci DC oraz konwencjonalnej sieci elektroenergetycznej AC. Dokonano opisu i analizy rozważanych struktur, została także przeprowadzona ocena porównawcza, ukazująca najważniejsze cechy każdej z nich.

Metody sterowania wykorzystywane w przypadku hybrydowej mikrosieci AC/DC pracującej w trybie wyspowym przedstawiono z kolei w artykule [18]. Badaniom poddano algorytmy sterowania dla mikrosieci AC i mikrosieci DC, ze względu na wymagania dotyczące rozdziału mocy pomiędzy źródła wytwórcze oraz wymagania dotyczące niezawodności działania systemu hybrydowego. Dodatkowo, poddano przeglądowi zasadnicze schematy sterowania konwerterem sprzęgającym, które pozwalają na odpowiedni podział mocy między mikrosieć AC i mikrosieć DC, aby zapewnić stabilne napięcie po stronie AC i DC mikrosieci hybrydowej.

Wielonośnikowe mikrosieci energetyczne

Zdaniem autorów prac [19, 20], optymalnie zaprojektowany i zbudowany system zaopatrzenia w energię powinien być systemem wielonośnikowym, tj. zapew-

niającym zintegrowaną dostawę energii elektrycznej, ciepła i chłodu, pozwalając w ten sposób na minimalizację kosztów zużycia wszystkich dostępnych nośników energii, i w konsekwencji umożliwienie uzyskania znaczącego efektu synergii. Każdy nośnik energii ma swoją własną charakterystykę, np. ciepło można w łatwy i tani sposób magazynować. Odpowiednie połączenie charakterystycznych cech poszczególnych nośników energii może być źródłem znacznych korzyści technicznych i ekonomicznych [20].

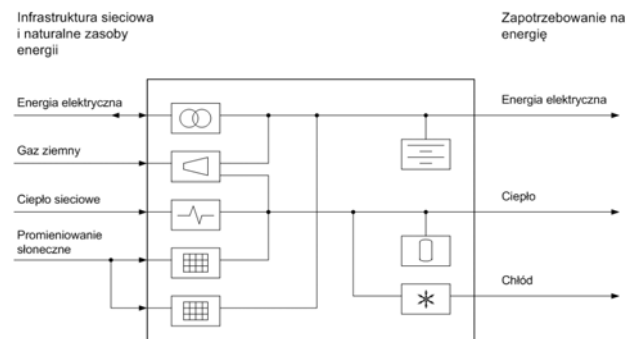
Wielonośnikową mikrosieć energetyczną można zdefiniować jako system lokalnej dostawy energii, obejmujący swoim zakresem źródła, zasobniki i odbiory różnych postaci energii. Rozróżnia się przy tym najczęściej takie nośniki energii, jak [20]: energia elektryczna, gaz, ciepło, chłód, promieniowanie słoneczne oraz ruch powietrza.

Wielonośnikowa mikrosieć energetyczna powinna spełniać dwa podstawowe warunki [19]:

- zaspokajać zapotrzebowanie odbiorców na poszczególne nośniki energii, zarówno w trybie pracy równoległej z rozważanymi systemami energetycznymi, jak i w trybie pracy wyspowej;
- realizować zdefiniowaną funkcję kryterialną w założonym okresie optymalizacji, np. minimalizować całkowity koszt jej funkcjonowania w przyjętym okresie eksploatacji, maksymalizować zysk ze sprzedaży nośników energii, maksymalizować niezawodność dostaw nośników energii do odbiorców, itp.

Podstawą koncepcji mikrosieci wielonośnikowej jest tzw. koncentrator energetyczny, który można zdefiniować jako interfejs między infrastrukturą wytwarzania, rozdziału i zużycia poszczególnych nośników energii [20, 21]. Pierwotna koncepcja koncentratora energetycznego (ang. *energy hub*) została sformułowana przez Geidla [22, 23].

Przykład struktury koncentratora energetycznego został pokazany na Rysunku 5.



Rys. 5. Schemat poglądowy koncentratora energetycznego; opracowano na podstawie [20]

Elementami składowymi koncentratora są (Rys. 5): transformator SN/nn, mikroturbina gazowa, wymiennik ciepła, kolektor słoneczny, system fotowoltaiczny, bateria akumulatorów, zasobnik gorącej wody (c.w.u.), absorpcyjna wytwornica chłodu.

Na wejściu koncentratora występują: energia elektryczna, gaz ziemny, ciepło sieciowe i energia słoneczna; zaś na wyjściu: energia elektryczna, ciepło i chłód. Jak widać, koncentrator energetyczny realizuje funkcje konwersji, magazynowania i rozdziału różnych nośników energii.

Podczas projektowania mikrosieci wielonośnikowych należy rozwiązać zadanie optymalizacji ich struktur. Wymaga to udzielenia odpowiedzi na następujące pytania [20, 22]:

- do jakiego rodzaju dostępnej infrastruktury sieciowej powinny być przyłączone poszczególne koncentratory?
- jakie elementy składowe powinny zawierać koncentratory (rodzaje konwersji lub magazynowania energii) oraz jakie powinny być ich parametry?

- jak powinien wyglądać graf reprezentujący sieć dystrybucyjną dla określonego nośnika energii?
Z kolei, podczas pracy istniejących mikrosieci wielonośnikowych, należy rozwiązać następujące problemy, tj. określić [20, 22]:
- jak dużo oraz jakich nośników energii powinny zużywać poszczególne koncentratory?
- jak powinny być przekształcane nośniki energii wewnątrz poszczególnych koncentratorów?
- jak powinien wyglądać plan pracy odbiorów sterowalnych?
- jak należy sterować przepływami mocy pomiędzy poszczególnymi koncentratorami?

Podsumowanie i wnioski

Powstaje coraz większa liczba wymagań formułowanych pod adresem elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych, związanych m.in. z liberalizacją rynku energii elektrycznej oraz przyłączaniem do nich źródeł generacji rozproszonej, w tym źródeł odnawialnych. Wymagań tych nie są w stanie spełnić obecnie eksploatowane tradycyjne sieci rozdzielcze. Dlatego prowadzone są prace badawcze i wdrożeniowe dotyczące przyszłościowych struktur tych sieci.

W artykule przedstawiono kilka dotychczas sformułowanych koncepcji rozwoju sieci dystrybucyjnych. W szczególności opisano wybrane przyszłościowe koncepcje rozwoju elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych, a następnie scharakteryzowano różnego rodzaju mikrosieci: mikrosieci AC, mikrosieci DC, hybrydowe mikrosieci AC/DC oraz wielonośnikowe mikrosieci energetyczne.

Biorąc pod uwagę informacje zawarte w niniejszym artykule oraz w licznych źródłach literaturowych wydaje się, że największą szansę upowszechnienia, w obszarze sieci dystrybucyjnych, mają w najbliższych latach mikrosieci AC, hybrydowe mikrosieci AC/DC oraz wielonośnikowe mikrosieci energetyczne. Wszystkie one mogą być elementem składowym inteligentnych sieci elektroenergetycznych, w których będą też mogły występować samochody elektryczne jako mobilne magazyny energii.

W dalszych pracach dotyczących tej tematyki należałoby rozważyć zagadnienie rozwoju inteligentnego budownictwa (inteligentnych budynków, inteligentnych domów) i jego wpływ na kształt przyszłościowych struktur sieci dystrybucyjnych.

Podziękowania

Autor kieruje słowa podziękowania pod adresem dr. hab. inż. Piotra Biczela za udostępnienie rysunków dotyczących mikrosieci prądu stałego oraz pod kierunkiem dr. inż. Jacka Wasilewskiego za udostępnienie schematu oraz dyskusję dotyczącą mikrosieci wielonośnikowej.

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

LITERATURA

- [1] Baczyński D., Księżyk K., Parol M., Piotrowski P., Wasilewski J., Wójtowicz T., *Mikrosieci niskiego napięcia. Praca zbiorowa pod redakcją Mirosława Parola*. Monografia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013
- [2] Parol M.: Przyszłościowe struktury elektroenergetycznych sieci rozdzielczych związane z rozwojem generacji rozproszonej. *Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE'04”*, 7-9 czerwca 2004, Wisła
- [3] Kujaszczyk S., Parol M.: Mikrosieci – nowe struktury sieci rozdzielczych. V *Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze - Sieci 2004”*, 15 - 17 września 2004, Wrocław
- [4] Parol M.: Inteligentne sieci elektroenergetyczne. *Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „INVENTION. Innowacyjność w Elektroenergetyce”*, Ustroń, 25-26 października 2007, *Energetyka*, 2007, Zeszyt tematyczny nr XIII, 121-126
- [5] Boyd J.: An Internet – Inspired Electricity Grid. *IEEE Spectrum*, 50 (2013), No. 1, 12-13
- [6] Rifkin J.: Energia + Internet = Trzecia rewolucja przemysłowa; www.cse.ibngr.pl/energia_internet_trzecia_rewolucja_przemysl_owa/
- [7] Dickerman L., Harrison J.: A New Car, a New Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8 (2010), No. 2, 55-61
- [8] 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
- [9] Farhangi H.: The Path of the Smart Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8 (2010), No. 1, 18-28
- [10] Gellings C., Samotyj M., Howe B.: The Future's Smart Delivery System. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2 (2004), No. 5, 40-48
- [11] 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
- [12] Biczel P.: *Integracja rozproszonych źródeł energii w mikrosieciach prądu stałego*. Prace Naukowe „Elektryka”, z. 142, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012
- [13] Lie X., Dong C.: Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (2011), issue 4, 2513-2522
- [14] Ito Y., Zhongqing Y., Akagi H.: DC microgrid based distribution power generation system. *Proceedings of the 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2004*, 14-16 August 2004, Xi'an, China, vol. 1743, 1740-1745
- [15] Sanchez S., Molinas M., Degano M., Zanchetta P.: Stability evaluation of a DC micro-grid and future interconnection to an AC system. *Renewable Energy*, 62 (2014), February 2014, 649-656
- [16] 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/idx/1/>
- [17] 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
- [18] 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
- [19] Baczyński D., Helt P., Maniecki M., Wasilewski J.: Koncepcja systemu MGrid do wspomagania, projektowania i sterowania pracą wielonośnikowych mikrosieci energetycznych. *Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce – APE 2013”*, 12-14 czerwca 2013, Jurata, *Acta Energetica*, 95-100
- [20] 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
- [21] Wasilewski J.: Optymalizacja struktury wytwórczo-zasobnikowej wielonośnikowej mikrosieci z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu koncentratora energetycznego. *Rynek Energii*, 116 (2015), nr 1, 37-49
- [22] Geidl M., Andersson G.: Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems. *European Transactions on Electrical Power*, 16 (2006), issue 5, 463-477
- [23] Geidl M., Koepfel 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