

Mikrosieci prądu stałego sposobem na integrację źródeł rozproszonych z systemem elektroenergetycznym

Piotr Biczal, Mariusz Kłos, Józef Paska

W ostatnich latach obserwuje się wzrastające zainteresowanie energetyką rozproszoną [1]. Spowodowane jest to głównie szybko postępującą ewolucją konwencjonalnych technologii wytwórczych i rozwojem technologii alternatywnych. Ten fakt przekłada się również na coraz łatwiejszy dostęp do tych technologii, po coraz przystępniejszych cenach. Źródła energii, takie jak: baterie słoneczne, przydomowe turbozespoły wiatrowe małej mocy, małe elektrownie wodne czy agregaty prądotwórcze zasilane paliwami ekologicznymi, są coraz powszechniej stosowane. W związku z rozwojem tej gałęzi energetyki potrzebne są rozwiązania umożliwiające jak najefektywniejsze wykorzystanie jej potencjału. Takim rozwiązaniem jest utworzenie małego lokalnego systemu elektroenergetycznego poprzez przyłączenie źródeł do wspólnej sieci, zwanej mikrosiecią.

Idea mikrosieci prądu stałego

Idea mikrosieci prądu stałego jest oparta na koncepcji połączenia różnych źródeł energii w mały system elektroenergetyczny. System ten ma umożliwić pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną na stosunkowo niewielkim obszarze, np. wsi, małego miasta lub wyspy [2]. Jak wiadomo, każda technologia wytwórcza charakteryzuje się innymi właściwościami i dynamiką. Połączenie w mały system elektroenergetyczny różnych niezależnie pracujących źródeł, które na przykład są rozmieszczone na terenie kilku gospodarstw danej miejscowości (baterie słoneczne, turbiny wiatrowe, agregaty zasilane biopłynem czy małe elektrownie wodne), z całą pewnością zwiększy niezawodność zasilania. Jednocześnie, dzięki zastosowaniu zaawansowanych algorytmów zarządzania tymi źródłami, zaimplementowanych w nadrzędnym systemie nadzoru i sterowania, oraz wprowadzeniu technologii umożliwiających magazynowanie energii elektrycznej, ulegnie poprawie stopień ich wykorzystania przy równoczesnym zapewnieniu odbiorcom stabilnych i przewidywalnych warunków zasilania.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy mikrosieci prądu stałego. Do elementów składowych mikrosieci należą:

- jednostki generujące energię;
- sterowniki lokalne (przetwornice energoelektroniczne z lokalnymi układami sterowania i nadzoru);
- podsystem przesyłu i rozdziału;
- odbiory;
- sprzęgi międzysystemowe;
- infrastruktura pomiarowa, komunikacyjna i rozliczeniowa;
- centralny układ sterowania.

Sterowniki indywidualne są odpowiedzialne za zapewnienie optymalnych warunków pracy poszczególnych źródeł. Na przykład, dla elektrowni fotowoltaicznej sterownik lokalny utrzymuje optymalny punkt pracy baterii słonecznej, zwany punktem

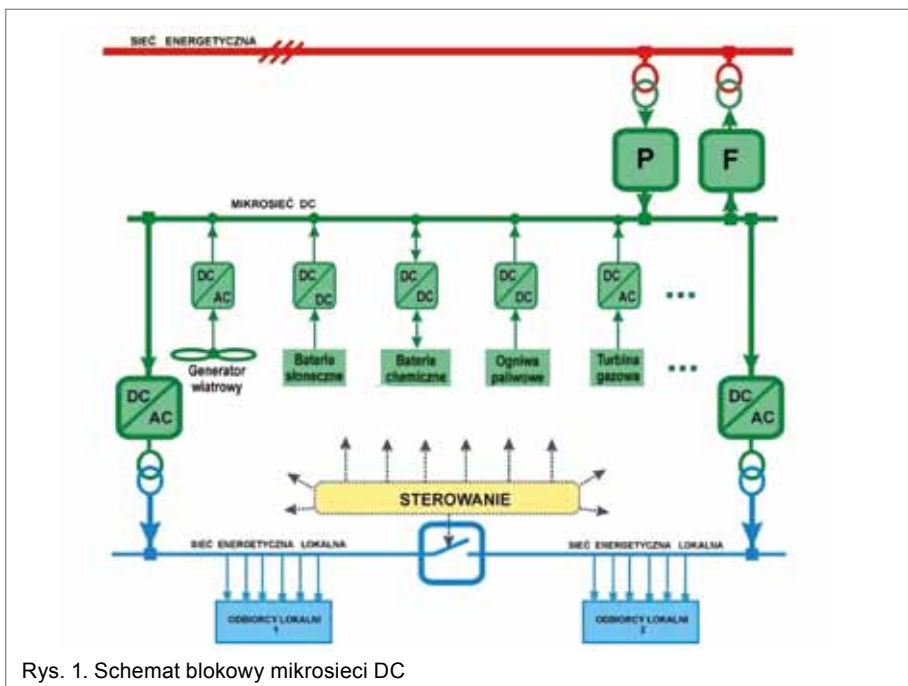
Streszczenie: W artykule przedstawiono ideę mikrosieci prądu stałego wraz z aspektami techniczno-ekonomicznymi jej budowy. Mikrosieci są rozpatrywane jako małe, niezależne systemy elektroenergetyczne. Układy tego typu umożliwiają w stosunkowo łatwy sposób integrację różnych technologii wytwórczych, zarówno konwencjonalnych, jak i alternatywnych, w jeden system zasilający lokalnych odbiorców. Integracja technologii wytwórczych może odbywać się w sposób klasyczny z wykorzystaniem infrastruktury przemiennoprądowej (AC), jak również przy wykorzystaniu omawianych w publikacji struktur i podzespołów prądu stałego (DC). Mikrosieci mogą być również postrzegane jako układy świadczące usługi systemowe, współpracując z Krajowym Systemem Elektroenergetycznym (KSE). W artykule zwrócono uwagę na rolę układów energoelektronicznych umożliwiających budowę tego typu systemów elektroenergetycznych oraz przedstawiono wstępną analizę ekonomiczną dla przykładowej infrastruktury elektroenergetycznej zbudowanej w oparciu o elektrownię fotowoltaiczną, elektrownię wiatrową, agregat prądotwórczy i baterijny zasobnik energii.

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, energetyka rozproszona, mikrosieć DC, integracja źródeł rozproszonych.

Abstract: The idea of DC microgrid is presented in the paper as well as technical and economical aspects of its application. Microgrids are assumed as small, independent power systems. Microgrids allow easy integration of several power plants based on different technologies, both conventional and alternative, into one power system supplying local consumers. Power sources integration can be done using classic AC lines or described here DC systems. Microgrid can also perform systems services for national power system. Authors put emphasis on the role of power electronic converters in such systems, which allow their proper operation. Basic economic analysis of investment in DC microgrid consisted of PV power plant, wind turbine, Diesel generator set and battery storage system are presented as well.

Keywords: power system, distributed generation, DC microgrid, RES integration.

mocy maksymalnej (MPP) [3]. Elementy pomiarowe umożliwiają zbieranie danych, na podstawie których sterownik centralny realizuje algorytmy sterowania pracą poszczególnych źródeł i całego systemu. Elementy pomiarowe mogą pełnić również



Rys. 1. Schemat blokowy mikrościei DC

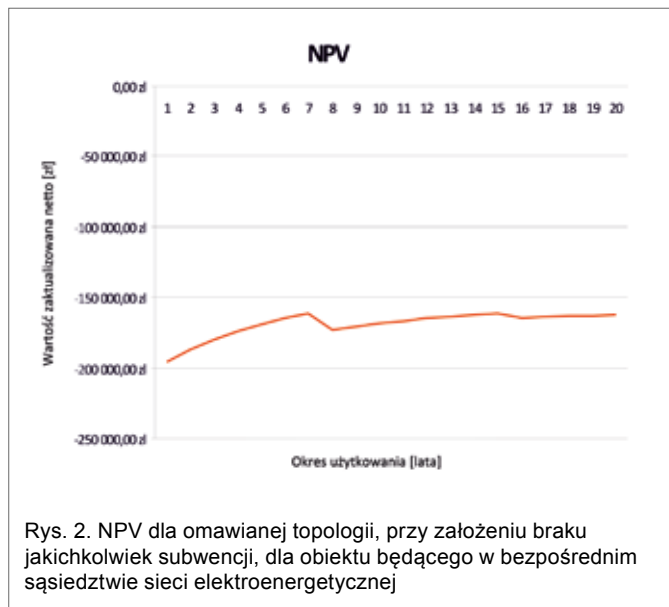
funkcję układów rozliczeniowych. Jak widać, mikrościeć jest w zasadzie kompletnym systemem elektroenergetycznym w mikroskali. Różnica między KSE a mikrościecią dotyczy głównie wielkości, w sensie mocy zainstalowanej w źródłach, mocy przesyłanej i mocy odbiorów, ale również zajmowanego obszaru. Mały system elektroenergetyczny, jakim jest mikrościeć, musi być wewnętrznie zbilansowany i zdolny do pracy w układzie wydzielonym. Jak przedstawiono to na rys. 1, rozpatrywane jest przyłączenie tego systemu do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, co umożliwi planową wymianę lub sprzedaż nadwyżki produkowanej energii elektrycznej.

Mikrościeci – ujęcie techniczne

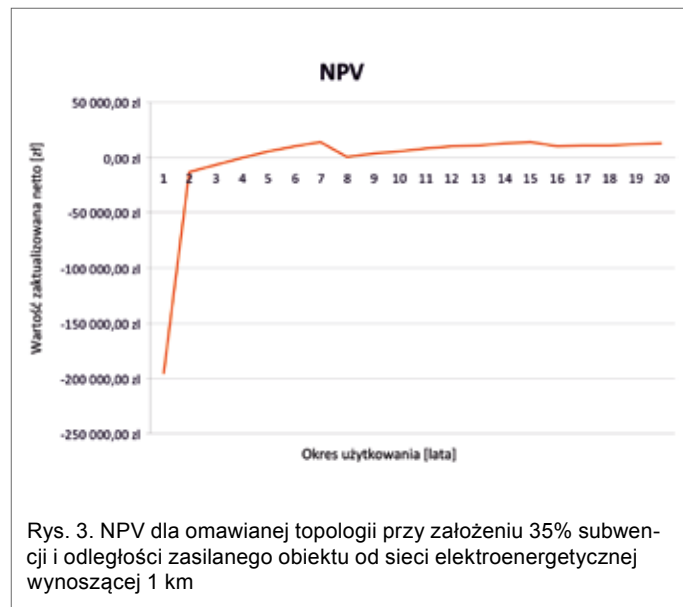
Zastosowanie mikrościeci prądu stałego upraszcza łączenie ze sobą w jeden układ wielu różnych technologii wytwórczych. Wyprowadzenie mocy na wspólną szynę DC eliminuje konieczność synchronizacji tych źródeł przy operacjach łączeniowych (załączanie źródeł). Ma to szczególne znaczenie w przypadku tak niestabilnych w produkcji energii elektrycznej źródeł, jak baterie słoneczne czy w szczególności turbiny wiatrowe, dla których mogą w ciągu dnia występować wielokrotnie wyłączenia i ponowne załączenia do pracy. Dodatkowo duża dynamika zmian generacji nie będzie powodowała tętnień napięcia w sieci, tak jak mogłoby to mieć miejsce w przypadku układu przemiennoprądowego. Istotnym argu-

mentem przemawiającym za zastosowaniem połączenia prądem stałym jest to, że większość przewidzianych do współpracy źródeł energii, tj. baterie słoneczne, ogniwa paliwowe, nowoczesne agregaty, turbiny wiatrowe oraz układy zasobników energii, jest źródłami stałoprądowymi.

Połączenie wymienionych wyżej źródeł z odbiorcami spowoduje dodatkowo korzystne dla Krajowego Systemu Elektroenergetycznego przesunięcie bilansu mocy na stronę DC. Umożliwi to także planową wymianę energii między KSE a mikrościecią. Konstrukcja mikrościeci zapewnia możliwość generowania napięcia przemiennego o bardzo stabilnych parametrach jakościowych (napięcia i częstotliwości). Jest to możliwe dzięki zastosowaniu bardzo zaawansowanych technologicznie przetwornic ergoelektronicznych, pośredniczących w wymianie energii pomiędzy poszczególnymi elementami składowymi mikrościeci (źródła – odbiorniki). Przesyłanie energii prądem stałym wymaga przyłączenia pojedynczych odbiorców lub ich grup wymagających zasilania przemiennoprądowego poprzez falownik. Takie rozwiązanie eliminuje problem przesyłu mocy biernej liniami elektroenergetycznymi. Przesył ten ma miejsce tylko od falownika do odbioru. W przypadku, gdy odbiór pobiera moc odkształcenia, ona również jest liczona tylko od falownika. Dzięki temu, że moc bierna i odkształcenia jest wytwarzana przy odbiorze, nie musi ona być przesyłana liniami



Rys. 2. NPV dla omawianej topologii, przy założeniu braku jakichkolwiek subwencji, dla obiektu będącego w bezpośrednim sąsiedztwie sieci elektroenergetycznej



Rys. 3. NPV dla omawianej topologii przy założeniu 35% subwencji i odległości zasilanego obiektu od sieci elektroenergetycznej wynoszącej 1 km

przesyłowymi i dzięki temu odciążany jest system elektroenergetyczny.

Obecny rozwój energoelektroniki pozwala na budowę nie tylko sieci DC niskiego napięcia, lecz również średniego napięcia. Dzięki temu jest możliwe podłączenie do sieci większych źródeł, rozprzewodzenie energii po większym terenie i zasilenie większej liczby odbiorców. Innym zagadnieniem jest połączenie takiego podsystemu z KSE. Obecnie prowadzone w Polsce badania potwierdzają możliwość budowy dużych układów energoelektronicznych (np. falowników wielopoziomowych), umożliwiających współpracę z KSE układów stałoprądowych średniego napięcia przy wykorzystaniu krajowego potencjału gospodarczego, a tym samym budowy tak zaawansowanych układów wytwórczych, jakimi są mikrosieci [6]. Zastosowanie nowoczesnych przekształtników umożliwia także zapewnienie dodatkowych funkcji regulacyjnych. Dla przykładu możliwe jest ograniczenie mocy biernej pobieranej przez odbiorcę z punktu widzenia KSE, gdyż jest ona produkowana lokalnie, zapewnia także dodatkową stabilizację napięcia wyjściowego oraz eliminację wyższych harmonicznych. Dzięki temu, z punktu widzenia odbioru, napięcie posiada parametry zgodne z normą, nawet gdy napięcie w linii DC będzie niestabilne. Układy przekształtnikowe są w stanie pracować prawidłowo przy wahaniach napięcia po stronie sieci prądu stałego w zakresie $\pm 10\%$. Falownik wyjściowy pozwala (poprzez szybkie układy regulacji) usunąć też niektóre zakłócenia pojawiające się w klasycznych

sieciach przemiennoprądowych, jak np. migotanie światła.

Algorytmy sterowania, optymalizując pracę układów wykorzystujących technologie odnawialne, umożliwiają efektywną pracę mikrosieci nie tylko z technicznego, ale również z ekonomicznego punktu widzenia, ograniczając do minimum generację energii w źródłach konwencjonalnych, które charakteryzują się dużymi kosztami eksploatacyjnymi (głównie koszty paliwowe) na rzecz optymalnego wykorzystania źródeł odnawialnych.

Mikrosieci – ujęcie ekonomiczne

Opłacalność inwestycji, polegającej na budowie mikrosieci DC, jest uzależniona od wielu czynników. Główną pozycję w kosztach inwestycyjnych stanowią układy wytwórcze wykorzystujące odnawialne źródła energii (OZE) (elektrownia wiatrowa i fotowoltaiczna) i układy zasobników energii. Na efektywność ekonomiczną będzie miał również wpływ dobór mocy poszczególnych źródeł i zasobników energii oraz sprawy związane z pozyskaniem terenu pod inwestycję (dla małych układów fotowoltaicznych należy wykorzystać całą dostępną powierzchnię dachową budynków, które są przewidziane do zasilania z tego typu układów wytwórczych).

W celu przeanalizowania opłacalności budowy mikrosieci rozpatrzono kilka topologii umożliwiających zasilanie trzech domków jednorodzinnych o rocznym zapotrzebowaniu na energię na poziomie 3500 kWh każdy. Topologie zostały zbu-

dowane w oparciu o następujące podukłady elektroenergetyczne:

- elektrownię wiatrową, składającą się z jednego, dwóch i trzech turbospełnów wiatrowych o mocy 5 kW każdy;
- elektrownię fotowoltaiczną o mocy 4,5 kW (25 paneli o mocy znamionowej 180 W każdy);
- agregat prądowórczy o mocy 10 kVA;
- baterijny zasobnik energii (48 akumulatorów 12 V o pojemności 200 Ah każdy, połączonych szeregowo).

Pominięto koszty przetwornic energoelektronicznych, które mają stosunkowo mały udział w nakładach inwestycyjnych takich instalacji. Głównym założeniem było pokrycie 100% zapotrzebowania na energię elektryczną rozpatrywanych obiektów bez udziału zewnętrznej sieci elektroenergetycznej. Założono również minimalny udział agregatu prądowórczego w bilansie elektroenergetycznym. Spełnienie głównych założeń wymusiło potrzebę przewymiarowania źródeł, co wpłynęło niekorzystnie na ekonomikę rozpatrywanych topologii, powiększając koszty inwestycyjne. Na rys. 2 zaprezentowano wyniki analizy NPV (wartości zaktualizowanej netto) dla układu składającego się z trzech turbospełnów wiatrowych, 25 paneli fotowoltaicznych, agregatu prądowórczego i zasobnika energii (topologia optymalna). Przyjęto cenę jednostkową energii na poziomie 0,58 zł/kWh, stopę dyskonta na poziomie 8% i założono brak jakichkolwiek subwencji. Przewymiarowanie źródeł wiatrowego umożliwiło bilansowanie obiektów bez udziału agregatu prądowórczego. Agregat jest tu postrzegany

jedynie jako źródło rezerwowe zwiększające parametry niezawodnościowe układu wytwórczego. Instalacja nie zwraca się w rozpatrywanym okresie obliczeniowym wynoszącym 20 lat. Wpływy z tytułu niewydatkowania środków na zakup energii elektrycznej nie kompensują poniesionych kosztów inwestycyjnych.

Następnie przeanalizowano wariant, w którym dla takiej samej topologii jak poprzednio, przy utrzymaniu takiej samej ceny energii i stopy dyskonta założono dofinansowanie projektu. Dla możliwej teoretycznie do uzyskania subwencji na poziomie 70% kosztów inwestycji nie uzyskano zwrotu kapitału. Aby uzyskać zwrot kapitału, subwencja musiałaby pokryć 100% poniesionych kosztów, co w naszych realiach jest niemożliwe. Teoretycznie przy 100-proc. dofinansowaniu inwestycja zwróci się po 10 latach, przynosząc zyski w kolejnych latach na poziomie średnio kilku tysięcy złotych. Kolejnym analizowanym wariantem był układ o takiej samej topologii, przy czym założono 35-proc. subwencję (taki poziom subwencji wydaje się możliwy do uzyskania) i przebadano wpływ odległości obiektu rozpatrywanego do zasilania od sieci elektroenergetycznej. Na rys. 3 przedstawiono wyniki analizy NPV dla tego wariantu.

Założono, że koszt jednostkowy budowy linii elektroenergetycznej niskiego napięcia wynosi 134 000 zł/km [7]. Dla tak przyjętych założeń inwestycja zwraca się w czwartym roku obliczeniowym przy założeniu, że obiekt wymagający zasilania jest oddalony od sieci o co najmniej 1 km. Zakładając odległość obiektu większą niż 1,5 km, należy oczekiwać, że inwestycja zwróci się bez jakiegokolwiek dodatkowego wsparcia finansowego.

Podsumowanie

Integracja technologii OZE w ramach mikro sieci prądu stałego umożliwia podłączenie do jednego węzła KSE wielu technologii OZE przy jednoczesnym ograniczeniu bądź likwidacji negatywnego wpływu tych technologii na jego prawidłowe funkcjonowanie. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych przekształtników i odpowiedniemu sterowaniu opisywana infrastruktura elektroenergetyczna może świadczyć usługi systemowe, takie jak: produkcja mocy biernej lub/i wygładzanie „szczytów” i „dolin” energetycznych. Integracja źródeł wraz z lokalnymi od-

biorami za pomocą mikro sieci pozwala także na lokalne zbilansowanie energii, umożliwiające odciążenie KSE. Budowa tego typu układów może przyczynić się również do ograniczenia negatywnego wpływu sektora elektroenergetycznego na środowisko naturalne. Z ekonomicznego punktu widzenia tego typu instalacje wytwórcze, zważywszy na bardzo duże nakłady inwestycyjne, nie są obecnie w stanie konkurować z konwencjonalną elektroenergetyką i trudno jest wyrokować o ich przyszłości i roli, jaką mogą spełnić w sektorze elektroenergetycznym.

Literatura

- [1] PASKA J.: *Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [2] PASKA J., MICHALSKI Ł., MOLIK Ł., KOCĘBA M.: *Wykorzystanie mikro sieci prądu stałego do integracji rozproszonych źródeł energii*. „Rynek Energii”, 2/2010.
- [3] DICK C.P., RIGBERS K., RADERMACHER H., DE DONCKER R.W.: *Investigations on the Controllability and the Design of DC/DC Converter connected to PV-Generators*. „Electrical Power Quality and Utilisation Journal”, 2/2006.
- [4] DE DONCKER R.W., MEYER C., LENKE R.U., MURA F.: *Power Electronics for Future Utility Applications*. 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS' 07, Nov. 2007.
- [5] BICZEL P., KŁOS M.: *Czyżby renesans układów tyrystorowych?* „Nowa Elektrotechnika”, 5/2005.
- [6] ZYMMER K., ZAKRZEWSKI Z., STRZELLECKI R., SZCZEPANKOWSKI P.: *Czteropoziomowy falownik napięcia 6 kV typu „Diode Clamped”*. Budowa i sterowanie. „Przegląd Elektrotechniczny”, 4/2008.
- [7] BIULETYN CEN OBIEKTÓW BUDOWLANYCH BCO część II – OBIEKTY INŻYNIERYJNE, Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa PROMOCJA Sp. z o.o., Zeszyt 14/2011.

dr inż. Piotr Biczel, dr inż. Mariusz Kłós, prof. dr hab. inż. Józef Paska – Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska