

**Beata ANTOSIEWICZ
Piotr BICZEL
Mateusz PATRALSKI**

Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki

Mikrosieć prądu stałego

Streszczenie. Artykuł opisuje demonstracyjny układ mikrosieci prądu stałego wykonany w laboratorium Zakładu Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej. Przedstawiono struktury sieci, w których można skonfigurować mikrosieć oraz modele matematyczne, które opisują każdą z nich. Przedstawiono źródła energii, który dysponuje obecnie laboratorium.

Słowa kluczowe: prąd stały, mikrosieć, struktura sieci, modelowanie sieci, sieci inteligentne

Wprowadzenie

Rozwój generacji rozproszonej oraz sieci inteligentnych w systemie dystrybucji energii może zaowocować wydzielaniem się mikro podsystemów elektroenergetycznych zwanych mikrosieciami [2].

W tej samej pracy zdefiniowano mikrosieć jako mały system elektroenergetyczny służący pokryciu zapotrzebowania na energię elektryczną stosunkowo niewielkiego obszaru. System ten jest wewnętrznie zbilansowany i zdolny do pracy w układzie wydzielonym. Jeśli jest przyłączony do konwencjonalnego systemu elektroenergetycznego, to wymiana międzysystemowa powinna mieć charakter planowy. Z punktu widzenia wytwarzania energii jest to rozproszony, hybrydowy układ wytwarzania, w którym dominują odnawialne źródła energii.

Ponieważ odnawialne źródła energii często są przyłączane do sieci przez przekształtniki energoelektroniczne zawierające obwód pośredni prądu stałego rozsądnym jest zmniejszenie liczby stopni przekształceń energii i rozwijanie sieci stałoprądowych.

Badania w tym kierunku są m. in. prowadzone w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej. W ramach tych prac została wykonana doświadczalna mikrosieć prądu stałego [1].

Eksperymentalna mikrosieć prądu stałego

Wykonana mikrosieć pracuje przy napięciu stałym o wartości $50\text{ V} \pm 5\%$. Przewody zostały zaprojektowane na prąd nominalny 40 A. Instalacja zapewnia łatwą rozbudowę zarówno o nowe funkcje jak i nowe obiekty. Konstrukcja dopuszcza pracę przy wielu układach sieci, a staranne wykonanie umożliwia bezpieczne użytkowanie.

Laboratorium zostało wyposażone w źródła rozproszone różnych technologii:

- elektrownię słoneczną,
- turbinę wiatrową z generatorem synchronicznym z magnesami stałymi,
- ogniwo paliwowe,
- układ maszynowy modelujący mikroturbinę gazową.

Dodatkowo laboratorium jest wyposażone w tyrystorowy sprzęg z systemem elektroenergetycznym, zapewniający eksport oraz import energii z mikrosieci. Odbiorami

w mikrosieci są zespoły rezystorów i obciążenie elektroniczne. Laboratorium jest również wyposażone w akumulatorowy zasobnik energii.

Każde z urządzeń przedstawionych powyżej ma istotną rolę. Elektrownie słoneczna i wiatrowa zapewniają wykorzystanie lokalnych nośników energii, co jest kluczowe dla badań w nurcie rozwoju zrównoważonego. Ogniw paliwowe dzięki zdolności do długotrwałej pracy przy niedociążeniu jest przeznaczone do długotrwałego utrzymywania parametrów zasilania. Stanowi statyczne źródło bilansujące. Akumulatorowy zasobnik energii służy zaś jako układ kompensacji dynamicznej. Zasobnik akumulatorowy pełni również rolę źródła prądów zwarciovych, potrzebnych do pobudzenia zabezpieczeń zwarciovych, których nie są w stanie wygenerować panele fotowoltaiczne ani ogniwo paliwowe. Mikroturbina gazowa będzie pracowała w tym układzie podczas szczytu zapotrzebowania oraz długotrwałego zaniku wiatru i promieniowania słonecznego o dostatecznej energii. Dla zwiększenia wykorzystania lokalnych nośników pierwotnych mikroturbina w rzeczywistym układzie powinna być zaopatrywana w biogaz pochodzący z okolicznych odpadów produkcji rolnej lub przemysłowej.

Do integracji tych elementów wybrano prąd stały, ponieważ regulacja napięcia i mocy w systemie przemiennie prądowym wymaga nieadekwatnie skomplikowanego układu sterowania do tak niewielkiej liczby źródeł. W praktyce utrzymanie stałej częstotliwości w małym systemie jest trudnym zadaniem. W dużych systemach elektroenergetycznych problem ten jest rozwiązywany poprzez łączenie jednostek o dużej mocy zainstalowanej i dużej inercji. Mikrosieci oczywiście można też podłączyć do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, ale jedynie do wyprowadzenia nadwyżki mocy, lub jako awaryjne źródło w przypadku zaniku generacji. Dlatego też rozwiązano problem regulacji poprzez zastosowanie napięcia stałego, co automatycznie uprościło wszystkie algorytmy sterowania. Dodatkową korzyścią wynikającą z tego wyboru jest brak konieczności synchronizacji pracy poszczególnych falowników. Istotny jest również brak strat związanych z mocą bierną – przede wszystkim prądów ładowania linii. Ma duże znaczenie, ponieważ mikrosieć w aplikacjach praktycznych będzie wykonana w postaci linii kablowych lub warkoczy podwieszanych na słupach.

Struktura mikrosieci

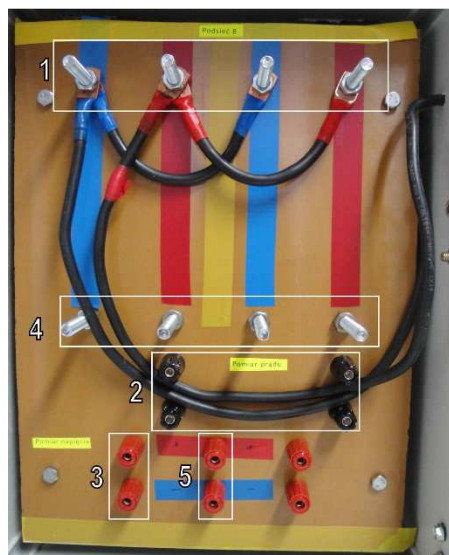
Sieć jest ułożona w korytach kablowych, a złącza zostały wykonane w skrzynkach elektroinstalacyjnych. Skrzynki umożliwiają podłączenie urządzeń przy pomocy standardowej wtyczki prądu stałego. Widok mikrosieci przedstawia rys. 1, gdzie oznaczono: C – skrzynki przyłączeniowe źródeł i odbiorów z widocznym gniazdem prądu stałego, D – koryto kablowe mikrosieci, E – skrzynkę przyłączeniową baterii słonecznej, G – szafę przekształtnikową elektrowni słonecznej i wiatrowej, H – ogniwo paliwowe, J – sprzęg z siecią przemiennoprądową.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

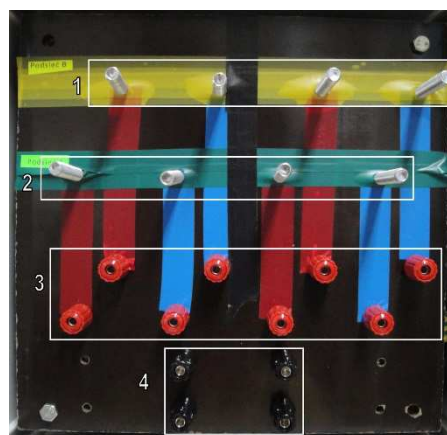


Rys. 1. Widok mikrosieci prądu stałego w ZEiGE, IEn, PW

Punkt przyłączeniowy elektrowni lub odbioru opiera się na prostej i funkcjonalnej konstrukcji (rys. 2). Przewody wchodzące do skrzynki zostały przytwierdzone od tyłu do płytki bakelitowej za pomocą śrub. W ten sposób przewody zostały schowane i zabezpieczone przed dotykiem bezpośrednim, zwiększając również przejrzystość i czytelność układu. Linie zostały wyprowadzone na zewnątrz za pomocą górnej linii śrub (1), które za pomocą zwor umożliwiają zmianę układu połączeń. Dolna linia śrub (4) została umieszczona w takiej odległości, aby umożliwić rozbudowę o dodatkowe elementy. Mogą to być boczniki do pomiaru prądu, rezystory lub cewki od symulacji długości linii, kondensatory do sztucznego zwiększania pojemności sieci lub bezpieczniki liniowe. Sygnały do pomiaru prądu mogą zostać wyprowadzone na zaciski (2). Zaciski służące do pomiaru napięcia znajdują się w dolnej części punktu przyłączeniowego (3) i (5). Pomiar różnicy potencjałów z linii (1) można wygodnie wykonać korzystając z zacisków laboratoryjnych umieszczonych na dole punktu przyłączeniowego. Zaciski (3) służą do pomiaru napięcia na przewodach wchodzących do układu od strony lewej. Zaciski oznaczone, jako (5) pozostają wolne, celem umożliwienia przyszłej rozbudowy układu. Przewód doprowadzający do urządzeń zewnętrznych wychodzi z boku obudowy i umożliwia swobodne dokonywanie zmian podłączenia urządzenia. Położenie zwór i przewodów od wtyczki, jak na rys. 2, przedstawia odczepowe podłączenie obiektu do linii mikrosieci. Usuwając zwory, widoczne w górnej części zdjęcia, tworzy się rozcięcie w linii mikrosieci, a obiekt zostaje przyłączony do lewej strony. Sam obiekt zewnętrzny, źródło, zasobnik lub odbiór, jest podłączane do uniwersalnego punktu przyłączeniowego poprzez łatwą w montażu wtyczkę ELFA ZW-2 znajdującą się na zewnątrz budowy, na bocznej ścianie skrzynki. Styk wtykowy tego rodzaju jest przystosowany do łączenia instalacji prądu stałego o prądzie znamionowym do 150 A.



Rys. 2. Punkt przyłączeniowy obiektu



Rys. 3. Punkt łączenia podsieci

W korytach mikrosieci ułożone zostały dwa tory przewodów, tworzących dwie podsieci A i B, oznaczone w skrzynkach odpowiednio kolorem zielonym i żółtym. Połowa punktów przyłączeniowych w liczbie 6 jest podłączona do podsieci żółtej, a druga połowa do podsieci zielonej. Do łączenia podsieci służy punkt łączenia podsieci (rys. 3). Umożliwia on tworzenie układów sieciowych np. magistralę lub pętlę.

Punkt łączenia podsieci jest zbudowany w sposób umożliwiający zmianę konfiguracji torów prądowych. Zostało przyjęte następujące rozwiązanie techniczne (rys. 3): górny rząd śrub (1) skupia wyprowadzenia torów prądowych podsieci "B", oznaczonej kolorem żółtym natomiast rząd (2) spełnia to zadanie dla podsieci „A”, oznaczonej kolorem zielonym. Wybrane punkty można połączyć za pomocą zwor. Każda ze śrub jest oznakowana dwoma krzyżującymi się paskami z kodem kolorystycznym. Pierwszy komunikuje biegunowość – niebieski „-”, czerwony „+”. Drugi natomiast jest symbolem podsieci. Poniżej w linii prostej do poszczególnych wyprowadzeń torów prądowych (1) i (2) znajdują się zaciski laboratoryjne umożliwiające pomiar napięcia (3). W linii dolnej (4) znajdują się zaciski mające służyć do pomiaru prądu za pomocą boczników pomiarowych.

Punkty przyłączeniowe poszczególnych podsieci są położone naprzemiennie, aby umożliwić łatwą zmianę położenia urządzenia w instalacji bez zmiany jego fizycznego miejsca przebywania. Jest to dogodne ze względu na bezpieczeństwo i komfort użytkowania tego obiektu badawczego.

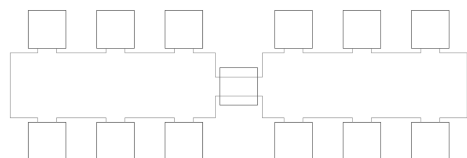
Mikrosieć wykonana w ten sposób, że przewody dodatni i ujemny są ułożone obok tuż obok siebie, podobnie jak w warkoczu. Mikrosieć ma więc znaczą pojemność. Autorzy zmierzili, że naładowana sieć długotrwale utrzymuje napięcie po odłączeniu obiektów. Łączną pojemność mikrosieci oszacowano na 47 nF, przy łącznej długości przewodów nieco ponad 108 metrów. Daje to możliwość wiernego odwzorowania na tym modelu stanów dynamicznych.

Elementy mikrosieci w zależności od potrzeb można przyłączyć do linii. odczepowo. Dzięki czemu unikamy wcięć w sieć i zwiększamy jej niezawodność. Uszkodzony element można z łatwością odstawić i nie ma to wpływu na dalszą pracę pozostałych

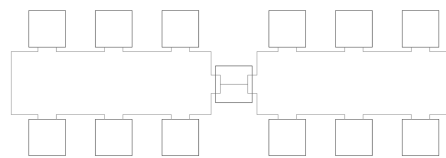
VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

urządzeń. Jest to szczególnie istotne w przypadku zwarć – nie wszystkie źródła są przystosowane do generacji większych prądów.

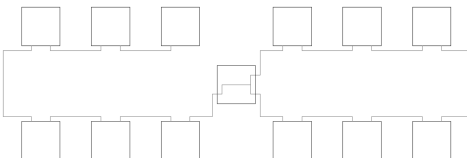
Poniżej przedstawiono różne typy układów mikro sieci (schemat dotyczy punktów łączenia podsieci, a nie samych urządzeń).



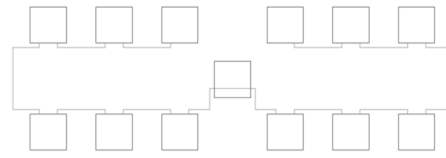
Rys. 3. Topologia A rozważanej mikro sieci



Rys. 4. Topologia B rozważanej mikro sieci



Rys. 5. Topologia L rozważanej mikro sieci



Rys. 6. Topologia K rozważanej mikro sieci

Topologia A jest to siecią zamkniętą tworzącą jedną pętlę. Układ charakteryzuje się dużą niezawodnością awaria poszczególnych elementów może prowadzić do rozcięcia pętli i zachowania pełnej funkcjonalności lub rozpadu na dwie podsieci.

Układ B to sieć zamknięta tworząca dwie pętle połączone w punkcie łączenia podsieci. Jest to układ, który wydaje się być dedykowany do przypadku, gdy mamy do czynienia z podsieciami należącymi do różnych właścicieli – łatwo tutaj dokonać rozdziału na dwie podsieci lub dokonywać pomiaru mocy wymiany między otrzymanymi podsystemami. Ten układ może być również stosowany, gdy wymagamy dużej pewności zasilania lub do łączenia mikro sieci znajdujących się w bliskiej odległości

Konfiguracja L jest złożeniem pojedynczej magistrali połączonej z zamkniętą pętlą. Ten typ pomoże wskazywać, który układ jest lepiej przystosowany do pracy mikro sieci. Jeśli jeden podsystem będzie częściej potrzebował wsparcia drugiego należy sądzić, że układ połączeń jest mniej efektywny. Pomoże to również sprawdzić czy pojedynczy element mikro sieci, będący w znacznym oddaleniu od reszty nie zaburza założonego poziomu napięć.

Układ K prezentuje typową magistralę. Ta konfiguracja stawia przed badaczami najwięcej pytań, ponieważ długość linii i różnorodność elementów mogą prowadzić do zapadów napięcia w niektórych jej fragmentach i zaburzeń w rozplywie prądów.

Wybierając układ do pracy należy przede wszystkim kierować się tym, aby energia była wytwarzana najbliżej miejsca konsumpcji. Wybór układu należy również poprzedzić analizą rozplywową – zwiększona ilość źródeł generujących znaczne wartości prądu w tej samej gałęzi prowadzi do sumowania ich natężeń i zwiększonych strat.

Modele symulacyjne mikro sieci

Pomiar prądów w mikro sieci, będącej przedmiotem tej pracy, jest utrudniony ze względu na spodziewane znaczne wartości prądów. Niskie napięcie zastosowane w instalacji sprawiłoby, że pomiar bezpośredni tej wartości mógłby zauważalnie zwiększyć straty w sieci. Instalacja jest, zatem dostosowana do pomiaru pośredniego. W przypadku użycia instalacji w celach dydaktycznych należałoby wyposażyć punkty przyłączeniowe w boczniki pomiarowe. Dla celów naukowowo-badawczych zastosowana

zostanie metoda polegająca na obliczeniu natężeń prądów z macierzy konduktancyjnej układu oraz zmierzonych napięć węzłowych. Należy jednak zaznaczyć, że w zależności od konfiguracji sieci macierz konduktancyjna ulegnie zmianie – niektóre jej komórki przyjmą wartość zero, gdy nie będzie połączenia pomiędzy danymi węzłami. Należy o tym pamiętać chcąc skorzystać z modelu tego typu. Stosowanie powyższej metody wymaga założenia możliwie jak największej jednorodności elementów raz ich otoczenia. Dlatego podczas instalowania połączeń zadbano, aby odległości między żyłami były możliwie identyczne na całej długości

W ramach tej pracy [1] zostały przygotowany model symulacyjny mikrosieci w postaci macierzy konduktancyjnej G dla różnych struktur. Równanie mikrosieci dla topologii B opisane zostało poniższym wzorem (1).

(1)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \\ I_{10} \\ I_{11} \\ I_{12} \\ I_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 491,732 & 0 & -102,166 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -389,565 & 0 \\ 0 & 471,818 & 0 & -113,418 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -358,400 \\ -102,166 & 0 & 485,072 & 0 & -382,906 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -113,418 & 0 & 466,174 & 0 & -352,756 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -382,906 & 0 & 545,519 & 0 & -162,613 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -352,756 & 0 & 540,991 & -188,235 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -162,613 & -188,235 & 1598,799 & -995,556 & -252,394 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -995,556 & 1199,192 & 0 & -203,636 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -252,394 & 0 & 541,427 & 0 & -289,032 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -203,636 & 0 & 492,669 & 0 & -289,032 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -289,032 & 0 & 633,648 & 0 \\ -389,565 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -289,032 & 0 & 678,597 & 0 \\ 0 & -358,400 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -344,6150 & 0 & 703,015 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \\ U_9 \\ U_{10} \\ U_{11} \\ U_{12} \\ U_{13} \end{bmatrix}$$

Parametry wpisane do macierzy zostały obliczone na podstawie danych geometrycznych przewodów. Ta metoda kryje w sobie znaczne uproszczenie – jest to jednak zabieg celowy, ponieważ potencjalni projektanci, również będą bazowali tym przybliżeniu. Zasadne jest zatem, aby zweryfikować błąd tego przybliżenia podczas dalszych prac badawczych i uzasadnić jego celowość.

Podsumowanie

1. Mikrosieć wykonana w pracy umożliwia badanie zjawisk zachodzących w mikrosieciach prądu stałego.
2. W szczególności umożliwia badanie zachowania się regulatorów źródeł oraz badanie wybranych zjawisk dynamicznych.
3. Budowa mikrosieci pozwala na badanie układu dla różnych struktur, w tym również dla nietypowej w dystrybucji w Polsce strukturze sieci zamkniętej.

Bibliografia

1. Antosiewicz B., Instalacja mikrosieci prądu stałego. Praca inżynierska. Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2013.
2. Biczal P., Integracja rozproszonych źródeł energii w mikrosieci prądu stałego, Prace naukowe PW, Nr 142, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2012.
3. Kacejko P., Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2004.
4. Kujszczyk S. (red.), Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.

Autorzy: dr hab. inż. Piotr Biczal; Zakład Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: biczel@ee.pw.edu.pl; inż. Beata Antosiewicz, studentka studiów II stopnia, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, inż. Mateusz Patralski, student studiów II stopnia, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska