

Streszczenie

Przedmiotem niniejszej pracy doktorskiej jest usprawnienie procesu wprowadzania wyprodukowanej przez instalację fotowoltaiczną energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej nN oraz opracowanie rozwiązań umożliwiających zwiększenie zdolności przyłączeniowych systemu elektroenergetycznego przy zachowaniu wymaganych parametrów jakości energii. Punktem wyjścia do rozważań jest dynamiczny rozwój odnawialnych źródeł energii, będący konsekwencją globalnej transformacji energetycznej oraz realizacji celów polityki klimatycznej, w szczególności w ramach Unii Europejskiej. Intensyfikacja wdrażania instalacji OZE, w tym instalacji fotowoltaicznych, wynika bezpośrednio z założeń pakietu Fit for 55, który zakłada istotną redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie udziału energii odnawialnej w bilansie energetycznym. Równolegle obserwowany jest proces cyfryzacji sektora elektroenergetycznego, którego kluczowym elementem jest wdrażanie systemu CSIRE, umożliwiającego efektywne zarządzanie danymi pomiarowymi, rozliczeniami oraz elastycznością systemu.

W pracy przedstawiono kompleksową analizę aktualnego stanu rozwoju OZE w ujęciu globalnym, europejskim oraz krajowym, ze szczególnym uwzględnieniem uwarunkowań charakterystycznych dla Polski. Wskazano, że rozwój instalacji fotowoltaicznych, napędzany mechanizmami wsparcia oraz rosnącą świadomością odbiorców, prowadzi do istotnych zmian w strukturze pracy sieci elektroenergetycznej, w szczególności na poziomie sieci niskiego napięcia. Transformacja modelu systemu z centralnie sterowanego na rozproszony generuje nowe wyzwania dla operatorów systemów dystrybucyjnych, w tym dla PGE Dystrybucja S.A., które związane są z koniecznością zapewnienia bezpieczeństwa pracy sieci oraz utrzymania wymaganych parametrów jakości energii elektrycznej.

Istotnym elementem pracy jest szczegółowa analiza procesu przyłączania instalacji odnawialnych źródeł energii do sieci elektroenergetycznej. Przedstawiono kolejne etapy procedury przyłączeniowej, obejmujące złożenie wniosku, określenie warunków przyłączenia, zawarcie umowy oraz realizację przyłączenia, a następnie rozpoczęcie sprzedaży energii. Szczególną uwagę poświęcono instalacjom, które ze względu na uproszczone procedury przyłączeniowe oraz masowy charakter stanowią istotne obciążenie dla sieci niskiego napięcia. W pracy przeanalizowano zarówno aspekty formalno-prawne, jak i techniczne, wskazując na występujące bariery systemowe ograniczające możliwości przyłączeniowe, w tym ograniczoną przepustowość sieci, brak elastyczności operacyjnej oraz niewystarczającą zdolność do kompensacji zmian napięcia.

W kontekście uwarunkowań technicznych szczególną rolę odgrywają wymagania jakościowe określone w normie PN-EN 50160, która definiuje dopuszczalne zakresy parametrów napięcia, częstotliwości oraz innych wskaźników jakości energii dostarczanej odbiorcom końcowym. W pracy szczegółowo omówiono znaczenie tej normy zarówno dla użytkowników końcowych, jak i operatorów systemów dystrybucyjnych, podkreślając konieczność jej spełnienia w warunkach rosnącego udziału generacji rozproszonej. Wskazano również metody pomiaru oraz oceny parametrów jakości energii, które stanowią podstawę do identyfikacji problemów eksploatacyjnych oraz podejmowania działań naprawczych.

Kluczową część rozprawy stanowi analiza rzeczywistych doświadczeń eksploatacyjnych związanych z funkcjonowaniem instalacji fotowoltaicznych w sieci niskiego napięcia. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz obserwacji wykazano, że przyłączenie instalacji PV prowadzi do istotnych zmian w pracy sieci, w szczególności w zakresie poziomów napięcia oraz ich symetrii. W godzinach wysokiej generacji, przy jednoczesnym niskim zapotrzebowaniu na energię, dochodzi

do wzrostu napięcia w sieci, co może skutkować przekroczeniem dopuszczalnych wartości określonych w normie oraz wyłączeniem falowników. Dodatkowo wykazano, że duży udział instalacji jednofazowych prowadzi do asymetrii napięć pomiędzy fazami, co negatywnie wpływa na pracę urządzeń odbiorczych oraz pogarsza jakość energii elektrycznej.

W pracy przeanalizowano różne konfiguracje przyłączeń instalacji fotowoltaicznych, obejmujące zarówno instalacje jednofazowe, jak i trójfazowe, a także ich kombinacje. Wykazano, że sposób przyłączenia ma kluczowy wpływ na rozkład obciążeń w sieci oraz poziomy napięć, a niewłaściwa struktura przyłączeń może prowadzić do lokalnych przeciążeń oraz pogorszenia parametrów jakościowych. Przeprowadzone badania zostały uzupełnione o szczegółową analizę pomiarową, obejmującą monitoring rzeczywistej sieci niskiego napięcia, co pozwoliło na identyfikację charakterystycznych zjawisk oraz ich ilościową ocenę.

W celu pogłębienia analizy przeprowadzono badania modelowe, w których odwzorowano rzeczywistą strukturę sieci niskiego napięcia oraz różne scenariusze jej pracy. W ramach modelowania zdefiniowano szereg stanów pracy systemu, oznaczonych jako A0–A3 oraz B1–B3, które odpowiadają różnym konfiguracjom przyłączeń. Wyniki symulacji potwierdziły obserwacje eksploatacyjne, wskazując na istotny wzrost napięć w sieci wraz ze wzrostem generacji oraz na pogłębianie się asymetrii w przypadku dominacji instalacji jednofazowych. Analiza wykazała również, że przy wysokim poziomie nasycenia sieci instalacjami PV dochodzi do systemowego przekroczenia dopuszczalnych parametrów napięciowych, co stanowi istotne ograniczenie dla dalszego rozwoju mikroinstalacji.

Na podstawie uzyskanych wyników opracowano zestaw działań mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu instalacji fotowoltaicznych na sieć niskiego napięcia oraz zwiększenie możliwości przyłączeniowych. Zaproponowane rozwiązania obejmują zarówno działania techniczne, jak i organizacyjne. Wśród nich szczególne znaczenie mają działania związane z symetryzacją przyłączeń instalacji jednofazowych, które pozwalają na ograniczenie asymetrii napięć oraz bardziej równomierne obciążenie faz. Istotnym elementem jest również możliwość sterowania współczynnikiem mocy instalacji fotowoltaicznych, co umożliwia lokalną regulację napięcia poprzez generację lub pobór mocy biernej. W pracy rozważono także wpływ regulacji napięcia po stronie transformatora SN/nN, która może stanowić skuteczne narzędzie w ograniczaniu przekroczeń napięciowych.

Kolejną grupą rozwiązań są działania związane z optymalizacją parametrów sieci, w tym długości oraz przekrojów przewodów, które mają bezpośredni wpływ na spadki napięcia oraz zdolność przesyłową sieci. Wskazano również możliwość ograniczenia mocy jednostkowej instalacji fotowoltaicznych jako narzędzia zarządzania przyrostem generacji w obszarach o ograniczonej przepustowości sieci.

Przeprowadzone analizy jednoznacznie wskazują, że dalszy rozwój instalacji fotowoltaicznych w sieciach niskiego napięcia wymaga podejścia systemowego, obejmującego zarówno modernizację infrastruktury, jak i wdrażanie nowych narzędzi operacyjnych oraz regulacyjnych. Kluczowe znaczenie ma integracja rozwiązań technicznych z systemami informatycznymi oraz mechanizmami rynkowymi, co umożliwi efektywne zarządzanie pracą sieci w warunkach wysokiego udziału generacji rozproszonej.

Praca ma charakter aplikacyjny i stanowi odpowiedź na realne problemy eksploatacyjne występujące w sieciach dystrybucyjnych. Jej wyniki mogą zostać bezpośrednio wykorzystane przez operatorów systemów dystrybucyjnych w procesie planowania rozwoju sieci, zarządzania przyłączeniami oraz optymalizacji pracy systemu elektroenergetycznego. Opracowane wnioski

i rekomendacje wpisują się w aktualne kierunki transformacji energetycznej, wskazując konkretne działania umożliwiające zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa pracy sieci oraz wysokiej jakości dostarczanej energii elektrycznej.