

Zmienność warunków pracy sieci dystrybucyjnej nasyconej generacją rozproszoną

Piotr Rzepka, Mateusz Szablicki – Politechnika Śląska, PSE Innowacje

Adrian Halinka – Politechnika Śląska

Dariusz Lamber, Maciej Turek – TAURON Dystrybucja

Maciej Kołodziejczyk – ALFA POWER

Streszczenie

W referacie przedstawiono perspektywę rozwoju generacji rozproszonej, oraz scharakteryzowano problematykę zmienności warunków pracy sieci dystrybucyjnej SN i nn po przyłączeniu do niej dużej liczby lokalnych źródeł energii. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki obejmują rozważania i analizy przeprowadzone dla studium przypadku odnoszącego się do pilotażowego projektu monitorowania mikrogeneracji w sieci nn realizowanego przez TAURON Dystrybucja.

1. Perspektywy rozwoju generacji rozproszonej

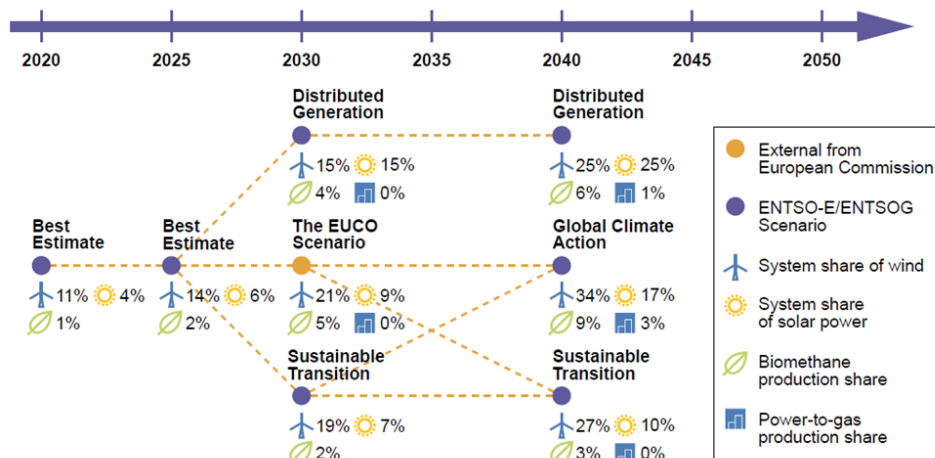
Realizowana polityka klimatyczna oraz inne uwarunkowania sprawiają, że w najbliższych latach przewidywany jest bardzo duży rozwój generacji rozproszonej GR. Generacja rozproszona to małe jednostki lub obiekty wytwórcze, przyłączane bezpośrednio do sieci rozdzielczych lub zlokalizowane w sieci elektroenergetycznej odbiorcy (za urządzeniem kontrolno-rozliczeniowym), nie podlegające centralnemu planowaniu rozwoju i dysponowaniu mocą, często produkujące energię elektryczną z energii odnawialnych lub niekonwencjonalnych, równie często w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła. Moc znamionowa jednostek generacji rozproszonej zwykle kształtuje się w przedziale od kilku kW do kilku MW.

Rozwój GR w Europie przedstawiono m.in. w raporcie The Ten-Year Network Development Plan 2018 (TYNDP) [1] opublikowanym przez stowarzyszenie ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) [2]. Zgodnie z informacjami zamieszczonymi w tym raporcie przewiduje się, że do 2040 r. udział OZE w pokryciu zapotrzebowania na energię elektryczną będzie bardzo duży i może sięgnąć nawet 75%. W raporcie tym rozpatrzono trzy scenariusze rozwoju struktur europejskiego SEE. Nazwy oraz podstawowe założenia dla poszczególnych scenariuszy przedstawiono w tab. 1. Scenariusze te zostały zdefiniowane z uwzględnieniem wymagań klimatycznych (w tym europejskich celów klimatycznych), aspektów politycznych oraz dążenia do obniżenia ceny energii elektrycznej u odbiorców końcowych.

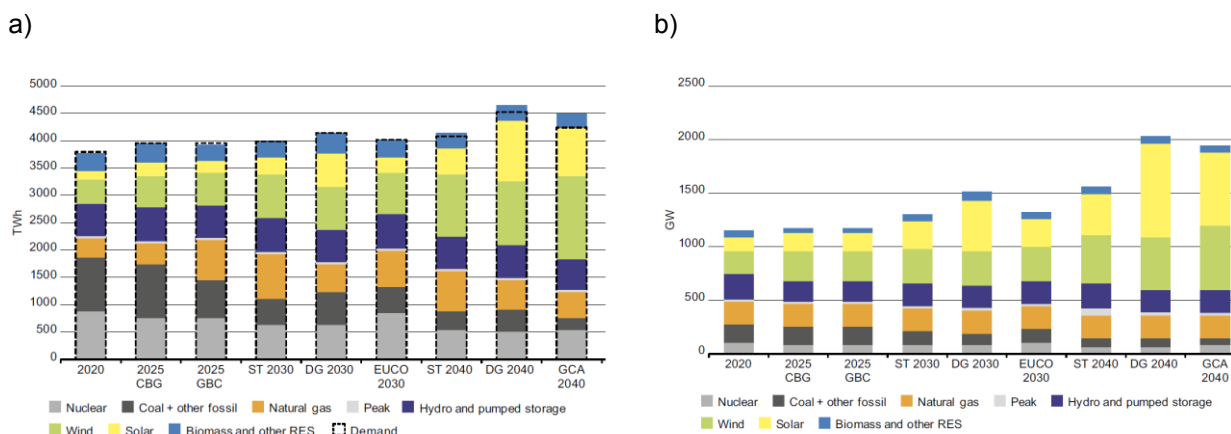
„Distributed Generation” (DG) Generacja rozproszona	„Global Climate Action” (GCA) Działania na rzecz klimatu	„Sustainable Transition” (ST) Zrównoważony przesył
<ul style="list-style-type: none">• skupienie na prosumentach• zdecentralizowana generacja w małej skali• paliwa alternatywne• wysokie wsparcie regulacyjne• wysoki wzrost gospodarczy• wysoki udział energii elektrycznej w sektorze ciepłowniczym i transporcie• zintegrowany system OZE w całej Europie	<ul style="list-style-type: none">• intensywna dekarbonizacja• rozwój OZE w dużej skali• spełnienie globalnych wymogów redukcji CO₂• efektywne wykorzystanie technologii OZE	<ul style="list-style-type: none">• zrównoważony rozwój OZE• umiarkowany rozwój gospodarczy• umiarkowana elektryfikacja sektora ciepłowniczego i transportu w zgodności z scenariuszem CO₂ 2030, lecz nieznacznie poniżej scenariusza na rok 2050• niewystarczający rozwój OZE

Tab. 1. Scenariusze rozwoju rozważane w raporcie TYNDP ENTSO-E [1]

Perspektywy rozwoju OZE dla poszczególnych scenariuszy analizowanych w raporcie TYNDP [1] przedstawiono na rys. 1. Natomiast zakładane zapotrzebowanie energetyczne, z podziałem na typy jednostek wytwórczych zapewniających pokrycie tego zapotrzebowania, przedstawiono na rys. 2, a na rys. 3 przedstawiono strukturę mocy zainstalowanej w poszczególnych typach źródeł (odpowiadającą zakładanemu zapotrzebowaniu).

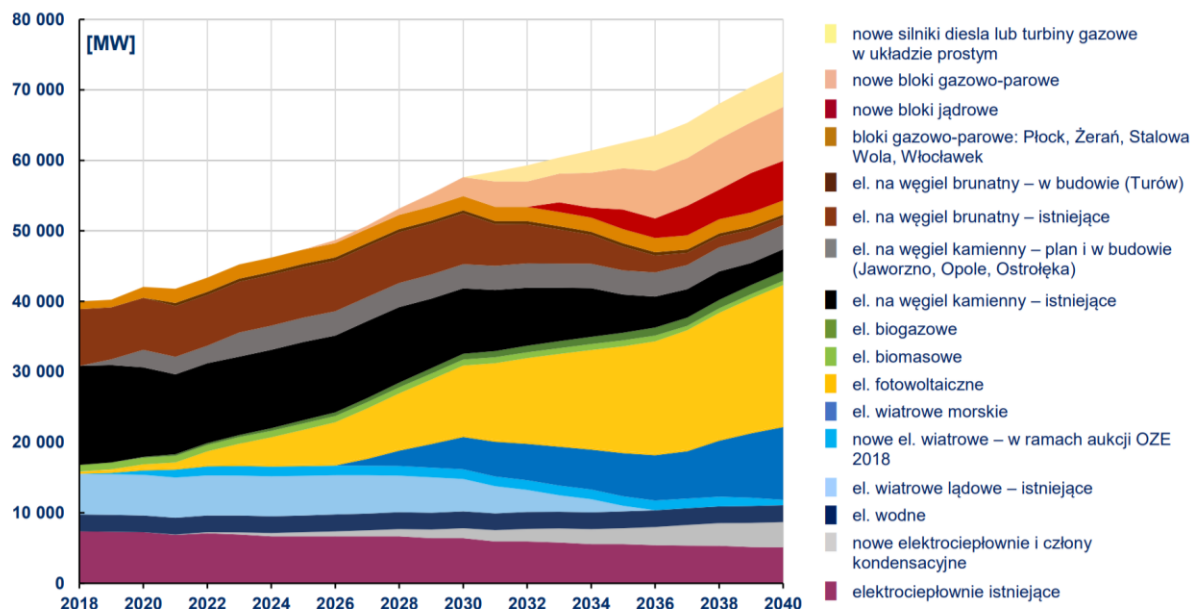


Rys. 1. Perspektywy rozwoju OZE dla poszczególnych scenariuszy zakładanych w raporcie TYNDP [1]



Rys. 2. Zakładane w poszczególnych scenariuszach TYNDP [1]:
a) zapotrzebowanie energetyczne z podziałem na typy jednostek wytwórczych,
b) struktura mocy zainstalowanej

Biorąc pod uwagę obecne działania rządów krajów europejskich w kierunku dynamicznego rozwoju elektromobilności, paliw alternatywnych, jak również i zdecentralizowanej produkcji energii elektrycznej i rozwój struktur społeczności energetycznych [3], [4], za najbardziej prawdopodobny scenariusz TYNDP należy uznać wariant GR". Zgodnie z tym wariantem za około dwie dekady dominującym typem źródeł w sektorze wytwórczym SEE, także w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (rys. 3), będą niestabilne źródła fotowoltaiczne oraz źródła wiatrowe.

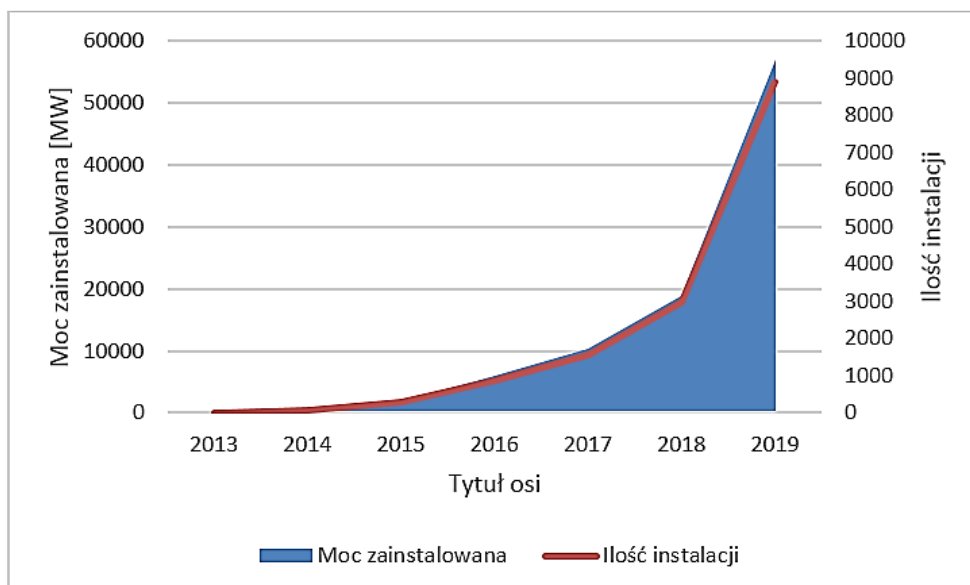


Rys. 3. Prognoza struktury mocy zainstalowanej z podziałem na technologie do 2040 r. [5]

Przewidywany masowy rozwój źródeł fotowoltaicznych wystąpi w sektorze źródeł przyłączanych bezpośrednio do sieci dystrybucyjnej nn i SN. W skutek tego istotnie zmienia się warunki pracy tych sieci. Przygotowanie nowych zasad funkcjonowania sieci dystrybucyjnych, uwzględniających duże nasycenie generacją rozproszoną, powinno być zrealizowane z uwzględnieniem znaczącego wzrostu roli sieci dystrybucyjnej w zapewnieniu stabilnej pracy SEE.

2. Rozwój GR w sieci oddziału gliwickiego TAURON Dystrybucja

Zgodnie z obecnie obowiązującymi przepisami duże jednostki wytwórcze, generujące zieloną energię, chcąc wprowadzić ją do sieci elektroenergetycznej na napięciu SN i wyższym, uzyskują na to pozwolenie od OSD z zachowaniem dotychczasowych procedur wydawania warunków współpracy z siecią energetyki zawodowej. Inaczej wygląda sytuacja w przypadku mikroinstalacji przyłączanych do sieci nn, szczególnie jeżeli podmiot ubiegając się o jej przyłączenie jest już przyłączony do sieci dystrybucyjnej nn jako odbiorca końcowy, a moc zainstalowana mikroinstalacji nie jest większa niż określona w warunkach przyłączenia. W tej sytuacji mikroinstalacja może zostać przyłączona do sieci dystrybucyjnej na podstawie zgłoszenia, bez jakichkolwiek dodatkowych uzgodnień pomiędzy prosumentem a OSD. Jedynym warunkiem, jaki musi być spełniony przez prosumenta, zanim taka instalacja mikrogeneracyjna zostanie przyłączona do sieci dystrybucyjnej, to oświadczenie osoby dokonującej instalacji, o zainstalowaniu mikroinstalacji zgodnie z przepisami i zasadami wiedzy technicznej oraz IRIESD. Takie uproszczenie procedury przyłączania mikroinstalacji prosumenckiej, wynikające z ustawodawstwa, ma na celu wspieranie rozwoju mikrogeneracji rozproszonej z OZE w sieciach nn. Dodając do tego programy wspierające finansowanie inwestycji w tym obszarze, zakładające krótki okres zwrotu poniesionych przez inwestorów nakładów, otrzymujemy mechanizm, który ma przynosić duży przyrost instalacji mikrogeneracyjnych w sieciach rozdzielczych nn. I tak się dzieje. O ile z końcem 2013 roku, na terenie obecnego oddziału gliwickiego TAURON Dystrybucja, było 6 mikroinstalacji, a w 2014 roku 86, to z końcem 2019 r. osiągnięto blisko 9 000. Obserwując tendencję, którą obrazuje poniższy rysunek, można założyć, że do końca 2020 roku ilość prosumentów w sieci rozdzielczej nn oddziału gliwickiego TD SA przekroczy 20 000. Podobny trend wzrostu instalacji prosumenckich obserwuje się w pozostałych oddziałach TAURON Dystrybucja.



*do 19 marca 2020 r. zainstalowano 10 643 mikroinstalacji o łącznej mocy 68,6 [MW] i 759 o łącznej mocy 9,1 [MW] jest w trakcie przyłączenia.

Rys. 4. Przyrost instalacji PV w sieci nn oddziału gliwickiego TAURON Dystrybucja od 2013 r.

3. Wpływ GR rozproszonej na warunki pracy sieci dystrybucyjnej SN i nn

Problematyka związana z współpracą źródeł GR z siecią dystrybucyjną jest zagadnieniem bardzo szerokim obejmującym różne obszary tematyczne będące przedmiotem wielu publikacji [6], [7], [8], [9], [10]. Wpływ GR na warunki pracy sieci dystrybucyjnej może obejmować zarówno kwestie eksploatacyjne i zarządzania majątkiem sieciowym, jak i kwestie związane z funkcjonowaniem systemów SCADA (ang.) i elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ) sieci dystrybucyjnej. Wybrane kluczowe zagadnienia przedstawiono w tabeli 2.

Kryterium	Zalety	Wady
Straty energii	Zmniejszenie strat dystrybucji – gdy generowana energia zużywana jest przez odbiorców zlokalizowanych blisko źródeł.	W przypadku dużej GR zlokalizowanej w oddali względem odbiorców straty mogą być wyższe niż dla klasycznego modelu generacji.
Koszty rozbudowy sieci	Obniżenie kosztów rozbudowy sieci – przy zrównoważonym rozwoju źródeł (proporcjonalnie do lokalnego zapotrzebowania). Redukcja istniejących ograniczeń sieciowych.	Wymagana nowe zaawansowane systemy automatyki elektroenergetycznej. Potrzeba rozbudowy sieci – przy zrównoważonego rozwoju źródeł. W pobliżu małych źródeł energii może rosnąć poziom mocy zwarciovych, co podnosi koszt aparatury sieciowej.
Regulacja napięć	Możliwość regulacji napięć w głębi sieci – przy zagwarantowaniu możliwości sterowania przez OSD generacją mocy biernej w źródłach GR.	Niesterowalne źródła GR, mogą pogarszać proces regulacji napięć w sieci. Prowadzenie procesu regulacji napięć z uwzględnieniem GR będzie komplikować systemy SCADA OSD i podnieść koszty automatyki elektroenergetycznej.
Pewność zasilania, jakość energii elektrycznej	Umieszczenie źródeł w pobliżu odbiorców może zwiększyć ich ciągłość zasilania, oraz prowadzić do wzrostu świadomości dotyczącej użytkowania energii elektrycznej w stanach awaryjnych pracy SEE. Przewiduje się również możliwość ograniczenia potencjalnych skutków dużych awarii systemowych.	Niewłaściwie funkcjonująca GR może obniżyć pewność zasilania w lokalnej sieci, oraz przyczyniać się do pogłębienia awarii systemowych. Rozwój GR w oparciu o urządzenia niskiej jakości może powodować pogorszenie parametrów jakościowych energii elektrycznej.
Działanie EAZ	Poprawa identyfikacji i lokalizacji występujących zakłóceń – po implementacji innowacyjnych obszarowych systemów EAZ, których wdrożenie będzie wymuszone rozwojem GR.	Rozwój GR spowoduje duże problemy w funkcjonowaniu istniejącej elektroenergetycznej autoamtyki zabezpieczeniowej sieci dystrybucyjnej. Rozwój GR rozproszonej będzie wymagać wdrożenia innowacyjnych obszarowych systemów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.
Kwestie eksploatacyjne	Rozwój GR poprawi obserwowalność sieci dystrybucyjnej.	Rozwój GR skomplikuje proces eksploatacji sieci dystrybucyjnej, m.in. z uwagi na możliwość pojawienia się napięcia od strony odbiorcy.

Usługi systemowe	W pojedynczych przypadkach zapotrzebowanie na usługi systemowe może zmaleć dzięki odciążeniu elementów systemu.	Po wprowadzeniu generacji rozproszonej zapotrzebowanie na usługi systemowe będzie znacząco wzrastać, szczególnie z uwagi na niestabilność wartości generowanej mocy czynnej.
Rola sieci dystrybucyjnej	Rola sieci dystrybucyjnej znacząco wzrośnie. Sieć ta zmieni swój charakter z sieci pasywnej na sieć aktywną. Sieć dystrybucyjna będzie istotnie wpływać na stabilności pracy SEE, oraz GR przyłączona do tej sieci będzie istotnym dostawcą usług systemowych.	Niezawodność pracy sieci dystrybucyjnej może istotnie wpływać na bezpieczeństwo pracy SEE.
Rozwój lokalnych rynków energii	Powstanie wielu niezależnych podmiotów GR umożliwi tworzenie i rozwój lokalnych rynków energii – co powinno obniżyć koszty energii dla odbiorcy końcowego.	Rozwój lokalnych rynków energii będzie komplikować prowadzenie ruchu sieciowego.
Oddziaływanie na środowisko	Korzyści wynikające z wykorzystania źródeł odnawialnych, skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła oraz wtórnego wykorzystania odpadów.	Wzrasta prawdopodobieństwo niewłaściwego zagospodarowania obiektu po zakończeniu eksploatacji.

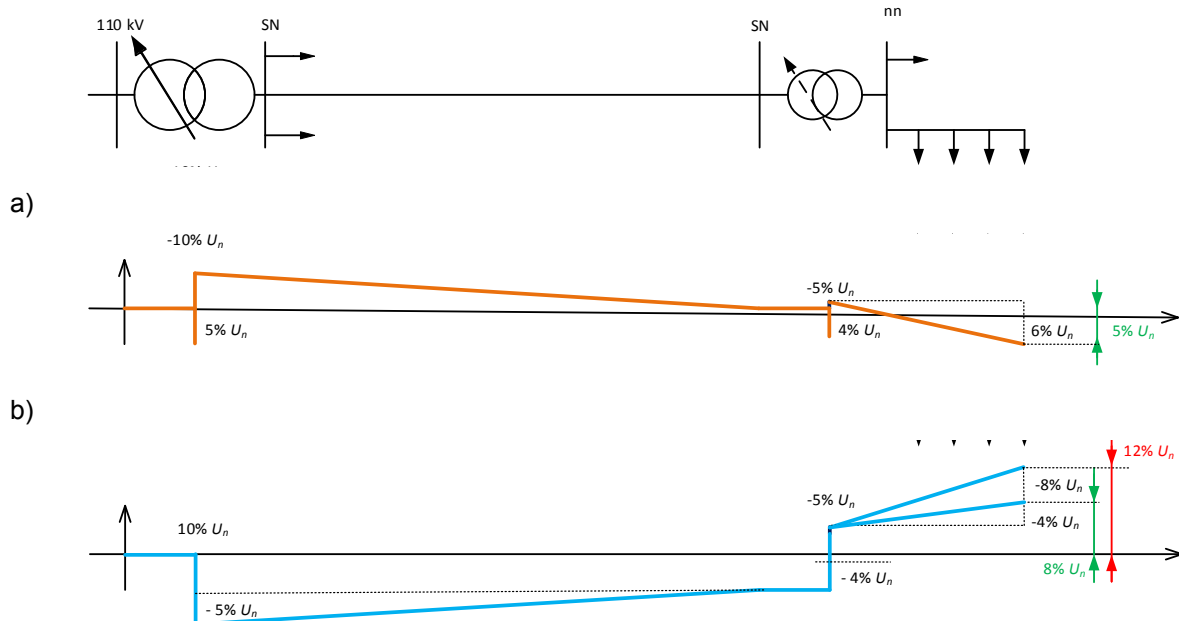
Tab. 2. Wpływ GR na sieć dystrybucyjną

Z przeprowadzonych analiz w tym zakresie wynika, że określenie wpływu rozwoju GR na warunki pracy sieci dystrybucyjnej SN i nn jest sprawą bardzo złożoną. W dużej mierze uzależnione jest to od poziomu mocy zainstalowanej w źródłach rozproszonych, poziomu ich rozproszenia, oraz przystosowania infrastruktury sieci dystrybucyjnych do obecności lokalnych źródeł energii.

Z uwagi na obszerność poruszanej tematyki, analizy przedstawione w niniejszym punkcie zostaną ograniczone do analizy dotyczących wpływu GR na kształtowanie poziomów napięć w sieci dystrybucyjnej.

Wpływu GR na kształtowanie się poziomów napięcia przedstawiono w sposób ideowy dla fragmentu sieci SN i nn, cechującej się bardzo dużą zmiennością nasycenia GR (praca źródeł, brak pracy źródeł). Zakładając różne możliwe warianty generacji i występującego obciążenia, zakres zmienności poziomów napięć w rozpatrywanym fragmencie sieci można zidentyfikować, dokonując analizy porównawczej poziomów napięć przedstawionych na rysunku 5. Przedstawiony na tym rysunku rozkład poziomów napięć uwzględnia spadki/straty napięcia występujące w fragmencie sieci począwszy od rozdzielni SN w GPZ do odbiorcy/wytwórcy przyłączonego na końcu ciągu liniowego sieci Nn w sytuacji:

- rysunek 5a: dużego obciążenia i małej generacji w analizowanej strukturze sieciowej;
- rysunek 5b: małego obciążenia i dużej generacji w analizowanej strukturze sieciowej.



Rys. 5. Ilustracja wpływu GR na kształtowanie się poziomów napięcia w sieci SN i nn:

- rozkład napięcia w sieci dla dużego obciążenia i małej generacji,
- rozkład napięcia w sieci dla małego obciążenia i dużej generacji w analizowanej strukturze sieciowej

W „klasycznych” sieciach dystrybucyjnych (tzn. takich, w których nie występuje istotny udział GR) w normalnym stanie pracy sieci maksymalne wartości spadków napięć (którym towarzyszą ujemne wartości odchylenia napięcia) należy się spodziewać na końcach odcinków sieci nn, zasilanych z najbardziej obciążonych stacji SN/nn położonych daleko od punktu zasilania sieci, najczęściej w pobliżu punktu rozdzielenia sieci. Natomiast minimalne wartości spadków napięć (którym towarzyszą dodatnie wartości odchylenia napięcia) występują w okresie minimalnego obciążenia sieci na początku obwodów nn, zasilanych ze stacji SN/nn położonych w pobliżu GPZ.

Niestety, w układach sieciowych cechujących się dużym lub nierównomiernym nasyceniem GR, prawidłowość ta nie będzie zachowana. W takim układzie sieciowym (utrzymując założenie przyjmowane przez OSD, że GR pracują z $\cos\varphi = 1$) spadki napięć występujące w sieci mogą przyjmować zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne. Efektem pojawienia się ujemnych spadków napięć będzie podniesione napięcie (w sposób niekontrolowany) w głębi sieci względem napięcia występującego w rozdzielni SN GPZ. Maksymalne dodatnie wartości spadków napięć (tzn. najniższe napięcia w sieci) mogą wystąpić w zupełnie nieoczekiwanych miejscach sieci, gdyż zarówno wartość, jak i znak spadku napięcia będą zależą od występującego w danej chwili rozptyłu mocy w układzie, który – z uwagi na dużą zmienność wartości mocy generowanej przez GR – może kształtować się praktycznie w dowolny sposób.

W przypadku wystąpienia ujemnych wartości spadków napięć (najwyższe napięcia w sieci) również mogą występować w nieoczekiwanych miejscach struktury sieciowej, gdyż – podobnie jak w poprzednim przypadku – spadki te będą zależą od aktualnego rozptyłu mocy w sieci. W takiej sytuacji maksymalnej wartości napięcia należy poszukiwać na ciągach liniowych, do których przyłączono GR generujące moc większą niż wartość mocy zapotrzebowanej przez odbiorców przyłączonych do danego ciągu liniowego.

Biorąc pod uwagę dużą zmienność wartości mocy generowanej przez GR, stwierdza się, że rozkład napięć w takiej sieci może kształtować się w dowolny sposób i trudno jest przewidzieć miejsca w sieci, w których te wartości będą najbardziej krytyczne.

W związku z tym w układach o dużym nasyceniu GR, w celu uniknięcia dopuszczalnych przekroczeń napięć, należy prowadzić podobciążeniową regulację napięć na transformatorze WN/SN (zainstalowanym w GPZ) z uwzględnieniem poziomów napięć występujących we wszystkich istotnych węzłach sieci do których przyłączono dużą generację lub odbiór. Jest to zupełnie odmienne podejście względem stosowanego obecnie, w którym zakłada się prowadzenie podobciążeniowej regulacji napięcia z bezpośrednim uwzględnieniem poziomów napięć jedynie na szynach SN w stacji GPZ.

4. Geneza i założenia wdrożenia systemu monitorowania pracy źródeł fotowoltaicznych przyłączonych do sieci nn zasilanej z stacji SN/nn

Pojedyncze mikroinstalacje nie stwarzają problemów natury równowagi napięciowej i mocowej obszaru, natomiast instalowane w dużej ilości na danym obszarze mogą powodować zjawiska niepożądane, w szczególności: występowanie przekroczeń dopuszczalnych napięć w sieci (nadprodukcja), obecność napięcia w sieci po wyłączeniu zasilania od strony dystrybutora, transformowanie napięcia generowanego przez źródła na stronę SN czy wzajemną pracę źródeł „na siebie” po zaniku sieci OSD. W większości źródła takie pracują bez możliwości awaryjnego wyłączenia ze strony OSD. Z drugiej strony OSD odpowiada za parametry energii dostarczanej odbiorcom (w tym prosumentom), ciągłość dostaw oraz bezpieczeństwo pracowników działających na sieci.

Zwiększająca się koncentracja źródeł fotowoltaicznych znacząco zmienia warunki napięciowe sieci dystrybucyjnej nn w miejscach dostarczania energii elektrycznej do odbiorców. Zmienne warunki napięciowe spowodowane zmianą obciążenia sieci lub wielkością generacji mocy czynnej wprowadzanej przez źródła fotowoltaiczne mogą wpływać na przekroczenie dopuszczalnych poziomów napięć w sieci.

Szybkie zmiany napięcia lub zbyt wysokie stanowią zagrożenie dla urządzeń przyłączonych do sieci dystrybucyjnej. Możliwość pojawienia się napięcia (od strony lokalnego źródła energii) w przypadku zaniku napięcia z sieci Operatora Systemu Dystrybucyjnego i brak zadziałania zabezpieczeń zaimplementowanych w falownikach tych źródeł generuje dodatkowe ryzyko związane z niebezpieczeństwem dla personelu przedsiębiorstwa dystrybucyjnego.

Niekontrolowana praca źródeł PV może spowodować również przekroczenie innych wskaźników jakości dostarczanej energii elektrycznej tj. wskaźnika krótko i długookresowego migotania światła, wskaźnika asymetrii napięcia lub wskaźnika zawartości harmonicznych w prądzie wprowadzonym przez źródło.

Zidentyfikowane zagrożenia dla pracy sieci nn które mogą pojawić się przy dużej koncentracji źródeł OZE, w szczególności instalacji fotowoltaicznych skłoniły autorów artykułu do wdrożenia systemu MiniLvs-OZE dedykowanego do monitorowania pracy tych źródeł.

Zastosowany system MiniLvs-OZE do monitorowania pracy źródeł fotowoltaicznych umożliwia obserwację całego obszaru sieci nn, do którego są przyłączone źródła oraz ich reakcję na stany zagrożeniowe związane z stabilnością napięciową.

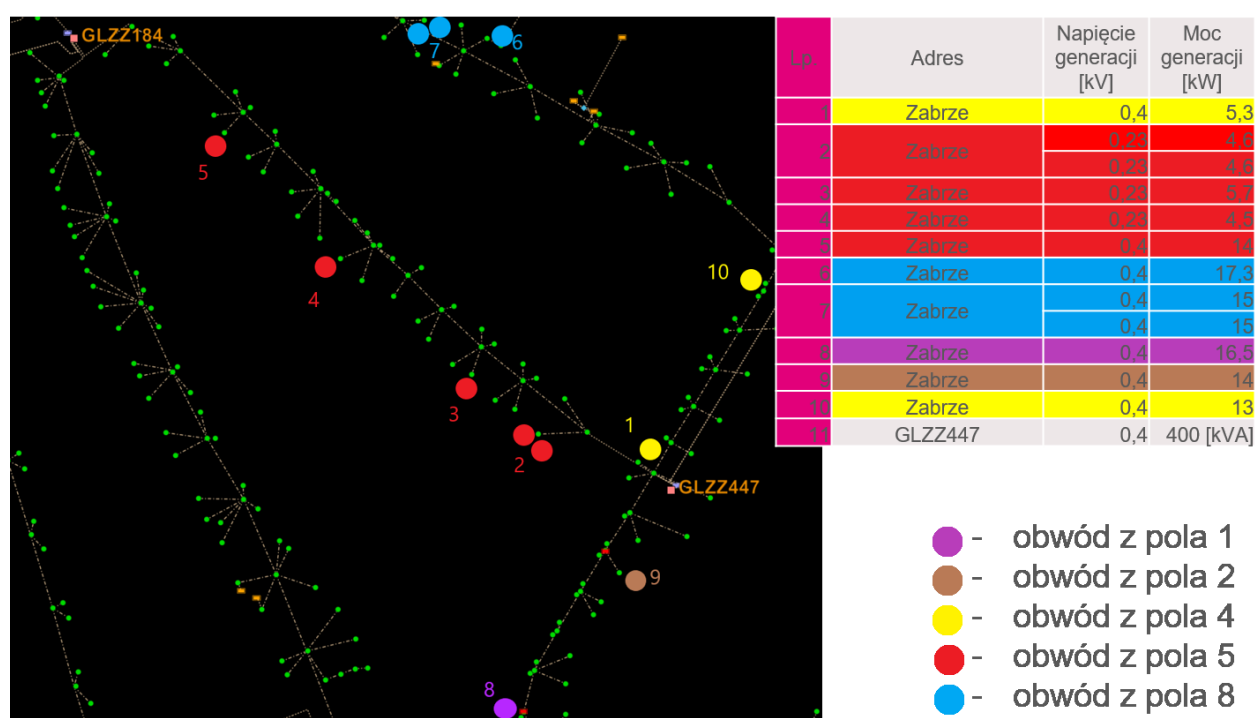
Obserwacja reakcji poszczególnych źródeł na pojawienie się zdefiniowanych zagrożeń w sieci nn oraz ocena poprawności zadziałania poszczególnych automatów zaimplementowanych w falownikach stanowi jeden z głównych celów projektu wdrożenia systemu MiniLvs-OZE.

Doświadczenia pozyskane z wdrożenia systemu MiniLvs-OZE będą wykorzystane do wypracowania rozwiązań technicznych które będą wspomagać Operatorów Systemów Dystrybucyjnych w procesie kierowania ruchem sieci nn w czasie rzeczywistym, w szczególności sieci o znaczącym nasyceniu źródeł fotowoltaicznych.

Ocena poprawności zadziałania automatów lokalnych zastosowanych w sterowniku monitorującym pracę źródła PV oraz analiza funkcjonowania układu zabezpieczeniowego falowników wskażą kierunek do opracowania koncepcji wdrożenia „obszarowej automatyki sieciowej”. Algorytm działania „obszarowej automatyki sieciowej” powinien zapewnić funkcje związane z regulacją napięcia dla zdefiniowanego obszaru sieci oraz automatycznym wyłączaniem źródeł fotowoltaicznych w sytuacjach zagrożeniowych.

4.1. Lokalizacja monitorowanych instalacji fotowoltaicznych

Dla celów projektu wytypowano 11 miejsc do zainstalowania zestawów monitorujących (10 z instalacjami fotowoltaicznymi i 1 w rozdzielni nn stacji SN/nn, zasilającej monitorowane obwody). W przypadku pojawienia się kolejnych instalacji fotowoltaicznych zostaną zainstalowane dodatkowe urządzenia w miejscach, z których są wyprowadzone przyłącza do prosumenta.



Rys. 6. Lokalizacja instalacji mikrogeneracyjnych przyłączonych do stacji GLZZ447

Urządzenia do monitorowania pracy źródeł zostały dostarczone i zamontowane przez firmę Alfa Power z Łodzi [14]. Firma Alfa Power opracowała również oprogramowanie MiniLvs-OZE do akwizycji wielkości pomiarowych oraz komunikacji z urządzeniami do monitorowania parametrów sieci. Na przyłączach do prosumentów zabudowano zestawy do monitorowania parametrów sieci wraz z modułami komunikacyjnymi. Zestawienie obserwowanych punktów przyłączenia prosumenta wraz z parametrami inwerterów pracujących w sieci prosumenta zawiera tabela 3. Obiekt W11 jest stacją zasilającą obszar wyposażoną w transformator SN/nn o mocy 400 kVA.

Obiekt	Napięcie generacji (kV)	Moc generacji (kW)	Rodzaj przyłącza
W1	0,4	5,3	napowietrzne
W2	0,23	4,6 + 4,6	napowietrzne
W3	0,23	5,7	napowietrzne
W4	0,23	4,8	napowietrzne
W5	0,4	14	napowietrzne
W6	0,4	17,3	napowietrzne
W7	0,4	15+15	napowietrzne
W8	0,4	16,5	napowietrzne
W9	0,4	14	napowietrzne
W10	0,4	13	napowietrzne
W11	---	---	Stacja

Tab. 3. Zestawienie obserwowanych punktów przyłączenia prosumentów

Na obiektach od W1 do W10 monitorowane są następujące parametry:

- wartości napięcia każdej fazy,
- wartości prądu każdej fazy,
- wartości i kierunki przepływu mocy czynnej w każdej fazie (pobór z sieci/oddawanie do sieci),
- wartości i charakter mocy bierniej w każdej fazie (pojemnościowy/indukcyjny).

Wartości pomiarów rejestrowane są co 60 s.

Na stacji zasilającej W11 (w polu zasilającym rozdzielni nn) monitorowane są takie same parametry pozostałych punktach W1 ÷ W10 (rejestrowane są co 60 s) i dodatkowo rejestrowane są alarmy przekroczenia lub obniżenia napięcia zgodnie z ustawionymi progami (tabela 4), a także wartości średnie (10 min) napięcia $U_{\text{średnie_10min}}$.

Parametr	Czas zadziałania	Wartość progu
U> 10min.	3s	253V
U>	0,2s	264V
U<	1,5s	195V

Tab. 4. Przyjęte wartości nastawień dla alarmów

5. Opis i charakterystyka systemu MiniLvs-s – studium przypadku

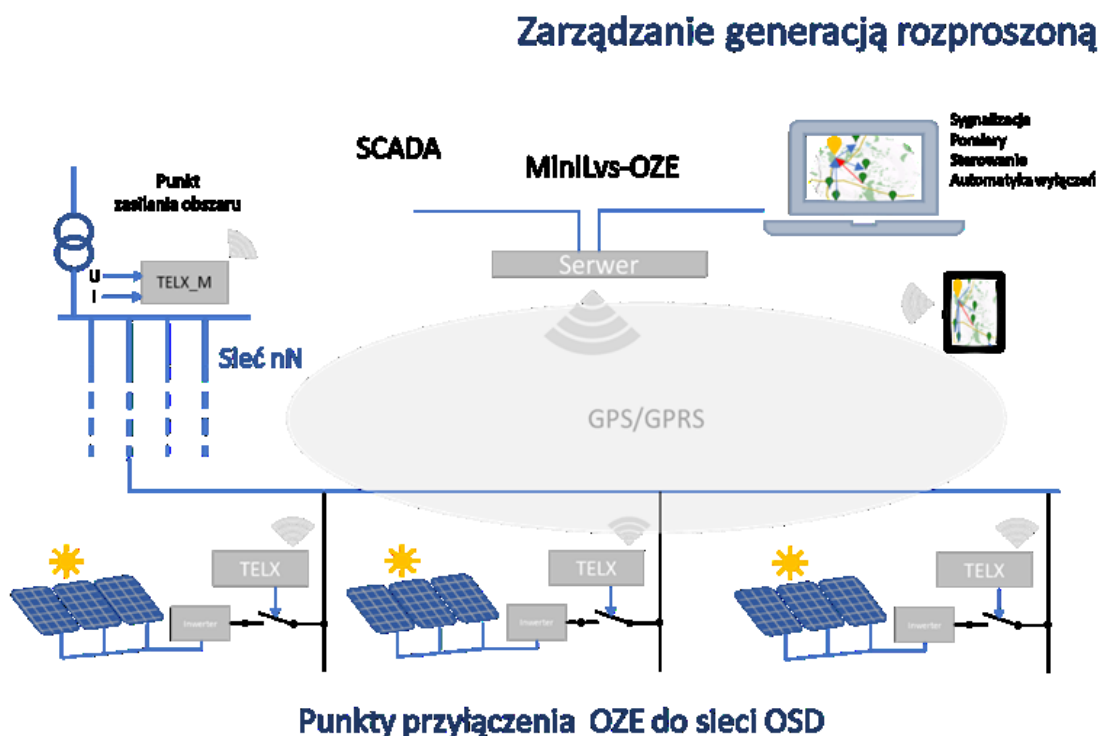
System MiniLvs-OZE zapewnia zdalny monitoring stanu źródeł zainstalowanych w kontrolowanym obszarze sieci, nadzór warunków napięciowych oraz bilansowanie obszaru. System umożliwia także oddziaływanie na stan sieci poprzez lokalne oraz zdalne odłączanie (lub zezwolenie na załączanie) dowolnego kontrolowanego źródła [15]. Dzięki tej funkcjonalności MiniLvs-OZE staje się narzędziem umożliwiającym sterowanie mocą generowaną w obszarze ręcznie lub poprzez zaimplementowane automatyki.

System MiniLvs-OZE obejmuje trzy obszary:

1. Warstwę nadzorowaną
 - miejsca przyłączenia OZE, w których umieszczone są: sterownik, pełniący funkcję telemechaniki i lokalnej automatyki zabezpieczeniowej oraz element wykonawczy (np. stycznik) dla sygnałów sterujących układem zabezpieczeniowym lub zdalnych poleceń systemu nadzoru;
 - stację zasilającą nadzorowany obszar w której umieszczony jest sterownik zapewniający monitoring parametrów sieci, w szczególności poziomu napięć, wartości częstotliwości oraz wartości i kierunku mocy.
2. Warstwę komunikacyjną (komunikacja zrealizowana jest w technologii GSM).
3. Warstwę nadzorującą

System nadzoru nad obszarem odpowiadający za odbiór, archiwizację, analizę i wizualizację danych, generację poleceń sterowniczych oraz za realizację automatyk obszarowych.

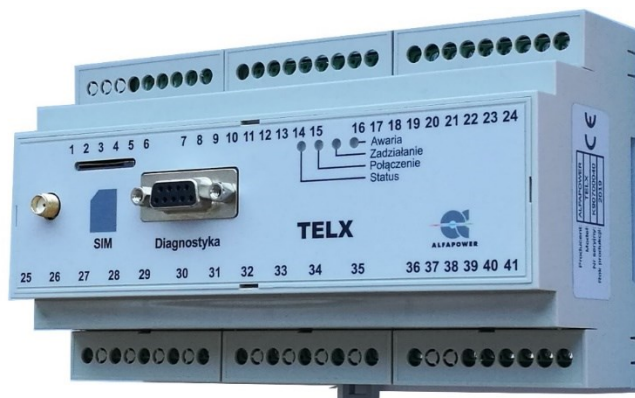
Za interakcję z dyspozytorem OSD odpowiada natomiast aplikacja uruchomiona na terminalu (komputer, tablet lub smartfon) z dostępem do Internetu. Pakiet informacji dedykowany dla prosumenta (np. o przyczynie ograniczenia generacji) może być udostępniany poprzez aplikację na smartfon (Android) lub poprzez SMS.



Rys. 7. Architektura systemu MiniLvs-OZE

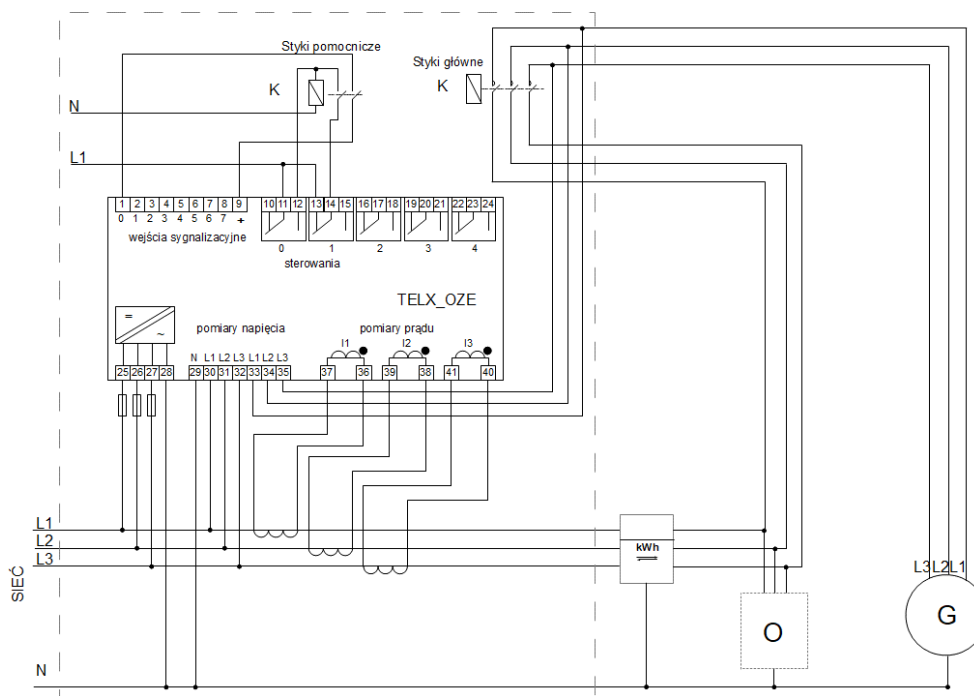
5.1. Wyposażenie miejsc przyłączenia OZE

Rolę sterownika spełnia dedykowane urządzenie TELX_OZE zapewniające realizację automatyk lokalnych (zabezpieczeń) oraz zdalny monitoring i sterowanie z poziomu OSD. Sterownik realizuje: pomiar trzech napięć fazowych, pomiar trzech prądów, wyliczanie mocy czynnej i biernej w każdej fazie, sumowanie mocy oraz dodatkowy pomiar kontrolny trzech napięć za łącznikiem (po stronie źródła). Urządzenie przesyła informację o zadziałaniu automatyk. Zapewnia także odczyt sygnalizacji (np. stanu łącznika, otwarcia drzwi) i wykonanie sterowań przełącznych np. do sterowania stycznikiem.



Rys. 8. Sterownik TELX – widok

Dzięki zastosowaniu sterownika w miejscu przyłączenia OZE do sieci możliwe jest (nadzorowane lub wykonywane przez OSD) odłączanie źródła w sytuacjach patologicznych (niezależnie od automatyk zaimplementowanych w inwerterze) oraz zezwolenie na wznowienie generacji w wybranym punkcie sieci wyłącznie przez OSD.



Rys. 9. Poglądowy schemat podłączenia sterownika TELX_OZE

Elementem wykonawczym w miejscu przyłączenia źródła do sieci jest stycznik trójfazowy z podtrzymaniem. Łącznik umożliwia podłączenie źródła do punktu wspólnego szyn prosumenta i sieci dystrybucyjnej w ten sposób, aby energia przepływająca z OZE do sieci była mierzona przez licznik, a zarazem odstawienie źródła nie pozbawiało zasilania prosumenta. Sterownik oddziałuje na łącznik na polecenie wysłane przez OSD (odstawienie źródła w przypadku prowadzonych prac na sieci), na polecenie automatów obszarowych (w przypadku nadprodukcji energii na danym obszarze), także na podstawie zadziałania zaimplementowanych w nim zabezpieczeń.

TELX_OZE pełni funkcję (niezależnych od inwertera) zabezpieczeń (zgodnie z normą PN-EN 50549-1:2019): nadnapięciowego $U_{\text{średnie}} 10\text{min}$, napięciowego $U >$ i $U <$, częstotliwościowego $f >$ i $f <$, ROCOF (df/dt) oraz Vector Shift.

Urządzenie posiada pozytywną opinię Instytutu Energetyki Warszawa w zakresie stosowania w układach zabezpieczeń krajowej sieci elektroenergetycznej zgodnie z przeznaczeniem.

Wszystkie funkcje zabezpieczeniowe mogą być indywidualnie blokowane w konfiguracji. Użytkownik ma możliwość lokalnej i zdalnej zmiany nastaw przez uprawniony personel OSD. Dodatkowo można ustawić czas automatycznego kasowania sygnalizacji zadziałania zabezpieczenia bez generowania zdarzenia.

Kolejną automatyką zaimplementowaną w sterowniku jest zabezpieczenie załączenia. Obejmuje ono kontrolę wartości napięcia i częstotliwości sieci przy otwartym styczniku. Parametry te muszą się mieścić w zadanych przedziałach przez zdefiniowany czas obserwacji. Dodatkowo kontrolowane jest napięcie po stronie mikrogeneratorsa. W przypadku, gdy obecne jest napięcie po stronie OZE następuje blokada przez sterownik wykonania zdalnego przyłączenia mikroinstalacji do sieci elektroenergetycznej.



Rys. 10. Miejsce przyłączenia OZE przykład miejsca montażu szafki

Zarówno sterownik TELX_OZE jak i cewka stycznika zasilane są napięciem sieci (do działania sterownika potrzebna jest obecność przynajmniej jednej fazy 230V). Styk główny stycznika jest stykiem normalnie otwartym.

W normalnym układzie pracy (zasilanie od strony sieci i generacja OZE) napięcie w kontrolowanym punkcie jest napięciem sieci - sterownik jest zasilany z sieci. W chwili zaniku napięcia od strony sieci napięcie w kontrolowanym punkcie jest napięciem generatora. Automatyka sterownika wykrywa fakt zaniku sieci i steruje łącznikiem na WYŁĄCZ odłączając OZE. W sytuacji całkowitego zaniku napięcia zasilania podtrzymanie pracy sterownika zapewnia zasobnik energii. Dzięki niemu, przy utracie zasilania, sterownik wysyła do systemu nadzoru informację o zaniku zasilania i wyłącza się.

Gdy wraca zasilanie z sieci sterownik „budzi się” i jest gotowy do wykonania sterowania stycznikiem na ZAŁĄCZ. Po załączeniu stycznika falownik OZE przechodzi procedurę synchronizacji z siecią i podejmuje generację.

Podobne działanie układu występuje w sytuacji innych patologii w sieci (np. przekroczenia progów). Odłączenie OZE następuje wskutek zadziałania zaimplementowanych w sterowniku zabezpieczeń.

5.2. Oprogramowanie do zdalnej kontroli i zarządzania obszarem

Rolę automatyki obszarowej oraz systemu miniscada do nadzoru obszaru z generacją pełni oprogramowanie MiniLvs_OZE, które zapewnia: identyfikację obiektu (w tym jego położenia w terenie), prowadzenie łączności ze sterownikami TELX oraz ich diagnostykę, odbiór i rejestrację informacji z obiektu w dedykowanej bazie danych (wraz z czasem powstania zdarzenia), generację poleceń sterowniczych, a także udostępnianie zagregowanej informacji systemom SCADA. Odpowiada także za warstwę prezentacyjną umożliwiając prezentację danych w czasie rzeczywistym zarówno dyspozytorom OSD jak i (wybranych informacji) prosumentom.

MiniLvs_OZE zajmuje się także analityką otrzymanych danych. W szczególności oprogramowanie umożliwia:

- kontrolę parametrów sieci, w szczególności kierunku przepływu mocy w miejscach przyłączenia źródeł i w stacji zasilającej obszar oraz alarmowanie o nieprawidłowościach,
- rejestrację zadziałania automatyk w miejscach przyłączenia,

- utrzymanie zadanego poziomu napięć oraz nieprzekraczania ustalonej wartości mocy generowanej na kontrolowanym obszarze poprzez odstawianie źródeł oraz ponowne zdalne załączenie (zamknięcie łącznika i automatyczne przejście procedury synchronizacji przez falownik OZE) w oparciu o definiowalne kryteria wyłączania źródeł.

The screenshot displays the MiniLvs-OZE (Gliwice) control interface. It features a top navigation bar with options like MAPA, STACJE, DZIENNIK OGÓLNY, and SYGNALIZACJE. Below this, there are several panels: a 'Sygnalizacja' panel with status indicators, a 'Lista sterowań' panel, and a 'Dziennik zdarzeń' panel. The main part of the interface is a large table displaying real-time data for various stations (W1 to W10 and GLZZ 447). The table columns include station codes, names, and various electrical parameters such as voltage (U1, U2, U3), current (I1, I2, I3), power (P1, P2, P3), and reactive power (Q1, Q2, Q3). The data is color-coded, with green indicating normal values and red indicating values outside the setpoint range.

Kod	Nazwa stacji	U1	U2	U3	I1	I2	I3	P1	P2	P3	Q1	Q2	Q3
W1		242.8	242.8	243.8	6.8	0.0	0.0	-1607.4	0.0	0.0	-288.9	0.0	0.0
W2		241.5	241.2	243.0	0.0	3.6	0.0	0.0	-863.1	0.0	0.0	49.4	0.0
W3		242.3	241.6	243.8	10.9	0.0	0.0	-2061.6	0.0	0.0	1639.8	0.0	0.0
W4		239.1	238.9	242.0	0.0	0.3	4.1	0.0	50.5	-993.8	0.0	25.5	-53.7
W5		239.4	243.2	239.1	0.1	7.6	0.0	0.0	-1841.8	0.0	0.0	0.0	0.0
W6		234.7	241.5	241.3	9.9	1.8	5.3	2318.9	402.9	-1253.2	-173.4	74.1	-192.3
W7		233.5	241.0	240.6	1.3	7.4	2.3	225.7	-1757.7	451.8	-94.6	-302.9	-321.1
W8		240.4	241.7	240.9	0.4	8.5	0.1	3.4	-2032.0	0.0	-82.5	111.1	0.0
W9		241.5	242.3	241.8	0.4	0.3	9.8	24.2	53.8	-1796.2	-92.9	-19.6	1529.3
W10		241.2	240.2	240.7	0.2	0.2	9.7	22.0	0.0	-2314.6	-44.1	0.0	-241.3
GLZZ 447		241.6	242.2	242.7	82.9	163.9	106.1	19221.8	39479.3	25245.5	1941.5	1143.3	-2137.4

Rys. 11. Oprogramowanie do zdalnej kontroli i zarządzania obszarem

5.3. Automatyka równowagi obszarowej

Celem działania automatyki, zaimplementowanej w MiniLvs_OZE, jest zapobieganie występowaniu przekroczeń dopuszczalnych napięć w sieci, wynikających ze znacznej różnicy między podażą a popytem (nadprodukcja). Automatyka dokonuje odstawienia poszczególnych źródeł wg. zadanego algorytmu do momentu wykrycia równowagi napięciowej. Następnie na podstawie kryterium bilansowania wyspy, po odwróceniu kierunku mocy, dokonuje załączeń odstawionych punktów generacji.

Sterowanie generacją poprzez wyłączenia poszczególnych źródeł w ten sposób, aby w czasie np. jednego miesiąca każdy prosument „stracił” jednakową ilość generowanej energii pozwoli uzyskać w prosty sposób sterowanie mocą na obszarze bez dopuszczania do pozbawiania zasilania obszaru, w tym samych prosumentów.

6. Pierwsze doświadczenia i wnioski z realizacji pilotażu uruchomionego w lutym 2020 r.

Przyłączenie do sieci źródeł rozproszonych powoduje znaczącą zmienność warunków pracy tej sieci.

Poziom występującej zmienności zależy od:

- ilości wypadkowej mocy przyłączonych źródeł względem mocy odbiorów,
- rozproszenia przestrzennego przyłączonych źródeł,
- oraz typów przyłączonych źródeł.

Znacznie większą zmiennością warunków pracy będą cechować się układy sieciowe z instalacjami fotowoltaicznymi i turbinami wiatrowymi niż układy sieciowe z źródłami kogeneracyjnymi. W układach cechujących się dużym nasyceniem GR systemy monitoringu pracy sieci mogą dostarczać cennych informacji o aktualnych warunkach pracy sieci oraz dzięki temu wspomóc pracę dyspozytora.

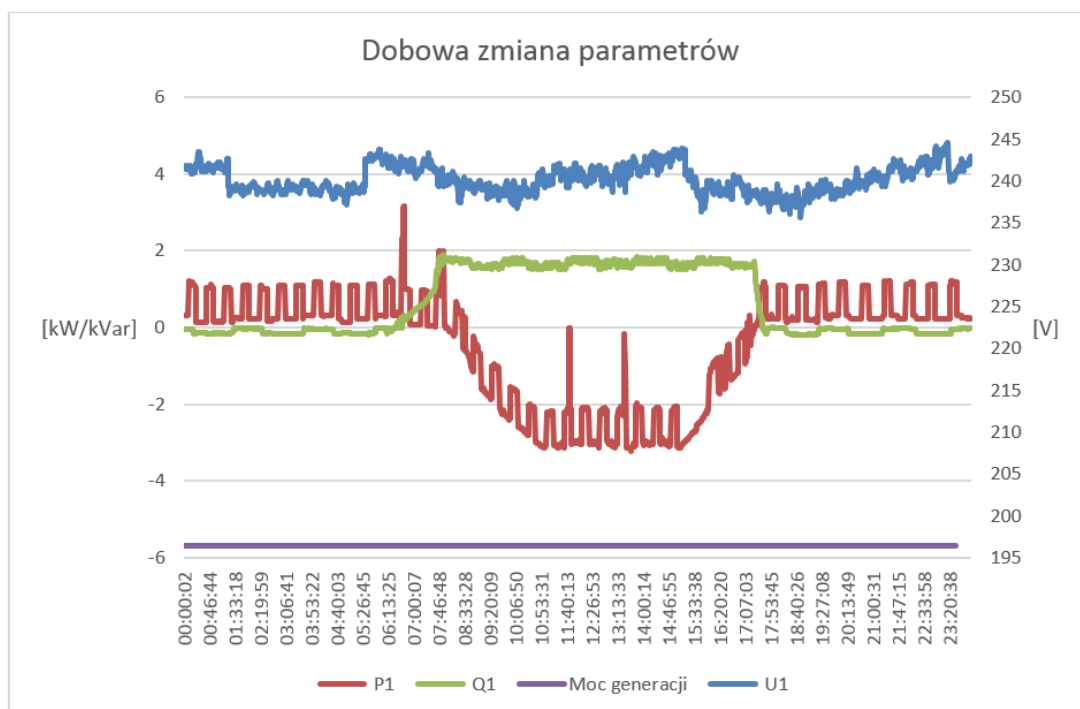
Z uzyskanych wstępnych doświadczeń wynikających bezpośrednio z realizacji projektu wynika, że:

- instalacje fotowoltaiczne mogą być źródłem mocy czynnej o bardzo dużej zmienności – warunkowanej dużymi zmianami warunków atmosferycznych (nasłonecznienia). Zatem w sieciach dystrybucyjnych cechujących się dużym nasyceniem PV wartość i nawet kierunek przepływającej mocy może zmieniać się kilkakrotnie/kilkunastokrotnie w ciągu doby. Przykładowy przebieg wartości pobieranej/generowanej mocy czynnej przez prosumenta przedstawiono na rysunku 12,



Rys. 12. Dobowa zmienność wartości pobieranej/generowanej mocy czynnej przez prosumenta W7 występująca w dniu 12.03.2020 (wartość dodatnia wskazuje na pobór mocy czynnej z sieci lub pobór mocy biernej indukcyjnej)

- Instalacje fotowoltaiczne mogą być nieintencjonalnym źródłem/odbiorcą mocy biernej; W przypadku niektórych instalacji fotowoltaicznej obserwuje się znaczący wzrost poboru mocy biernej indukcyjnej wraz ze wzrostem wartości generowanej mocy czynnej. Jest to niezgodne z obowiązującymi standardami, w których zakłada się, że źródła fotowoltaiczne powinny pracować ze współczynnikiem mocy równym jeden. Duży pobór mocy biernej przez źródła fotowoltaiczne może być powodowany niską jakością przekształtnika instalacji fotowoltaicznej, który nie będzie miał opcji dostrojenia pobieranej wartości mocy biernej do generowanej wartości mocy czynnej.



Rys. 13. Dobowa zmienność wartości pobieranej/generowanej mocy czynnej przez prosumenta W3 występująca w dniu 12.03.2020 (wartość dodatnia wskazuje na pobór mocy czynnej z sieci lub pobór mocy biernej indukcyjnej)

Duża zmienność generowanej mocy czynnej i biernej przez źródła fotowoltaiczne może negatywnie wpływać: na poziom napięcia występującego w całej sieci oraz na poziom napięcia występującego lokalnie. W przypadku równomiernego rozproszenia instalacji fotowoltaicznych zmienność napięć będzie występować w całej sieci. Natomiast w przypadku nierównomiernego rozmieszczenia instalacji fotowoltaicznych możliwe wystąpić duże różnicowanie poziomów napięć w sieci co będzie zjawiskiem bardzo niebezpiecznym. W takim przypadku może wystąpić sytuacja, w której chcąc dochować właściwych poziomów napięć w jednym obszarze sieci bardzo obciążonym będziemy przekraczać je w obszarze sieci cechującym się bardzo dużą generacją.

Zjawisko te stawia zupełnie nowe wymagania dla procesu regulacji napięcia prowadzonego w sieciach SN i nn (realizowanego obecnie głównie poprzez zmianę przekładni transformatorów WN/SN). Co więcej, w skrajnie niekorzystnej sytuacji zmienne uwarunkowanie sieci dystrybucyjnej z GR mogą prowadzić do przekroczeń dopuszczalnych poziomów napięć w sieci. Największe ryzyko niedotrzymania wymaganych warunków napięciowych po przyłączeniu GR wystąpi w sytuacji, gdy moc generowana przez GR będzie przewyższać moc zapotrzebowaną na danym ciągu liniowym (lub w danym obszarze sieci).

Dzięki zastosowaniu zaawansowanych systemów monitoringu sieci (np. MiniLvs-OZE) operatorzy sieci niskiego napięcia uzyskują nie tylko możliwość monitoringu stanu sieci niskiego napięcia oraz zdalnego odłączenia źródeł w sytuacjach awaryjnych, ale także narzędzie do automatycznej reakcji na przekroczenie dopuszczalnych parametrów sieci.

Dodatkowo zidentyfikowane ryzyka dotyczyły:

- ryzyko niekorzystnych interakcji między falownikami powodując pracę wyspową źródeł w przypadku zaniku napięcia z sieci dystrybucyjnej. W przypadku utrzymania się źródeł i zbilansowania z obciążeniem obszaru (obwodu nn) falowniki nie rozróżniają stanu zaniku napięcia z sieci dystrybucyjnej,
- wystąpienie dużej asymetrii generacji/obciążenia wynikającej m.in. z niesymetrycznego przyłączania instalacji fotowoltaicznej prosumenta,
- występowanie dużego prądu w przewodzie zerowym, w skutek stosowania jednofazowych instalacji fotowoltaicznych, co może grozić uszkodzeniem przewodu zerowego i ogromnymi zagrożeniami,
- brak unifikacji portów i protokołów komunikacyjnych i wymiany informacji w tym informacji sterowniczych z urządzeniami instalacji fotowoltaicznych praktycznie eliminuje możliwość sterowania tymi instalacjami w stanach awaryjnych/katastrofalnych,
- brak unifikacji algorytmów sterowania instalacji fotowoltaicznych poszczególnych producentów dodatkowo komplikuje możliwość kontrolowania tych instalacji.

Zakłada się, że wyniki trwającego projektu pilotażowego będzie można wykorzystać do opracowania koncepcji w zakresie prowadzenia ruchu sieci nn, cechującej się dużym nasyceniem generacji rozproszonej. Już pierwsze doświadczenia wskazują, że będzie to bardzo wymagające.

Literatura

- [1] Raport: The Ten-Year Network Development Plan 2018 – Analiza potrzeb systemu europejskiego. Dostęp w Internecie, <https://www.entsoe.eu/publications/tyndp/>
- [2] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Portal ENTSO-E. Dostęp w Internecie [20.03.2020]: <https://tyndp.entsoe.eu/>
- [3] Koncepcja funkcjonowania klastrów energii w Polsce, Opracowanie na zlecenie Skarbu Państwa – Ministra Energii, wykonało Konsorcjum w składzie Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A. i inni
- [4] Rzepka P., Sołtysik M., Szablicki M.: Modele funkcjonowania klastrów energii. Energetyka 2018 nr 2, s. 75-80
- [5] Raport: Projekt Wniosków z analizy prognostycznych – zał. 1 do PEP2040 (Polityka energetyczna Polski do 2040 r). Dostęp w Internecie [20.03.2020]: <https://www.gov.pl/>
- [6] Paska J.: Generacja rozproszona. Elektroenergetyka – Technika, Ekonomia, Organizacja, nr 4/2002, s. 7-16
- [7] Paska J., Sałek M., Surma T.: Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła. Przegląd elektrotechniczny, 12/2005, s. 3-13
- [8] Kacejko P.: Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. Lublin 2004

- [9] Klimpel A.: Niektóre problemy wpływu generacji rozproszonej i odnawialnej na pracę sieci. Seminarium KAE „Wpływ źródeł odnawialnych na pracę Krajowego Systemu Elektroenergetycznego”, Krokowa 27-29 maja 2009, ss.7-17
- [10] Koszul Z., Floryn J.: Przyłączanie do sieci dystrybucyjnej 110 kV i SN lokalnych źródeł wytwórczych w aspekcie wymagań stawianych elektroenergetycznej automatyce zabezpieczeniowej. XI Ogólnopolska Konferencja Komitetu Automatyki Elektroenergetycznej „Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce”, Wrocław 15-17 października 2008, ss. 117-123
- [11] Korniluk W, Dąbrowski G, Rola systemów nadzoru i sterowania w pracy dyspozytora rozdzielczych sieci elektroenergetycznych średnich napięć „Wiadomości Elektrotechniczne” 2014 R.82 nr 3 s. 3-11
- [12] Dołęga W, Standardy i protokoły komunikacyjne systemów sterowania i nadzoru w stacjach elektroenergetycznych, „Napędy i Sterowanie”, Rok XVII, nr 9, wrzesień 2015, s. 140–147
- [13] Dołęga W.,: Stacje elektroenergetyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007
- [14] Strona internetowa firmy Alfa Power Spółka z o.o: <http://alfapower.com.pl>
- [15] Kryteria przyłączania oraz wymagania techniczne dla mikroinstalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia TAURON Dystrybucja S.A. s. 18 pkt 6.; <https://www.auron-dystrybucja.pl/przylaczenie-do-sieci/dokumenty-do-pobrania>

