



Dylematy przyłączania odnawialnych źródeł energii do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia

Dilemmas of connecting renewable energy sources to the distribution grid

Streszczenie. Ostatnia dekada charakteryzuje się szczególnie intensywnym rozwojem niskoemisyjnych i odnawialnych źródeł energii (OZE). Przyłączanie nowego typu urządzeń do sieci dystrybucyjnej jakimi są OZE, wiąże za sobą potrzebę poznania skutków ich przyłączenia w kontekście ich wpływu na pracę istniejącej sieci. Dlatego też celem badania będzie uproszczone sprawdzenie, czy zostanie spełniony warunek wyłączenia napięcia przy zwarciu w linii nn odległym od generatora.

Abstract. The last decade is characterized by a particularly intensive development of low-emission and renewable energy sources (RES). Connecting a new type of devices to the distribution grid, such as renewable energy sources, involves the need to learn about the effects of their connection in the context of their impact on the operation of the existing grid. Therefore, the aim of the test will be a simplified check of whether the condition of switching off the voltage will be met in the event of a short circuit in the LV line distant from the generator.

Słowa kluczowe: mikrościeć, OZE, ochrona przy uszkodzeniu linii nn, ochrona przed przeciążeniem linii nn

Keywords: microgrid, renewable energy sources, protection against LV line failure, protection against LV line overload

Wstęp

Ostatnia dekada charakteryzuje się szczególnie intensywnym rozwojem niskoemisyjnych i odnawialnych technologii źródeł energii (OZE, Renewable Energy Sources - RES), takich jak: skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej (CHP) opalane gazem, instalacje PV, kolektory słoneczne, turbiny wiatrowe, ogniwa paliwowe, elektrownie wodne małych mocy, pompy ciepła i inne. Nie wszystkie z tych źródeł mają wpływ na sieć. Równocześnie wyraźnie dostrzegalny jest rozwój technologii magazynowania energii w postaci różnego typu zasobników jak np. bateryjnych (akumulatory), kinetycznych FES (Flywheel Energy Storage), nadprzewodnikowych, super kondensatorów, układów CAES (Compressed Air Energy Storage), i innych wykorzystujących różnego typu przekształtniki. Obecnie wiadomo, że w/w technologie mają wpływ na sieć dystrybucyjną, lecz do końca nie wiadomo – jaki, gdzie i w jakim natężeniu. Niniejsza publikacja ma na celu przybliżenie wybranych zagadnień.

Jednym z podstawowych obowiązków spółki będącej OSD jest koncesyjna odpowiedzialność na bezpieczną pracę sieci dystrybucyjnej będącej jego własnością. Operatorzy są obowiązani do dostarczania do granicy własności energii elektrycznej o odpowiednich parametrach. Przyłączanie nowego typu urządzeń do sieci dystrybucyjnej jakimi są OZE, wiąże za sobą potrzebę poznania skutków ich przyłączenia w kontekście ich wpływu na pracę istniejącej sieci. Pozwala to z jednej strony mitygować ryzyka związane z przyłączeniem tych urządzeń (np. OZE w skali masowej), a z drugiej wykorzystać nadarżające się okazje dla poprawy wskaźników parametrów jakościowych energii elektrycznej przy jednoczesnym zmniejszeniu wydatków na rozbudowę sieci.

Mikrościeci jako nowa forma organizacji odnawialnych źródeł energii

Mikrościeci można utworzyć poprzez integrację sterowalnych i niesterowalnych źródeł rozproszonych, sterowalnych i niesterowalnych odbiorów oraz systemów magazynowania energii występujących w pewnym ograniczonym terytorialnie obszarze geograficznym. Istotną kwestią związaną z rozwojem mikrościeci jest identyfikacja jej właściciela/operatora, co jest kluczowym elementem budowy nowego segmentu mikroenergetyki prosumenckiej [1] [2]. Wśród istotnych wyzwań stojących przed organizatorami

mikrościeci możemy wyróżnić takie kluczowe praktyczne aspekty jak [3]:

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

Dodatkowo, mikrościeci mogą być używane przed, podczas i po klęsce żywiołowej do dostarczania energii elektrycznej po uszkodzeniu podstawowego źródła zasilania [4], co oznacza, że w sytuacjach awaryjnych wydzielony obszar bilansowania będzie w stanie funkcjonować w trybie pracy wyspowej. Dodatkowym atutem inwestowania w mikrościeć jest możliwość jej długotrwałej współpracy z siecią dystrybucyjną ukierunkowana na zapewnienie niezawodnej i bezpiecznej pracy tej sieci w warunkach dużego udziału energii z odnawialnych i rozproszonych źródeł.

Różne definicje opisują mikrościeci [2] [5] [6] [7] jako pewne infrastruktury techniczne składające się z kombinacji różnego rodzaju urządzeń służących do produkcji energii (zasadniczo są to ogniwa fotowoltaiczne (PV), wiatr, ogniwa paliwowe, źródła wytwarzania bioenergii, skojarzone ciepło i energia (CHP), itp.) wykorzystujących co do zasady rozproszone zasoby energii, odbiorów sterowalnych i niesterowalnych, systemów magazynowania oraz systemów sterowania i nadzoru połączonych elektrycznie poprzez sieć elektroenergetyczną/instalację elektryczną do której są przyłączone i za pomocą której mogą równoważyć swoje zapotrzebowanie na energię elektryczną. W artykule [8] podjęto dyskusję nad procesową koncepcją funkcjonowania organizacji mikrościeci oraz jej wdrożeniem i zaproponowano zarządzanie tym nowym typem podmiotu rynku energii poprzez organizację procesową, opisując skrótowo procesy takiej organizacji. Mikrościecią będzie więc mikroinstalacja prosumencka, która powstała na bazie instalacji elektrycznej gospodarstwa domowego po jej rozbudowie o w/w elementy, a także obywatelska społeczność energetyczna opisana w artykule szesnastym Dyrektywy [9].

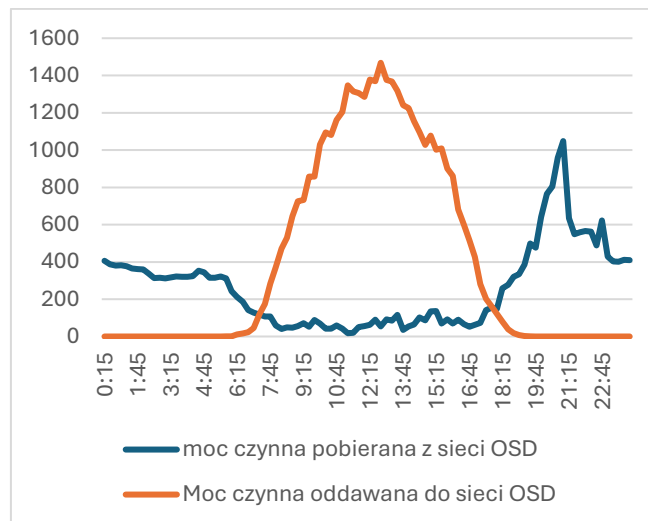
Nowe technologie a funkcjonowanie konwencjonalnej infrastruktury elektroenergetycznej

W efekcie rozwoju generacji rozproszonej dochodzi do: powstawania dużej liczby miejsc dostarczających energię, dwukierunkowych przepływów mocy wraz z problemem niestabilnego i nieprzewidywalnego charakteru produkcji energii ze źródeł odnawialnych. W konsekwencji występuje potrzeba instalowania urządzeń sterujących przepływami mocy w głębi sieci oraz stosowania nowych technologii i rozwiązań organizacyjnych. Instalowanie wymienionych wyżej urządzeń na coraz większą skalę sprzyja organizowaniu się ich właścicieli w wydzielone organizacyjnie byty i w dłuższym okresie będzie prowadziło do postępującej z jednej strony dywersyfikacji, a z drugiej decentralizacji systemu elektroenergetycznego. Powstaną nowe usługi na rynku energii związane z OZE, co z kolei będzie zwiększało wymagania dotyczące stabilności dostaw energii elektrycznej. Przykładowe profile mocy przedstawiono w [10]. Typowy profil produkcji energii elektrycznej w OZE charakteryzuje się dużą zmiennością w czasie, która zależy od lokalnych warunków atmosferycznych, a więc niezwykle trudno przewidzieć i zaplanować produkcję z takich źródeł. Obecnie trwają intensywne wysiłki na rzecz utworzenia systemów przewidujących pogodę wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji. Pozwoli to na bardziej przewidywalne planowanie produkcji energii elektrycznej.

W raporcie [11] przedstawiono obecne i projektowane przepływy mocy na stacji WN/SN usytuowanej na terenie podmiejskim w Szwecji. Warto zwrócić uwagę, że wartość przepływów ujemnych, czyli do sieci zasilającej, stanowi ok. 60–70% wszystkich przepływów, co jest potwierdzeniem dużej zmienności tej produkcji z OZE. Zjawisko to wymaga opracowania nowych sposobów szeroko rozumianego zarządzania siecią dystrybucyjną, która sobie z taką zmiennością poradzi [12] [13]. Z przedstawionych wyników badań wynika, że godzinowa zmiana popytu na energię elektryczną może być radykalnie zwiększana w zależności od różnych poziomów nasycenia zmiennymi OZE. Bez energii z OZE najwyższa zmiana popytu z godziny na godzinę wynosi ok. 9 GW, z kolei przy nasyceniu energią z OZE ponad 80% godzinowe zmiany w popycie wzrastają już do ponad 25 GW. Oznacza to wyższe wahania mocy przy wyższych poziomach zainstalowanych tego rodzaju źródeł. Jest oczywiste, że wymusza to zwiększenie wymagań w obszarze równoważenia systemu w stosunku do generacji ze źródeł konwencjonalnych [11]. Chociaż analiza opiera się na wzorcach popytu, nasłonecznieniu i prędkościach wiatru w Niemczech, eksperci twierdzą, że można zakładać, iż w naszym kraju, ze względu na podobną szerokość geograficzną i warunki klimatyczne, przy podobnych nasyceniach OZE, wystąpią podobne zjawiska. Jednak jest oczywiste, że nie będą takie same. Pomocne może być odpowiednie zarządzanie procesami m.in. ładowania i rozładowania baterii samochodowych (ogólnie – magazynowania energii elektrycznej), co może w przyszłości pozytywnie wpłynąć na zmianę kształtu krzywej obciążenia dobowego systemu elektroenergetycznego – co jest jednak bardzo wymagające pod względem technologicznym i ekonomicznym [8] [14].

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przepływ mocy czynnej oddawanej i pobieranej do/z sieci OSD do mikroinstalacji (mikrosieć gospodarstwa domowego). Widoczne są wzajemne zależności pomiędzy przepływami oraz odmienną przepływu mocy pobieranej z sieci OSD od typowego szczytowo-dolinowego przepływu mocy w systemie elektroenergetycznym. W przypadku mikrosieci na krzywą dobową obciążenia „nakładają się” dodatkowo wartości krzywej produkcji energii elektrycznej, w wyniku

czego, z punktu widzenia sieci zasilającej można mówić o pobieraniu lub oddawaniu mocy z- i do sieci OSD. W artykule [15] podsumowano istniejące badania dotyczące zużycia własnej energii z fotowoltaiki i możliwości jego ulepszenia. Uwzględniono dwie opcje zwiększonej konsumpcji własnej, a mianowicie magazynowanie energii i zarządzanie obciążeniem, zwane zarządzaniem stroną popytową (DSM), co wskazuje na pojawiające się i wciąż niewykorzystane do końca możliwości budowy modeli biznesowych opartych na OZE [16].



Rys. 1. Uśrednione dobowe przepływy mocy czynnej oddawanej i pobieranej do i z sieci OSD przez mikroinstalację

Powyższy przykład ilustruje potencjał techniczny i rynkowy związany z przyłączaniem mikroinstalacji do sieci OSD. Wyraźnie widać wpływ instalacji OZE na sieć w postaci generowania energii do sieci i zmniejszonego poboru mocy z tej sieci, co można wykorzystać np. do zarządzania jej rozwojem. Największa produkcja energii występuje podczas szczytu dziennego obciążenia (w praktyce likwidując go). Można to wykorzystać np. dla celów projektowania sieci, co wymaga jednak dokładnego zbadania obserwowanego zjawiska. Pewne projekty w tym zakresie już zrealizowano w USA [8]. Między innymi udowodniono, że przy pomocy nowych technologii organizowanych w mikrosieci można zredukować zapotrzebowanie szczytowe o 15%. Inteligentne użycie odnawialnych źródeł energii tworzy drivery, które napędzą nowe zastosowania i rynki odnawialnych źródeł energii, co następnie przyspieszy przejście na energię elektryczną dla zastosowań u użytkowników końcowych i przemysłowych, zapewniając większą elastyczność, a tym samym napędzając dalszy rozwój odnawialnych źródeł energii i innowacje technologiczne. Kolejnym driverem rozwoju rynku energii elektrycznej są inteligentne systemy elektroenergetyczne – Smart Grid, integrujące zmienne i rozproszone źródła energii oraz technologie towarzyszące [9] [10].

Sztuczne sieci neuronowe w analizie zwarciowej posiadają pewne unikalne cechy tych odróżniające ją od tradycyjnych metod: rozwiązanie problemu przez sieć neuronową nie wymaga znajomości modeli matematycznych diagnozowanych obiektów; adaptacyjność; czyli zdolność do uczenia się; zdolność do rozpoznawania i klasyfikacji obrazów oraz szybkość pracy [12]. Niestety w skali działalności dzisiejszych OSD i nie tylko (np. projektantów), opisane wyżej zastosowanie sieci neuronowych do obliczeń zwarciowych jest możliwe w bardzo ograniczonym zakresie.

Z powyższych szans może skorzystać OSD pod warunkiem przygotowania się do tego. Jednym z istotnych

zagadnień słabo opisanych w literaturze przedmiotu jest wpływ przyłączania OZE na pracę wybranych zabezpieczeń w obwodach niskiego napięcia sieci dystrybucyjnej w przypadku wystąpienia zwarc. Zgodnie z normą N/E-5002,01 zwarcie jest połączeniem przypadkowym lub celowym poprzez względnie małą rezystancję lub impedancję, pomiędzy dwoma lub więcej punktami obwodu, które w normalnych warunkach mają różne napięcia. Bardzo podobna definicja tego zjawiska została opisana w: [17]. Stosując kryteria opisane w tej publikacji możemy wyróżnić wiele rodzajów zwarc, a wśród nich zwarcia: pojedyncze i wielomiejscowe, trwałe i przemijające, doziemne i bez udziału ziemi i inne. Analiza zjawisk zwarciovych, czyli stanów nieustalonych, jest problemem trudnym i bardzo złożonym, dlatego też cały czas poszukuje się nowych narzędzi do tego celu. Istotnym dla niniejszego badania parametrem zwarciovym jest ustalony prąd zwarcia I_k dla przypadku zwarcia odległego od generatora w sieciach niskiego napięcia.

Badanie

Badanie będzie polegało na sprawdzeniu, czy dla określonych warunków pracy sieci dystrybucyjnej (bez przyłączonych OZE i przyłączonych OZE) zostanie spełniony warunek wyłączenia napięcia przy zwarcu w linii nn odległym od generatora, co sprowadza się do zadziałania zabezpieczeń w stacji transformatorowej i jest warunkiem koniecznym zadziałania zabezpieczeń podnapięciowych inwerterów i odłączenie ich od sieci.

Istnieje możliwość, że przy określonych warunkach, czyli po przyłączeniu OZE, które będą także źródłem prądu zwarcia, zabezpieczenia w stacji transformatorowej nie zadziałają i linia ze zwarcem będzie znajdowała się pod napięciem, co stwarza zagrożenia dla osób postronnych i samej linii. Będzie to oznaczało, że warunki pracy obwodu nN z przyłączonymi OZE różnią się od obwodu bez przyłączonych OZE. Nie będą badane aspekty obniżenia napięcia w obwodzie w wyniku zwarcia, czy spadek napięcia (założenie, że zwarcie nie spowoduje zadziałania zabezpieczeń w stacji) jest wystarczający do zadziałania w/w zabezpieczeń inwerterów. Ta tematyka będzie tematem przyszłych badań o charakterze symulacyjnym po potwierdzeniu założeń niniejszego badania.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia podstawowe, w niniejszej publikacji skupiono się na analizie pracy wybranych zabezpieczeń obwodu niskiego napięcia z użyciem prostych narzędzi, metod i aplikacji dostępnych dla każdego projektanta / inżyniera, jak katalogów wkładek bezpiecznikowych, katalogów budowy sieci, powszechnie znanych zasad projektowania sieci oraz wymagań w zakresie ochrony przeciwporażeniowej opisanych w N SEP. Badanie naukowe będzie polegało na analizie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej i ochrony przed przeciążeniem dla dwóch głównych wariantów:

1. Modelu sieci „klasycznego”, w którym elementami podlegającymi analizie są typowe elementy sieci dystrybucyjnej 15/0,4kV wraz z typowymi odbiorami gospodarstwa domowego usytuowanymi w terenie wiejskim w wariantach 1 szt. i 3 szt., z czego 3 odbiory występują w dwóch wariantach przyłączenia – skupionym i rozproszonym.
2. Modelu sieci (ta sama instalacja nn jak w p. 1) uwzględniającego infrastrukturę mikrosieci gospodarstwa domowego składającą się z typowych odbiorów (jak w p. 1) i elektrowni PV w wariantach: dla 1 odbioru jedna elektrownia PV razem tworzące mikrosieć gospodarstwa domowego oraz dla 3 odbiorów przyłączone do nich elektrownie PV jak wyżej tworzące mikrosieć 3 gospodarstw domowych

zasilanych z jednego obwodu linii nn i przyłączonych, jak wyżej, w dwóch podwariantach przyłączenia – skupionym i rozproszonym.

Zakłada się, że:

- układ sieciowy jest typowy dla sieci terenowej – TNC-S.
- falowniki w systemach on-grid zgodnie z IRIESD wszystkich OSD w kraju są ustawione na wyłączenie w przypadku zaniku napięcia w sieci zasilającej – nie mogą tworzyć wyspy.
- zasadniczym źródłem prądu zwarcia jest system zasilający,
- podczas zwarcia elektrownia PV wygeneruje prąd zwarciovym proporcjonalny do swojej mocy znamionowej i jednocześnie mocy przyłączeniowej obiektu.
- Do niniejszych badań zakłada się jeden rodzaj zwarcia – zwarcie trójfazowe bez ziemi.

Wymagania stawiane środkom ochrony przy dotyku pośrednim

Zabezpieczeniami w obwodach niskiego napięcia sieci dystrybucyjnej są co do zasady wkładki bezpiecznikowe z najczęściej używaną charakterystyką gG, co ma swoje konsekwencje w kontekście ochrony przy dotyku pośrednim, co do której wymagania opisano w normie N SEP-E-001 [18]. Zgodnie z [18] ochronę przy dotyku pośrednim należy w liniach napowietrznych niskiego napięcia realizować poprzez samoczynne wyłączenia zasilania. Ochrona przy dotyku pośrednim w liniach pracujących w układzie TN, a z takimi liniami mamy do czynienia w przypadku sieci terenowych, powinna być tak wykonana, aby spełniony był warunek:

$$(1) \quad Z_s \leq U_0 / I_a$$

gdzie: Z_s – impedancja pętli zwarciovowej obejmująca źródło zasilania zwarcia, przewód czynny od źródła do miejsca zwarcia i przewód ochronny między punktem zwarcia, a źródłem, w $[\Omega]$, I_a – prąd wyłączający (w $[A]$), powodujący przy zwarciach pomiędzy częściami czynnymi linii i jej przewodami PEN (PE) lub częściami przewodzącymi mającymi połączenie z tymi ostatnimi przewodami, zadziałanie zabezpieczeń w czasie 5 [s] (punkt 10.2 Normy SEP), U_0 – wartość skuteczna napięcia znamionowego linii względem ziemi, w $[V]$.

W przypadku ochrony przed przeciążeniami trzeba spełnić dwa warunki:

$$(2) \quad I_2 \leq I_{45} I_z$$

$$(3) \quad I_B \leq I_n \leq I_z$$

gdzie: I_B – obliczeniowy prąd szczytowy obwodu w $[A]$, I_n – prąd znamionowy lub prąd nastawienia urządzenia zabezpieczającego w $[A]$, I_z – obciążalność prądowa długotrwała przewodu w $[A]$, I_2 – najmniejszy prąd zapewniający skuteczne zadziałanie urządzenia zabezpieczającego nadprądowego w $[A]$.

Ponieważ z obwodu nN zasilane mogą być budynki budowane w różnych latach, co może oznaczać, że nie posiadają połączeń wyrównawczych w rozumieniu Normy PN-IEC 60364, odstępuje się od przesłanki opisanej w Normie SEP (p. 10.3) dotyczącej możliwości wydłużenia czasu zadziałania wkładki bezpiecznikowej powyżej 5s. W kontekście pracy zabezpieczeń interesujące są wyniki badań [19] [20], których m.in. wykazano, że zwarcie za falownikiem o mocy 30kVA wyłączył wyłącznik nadprądowy o charakterystyce B i prądzie znamionowym 25A, co pozwala

uzyskać 100A prądu zwarciovego (po przełączeniu na tryb pracy bypass elektroniczny). To istotne zachowania z punktu widzenia oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej przez samoczynne wyłączenie zasilania mające wpływ na pracę obwodu nN podczas zwarc. Ponadto, prąd modułów PV po stronie DC może osiągnąć wartość 1,25 prądu I_{sc} w warunkach STC [21]. Prądy zwarciovie w punkcie przyłączenia (strona AC) zależą od rodzaju jednostek generacji. Dla oszacowania prądu zwarciovego płynącego od danego typu jednostki generacji (dla falownika) przyjmuje się wartość jego prądu znamionowego [22]. Tak więc wartość prądu znamionowego falownika, która jest dostosowana do mocy elektrowni PV będzie brana pod uwagę przy obliczeniach prądów zwarcia płynących w obwodzie nN i założeń badawczych opisanych wyżej. Ponieważ moc elektrowni PV nie może przekroczyć mocy przyłączeniowej obiektu (gospodarstwa domowego), w praktyce prąd wynikający z mocy przyłączeniowej wydaje się właściwy do uwzględnienia przy obliczeniach prądów zwarciovych w badaniu.

Do projektowania obwodów linii niskich napięć oraz doboru transformatorów SN/0,4kV cały czas używa się współczynników jednoczesności - odpowiednio 0,2 (lato) – 0,3 (zima), co pozwalało i pozwala oszczędzić na materiale użytym do budowy linii nN oraz stacji i ma wpływ na dobór wkładek bezpiecznikowych zabezpieczających te linie. Ze względu na fakt, że obecnie wyposażenie domu jednorodzinnego na wsi w zasadzie niczym się nie różni od wyposażenia mieszkania w mieście, nie ma przeszkód dla używania do obliczeń obciążalności obwodów nN współczynników jednoczesności opisanych w Normie SEP-E-002 [23].

W przypadku przyłączenia OZE do sieci OSD zasadą jest, że moc elektrowni PV nie może przekroczyć wartości mocy przyłączeniowej gospodarstwa domowego. Nie ma tutaj mowy o współczynnikach jednoczesności. Zachodzi więc obawa, że istniejące obwody linii nN, zaprojektowane wcześniej, z których zasilają się dużo budynków i w których zainstalowano elektrownie PV, mogą z tego powodu być przeciążane, co stanowi dodatkowe zagrożenie użytkowania tych obwodów. W skrajnym, ale możliwym przypadku, zagrożone są transformatory SN/0,4kV ze względu na możliwe duże przepływy w kierunku linii zasilających SN wynikające z niejednoczesnej produkcji i zużycia energii elektrycznej.

Na rysunku 2 przedstawiono typowy, uproszczony, trójfazowy obwód nN do którego przyłączono instalację odbiorczą, który będzie podstawą do badań. Na tym rysunku zobrazowano propozycje usytuowania miejsc zwarc. W skali działalności OSD (np. jeden OSD może posiadać do 100000

stacji SN/nN), przedstawiony na rys. 2 układ sieci można z powodzeniem uznać za realny.

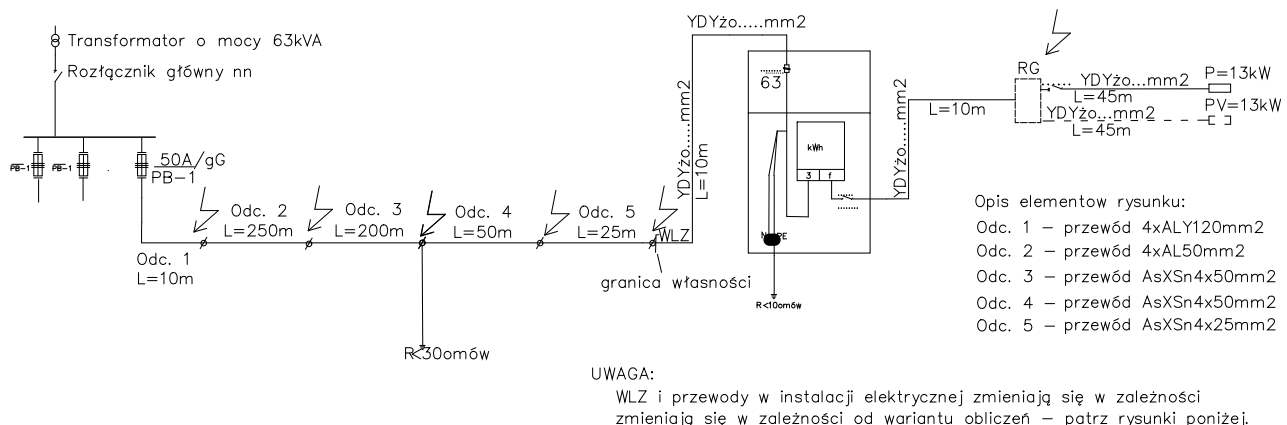
Proponowany do badań obwód zasilany jest z pola nN stacji, w której zabezpieczony w stacji transformatorowej wkładkami bezpiecznikowymi mocy o prądzie znamionowym 50A i charakterystyce gG usytuowanymi w podstawach bezpiecznikowych o prądzie znamionowym 250A (PB-1), co jest typowym przypadkiem występującym w obwodach zasilanych ze stacji terenowych (poza miastami). Wyprowadzenie obwodu w kierunku linii nn jest realizowane za pomocą przewodu 3xALY120mm² o długości 10m. Linia napowietrzna składa się z kilku odcinków wykonanych przewodami gołymi typu AL i AsXSn oraz z przyłącza do budynku wykonanego przewodem typu AsXSn:

- linia - 4xAL50mm² o długości 250m,
- linia - AsXSn 4x50mm² o długości 200m,
- linia - AsXSn 4x50mm² o długości 50m,
- przyłączy - AsXSn4x25mm² o długości 15m.

Z linii napowietrznej zasilana jest instalacja:

- w wariantcie pierwszym badania instalacja elektryczna budynku jest zasilana poprzez WLZ do tablicy licznikowej, w której usytuowano zabezpieczenia instalacji elektrycznej - bezpieczniki topikowe instalacyjne o prądzie znamionowym 35A i charakterystyce gG oraz ogranicznik poboru mocy realizowany za pomocą wyłącznika ograniczającego pobieraną moc o odpowiednim prądzie znamionowym i charakterystyce. W tablicy licznikowej dokonano rozdziału przewodu PEN na PE i N. Z licznika energii elektrycznej wychodzi zasilanie do rozdzielni głównej budynku RG. Z rozdzielni głównej zasilany jest jeden odbiór. Parametry techniczne obwodów i zabezpieczeń ulokowano na schematach.
- w wariantcie 2 zastosowano 3 odbiory skupione na końcu obwodu o parametrach z wariantu 1,
- w wariantcie 3 występuje 3 odbiory przyłączone w sposób rozproszony o parametrach z wariantu 1.

Zgodnie z planem badania, w pierwszym etapie badane będą przypadki bez OZE, w drugim etapie, do instalacji elektrycznej budynku zostaną „przyłączone” elektrownie PV. W badaniu przewidziano zwarcia w miejscach sieci, w których następuje zmiana rodzaju przewodu oraz w tablicy głównej budynku, co zobrazowano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat do badań

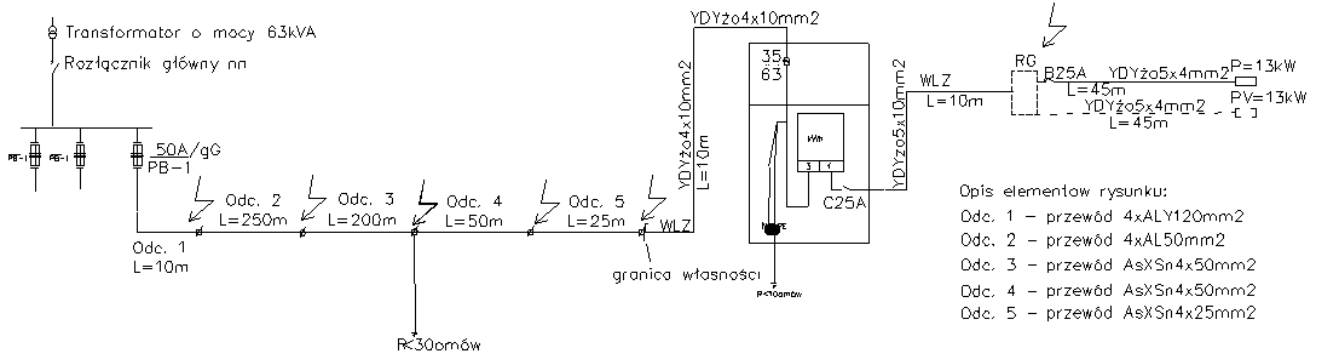
Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono odpowiednio:

- schemat do analizy badanego obwodu i zasilanej z niego pojedynczej instalacji elektrycznej,
- schemat do analizy badanego obwodu i zasilanych z niego 3 instalacji elektrycznych przyłączonych na końcu obwodu,

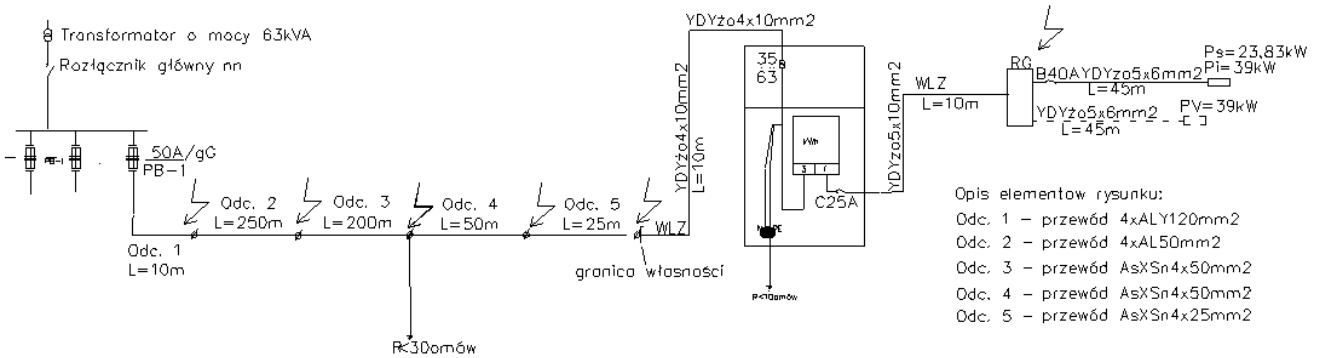
- schemat do analizy badanego obwodu i zasilanych z niego 3 instalacji elektrycznych przyłączonych w sposób rozproszony do obwodu.

Wyniki obliczeń

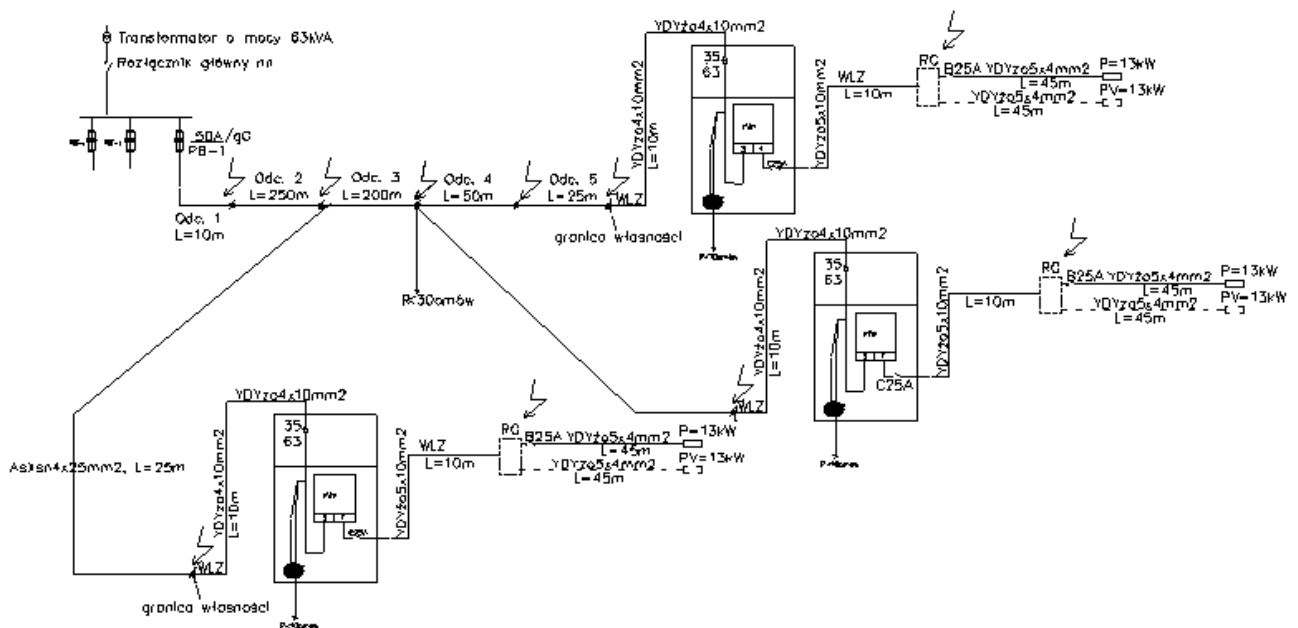
Obliczeń dla poszczególnych wariantów dokonano z pomocą aplikacji OBL X, która realizuje je zgodnie z aktualnymi przepisami i normami i jest powszechnie dostępna i stosowana przez projektantów.



Rys. 3. Schemat do badań skuteczności ochrony przeciwporażeniowej i ochrony przed skutkami przeciążeń dla jednego odbioru



Rys. 4. Schemat do badań skuteczności ochrony przeciwporażeniowej i i ochrony przed skutkami przeciążeń dla 3 odbiorów przyłączonych na końcu obwodu



Rys. 5. Schemat do badań skuteczności ochrony przeciwporażeniowej i ochrony przed skutkami przeciążeń dla 3 odbiorów rozproszonych

Tabela 1 przedstawia wyniki obliczeń skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz przed skutkami przeciążeń dla jednego odbioru dla typowego przypadku przyłączonej instalacji elektrycznej nn do sieci OSD oraz pokazuje wpływ OZE na przepływy w obwodzie nn przyłączonej elektrowni PV o mocy nie przekraczającej mocy przyłączeniowej obiektu.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz przed skutkami przeciążeń dla przypadku 3 przyłączonych instalacji elektrycznych nn do sieci OSD oraz pokazuje wpływ na przepływy w obwodzie nn przyłączonych elektrowni PV o

mocach nie przekraczających mocy przyłączeniowej obiektu, co może być odpowiednikiem obwodu typu kolonijnego.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz przed skutkami przeciążeń dla przypadku 3 przyłączonych instalacji elektrycznej nn do sieci OSD w sposób rozproszony oraz pokazuje wpływ OZE na przepływy w obwodzie nn przyłączonych elektrowni PV o mocach nie przekraczających mocy przyłączeniowej obiektu, co może być odpowiednikiem obwodu zasilającego bardzo rozproszone odbiory na terenie małych wsi.

Tabela 1. Tabela obliczeń skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz ochrony przed skutkami przeciążeń dla jednego odbioru

Ochrona przeciwporażeniowa oraz ochrona przed skutkami przeciążeń dla obwodu bez OZE											
Lp	Element	Opis	L [m]	Zabezpieczenie	Opis zabezp.	Czas zadziałania [s]	Z _s ** [Ω]	I _a [A]	U [V]	Z _s * I _a ≤ U [V]	tolerancja
1	Wyprowadzenie obwodu	AsXSn 120	10	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,146	254	230	37,13 - TAK	+/- 1,49
2	Linia nn	Al 50	250	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,528	254	230	135,55 - TAK	+/- 5,36
3	Linia nn	AsXSn 50	200	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,817	254	230	207,51 - TAK	+/- 8,30
4	Linia nn	AsXSn 50	50	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,893	254	230	226,81 - TAK*	+/- 9,07
5	Przyłącze nN	AsXSn 25	15	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,935	254	230	237,46 - TAK*	+/- 9,50
6	WLZ	YDY2o4/5x10	10	B1:5_1	D02 gG 25 A	5 s	0,979	93,2	230	91,31 - TAK	+/- 3,65
7	Obwód w domu	YKY5x 4	45	B1:6_1	P314 B A DX 25 A	0,4 s	1,465	124,7	230	182,65 - TAK	+/- 7,31

(*) weryfikacja uwzględnia tolerancję odczytu pasm zadziałania ±4%

(**) W obliczeniach uwzględniono wartość impedancji powiększoną o 5%.

Ochrona przeciwporażeniowa oraz ochrona przed skutkami przeciążeń dla obwodu bez OZE									z OZE				
Lp	I _{zw} [A]	I _B [A]	I _n [A]	I _z [A]	I ₂ [A]	1.45 * I _z [A]	I _B ≤ I _n ≤ I _z	I ₂ ≤ 1.45 * I _z	I _{zw} [A]	P _{nOZE} [kW]	I _{nOZE} [A]	I _{zWOZE} [A]	UWAGA
1	1 573,44	20,2	50,0	220,0	71,0	429,2	TAK	TAK	1533,44	13,0	20,2	1513,2	I _{zWOZE} > I _a
2	436,0	20,2	50,0	220,0	71,0	319,0	TAK	TAK	436,0	13,0	20,2	415,7	I _{zWOZE} > I _a
3	281,5	20,2	50,0	168,0	71,0	243,6	TAK	TAK	281,5	13,0	20,2	261,3	I _{zWOZE} > I _a
4	257,6	20,2	50,0	168,0	71,0	243,6	TAK	TAK	257,6	13,0	20,2	237,4	I _{zWOZE} < I _a
5	246,0	20,2	50,0	112,0	71,0	162,4	TAK	TAK	246,0	13,0	20,2	225,8	I _{zWOZE} < I _a
6	234,8	20,2	25,0	100,0	40,9	145,0	TAK	TAK	234,8	13,0	20,2	214,6	I _{zWOZE} > I _a
7	157,0	20,2	25,0	34,0	36,1	49,3	TAK	TAK	157,0	13,0	20,2	177,2	I _{zWOZE} > I _a

Tabela 2. Tabela obliczeń skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz ochrony przed skutkami przeciążeń dla 3 odbiorów skupionych

Ochrona przeciwporażeniowa oraz ochrona przed skutkami przeciążeń dla obwodu bez OZE											
Lp	Element	Opis	L [m]	Zabezpieczenie	Opis zabezp.	Czas zadziałania [s]	Z _s ** [Ω]	I _a [A]	U [V]	Z _s * I _a ≤ U [V]	tolerancja
1	Wyprowadzenie obwodu	AsXSn 120	10	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,146	254,0	230	37,13 - TAK	+/- 1,49
2	Linia nn	Al 50	250	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,534	254,0	230	135,55 - TAK	+/- 5,42
3	Linia nn	AsXSn 50	200	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,823	254,0	230	209,16 - TAK	+/- 8,37
4	Linia nn	AsXSn 50	50	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,900	254,0	230	228,48 - TAK*	+/- 9,14
5	Przyłącze nN	AsXSn 25	15	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,941	254,0	230	239,13 - TAK*	+/- 9,57
6	WLZ	YDY2o4/5x10	10	B1:6_1	D III gF 50 A	5 s	0,986	146,6	230	144,51 - TAK	+/- 5,78
7	Obwód w domu	YKY5x6	45	B1:7_1	S304 B 40 A	0,4 s	1,309	182,0	230	238,26 - TAK*	+/- 9,53

(*) weryfikacja uwzględnia tolerancję odczytu pasm zadziałania ±4%

(**) W obliczeniach uwzględniono wartość impedancji powiększoną o 25%.

Ochrona przeciwporażeniowa oraz ochrona przed skutkami przeciążeń dla obwodu bez OZE									z OZE				
Lp	I _{zw} [A]	I _B [A]	I _n [A]	I _z [A]	I ₂ [A]	1.45 * I _z [A]	I _B ≤ I _n ≤ I _z	I ₂ ≤ 1.45 * I _z	I _{zw} [A]	P _{nOZE} [kW]	I _{nOZE} [A]	I _{zWOZE} [A]	UWAGA
1	1 573,44	37,0	50,00	296,0	71,00	429,2	TAK	TAK	1538,44	39,0	60,6	1477,8	I _{zWOZE} > I _a
2	430,98	37,0	50,00	220,0	71,00	319,0	TAK	TAK	430,98	39,0	60,6	370,4	I _{zWOZE} > I _a
3	279,30	37,0	50,00	168,0	71,00	243,6	TAK	TAK	279,30	39,0	60,6	218,7	I _{zWOZE} < I _a
4	255,69	37,0	50,00	168,0	71,00	243,6	TAK	TAK	255,69	39,0	60,6	195,1	I _{zWOZE} < I _a
5	244,31	37,0	50,00	112,0	71,00	162,4	TAK	TAK	244,31	39,0	60,6	183,7	I _{zWOZE} < I _a
6	233,26	37,0	50,00	100,0	71,02	145,0	TAK	TAK	233,26	39,0	60,6	172,7	I _{zWOZE} > I _a
7	175,69	37,0	40,00	43,0	59,00	62,3	TAK	TAK	175,69	39,0	60,6	236,3	I _{zWOZE} > I _a

Tabela 3. Tabela obliczeń skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz ochrony przed skutkami przeciążeń dla 3 odbiorów rozproszonych

Ochrona przeciwporażeniowa oraz ochrona przed skutkami przeciążeń dla obwodu bez OZE												
Lp	Element	Opis	L [m]	Zabezpieczenie	Opis zabezp.	Czas zadziałania [s]	Z _s ** [Ω]	I _a [A]	U [V]	Z _s * I _a SU [V]	tolerancja	
1	Wyprowadzenie obwodu	AsXS _n 120	10,0	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,146	254,0	230	37,13 - TAK	+/- 1,49	
2	Linia nn	Al 50	250,0	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,534	254,0	230	135,55 - TAK	+/- 5,42	
3	Linia nn	AsXS _n 50	200,0	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,823	254,0	230	209,16 - TAK	+/- 8,37	
4	Linia nn	AsXS _n 50	50,0	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,900	254,0	230	228,48 - TAK*	+/- 9,14	
5	Przyłącze nN	AsXS _n 25	15,0	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,941	254,0	230	239,13 - TAK*	+/- 9,57	
6	WLZ	YDYżo4/5x10	10,0	B1.1.1:3_1	D02 gG 35 A	5 s	0,986	129,7	230	127,9 - TAK	+/- 5,12	
7	Obwód w domu	YKY5x 4	45,0	B1.1.1:4_1	P314 B A DX 25 A	0,4 s	1,472	124,7	230	183,48 - TAK	+/- 7,34	
8	Przyłącze nn	Al 25	15,0	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,868	254,0	230	220,51 - TAK	+/- 8,82	
9	WLZ	YDYżo4/5x10	10,0	B1.1.2:2_1	D02 gG 35 A	5 s	0,909	129,7	230	117,90 - TAK	+/- 4,72	
10	Obwód w domu	YKY5x 4	45,0	B1.1.2:3_1	P314 B A DX 25 A	0,4 s	1,392	124,7	230	173,50 - TAK	+/- 6,94	
11	Przyłącze nn	Al 25	15,0	B1:1_1	WTNH 1 gG 50 A	5 s	0,575	254,0	230	146,16 - TAK	+/- 5,85	
12	WLZ	YDYżo4/5x10	10,0	B1.2:2_1	D02 gG 35 A	5 s	0,612	129,7	230	79,35 - TAK	+/- 3,17	
13	Obwód w domu	YKY5x 4	45,0	B1.2:3_1	P314 B A DX 25 A	0,4 s	1,075	124,7	230	133,96 - TAK	+/- 5,36	

(*) weryfikacja uwzględnia tolerancję odczytu pasm zadziałania ±4%

(**) W obliczeniach uwzględniono wartość impedancji powiększoną o 25%.

Ochrona przeciwporażeniowa oraz ochrona przed skutkami przeciążeń dla obwodu bez OZE									Z OZE				UWAGA
Lp	I _{zw} [A]	I _B [A]	I _n [A]	I _z [A]	I ₂ [A]	1.45 * I _z [A]	I _B ≤ I _n ≤ I _z	I _z ≤ 1.45 * I _z	I _{zw} [A]	P _{nOZE} [kW]	I _{nOZE} [A]	I _{zOZE} [A]	
1	1 573,44	37,0	50	296,0	71,00	429,2	TAK	TAK	1573,44	39,0	60,6	1512,8	I _{zOZE} >I _a
2	430,98	37,0	50,00	220,0	71,00	319,0	TAK	TAK	430,98	39,0	60,6	370,4	I _{zOZE} >I _a
3	279,30	24,6	50,00	168,0	71,00	243,6	TAK	TAK	279,30	39,0	60,6	218,7	I _{zOZE} <I _a
4	255,69	12,3	50,00	168,0	71,00	243,6	TAK	TAK	255,69	39,0	60,6	195,1	I _{zOZE} <I _a
5	244,31	12,3	50,00	112,0	71,00	162,4	TAK	TAK	244,31	39,0	60,6	183,7	I _{zOZE} <I _a
6	233,26	12,3	35,00	100,0	52,54	145,0	TAK	TAK	233,26	39,0	60,6	172,7	I _{zOZE} >I _a
7	156,26	12,3	25,00	34,0	36,13	49,3	TAK	TAK	156,26	39,0	60,6	216,9	I _{zOZE} >I _a
8	264,93	12,3	50,00	140,0	71,00	203,0	TAK	TAK	264,93	39,0	60,6	325,5	I _{zOZE} >I _a
9	253,04	12,3	25,00	39,0	36,25	56,5	TAK	TAK	253,04	39,0	60,6	313,6	I _{zOZE} >I _a
10	165,24	12,3	25,00	62,0	36,13	90,0	TAK	TAK	165,24	39,0	60,6	225,8	I _{zOZE} >I _a
11	399,70	12,3	50,00	140,0	71,00	203,0	TAK	TAK	399,70	39,0	60,6	460,3	I _{zOZE} >I _a
12	375,97	12,3	25,00	39,0	36,25	56,5	TAK	TAK	375,97	39,0	60,6	436,6	I _{zOZE} >I _a
13	214,02	12,3	25,00	62,0	36,13	90,0	TAK	TAK	214,02	39,0	60,6	274,6	I _{zOZE} >I _a

Wnioski

W założonym układzie sieci, już dla jednej instalacji elektrycznej i przyłączonej do niej elektrowni OZE dostrzega się niewielki wpływ OZE na przepływy w sieci nn podczas zwarcia. Przyłączona elektrownia o mocy nie większej od mocy przyłączeniowej nie zmieni znacząco przepływów prądu w obwodzie nn i nie będzie miała szczególnie niekorzystnego wpływu na skuteczność ochrony przeciwporażeniowej i ochrony przed skutkami przeciążeń.

W samej instalacji odbiorczej prądy zwarciove od systemu i OZE sumują się. W tym przypadku dla wariantów bez OZE i z OZE ochrona przeciwporażeniowa i ochrona przed skutkami przeciążeń jest skuteczna.

W przypadku 3 odbiorów usytuowanych na końcu obwodu nn i przyłączonych w sposób rozproszony, dla przypadku bez OZE, obliczenia skuteczności ochrony przeciwporażeniowej przed skutkami przeciążeń wskazują ich skuteczność. Daje się zauważyć wpływ OZE na działanie zabezpieczeń w stacji - przedstawione wyniki obliczeń wskazują, że ochrona przeciwporażeniowa i przed skutkami przeciążeń może stać się problematyczna, co wymaga pogłębionych badań w tym zakresie.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań potwierdzają założenie badawcze, że w mikrosieciach bazujących na obwodach nn odnawialne źródła energii mają wpływ na rozprawy prądów, w tym zwarciowych, w obwodzie. Te zjawiska mogą przybrać charakter niekorzystny z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji sieci nn, do której przyłączono OZE w większych ilościach. Przeprowadzone badanie, chociaż bardzo uproszczone ze względu na potrzebę czytelności przedstawienia problemu, uzasadnia potrzebę kontynuacji tego wątku badań i przeprowadzenia szczegółowszych symulacji. Być może właśnie jesteśmy świadkami potrzeby zmiany w paradygmacie projektowania sieci nn, do której prędkiej, czy później zostaną przyłączone OZE w większej liczbie, co jest zgodne z obecnymi tendencjami na rynku energii.

Autor: dr inż. Grzegorz Kluj, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa. E-mail: grzegorz.kluj@pw.edu.pl.

LITERATURA

- Wasiłowski J., Kaleta M. i Baczyński D., Wybrane zagadnienia rozwoju mikrosieci energetycznych w Polsce, *Polityka Energetyczna*, (2015), 45-48.
- Parol M., Rokicki Ł., Polecki M., Parol R., Komarnicki P., Arendarski B. i Piortowski M., Projektowanie i optymalne sterowanie pracą mikrosieci niskiego napięcia na obszarach wiejskich, *III Interdyscyplinarna Konferencja Środowisk Naukowych - Energetyka Prosumencka w Wymiarach Zrównoważonego Rozwoju*, Koszęcin (2016).

- [3] Parol M., Mikrosieci - przyszłościowe struktury sieci dystrybucyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 8 (2016), 1-5.
- [4] Hurr J. W., Residential Microgrids for Disaster Recovery Operations, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Falls Church, Virginia, (2012), 2.
- [5] Mumtaz F., Bayram I.S., „Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview,” w *3rd International Conference on Energy and Environment Research*, Barcelona, Spain, (2016), 7-11, 94-100.
- [6] Hirsch A., Parag Y. i Guerrero J., „Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2018), 402-411.
- [7] Mir Sayed Shah Danish et al, A sustainable microgrid: A sustainability and management-oriented (2019), *Energy Procedia* 159 (2019) 160-167, 160-167, 10.1016/j.egypro.2018.12.045.
- [8] Sysko-Romańczuk S., Kluj G., Mikrosieci jako innowacyjny komponent dywersyfikacji rynku energetycznego w Polsce, *Przegląd Organizacji* (2019), nr 9, 19-24.
- [9] UE, Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (2019).
- [10] Biczal P., Wytwarzanie energii w mikrosieciach, *Automatyka-Elektryka-Zakłócenia* (2011), vol. 2, nr 2(4).
- [11] European Commission, Study on the effective integration of Distributed Energy Resources for providing flexibility to the electricity system, *European Commission* (2015), 37.
- [12] Helt P., Parol M. i Piotrowski P., Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce, Warszawa: *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej* (2012).
- [13] Pijarski P., Saigustia C., Kacejko P., Belowski A. i Miller P., Optimal Network Reconfiguration and Power Curtailment of Energies, nr 17(12)2965, *Energies* (2024), <https://doi.org/10.3390/en17122965>.
- [14] Sysko-Romańczuk S., Kluj G., Hawrysz L., Robak S., Rokicki Ł., Scalable Microgrid Process Model: The Results of an Off-Grid, *Energies* 14, 7139 (2021), <https://doi.org/10.3390/en14217139>.
- [15] Rasmus D. et al, Photovoltaic self-consumption in buildings: A review, *Applied Energy*, tom Applied Energy 142 (2015), 80–94, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
- [16] Chao L. et al, Peer-to-peer energy sharing through a two-stage aggregated battery control, *Applied Energy*, Applied Energy 226 (2018), 261–276, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.097>.
- [17] Kacejko P., Machowski J., Pijarski P. i Smolarczyk A., Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, *Wydawnictwo Naukowe PWN* (2022), 18.
- [18] SEP, Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przeciwporażeniowa, Warszawa: *COSiW SEP* (2003).
- [19] Katarzyński J. i Olesz M., Pomiar impedancji pętli zwarciowej w instalacjach fotowoltaicznych dużych mocy z magazynem energii, *Przegląd Elektrotechniczny* (2022) nr 3, 26,
- [20] J. Katarzyński i M. Olesz, Fault Loop Impedance Measurement in Circuits Fed by UPS and Principle of Safety Protection, *Sustainability* (2020), 6.
- [21] Szymański B., Instalacje fotowoltaiczne, Kraków: *Gloenergia sp. z o.o.* (2021), 165.
- [22] Sarniak M., Systemy fotowoltaiczne, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej* (2019), 140.
- [23] SEP2, Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Instalacje elektryczne w obiektach mieszkaniowych. Podstawy planowania, Warszawa: *COSiW SEP* (2003).