

Niezawodność zasilania odbiorców w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych oraz w mikro sieciach – analiza problemu – część 2

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono analizę problemu niezawodności zasilania odbiorców energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych. Przedstawiono i przedyskutowano dane na temat wartości wskaźników SAIDI i SAIFI w wybranych krajach europejskich, w tym w Niemczech. W artykule opisano także zagadnienie kablowania linii napowietrznych SN oraz automatyzacji sieci dystrybucyjnych. Ponadto przedstawiono problem niezawodności zasilania odbiorców w mikro sieciach. Artykuł zakończono podsumowaniem i przedstawieniem wniosków końcowych.

Abstract. Analysis of problem of supply reliability of electricity consumers in electric power distribution grids was carried out in the paper. Data on the values of the SAIDI and SAIFI indices in selected European countries, including the ones in Germany were placed and discussed. Issue of cabling the MV overhead lines as well as automation of distribution grids were also described in the paper. Additionally, supply reliability of electricity consumers in microgrids was presented. Summary and final conclusions were placed at the end of the paper. (*Supply reliability of electricity consumers in electric power distribution grids and in microgrids – analysis of problem – part 2*).

Słowa kluczowe: niezawodność zasilania, elektroenergetyczne sieci dystrybucyjne, wskaźniki niezawodności zasilania SAIDI i SAIFI, automatyzacja i kablowanie sieci dystrybucyjnych, mikro sieci.

Keywords: reliability of supply, electric power distribution grids, SAIDI and SAIFI - supply reliability indices, automation and cabling of distribution grids, microgrids.

Wprowadzenie

Niezawodność zasilania jest jednym z podstawowych parametrów jakości energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom. Zagadnienie to jest i będzie coraz ważniejsze w najbliższych latach, zarówno z gospodarczego, jak i społecznego punktu widzenia.

W niniejszym artykule zostały przedstawione takie zagadnienia, jak: analiza wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej w krajach europejskich, w tym w Niemczech; czynniki wpływające na wartość wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej (w szczególności zagadnienie kablowania linii napowietrznych SN i automatyzacji sieci dystrybucyjnych) oraz niezawodność zasilania odbiorców w mikro sieciach niskiego napięcia.

Warto wspomnieć, że zagadnienia dotyczące niezawodności dostaw energii elektrycznej do odbiorców były m.in. przedmiotem rozważań zawartych w [1 – 8].

W końcowej części niniejszego artykułu przedstawiono spostrzeżenia i wnioski dotyczące analizowanej tematyki, tj. niezawodności zasilania odbiorców w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych oraz w mikro sieciach.

W części pierwszej tego artykułu została przedstawiona analiza wartości wskaźników SAIDI, SAIFI i MAIFI dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej, podawanych corocznie przez operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD) w naszym kraju. Przedstawione zostały informacje na temat wartości wskaźników dotyczących częstości i czasu trwania przerw w dostarczaniu energii elektrycznej u 5 największych OSD w Polsce w kilku ostatnich latach, jak i w skali całego kraju. Oprócz tego została również przedstawiona analiza struktury terytorialnej wartości wskaźników SAIDI i SAIFI w Polsce.

Dane na temat wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej w krajach europejskich

Na Rysunkach 1 i 2 zostały podane wartości wskaźników SAIDI i SAIFI dotyczących przerw w zasilaniu dla wybranych krajów europejskich w roku 2018.

Jeśli chodzi o wskaźnik SAIDI, to najmniejszymi jego wartościami w roku 2018 charakteryzowały się następujące kraje [9]: Niemcy, Szwajcaria, Dania, Holandia i Austria. W przypadku 3 pierwszych krajów wskaźnik ten wynosił około kilkunastu minut na odbiorcę w ciągu roku. Dla zdecydowanej większości krajów pokazanych na Rys. 1 wskaźnik ten wynosił natomiast kilkadziesiąt minut na odbiorcę.

Wartość średnia wskaźnika SAIDI_{bpk_npl} dla wybranych państw europejskich na koniec 2018 roku wynosiła 56,46 min/odb./rok, zaś mediana 50,54 min/odb./rok. Z kolei wartość średnia wskaźnika SAIDI_{zpk_npl} dla wybranych państw europejskich na koniec 2018 roku wynosiła 71,08 min/odb./rok, zaś mediana 49,22 min/odb./rok. Odchylenie standardowe analizowanych wielkości wynosiło odpowiednio 38,86 min/odb./rok i 55,1 min/odb./rok.

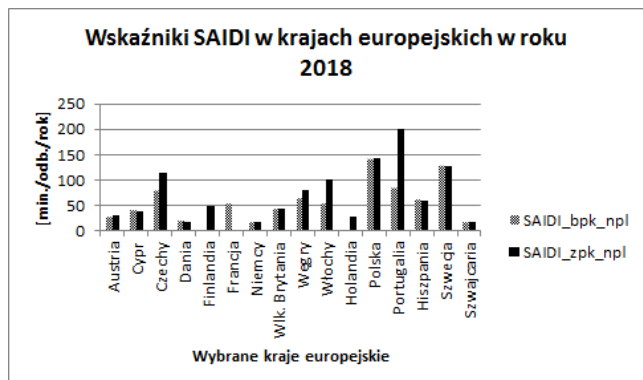
Odnosnie do wskaźnika SAIFI, należy zauważyć, że najmniejszymi jego wartościami w roku 2018 charakteryzowały się [9]: Cypr, Niemcy, Szwajcaria, Dania i Holandia. Dla pierwszych trzech państw wskaźnik ten był z przedziału od 0,25 do 0,3 przerw na odbiorcę w ciągu roku. W przypadku znacznej liczby państw pokazanych na Rys. 2 wskaźnik SAIFI był mniejszy od 1,0 przerw na odbiorcę.

Wartość średnia wskaźnika SAIFI_{bpk_npl} dla wybranych państw europejskich na koniec 2018 roku wynosiła 1,0 przerw/odb./rok, zaś mediana 0,8 przerw/odb./rok. Z kolei wartość średnia wskaźnika SAIFI_{zpk_npl} dla wybranych państw europejskich na koniec 2018 roku wynosiła 1,1 przerw/odb./rok, zaś mediana 0,99 przerw/odb./rok. Odchylenie standardowe analizowanych wielkości wynosiło odpowiednio 0,7 przerw/odb./rok i 0,77 przerw/odb./rok.

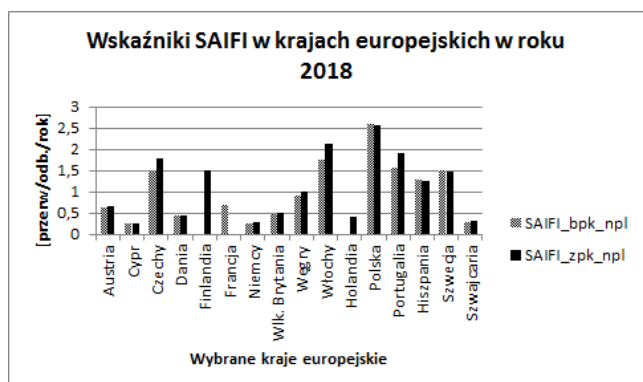
Spośród wymienionych krajów europejskich dalszej analizie poddano wartości wskaźników SAIDI i SAIFI w Niemczech.

Wartości wskaźników SAIDI i SAIFI dla przerw nieplanowanych w Niemczech w latach 2015 – 2022 zostały pokazane na Rys. 3 i 4. Jak widać, wskaźnik SAIDI bez uwzględnienia przerw katastrofalnych ma lekką tendencję malejącą i zbliża się nawet w niektórych latach do około 10

minut na odbiorcę w ciągu roku. Natomiast wzięcie pod uwagę przerw katastrofalnych powoduje dużą zmienność tego wskaźnika. Tym niemniej jego wartość nie przekracza 22 minut na odbiorcę na rok [10].



Rys. 1. Wartości wskaźników SAIDI w wybranych krajach europejskich w roku 2018; opracowano na podstawie [9]



Rys. 2. Wartości wskaźników SAIFI w wybranych krajach europejskich w roku 2018; opracowano na podstawie [9]

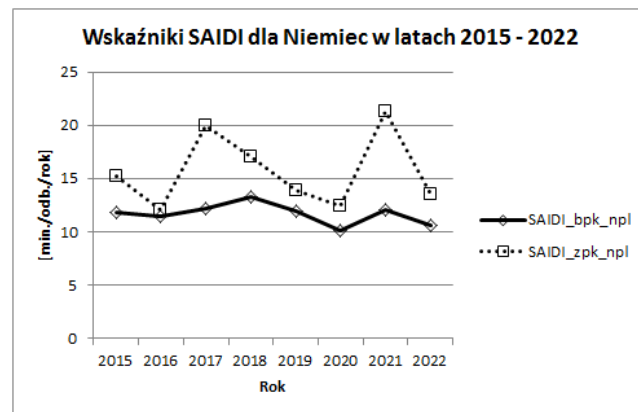
Wartość średnia wskaźnika SAIDI_bpk_npl dla Niemiec w latach 2015 - 2022 wynosiła 11,73 min/odb./rok, zaś mediana 11,95 min/odb./rok. Z kolei wartość średnia wskaźnika SAIDI_zpk_npl dla Niemiec w latach 2015 - 2022 wynosiła 15,73 min/odb./rok, zaś mediana 14,6 min/odb./rok. Odchylenie standardowe analizowanych wielkości wynosiło odpowiednio 0,97 min/odb./rok i 3,44 min/odb./rok.

Jeśli chodzi o wskaźnik SAIFI, to w obu przypadkach (bpk i zpk) wykazuje on w latach 2015 - 2022 lekką tendencję malejącą. Wskaźnik SAIDI_bpk zbliża się w niektórych latach do wartości 0,2 przerw na odbiorcę w ciągu roku, zaś wskaźnik SAIFI_zpk oscyluje w ostatnich latach wokół wartości 0,25 przerw na odbiorcę.

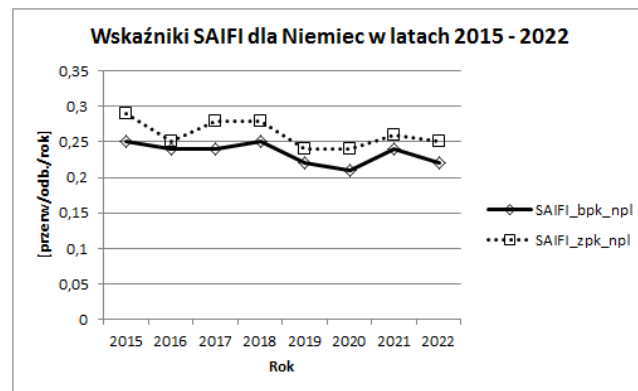
Wartość średnia wskaźnika SAIFI_bpk_npl dla Niemiec w latach 2015 - 2022 wynosiła 0,23 przerw/odb./rok, zaś mediana 0,24 przerw/odb./rok. Z kolei wartość średnia wskaźnika SAIFI_zpk_npl dla Niemiec w latach 2015 - 2022 wynosiła 0,26 przerw/odb./rok, zaś mediana 0,255 przerw/odb./rok. Odchylenie standardowe analizowanych wielkości wynosiło odpowiednio 0,015 przerw/odb./rok i 0,020 przerw/odb./rok.

Z kolei na Rys. 5 zostały podane wartości wskaźnika SAIDI dla sieci SN i nN w Niemczech w przypadku przerw nieplanowanych (bez uwzględnienia przerw katastrofalnych) w latach 2015 - 2021. Jak można zauważyć, główny wpływ na wartość wskaźnika SAIDI mają przerwy występujące w sieci SN. Czas trwania tych przerw zawierał się w przedziale od ponad 8 do niecałych 13 minut na odbiorcę końcowego na rok. Natomiast czas trwania przerw w sieciach nN wynosił trochę ponad 2 minuty na odbiorcę. Sumaryczna wartość wskaźnika SAIDI dla sieci

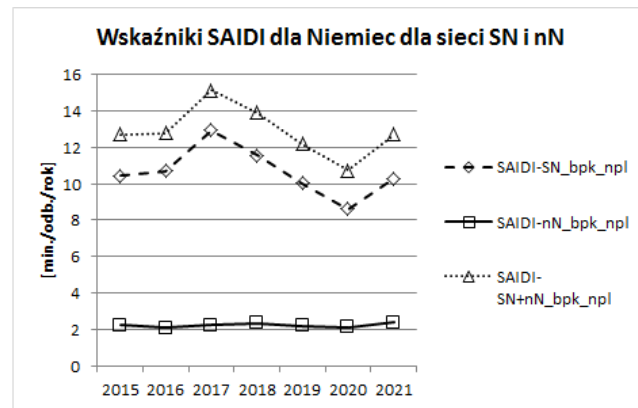
SN i nN wynosiła więc w latach 2015 - 2021 od ponad 10,5 do nieco ponad 15 minut na odbiorcę [11].



Rys. 3. Wartości wskaźników SAIDI dla Niemiec w latach 2015 - 2022; opracowano na podstawie [10]



Rys. 4. Wartości wskaźników SAIFI dla Niemiec w latach 2015 - 2022; opracowano na podstawie [10]



Rys. 5. Wartości wskaźników SAIDI dla Niemiec w latach 2015 - 2021 dla sieci SN i nN; opracowano na podstawie [11]

Czynniki wpływające na wartość wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej

Z informacji podanych w [6] wynika, że w Polsce w latach 2015 - 2018 przerwy w sieci SN odpowiadały za około 82 - 84% wartości wskaźnika SAIDI, przy czym przerwy nieplanowane odpowiadały za 58 - 71%, zaś przerwy planowane za 13 - 25% wartości tego wskaźnika. Jeśli chodzi o wskaźnik SAIFI, to w latach 2015 - 2018 w Polsce przerwy w sieci SN odpowiadały za około 91% wartości tego wskaźnika, przy czym udział przerw nieplanowanych wynosił 79 - 83%, zaś przerw planowanych 8 - 12% wartości tego wskaźnika. Podane powyżej wartości jednoznacznie wskazują, że za wartości wskaźników SAIDI i SAIFI w Polsce odpowiadają głównie przerwy występujące w sieciach SN.

W artykule [6] został też przedstawiony szczegółowy wykaz czynności możliwych do podjęcia przez OSD, aby ograniczyć przerwy nieplanowane i planowane w sieciach, w tym również przerwy dotyczące sieci SN, zarówno w zakresie ograniczenia liczby przerw, jak również ograniczenia czasu trwania przerw. Wśród tych czynności jest m.in. wymiana linii napowietrznych SN z przewodami gołymi na linie kablowe SN oraz linie napowietrzne SN z przewodami w osłonie, a także automatyzacja sieci SN, w tym instalowanie łączników zdalnie sterowanych (z telesterowaniem) i stacji z układami telemechaniki.

Szczególnie istotny wydaje się być z punktu widzenia poprawy niezawodności zasilania problem kablowania linii napowietrznych SN z przewodami gołymi. Z informacji zawartych w [6] wynika, że w państwach europejskich o stopniu skablowania linii SN powyżej 40% wskaźnik SAIDI jest istotnie mniejszy niż przy mniejszych wartościach tego stopnia. Natomiast wartość progowa stopnia skablowania linii SN powodująca istotne obniżenie wskaźnika SAIFI wynosi w tych państwach około 60%.

Udział procentowy linii kablowych w sieciach SN i nN w państwach europejskich na koniec 2018 roku został pokazany na Rys. 6. Jak widać, największy stopień skablowania linii SN występował w 2018 roku w Holandii, Danii, Niemczech oraz Szwajcarii i zawierał się w przedziale od około 80 do 100%. W dalszej kolejności pod tym względem była Szwecja, Austria, Francja i Włochy [9].

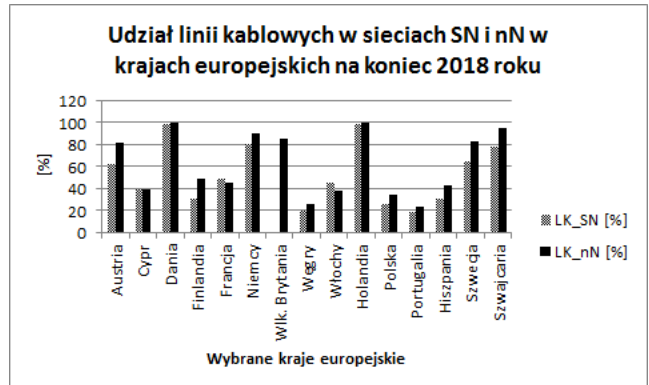
Wartość średnia udziału linii kablowych w sieciach SN dla wybranych państw europejskich na koniec 2018 roku wynosiła 53,83%, zaś mediana 47,65%. Z kolei wartość średnia udziału linii kablowych w sieciach nN dla wybranych państw europejskich na koniec 2018 roku wynosiła 62,27%, zaś mediana 49,1%. Odchylenie standardowe analizowanych wielkości wynosiło odpowiednio 27,88% i 28,73%.

Jeśli chodzi o Polskę, to obserwuje się w ostatnich kilkunastu latach stopniowy wzrost udziału linii kablowych SN w całkowitej długości wszystkich linii SN, natomiast jest on w dalszym ciągu niewystarczający. Polska zajmowała pod tym względem w 2018 roku (wg raportu [9]) 21 miejsce w Europie (na koniec 2018 roku stopień skablowania linii SN w naszym kraju wynosił 26,7%). Pod koniec 2022 roku udział ten był trochę większy i wynosił 29,55% wg danych zawartych w [12].

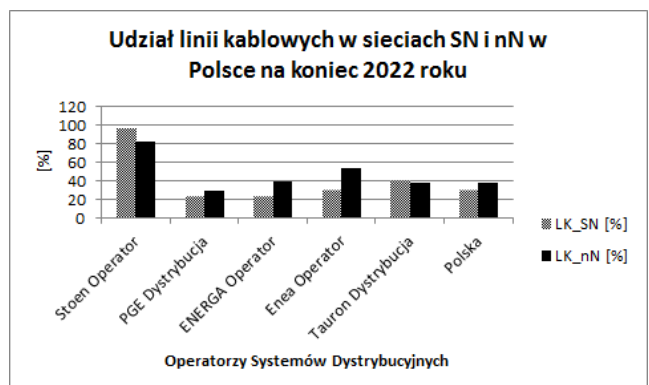
Warto zaznaczyć, że według [12] rok 2022 był kolejnym rokiem, w którym zaobserwowano spowolnienie wzrostu udziału linii kablowych w całkowitej długości wszystkich linii SN (napowietrznych i kablowych). Długość linii kablowych SN zwiększyła się w tym roku o około 2,1 tys. km i wynikała głównie z budowy nowych linii kablowych SN. Przynależność udziału linii kablowych w sumarycznej długości wszystkich linii SN w roku 2022 wyniósł około 0,5%. Zaobserwowano natomiast spowolnienie procesu przebudowy linii napowietrznych na kablowe, tj. kablowania linii napowietrznych SN.

Należy wspomnieć, że zgodnie z dokumentem PEP2040 [13], powinno nastąpić sukcesywne kablowanie linii napowietrznych SN, aż do osiągnięcia średniego poziomu występującego w tej kwestii w krajach Unii Europejskiej.

Na Rys. 7 został pokazany udział linii kablowych w sieciach SN i nN dla 5 największych OSD w Polsce na koniec 2022 roku. Największy udział linii kablowych SN w sieciach SN występował w Stoen Operator, a następnie w Tauron Dystrybucja i Enea Operator. Z kolei największy udział linii kablowych nN w sieciach nN miał miejsce w Stoen Operator, a następnie w Enea Operator i Energa Operator [12].



Rys. 6. Wartości procentowego udziału linii kablowych w sieciach SN i nN w wybranych krajach europejskich na koniec roku 2018; opracowano na podstawie [9]



Rys. 7. Wartości procentowego udziału linii kablowych w sieciach SN i nN w Polsce na koniec roku 2022; opracowano na podstawie [12]

Wartość średnia udziału linii kablowych w sieciach SN dla 5 największych OSD w Polsce na koniec 2022 roku wynosiła 42,369% (głównie ze względu na sieć SN należącą do Stoen Operator), zaś mediana 26,29%. Z kolei wartość średnia udziału linii kablowych w sieciach nN dla 5 największych OSD w Polsce na koniec 2022 roku wynosiła 48,49%, zaś mediana 46,335%. Odchylenie standardowe w obu przypadkach wynosiło odpowiednio 31,15% i 22,84%.

Drugim bardzo istotnym zagadnieniem z punktu widzenia poprawy niezawodności zasilania jest automatyzacja sieci SN, w tym instalowanie łączników zdalnie sterowanych. Zagadnienie to zostało szczegółowo omówione m.in. w artykule [4]. Z publikacji tej wynika, że instalowanie wewnątrz terenowych sieci SN łączników sterowanych radiowo powoduje skracanie czasu trwania przerw w zasilaniu oraz zmniejszanie liczby odbiorców objętych wyłączeniem. Ponadto wraz ze wzrostem liczby zainstalowanych w sieci SN łączników sterowanych radiowo (do pewnej liczby granicznej) zmniejsza się wartość wskaźnika SAIDI.

Należy też podkreślić, że w sprawozdaniu G-10.5 [14] OSD są zobligowani do podawania m.in. danych na temat liczby zainstalowanych łączników do zdalnego sterowania w liniach SN oraz w liniach nN, a także danych na temat liczby stacji SN zdalnie sterowanych (w tym przystosowanych do automatycznych przełączeń).

Zgodnie z [15], u 5 największych OSD w Polsce w 2020 roku były zainstalowane 25673 łączniki SN z telesterowaniem, zaś liczba łączników telesterowanych na 100 km linii napowietrznych SN wynosiła 11,8 (co wydaje się być stosunkowo dobrym wynikiem). Ponadto, zgodnie z [15], około 90% wszystkich łączników z telesterowaniem stanowiły łączniki sterowane zdalnie, instalowane w liniach napowietrznych w głębi sieci SN. Warto też wspomnieć, że

w roku 2020 było eksploatowanych około 3,6% stacji SN/nN wyposażonych w telemechanikę. Liczba tego typu stacji SN/nN ciągle rośnie.

Spośród innych czynników mających wpływ na niezawodność zasilania odbiorców można też wymienić rozległość terytorialną OSD i związaną z tym całkowitą długość eksploatowanych sieci dystrybucyjnych SN i nN. W tym kontekście należy w szczególności zwrócić uwagę na potrzebę skracania długości ciągów liniowych SN [15]. Z podanych w tym źródle literaturowym informacji wynika, że w latach 2016 – 2020 skróceniu uległy najdłuższe ciągi SN. Na koniec 2020 roku ciągi liniowe SN o długości poniżej 20 km stanowiły ponad 80% wszystkich ciągów na tym poziomie napięcia. Ciągi o tej długości są rozwiązaniem standardowym przy budowie nowych linii SN. Wciąż jednak występowały ciągi SN o długości przekraczającej 100 km, a nawet 140 km (wg stanu na koniec 2020 roku).

Z punktu widzenia poprawy niezawodności zasilania odbiorców, ważnym zagadnieniem jest także regulacja jakościowa. Regulacja ta została wprowadzona w Polsce od 1 stycznia 2016, a jej zasady, obowiązujące OSD w latach 2018 – 2025, zostały przedstawione w [16]. W dokumencie tym został opisany obowiązujący w naszym kraju model regulacji jakościowej, wprowadzonej na zasadzie porozumienia między URE oraz OSD. Modelowi regulacji jakościowej w naszym kraju został też poświęcony artykuł [17].

Niezawodność zasilania w mikrosieciach niskiego napięcia

W pracy [18] zostało poddane analizie zagadnienie niezawodności zasilania w mikrosieciach niskiego napięcia prądu przemiennego. Informacje na temat struktury oraz sposobu działania mikrosieci niskiego napięcia można znaleźć m.in. w [19].

W oparciu o zależności podane w [20], przeanalizowano 4 przypadki szczegółowe odnośnie do niezawodności zasilania odbiorców w sieci (mikrosieci): niezawodność klasycznej sieci niskiego napięcia, niezawodność sieci niskiego napięcia zmodyfikowanej do postaci mikrosieci – tzw. przypadek idealny mikrosieci, niezawodność mikrosieci niskiego napięcia uwzględniającej zawodność procesu jej oddzielenia od sieci OSD, niezawodność mikrosieci niskiego napięcia przy braku możliwości pokrycia zapotrzebowania na moc i w konsekwencji zrzutu części obciążenia mikrosieci.

Dla każdego z wymienionych przypadków i dla każdego węzła odbiorczego „c” w sieci (mikrosieci) wyznaczono: wskaźnik intensywności uszkodzeń λ_c , wskaźnik niedostępności (braku) zasilania U_c , wartość niedostarczonej energii NDE_c .

W przypadku sieci nN zmodyfikowanej do postaci mikrosieci pojawia się możliwość (zdolność) do jej działania w trybie awaryjnym (wyspowym). Założono, że operacja oddzielenia mikrosieci od sieci OSD jest w tej sytuacji zawsze pomyślna oraz że generacja mocy wewnątrz mikrosieci jest większa od zapotrzebowania na moc w tej mikrosieci.

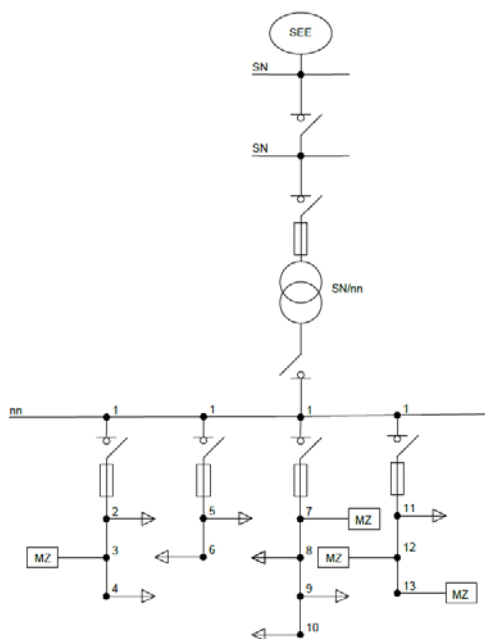
Z kolei w przypadku analizy niezawodności mikrosieci niskiego napięcia uwzględniającej zawodność procesu jej oddzielenia od sieci OSD, niezbędne jest określenie następujących parametrów: P_M – prawdopodobieństwa nieudanego oddzielenia mikrosieci od sieci OSD, P_L – prawdopodobieństwa wyłączenia (odstawienia) mikrosieci z powodu wystąpienia awarii wewnątrz mikrosieci oraz T_a – średniego czasu niezbędnego do przywrócenia mikrosieci do pracy.

W końcu, w przypadku analizy niezawodności mikrosieci niskiego napięcia przy braku możliwości pokrycia

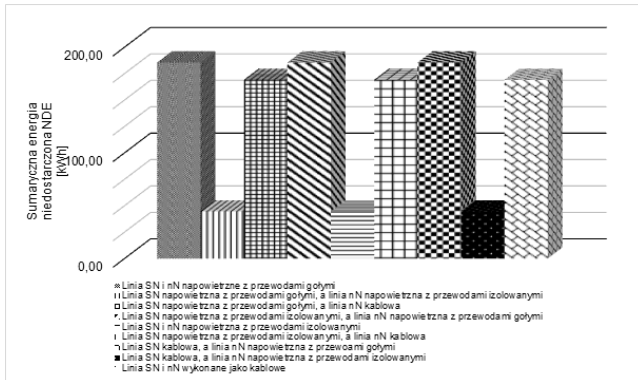
zapotrzebowania na moc w chwili odłączenia mikrosieci od sieci OSD (tj. w pracy wyspowej), centralny sterownik mikrosieci powinien dokonać zrzutu części jej obciążenia. W tej sytuacji również niezbędne jest określenie parametrów P_L i T_a .

Przykładowe obliczenia niezawodnościowe zostały w pracy [18] przeprowadzone dla testowej mikrosieci niskiego napięcia pokazanej na Rys. 8, dla kilku możliwych wariantów wykonania sieci SN i nN. Rozważone zostały następujące warianty (typy) wykonania linii SN i nN: linia napowietrzna z przewodami gołymi, linia napowietrzna z przewodami izolowanymi oraz linia kablowa. Razem stanowiło to 9 różnych eksperymentów obliczeniowych dla każdego rozważanego przypadku. Przy czym, w przypadku analizowania niezawodności sieci niskiego napięcia zmodyfikowanej do postaci mikrosieci, założono, że sieć SN zostanie wykonana jako linia napowietrzna z przewodami gołymi; zostały więc wówczas przeprowadzone 3 eksperymenty obliczeniowe.

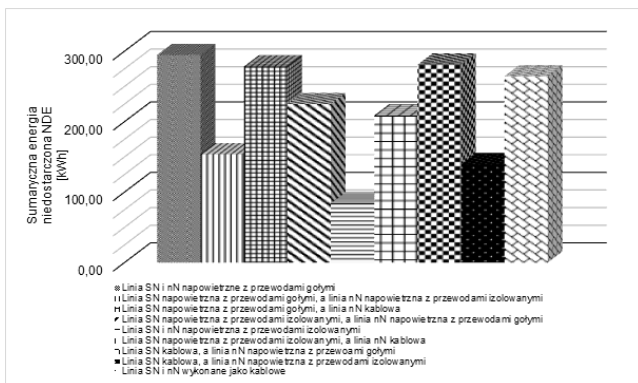
Z przeprowadzonych obliczeń niezawodnościowych wynika, że wartość sumarycznej niedostarczonej energii NDE zależy od analizowanego przypadku pracy sieci (mikrosieci) niskiego napięcia oraz od wariantu wykonania sieci SN i nN. Najniższe wartości NDE otrzymano dla przypadku sieci niskiego napięcia zmodyfikowanej do postaci mikrosieci (tj. tzw. przypadku idealnego). Niewiele większe wartości NDE (dla przyjętych do obliczeń wartości parametrów P_M , P_L i T_a) uzyskano dla przypadku mikrosieci, w którym uwzględniono zawodność procesu jej oddzielenia od sieci OSD. Okazało się, że bardzo istotny wpływ na wartość NDE w przypadku mikrosieci niskiego napięcia ma jej zdolność do pokrycia zapotrzebowania na moc w pracy wyspowej. Przy braku tej zdolności (konieczności wyłączenia wszystkich odbiorów) wartość NDE była taka sama jak w przypadku klasycznej sieci niskiego napięcia (dla przyjętych do obliczeń wartości parametrów P_L i T_a). Z przeprowadzonych obliczeń wynika też, że z punktu widzenia wartości NDE najkorzystniejszy jest wariant, w którym sieć SN oraz sieć nN są wykonane liniami napowietrznymi izolowanymi [18].



Rys. 8. Schemat testowej mikrosieci nN (1 – 13: numery węzłów sieci niskiego napięcia, MZ - mikroźródło) [18]



Rys. 9. Wartości niedostarczonej energii dla przypadku mikrosieci nN uwzględniającego zawodność procesu oddzielenia mikrosieci od sieci OSD, w zależności od wariantu wykonania sieci SN i nN [18]



Rys. 10. Wartości niedostarczonej energii dla przypadku klasycznej sieci nN, w zależności od wariantu wykonania sieci SN i nN [18]

Na Rys. 9 zamieszczono wykres przedstawiający wartości sumarycznej niedostarczonej energii *NDE* dla przypadku mikrosieci nN uwzględniającego zawodność procesu oddzielenia mikrosieci od sieci OSD (tj. tzw. przypadku rzeczywistego), w zależności od wariantu wykonania sieci SN i nN. Z kolei na Rys. 10 pokazano wykres przedstawiający wartości niedostarczonej energii dla przypadku klasycznej sieci nN, w zależności od wariantu wykonania sieci SN i nN. Jak widać, w przypadku mikrosieci niskiego napięcia wartości sumarycznej niedostarczonej energii *NDE* jest dla każdego z rozważanych wariantów wykonania sieci SN i nN o wiele mniejsza niż w przypadku klasycznej sieci niskiego napięcia.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Najmniejszymi wartościami wskaźnika SAIDI w roku 2018 charakteryzowały się następujące kraje europejskie: Niemcy, Szwajcaria, Dania, Holandia i Austria. Dla sieci elektroenergetycznych w trzech pierwszych krajach wskaźnik ten wynosił około kilkunastu minut na odbiorcę w ciągu roku. Z kolei najmniejszymi wartościami wskaźnika SAIFI w roku 2018 charakteryzowały się: Cypr, Niemcy, Szwajcaria, Dania i Holandia. Dla sieci w trzech pierwszych państwach wskaźnik ten przyjmował wartości z przedziału od 0,25 do 0,3 przerw na odbiorcę w ciągu roku.

Wartość średnia wskaźnika SAIDI_bpk_npl dla Niemiec w latach 2015 - 2022 wynosiła 11,73 min/odb./rok. Z kolei wartość średnia wskaźnika SAIDI_zpk_npl dla Niemiec w tych samych latach była równa 15,73 min/odb./rok. Natomiast, wartość średnia wskaźnika SAIFI_bpk_npl dla Niemiec w latach 2015 - 2022 wynosiła 0,23 przerw/odb./rok. Z kolei wartość średnia wskaźnika

SAIFI_zpk_npl dla Niemiec w tych samych latach była równa 0,26 przerw/odb./rok.

Główny wpływ na wartość wskaźnika SAIDI w Niemczech miały przerwy występujące w sieci SN. Czas trwania tych przerw w latach 2015 – 2021 miał tendencję zmienną i zawierał się w przedziale od ponad 8 do niecałych 13 minut na odbiorcę końcowego na rok. Natomiast czas trwania przerw w sieciach nN w Niemczech w tych samych latach wynosił trochę ponad 2 minuty na odbiorcę.

W Polsce w latach 2015 – 2018 przerwy w sieci SN odpowiadały za około 82 – 84% wartości wskaźnika SAIDI, przede wszystkim wskutek przerw nieplanowanych. W przypadku wskaźnika SAIFI, w tych samych latach przerwy w sieci SN odpowiadały za około 91% wartości tego wskaźnika, również głównie na skutek przerw nieplanowanych.

Zgodnie z [6], w celu ograniczenia liczby przerw, jak również ograniczenia czasu trwania przerw, możliwa jest m.in. realizacja takich czynności, jak wymiana linii napowietrznych SN z przewodami gołymi na linie kablowe SN oraz linie napowietrzne SN z przewodami w osłonie, a także automatyzacja sieci SN, w tym instalowanie łączników zdalnie sterowanych (z telesterowaniem) i stacji z układami telemechaniki.

Z punktu widzenia poprawy niezawodności zasilania, szczególnie istotny wydaje się być na pierwszym miejscu problem kablowania linii napowietrznych SN z przewodami gołymi.

Największy stopień skablowania linii SN w krajach europejskich występował w 2018 roku w: Holandii, Danii, Niemczech oraz Szwajcarii i zawierał się w przedziale od około 80 do 100%. W dalszej kolejności pod tym względem była: Szwecja, Austria, Francja i Włochy. Wartość średnia udziału linii kablowych w sieciach SN dla wybranych państw europejskich na koniec 2018 roku wynosiła prawie 54%.

Polska zajmowała pod tym względem w 2018 roku 21 miejsce w Europie (na koniec 2018 roku stopień skablowania linii SN w naszym kraju wynosił niecałe 27%). Pod koniec 2022 roku udział ten był trochę większy i wynosił trochę ponad 29,5%. Zgodnie z PEP2040 [13], w Polsce powinno nastąpić sukcesywne kablowanie linii napowietrznych SN, aż do osiągnięcia średniego poziomu występującego w tej kwestii w krajach Unii Europejskiej. Największy udział linii kablowych SN w sieciach SN na koniec 2022 roku w Polsce występował w Stoen Operator, a następnie w Tauron Dystrybucja i Enea Operator.

Drugim bardzo istotnym zagadnieniem z punktu widzenia poprawy niezawodności zasilania jest automatyzacja sieci SN, w tym instalowanie łączników zdalnie sterowanych. W Polsce w 2020 roku liczba łączników telesterowanych na 100 km linii napowietrznych SN wynosiła 11,8. W tym samym roku było eksploatowanych około 3,6% stacji SN/nN wyposażonych w telemechanikę. Liczba tego typu stacji SN/nN ciągle rośnie.

Należy też zwrócić uwagę na potrzebę skracania długości ciągów liniowych SN. Z podanych w [15] informacji wynika, że w latach 2016 – 2020 skróceniu uległy najdłuższe ciągi SN. Na koniec 2020 roku ciągi liniowe SN o długości poniżej 20 km stanowiły ponad 80% wszystkich ciągów na tym poziomie napięcia.

Innym ważnym zagadnieniem z punktu widzenia poprawy niezawodności zasilania odbiorców jest także regulacja jakościowa, obejmująca OSD. Kwestia ta została poruszona m.in. w [5, 17]. Regulacja jakościowa została wprowadzona w Polsce w 2016 roku.

W artykule przeanalizowano również zagadnienie niezawodności zasilania odbiorców w mikrosieciach

niskiego napięcia. Obliczenia niezawodnościowe zostały przeprowadzone dla mikrosieci testowej opisanej w [18].

Z przeprowadzonych obliczeń niezawodnościowych w pracy [18] wynika, że najmniejszą wartość sumarycznej niedostarczonej energii *NDE* otrzymano dla przypadku sieci niskiego napięcia zmodyfikowanej do postaci mikrosieci. Z wykonanych obliczeń wynika też, że z punktu widzenia wartości *NDE* najkorzystniejszy jest wariant, w którym sieć SN oraz sieć nN mikrosieci są wykonane liniami napowietrznymi izolowanymi. Wartości sumarycznej niedostarczonej energii *NDE* w przypadku mikrosieci są dla każdego z rozważanych wariantów wykonania sieci SN i nN o wiele mniejsze niż w przypadku klasycznej sieci niskiego napięcia.

Z punktu widzenia przeprowadzanych analiz niezawodnościowych, wskazane byłoby publikowanie przez OSD lub Agencję Rynku Energii S.A. oddzielnych wskaźników SAIDI i SAIFI dla poszczególnych poziomów napięć (WN, SN i nN).

W pierwszej części artykułu („część 1”) została przeprowadzona analiza wartości wskaźników odnoszących się do przerw w dostarczaniu energii elektrycznej odbiorcom, podawanych corocznie przez operatorów systemów dystrybucyjnych. Podane zostały szczegółowe informacje odnośnie do wartości wskaźników SAIDI, SAIFI oraz MAIFI u 5 największych OSD w Polsce, jak i w skali całego kraju, w ostatnich kilku latach. Ponadto została przedstawiona analiza struktury terytorialnej (powiatowej) wartości wskaźników SAIDI i SAIFI w naszym kraju.

Autor dziękuje Panu dr. inż. Bartłomiejowi Arendarskiemu za przesłanie wybranych danych dotyczących wskaźników niezawodności zasilania w Niemczech. Autor kieruje również słowa podziękowania pod adresem Pani Anny Ołędzkiej za wyrażenie zgody na wykorzystanie w artykule wyników zawartych w jej pracy dyplomowej magisterskiej dotyczącej niezawodności zasilania w mikrosieciach [18].

Autor: prof. dr hab. inż. Mirosław Parol, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: miroslaw.parol@pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Kornatka M.: Ocena niezawodności krajowych sieci średniego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 3, 176-179
- [2] Kornatka M.: Analiza wskaźników niezawodnościowych krajowych operatorów systemu dystrybucyjnego. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 5, 331-337
- [3] Parol M.: Analiza wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej na poziomie sieci dystrybucyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 8, 122-126
- [4] Kornatka M.: Automatykacja pracy sieci średniego napięcia a poziom ich niezawodności. *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 8, 109-112
- [5] Parol M.: Analiza poziomu niezawodności zasilania odbiorców w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 3, 1-6, DOI: 10.15199/48.2017.03.01
- [6] Tomczykowski J.: Kluczowa rola linii SN w ocenie niezawodności sieci dystrybucyjnych. *Energia Elektryczna*, 8/2019, 22 – 24
- [7] Tomczykowski J.: Niezawodność sieci na poziomie rejonów energetycznych. *Energia Elektryczna*, 6/2020, 21 – 24
- [8] II Krajowy Raport Benchmarkingowy nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowych i dystrybucyjnych. Akademia Górniczo – Hutnicza, Kraków czerwiec 2021
- [9] 7th CEER-ECRB Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply. Council of European Energy Regulators, 2022
- [10] Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik. VDE FNN, 13.09.2023
- [11] Monitoringbericht 2016 - 2022; www.bundesnetzagentur.de
- [12] Energetyka, dystrybucja, przesył. Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. Raport z roku 2023 za rok 2022, Poznań 2023.
- [13] Polityka energetyczna Polski do 2040 r., Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r., Monitor Polski, poz. 264 z 2021 roku
- [14] Sprawozdanie G-10.5 o stanie urządzeń elektrycznych za 2022 rok, Agencja Rynku Energii S.A., www.are.waw.pl
- [15] Tomczykowski J.: Analiza zmian sieci dystrybucyjnej w latach 2016 – 2020. *Energia Elektryczna*, 9/2021, 15 - 18
- [16] Regulacja jakościowa w latach 2018-2025 dla Operatorów Systemów Dystrybucyjnych. Urząd Regulacji Energetyki, Warszawa, wrzesień 2018
- [17] Kornatka M.: Prognozowanie kluczowych wskaźników efektywnościowych w modelu regulacji jakościowej. *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 3, 48-51
- [18] Ołędzka A.O.: Niezawodność zasilania w mikrosieciach niskiego napięcia prądu przemiennego. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Warszawska Wydział Elektryczny, Warszawa 2022
- [19] *Mikrosieci niskiego napięcia prądu przemiennego*. Pod redakcją Mirosława Parola. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013
- [20] Costa P. M., Matos M. A.: Assessing the contribution of microgrids to the reliability of distribution network. *Electric Power System Research*, 79 (2009), 382-389