

doi:10.15199/48.2021.08.02

Awarie krajowych linii napowietrznych – wybrane aspekty

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane aspekty awarii w krajowych liniach napowietrznych. Przedstawiono charakterystykę krajowych linii napowietrznych. Omówiono awarie linii napowietrznych i ich skutki w kontekście zagrożenia bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej. Przedstawiono problematykę zapobiegania awariom linii napowietrznych, usuwania ich skutków i kosztów awarii. Dokonano oceny awaryjności krajowych linii napowietrznych.

Abstract. In this paper, some selected aspects of failures in national overhead lines are presented. Profile of national overhead lines is shown. Failures of national overhead lines and their effects in context of threat of electric power supply safety are described. The subject matter of prevention of failures of national overhead lines, deletion of their effects and costs of accidents is presented. Assessment of emergency of national overhead lines is performed. (**Failures of overhead lines in national electric power system – selected aspects**).

Słowa kluczowe: awaria, linia napowietrzna, sieć dystrybucyjna, bezpieczeństwo pracy, bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej.

Keywords: failure, overhead line, distribution grid, operation security, electric power supply safety.

Wprowadzenie

Linie elektroenergetyczne napowietrzne i kablowe stanowią ważny element sieciowej infrastruktury elektroenergetycznej obejmującej: sieć przesyłową 400 i 220 kV, sieć dystrybucyjną (tzw. wstępnego rozdziału) 110 kV oraz sieć dystrybucyjną (rozdzielczą) SN (6, 10, 15, 20 i 30 kV) i sieć nn (0,4 kV).

W kraju użytkowanych jest łącznie 829572 km linii elektroenergetycznych z czego: 14069 km linii 400 i 220 kV, 33757 km linii 110 kV, 311604 km linii SN oraz 470142 km linii niskiego napięcia [1]. Stanowi to odpowiednio: 1,7%, 4,1%, 37,6% i 56,6% łącznej ich długości.

Linie napowietrzne są urządzeniami napowietrznymi przeznaczonymi do przesyłania energii elektrycznej; Składają się z przewodów, izolacji, konstrukcji wsporczych (słupów), osprzętu oraz innych, wynikających ze sposobu

pracy linii, elementów. Stanowią obecnie prawie 99% linii 400, 220 i 110 kV, 73% linii SN i 65% linii nn pod względem długości [2]. Przy czym występuje ich duże zróżnicowanie na terenie kraju. W tabeli 1 przedstawiono udział linii napowietrznych dla 5-ciu kluczowych krajowych operatorów systemów dystrybucyjnych: PGE Dystrybucja S.A., TAURON Dystrybucja S.A., ENERGA-Operator S.A., ENEA Operator Sp. z o.o., oraz innogy Stoen Operator Sp. z o.o. [3]. W przypadku pierwszych czterech OSD z sieci dystrybucyjnych SN i nn zasilani są odbiorcy charakterystyczni zarówno dla obszarów miejskich, wiejskich, jak i przemysłowych. Natomiast innogy Stoen Operator Sp. z o.o. funkcjonuje głównie na obszarze miasta stołecznego Warszawy i zasila ze swojej sieci SN i nn odbiorców miejskich i przemysłowych.

Tabela 1. Charakterystyka linii elektroenergetycznych (w przeliczeniu na jeden tor) użytkowanych przez kluczowych krajowych operatorów systemów dystrybucyjnych na dzień 1.01.2019 [2]

	Obszar działalności [tys. km ²]	Liczba klientów [tys.]	Długość linii [km]	Udział linii napowietrznych
PGE Dystrybucja S.A.	122,43	5 402,20	WN – 10 263 SN – 112 418 nn – 168 300	WN – 99,2% SN – 80,5% nn – 72,3%
TAURON Dystrybucja S.A	57,07	5 597,54	WN – 11 114 SN – 65 157 nn – 111 108	WN -98,7% SN – 62,2% nn – 65,3%
ENEA Operator Sp. z o.o	58,21	2 588,90	WN – 5 339 SN – 45 871 nn – 53 726	WN – 99,4% SN – 73,1% nn – 50,7%
ENERGA-Operator S.A.	74,85	3 066,13	WN – 6 471 SN – 68 793 nn – 89 622	WN – 99,2% SN – 80,2% nn – 63,2%
innogy Stoen Operator Sp. z o.o.	0,51	1 038,42	WN – 507 SN – 7 827 nn – 7 054	WN – 71,6% SN – 3,6% nn – 18,7%

Charakterystyka krajowych linii napowietrznych

W krajowych liniach napowietrznych 400, 220 i 110 kV typowo, jako przewody robocze, stosuje się linkę stalowo-aluminiową (AFL) o stosunku przekroju aluminium do przekroju rdzenia stalowego wynoszącym 6:1 lub 8:1. Przekrój znamionowy aluminium zawiera się w granicach od 120 do 525 mm² przy czym typowy przekrój w liniach 110 kV wynosi 240 mm² natomiast w liniach 220 i 400 kV jest równy 525 mm² [4].

W liniach 400 kV stosowane są przewody wiązkowe, składające się z dwóch lub więcej linek utrzymywanych w stałej odległości od siebie.

W liniach wysokich i najwyższych napięć najbardziej rozpowszechnione są przewody stalowo-aluminiowe segmentowe ACSR. Ma to związek z ich prostą konstrukcją, niezawodnością, łatwością montażu oraz stosunkowo niską ceną. W sytuacji, kiedy wymagane jest zwiększenie obciążalności termicznej i prądowej istniejących linii napowietrznych, a konstrukcje wsporcze są w dobrym stanie, można zastosować przewody wysokotemperaturowe o małych zwisach (HTLS), przy czym o ich wyborze decyduje indywidualna analiza techniczno-ekonomiczna. Takie przewody charakteryzują się możliwością pracy w temperaturach około dwukrotnie

wyższych niż przewody typu AFL przy równoczesnym zachowaniu bezpiecznego zakresu zwisów [4]. Oplot tych przewodów wykonany jest ze stopów na bazie aluminium, z dodatkiem pierwiastków ziem rzadkich (głównie cyrkonu) lub z aluminium całkowicie wyżarzonego. Rdzeń stalowy zastąpiony został rdzeniem kompozytowym z mikrowłókien tlenkowych w osłonie aluminiowej lub z włókien szklanych i węglowych osadzonych w żywicy polimerowej. Kompozycja stopu aluminium z cyrkonem cechuje się przede wszystkim wysoką odpornością cieplną. Temperatura dopuszczalna pracy przewodów wysokotemperaturowych HTLS wynosi ponad 150°C i może osiągać nawet 250°C (temperatura pracy tradycyjnych przewodów stalowo-aluminiowych nie może przekraczać 80°C) [4].

W czasie modernizacji termicznej linii napowietrznych 400, 220 i 110 kV możliwe jest zastosowanie różnych przewodów: stopowych ze stopu AlMgSi (AALS), segmentowych (ACSR), stopowo-stalowych (AACSR), przewodów ze stopu aluminium z cyrkonem TAL, KTAL, ZTAL i XTAL odpowiednio o temperaturze pracy do: 150°C, 150°C, 210°C i 230°C oraz przewodów z aluminium całkowicie wyżarzonego 1350-O (ACCC, ACSS) [5]. Przykładowo, w dwutorowej linii 220 kV Kozienice – Piaseczno – Mory, ze względu na jej szczególne znaczenie w zasilaniu Warszawy, zdecydowano się na jednym torze zastosować przewód ACCC, a na drugim ACSS.

Przewody linii napowietrznych są zawieszane na odpowiednio zaprojektowanych konstrukcjach wsporczych. W liniach NN i WN stosowane są typowe serie słupów kratowych, wykonanych z odpowiednich kształtowników stalowych. W ostatnich latach rozpoczęto stosowanie słupów pełnościennych, tzw. rurowych, o przekroju koła lub wieloboku [6].

Przewody są mocowane do konstrukcji wsporczych za pomocą izolatorów, wykonywanych z porcelany lub szkła, przy czym obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój izolatorów kompozytowych, składających się z rdzenia nośnego, najczęściej szklano-epoksydowego i zewnętrznej osłony izolacyjnej, wykonanej zwykle z hydrofobowego elastomeru syntetycznego.

Linie napowietrzne SN są wykonane jako linie z przewodami wielożyłowymi stalowo-aluminiowymi gołymi lub niepełnoizolowanymi w powłoce z polietylenu usieciowanego [7]. Przewody są mocowane na izolatorach, które są przytwierdzone do poprzeczników na słupach stalowych lub strunobetonowych. Stosowanie przewodów niepełnoizolowanych ogranicza występowanie w liniach zwarć jednofazowych, spowodowanych stykaniem lub opadaniem gałęzi drzew na przewód.

W krajowych liniach napowietrznych SN typowo, jako przewody robocze, stosuje się linkę stalowo-aluminiową (AFL) o stosunku przekroju aluminium do przekroju rdzenia stalowego wynoszącym 6:1. Przekrój znamionowy aluminium zawiera się w granicach od 35 do 120 mm² przy czym typowy przekrój w liniach wiejskich wynosi 35 mm² natomiast w liniach magistralnych SN jest równy 70 mm². W obszarach zadrzewionych lub w innych uzasadnionych przypadkach stosuje się przewody w osłonie izolacyjnej według fińskiego systemu PAS, o zmniejszonej odległości pomiędzy przewodami fazowymi (AAsXS, AAsXSn /wersja uodporniona na rozprzestrzenianie się płomienia/) o przekrojach żyły roboczej od 35 do 240 mm² [7].

Linie napowietrzne nn są wykonane jako jednotorowe lub dwutorowe linie z przewodami wielożyłowymi aluminiowymi gołymi lub izolowanymi [7]. Przewody są mocowane na izolatorach, które są przytwierdzone do poprzeczników na słupach strunobetonowych wirowanych, stalowych rurowych lub drewnianych (na terenach górskich, leśnych i zadrzewionych).

W krajowych liniach napowietrznych niskiego napięcia typowo, jako przewody robocze, stosuje się w starszych rozwiązaniach gołe przewody aluminiowe (Al) oraz w nowych i zmodernizowanych rozwiązaniach izolowane przewody w postaci samonośnej wiązki złożonej z izolowanych linek aluminiowych (AsXS, AsXSn /wersja uodporniona na rozprzestrzenianie się płomienia/) w tzw. systemie czteroprzewodowym. Materiałem izolacyjnym jest polietylen usieciowany. Przekroje linek/przewodów wynoszą: 16, 25, 35, 50, 70 lub 95 mm². Stosowanie przewodów izolowanych wraz z odpowiednim osprzętem pozwala na uproszczenie budowy linii napowietrznej, zmniejszenie liczby zakłóceń oraz zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji i pewności pracy linii. W przypadku zerwania i opadnięcia przewodów izolowanych na ziemię warstwa zabezpieczeniowa chroni ludzi i zwierzęta przed porażeniem prądem elektrycznym. Ponadto takie przewody w stosunku do tradycyjnych rozwiązań (Al) mniej obciążają słupy podczas występowania wiatru lub warunków sadziowych, co pozwala w modernizowanych liniach napowietrznych zwiększyć przekrój przewodów bez konieczności wymiany słupów.

Awarie krajowych linii napowietrznych

Awarie linii napowietrznych mogą być spowodowane wieloma czynnikami. Należą do nich niekorzystne warunki atmosferyczne, przyczyny techniczne i inne (błędy ludzkie, działanie osób trzecich, zwierząt i ptaków).

Niekorzystne warunki atmosferyczne dotyczą zasadniczo sytuacji wystąpienia anomalii pogodowych i ekstremalnych warunków atmosferycznych, do których zalicza się: śnieżyce, opady mokrego śniegu, oblodzenia, orkany, wichury i burze z wyładowaniami atmosferycznymi. W ich wyniku mogą się m.in. przewracać lub łamać drzewa spoza normatywnych pasów wycinek, łamać konary i gałęzie drzew, zarzucać gałęzie i inne przedmioty powodując trwałe uszkodzenia linii napowietrznych (zrywanie przewodów, łamanie słupów, uszkodzenie izolatorów) oraz zwarcia. Prowadzi to do awaryjnych wyłączeń linii napowietrznych o charakterze trwałym lub przemijającym.

Ekstremalne nagłe zjawiska pogodowe o dużym nasileniu coraz częściej występują na terenie kraju.

Przyczyny techniczne mają związek ze starzeniem/zmęczeniem elementów infrastruktury sieciowej np. zerwanie/uszkodzenie przewodów, izolatorów, uszkodzenie wyłączników, eksplozowanie przekładników, błędne działania/uszkodzenia zabezpieczeń.

Inne przyczyny obejmują działania i zdarzenia u odbiorców, działania osób postronnych, mechaniczne uszkodzenia linii napowietrznych w trakcie prac budowlanych lub polowych, elementy obce na urządzeniach, zwierzęta i ptaki.

Zagrożenia i skutki awarii krajowych linii napowietrznych

Awarie linii napowietrznych stanowią potencjalnie duże zagrożenie bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej. Zagrożenie to potęguje się w sytuacji wystąpienia ekstremalnych nagłych zjawisk pogodowych o dużym nasileniu. W takich warunkach skala i rozległość awarii może być znaczna i nabiera ona charakteru masowego. Efekt ten zwiększa się w sytuacji przewagi linii napowietrznych przebiegających przez tereny zalosone. Dodatkowo panujące często wówczas trudne warunki atmosferyczne (burze z wyładowaniami atmosferycznymi, silny porywisty wiatr, intensywne opady deszczu, intensywne opady śniegu) utrudniają dojazd pogotowia energetycznego na miejsce awarii i prace przy użyciu

ciężkiego sprzętu (dźwigów, podnośników), co skutkuje długimi czasami usuwania awarii.

W dalszej części przedstawiono awarie linii napowietrznych spowodowane ekstremalnymi warunkami atmosferycznymi w okresie 2017-2019.

W 2017 r. do najistotniejszych w skutkach należały awarie sieciowe spowodowane przez ekstremalne warunki atmosferyczne takie jak: gwałtowna burza w nocy 11-12.08.2017, orkan „Ksawery” w dniach 5–8.10.2017, orkan „Grzegorz” w dniach 29–30.10.2017 i intensywne opady mokrego śniegu na terenie Śląska w dniach 18-19.04.2017.

Wielkość i skala tych awarii w sieci przesyłowej była znaczna. Przykładowo, nawałnica w okresie 11/12.08.2017 r. spowodowała awaryjne wyłączenie 6 napowietrznych linii przesyłowych jednotorowych 220 kV i 3 torów napowietrznych linii przesyłowych dwutorowych 220 kV i 400 kV, a orkan „Ksawery” w okresie 5–6.10.2017 r. spowodował wyłączenia awaryjne aż 16 napowietrznych linii przesyłowych jednotorowych 220 kV i 400 kV, 6 torów napowietrznych linii przesyłowych dwutorowych 220 kV i jednego autotransformatora 220/110 kV [8].

Wielkość i skala tych awarii w sieci dystrybucyjnej była ogromna. Przykładowo, gwałtowna burza w nocy 11-12.08.2017 na obszarze dystrybucji ENEA Operator doprowadziła do uszkodzenia w kulminacyjnym momencie 24 linii 110 kV i 313 linii SN i pozbawiła zasilania 14 stacji 110 kV/SN (GPZ) i 7268 stacji elektroenergetycznych SN/nn [8]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły ok. 250 tys. odbiorców. Natomiast na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja doprowadziła do uszkodzenia 10 linii 110 kV i 65 linii SN i pozbawiła zasilania 2 stacje 110 kV/SN (GPZ) i 1412 stacji elektroenergetycznych SN/nn [8]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły ok. 70 tys. odbiorców.

Orkan „Ksawery” na obszarze dystrybucji ENEA Operator doprowadził do uszkodzenia 48 linii 110 kV i wielu linii SN oraz pozbawił zasilania 46 stacji 110 kV/SN (GPZ) i 15000 stacji elektroenergetycznych SN/nn [8]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły ponad 600 tys. odbiorców. Natomiast na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja doprowadził do uszkodzenia 73 linii 110 kV i 484 linii SN oraz pozbawił zasilania 30 stacji 110 kV/SN (GPZ) i 6063 stacji elektroenergetycznych SN/nn [8]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły 320 tys. odbiorców.

Orkan „Grzegorz” na obszarze dystrybucji ENEA Operator doprowadził do uszkodzenia 12 linii 110 kV i 300 linii SN oraz pozbawił zasilania 3 stacje kV/SN (GPZ) i 3754 stacji elektroenergetycznych SN/nn [8]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły ponad 160 tys. odbiorców. Na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja natomiast doprowadził do uszkodzenia 37 linii 110 kV i 244 linii SN i pozbawił zasilania 8 stacji 110 kV/SN (GPZ) i 3499 stacji elektroenergetycznych SN/nn [8]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły 194 tys. odbiorców.

Intensywne opady mokrego śniegu na terenie Śląska (głównie w okolicach Częstochowy i Kłobucka) w dniach 18-19.04.2017 (w połączeniu z porywistym wiatrem) na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja doprowadziły do uszkodzenia 13 linii 110 kV i 110 linii SN i pozbawiły zasilania 7 stacji 110 kV/SN (GPZ) i 1850 stacji elektroenergetycznych SN/nn [8]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły 114 tys. odbiorców.

Siła nawałnic i orkanów, zwłaszcza w odniesieniu do sieci dystrybucyjnej, była bardzo duża i doprowadziła do zniszczenia lub uszkodzenia wielu linii napowietrznych: 110 kV, SN i nn, a skala koniecznych napraw była ogromna i porównywalna z koniecznością odtworzenia nowej

infrastruktury sieciowej. Tylko na terenie najbardziej dotkniętego województwa pomorskiego nawałnica w okresie 11-12.08.2017 r. spowodowała uszkodzenie 180 km linii napowietrznych średnich i niskich napięć oraz 2100 słupów elektroenergetycznych [8]. Niemniej jednak wymienione awarie były możliwe do likwidacji środkami będącymi w dyspozycji operatorów systemów dystrybucyjnych.

Przedstawione awarie związane z liniami napowietrznymi, a spowodowane ekstremalnymi warunkami atmosferycznymi nie wyczerpują wszystkich zdarzeń, które miały miejsce w 2017 r. Przykładowo, na obszarze działania operatora systemu dystrybucyjnego Enea Operator wystąpiło łącznie 47460 awarii sieciowych wywołujących przerwy w dostarczaniu energii elektrycznej [8]. Wśród nich były 143 zdarzenia w sieci dystrybucyjnej 110 kV, 12512 zdarzeń w sieci SN oraz 34805 zdarzeń w sieci niskiego napięcia [8]. Natomiast w przypadku operatora TAURON Dystrybucja na terenie jego działania wystąpiły łącznie 74332 awarie sieciowe: 170 w sieci 110 kV, 30992 w sieci SN oraz 43170 w sieci niskiego napięcia [8]. Szacunkowa wartość energii elektrycznej niedostarczonej w 2017 r. w wyniku tych awarii wyniosła około 29,9 GWh (Enea Operator) i 7,8 GWh (TAURON Dystrybucja) [8].

W 2018 r. występowało znacznie mniej gwałtownych burz i niekorzystnych ekstremalnych zjawisk pogodowych niż w 2017 r. Niemniej jednak miały one miejsce. Do najistotniejszych w skutkach należały awarie sieciowe spowodowane przez ekstremalne warunki atmosferyczne takie jak: orkan „Fryderyka” w dniach 18–19.01.2018, gwałtowne burze w dniach 21-22.06.2018, wichura związana z układem niżu Fabienne w dniach 23-25.09.2018 i wichura w dniach 29-31.10.2018.

Orkan „Fryderyka” na obszarze dystrybucji ENEA Operator doprowadził do uszkodzenia 2 linii 110 kV i wielu linii SN oraz pozbawił zasilania 1853 stacji elektroenergetycznych SN/nn [9]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły ponad 48 tys. odbiorców.

Gwałtowne burze w czerwcu 2018 r. na obszarze dystrybucji ENEA Operator doprowadziły do uszkodzenia 5 linii 110 kV i 145 linii SN oraz pozbawiły zasilania 2227 stacji elektroenergetycznych SN/nn [9]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły ponad 77 tys. odbiorców.

Wichura we wrześniu 2018 r. na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja doprowadziła do uszkodzenia 14 linii 110 kV i wielu linii SN oraz pozbawiła zasilania 1748 stacji elektroenergetycznych SN/nn [9]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły 104 tys. odbiorców.

Wichura w październiku 2018 r. na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja doprowadziła do uszkodzenia 12 linii 110 kV i wielu linii SN, pozbawiła zasilania 676 stacji elektroenergetycznych SN/nn [9]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły 36 tys. odbiorców.

Przedstawione awarie związane z liniami napowietrznymi, a spowodowane ekstremalnymi warunkami atmosferycznymi nie wyczerpują wszystkich zdarzeń, które miały miejsce w 2018 r. Przykładowo, na obszarze działania operatora systemu dystrybucyjnego Enea Operator wystąpiło łącznie 33962 awarii sieciowych wywołujących przerwy w dostarczaniu energii elektrycznej [9]. Wśród nich były 33 zdarzenia w sieci dystrybucyjnej 110 kV, 8591 zdarzeń w sieci SN oraz 35338 zdarzeń w sieci niskiego napięcia [9]. Natomiast w przypadku operatora TAURON Dystrybucja na terenie jego działania wystąpiły łącznie 61535 awarii sieciowych: 127 w sieci 110 kV, 27589 w sieci SN oraz 33818 w sieci niskiego napięcia [9]. Szacunkowa ilość energii elektrycznej niedostarczonej w 2018 r. w wyniku tych awarii wyniosła około 7,2 GWh (Enea Operator) i 3,5 GWh (TAURON Dystrybucja) [9].

W 2019 r. występowały podobnie jak 2018 r. gwałtowne burze i niekorzystne ekstremalne zjawiska pogodowe. Do najistotniejszych w skutkach należały awarie sieciowe spowodowane przez ekstremalne warunki atmosferyczne takie jak: wichura związana z układem niżu Eberhard w dniach 10-11.03.2019 i gwałtowne burze z wichurami w dniach 30.09-01.10.2019.

Gwałtowne burze z wichurami na przełomie września i października na obszarze dystrybucji ENEA Operator doprowadziły do uszkodzenia 8 linii 110 kV i 218 linii SN oraz pozbawiły zasilania 2874 stacje elektroenergetyczne SN/nn [3]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły ponad 91 tys. odbiorców.

Wichura w marcu 2019 r. na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja doprowadziła do uszkodzenia 57 linii 110 kV i wielu linii SN oraz pozbawiła zasilania 6744 stacje elektroenergetyczne SN/nn [3]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły 422 tys. odbiorców.

Gwałtowne burze z wichurami na przełomie września i października 2019 r. na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja doprowadziła do uszkodzenia 13 linii 110 kV i wielu linii SN oraz pozbawiła zasilania 924 stacje elektroenergetyczne SN/nn [3]. Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły 54 tys. odbiorców.

Przedstawione awarie związane z liniami napowietrznymi, a spowodowane ekstremalnymi warunkami atmosferycznymi nie wyczerpują wszystkich zdarzeń, które miały miejsce w 2019 r. Przykładowo, na obszarze działania operatora systemu dystrybucyjnego Enea Operator wystąpiło łącznie 43520 awarii sieciowych wywołujących przerwy w dostarczaniu energii elektrycznej [3]. Wśród nich było 14 zdarzeń w sieci dystrybucyjnej 110 kV, 17114 zdarzeń w sieci SN oraz 26392 zdarzeń w sieci niskiego napięcia [3]. Natomiast w przypadku operatora TAURON Dystrybucja na terenie jego działania wystąpiły łącznie 62394 awarie sieciowe: 122 w sieci 110 kV, 27383 w sieci SN oraz 34889 w sieci niskiego napięcia [3]. Szacunkowa ilość energii elektrycznej niedostarczonej w 2019 r. w wyniku tych awarii wyniosła około 8,2 GWh (Enea Operator) i 4,7 GWh (TAURON Dystrybucja) [3].

Zapobieganie awariom krajowych linii napowietrznych

Zapobieganie awariom linii napowietrznych wiąże się z jednej strony z działaniami zmierzającymi do ograniczenia ryzyka wystąpienia takich awarii, a drugiej do ograniczenia przerw w dostawie energii elektrycznej przez nie wywołanymi. Obejmują one: właściwą, systematyczną i planową eksploatację napowietrznej sieci elektroenergetycznej, modernizację infrastruktury sieciowej, realizację działań ukierunkowanych na poprawę odporności sieci na niekorzystne (ekstremalne) zjawiska atmosferyczne, usprawnienie procesu lokalizacji i usunięcia awarii [10].

Właściwa eksploatacja napowietrznej sieci elektroenergetycznej umożliwia ograniczenie wpływu niekorzystnych warunków atmosferycznych poprzez planową i systematyczną realizację określonych zabiegów eksploatacyjnych. Należą do nich m.in.: oględziny linii napowietrznych, okresowa wycinka drzew i krzewów pod liniami napowietrznymi, przeglądy linii i urządzeń elektroenergetycznych.

Modernizacja infrastruktury sieciowej ma na celu poprawę wskaźników niezawodności pracy sieci elektroenergetycznej dotyczących czasu trwania przerw w dostarczaniu energii elektrycznej (SAIDI, SAIFI). Zasadniczo obejmuje modernizację długich ciągów napowietrznych linii SN i nn z wykorzystaniem najnowszych rozwiązań technicznych i technologicznych dla tych linii w lokalizacjach, gdzie występuje zwiększone prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przy ekstremalnych

warunkach pogodowych lub w innych miejscach wrażliwych na awarie. Taka modernizacja wiąże się z przebudową linii napowietrznych na linie kablowe lub wyprowadzeniem linii napowietrznych z terenów leśnych. Zwiększenie udziału linii kablowych wpływa na zmniejszenie awaryjności sieci elektroenergetycznych i przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa dostaw i niezawodności zasilania. Stanowi jeden z podstawowych czynników wpływających na wielkość wskaźników SAIDI i SAIFI [11]. Takie linie są bowiem w mniejszym stopniu narażone na działanie warunków atmosferycznych oraz uszkodzenia mechaniczne niż linie napowietrzne. Dlatego tak istotny jest znaczny wzrost udziału linii kablowych, szczególnie w przypadku linii średniego napięcia, który obecnie kształtuje się w kraju na poziomie 35%. W ostatnich latach długość linii kablowych SN zwiększa się o około 2 tys. km rocznie [12]. Jest to jednak poziom daleko nie wystarczający. W raporcie „Krajowy plan automatyzacji sieci elektroenergetycznej oraz zmiany struktury sieci z technologii linii napowietrznych na kablowe” opracowanym przez PTPiREE przeprowadzono analizy dotyczące uzyskania poziomu 75% udziału skablowania sieci SN w 2040 r. [12]. Łączny poziom nakładów operatorów systemów dystrybucyjnych oszacowano na poziomie 47,6 mld zł, przy obecnych założeniach i możliwościach inwestycyjnych przeznaczenia na ten cel nakładów na poziomie 12,6 mld zł [12].

Realizacja działań ukierunkowanych na poprawę odporności sieci na niekorzystne (ekstremalne) zjawiska atmosferyczne oraz usprawnienie procesu lokalizacji i usunięcia awarii pozwala na ograniczenie rozmiarów awarii w sieciach napowietrznych i czasu ich trwania. Działania te w odniesieniu do sieci dystrybucyjnej obejmują: wymianę przewodów gołych na linie kablowe i niepełnoizolowane w sieci SN i izolowane w sieci niskiego napięcia, automatyzację sieci SN, stosowanie systemów sterowania i nadzoru (dyspozytorskich), wdrożenie łączności cyfrowej, zwiększenie możliwości rekonfiguracyjnych sieci SN i modernizację stacji elektroenergetycznych SN/nn [10]. Przy czym wymiana przewodów w znacznym stopniu ogranicza liczbę awarii spowodowanych przez drzewa i spadające konary i gałęzie.

Ograniczenie przerw w dostarczaniu energii elektrycznej na skutek awarii linii napowietrznych wymaga, z jednej strony, aby prace w zakresie lokalizacji miejsca wystąpienia uszkodzeń w sieci, wykonania niezbędnych przełączeń oraz naprawcze dla przywrócenia zasilania odbiorcom były podejmowane niezwłocznie po wystąpieniu awarii, a z drugiej, aby ekipy serwisowe szybko i sprawnie usuwały wspomniane awarie. Konieczna jest właściwa praca służb dyspozytorskich, serwisowych, pogotowia energetycznego i stosowanie się do opracowanej i ustalonej przez właściwego operatora systemu instrukcji działania w sytuacji wystąpienia sytuacji awaryjnej. Pomocne jest pełne zautomatyzowanie procesów realizowanych przez wspomniane służby.

W wielu przedsiębiorstwach sieciowych - operatorach systemów dystrybucyjnych funkcjonuje proces „Przygotowanie i realizacja zadań związanych z usuwaniem awarii”, który zapewnia właściwą współpracę służb dyspozytorskich prowadzących ruch sieci elektroenergetycznej ze służbami serwisu realizującymi działania naprawcze w obszarze infrastruktury sieciowej [9]. Służby dyspozytorskie, pełniąc całodobowe dyżury, dysponują zespołami pogotowia energetycznego, przeszkolonymi brygadami serwisowymi oraz doświadczoną kadrą inżynieryjno-techniczną. Proceduralnie postępowanie przy likwidowaniu stanów awaryjnych na sieci dystrybucyjnej obejmujące awarie linii napowietrznych, w tym postępowanie w przypadku wystąpienia awarii

masowej jest określone i uregulowane we właściwych instrukcjach. Należą do nich: „Instrukcja postępowania przy likwidacji stanów awaryjnych występujących w sieci elektroenergetycznej” oraz „Instrukcja postępowania w przypadku wystąpienia awarii masowej w sieci dystrybucyjnej” [8].

W celu zachowania ciągłości dostaw energii elektrycznej do odbiorców podejmuje się, jeśli jest to konieczne, określone działania takie jak zasilanie wydzielonej sieci elektroenergetycznej z agregatów prądowców czy wykorzystanie serwisowych mobilnych linii kablowych. Te ostatnie składają się z mobilnego zestawu linii kablowej (z kablem wzmocnionym dodatkową izolacją zewnętrzną), umocowanego na bębnie, na przewoźnej przyczepie i przystosowanego do wielokrotnego zwijania i rozwijania kabla. Wykorzystywane są przy tworzeniu tymczasowego zasilania w energię elektryczną. Taka linia kablowa tymczasowo ułożona na ziemi nie wymaga pozwoleń na budowę. Dzięki temu ułożenie jej i włączenie w miejsce uszkodzonego odcinka sieci trwa stosunkowo krótko. Pozwala to na szybkie podjęcie działań naprawczych lub serwisowych przy ciągłym utrzymaniu dostaw energii elektrycznej do odbiorców.

Serwisowe mobilne linie kablowe są bardzo pomocne przy usuwaniu awarii linii napowietrznych SN. W sytuacji, gdy fragment takiej linii ulega uszkodzeniu, a przywrócenie zasilania do odbiorców będzie odległe w czasie, ze względu na wielkość uszkodzeń, to wówczas taka serwisowa linia kablowa tymczasowo zastępuje uszkodzony fragment linii.

W kontekście zachowania ciągłości dostaw energii elektrycznej ważne jest ponadto systematyczne zwiększanie zakresu prac realizowanych w technologii prac pod napięciem [10].

Usuwanie awarii linii napowietrznych jest realizowane przez właściwe służby/komórki przedsiębiorstw energetycznych – operatorów systemów dystrybucyjnych (pogotowie energetyczne, brygady serwisowe, brygady wykonawcze) oraz współpracujące z danym operatorem systemu zewnętrzne firmy wykonawcze. Służby te zostały wzmocnione i zreorganizowane. Wyposaża się je obok wyposażenia standardowego w dodatkowy niezbędny sprzęt w celu zwiększenia zakresu prac realizowanych przez te służby. Zasadniczo brygady pogotowia energetycznego wyposażone są w sprzęt ochronny, materiały eksploatacyjne, mierniki, narzędzia zwykłe, narzędzia do pracy pod napięciem oraz agregat prądowców i elektronarzędzia. Ponadto często na wyposażeniu znajduje się pilarka łańcuchowa (spalinowa) i sekatory na drążkach, co jest istotne w kontekście usuwania złamań drzew, konarów, gałęzi, które np. upadły w wyniku wichury czy orkanu na linie napowietrzne.

Ważny element poprawy jakości realizowanych usług serwisowych i naprawczych stanowi wyposażenie służb w specjalistyczne samochody umożliwiające sprawne poruszanie się ekip serwisowych i pogotowia energetycznego w trudnym terenie czasami w ekstremalnych warunkach pogodowych i szybkie dotarcie elektryków do uszkodzonych linii i urządzeń elektroenergetycznych oraz bezpieczną pracę przy przywracaniu zasilania. Takie pojazdy posiadają specjalistyczną zabudowę i dodatkowe wyposażenie (np. podnośniki, wyciągarki) i są przystosowane do jazdy w trudnym terenie. W terenie wiejskim czy zalesionym dojazd do uszkodzonych linii i urządzeń elektroenergetycznych trwa często dłużej niż sama naprawa.

Likwidacja awarii w liniach napowietrznych często wiąże się z koniecznością wykonywania prac naprawczych przez elektryków na wysokościach, w miejscach trudnodostępnych. Wymaga to zastosowania

odpowiedniego sprzętu, który umożliwi efektywną i komfortową realizację takich prac przy zachowaniu bezpieczeństwa. Najczęściej na wyposażeniu służb serwisowych i pogotowia energetycznego znajdują się podnośniki koszone przegubowo-teleskopowe lub hydrauliczne zamontowane na specjalistycznych samochodach. Pozwalają one na dotarcie na miejsce awarii i realizację prac w dużym zakresie wysokości roboczych i wysięgu bocznego.

Zasady postępowania w przypadkach wystąpienia wzmoczonych awarii sieciowych określone są w procedurze „Zasady postępowania w sytuacji kryzysowej spowodowanej awariami masowymi” stosowanej w wielu przedsiębiorstwach energetycznych [9]. Na jej podstawie m.in. poszczególne oddziały przedsiębiorstwa zawierają porozumienia z wykonawcami zewnętrznymi w zakresie gotowości do współpracy przy usuwaniu awarii w sieci dystrybucyjnej.

Skala awarii spowodowanych ekstremalnymi nagłymi zjawiskami atmosferycznymi o dużym nasileniu wymaga często zmobilizowania wszystkich dostępnych ekip. Przykładowo, przy usuwaniu skutków gwałtownej burzy w nocy 11-12.08.2017 na obszarze dystrybucji ENEA Operator zaangażowanych było 200 brygad naprawiających uszkodzenia i dokonujących przełączeń na sieci elektroenergetycznej [8]. Łącznie z osobami dozoru i dyspozytorami było to łącznie prawie 1000 osób. Przy naprawie sieci wykorzystano ze 120 podnośników i 61 dźwigów.

Usuwanie awarii krajowych linii napowietrznych

W przypadku wystąpienia awarii sieci napowietrznej, priorytet w usuwaniu mają awarie zagrażające życiu i zdrowiu. Obejmują one uszkodzenia linii napowietrznych w postaci złamań lub przewrócenia słupów, zerwania przewodów lub przewodów leżących na ziemi. Przy czym szczególnie priorytet w usuwaniu mają zerwane przewody w okolicach budynków mieszkalnych i skrzyżowań z drogami czy ulicami.

Następnie kolejność usuwania awarii odbywa się wg poziomu napięcia sieci. W pierwszej kolejności naprawiane są linie napowietrzne 110 kV, następnie SN i w ostatniej kolejności nn. Taki sposób postępowania umożliwia jak najszybsze przywrócenie napięcia jednocześnie dużym grupom odbiorców.

Prace w zakresie zlokalizowania miejsca wystąpienia uszkodzeń w sieci, wykonania niezbędnych przełączeń oraz naprawy dla przywrócenia zasilania odbiorcom są podejmowane niezwłocznie po wystąpieniu awarii przez służby serwisowe przedsiębiorstw energetycznych i współpracujących zewnętrznych firm wykonawczych.

Skutki ilościowe awarii

Koszty awarii linii napowietrznych są znaczne, szczególnie w sytuacji wystąpienia anomalii pogodowych i ekstremalnych warunków atmosferycznych. Wówczas dochodzi do zniszczenia lub uszkodzenia wielu odcinków napowietrznych linii elektroenergetycznych 110 kV, SN i nn. Skala koniecznych napraw jest ogromna i często porównywalna z koniecznością odtworzenia nowej infrastruktury sieciowej.

Ponadto dochodzi do znacznych ograniczeń w dostawie energii elektrycznej. Przykładowo, na obszarze dystrybucji ENEA Operator gwałtowna burza w nocy 11-12.08.2017 pozbawiła zasilania ok. 250 tys. odbiorców, orkan „Ksawery” w dniach 5–8.10.2017 - 600 tys. odbiorców, orkan „Grzegorz” w dniach 29–30.10.2017 - 160 tys. odbiorców, orkan „Fryderyk” w dniach 18–19.01.2018 - 48 tys. odbiorców, gwałtowne burze w dniach 21-22.06.2018 -

77 tys. odbiorców, a gwałtowne burze z wichurami w dniach 30.09-01.10.2019 - 91 tys. odbiorców [3,8,9]. Natomiast na obszarze dystrybucji TAURON Dystrybucja tylko wymienione zjawiska pogodowe w 2017 r. pozbawiły zasilania odpowiednio: 70 tys., 320 tys. odbiorców i 194 tys. odbiorców [8]. Szacunkowa ilość energii elektrycznej niedostarczonej w wyniku awarii sieciowych, spowodowanych w znacznym stopniu przez niekorzystne (ekstremalne) warunki atmosferyczne, wyniosła w odniesieniu do spółki Enea Operator kolejno w latach 2017,

2018 i 2019 odpowiednio: 29,9 GWh, 7,2 GWh i 8,2. GWh. Dla spółki TAURON Dystrybucja było to natomiast: 7,8 GWh, 3,5 GWh i 4,7GWh [3,8,9]. W skali całego kraju ilości energii niedostarczonej do odbiorców w okresie 2017-19. na skutek awarii sieciowych przedstawiono w tabeli 2.

Głównymi elementami kosztów awarii linii napowietrznych są koszty odtworzenia infrastruktury sieciowej i przywrócenia jej normalnego funkcjonowania oraz koszty niedostarczonej energii elektrycznej na skutek tych awarii.

Tabela 2. Ograniczenia w dostawach energii elektrycznej do odbiorców w KSE w 2017, 2018 i 2019 r. [MWh] [3,8,9]

Wyszczególnienie	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Suma
Ograniczenia dostaw energii z powodu awarii w sieci dystrybucyjnej w 2017 r.	631	765	531	2765	83	4396	1068	13192	288	18592	971	5567	48849
- w tym z powodu złych warunków atmosferycznych	452	711	321	2516	59	4324	999	13061	125	18596	944	5329	47437
Ograniczenia dostaw energii z powodu awarii w sieci dystrybucyjnej w 2018 r.	967	312	54	46	113	3283	139	263	1082	765	254	2	7280
- w tym z powodu złych warunków atmosferycznych	948	161	0	37	0	3271	96	198	1070	749	0	0	6530
Ograniczenia dostaw energii z powodu awarii w sieci dystrybucyjnej w 2019 r.	119	77	6207	207	66	190	129	243	1547	289	38	24	9136
- w tym z powodu złych warunków atmosferycznych	86	71	5949	194	65	119	115	213	1436	276	3	0	8527

Wnioski

Awarie linii napowietrznych w kraju wynikają z głównie anomalii pogodowych i ekstremalnych warunków atmosferycznych obejmujących: śnieżyce, opady mokrego śniegu, oblodzenia, intensywne opady deszczu, orkany, wichury i burze z wyładowaniami atmosferycznymi. Przy czym niejednokrotnie następuje sprzężenie tych niekorzystnych warunków atmosferycznych. Ponadto wynikają z przyczyn technicznych i innych takich jak: błędy ludzkie, działanie osób trzecich, zwierząt i ptaków.

Awarie linii napowietrznych w sytuacji występowania niekorzystnych warunków atmosferycznych często przeradzają się w masowe awarie sieciowe o znacznej skali i rozległości, której efektem jest pozbawienie zasilania dziesiątek a nawet setek tysięcy odbiorców energii elektrycznej.

Zapobieganie awariom linii napowietrznych wiąże się z działaniami zmierzającymi do ograniczenia ryzyka wystąpienia takich awarii oraz do ograniczenia przerw w dostawie energii elektrycznej przez nie wywołanymi. Obejmują one: właściwą, systematyczną i planową eksploatację napowietrznej sieci elektroenergetycznej, modernizację infrastruktury sieciowej, realizację działań ukierunkowanych na poprawę odporności sieci elektroenergetycznej na niekorzystne (ekstremalne) zjawiska atmosferyczne oraz usprawnienie procesu lokalizacji i usunięcia awarii.

Ekstremalne warunki atmosferyczne, które wystąpiły w latach 2017-2019 spowodowały awarie linii napowietrznych w sieci przesyłowej i dystrybucyjnej o znacznej skali i wielkości, których skutki dotknęły dziesiątki i setki tysięcy odbiorców energii elektrycznej. Awarie te ujawniły konieczność podjęcia przez operatora systemu przesyłowego i operatorów systemów dystrybucyjnych różnych działań inwestycyjnych i eksploatacyjnych, które pozwolą na uniknięcie lub co najmniej na ograniczenie skali masowych awarii sieciowych w przypadku wystąpienia nagłych zjawisk atmosferycznych o dużym nasileniu w przyszłości.

Autor: dr hab. inż. Waldemar Dołęga, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław, E-mail: Waldemar.dolega@pwr.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Sprawozdanie z wyników monitorowania bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej za okres od dnia 1 stycznia 2015 do dnia 31 grudnia 2016. Minister Energii, Warszawa, 2017.
- [2] Raport Energetyka dystrybucja i przesył. PTPIREE, Poznań, maj 2019.
- [3] Sprawozdanie z działalności Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki w 2019 r. Urząd Regulacji Energetyki, Warszawa, kwiecień 2020.
- [4] Dołęga W., Obciążalność termiczna napowietrznych linii elektroenergetycznych 400, 220 i 110 kV. *Energetyka*, (2016), nr 1, s. 27–30.
- [5] Dołęga W., Planowanie rozwoju sieciowej infrastruktury elektroenergetycznej w aspekcie bezpieczeństwa dostaw energii i bezpieczeństwa ekologicznego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2013
- [6] Jaworski M., Wykorzystanie nowoczesnych konstrukcji wsporczych linii napowietrznych w celu ograniczenia pola elektromagnetycznego. *Przegląd Elektrotechniczny*, (2021), nr 2, s. 136–141.
- [7] Hudym V., Jagiełło A., Zasady projektowania i eksploatacji elektroenergetycznych linii napowietrznych. Podręcznik. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2016
- [8] Sprawozdanie z działalności Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki w 2017 r. Urząd Regulacji Energetyki, Warszawa, kwiecień 2018.
- [9] Sprawozdanie z działalności Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki w 2018 r. Urząd Regulacji Energetyki, Warszawa, kwiecień 2019.
- [10] Dołęga W., Bezpieczeństwo pracy krajowych sieci dystrybucyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, (2020), nr 3, s. 21–24.
- [11] Parol M., Analiza wskaźników dotyczących przerw w dostarczaniu energii elektrycznej na poziomie sieci dystrybucyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), nr 8, s. 122–126.
- [12] Raport Energetyka przesyłowa i dystrybucyjna. PTPIREE, Poznań, maj 2018.