

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4379

Bogumiła Wnukowska

Collegium Witelona Uczelnia Państwowa
Wydział Nauk Technicznych i Ekonomicznych
e-mail: bogumila.wnukowska@collegiumwitelona.pl

Czynniki wpływające na niezawodność pracy sieci dystrybucyjnych

STRESZCZENIE

Jednym z najważniejszych zagadnień związanych z niezawodnością zasilania odbiorców jest sprawne funkcjonowanie sieci dystrybucyjnej. W pracy omówiono najważniejsze elementy elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia. Przedstawiono przypadki awarii oraz ich wpływ na odbiorców energii elektrycznej oraz powstałe skutki. Praca zawiera analizę przyczyn powodujących awarie sieci dystrybucyjnej, dokonaną na podstawie dostępnych materiałów źródłowych oraz oddziaływanie awarii na odbiorców energii elektrycznej, a także na bezpieczeństwo energetyczne kraju.

Słowa kluczowe: niezawodność, energia, awaria.

1. Krajowy System Elektroenergetyczny

Krajowy System Elektroenergetyczny **KSE** to powiązane ze sobą urządzenia do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii, które tworzą sieć, zapewniając bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju¹. Sieć elektroenergetyczna **SEE** jest to zbiór wszystkich urządzeń oraz przewodów elektrycznych, zarówno napowietrznych, jak i kablowych, które są ze sobą ściśle powiązane. Celem ich działania jest zapewnienie ciągłego, bezawaryjnego zasilania odbiorców energią elektryczną. Współpracując ze sobą, mają za zadanie przesyłać, przetwarzać oraz rozdzielać energię elektryczną na określonym terenie. Napięcia stosowane w sieci elektroenergetycznej podlegają normalizacji. Oznacza to, że napięcia muszą być jednakowe w całym obszarze, aby sieć mogła prawidłowo funkcjonować i spełniać swoje zadanie. W ciągu lat normy te się zmieniały i aktualnie stosowane w Polsce napięcia to: 0,4 kV, 20 kV, 110 kV, 220 kV, 400 kV i 750 kV. Podział sieci elektroenergetycznych według stosowanych napięć to:

¹ https://energetyka.wnp.pl/notowania/zapotrzebowanie_mocy_kse

- sieci niskiego napięcia do 1 kV,
- sieci średniego napięcia 15 kV, 20 kV,
- sieci wysokiego napięcia 110 kV,
- sieci najwyższych napięć 220 kV, 400 kV i 750 kV.

Sieć elektroenergetyczną można podzielić również ze względu na pełnione funkcje na:

- sieć przesyłową,
- sieć rozdzielczą, zwaną także dystrybucyjną.

Sieci przesyłowe służą do przesyłu energii elektrycznej na duże odległości w skali krajowej oraz okręgowej. Są to sieci państwowe oraz sieci okręgowe. W sieciach przesyłowych stosowane są napięcia 220 kV, 400 kV i 750 kV i są to sieci najwyższych napięć².

1.1. Sieć dystrybucyjna

Sieć dystrybucyjna, inaczej sieć rozdzielcza, składa się z sieci średnich oraz wysokich napięć 20 kV i 110 kV. Są to najczęściej tzw. sieci rejonowe, ponieważ przebiegają w obszarze poszczególnych Rejonów Energetycznych³. Sieć dystrybucyjna służy do przesyłania energii bezpośrednio do większych skupisk odbiorców, np. zakładów przemysłowych, miast, osiedli itp.⁴ Do sieci dystrybucyjnej zalicza się także sieć niskiego napięcia 0,4 kV, która dostarcza energię elektryczną bezpośrednio do poszczególnych odbiorców indywidualnych, tj. gospodarstw domowych, zakładów itp. Za dystrybucję energii elektrycznej w danym regionie odpowiada Operator Systemu Dystrybucyjnego **OSD**. Do jego głównych zadań należy:

- zapewnienie bezpieczeństwa funkcjonowania całego systemu,
- odpowiednia eksploatacja sieci (naprawy, remonty, modernizacja, przeglądy, konserwacje, wymiany),
- dysponowanie mocą jednostek wytwórczych przyłączonych do sieci dystrybucyjnej,
- bilansowanie systemu,
- zarządzanie nim,
- rozwój systemu,
- użytkowanie i utrzymanie sieci dystrybucyjnej na danym obszarze,
- dbanie o zminimalizowanie przypadków wystąpienia awarii w systemie, m.in. poprzez wymienione wyżej działania eksploatacyjne⁵.

Na rys. 1.1 przedstawiono podział terytorialny między poszczególnymi operatorami systemu dystrybucyjnego w kraju.

² *Statystyka Elektroenergetyki Polskiej*, Agencja Rynku Energii, Warszawa 2022.

³ B. Wnukowska, *Efektywność energetyczna. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Collegium Wileńska Uczelnia Państwowa, Legnica 2023.

⁴ *Polskie Sieci Elektroenergetyczne*, Operator S.A., 2023.

⁵ *Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030*, Ministerstwo Aktywów Państwowych, 2022.



Ryc. 1.1. Obszary działania największych polskich operatorów OSD

Źródło: <https://pse.pl/-/raporty-rocz-1><https://www.energyinvestors.pl>

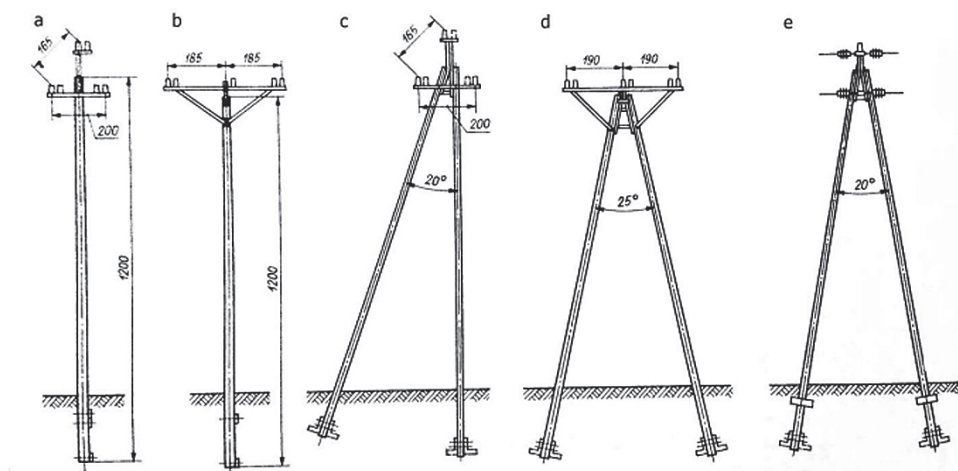
1.2. Linie napowietrzne jako element sieci dystrybucyjnej

Linie napowietrzne sieci elektroenergetycznej są to przewody elektryczne umieszczone na różnego typu konstrukcjach wsporczych, najczęściej w praktyce wykorzystuje się słupy elektroenergetyczne. Zaletą tych linii jest stosunkowo niski koszt budowy oraz łatwa dostępność, np. do uszkodzonych elementów linii napowietrznych w przypadku awarii. Jako wady można wyróżnić duży wpływ na walory estetyczne krajobrazu, zajmowanie szerokiego pasa terenu oraz narażenie na awarie wywołane warunkami atmosferycznymi. Linie napowietrzne stanowią większość wśród linii dystrybucyjnych. Podstawowe elementy linii napowietrznych to:

- przewody fazowe i odgromowe,
- konstrukcje wsporcze,
- izolatory,
- osprzęt liniowy,
- uziomy słupów.

Linie napowietrzne są jedno-, dwu- lub wielotorowe. Podstawowymi elementami linii napowietrznej są słupy, dla których wprowadzono oznaczenia literowe. Podstawowe typy słupów średniego napięcia (ryc. 1.2) to:

- przelotowy **P**,
- skrzyżowany **PS**,
- narożny **N**,
- odporowy **O**,
- krańcowy **K**,
- odporowo-narożny **ON**,
- rozgałęźny odporowo-krańcowy **ROK**,
- rozgałęźny krańcowo-krańcowy **RKK**,
- rozgałęźny narożno-krańcowy **RNK**,
- rozgałęźny odporowo-przelotowy **ROP**,
- rozgałęźny krańcowo-przelotowy **RKP**,
- rozgałęźny przelotowo-krańcowy **RPK**.



Ryc. 1.2. Słupy SN

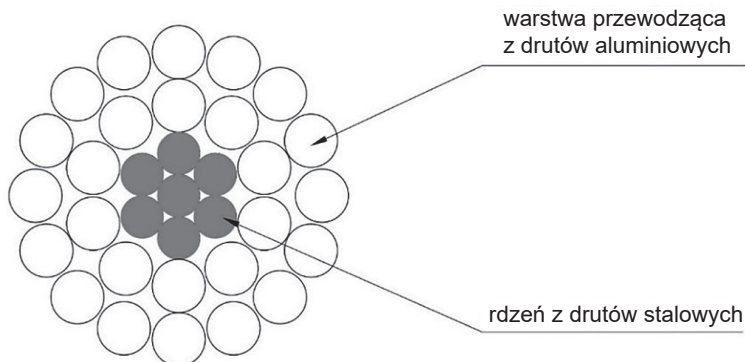
- a – słup przelotowy, trójkątny układ przewodów,
 b – słup przelotowy, płaski układ przewodów,
 c – słup narożny z podporą, trójkątny układ przewodów,
 d – słup narożny, płaski układ przewodów,
 e – słup odporowy, trójkątny układ przewodów

Źródło: J. Marzecki, *Optymalizacja i modernizacja elektroenergetycznych sieci*, PSE Operator, Warszawa 2017.

Linie napowietrzne prądu przemiennego można budować dla każdego rodzaju sieci elektroenergetycznych pod względem napięć nominalnych⁶. Wykorzystywane w liniach napowietrznych przewody wykonywane są jako linki skręcone z wielu drutów wykonanych najczęściej z aluminium lub ze stopów aluminium. Dla zwiększenia wytrzymałości

⁶ J. Marzecki, *Optymalizacja i modernizacja elektroenergetycznych sieci*, PSE Operator, Warszawa 2017.

mechanicznej przewodów w środku linek o większym przekroju umieszcza się stalowe druty. Na ryc. 1.3 pokazano w uproszczeniu budowę przewodu stalowo-aluminiowego.



Ryc. 1.3. Budowa tradycyjnego przewodu stalowo-aluminiowego

Źródło: J. Marzecki, *Optymalizacja i modernizacja elektroenergetycznych sieci...*

Rodzaje przewodów linii napowietrznych to:

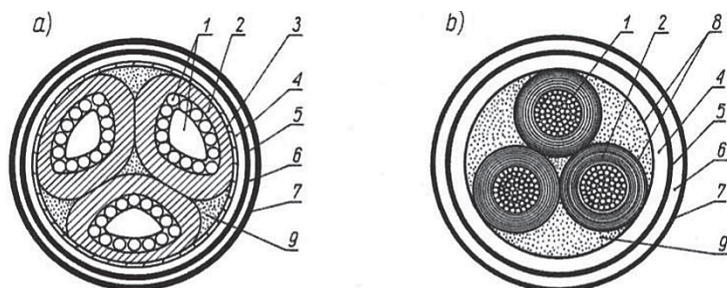
- **nieizolowane** – tzw. przewody gołe, nie posiadające izolacji żył roboczej,
- **izolowane** – przewody posiadające izolację żył roboczych,
- **pełnoizolowane** – przewody o izolacji żył roboczych dostosowanej do warunków pracy linii napowietrznej, której wytrzymałość elektryczna odpowiada napięciu znamionowemu linii,
- **pełnoizolowane samonośne** – przewody z izolowanymi żyłami roboczymi bez elementu nośnego,
- **pełnoizolowane podwieszane** – przewody z żyłami roboczymi izolowanymi i wydzielonym elementem nośnym, służącym do zapewnienia wytrzymałości mechanicznej na rozciąganie,
- **pełnoizolowane samonośne** – przewody, których wszystkie żyły robocze bez elementu nośnego spełniają funkcję nośną i wykonane są z drutów ze stopu aluminium.

1.3. Linie kablowe jako element sieci dystrybucyjnej

Kable są przewodami odznaczającymi się specjalną budową przeznaczonymi do prowadzenia linii pod powierzchnią ziemi. W konstrukcji kabla wyodrębnia się takie warstwy jak:

- **żyły** – wykonane z aluminium lub miedzi,
- **izolacja** – papierowa, olejowa, gazowa, polwinitowa lub polietylenowa,
- **wypełniacz** – materiał izolacyjny między izolacją żyły a powłoką kabla,
- **powłoka** – najczęściej z aluminium lub polwinitu, uszczelnia izolację kabla, niweluje dostęp wilgoci oraz nie dopuszcza do powstania pęcherzyków powietrza w izolacji,
- **pancerz** – druty lub taśmy stalowe owinięte wokół kabla, ochrania kabel przed uszkodzeniami mechanicznymi,
- **osłona zewnętrzna** – wykonana z polwinitu lub juty, osłania pancierz przed wpływem wilgoci.

W zależności od przeznaczenia kabla i miejsca jego położenia niektóre z ww. warstw konstrukcyjnych kabla mogą być rozbudowane lub pominięte. Na ryc. 1.4 przedstawiono ogólny schemat przekroju kabla.

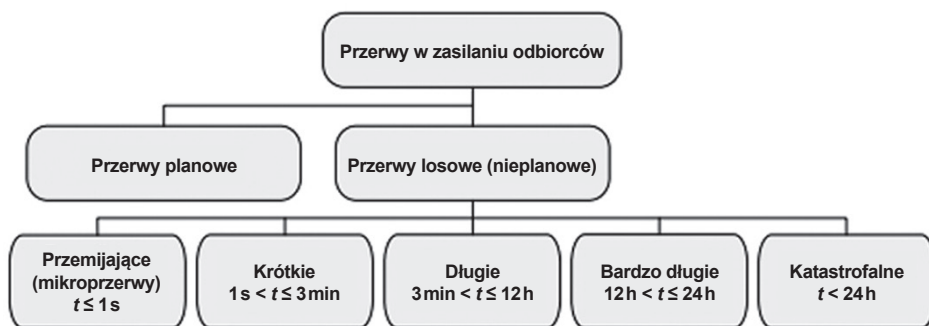


Ryc. 1.4. Budowa kabla: a) rdzeniowego, b) sektorowego; 1–żyły przewodzące, 2–izolacja żyły, 3–izolacja rdzeniowa, 4–powłoka, 5–osłona powłoki, 6–pancerz, 7–osłona zewnętrzna, 8–taśma metalizowana, 9–wypełnienie
Źródło: J. Marzecki, *Optymalizacja i modernizacja elektroenergetycznych sieci...*

2. Awaryjność sieci dystrybucyjnej

2.1. Kryteria podziału awarii sieci dystrybucyjnej

W zależności od wybranego kryterium można dokonać podziału awarii elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej. Klasyfikację przerw w zasilaniu odbiorców w energię przedstawiono na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1 Klasyfikacja przerw w zasilaniu odbiorców

Źródło: B. Wnukowska, D. Pisulska, *Awarie w sieciach dystrybucyjnych*, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2023.

Przerwy planowe w zasilaniu występują na skutek celowych wyłączeń, dokonywanych przez OSD i są zazwyczaj spowodowane koniecznością wykonania prac na urządzeniach elektroenergetycznych. Rozróżnia się następujące rodzaje wyłączeń planowych:

- **eksploatacyjne** – związane z pracami eksploatacyjnymi na wyłączonych elementach sieci,
- **remontowe** – związane z remontami wyłączonych elementów sieciowych,

- **inwestycyjne** – związane z instalowaniem nowych urządzeń w sieci, przyłączaniem nowo wybudowanych stacji oraz linii,
- **bezpieczeństwa** – związane z zapewnieniem bezpieczeństwa ludzi pracujących przy innych urządzeniach sąsiadujących z wyłączonymi.

W przypadku wyłączeń planowych wiadomość o porze i czasie ich trwania musi być wcześniej ustalona oraz przekazana odbiorcom energii z wyprzedzeniem czasowym pozwalającym na ich przygotowanie się do mającej nastąpić przerwy w zasilaniu. W sieciach dystrybucyjnych zasilających odbiorców komunalnych około 95% wyłączeń planowych stanowią wyłączenia **eksploatacyjne i remontowe**⁷. Obecnie coraz więcej prac remontowych i konserwacyjnych przeprowadza się przy wykorzystaniu techniki prac pod napięciem, co w zdecydowanym stopniu ogranicza liczbę oraz czas trwania przerw w zasilaniu odbiorców. Występowanie przerw w zasilaniu jest nieuchronne, gdyż sieci elektroenergetyczne wyposażone są w urządzenia o określonej niezawodności. W układach elektroenergetycznych może wystąpić kilka rodzajów przerw:

- wywołane uszkodzeniami elementów systemu elektroenergetycznego,
- spowodowane wadliwym działaniem zabezpieczeń i automatyki elektroenergetycznej,
- wywołane błędnymi operacjami łączeniowymi,
- wynikające z planowych prac remontowo-konserwacyjnych,
- związane z przeciążeniem elementów sieci elektroenergetycznych.

Im sieć dystrybucyjna jest bardziej złożona, tym większe jest prawdopodobieństwo, że niektórzy odbiorcy zostaną narażeni na przerwy w zasilaniu. Poprawę niezawodności zasilania można uzyskać poprzez zwiększenie nakładów na inwestycje, modernizację i rozwój sieci elektroenergetycznej. Przerwy w dostarczaniu energii elektrycznej w zależności od czasu ich trwania to:

- **przemijające**, tzw. mikroprzerwy – krócej niż 1 sekunda,
- **krótkie** – nie krócej niż 1 sekunda i nie dłużej niż 3 minuty,
- **długie** – nie krócej niż 3 minuty i nie dłużej niż 12 godzin,
- **bardzo długie** – nie krócej niż 12 godzin i nie dłużej niż 24 godziny,
- **katastrofalne** – trwające dłużej niż 24 godziny.

Innym kryterium jest podział ze względu na rodzaje awarii związanych z:

- przeciążeniami sieci,
- uszkodzeniami sprzętu elektroenergetycznego, np. transformatorów lub przewodów,
- zjawiskami atmosferycznymi, np. silnym wiatrem, burzami,
- działaniami człowieka, np. kradzieżami przewodów, nieumyślnymi uszkodzeniami sprzętu, sabotażami,
- innymi przyczynami.

Przerwy w dostawie energii mogą też być spowodowane:

- uszkodzeniami nierezzerwowanych elementów układu elektroenergetycznego,
- wadliwym działaniem zabezpieczeń i automatyki elektroenergetycznej,
- błędnymi czynnościami łączeniowymi dokonanymi przez personel obsługujący infrastrukturę,
- planowanymi pracami remontowymi lub modernizacyjnymi,
- deficytem mocy w systemie lub przeciążeniem elementów systemu.

⁷ B. Wnukowska, M. Mrugała, *Czynniki wpływające na poziom niezawodności zasilania zakładów produkcyjnych*, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2022.

2.2. Awaryjność sieci dystrybucyjnej w Polsce

Na obszarze dużej spółki dystrybucyjnej w kraju przeprowadzono badania zawodności linii napowietrznych i kablowych średniego napięcia SN obejmujących okres 15 lat (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Długości analizowanych linii średniego napięcia w kolejnych latach obserwacji wyrażone w km

Rok	1	2	3	4	5	6	7	8	8	10	11	12	13	14	15
Linie napowietrzne z przewodami gołymi	1050	1056	1065	1068	1080	1085	1090	1095	1110	1117	118	1185	1189	1189	1211
Linie napowietrzne z przewodami izolowanymi	19,6	19,6	19,6	19,6	19,8	24,1	31,1	31,1	34	40	41	57,8	70,69	82,47	91,32
Linie kablowe tradycyjne	319	317	316	314	314	314	313	312	313	312	308	308	307	307	304
Linie kablowe o izolacji z polietylenu PE	30	26	22	22	22	21	20	19	18	16	13	9	8	7	5
Linie kablowe o izolacji z polietylenu usieciwionego XLPE	22	33	46	55	60	69	69	83	91	95	103	114	128	133	141

Źródło: B. Wnukowska, D. Pisulka, *Awarie w sieciach dystrybucyjnych*, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2023.

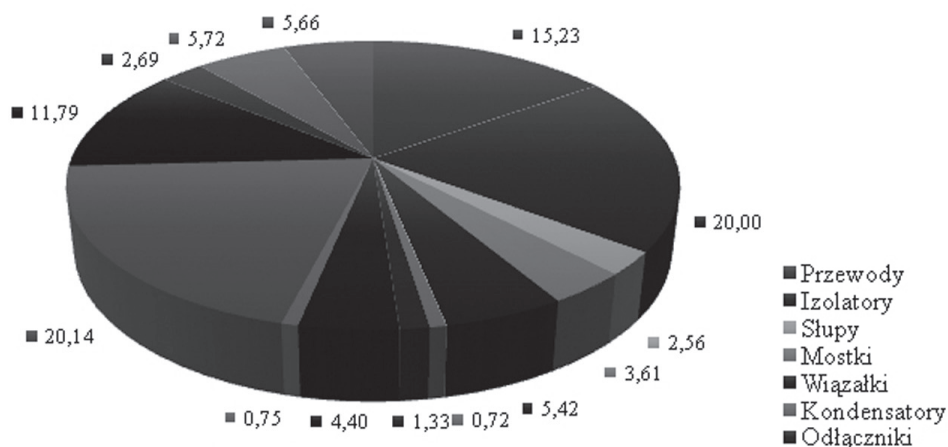
Na początku badań było w tej spółce łącznie 1069,6 km linii napowietrznych, w tym 19,6 km linii izolowanych oraz 371 km linii kablowych SN. Pod koniec obserwacji, liczby te kształtowały się następująco: 1302,32 km linii napowietrznych, w tym 91,32 km linii izolowanych oraz 450 km linii kablowych SN. Na podstawie danych uzyskanych z OSD w tabeli 2.2 przedstawiono liczbę awarii sieci SN w okresie 15 lat z podziałem na elementy sieci, które uległy uszkodzeniu.

W badanym okresie można wskazać, że najczęściej awarie dotyczyły izolatorów, ok. 20% awarii w sieci napowietrznej średniego napięcia. Najrzadziej w sieci średniego napięcia awarii ulegały kondensatory ok. 0,72% awarii linii napowietrznych SN. W liniach kablowych o izolacji z XLPE awarie stanowiły ok. 2,67% wszystkich awarii linii kablowych SN. Na ryc. 2.2 pokazano udział poszczególnych elementów sieci SN, które uległy awarii, a na ryc. 2.3 przedstawiono przyczyny awarii występujące w liniach napowietrznych średniego napięcia.

Tabela 2.2. Awarie sieci SN w okresie 15 lat obserwacji

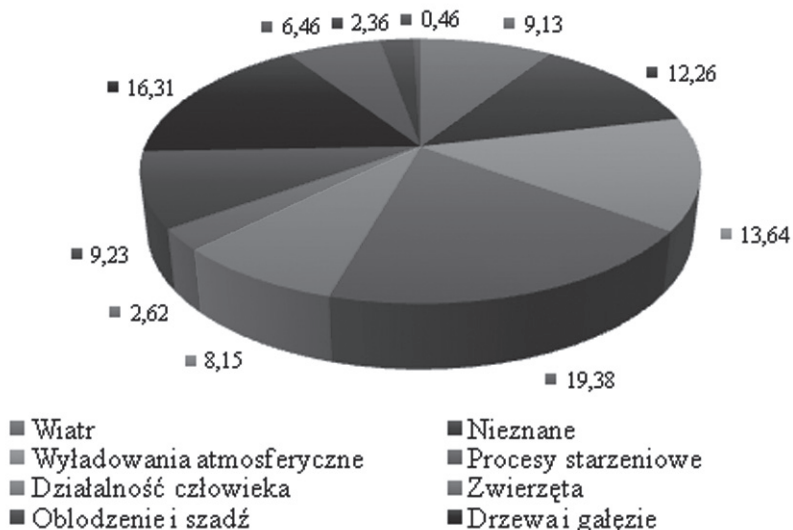
Typ linii	Urządzenie	Liczba awarii	Udział awarii grupy urządzeń w odniesieniu do liczby wszystkich awarii [%]
Linie napowietrzne	Przewody	447	15,23
	Izolatory	587	20,00
	Słupy	75	2,56
	Mostki	106	3,61
	Wiązanki	159	5,42
	Kondensatory	21	0,72
	Odłączniki	39	1,33
	Odgromniki	129	4,40
	Linie izolowane	22	0,75
Linie kablowe	Kable o izolacji papierowo-olejowej	591	20,14
	Kable o izolacji z PE	346	11,79
	Kable o izolacji z XLPE	79	2,67
	Głowice kablowe	168	5,72
	Mufy kablowe	166	5,66
Suma		2 935	

Źródło: B. Wnukowska, M. Mrugała, *Czynniki wpływające na poziom niezawodności zasilania zakładów produkcyjnych*, Politechnika Wroclawska 2022.



Ryc. 2.2. Udział poszczególnych grup urządzeń w całkowitej liczbie awarii w liniach SN napowietrznych i kablowych wyrażony w %

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 2.3. Procentowy udział przyczyn awarii linii napowietrznych SN

Źródło: opracowanie własne.

Główne przyczyny awarii linii napowietrznych średniego napięcia to:

- procesy starzeniowe 19,38%,
- drzewa i gałęzie 16,31%,
- wyładowania atmosferyczne 13,64%,
- nieznane 12,26%,
- działalność człowieka 8,15%.

Większość awarii pozostaje nieznaną (ok. 12,26%) z powodu braku znajomości czynnika powodującego stan awaryjny stwierdzonych przez pogotowie energetyczne lub dyspozytorów. Działalnością człowieka, która powoduje awarie sieci linii napowietrznych (ok. 8,15%), mogą być takie szkody jak:

- zerwanie przewodów,
- uszkodzenie słupów w wyniku prowadzonych prac na roli,
- uszkodzenia wskutek prac na placach budowy,
- wskutek wypadków komunikacyjnych itp.

Takie zdarzenia mają zazwyczaj charakter losowy oraz traktowane są jak wypadek, tj. nie są to zamierzone działania. Innego typu działalnością powodującą występowanie awarii są: akty sabotażu, strajki, wandalizm lub działania zamierzone, często wykonywane z premedytacją.

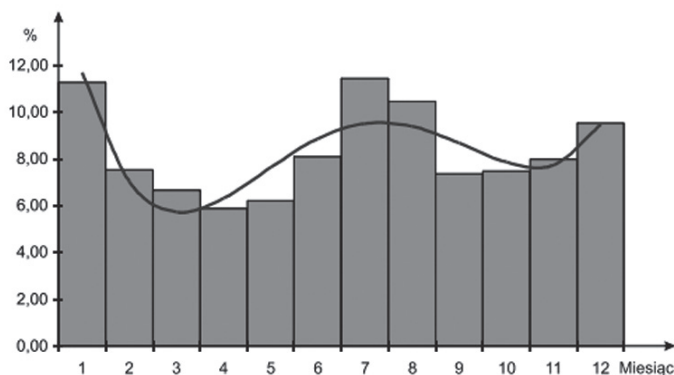
Skutkami przedstawionych na ryc. 2.3 przyczyn awarii linii napowietrznych średniego oraz niskiego napięcia są bardzo często zerwania przewodów. Źródła takich uszkodzeń można podzielić na **mechaniczne** oraz **termiczne**:

- **uszkodzenia mechaniczne** – spowodowane opadającymi drzewami lub gałęziami oraz nadmiernym obciążeniem przewodów szadzią w okresie zimowym,
- **uszkodzenia termiczne linii** – spowodowane przepaleniem przewodów w wyniku wyładowania atmosferycznego.

Część uszkodzeń jest wynikiem niewłaściwego montażu przewodów, co prowadzi do ich przemieszczania się względem izolatora i wiązalki oraz ich ścierania w określonym miejscu i starzeniem się materiałów. Uszkodzenia izolatorów liniowych najczęściej polegają na ich zniszczeniu mechanicznym, takim jak złamanie lub urwanie lub wypalenie ścieżki przewodzącej na ich powierzchni, co może prowadzić do opadnięcia przewodu lub powstania zwarcia. Uszkodzenia słupów także w dużej mierze spowodowane są zniszczeniami mechanicznymi, np. złamania lub wykrzywienia konstrukcji wsporczej.

2.3. Sezonowość awarii sieci dystrybucyjnej

Na ryc. 2.4 przedstawiono częstość uszkodzeń linii napowietrznych średniego napięcia SN w poszczególnych miesiącach.



Ryc. 2.4. Sezonowa zmienność awarii linii napowietrznych SN

Źródło: https://energetyka.wnp.pl/notowania/zapotrzebowanie_mocy_kse

Według źródłowych danych najwięcej awarii linii napowietrznych SN zaobserwowano w miesiącach letnich: lipiec i sierpień oraz w miesiącach zimowych: styczeń i grudzień. Z pewnością ma to związek ze średnimi temperaturami występującymi w tych okresach oraz warunkami atmosferycznymi, gdyż skrajne temperatury powietrza stanowią zagrożenie dla systemu elektroenergetycznego.

Wysokie temperatury wpływają przede wszystkim na wydłużenia termiczne przewodów linii napowietrznych, co w efekcie prowadzi do zwiększania zwisów przewodów. Zmniejsza to odległości pracującej linii od obiektów znajdujących się bezpośrednio pod nią. Stanowi to poważne ryzyko przeskoku napięcia oraz wystąpienia awarii mechanicznej, np. poprzez zerwanie przewodów przez osoby postronne⁸. Przy wysokiej temperaturze, niskiej wilgotności powietrza oraz intensywnych porywach wiatru wzrasta ryzyko wystąpienia niekontrolowanych, nagłych pożarów lasów. Infrastruktura sieciowa może być narażona zarówno na zajęcie ogniem w wyniku poszerzania zasięgu pożaru, powodując lawinę awarii sieci, jak i stanowić dodatkowe źródło zapłonu.

⁸ B. Wnukowska, D. Pisulka, *Awarie w sieciach dystrybucyjnych*, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2023.

Ekstremalnie niskie temperatury powietrza również stanowią niebezpieczeństwo dla systemu elektroenergetycznego, ponieważ często wraz z nimi występuje gromadzenie się osadów lodowych, np. w wyniku występowania burz śnieżnych, na liniach napowietrznych i znacznych naprężeń mechanicznych. Także **szadź** osadzona na przewodach powoduje bardzo często wzrost liczby awarii. Zjawisko występowania szadzi na przewodach linii napowietrznej powoduje znaczny wzrost zwisów w przęsłach linii wskutek zwiększenia ciężaru przewodów.

W okresie letnim głównym zjawiskiem przyczyniającym się do awarii występujących sezonowo są **wyladowania atmosferyczne**, którym zazwyczaj towarzyszą **intensywne opady deszczu** oraz **silny wiatr**. Te warunki atmosferyczne bardzo często powodują uszkodzenia mechaniczne infrastruktury sieci elektroenergetycznej: słupów, przewodów, izolatorów oraz pozostałych elementów znajdujących się na konstrukcjach wsporczych.

Wichury i huragany mają ogromny wpływ na pracę linii napowietrznych. Jeśli prędkość wiatru przekroczy 20 m/s, istnieje liniowa zależność między prędkością wiatru a ryzykiem uszkodzenia linii elektroenergetycznej. Przekroczenie prędkości wiatru powyżej ok. 40 m/s zwiększa prawdopodobieństwo zawalenia się słupów elektroenergetycznych. Kiedy prędkość wiatru przekroczy 100 m/s, ryzyko awarii linii napowietrznych jest praktycznie pewne i prowadzi do poważnych uszkodzeń mechanicznych, powodując lawinowe zawalenie się znacznych fragmentów sieci elektroenergetycznej.

2.4. Praca w pobliżu sieci elektroenergetycznych

Przygotowanie pracy w pobliżu linii napowietrznych i kablowych jest niezmiernie istotne, aby zadbać o bezpieczeństwo osób oraz zminimalizować ilość awarii sieci. Zasady bezpieczeństwa w pobliżu linii elektroenergetycznych określają odpowiednie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury, a także normy dotyczące instalacji elektrycznych niskiego napięcia. Wykonanie robót ziemnych w bezpośrednim sąsiedztwie kablowych linii elektroenergetycznych powinno być poprzedzone określeniem bezpiecznej odległości od sieci, w jakiej mogą być wykonywane prace i szczegółowego sposobu wykonania tych prac. Zabronione jest sytuowanie stanowisk pracy, a także maszyn i urządzeń budowlanych, bezpośrednio pod napowietrznymi liniami elektroenergetycznymi lub w bliskiej odległości od tych linii. Bezpieczne odległości określone w przepisach to:

- **3 m** – dla linii o napięciu znamionowym nieprzekraczającym 1 kV,
- **30 m** – dla linii o napięciu znamionowym powyżej 110 kV.

Żurawie, koparki oraz inne pojazdy i maszyny, które mogą zbliżyć się na niebezpieczną odległość do napowietrznych lub kablowych linii elektroenergetycznych, powinny być wyposażone w sygnalizatory napięcia informujące o niebezpieczeństwie.

Kolejnym aspektem jest ochrona indywidualna przy pracy w pobliżu sieci energetycznej oraz odpowiedzialne zachowanie, które pozwalają na zminimalizowanie wystąpienia awarii:

- elektronarzędzia na budowach powinny mieć odpowiedni stopień ochrony przed czynnikami zewnętrznymi,
- nie wolno pozostawiać bez nadzoru elektronarzędzi podłączonych do zasilania oraz należy sprawdzić stanu sprzętu,
- zabrania się pracować uszkodzonym elektronarzędziem,
- nie wolno samodzielnie wykonywać napraw i konserwacji elektronarzędzi.

Przepisy i regulacje mają zapewniać bezpieczeństwo osób postronnych i bezpieczeństwo pracy elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej. Zmniejsza to ryzyko wypadków

zagrożających zdrowiu oraz często życiu ludzi, ale też występowania nieplanowanych awarii, wyłączeń oraz przerw w dostawie energii⁹. Główne cztery zasady 4S, które należy przestrzegać, prowadząc prace w pobliżu linii energetycznych, to: *Sprawdź swoje narzędzia i ubranie! Sprawdź, do czego się podłączasz! Spójrz w górę! Spójrz w dół!*

2.5. Skutki awarii sieci dystrybucyjnej

Zapewnienie niezawodności dostawy energii elektrycznej jest kluczowym zadaniem stawianym przed każdym OSD. Wszelkie zakłócenia w pracy elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych mogą powodować przerwy w zasilaniu odbiorców lub pogorszenie jakości dostarczanej energii. Skutkiem takich sytuacji są straty ekonomiczne u odbiorców energii elektrycznej, brak zasilania w zakładach produkcyjnych, firmach itp. Niewłaściwe parametry jakościowe energii elektrycznej stwarzają różnorodne ograniczenia w działalności oraz standardzie życia odbiorców¹⁰. W skrajnych przypadkach mogą prowadzić do zagrożenia zdrowia lub życia. Awaryjne braki w zasilaniu powodują bardzo często frustrację oraz brak zaufania odbiorców do dostawców energii elektrycznej. Niezapowiedziane, losowe przerwy wiążą się z brakiem możliwości wykonywania różnych obowiązków domowych lub pracowniczych, chwilowym spadkiem jakości życia odbiorców oraz też zagrożeniem życia i zdrowia, np. w przypadku korzystania z urządzeń podtrzymujących czynności życiowe zasilanych energią elektryczną. Oprócz niezapowiedzianych losowych awarii występują także planowane wyłączenia na sieci, które mają inny charakter niż awarie. Są to przerwy planowane, na które odbiorcy mogą się przygotować.

Awarie systemowe mogą mieć swoje źródła w czynnikach **pierwotnych** oraz **wtórnych**.

Czynniki pierwotne prowadzące do powstania awarii to:

- ekstremalne warunki atmosferyczne, np. wiatr, skrajne temperatury,
- klęski żywiołowe (np. powódzie, trzęsienia ziemi, huragany),
- przeciążenia linii przesyłowych,
- awarie techniczne w obwodach pierwotnych i wtórnych,
- błędne działania lub brak działań osób odpowiedzialnych za dyspozycję,
- akty wandalizmu, sabotażu, strajki, protesty itp.,
- awarie wywołane infrastrukturą otaczającą linie i urządzenia elektroenergetyczne.

Czynniki wtórne to:

- przeciążenia sieci,
- niestabilność pracy systemu,
- znaczne odchylenia częstotliwości i napięcia od wartości określonych w normach.

Czynniki wtórne przyczyniają się do wystąpienia awarii systemowej najczęściej wtedy, gdy przeciążenia i niestabilność pracy sieci nie zostaną w porę opanowane, a odchylenia częstotliwości i napięcia będą tak znaczne, że nastąpi kaskadowe wyłączenie stacji i źródeł energii. Następstwem takiej sekwencji zdarzeń jest wyłączenie całego systemu elektroenergetycznego lub jego części. W takim wypadku ważne jest, aby skoncentrować się na szybkim i sprawnym przywróceniu działania systemu. Polskie elektrownie i elektrociepłownie nie są zdolne do samoczynnego uruchomienia się, czyli tzw. **samostartu**. W związku z tym trzeba zastosować moc

⁹ *Statystyka Elektroenergetyki Polskiej*, Agencja Rynku Energii, Warszawa 2022.

¹⁰ Cenniki energii elektrycznej 2020–2023.

rozdźwiękami z tych elementów systemu, które wciąż działają, lub w przypadku ich braku trzeba skorzystać z nielicznych elektrowni wodnych, które posiadają zdolność samostartu.

3. Zapobieganie awariom sieci dystrybucyjnej

3.1. Odpowiednia eksploatacja systemu dystrybucyjnego

Podstawowym sposobem zapobiegania awariom sieci dystrybucyjnej jest odpowiednia eksploatacja sieci. Przez ciągłe inwestowanie w rozwój całej sieci dystrybucyjnej jej operator ma realny wpływ na minimalizację ryzyka powstawania niespodziewanych i losowych awarii w liniach napowietrznych i kablowych. Wymiana zużytych, zniszczonych i starych elementów sieci wpływa na poprawę niezawodności całego układu. Również dbanie o stan sieci poprzez planowane, cykliczne i dokładne zabiegi eksploatacyjne, takie jak: przeglądy, koszenie trawy, kontrole, obloty linii napowietrznych, wycinka drzew i gałęzi w pobliżu linii napowietrznych, malowanie konstrukcji wsporczych itp. mają ogromne znaczenie w zwiększeniu efektywności pracy sieci, która wiąże się z ilością awarii.

Regularna kontrola zadrzewienia w pobliżu linii napowietrznych jest jednym z głównych zadań stawianych przed właścicielami sieci dystrybucyjnych, ponieważ odpowiednia dbałość i regularność w wycinie drzew, minimalizuje szanse na wystąpienie awarii spowodowanych upadkiem drzew lub gałęzi na przewody i słupy. Prowadzone prace eksploatacyjne mają za zadanie wyeliminowanie sytuacji awaryjnych w jak największym stopniu. Regularne kontrole i wycinki drzew w pasie technologicznym linii napowietrznych znacząco przyczyniają się do zmniejszenia ryzyka wystąpienia awarii w sieci napowietrznej spowodowanej upadkiem drzewa na przewody, które potencjalnie mogłyby spowodować straty takie jak zerwanie przewodów oraz przerwanie ciągłości dostaw prądu. W celu stałego dążenia do zmniejszania liczby awarii niezbędne jest odpowiedzialne i sumienne zarządzanie całą siecią dystrybucyjną przez każdego operatora OSD.

3.2. Stopnie zasilania w KSE

Kolejnym sposobem wypracowanym przez OSD jest wprowadzanie stopni zasilania w sytuacjach kryzysowych, które mają na celu uniknięcie najpoważniejszej awarii tj. **blackoutu**. Stopnie zasilania są to wielkości określające poziomy ograniczeń w dostarczaniu i poborze energii elektrycznej poprzez ograniczenie poboru mocy¹¹. Ograniczenia te są ujęte w planach dostarczania i poboru energii elektrycznej i dotyczą odbiorców energii elektrycznej o mocy umownej równej lub większej niż 300 kW, realizowane poprzez zmniejszenie poboru mocy określone w stopniach zasilania od 11. do 20. Obiekty, których stopnie zasilania nie dotyczą, to między innymi obiekty o krytycznym znaczeniu, takie jak: obiekty ratownictwa medycznego, szpitale, obiekty nadające programy radiowe i telewizyjne o zasięgu ogólnokrajowym, obiekty transportu kolejowego, lotniczego, publicznego transportu zbiorowego, obiekty wydobywające paliwa kopalniane, wykorzystywane do przesyłania lub dystrybucji paliw gazowych, wytwarzania, przesyłania lub dystrybucji energii elektrycznej lub ciepła.

¹¹ <https://ure.gov.pl>

Wnioski

Awarie systemów elektroenergetycznych ze względu na ich liczne przyczyny są zjawiskiem nieuniknionym. Ekstremalne zjawiska pogodowe nie są możliwe do przewidzenia, dlatego stanowią poważne zagrożenie dla pracy systemów elektroenergetycznych.

Intensywność awarii jest uzależniona w dużym stopniu od temperatury otoczenia. Istnieje powiązanie między wysokimi temperaturami a ilością występowania wylądowań atmosferycznych, którym często towarzyszą obfite opady deszczu oraz wichury. Skrajnie niskie temperatury natomiast powodują oblodzenie lub szadź na urządzeniach naziemnych oraz wiążą się z występowaniem burz śnieżnych, co również często prowadzi do awarii.

Niezbędne są nowe inwestycje w infrastrukturę sieciową oraz odpowiedzialna eksploatacja systemu elektroenergetycznego, a także cykliczność zabiegów eksploatacyjnych, które wzmocnią bezpieczeństwo zasilania danego regionu OSD.

Zasady bezpieczeństwa pracy w pobliżu linii elektroenergetycznych są określone m.in. w Rozporządzeniach Ministra Infrastruktury, normach dla specjalnych instalacji elektrycznych oraz standardach pracy przyjętych przez OSD.

Bibliografia

Cenniki energii elektrycznej 2020–2023.

https://energetyka.wnp.pl/notowania/zapotrzebowanie_mocy_kse

<https://pse.pl/-/raporty-rocz-1><https://www.energyinvestors.pl>

<https://ure.gov.pl>

Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030, Ministerstwo Aktywów Państwowych, 2022.

Marzecki J., *Optymalizacja i modernizacja elektroenergetycznych sieci*, PSE Operator, Warszawa 2017.

Polskie Sieci Elektroenergetyczne, Operator S.A., 2023.

Statystyka Elektroenergetyki Polskiej, Agencja Rynku Energii, Warszawa 2022.

Wnukowska B., *Efektywność energetyczna. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Collegium Witelona Uczelnia Państwowa, Legnica 2023.

Wnukowska B., Mrugała M., *Czynniki wpływające na poziom niezawodności zasilania zakładów produkcyjnych*, Politechnika Wrocławska 2022.

Wnukowska B., Pisulska D., *Awarie w sieciach dystrybucyjnych*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2023.

SUMMARY

Bogumiła Wnukowska

Factors influencing the reliability of distribution grids

One of the main problems connected with energy supply reliability is the efficient functioning of distribution grids. This paper discusses major elements of a medium voltage electric grid. It also presents cases of its failure as well as their outcomes and influence on energy consumers. This paper contains an analysis of the causes of distribution grid failure based on the available source materials and its consequences consumers as well as energy security of countries.

Key words: reliability, energy, failure.

Data wpływu artykułu: 18.12.2023 r.

Data akceptacji artykułu: 2.02.2024 r.