

Statystyczna analiza zakłóceń zwarciovych dla określenia przekroju żył powrotnych kabli średnich napięć

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę, mającą na celu określenie możliwości przekroczenia obciążalności zwarciovych żył powrotnych kabli średniego napięcia, podczas zwarc podwójnych z ziemią. Przeprowadzona analiza bazowała na danych statystycznych rzeczywistej sieci średniego napięcia. Zaprezentowane wyniki obliczeń obejmują między innymi prawdopodobieństwa przekroczenia obciążalności znamionowej żył powrotnych kabli oraz liczby przekroczeń tej wartości na jednostkę długości linii kablowych, mogących wystąpić w określonym czasie.

Abstract. The article presents an analysis aimed to identify the possibility of exceeding the short-circuit capacity of return conductors of medium voltage cables, during the two-phase-to-earth faults. The analysis was based on actual statistical data of medium voltage power network. Presented results of the calculations include, among others, the possibility of exceeding the rated capacity of return conductors of cables and the number of exceedances of this value per unit length of cable lines, which may occur within a specific time. (**Statistical analysis of faults for determining cross section of medium voltage cables return conductors**)

Słowa kluczowe: kable elektroenergetyczne, żyły powrotne kabli, obciążalność zwarciova, analiza statystyczna.

Keywords: power cables, return conductor, short-circuit capacity, statistical analysis.

Wprowadzenie

Żyła powrotna jest elementem konstrukcyjnym jednożyłowych kabli elektroenergetycznych średniego napięcia, przewodzącym prąd elektryczny w stanach zakłóceńowych. Sieci rozdzielcze średnich napięć (SN) eksploatowane są jako układy trójfazowe z punktem neutralnym izolowanym, uziemionym przez dławik (tzw. sieć kompensowana) albo uziemionym przez rezystor. Niezależnie od sposobu połączenia punktu neutralnego z ziemią wspólną cechą sieci SN, są relatywnie małe, w stosunku do sieci WN, wartości prądów zwarc z ziemią (doziemień), nieprzekraczające na ogół wartości kilkunastu, kilkudziesięciu amperów w sieciach z izolowanym punktem neutralnym i kompensowanych oraz wartości rzędu kilkuset amperów w sieciach uziemionych przez rezystor. Zasadnicze narażenie żył powrotnych kabli elektroenergetycznych wynika więc ze zwarc podwójnych.

Praktyka eksploatacyjna wykazuje, że zwarcia podwójne w przeważającej większości przypadków rozpoczynają się od pojedynczego doziemienia, które jest przyczyną wzrostu napięcia na fazach nieuszkodzonych i w konsekwencji wystąpienia drugiego doziemienia. Powstałe wówczas zwarcie dwufazowe jest de facto niejednoczesnym zwarcie dwumiejscowym, przy czym doziemienie może wystąpić w obrębie rozdzielni SN albo w ciągu liniowym. Praktyka eksploatacyjna wykazuje również, że najczęstszym przypadkiem są zwarcia w postaci doziemień na dwóch różnych liniach zasilanych ze wspólnej rozdzielni SN.

Podczas zwarc podwójnych płyną prądy zwarciove o wartościach zależnych od parametrów obwodu zwarciovego, a więc od wartości napięcia znamionowego, mocy zwarciovego sieci, parametrów transformatorów, jednostkowych impedancji zwarciovego linii elektroenergetycznych oraz odległości miejsca zwarcia od szyn rozdzielni SN. Dla określenia poziomu zagrożenia żył powrotnych kabli średniego napięcia wskutek przekroczenia dopuszczalnej obciążalności prądem zwarciovego, niezbędna jest znajomość struktury sieci elektroenergetycznej oraz charakterystycznych wielkości decydujących o wartości prądu zwarciovego. Z uwagi na rozległość i różnorodność sieci SN celowe jest przeprowadzenie analizy statystycznej tych parametrów układu elektroenergetycznego, które decydują o wartościach prądów płynących w żyłach powrotnych kabli podczas zwarc. Celem zaprezentowanej analizy

statystycznej jest określenie poziomu zagrożenia żył powrotnych kabli średniego napięcia wskutek przekroczenia ich obciążalności prądem zwarciovego. Przedstawione wyniki analizy zostały uzyskane przy uwzględnieniu danych rzeczywistej sieci rozdzielczej średniego napięcia.

Statystyczna analiza struktury sieci elektroenergetycznej

Przedmiotem analizy jest sieć rozdzielcza 15 kV o łącznej długości linii 4 261 km linii, w tym 1 077 km linii kablowych. Sieć jest zasilana z 65 transformatorów 110 kV/SN i zasila ponad 4 tysiące stacji 15/0.4 kV. Na podstawie danych tej sieci przeprowadzono analizę statystyczną wielkości charakteryzujących sieć, które z matematycznego punktu widzenia są zmiennymi losowymi:

- moc zwarciova na szynach rozdzielni SN – zmienna losowa S_k'' ;
- długość linii napowietrznych przypadających na pole liniowe w rozdzielni SN – zmienna losowa D_{LN} ;
- długość linii kablowych trójżyłowych przypadających na pole liniowe w rozdzielni SN – zmienna losowa D_{LK3Z} ;
- długość linii kablowych jednożyłowych przypadających na pole liniowe w rozdzielni SN – zmienna losowa D_{LK1Z} ;
- długość linii (łącznie napowietrznych i kablowych) przypadających na pole liniowe w rozdzielni SN – zmienna losowa D_L ;
- czas zadziałania automatyki zabezpieczeniowej od zwarc wieloprądowych – zmienna losowa t_{ZAB} .

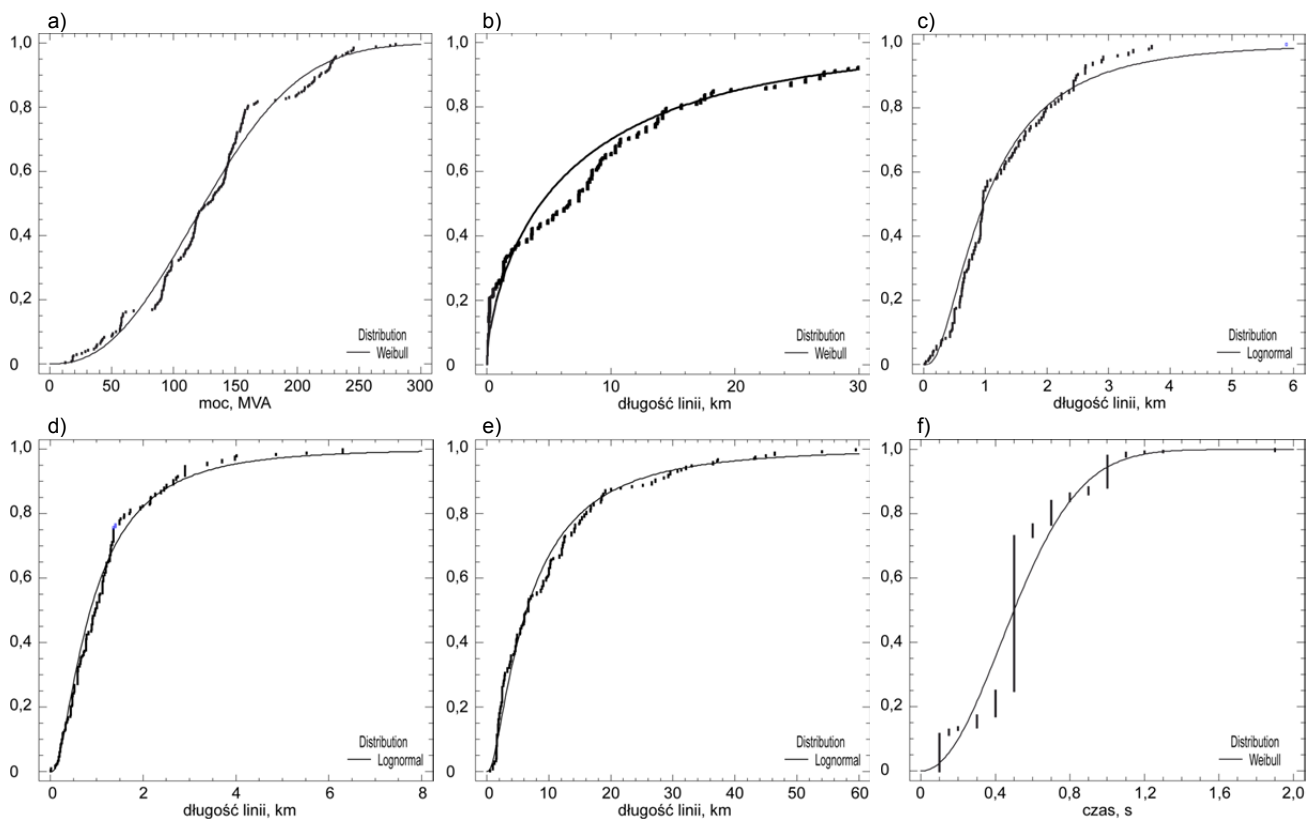
Na rysunkach 1a - 1f przedstawiono otrzymane rozkłady statystyczne powyższych zmiennych losowych w postaci dystrybucji empirycznych i teoretycznych. Przeprowadzone wnioski wykazały, że statystyczny charakter tych zmiennych losowych opisywany jest przez rozkład Weibula:

$$(1) \quad F(x) = \int_{-\infty}^x \delta(x\theta)^{\delta-1} e^{-x\theta^\delta} dx$$

gdzie: δ – współczynnik kształtu, θ – współczynnik skali, albo przez rozkład logarytm-normalny:

$$(2) \quad F(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

gdzie: σ – odchylenie standardowe (w skali logarytmicznej), μ – wartość oczekiwana (w skali logarytmicznej).



Rys. 1. Dystrybuanty dla poszczególnych zmiennych losowych: a) S_k'' ; b) D_{LN} ; c) D_{LK1Z} ; d) D_{LK3Z} ; e) D_L ; f) t_{ZAB}

Otrzymane wartości parametrów tych rozkładów dla poszczególnych zmiennych losowych podano w tabeli 1. Wartości tych parametrów wykorzystano do analizy narażeń żył powrotnych kabli.

Tabela 1. Parametry otrzymanych rozkładów statystycznych

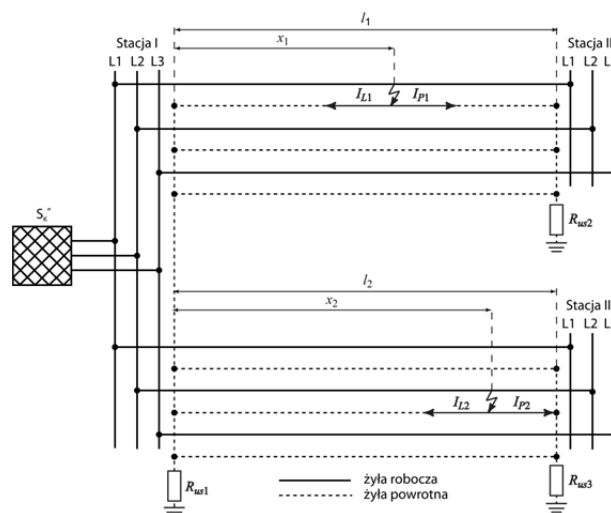
Zmienna losowa	Typ rozkładu					
	Weibull	Weibull	Log-normal	Log-normal	Log-normal	Weibull
δ	2,39	0,66	---	---	---	2,06
θ	145,66	7,58	---	---	---	0,59
μ	---	---	0,021	0,145	1,855	---
σ	---	---	0,826	0,908	1,022	---

Analizę awaryjności przeprowadzono na podstawie całkowitej liczby zwarć zarejestrowanych w sieci zasilanej z danej stacji 110 kV/SN (z pominięciem zwarć jednofazowych). Liczbę zwarć wieloprądowych przypadającą na linię z kablami jednożyłowymi wyznaczono na podstawie procentowego udziału całkowitej długości takich linii w analizowanej sieci średniego napięcia. Określona na tej podstawie intensywność zwarć wieloprądowych w liniach z kablami jednożyłowymi wynosi w analizowanej sieci 3,19 zwarć/rok/100km.

Analizowany układ elektroenergetyczny i jego implementacja komputerowa

W celu przeprowadzenia statystycznej analizy rozkładów największych wartości prądów zwarciovych płynących w żył powrotnej opracowano w programie EMT-P-ATP komputerowy model analizowanej sieci SN. Model ten uwzględnia modele cząstkowe elementów układu elektroenergetycznego, które biorą udział w przepływie prądu zwarciovego (rysunek 2). Są to:

- model systemu elektroenergetycznego przyłączonego do szyn Stacji I;
- model linii kablowej z kablami jednożyłowymi (dwa ciągi liniowe: pomiędzy Stacją I i Stacją II o długości l_1 oraz pomiędzy Stacją I i Stacją III o długości l_2).
- model uziemienia stacji elektroenergetycznej (w postaci rezystancji skupionych R_{us1} , R_{us2} , R_{us3}).



Rys. 2. Schemat układu do analizy statystycznej wartości prądu w żył powrotnej x_1 , x_2 – odległości do miejsca zwarć; l_1 , l_2 – długość linii kablowej, S_k'' – moc zwarciovą na szynach średniego napięcia, R_{us1} , R_{us2} , R_{us3} – rezystancja uziemienia w Stacji I, Stacji II i Stacji III

Do analizy przyjęto wartości mocy zwarciovą na szynach rozdzielni 15 kV wynoszące: 87 MVA, 125 MVA,

167 MVA i 258 MVA. Przyjęte wartości mocy zwarciowej odpowiadają kwantylom rzędu: 0,25; 0,50; 0,75 i 0,98.

Sposób wykonania i rodzaj zastosowanej izolacji kabla nie ma wpływu na drogę przepływu i wartość prądu zwarciowego - istotne są tylko przekroje żył roboczych i powrotnych. Przeprowadzona analiza deterministyczna wykazała, że prąd płynący w żyłce powrotnej w niewielkim stopniu zależy od przekroju żyły roboczej. Dla kabla z żyłą powrotną o przekroju 25 mm² największa różnica wartości prądów płynących w żyłach powrotnych dla poszczególnych przekrojów żył roboczych wynosi 2,82%, dla kabli z żyłą powrotną 35 mm² maksymalna różnica wynosi 2,10%, a dla żyły powrotnej 50 mm² - 1,73%.

Obliczenia wartości prądów zwarciowych wykonano dla kabli z żyłami roboczymi o przekrojach 240 mm², 185 mm², 150 mm² i 120 mm² z żyłami powrotnymi o przekrojach: 50 mm², 35 mm² i 25 mm². Przeprowadzone obliczenia wykazały, że prąd płynący w żyłce powrotnej w niewielkim stopniu zależy od wartości rezystancji uziemienia stacji SN/nN. Różnica ta jest największa dla kabli z żyłą powrotną 25 mm² i nie przekracza 4,5%.

Na podstawie powyższych wyników dalszą analizę przeprowadzono dla kabli z żyłami roboczymi o przekroju 240 mm², natomiast wartości rezystancji uziemienia żył powrotnych przyjęto 0,5 Ω w stacjach 110 kV/SN oraz 10 Ω, w stacjach SN/nN. Takie podejście nie wprowadza znaczącego błędu, nieznacznie zawyżając długość odcinka linii kablowej zagrożonej przekroczeniem dopuszczalnego prądu płynącego w żyłce powrotnej, ale jednocześnie zmniejsza liczbę możliwych kombinacji analizowanych układów.

Wyniki analizy

Oceny przekroczenia obciążalności zwarciowej żył powrotnych kabli średniego napięcia dokonano przy wykorzystaniu podejścia statystycznego dzięki, któremu można określić prawdopodobieństwo przekroczenia obciążalności znamionowej żył powrotnych kabli, a następnie określić liczbę przekroczeń na jednostkę długości linii kablowej w ciągu przyjętego okresu eksploatacji.

Analizę statystyczną przeprowadzono przy następujących założeniach:

- moc zwarciowa S_k'' , długość l_1 i długość l_2 są zmiennymi losowymi z rozkładów o parametrach podanych w tabeli 1,
- odległość x_1 miejsca doziemienia od szyn Stacji I jest zmienną losową z rozkładu jednostajnego na przedziale (0, 1)

- odległość x_2 miejsca doziemienia od szyn Stacji I jest zmienną losową z rozkładu jednostajnego na przedziale (0, 1).

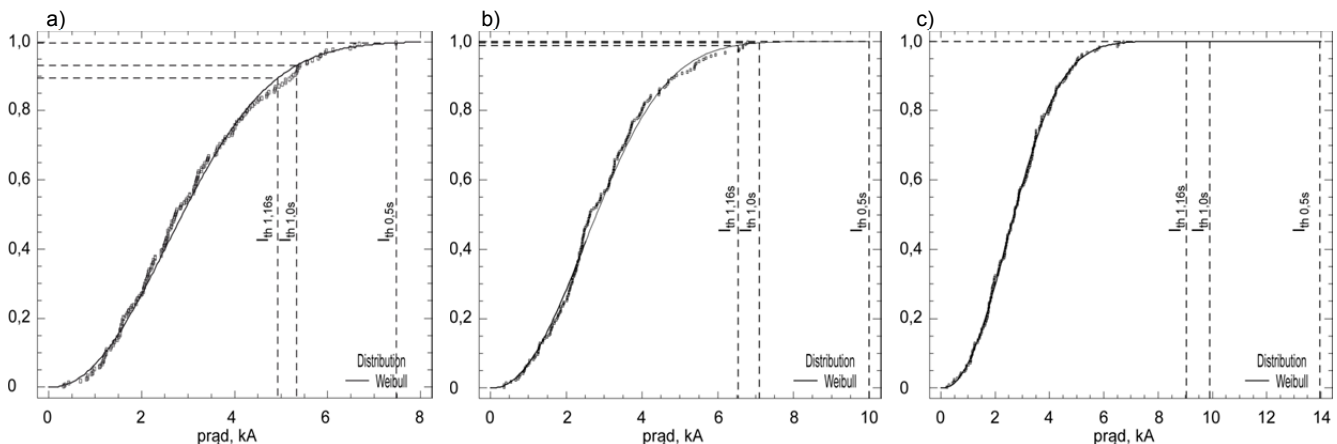
Dla każdego przekroju żyły powrotnej (25 mm², 35 mm² i 50 mm²) wykonano po pięćset symulacji zwarc podwójnych, przy czym w każdej z symulacji losowano z odpowiedniego rozkładu parametry S_k'' , l_1 , l_2 , x_1 , x_2 . Dla i -tej symulacji ($i = 1, \dots, 500$) otrzymywano wartości prądów płynących w żyłach powrotnych kabli, z których do dalszej analizy wybierano wartość największą. Symulacje wykonano w programie EMTP-ATP. Końcowym efektem symulacji było między innymi 500 wartości największych spodziewanych prądów zwarciowych, stanowiących zmienną losową, którą poddano dalszej analizie statystycznej w programie STATGRAPHICS.

Wynikiem analizy statystycznej są między innymi dystrybuanty największych spodziewanych prądów w żyłach powrotnych kabli, które przedstawiono na rysunku 3. Na wykresach zaznaczono wartości prądów odpowiadających znamionowej obciążalności 0,5-sekundowej, 1-sekundowej i 1,16-sekundowej.

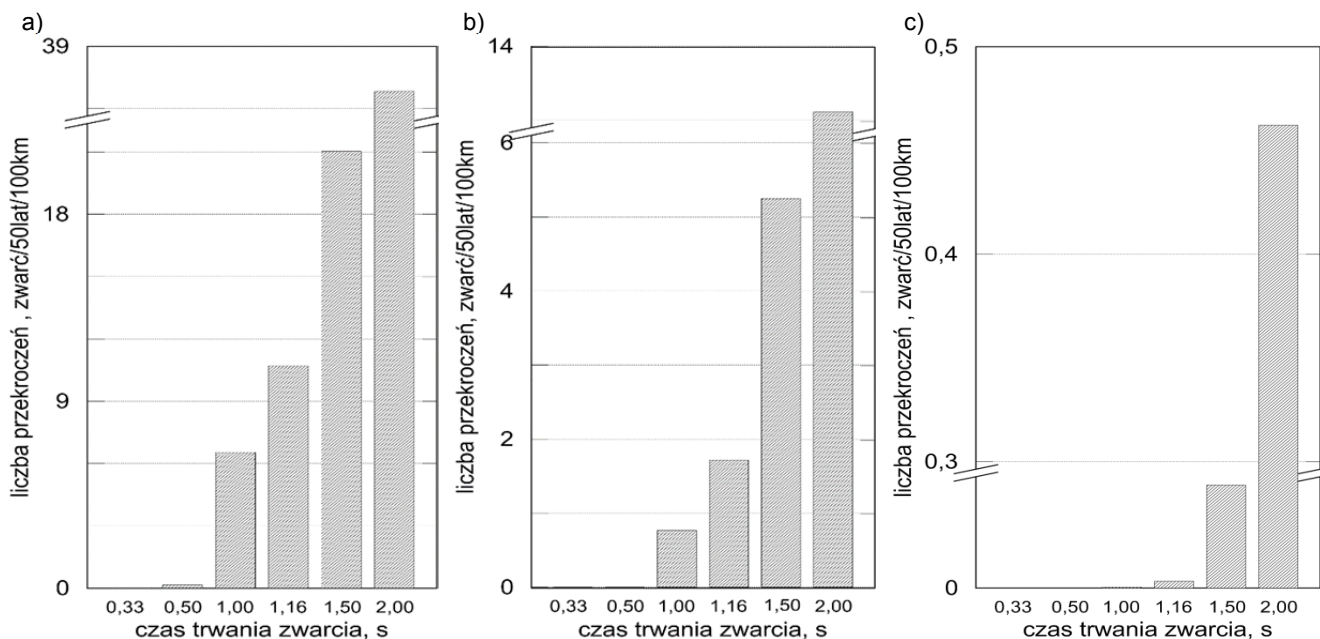
Na podstawie odczytanych z dystrybuant wartości prawdopodobieństwa przekroczenia obciążalności żył powrotnych p oraz oszacowanej intensywności zwarc w analizowanej sieci, obliczono współczynnik WP określający prawdopodobną liczbę przekroczeń dopuszczalnej wartości prądu w ciągu roku przypadającą na 1 km długości linii z kablami jednożyłowymi dla różnych czasów trwania zwarcia. Wartości prawdopodobieństwa p oraz współczynników WP zestawiono w tabeli 2. Na podstawie wartości współczynnika WP obliczono prawdopodobną liczbę $WP_{50/100}$ przekroczeń obciążalności żył powrotnych w ciągu 50 lat w 100 km linii z kablami jednożyłowymi. Wyniki tych obliczeń pokazano na rysunku 4.

Tabela 2. Prawdopodobieństwa p oraz współczynniki WP przekroczenia przez prąd płynący w żyłce powrotnej wartości znamionowego prądu n -sekundowego

Czas zwarcia [s]	Przekrój żyły powrotnej					
	25 mm ²		35 mm ²		50 mm ²	
	p	WP	p	WP	p	WP
0,33 s	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-30}$	$3,2 \cdot 10^{-32}$
0,50 s	$9,48 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-13}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$
1,00 s	$4,10 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$
1,16 s	$6,71 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$
1,50 s	$1,32 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$3,29 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,11 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-6}$
2,00 s	$2,31 \cdot 10^{-1}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$8,22 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$



Rys. 3. Dystrybuanty największych spodziewanych prądów w żyłach powrotnych dla kabli z żyłą powrotną o przekroju: a) 25 mm²; b) 35 mm²; c) 50 mm²



Rys. 4. Spodziewane liczby przekroczeń obciążalności zwarciowej w ciągu 50 lat w sieci o długości 100 km żył powrotnych o przekroju: a) 25 mm², b) 35 mm², c) 50 mm².

Z przeprowadzonej analizy ryzyka przekroczenia znamionowych obciążalności zwarciowych żył powrotnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- wartości współczynników WP są proporcjonalne do czasu zwarcia, tzn. większym wartościom tych czasów odpowiadają większe wartości współczynników;
- wartości współczynników WP są odwrotnie proporcjonalne do przekroju żyły powrotnej, tzn. większym wartościom tych przekrojów odpowiadają mniejsze wartości współczynników;
- w przypadku kabli z żyłami powrotnymi o przekroju 50 mm² przekroczenia obciążalności znamionowej żył powrotnych są zdarzeniami losowymi o małym prawdopodobieństwie;
- redukcja przekroju żył powrotnych skutkuje wzrostem ryzyka przekroczenia obciążalności zwarciowej;
- przy założeniu kryterialnej wartości współczynnika $WP_{50/100} = 1$, najdłuższe czasy trwania zwarcia dla przekroju żyły powrotnej 25 mm², 35 mm² i 50 mm² wynosiłyby odpowiednio: 0,5 s; 1,0 s i 2,0 s.

Należy jednak zaznaczyć, że przekroczenie dopuszczalnych wartości prądów zwarcia podwójnych nie oznacza, iż nastąpi uszkodzenie linii, w której to przekroczenie wystąpiło.

Podsumowanie

Powyższe wnioski analizy statystycznej, pozwalają na określenie możliwości redukcji przekroju żyły powrotnej w aspekcie wzrostu ryzyka przekroczenia znamionowych obciążalności zwarciowej, zwłaszcza przy uwzględnieniu czasu przepływu prądu zwarciowego. Zmniejszenie przekroju żyły powrotnej powoduje zmniejszenie nakładów inwestycyjnych na budowę linii kablowych. Rozważając ewentualne skutki takiego przedsięwzięcia należy wziąć pod uwagę wiele aspektów spośród, których najważniejszymi są aspekty: techniczny oraz ekonomiczny.

Decyzja o zmniejszeniu przekroju żył powrotnych kabli powinna być poprzedzona analizą ekonomiczną,

określającą spodziewane skutki finansowe, wynikające z niższych nakładów inwestycyjnych budowanych bądź modernizowanych linii kablowych, oraz spodziewane koszty wynikające z ewentualnego zwiększenia liczby awarii (suma kosztów wymiany uszkodzonego odcinka kabla oraz kosztów wynikających z niedostarczenia energii do odbiorców).

Przy określonych założeniach, możliwe jest obliczenie granicznej długości uszkodzonego odcinka linii, przy której koszty awarii będą równe oszczędnościom wynikającym ze zmniejszenia przekroju żyły powrotnej.

Autorzy: dr inż. Rafał Tarko, e-mail: rtarko@agh.edu.pl, dr inż. Mariusz Benesz, e-mail: mben@agh.edu.pl, dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. n., e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl, dr inż. Waldemar Szpyra, e-mail: wszpyra@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

LITERATURA

- [1] Benesz M., Tarko R., *Wykorzystanie metod statystycznych do określenia optymalnego przekroju żyły powrotnej w sieciach kablowych średniego napięcia*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2012, nr 31, s. 31-34.
- [2] Benesz M., *Zastosowanie metod statystycznych do poprawy jakości dostawy energii elektrycznej*, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2014
- [3] Krakowski M., *Obwody ziemnopowrotne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979
- [4] PN-EN 60909, *Prądy zwarciowe w sieciach trójfazowych prądu przemiennego, PKN*
- [5] Korab R., Siwy E., *Statistical analysis of the double line-to-ground short-circuit current in MV urban network for the power cable metallic screen rating*, 9th International Conference On Probabilistic Methods Applied To Power Systems KTH, Stockholm, Sweden, June 11-15, 2006
- [6] Kacejko P., Machowski J., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009.