

Piotr PIECHOCKI*
Ryszard FRĄCKOWIAK**

WARUNKI ZWARCIOWE W ROZDZIELNI SPOWODOWANE ZAKŁÓCENIAMI NA RÓŻNYCH ELEMENTACH SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Prezentowane zagadnienie jest kontynuacją badań w dotyczących oceny czasu trwania zwarcia i dynamicznych skutków zwarciovych w rozdzielniach najwyższych napięć metodą probabilistyczną. Badania są realizowane za pomocą specjalnie opracowywanego modelu do symulacyjnej analizy warunków zwarciovych w rozdzielniach, opartego na metodzie symulacji Monte Carlo. W ramach kolejnego etapu prac oceniono wpływ zakłóceń na różnych elementach sieci na rozkład prawdopodobieństwa prądu zwarciovego i czasu jego przepływu oraz sił dynamicznych w dwóch różnych miejscach rozdzielni 220 kV. Rozpatrzono wpływ zwarć na szynach głównych i w polach rozdzielni, na liniach (dłuższej i krótkiej) i na transformatorze.

SŁOWA KLUCZOWE: rozdzielnie najwyższych napięć, warunki zwarciovowe, symulacja

1. WSTĘP

Prezentowane wyniki prac dotyczą oceny dynamicznych skutków zwarciovych w rozdzielniach najwyższych napięć z szynami giętkimi przy wykorzystaniu metod probabilistycznych. Do tego celu jest opracowywany model symulacyjny, w którym uwzględniono rozptyw prądów zwarciovych w rozdzielni oraz działanie elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej EAZ i wyłączników w rozdzielniach najwyższych napięć podczas zwarć w systemie elektroenergetycznym. W modelu czasu trwania zwarcia opartym na analizie działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej EAZ i wyłączników w rozdzielniach najwyższych napięć podczas zwarć, uwzględniono działanie zabezpieczeń różnicowo-prądowych szyn zbiorczych i transformatora, zabezpieczeń odległościowych, zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz odcinkowych, a także automatyki SPZ oraz układu LRW. Przedstawione wyniki kolejnego etapu badań testujących, dotyczą oszacowania częstości występowania określonych wartości czasu trwania zwarcia, prądu zwarciovego oraz sił dynamicznych w wybranych miejscach rozdzielni 220 kV, podczas zakłóceń na róż-

* Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. – Oddział w Poznaniu.

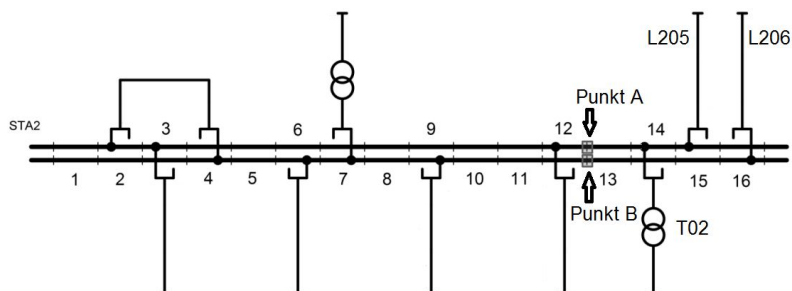
** Politechnika Poznańska.

nych elementach sieci elektroenergetycznej: w samej rozdzielni (na szynach głównych i w polach rozdzielni), na liniach (dłuższej i krótkiej) i na transformatorze.

2. MODEL SYMULACYJNY PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

2.1. Model rozdzielni

Na rysunku 1 przedstawiono schemat rozdzielni (widok z okna programu komputerowego), na którym zaznaczono punkty obserwacji (A, B) warunków zwarciovych w systemach szyn nr I i nr II pomiędzy polami 12 i 13. W pierwszym przypadku po jednej stronie punktu obserwacji znalazły się dwa pola do których jest dołączony transformator T02 oraz linia L205, a po drugiej pozostałe gałęzie uwzględniane na schemacie. W drugim przypadku (system nr 2) po jednej stronie punktu obserwacji znajduje się tylko linia L206 o bardzo małym udziale w prądzie zwarciovym na szynach. Do wyznaczenia rozplywu prądów zwarciovych wykorzystano model sieci w programie Plans. Obliczenia symulacyjne wykonano dla układu, w którym maksymalny prąd dla zwarcia trójfazowego na szynach rozdzielni wynosi 40 kA.

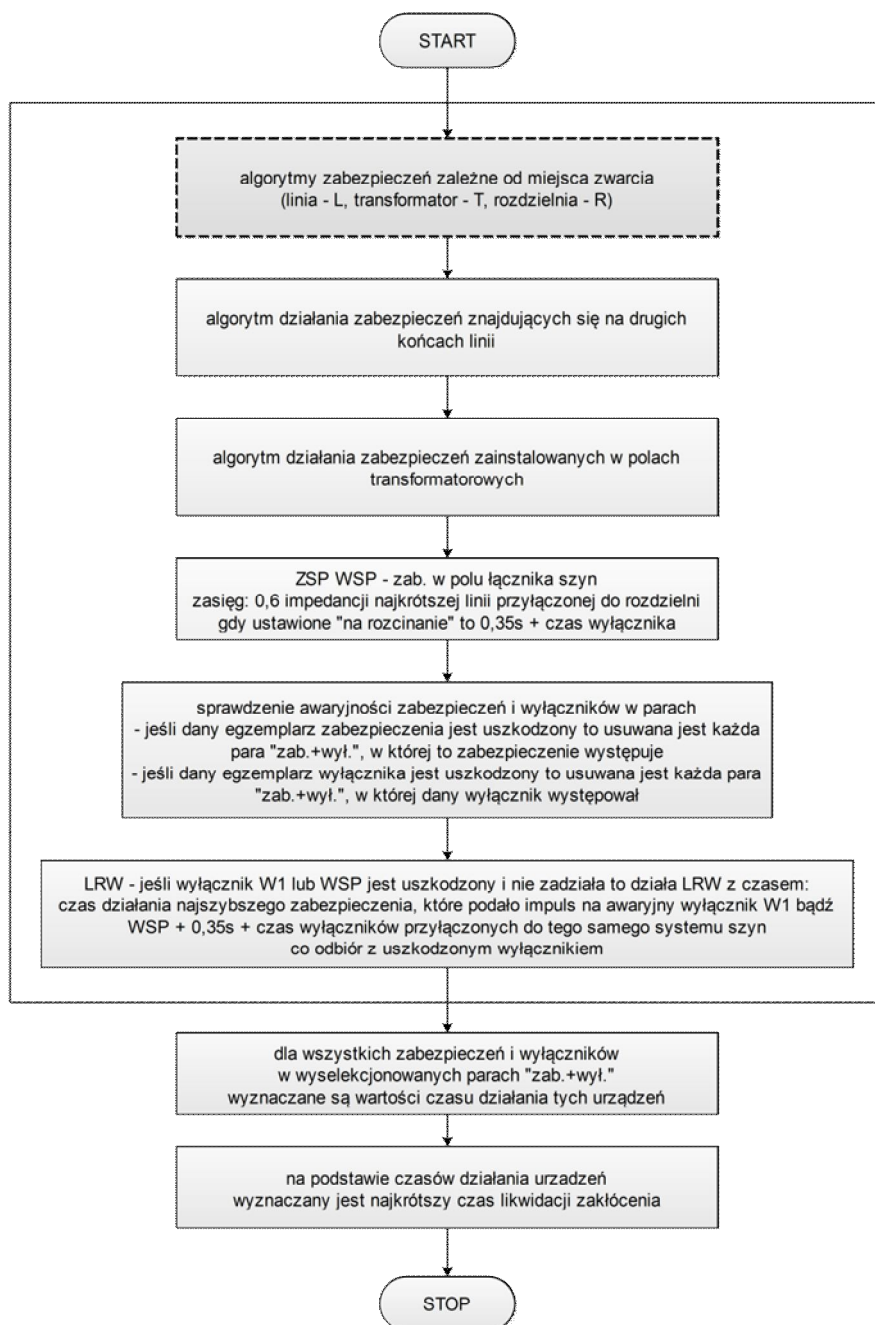


Rys. 1. Schemat badanej rozdzielni 220 kV – punkty obserwacji zaznaczono kwadratem na I i II systemie szyn pomiędzy polami nr 12 i 13

2.2. Model czasu trwania zwarcia

Podstawę do określania czasu trwania zwarcia w obliczeniach skutków zwarciovych stanowi analiza wartości czasu działania układu EAZ i wyłączników likwidujących zakłócenia w rozdzielni. Ogólny algorytm wyznaczania czasu przepływu prądu zwarciovego w rozdzielni przedstawiono na rys. 2.

Zasadę wyznaczania wartości T_k na drodze symulacji Monte Carlo w postaci kolejnych etapów bliżej omówiono w pracy [1]. Szczegółowe wymagania dotyczące instalowanych zabezpieczeń w polach rozdzielni WN i NN i elementów automatyki elektroenergetycznej podaje Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP) [2].



Rys. 2. Ogólny algorytm wyznaczania czasu trwania zwarcia w rozdzielni

Schemat fragmentu systemu zawierający badaną rozdzielnię 220 kV przedstawiono w pracy [3]. Działanie zabezpieczeń i wyłączników podczas zwarć na liniach i w rozdzielni oraz odpowiednie algorytmy (L,R) wyznaczania wartości czasu trwania zwarcia omówiono w pracach [3, 4]. Działanie zabezpieczeń podczas zwarć na transformatorze i w polach transformatora i zbudowany na tej podstawie algorytm (T) przedstawiono w pracy [5].

3. WYNIKI ANALIZY PRĄDÓW ZWARCIOWYCH I CZASU TRWANIA ZWARCIA

3.1. Wyniki analizy prądów zwarciovych

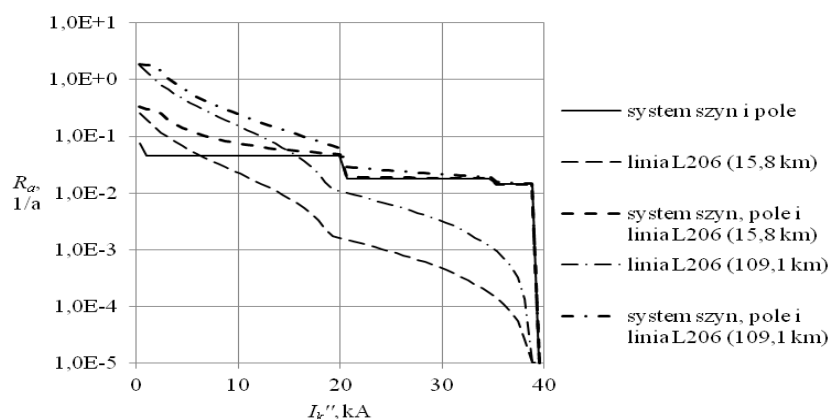
W celu weryfikacji opracowanego modelu i oceny warunków zwarciovych w rozdzielni dokonano szczegółowej analizy rozkładów prądu zwarciovego, czasu jego przepływu w wybranych dwóch jej punktach oraz sił dynamicznych spowodowanych przez te wielkości w przęsłach rozdzielni. W tabeli 1 przedstawiono wartości charakteryzujące rozptyw prądów zwarciovych w rozdzielni względem przyjętych punktów obserwacji.

Wyniki analizy podawano oddzielnie dla zwarć na systemie szyn łącznie z uwzględnianymi polami, dla zwarć na linii i na transformatorze oraz dla zwarć występujących na wszystkich tych elementach łącznie. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla dwóch różnych długości linii: 15,8 km – linia krótka oraz 109,1 km – linia długa.

Tabela 1. Wartości prądów zwarciovych charakteryzujące rozptyw w rozdzielni

Prąd zwarciovowy	Wartość prądu 2-fazowego [kA]	Wartość prądu 3-fazowego [kA]
Zwarcie na szynach rozdzielni	34,6	40,0
Udział transformatora T02	10,1	11,7
Udział linii L205	2,3	2,6
Udział linii L206	≈ 0	≈ 0
Zwarcie z prawej strony punktu A	23,8	27,5
Zwarcie z lewej strony punktu A	10,8	12,5
Zwarcie z prawej strony punktu B	≈ 34,6	≈ 40
Zwarcie z lewej strony punktu B	≈ 0	≈ 0

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy spodziewanej rocznej częstości przekroczeń (ryzyka) poszczególnych wartości prądu zwarciovego w punkcie obserwacji B, podczas zwarć w rozdzielni, na linii (krótkiej i długiej) oraz łącznie. Odpowiednie wartości prądów zwarciovych dla wybranych poziomów ryzyka zamieszczono w tabeli 2.



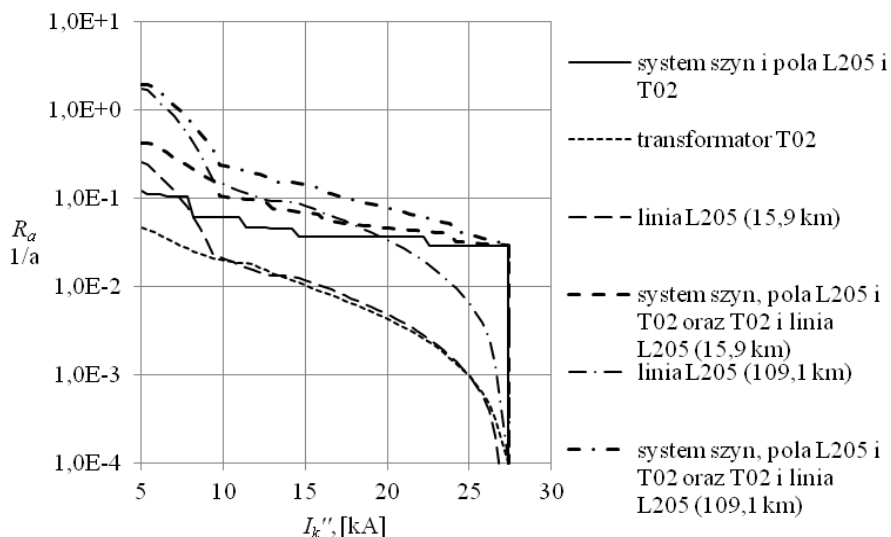
Rys. 3. Spodziewana roczna częstość przekroczeń poszczególnych wartości prądu zwarciovego w punkcie obserwacji B, dla różnych miejsc zwarcia

Tabela 2. Wartości prądów zwarciovego w punkcie B dla wybranych poziomów ryzyka, podczas zwarcia na różnych elementach badanego wycinka sieci

R_a [1/a]	I_k'' [kA]				
	Miejsce zwarcia				
	System szyn i pole	Linia L206 (15,8 km)	System szyn, pole linii i linia L206 (15,8 km)	Linia L206 (109,1 km)	System szyn, pole linii i linia L206 (109,1 km)
10^0	-	-	-	1,7	3,2
10^{-1}	-	3,1	6,6	12,3	16,5
10^{-2}	39,6	13,6	39,6	20,6	39,6
10^{-3}	39,6	24,1	39,6	35,3	39,6
10^{-4}	39,6	36,0	39,6	38,5	39,6

Wartość prądu zwarciovego płynąca przez punkt B rozdzielni wyznaczana dla poziomów ryzyka 10^{-2} 1/a i niższych jest głównie zdeterminowana przez zwarcia występujące w rozdzielni (systemy szyn i pola) i jest bliska maksymalnej wartości, na jaką rozdzielnia jest projektowana (40 kA).

Długość linii przyłączonej do badanej sekcji szyn zbiorczych, w której uwzględniane są zwarcia, ma dość znaczący wpływ na częstość występowania poszczególnych wartości prądu zwarciovego. Jednak prawdopodobieństwo wystąpienia dużych wartości prądu zwarciovego (bliskich wartości maksymalnej) jest małe w stosunku do prawdopodobieństwa występowania tych wartości podczas zwarcia na szynach. W sumarycznym zestawieniu (tabela 2) wpływ linii na wyznaczone wartości prądu zwarciovego można zauważyć dla ryzyka większego niż 10^{-2} 1/a.



Rys. 4. Spodziewana roczna częstość przekroczeń poszczególnych wartości prądu zwarciego w punkcie obserwacji A, dla różnych miejsc zwarcia

W tabeli 3 przedstawiono wyniki analizy spodziewanej rocznej częstości przekroczeń poszczególnych wartości prądu zwarciego w punkcie obserwacji A, podczas zwarć w rozdzielni, na transformatorze, na linii L205 (krótkiej i długiej) oraz łącznie, dla wybranych poziomów ryzyka. Rozpływ prądu zwarciego względem punktu obserwacji A sprawia, że maksymalna wartość prądu zwarciego w tym punkcie nie przekracza 27,5 kA i jest znacznie mniejsza od wartości maksymalnej podczas trójfazowego zwarcia na szynach.

Tabela 3. Wartości prądów zwarciegich w punkcie A dla wybranych poziomów ryzyka, podczas zwarć na różnych elementach badanego wycinka sieci

R_a [1/a]	I_k'' [kA]					
	Miejsce zwarcia					
	System szyn i pole	Transf. T-02	Linia L205 (15,8 km)	System szyn, pole linii i T-02 oraz T-02 i linia L205(15,8 km)	Linia L205 (109,1 km)	System szyn, pole linii i T-02 oraz T-02 i linia L205 (109,1 km)
10^0	-	-	-	-	6,6	7,4
10^{-1}	7,8	-	7,4	9,8	11,8	17,0
10^{-2}	27,4	15,0	15,8	27,4	23,8	27,4
10^{-3}	27,4	25,0	25,0	27,4	27,0	27,4
10^{-4}	27,4	27,4	27,0	27,4	27,4	27,4

Wartość prądu zwarciovego płynąca przez punkt A rozdzielni wyznaczana dla poziomów ryzyka 10^{-2} 1/a i niższych jest głównie zdeterminowana przez zwarcia występujące w rozdzielni (systemy szyn i pola), jest bliska 27,5 kA. Można także zauważyć wyraźny wpływ długości linii na badaną częstość przekroczeń poszczególnych wartości prądu zwarciovego w punkcie A (dla linii dłuższej jest ok. 10 razy większa). Dla wartości ryzyka 10^{-3} 1/a i mniejszych należy się liczyć, że zwarcia na linii długiej powodują pojawienie maksymalnej wartości prądu zwarcia w punkcie A, podobnie jak zwarcia na szynach.

Wpływ zwarc w gałęzi transformatora na badaną częstość prądów zwarciowych jest bardzo mały. Dla wartości ryzyka 10^{-2} 1/a i mniejszych jest zbliżony do wpływu linii krótkiej.

3.2. Wyniki analizy czasu trwania zwarcia

W tabeli 4 przedstawiono wyniki analizy spodziewanej rocznej częstości przekroczeń poszczególnych wartości czasu przepływu prądu zwarciovego przez punkt B rozdzielni, podczas zwarc w rozdzielni, na linii (krótkiej i długiej) oraz łącznie, dla wybranych poziomów ryzyka.

Najmniejszy wpływ na częstość występowania dużych wartości czasu trwania zwarcia mają zwarcia w rozdzielni. Jest to spowodowane dodatkowymi zabezpieczeniami o krótkim czasie działania. Należy do nich zaliczyć zabezpieczenie szyn zbiorczych oraz zabezpieczenie w polu łącznika szyn. Wartościom ryzyka 10^{-2} 1/a i 10^{-3} 1/a odpowiadają wartości czasu trwania zwarcia ok. 100 ms. Dopiero dla spodziewanej częstości przekroczeń 10^{-4} 1/a i mniejszych wartości czasu trwania zwarcia są zawarte pomiędzy 500 ms i 600 ms.

Tabela 4. Wartości czasu przepływu prądu zwarciovego przez punkt B, dla wybranych poziomów ryzyka, podczas zwarc na różnych elementach badanego wycinka sieci

R_a [1/a]	T_k [ms]				
	Miejsce zwarcia				
	System szyn i pole	Linia L206 (15,8 km)	System szyn, pole linii i linia L206 (15,8 km)	Linia L206 (109,1 km)	System szyn, pole linii i linia L206 (109,1 km)
10^{-1}	-	95,7	96,3	111,3	111,5
10^{-2}	93,4	115,8	117,9	498,3	498,6
10^{-3}	124,1	486,1	490,7	1056,6	1056,8
10^{-4}	525,9	1065,4	1066,6	1080,4	1081,7
10^{-5}	546,0	1080,0	1082,9	1094,9	1095,6
10^{-6}	583,0	1120,0	1123,0	1121,0	1126,0

Znacznie większy wpływ na wyznaczaną częstość przekroczeń poszczególnych wartości czasu przepływu prądu zwarciovego w punkcie B posiadają

zwarcia na linii. Znaczący wpływ długości linii na wyznaczone wartości czasu trwania zwarcia można zauważyć dla ryzyka 10^{-2} 1/a i 10^{-3} 1/a.

W tabeli 5 przedstawiono wyniki analizy spodziewanej rocznej częstości przekroczeń poszczególnych wartości czasu przepływu prądu zwarciovego przez punkt A rozdzielni, podczas zwarć w rozdzielni, na transformatorze, na linii (krótkiej i długiej) oraz łącznie, dla wybranych poziomów ryzyka.

Tabela 5. Wartości czasu przepływu prądu zwarciovego przez punkt A, dla wybranych poziomów ryzyka, podczas zwarć na różnych elementach badanego wycinka sieci

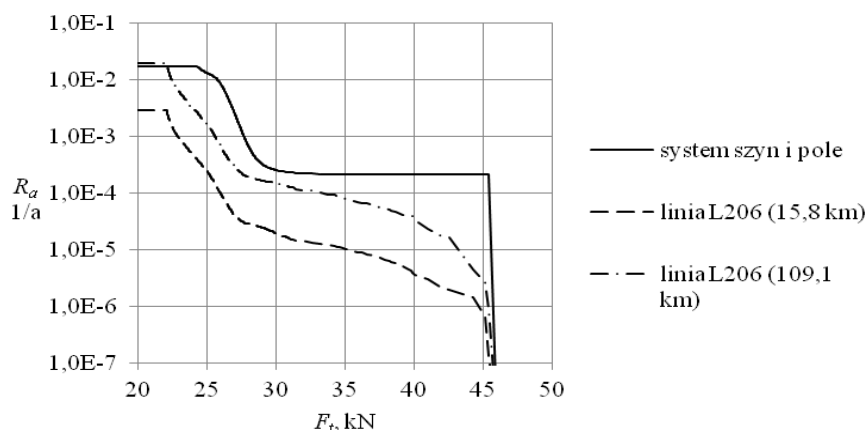
R_a [1/a]	T_k [ms]					
	Miejsce zwarcia					
	System szyn i pole	Transf. T-02	Linia L205 (15,8 km)	System szyn, pole linii i T-02 oraz T-02 i linia L205(15,8 km)	Linia L205 (109,1 km)	System szyn, pole linii i T-02 oraz T-02 i linia L205 (109,1 km)
10^{-1}	-	-	95,7	97,2	111,3	111,6
10^{-2}	93,4	92,6	115,6	119,3	498,5	499,3
10^{-3}	124,1	109,0	486,6	491,8	1058,6	1061,3
10^{-4}	525,9	125,5	1066,6	1065,3	1081,4	1082,8
10^{-5}	546,0	145,3	1086,8	1087,3	1094,4	1096,4
10^{-6}	583,0	223,0	1118,0	1121,0	1124,0	1126,0

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 5 można stwierdzić, że wyraźnie najmniejszy wpływ na częstość przekroczeń dużych wartości czasu trwania zwarcia mają zwarcia na transformatorze. Jest to spowodowane większą liczbą zabezpieczeń chroniących to urządzenie, szczególnie zabezpieczeniami różnicowo-prądowymi działającymi bezzwłocznie. Nawet dla poziomu ryzyka 10^{-6} 1/a czas trwania zwarcia wynosi około 220 ms. Wpływ reszty elementów jest podobny jak w przypadku analizy przeprowadzonej dla punktu B.

3.3. Wyniki analizy siły dynamicznej

Dla warunków zwarciovych w badanych punktach rozdzielni przeprowadzono także analizę sił dynamicznych, przy uwzględnieniu wymagań normy [6]. Krzywe ilustrujące spodziewaną roczną częstość przekroczeń poszczególnych wartości siły F_t dla prądu 220 kV o długości 56 m, wyznaczone dla warunków zwarciovych w punkcie B rozdzielni, podczas zwarć w rozdzielni, na linii (krótkiej i długiej) oraz łącznie, przedstawiono na rys. 4. Maksymalna wartość siły dla prądu wynosi około 46 kN.

Wyznaczone wartości siły F_t dla wybranych poziomów ryzyka, dla warunków zwarciovych w punkcie B, zamieszczono w tabeli 6.



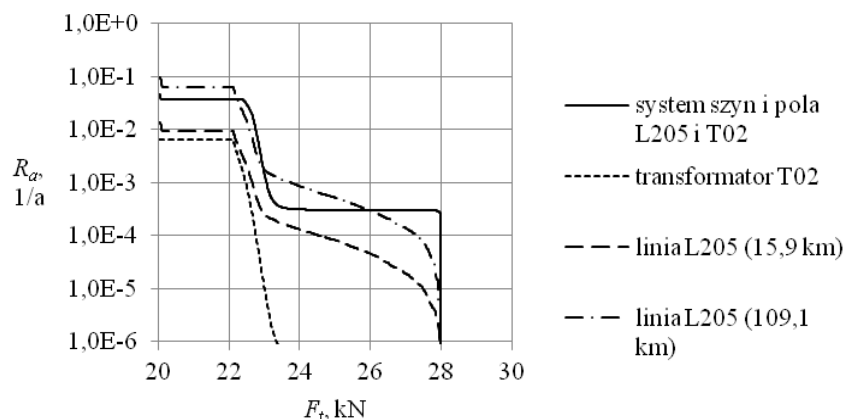
Rys. 4. Spodziewana roczna częstość przekroczeń poszczególnych wartości siły F_t dla warunków zwarciowych w punkcie obserwacji B, dla różnych miejsc zwarcia

Największy wpływ na spodziewaną częstość przekroczeń wartości bliskich maksymalnej wartości siły F_t mają zwarcia w rozdzielni (na szynach i w polu). Istotny wpływ na wyznaczaną częstość podczas zwarć na linii ma jej długość. Dla linii dłuższej częstość ta jest około 10 razy większa niż dla krótszej (rys. 4).

Tabela 6. Wartości siły F_t dla warunków zwarciowych w punkcie B, dla wybranych poziomów ryzyka, podczas zwarć na różnych elementach badanego wycinka sieci

R_a [1/a]	F_t [kN]				
	Miejsce zwarcia				
	System szyn i pole	Linia L206 (15,8 km)	System szyn, pole linii i linia L206 (15,8 km)	Linia L206 (109,1 km)	System szyn, pole linii i linia L206 (109,1 km)
10^{-2}	25,90	-	25,95	22,51	25,97
10^{-3}	27,81	22,88	27,90	25,60	27,83
10^{-4}	45,90	25,98	45,90	33,38	45,90
10^{-5}	45,90	35,55	45,90	43,35	45,90
10^{-6}	45,90	44,88	45,90	45,43	45,90

Krzywe ilustrujące spodziewaną roczną częstość przekroczeń poszczególnych wartości siły F_t , wyznaczone dla warunków zwarciowych w punkcie A rozdzielni, podczas zwarć w rozdzielni, na transformatorze, na linii (krótkiej i długiej) oraz łącznie, przedstawiono na rys. 5. Maksymalna wartość siły dla pręży wynosi około 28 kN.



Rys. 5. Spodziewana roczna częstość przekroczeń poszczególnych wartości siły F_t dla warunków zwarciovych w punkcie obserwacji B, dla różnych miejsc zwarcia

Wyznaczone wartości siły F_t dla wybranych poziomów ryzyka, dla warunków zwarciovych w punkcie A rozdzielni, zamieszczono w tabeli 7.

W stosunku do poprzedniego punktu obserwacji, w tym przypadku na dynamiczne skutki zwarciovowe mają dodatkowo pewien wpływ zwarcia na transformatorze. Zwarcia te ze względu na ich krótkie czasy trwania powodują powstawanie sił o stosunkowo małych wartościach. Największy wpływ na spodziewaną częstość sił o dużych wartościach mają zwarcia w rozdzielni, w dalszej kolejności na linii długiej potem krótkiej. Roczna częstość przekroczeń maksymalnej wartości siły jest mniejsza niż 10^{-3} 1/a.

Tabela 7. Wartości siły F_t dla warunków zwarciovych w punkcie B, dla wybranych poziomów ryzyka, podczas zwarć na różnych elementach badanego wycinka sieci

R_a [1/a]	F_t [kN]					
	Miejsce zwarcia					
	System szyn i pole	Transf. T-02	Linia L205 (15,8 km)	System szyn, pole linii i T-02 oraz T-02 i linia L205(15,8 km)	Linia L205 (109,1 km)	System szyn, pole linii i T-02 oraz T-02 i linia L205 (109,1 km)
10^{-1}	-	-	-	-	-	22,11
10^{-2}	22,72	-	-	22,73	22,58	22,78
10^{-3}	23,02	22,48	22,65	23,06	23,69	24,50
10^{-4}	28,00	22,76	24,56	28,00	27,26	28,00
10^{-5}	28,00	23,00	27,49	28,00	27,92	28,00
10^{-6}	28,00	23,29	27,97	28,00	28,00	28,00

5. WNIOSKI

Opracowany model oraz przeprowadzone przykładowe obliczenia symulacyjne stanowią kolejny etap prac mających na celu ocenę warunków zwarciowych w rozdzielniach najwyższych napięć z przewodami giętkimi ze względu na skutki dynamiczne. Przeprowadzone obliczenia symulacyjne pozwoliły ocenić wpływ zwarć na wybranych elementach sieci na warunki zwarciowe w dwóch punktach rozdzielni oraz na przewidywane skutki dynamiczne.

Wartości prądu zwarciowego oraz częstość ich występowania zależą od punktu rozdzielni, w którym wartości te są oceniane. Największa częstość prądu zwarciowego o dużych wartościach, bliskich wartości maksymalnej w punkcie obserwacji, jest spowodowana przez zwarcia w rozdzielni a następnie przez zwarcia na linii długiej dołączonej do tej rozdzielni. Znacznie mniejszą częstość występowania tych wartości powodują zwarcia na linii krótkiej i na transformatorze.

Dla określonego poziomu ryzyka największe wartości czasu przepływu prądu zwarciowego przez punkt rozdzielni są związane z występowaniem zwarć na liniach, szczególnie długich. Znacznie mniejsze wartości tych czasów są związane ze zvarciami występującymi w rozdzielni a najmniejsze ze zvarciami na transformatorze.

Największy wpływ na spodziewaną częstość przekroczeń siły F_t bliskich maksymalnej wartości mają zwarcia w rozdzielni (na szynach i w polu). Istotny wpływ na wyznaczaną częstość mają także zwarcia na linii długiej przyłączonej do szyn rozdzielni. Można uznać, że zwarcia na transformatorze mają pomijalny wpływ na częstość występowania wartości siły F_t bliskich maksymalnej.

Prowadzone prace mają na celu określenie wskazówek przydatnych podczas inżynierskiej oceny skutków dynamicznych w rozdzielniach z szynami giętkimi.

LITERATURA

- [1] Frąckowiak R., Piechocki P.: Wartości czasu trwania zwarcia w sieci elektroenergetycznej najwyższych napięć w świetle badań symulacyjnych, *Academic Journals Electrical Engineering*, Poznan University of Technology, nr 70, 2012, s. 75-82.
- [2] IRiESP - Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej – Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci przesyłowej: dostępna na stronie <http://www.pse-operator.pl>.
- [3] Frąckowiak R., Piechocki P.: Probabilistic assessment of the short-circuit duration on the 220 kV transmission line basing on simulation analysis, Monograph "Computer Applications in Electrical Engineering", Poznan University of Technology, Poznan 2012, vol. 10, p. 275-282.
- [4] Frąckowiak R., Piechocki P.: Values of short-circuit duration and dynamic forces during short- circuits in the EHV substations: simulation-based investigations, Mo-

- nograph “Computer Applications in Electrical Engineering”, Poznan University of Technology, Poznan 2014, vol. 12, p. 171-184.
- [5] Frąckowiak R., Piechocki P.: Short-circuit duration and dynamic forces in central section of substation, Monograph “Computer Applications in Electrical Engineering”, Poznan University of Technology, Poznan 2015, vol. 13, p. 220-230.
- [6] PN-EN 60865-1 Obliczanie skutków zwarciovych – Część I: Definicje i metody obliczania.

SHORT-CIRCUIT CONDITIONS IN DISTRIBUTION SUBSTATION DUE TO DISTURBANCES ON VARIOUS ELEMENTS OF THE GRID

The presented question forms a continuation of the research on the probabilistic-based assessment of the short-circuit duration in the EHV distribution stations is reported. In the research work, a model for simulation-based analysis of short-circuit conditions in distribution substations is applied, and the model using the Monte Carlo simulation technique is being especially developed. In the presented successive step of work, the influence of disturbances at different grid elements on the probability distribution of the short-circuit current and its flow duration and the dynamic forces in two different locations in the 220kV distribution station has been assessed. The analysis has been carried out for the faults across the busbar and in the substation’s bays, on the lines (short and long) and in the transformer.

(Received: 2. 02. 2016, revised: 3. 03. 2016)