ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1986

Seria: ELEKTRYKA z. 99 Nr kol. 860

ANDRZEJ BŁASZCZYK, JAN POPCZYK, KURT ŻMUDA

Instytut Elektroenergetyki i Sterowania
Układów Politechniki Śląskiej

OCENA WARUNKÓW ZWARCIOWYCH W SIECIACH ROZDZIELCZYCH SN

Część II

ANALIZA PROBABILISTYCZNA DOPUSZCZALNOŚCI PRZEKROCZEŃ WYTRZYMAŁOŚCI ZWARCIOWEJ URZĄDZEŃ

Streszczenie. Przedstawiono kryterium i metodę oceny dopuszczalności przekroczeń wytrzymałości zwarciowej urządzeń SN. Jako wielkości kryterialne zdefiniowano współczynnik bezpieczeństwa ekonomicznego oraz roczne ryzyko ekonomiczne. Przedstawiono metodę obliczania intensywności uszkodzeń na skutek przekroczenia wytrzymałości zwarciowej następujących urządzeń SN: linii napowietrznych, linii kablowych, aparatury w polach odpływowych i zasilających. Podano szacunkowe wartości oczekiwanych czasów pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami linii napowietrznych i kablowych o wybranych przekrojach oraz aparatury w polach odpływowych zwymiarowanej na prądy 10 i 20 kA. Uwzględniono przy tym szeroki zakres wartości procentowych przekroczeń (do 150%). Zaprezentowano wyniki przykładowych analiz dopuszczalności przekroczeń wytrzymałości zwarciowej linii napowietrznych i kablowych. Na podstawie przykładowych analiz określono wartości procentowe przekroczeń, dopuszczalne w sieciach SN ze względów ekonomicznych.

1. Wstęp

Podejście probabilistyczne w doborze urządzeń elektroenergetycznych na warunki zwarciowe jest przedmiotem badań naukowych od kilkunastu lat (ZSRR, Kanada, NRD, Polska, USA). Wyniki badań wskazują na dopuszczalność przekroczeń wytrzymałości zwarciowej urządzeń. Z drugiej strony inżynierowie sprzeciwiają się zmianom dotychczasowych zasad deterministycznych, według których wytrzymałość zwarciowa urządzenia powinna być nie mniejsza niż jego największe (obliczeniowe) obciążenie zwarciowe. Trzeba przy tym podkreślić, że konsekwentni są w zasadzie tylko inżynierowie - projektanci. Wynika to niewątpliwie stąd, że dotychczasowe zasady deterministyczne ciągle jeszcze nie stanowią poważnej bariery technicznej w projektowaniu nowych urządzeń. Inaczej jest w przypadku obiektów istniejących: szybki wzrost prądów zwarciowych w sieciach powoduje często konieczność moderni-

zacji, kłopotliwych pod względem technicznym i wymagających znacznych nakładów finansowych. Dlatego w praktyce przekroczenia eksploatacyjne wytrzymałości zwarciowej urządzeń są częste i dopuszcza się je nawet w przypadku takich urządzeń jak wyłączniki WN i NN (Polska, NRD, USA). Inżynierowie-eksploatatorzy godzą się na te przekroczenia wychodząc z intuicyjnego przeświadczenia, że prawdopodobieństwo wystąpienia największych (obliczeniowych) prądów zwarciowych jest bardzo małe. Naturalnie decyzje o dopuszczeniu do pracy urządzeń z przekroczoną wytrzymałością zwarciową muszą uwzględniać także skutki ewentualnych uszkodzeń.

Jednak obliczanie prawdopodobieństwa oraz skutków uszkodzenia urządzenia pracującego z przekroczoną wytrzymałością zwarciową jest trudne. Dlatego postępowanie inżynierów-eksploatatorów ma charakter procesu ewolucyjnego, w którym zakres przekroczeń zwiększa się stopniowo; jako miarę zakresu przekroczeń przyjmuje się wartości procentowe przekroczeń oraz procentowy udział urządzeń pracujących z przekroczeniem. Badania przeprowadzone dla wyłączników w polskich sieciach 110 kV wykazały jednak, że nie istnieje prosta współzależność między procentowym przekroczeniem wytrzymałości zwarciowej urządzenia i prawdopodobieństwem jego uszkodzenia[1].

Z tego powodu, między innymi, dopuszczalne przekroczenia eksploatacyjne wytrzymałości zwarciowej wyłączników 110 kV mogą być bardzo różne. Jeśli rozważać różne rodzaje urządzeń, pracujące w dodatku w sieciach o różnych napięciach znamionowych, to zróżnicowanie dopuszczalnych wartości procentowych przekroczeń wytrzymałości zwarciowej znacznie się jeszcze zwiększa. Stąd też wynika konieczność odrębnych badań dla urządzeń SN.

2. Kryterium i metoda oceny dopuszczalności przekroczeń

Ze względów ekonomicznych dane urządzenie może być dopuszczone do pracy z przekroczeniem jeżeli zachodzi

$$K_1 > E\left[K_u\right], \tag{1}$$

gdzie:

K_1 - koszt związany z likwidacją przekroczenia,

$E\left[K_u\right]$ - wartość oczekiwana kosztu związanego z usuwaniem uszkodzenia powstałego na skutek pracy z przekroczeniem.

[1] Prace IE i SU Politechniki Śląskiej, w szczególności praca doktorska - A. Błaszczyk: Zastosowanie modeli statystyczno-probablistycznych prądu zwarciowego do oceny dopuszczalności przekroczeń eksploatacyjnych znamionowej wytrzymałości zwarciowej wyłączników 110 kV. Gliwice 1984.

Przy praktycznym stosowaniu kryterium (1) celowe jest zdefiniowanie współczynnika bezpieczeństwa (ekonomicznego) k_b

$$k_b = \frac{K_1}{E[K_u]}. \tag{2}$$

Współczynnik k_b można traktować jako wielkość kryterialną. Jeżeli dla danego urządzenia $k_b < 1$, to konieczna jest likwidacja przekroczenia. Urządzenia, dla których $k_b \geq 1$ mogą ze względów ekonomicznych pracować z przekroczeniem.

Koszt K_1 jest w ogólnym przypadku kosztem działań zmierzających albo do zwiększenia wytrzymałości zwarciowej urządzeń (np. wymiana urządzeń na nowe o większej wytrzymałości), albo do zmniejszenia obciążeń zwarciowych (np. instalowanie dławików zwarciowych, stosowanie transformatorów 110 kV/SN o podwyższonym napięciu zwarcia, skracanie czasów trwania zwarcia). W analizie prezentowanej w niniejszym artykule ograniczono się do pierwszej grupy działań.

W szczególności przyjęto, że:

- jeżeli ocena dopuszczalności przekroczeń jest dokonywana w procesie eksploatacji, to K_1 jest kosztem modernizacji polegającej na dostosowaniu istniejących urządzeń do poziomu prądów zwarciowych:
- jeżeli natomiast ocena dotyczy projektowania (względnie planowania rozwoju sieci), to K_1 jest różnicą pomiędzy kosztem rozwiązania droższego, w którym dzięki zastosowaniu urządzeń o większej wytrzymałości nie występują przekroczenia, a kosztem rozwiązania tańszego z przekroczeniami.

Wartość oczekiwaną $E[K_u]$ oblicza się przy założeniu, że uszkodzenia danego urządzenia spowodowane przekroczeniami będą zachodziły z intensywnością $\lambda_u = \frac{1}{T_u}$, gdzie T_u jest przeciętnym czasem do pierwszego uszkodzenia (lub przeciętnym czasem między kolejnymi uszkodzeniami). W obliczeniach rozróżnia się dwa przypadki:

1 - urządzenie uszkodzone na skutek przekroczenia zostanie zastąpione nowym o wyższej wytrzymałości zwarciowej - po usunięciu uszkodzenia przekroczenie nie występuje,

2 - naprawa uszkodzeń nie zmienia wytrzymałości zwarciowej urządzenia - przekroczenie nadal występuje.

Wartość oczekiwaną można dla obydwu przypadków wyrazić w następujący sposób:

- dla przypadku 1

$$E[K_u] = \int_0^{\vartheta} K_u(1+r)^{-\tau} \lambda_u \exp(-\lambda_u \tau)\, d\tau \tag{3}$$

- dla przypadku 2

$$E\left[K_u\right] = \int_0^{\vartheta} K_u(1+r)^{-\tau}\,\vartheta_u\,d\tau\,, \tag{4}$$

gdzie:

K_u - koszt uszkodzenia (suma kosztu napraw i kosztu $K_{\Delta A}$ niedostarczonej energii) obliczony w roku 0, tj. w roku, w którym wystąpiło przekroczenie[1],

r - stopa dyskontowa,

ϑ - przewidywany czas eksploatacji urządzenia z przekroczeniem, w latach.

Rozwiązując całki (3), (4) i podstawiając do (2) otrzymujemy ostatecznie:

- dla przypadku 1

$$k_b = \frac{K_1}{K_u}\cdot\frac{1+T_u\ln(1+r)}{1-(1+r)^{-\vartheta}\exp(-\frac{\vartheta}{T_u})} \tag{5}$$

- dla przypadku 2

$$k_b = \frac{K_1}{K_u}\cdot\frac{T_u\ln(1+r)}{1-(1+r)^{-\vartheta}}\,. \tag{6}$$

Dla urządzeń dopuszczonych do eksploatacji z przekroczeniem można określić roczne ryzyko (ekonomiczne) K_r związane z ich eksploatacją. Ryzyko K_r można utożsamiać z wartością oczekiwaną $E\left[K_u\right]$ obliczoną wg wzoru (3) lub (4) przyjmując $\vartheta = 1$ oraz w uproszczeniu $r = 0$:

- dla przypadku 1 mamy

$$K_r = K_u\left[1-\exp(-\frac{1}{T_u})\right] \tag{7}$$

- natomiast dla przypadku 2

[1] Jeżeli koszt K_1 we wzorach (1) i (2) trzeba ponieść na T_o lat przed wystąpieniem przekroczenia, tj. w roku $-T_o$, to koszt ten należy przeliczyć na rok 0 mnożąc go przez czynnik $(1+r)^{T_o}$.

$$K_r = \frac{K_u}{T_u} \tag{8}$$

Sumując wartości K_r obliczone dla poszczególnych urządzeń pracujących w danej sieci z przekroczeniem otrzymuje się łączne ryzyko $K_{r\Sigma}$. Jeżeli liczba przekroczeń występujących w sieci jest odpowiednio duża, to ryzyko $K_{r\Sigma}$ można traktować jako koszt ponoszony w ciągu roku na likwidację szkód związanych z przekroczeniami. Znajomość $K_{r\Sigma}$ pozwala na określenie dopuszczalnej liczby przekroczeń w całej sieci.

3. Szacunkowe czasy przeciętne między uszkodzeniami na skutek przekroczeń

Przy szacowaniu przeciętnego czasu T_u między uszkodzeniami danego urządzenia na skutek przekroczeń wymagane jest indywidualne podejście do poszczególnych urządzeń w sieci SN. Uwzględniając przekroczenia występujące w rzeczywistej sieci (część I artykułu) celowe wydaje się rozpatrzenie następujących urządzeń: (i) przewody robocze linii napowietrznych i kablowych, (ii) urządzenia w polach odpływowych rozdzielni SN, (iii) urządzenia w polach zasilających rozdzielni SN.

Dla uproszczenia przyjmuje się, że uszkodzenie na skutek przekroczenia występuje wtedy, gdy losowe obciążenie zwarciowe osiągnie wartość większą od parametru określającego wytrzymałość, traktowanego jako wielkość o charakterze deterministycznym (model półprobabilistyczny).

3.1. Przewody robocze linii napowietrznych i kablowych

W szacunkowej ocenie dopuszczalności przekroczeń można zaproponować uproszczone podejście do wyznaczania czasu T_u. Podejście to polega na założeniu, że jedynym czynnikiem losowym, od którego zależy obciążenie zwarciowe jest prąd początkowy. Pozostałe czynniki losowe (czas trwania zwarcia, temperatura przewodu przed zwarciem i inne) przyjmują natomiast z góry określone wartości, tj. wartości, które wynikają z obecnie obowiązujących przepisów i wytycznych projektowania. Dla przewodów roboczych linii SN dopuszczalna wartość prądu początkowego I_{pd}, który spowoduje, że przewód osiągnie temperaturę graniczną dopuszczalną przy zwarciu, wynosi:

$$I_{pd} = \frac{j_{1d}\, s}{k_o \sqrt{t_z}}, \tag{9}$$

gdzie:

j_{1d} - obciążalność zwarciowa jednosekundowa,

t_z - czas trwania zwarcia,

k_c - współczynnik uwzględniający składową nieokresową prądu zwarciowego,

s - przekrój przewodu.

W tablicy 1 podano wartości I_{pd} obliczone wg wzoru (9) dla linii napowietrznych i kablowych o wybranych przekrojach. W tablicy tej podano również, przyjęte do obliczeń, wartości j_{1d}, k_c i t_z.

Dla oszacowania czasu T_u wystarczy określić jak często występują zwarcia, w czasie których prądy początkowe płynące przez daną linię są większe od I_{pd}. Oczywiście zwarcia takie mogą występować tylko wtedy, gdy obliczeniowy prąd początkowy I_{pmax} przekracza wartość I_{pd}. Procentową wartość przekroczenia oblicza się w następujący sposób.

$$p = \frac{I_{pmax} - I_{pd}}{I_{pd}} 100\% \tag{10}$$

Prąd I_{pmax} popłynie przez linię SN, jeżeli zwarcie trójfazowe wystąpi na jej początku. W miarę oddalania się miejsca zwarcia od początku linii maleje prąd początkowy. Można zatem dla danego przekroczenia p wyznaczyć krytyczną długość odcinka l_{3f}, przy której następuje zrównanie prądu początkowego zwarcia trójfazowego z dopuszczalnym

$$l_{3f} = \frac{1,1 \quad U_n}{\sqrt{3}\, X' I_{pd}} \cdot \frac{p}{p+100}, \tag{11}$$

gdzie:

U_n - napięcie znamionowe sieci,

X' - reaktancja jednostkowa linii (dla składowej symetrycznej zgodnej).

Dla zwarć dwufazowych (w tym również podwójnych) krytyczna długość l_{2f} wynosi:

$$l_{2f} = \frac{1,1 \quad U_n}{\sqrt{3}\, X' I_{pd}} \quad \frac{\sqrt{3}\, p - 100(2-\sqrt{3})}{2(p+100)}, \tag{12}$$

Tablica 1

Długości krytyczne l_{3f} w zależności od przekroczenia p prądu dopuszczalnego I_{pd} dla przewodów roboczych linii napowietrznych i kablowych o wybranych przekrojach

		S [mm²]	I_{pd} [kA]	U_n [kV]	Długości l_{3f} [km] dla p = 10%	20%	30%	40%	50%	100%	150%
Linie napowietrzne	j_{1d} = 93 A/mm²	35	3,1	20	0,9	1,7	2,4	2,9	3,4	5,1	6,2
				15	0,7	1,2	1,8	2,2	2,6	3,8	4,6
	t_z = 0,2s+0,2s+0,7s =1,1s	70	6,2	20	0,5	0,9	1,2	1,5	1,7	2,6	3,1
				15	0,3	0,6	0,9	1,1	1,3	1,9	2,3
	k_c ≅ 1,0	120	10,5	20	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,8
				15	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,1	1,4
Linie kablowe	j_{1d} = 80 A/mm² dla 15 i 20 kV	70	5,1	20	2,3	4,2	5,8	7,1	8,3	12,5	14,9
				15	1,7	3,1	4,3	5,3	6,2	9,3	11,2
	j_{1d} = 72 A/mm² dla 6 kV		4,6	6	0,8	1,4	1,9	2,4	2,8	4,1	5,0
	t_z = 1,2 s	120	8,8	20	1,3	2,4	3,3	4,1	4,8	7,2	8,7
				15	1,0	1,8	2,5	3,1	3,6	5,4	6,5
	k_c ≅ 1,0		7,9	6	0,4	0,8	1,1	1,4	1,6	2,4	2,9
		240	17,5	20	0,7	1,2	1,7	2,1	2,4	3,6	4,4
				15	0,5	0,9	1,2	1,6	1,8	2,7	3,3
			15,8	6	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	1,2	1,5

Uwagi: 1) W przypadku linii napowietrznych prąd I_{pd} obliczono dla zwarć trwałych, przy czym przyjęto, że czas t_z jest sumą czasów trwania kolejnych impulsów zwarciowych przy dwukrotnym SPZ. Jeżeli SPZ jest udane, to czas trwania zwarcia jest krótszy od t_z i wynosi 0,4 s dla zwarć wolno przemijających oraz 0,2 s dla zwarć przemijających.

2) W przypadku linii kablowych przyjęto j_{1d} jak dla kabli w izolacji polietylenowej.

przy czym l_{2f} należy obliczać tylko wtedy, gdy prąd początkowy zwarcia dwufazowego jest większy od I_{pd}, tj. wtedy, gdy p > 14%.

W tablicy 1 przedstawiono przykładowe wartości l_{3f} dla linii napowietrznych i kablowych o wybranych przekrojach w zależności od przekroczenia p. Wartości te obliczono przyjmując reaktancję jednostkową linii napowietrznych $X' = 0,4\,\Omega/km$ oraz kablowych $X' = 0,1\,\Omega/km$.

Przeciętna długość krytyczna $\bar{l}$ wynosi

$$\bar{l} = P_{2f}\, l_{2f} + P_{3f}\, l_{3f}, \tag{13}$$

gdzie: P_{2f} i P_{3f} są prawdopodobieństwami warunkowymi zwarć dwu- i trójfazowych (pod warunkiem, że wystąpiło zwarcie międzyfazowe).

Intensywność uszkodzeń λ_u na skutek przekroczeń jest równa wprost intensywności zwarć międzyfazowych występujących na odcinku o długości krytycznej $\bar{l}$. Jednak długość $\bar{l}$, w przypadku gdy zwarcie jest wyłączane w cyklu dwukrotnego SPZ, może być różna dla zwarć trwałych, wolno przemijających i przemijających. Wynika to z różnych czasów trwania tych zwarć (patrz uwagi do tablicy 1).

Wobec tego intensywności uszkodzeń λ_u oraz czas T_u między kolejnymi uszkodzeniami na skutek przekroczeń należy obliczać wg następującego wzoru:

$$\lambda_u = \frac{1}{T_u} = (P_t\bar{l}_t + P_w\bar{l}_w + P_p\bar{l}_p)\,\lambda_{zl}, \tag{14}$$

gdzie:

$\bar{l}_t, \bar{l}_w, \bar{l}_p$ - przeciętna długość krytyczna linii SN obliczona wg wzoru (13) odpowiednio dla zwarć trwałych, wolno przemijających i przemijających,

P_t, P_w, P_p - prawdopodobieństwa warunkowe zwarć trwałych, wolno przemijających i przemijających (pod warunkiem, że wystąpiło zwarcie międzyfazowe),

λ_{zl} - intensywność zwarć międzyfazowych na jednostkę długości linii i na 1 rok.

W tablicy 2 przedstawiono wyniki obliczeń czasu T_u dla wybranych linii SN oraz dla różnych wartości przekroczeń. W obliczeniach wykorzystano wyniki podane w tablicy 1 oraz przyjęto następujące dane, wg pracy [2] :

- $\lambda_{zl} = 50\ \frac{\text{zwarć}}{100\text{km.rok}}$ dla linii napowietrznych oraz

$\lambda_{zl} = 20\ \frac{\text{zwarć}}{100\text{km.rok}}$ dla linii kablowych,

Tablica 2

Przeciętne czasy T_u między uszkodzeniami przewodów roboczych linii napowietrznych i kablowych w zależności od przekroczenia p prądu dopuszczalnego I_{pd}

	S [mm²]	U_n [kV]	Czasy T_u w latach dla p = 10%	20%	30%	40%	50%	100%	150%
Linie napowietrzne	35	20	36	13	7,1	5,0	4,0	2,2	0,7
		15	48	18	9,5	6,8	5,4	2,9	0,9
	70	20	72	27	14	10	8,2	4,4	1,4
		15	95	36	19	14	11	5,8	1,8
	120	20	120	45	24	17	14	7,5	2,4
		15	160	60	32	23	18	10	3,2
Linie kablowe	70	20	7,4	2,8	1,5	1,1	0,8	0,5	0,4
		15	9,8	3,7	2,0	1,4	1,1	0,7	0,5
		6	22	8,3	4,4	3,1	2,5	1,4	1,2
	120	20	13	4,8	2,5	1,8	1,5	0,9	0,7
		15	17	6,3	3,4	2,4	1,9	1,1	0,9
		6	38	14	7,6	5,4	4,3	2,6	2,1
	240	20	25	9,5	5,0	3,6	2,9	1,7	1,4
		15	34	13	6,7	4,8	3,8	2,3	1,8
		6	76	28	15	11	8,7	5,1	4,1

- $P_{3f} = 0,3$ oraz $P_{2f} = 0,7$ zarówno dla linii napowietrznych jak i kablowych,
- $P_t = 0,2$; $P_w = 0,1$; $P_p = 0,7$ dla linii napowietrznych oraz $P_t = 1$; $P_w = 0$; $P_p = 0$ dla linii kablowych (w których zwarcia są wyłączane bez udziału automatyki SPZ).

3.2 Urządzenia w polach odpływowych rozdzielni SN

Podobnie jak w p.3.1 przyjmuje się, że dla każdego urządzenia można określić prąd początkowy dopuszczalny I_{pd}. Inny jest natomiast sposób wyznaczenia wartości tego prądu. Urządzenia rozdzielcze są narażone zarówno na oddziaływania cieplne prądu zwarciowego jak i na oddziaływania elektrodynamiczne. W przypadku wyłączników należy ponadto uwzględnić obciążenia występujące przy wyłączaniu zwarć.
Prąd dopuszczalny należy określać oddzielnie dla każdego rodzaju obciążenia zwarciowego, można przy tym zaproponować następujące zależności:

- dla obciążeń cieplnych

$$I_{pdc} = \frac{I_{nn}}{k_c} \sqrt{\frac{n}{t_z}} \tag{15}$$

- dla obciążeń elektrodynamicznych

$$I_{pde} = \frac{i_{nsz}}{\sqrt{2}\, k_u} \tag{16}$$

- dla obciążeń przy wyłączaniu zwarcia (tylko w przypadku wyłączników)

$$I_{pdw} = \frac{I_{nws}}{k_w}, \tag{17}$$

gdzie:

I_{nn}, i_{nsz}, I_{nws} - parametry charakteryzujące wytrzymałość urządzenia na poszczególne rodzaje obciążeń zwarciowych, a więc odpowiednio: prąd znamionowy n-sekundowy, znamionowy prąd szczytowy, znamionowy prąd wyłączalny symetryczny,

k_c, k_u, k_w - współczynniki traktowane deterministycznie obliczone wg obowiązujących przepisów (PN-74/E-05002).

Zwarcia zagrażające urządzeniom w polu odpływowym występują w samym polu oraz w jego otoczeniu. Jeśli ograniczyć analizę do urządzeń w polach liniowych, to odpowiednie otoczenie obejmuje linię SN. Dla urządzeń tych można określić krytyczną długość odcinka, na którym prądy początkowe mogą osiągnąć wartości większe od I_{pd} (jako I_{pd} należy przyjąć najmniejszą z wartości I_{pdc}, I_{pde}, I_{pdw}). Czas T_u pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami można wtedy obliczyć za pomocą wzorów (10) do (14). Zakłada się przy tym, że zwarcia w samym polu, które występują rzadko, nie wpływają istotnie na zmniejszenie czasu T_u.

W tablicy 3 przedstawiono wyniki obliczeń czasu T_u dla urządzeń rozdzielczych w polach odpływowych (liniowych). W obliczeniach przyjęto, że prąd początkowy dopuszczalny wynosi 10 kA dla rozdzielni 15 i 20 kV oraz 20 kA dla rozdzielni 6 kV. Wartości te odpowiadają poziomom prądów zwarciowych przyjmowanym aktualnie przy projektowaniu rozdzielni SN.

Tablica 3

Przeciętne czasy T_u między uszkodzeniami urządzeń rozdzielczych w polach odpływowych w zależności od przekroczenia p prądu dopuszczalnego I_{pd}

Sieć	I_{pd} [kA]	U_n [kV]	Czas T_u w latach dla p = 10%	20%	30%	40%	50%	100%	150%
napowietrzna	10	20	23	8,6	4,6	3,3	2,6	1,6	1,2
		15	31	12	6,1	4,4	3,5	2,1	1,6
kablowa	10	20	14	5,4	2,9	2,1	1,6	1,0	0,7
		15	19	7,2	3,8	2,7	2,2	1,3	1,0
	20	6	96	36	19	14	11	6,5	5,2

Uwaga: W obliczeniach czastu T_u przyjęto dane (X', λ_{zl}, P_{3f}, P_{2f}, P_t, P_w, P_p) takie jak w p.3.1.

3.3 Urządzenia w polach zasilających rozdzielni SN

Czasy T_u dla urządzeń w polach zasilających można szacować wg następującej zależności:

$$\lambda_u = \frac{1}{T_u} = P_r \lambda_{zr} + \sum_j \lambda_{uj} , \qquad (18)$$

gdzie

P_r - prawdopodobieństwo warunkowe uszkodzenia rozpatrywanego urządzenia, pod warunkiem, że wystąpiło zwarcie międzyfazowe w obrębie rozdzielni,

λ_{zr} - intensywność zwarć międzyfazowych w obrębie rozdzielni,

λ_{uj} - intensywność uszkodzeń rozpatrywanego urządzenia na skutek przekroczeń przy zwarciach w j-tym odpływie.

Intensywności składowe λ_{uj} oblicza się podobnie jak dla urządzeń w polach odpływowych, tzn. wg zależności (10) do (14), przyjmując prąd dopuszczalny I_{pd} określony wg wzorów (15) do (17).

Ze wzoru (18) wynika, że dla urządzeń w polach zasilających intensywność uszkodzeń spowodowanych przepływem nadmiernych prądów zwarciowych jest przy takich samych przekroczeniach znacznie większa niż dla urządzeń w polach odpływowych. Należy zatem unikać przekroczeń wytrzymałości zwarciowej tych urządzeń.

4. Przykłady analizy dopuszczalności przekroczeń

Przykład 1. Na etapie projektowania (lub planowania rozwoju sieci) należy przeanalizować dopuszczalność pracy z przekroczeniem linii napowietrznej 20 kV z przewodami roboczymi o przekroju 70 mm^2.
Należy rozważyć 2 warianty:

- wariant A - przekroczenie wystąpi po 15 latach eksploatacji linii (T_0 = 15 lat),
- wariant B - przekroczenie występuje od chwili rozpoczęcia eksploatacji (T_0 = 0).

W analizie przyjmuje się następujące założenia oraz dane:

(i) Alternatywnym rozwiązaniem pozwalającym na likwidację przekroczeń jest zastosowanie przekroju 120 mm^2 na odcinku, na którym występują przekroczenia dla przekroju 70 mm^2 (odcinek o długości l_{3f} określony dla zwarć trwałych). Różnica kosztów pomiędzy obydwoma rozwiązaniami wynosi 300 tys. zł.[1)].

(ii) Naprawa uszkodzeń polega na wymianie przewodów na odcinku, przez który przepłynął nadmierny prąd zwarciowy (nowe przewody również o przekroju 70 mm^2). W uproszczeniu można przyjąć, że przeciętna długość tego odcinka wynosi $\frac{1}{2}\, l_{3f}$. Koszt wymiany wynosi 160 tys. zł./km.

1) Poziom cen z 1984 r. Dotyczy to wszystkich cen i kosztów przyjętych w analizie.

(iii) Koszt niedostarczonej energii szacuje się wg zależności:

$$K_{\Delta A} = k_p \Delta A, \tag{19}$$

gdzie:

k_p - koszt jednostkowy niedostarczonej energii równy 25-krotnej cenie kupna i sprzedaży energii elektrycznej (w przybliżeniu k_p = 50 zł/kWh),

ΔA - energia niedostarczona wskutek uszkodzenia.

Przy określeniu niedostarczonej energii uwzględnia się 3 warianty:

(a) $\Delta A = 0$,

(b) $\Delta A = \overline{\Delta A}$,

(c) $\Delta A = 2 \cdot \overline{\Delta A}$,

przy czym $\overline{\Delta A}$ jest przeciętną energią niedostarczoną wskutek uszkodzenia linii SN. Z dostępnych danych statystycznych [2] wynika, że dla linii napowietrznych $\overline{\Delta A}$ = 4 MWh/uszk.

(iv) Normatywny okres eksploatacji linii napowietrznej wynosi 35 lat, co daje w konsekwencji przewidywany okres ϑ eksploatacji z przekroczeniem: dla wariantu A ϑ = 20 lat oraz dla wariantu B ϑ = 35 lat.

(v) Stopa dyskontowa r = 0,08.

(vi) Długości l_{3f} oraz czasy T_u przyjmuje się wg tabl. 1 i 2.

Tablica 4

Wyniki oceny dopuszczalności przekroczeń dla linii napowietrznej 20 kV o przekroju 70 mm^2

	Wariant		p = 10%	20%	30%	40%	50%	100%	150%
$\frac{K_{\Delta A}}{K_u}$ 100%	A i B	a	-	-	-	-	-	-	-
		b	83	74	67	63	59	49	44
		c	91	85	80	77	74	66	62
K_r [tys. zł]	A i B	a	0,6	2,7	6,8	12	17	48	180
		b	3,4	10	21	31	41	93	320
		c	6,1	18	35	51	66	140	460
k_b	A	a	84	31	17	12	9,6	5,1	1,6
		b	14	8,4	5,4	4,5	3,9	2,6	0,9
		c	7,6	4,8	3,2	2,8	2,4	1,8	0,6
	B	a	22	8,3	4,4	3,2	2,5	1,4	0,4
		b	3,7	2,2	1,4	1,2	1,0	0,7	0,2
		c	2,0	1,3	0,9	0,7	0,6	0,5	0,2

Wyniki analizy przedstawiono w tabl. 4. Dla poszczególnych wariantów obliczono:

- udział kosztu niedostarczonej energii w koszcie uszkodzenia

$$\frac{K_{\Delta A}}{K_u} 100\%,$$

- współczynnik bezpieczeństwa k_b wg (6),
- roczne ryzyko K_r wg (8).

Przykład 2. Należy przeanalizować dopuszczalność pracy z przekroczeniem linii kablowej 20 kV o przekroju 120 mm^2 (kable jednożyłowe typu YHAKX) dla dwóch wariantów:

- wariant A - analiza dotyczy linii kablowej nowo projektowanej, dla której przekroczenie wystąpi po 15 latach eksploatacji (T_o = 15 lat),
- wariant B - analiza dotyczy linii kablowej istniejącej, eksploatowanej od 15 lat (T_o = 0).

Przyjmuje się następujące założenia oraz dane:

(i) Alternatywnym rozwiązaniem likwidującym przekroczenia jest zastosowanie kabli o przekroju 240 mm^2 (również typu YHAKX) na odcinku, na którym występują przekroczenia dla przekroju 120 mm^2 (długość odcinka wynosi l_{3f}). Różnica w cenie kabli o przekroju 240 i 120 mm^2 wynosi ok. 300 tys. zł./km (w trzech fazach). Koszt budowy linii kablowej z kablami o przekroju 240 mm^2 wynosi natomiast ok. 2 mln zł/km.

(ii) Naprawa uszkodzeń polega na wymianie uszkodzonych kabli (we wszystkich fazach) na odcinku, przez który przepłynął nadmierny prąd zwarciowy. W uproszczeniu można przyjąć, że przeciętna długość tego odcinka wynosi $\left[\frac{1}{2}\right] l_{3f}$. Jest to praktycznie równoznaczne z budową nowej linii kablowej na odcinku $\frac{1}{2} l_{3f}$. W celu uproszczenia obliczeń przyjmuje się ponadto, że nowe kable mają również przekrój 120 mm^2. Koszt budowy linii kablowej z kablami o przekroju 120 mm^2 wynosi ok. 1,7 mln zł/km.

(iii) Koszt niedostarczonej energii szacuje się podobnie jak w przykładzie 1, tj. wg zależności (19). Przy określaniu niedostarczonej energii przyjmuje się tylko jeden wariant $\Delta A = \overline{\Delta A}$ = 2,5 MWh/uszk.

(iv) Normatywny okres eksploatacji linii kablowej wynosi 35 lat i stąd przewidywany okres eksploatacji z przekroczeniem wynosi dla obydwu wariantów Ψ = 20 lat.

(v) Stopa dyskontowa r = 0,08.

(vi) Długości l_{3f} oraz czasy T_u przyjmuje się wg tabl. 1 i 2.

Wyniki analizy przedstawiono w tabl. 5. Dla obydwu wariantów obliczono te same wielkości co w przykładzie 1.

Tablica 5

Wyniki oceny dopuszczalności przekroczeń dla linii kablowej 20 kV o przekroju 120 mm^2

	Wariant	p =						
		10%	20%	30%	40%	50%	100%	150%
$\frac{K_{\Delta A}}{K_u}$ 100%	A i B	9,3	5,3	3,9	3,2	2,7	1,8	1,5
K_r [mln zł]	A i B	0,1	0,5	1,2	2,0	2,8	7,0	11
k_b	A	1,2	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
	B	2,7	1,1	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2

5. Zakończenie

Szczegółowe wnioski wynikające z analizy dopuszczalności przekroczeń wytrzymałości zwarciowej urządzeń SN zostały przedstawione w pracy [2]. Wnioski te stanowią jedną z podstaw sformułowania wytycznych doboru urządzeń w polskich sieciach rozdzielczych na warunki zwarciowe. Dopuszczalne przekroczenie w sieciach istniejących, przyjęte w „Wytycznych programowania rozwoju sieci elektroenergetycznych" (rozdz. IV - Programowanie rozwoju sieci SN i NN, wersja 2) opracowanych przez Instytut Energetyki - Zakład Sieci Rozdzielczych w 1984 r., są następujące:

- dla linii napowietrznych 30%,
- dla linii kablowych 15%,
- dla urządzeń rozdzielczych (z wyjątkiem wyłączników, urządzeń w polach zasilających oraz szyn zbiorczych) 20%.

Podane wartości nie są ostateczne; opracowana wersja wytycznych jest propozycją, która zostanie poddana dyskusji (ankietyzacji) i następnie dopiero, po ewentualnych zmianach zatwierdzona. Jednak uwzględnienie w "Wytycznych..." możliwości przekroczeń wskazuje na duże perspektywy praktycznego zastosowania nowego (probabilistycznego) podejścia w doborze urządzeń na warunki zwarciowe. Na perspektywy takie wskazują również normy opracowane ostatnio za granicą, w szczególności norma RWPG z 1980 r. (nie przyjęta, jak dotąd, przez Polskę) oraz norma TGL-200-0606/01-04 opracowana w NRD w 1984 r. Obie normy dotyczą doboru urządzeń ze względu na cieplne i elektrodynamiczne oddziaływania prądu zwarciowego i przewidują możliwości stosowania zarówno obowiązujących dotychczas zasad deterministycznych jak i zasad nowych, probabilistycznych.

LITERATURA - patrz część I artykułu.

Recensent: prof. dr hab. inż. Szczęsny Kujczczyk

Wpłynęło do redakcji dn. 11 marca 1985 r.

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

ЧАСТЬ II

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ДОСТУПНОСТИ ПРЕВЫШЕНИЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПО УСЛОВИЯМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Р е з ю м е

В работе представлены критерии и метод оценки допустимости превышений прочности электрооборудования среднего напряжения по условиям короткого замыкания. В качестве критериальной величины принят коэффициент экономической безопасности и годовой экономический риск. Представлен метод вычисления интенсивности повреждений по причине превышений прочности для следующего оборудования среднего напряжения: воздушных и кабельных линий а также аппаратов в розных ячейках (питающих и отплывочных) . Приведены приблизительные значения ожидаемого времени между последующими повреждениями воздушных и кабельных линий с определёнными сечениями а также аппаратов в отплывочных ячейках, расчитанных на ток короткого замыкания 10 и 20 кА. При этом учтён широкий предел процентных значений превышений до 150% . Предсталены результаты некоторых анализов допустимости превышений прочности воздушных и кабельных линий по условиям короткого замыкания. На основе примерного анализа определены значения процентных превышений, допускаемые в сетях среднего напряжения с точки зрения экономических условий.

ASSESSMENT OF SHORT-CIRCUIT CONDITIONS IN MEDIUM VOLTAGE POWER NETWORKS

PART.II. PROBABILISTIC ANALYSIS OF ADMISSIBILITY OF EXCEEDING THE EQUIPMENT SHORT-CIRCUIT RATING

S u m m a r y

A method for the assessment of admissibility of exceeding the short-circuit rating in medium voltage networks is presented. An economical safety factor and an economical risk (per year) are defined as criterion quantities. A method for calculating the failure rate due to exceeding the short-circuit rating of medium voltage equipment (overhead lines, cable lines, substation equipment) is presented. The values of mean time between failures have been calculated for overhead and cable lines with selected conductor cross sections and for appparatus which short-circuit rating is 10 kA and 20 kA. The calculations have been made for the wide range of exceedings (up to 150%). As an example, the analysis of exceeding the short-circuit rating of selected overhead and cable lines is made. The example provides the percentage values of exceedings be accepted ragarding the economical aspects.