

DOBÓR NASTAW ZABEZPIECZEŃ NADPRĄDOWYCH ZWARCIOWYCH DLA LINII ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

1. Wprowadzenie

W liniach SN od skutków zwarć międzyfazowych (tylko takich zakłóceń dotyczy artykuł) stosuje się głównie dwa rodzaje zabezpieczeń nadprądowych, przy czym ich nazwy wynikają raczej z tradycji niż merytorycznego uzasadnienia:

- zwłoczne (często używane symbole to $I>$ lub $RI>$), którego opóźnienie czasowe wynosi nie mniej niż 0,4 s. Przeważnie jest stosowany zakres 0,5 s – 1,0 s, czasy powyżej 1 s występują w liniach zasilających rozdzielnie sieciowe (dalej nazywane skrótem RS) lub są w nich zainstalowane łączniki wyposażone w zabezpieczenia (tzw. reklozery – takie pojęcie będzie używane w dalszej części tekstu, ponieważ chętniej jest stosowane w praktyce),
- zwarciove (symbol $I>>$ lub $RI>>$), którego opóźnienie czasowe zawiera się w granicach 0,05 s – 0,35 s, najczęściej wynosi 0,15 s – 0,2 s, a nazwa nie wiąże się z faktem, że zabezpieczają od skutków zwarć, ale od tego, że nastawa zależy od wartości prądów zwarciowych.

Zasady doboru nastaw dla zabezpieczeń nadprądowych zwłocznych są dobrze rozpracowane i podawane w wielu książkach [1, 2] i publikacjach [9, 10, 11]. Dobierając nastawy dla nowych lub modernizowanych pól wyposażonych w zabezpieczenia cyfrowe warto zwrócić uwagę, że ze względu na ogromny postęp w dokładności przekazników czasowych warto zrezygnować z czasu stopniowania pomiędzy poszczególnymi punktami zabezpieczeniowymi oznaczanego przeważnie jako Δt o wartości 0,5 s na rzecz wartości 0,3 s, co zresztą jest wyraźnie zalecane w najnowszej wersji IRiESD [7]. W zależności od liczby stopni czasowych w promieniowym układzie zasilania, skraca to przynajmniej o 0,6 s nastawę zabezpieczenia $I>$ po stronie SN transformatora 110 kV/SN (nazywanego też transformatorem zasilającym lub mocy dla odróżnienia od transformatora uziemiającego). Wadą tego zabezpieczenia jest konieczność zwiększania opóźnienia czasowego w miarę zbliżania się do źródła mocy, czyli przeważnie szyn zasilających, kiedy jednocześnie wzrastają prądy zwarciove. Prowadzi do zagrożenia uszkodzeniami cieplnymi początkowych odcinków linii. Problem współcześnie narasta, ponieważ w związku z rozwojem energetyki odnawialnej, szczególnie wiatrowej, wzrastają moce zwarciove na szynach rozdzielni SN energetyki zawodowej. Już w tym miejscu warto zwrócić uwagę na nieprecyzyjność pojęcia „początkowy odcinek linii”.

2. Zabezpieczenie zwarciove

Zabezpieczenie zwarciove jest stosowane dla osiągnięcia szybkiego wyłączenia zwarć w liniach w pobliżu szyn zbiorczych, z których są zasilane. W publikacjach sprzed 40–50 lat zauważano, że głównym celem tego zabezpieczenia jest uniknięcie działania zabezpieczeń podnapięciowych silników u odbiorców zasilanych z linii niedotkniętych zwarciami, ponieważ wiadomo o zapadach napięcia powodowanych przez zwarcia międzyfazowe. Dopiero w latach 80. poprzedniego stulecia lub być może nawet później, kiedy silnie zaczęły wzrastać moce zwarciove, pojawił się pogląd, że celem zabezpieczenia zwarciovego jest ochrona początkowych odcinków linii przed cieplnymi skutkami przepływu prądu zwarciovego. Dość powszechna jest opinia, że zabezpieczenie powinno swoim zasięgiem obejmować przynajmniej 20% długości linii.

Autor zauważa, że w większości zakładów dystrybucyjnych nie analizuje się wcale nastaw tego zabezpieczenia przyjmując je wg starych dokumentacji czy „na wyczuć” doświadczonych pracowników. Problemu praktycznie nie ma, jeśli linia posiada zabezpieczenia tylko na początku. Nie ma zagrożenia, że zabezpieczenie swym zasięgiem obejmie stronę nN nawet najbliższego transformatora SN/nN i nie będzie selektywności z bezpiecznikami w stacji. Może wystąpić problem z selektywnością, jeśli zwarcie będzie na krótkim odcinku pomiędzy bezpiecznikami w stacji SN/nN a zaciskami transformatora. Bardzo często, szczególnie w liniach kablowych, zabezpieczenie obejmuje całą ich długość. Niektórzy „fachowcy” twierdzą, że tak ma być, ponieważ zabezpieczenie w nazwie ma słowo „zwarciove”, czyli chroni od skutków zwarć, natomiast zabezpieczenie zwłoczne nazywają zabezpieczeniem przeciążeniowym, czyli ma działać podczas przeciążeń linii. Nie ma wymagania, aby linie SN zabezpieczać od skutków przeciążeń! Nie jest to zabronione i w jednym z oddziałów dystrybucji takie zabezpieczenie jest stosowane, jednakże z działaniem na sygnał, co jest bardzo dobrym rozwiązaniem. Jest to jednak trzecie zabezpieczenie używające jako kryterium prądów fazowych w linii i wyraźnie nazwane.

3. Dobór nastawy prądowej

Nastawę zabezpieczenia zwarciovego dobiera się obecnie wyłącznie z punktu widzenia selektywności – zabezpieczenie nie powinno mieć zasięgu przekraczającego miejsce zainstalowania następnego zabezpieczenia nadprądowego zwłoczno, czyli stosuje się wzór:

$$I_{nast} \geq \frac{k_b I_{kmax}}{\mathcal{G}_i} \quad (1)$$

gdzie:

I_{nast} – nastawa zabezpieczenia zwarciovego po stronie wtórnej przekładników prądowych,

- I_{kmax} – maksymalny prąd zwarcioowy na szynach przed następnym zabezpieczeniem nadprądowym zwłocznym, w przypadku łącznika wyposażonego w zabezpieczenia w głębi sieci – na słupie, na którym jest zainstalowany,
- k_b – współczynnik bezpieczeństwa, literatura zaleca 1,2–1,6 bez żadnych wskazań dodatkowych,
- \mathcal{G}_i – przekładnia przekładników prądowych.

Warunek (1) wyraźnie dotyczy wymagania koniecznego dla uzyskania selektywności, aby zabezpieczenie zwarcioowe na początku linii nie miało zasięgu poza następne zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne lub nieco ogólniej: za zabezpieczenia znajdujące się dalej w linii o nastawionym dłuższym lub zbliżonym czasie. W liniach, gdzie zabezpieczenie jest wyłącznie na jej początku, jest nieczytelny lub nawet zbędny.

Rzadko sprawdza się przy tym, czy zabezpieczenie obejmuje 20% długości linii. Przy małych impedancjach linii (do następnych szyn zbiorczych) zdarzają się wyjątkowe sytuacje, kiedy ze względu na warunek wynikający ze wzoru (1) zabezpieczenie nie zadziała w żadnych warunkach, ponieważ wartość nastawy jest większa od wartości prądu zwarcioowego na szynach zbiorczych – szczególnie dla zwarc dwufazowych. Powinna być przynajmniej sprawdzana zależność, czy:

$$I_{nast} < \frac{I_{kmin}^s}{k_c \mathcal{G}_i} \quad (2),$$

gdzie:

- I_{kmin}^s – minimalny prąd zwarcioowy (dla zwarcia dwufazowego) na szynach zbiorczych zasilających linię,
- k_c – współczynnik czułości w granicach 1,2–1,5, ale w skrajnym przypadku może to być nawet wartość 1.

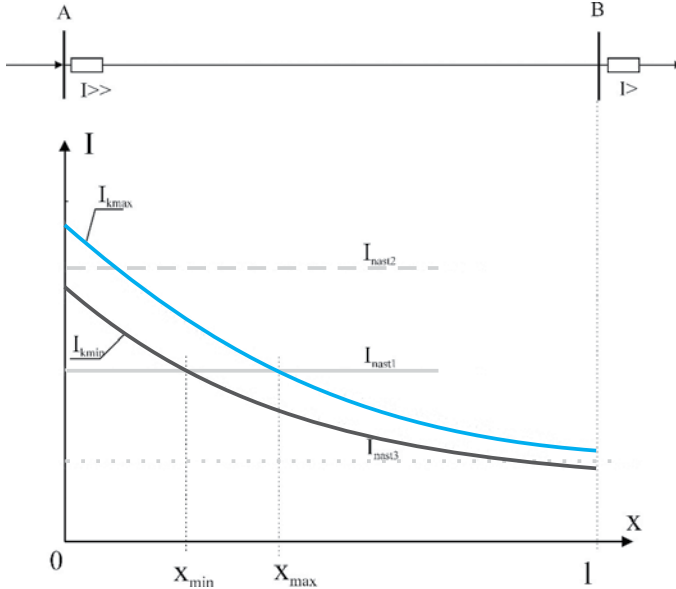
Zależność (2) nie gwarantuje objęcia zabezpieczeniem 20% długości linii, ale przynajmniej wiadomo, że z odpowiednią czułością wyłączy zwarcia na początku linii.

Prawidłowy i nieprawidłowy sposób doboru nastawy dla linii z drugim punktem zabezpieczeniowym pokazano na rys. 1, na którym x oznacza odległość miejsca zwarcia od szyn zbiorczych zasilających linię, a l – długość linii. Niebieska krzywa oznaczona I_{kmax} to wartość maksymalnego prądu zwarcia (trójfazowego) w danym miejscu linii, a I_{kmin} to wartość prądu minimalnego (przy zwarcu dwufazowym). Prawidłowo dobrana nastawa to prosta I_{nast1} . Maksymalny zasięg zabezpieczenia oznaczono x_{max} , a minimalny x_{min} i wg spotykanych zaleceń ma on (x_{min}) być większy niż 20% długości linii.

Prosta I_{nast1} to nastawa właściwa. Zabezpieczenie będzie działało podczas zwarc trójfazowych na około 40% długości linii, podczas zwarc dwufazowych na około 25% długości linii.

Prosta $I_{\text{nast}2}$ to nastawa za duża. Zabezpieczenie będzie działało tylko podczas zwarcí trójfazowych na około 5% długości linii, podczas zwarcí dwufazowych nie zadziała wcale.

Prosta $I_{\text{nast}3}$ to nastawa za mała. Zabezpieczenie będzie działało podczas zwarcí trójfazowych również za zabezpieczeniem I>, czyli nie będzie selektywności.



Rys. 1. Ogólna zasada doboru nastawy zabezpieczenia zwarciowego

Przy obliczaniu prądów zwarciowych najlepiej jest korzystać z gotowych programów, które uwzględniają zmiany mocy zwarciowej na szynach zasilających linię. Jeśli takich programów brak lub nie zawierają odpowiedniej bazy danych, to można korzystać ze wzorów:

- na maksymalny prąd zwarciowy $I_{k\text{max}}$ (zwarcia trójfazowego ze współczynnikiem 1,1 w liczniku):

$$I_{k\text{max}} = \frac{1,1U_n}{\sqrt{3}Z_k}, \quad (3)$$

- na minimalny prąd zwarciowy (zwarcia dwufazowego ze współczynnikiem 1 w liczniku):

$$I_{k\text{min}} = \frac{U_n}{2Z_k}, \quad (4)$$

gdzie:

U_n – napięcie nominalne sieci,

Z_k – impedancja pętli zwarciowej sieci (dla składowej zgodnej).

W praktyce obserwuje się często, szczególnie w liniach, w których nie ma innych punktów zabezpieczeniowych, że zabezpieczenie zwarciove obejmuje całą linię, ponieważ nastawiane jest na zbyt małą wartość prądu. Przy wprowadzaniu reklozerów istnieją wówczas problemy ze skoordynowaniem nastaw i uzyskaniem selektywności. Konieczna jest czasem wymiana zabezpieczenia w polu liniowym rozdzielni zasilającej lub nawet przekładników prądowych, ponieważ stosowane dawniej i spotykane do dzisiaj zabezpieczenia elektromechaniczne lub analogowe miały znacznie mniejsze zakresy nastaw niż współczesne cyfrowe.

Jeśli zrezygnować z warunku (1), to należy zadbać przynajmniej, aby zabezpieczenie zwarciove nie miało rozruchu podczas maksymalnego obciążenia linii, ponieważ przy jego małym opóźnieniu czasowym łatwo o zbędne zadziałanie podczas stanów niestabilnych np. przy załączaniu linii. Podczas tej normalnej dla linii operacji mogą występować dwa rodzaje udarów:

- od odbiorników, np. dużych silników asynchronicznych,
- od prądu magnesującego wielu transformatorów, przy czym zjawisko ma nieco inny charakter niż dla transformatora pojedynczego.

Nie wystarczy postawienie wymagania, że nastawa prądowa ma być większa niż zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego, ponieważ rozruch tego zabezpieczenia nie spowoduje zbędnego wyłączenia – przeważnie jego nastawa czasowa zawiera się w przedziale 0,5 s – 1,5 s.

Można zaproponować zależność:

$$I_{nast}^{>>} \geq k_{b>>} I_{nast}^{>} , \quad (5)$$

w której:

$I_{nast}^{>>}$ – nastawa prądowa zabezpieczenia zwarciowego,

$I_{nast}^{>}$ – nastawa prądowa zabezpieczenia zwłocznego.

$k_{b>>}$ – współczynnik bezpieczeństwa, którego wartość można zalecić w granicach 2–4, ale jeśli jest wystarczająca czułość, to nie mniej niż 4.

Zależność (5) i podane wartości współczynnika $k_{b>>}$ wynikają wyłącznie z doświadczeń autora i trudno udowodnić naukowo tę wartość.

4. Ochrona początkowego odcinka linii

Dla ochrony przewodów linii napowietrznej przed skutkami krótkotrwałego nagrzewania prądem zwarciowym (gołych lub izolowanych, nazywanych też przewodami w osłonie) lub linii kablowej, zabezpieczenie powinno mieć zasięg taki, aby wyłączać zwarcia groźne z tego punktu widzenia. Nastawy zabezpieczenia nie należy rozpatrywać w oderwaniu od nastaw zabezpieczenia zwłocznego, a tak obecnie powszechnie się robi. Warto przeanalizować, jaki początkowy odcinek linii jest zagrożony podczas zwarc wyłączanych przez zabezpieczenie zwłoczne i taki odcinek należy objąć zabezpieczeniem zwarciowym. Podjęta zostanie próba wykazania w zależności od mocy zwarciowej na szynach zbiorczych, parametrów linii i nastaw zabezpieczenia zwłocznego, co należy rozumieć pod pojęciem „początkowy odcinek

linii” i czy dla każdego warunków jest potrzeba zastosowania zabezpieczenia zwarciowego. Przedstawiony sposób jest słuszny dla zwarć trwających nie dłużej niż 5 s, przy czym uwzględnia się możliwość wystąpienia cyklu SPZ o przerwie szacunkowo do 1,5 s, czyli standardowo stosowanej w polskich liniach SN. Autor nie znalazł pewnych analiz, jaka przerwa bezprądowa w cyklu SPZ wpływa na to, czy czasy trwania należy sumować czy nie. Wiąże się to ze stałą czasową stygnięcia przewodów. Stąd wydaje się, że w SPZ-cie jednokrotnym należy sumować obydwa czasy prądowe, a w cyklu SPZ dwukrotnym tylko dwa pierwsze. Druga przerwa beznapięciowa trwa przeważnie 10 s – 15 s, a nawet więcej i będzie miała już znaczenie wymiana ciepła pomiędzy przewodem a otaczającym go środowiskiem, którym przeważnie będzie powietrze lub grunt, czyli można jej nie uwzględniać. Stąd czas zwarcia t_k można dla linii wyposażonej w SPZ jednokrotny lub dwukrotny przyjąć jako równy:

$$t_k = t_{nast1} + t_{nast2} + 2t_{ow}, \quad (6)$$

gdzie:

t_{nast1} – nastawione opóźnienie zabezpieczenia zwłocznego podczas pierwszego zwarcia w cyklu SPZ,

t_{nast2} – nastawione opóźnienie zabezpieczenia zwłocznego podczas drugiego zwarcia w cyklu SPZ,

t_{ow} – czas własny wyłącznika przy wyłączaniu (indeks „o” – od otwierania).

W zależności (6) przyjęto, że czas pierwszego zwarcia może być inny od czasu drugiego – takie zjawisko występuje, jeśli stosuje się tzw. przyspieszanie wyłączenia w kolejnych działaniach zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego podczas cyklu SPZ. Zabezpieczenie zwłoczne może działać z mniejszym opóźnieniem specjalnie wyodrębnionym w nastawach lub z czasem zabezpieczenia zwarciowego. Dla linii bez SPZ należy zastosować zależność:

$$t_k = t_{nast} + t_{ow}. \quad (7)$$

5. Ochrona przed skutkami nagrzewania przewodu podczas zwarcia

W celu określenia dopuszczalnego prądu zwarciowego oznaczanego jako I_{thdop} , należy skorzystać z zależności [3]:

$$I_{thdop} = s \cdot j_{th} \quad (8a)$$

lub

$$I_{thdop} = \frac{s \cdot j_{thn}}{\sqrt{t_k}} \quad (8b).$$

j_{th} – największa dopuszczalna gęstość prądu w rozpatrywanym przewodzie podczas zwarcia, przy czym:

$$j_{th} = \frac{j_{thn}}{\sqrt{t_k}} \quad (9)$$

- j_{thn} – największa dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu jaką w żyłę przewodu można dopuścić podczas zwarcia (nazywana też: znamionową wytrzymałą gęstością prądu) odczytana z wykresu na rys. 2 lub 3, czasem z tablic),
- t_k – czas trwania zwarcia w rozpatrywanym obwodzie prądu (linii).

Pod pojęciem „dopuszczalny prąd zwarciový” w niniejszym artykule uważać się będzie największą wartość prądu, która może płynąć w przewodzie w określonym czasie bez przekroczenia jego temperatury dopuszczalnej krótkotrwale przy założeniu, że temperatura początkowa była równa temperaturze granicznej dopuszczalnej długotrwale (związanej z dopuszczalną obciążalnością długotrwałą). Przyjmuje się, że zjawisko nagrzewania uważa się za krótkotrwale, jeśli trwa do 5 s (można spotkać też wartość 3 s).

Dla określenia j_{thn} na podstawie wykresów na rys. 2 lub 3, które dotyczą przewodów narażonych na oddziaływania mechaniczne, należy znać materiał przewodu, czyli czy to jest miedź (Cu), czy aluminium (Al). Nie uwzględnia się przy tym udziału stali w rdzeniu przewodu stalowo-aluminiowego dla linii napowietrznych, ponieważ jej zdolność gromadzenia ciepła w porównaniu z aluminium jest około czterokrotnie mniejsza i dodatkowo jej przekrój stanowi tylko $\frac{1}{6}$ – $\frac{1}{8}$ przekroju aluminium.

Należy znać także dwie temperatury:

- ϑ_B – ustaloną temperaturę przewodu podczas długotrwałego obciążenia roboczego poprzedzającego zwarcie,
- ϑ_k – zalecaną najwyższą temperaturę podczas zwarcia, temperatura ta jest podana przy poszczególnych krzywych na rys. 2 i 3 bez jednostek, są to °C.

Dla przewodów narażonych na oddziaływania mechaniczne, czyli w liniach napowietrznych, temperaturę ϑ_k na podstawie tablicy 1 przyjmuje się dla przewodów stalowo-aluminiowych równą 200 °C

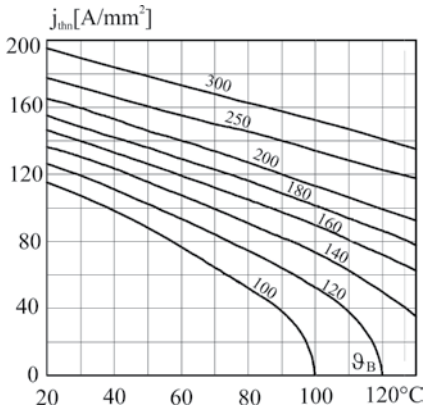
Tablica 1. Zalecane najwyższe temperatury podczas zwarcia dla przewodów narażonych na oddziaływania mechaniczne (wskutek dynamicznego działania prądu) wg [4]

Rodzaj przewodu	Najwyższa zalecana temperatura
Przewody szynowe, materiał lity bądź linka: Cu, Al, stopy Al	200 °C
Przewody szynowe, materiał lity bądź linka: stal	300 °C

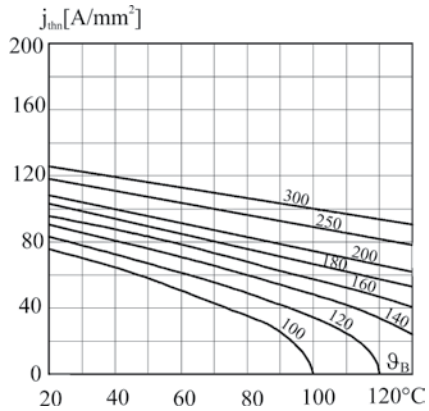
Ustaloną temperaturę początkową ϑ_B należy dla przewodów AFL przyjmować równą 80 °C jako dopuszczalną temperaturę przy trwałym obciążeniu.

Dla kabli te dwie temperatury należy przyjmować na podstawie kart katalogowych producenta. Kilka takich wartości zestawiono w tablicy 2 [5].

Prościej jest skorzystać bezpośrednio z wartości dopuszczalnych gęstości prądu zwarciovýgo 1-sekundowego podanych w tablicy [5] przyjmując wiersz dla temperatury żyły przed zwarcievą wynoszącej 80 °C. Dla kabli papierowo-olejowych Telefonika niestety nie podaje żadnych danych. Można tutaj posłużyć się starymi przepisami [12], które w wielu miejscach podają bardzo praktyczną i sprawdzoną wiedzę.



Rys. 2. Największa dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu dla przewodów Cu



Rys. 3. Największa dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu dla przewodów AL i AFL

Dla bardzo ostatnio popularnych przewodów EXCEL i AXCES producent podaje bezpośrednio dopuszczalny prąd zwarcia jednosekundowy, co zacytowano w tabelicy 4 [6]. Prąd ten należy przeliczyć na rzeczywisty czas zwarcia t_k wg zależności:

$$I_{\text{thdop}} = \frac{I_{\text{thn}}}{\sqrt{t_k}}, \quad (10)$$

w której:

I_{thn} – jednosekundowy dopuszczalny prąd zwarcia.

Zwraca się uwagę, że producent przewodów AXCES podaje dopuszczalną temperaturę krótkotrwałą przewodu 250 °C, a z normy [4] wynika, że powinno to być 200 °C. Artykuł dotyczy zabezpieczeń, a nie przewodów dla linii, stąd nie podejmuje się dyskusji na ten temat. Wiadomo, że AXCES jest przewodem specyficznym i być może producent ma uzasadnienie dla takiego parametru.

Tablica 2. Charakterystyczne temperatury dla niektórych rodzajów kabli i przewodów

Typ kabla	Maks. temp. żyły dla obciążenia długotrwałego	Maks. temp. żyły roboczej przy zwarcia 5 sek.
Kable w izolacji z polietylenu usieciowanego	+90 °C	+250 °C
Kable do podwieszania np. XRaUHAKXS+Fe	brak danych w karcie katalogowej, wg autora jak dla linii napowietrznych	brak danych w karcie katalogowej, wg autora jak dla linii napowietrznych
Kable w izolacji polwinitowej (w liniach SN nie stosuje się)	+70 °C	+160 °C dla przekroju ≤ 300 mm ² +140 °C dla przekroju > 300 mm ²
Kable w izolacji papierowej przesyconej syciwem nieściekającym na napięcie 15 kV	+65 °C	+170 °C

Typ kabla	Maks. temp. żyły dla obciążenia długotrwałego	Maks. temp. żyły roboczej przy zwarciu 5 sek.
Kable w izolacji papierowej przesyconej syciwem nieściekającym na napięcie 20 kV	+65 °C	+150 °C
EXCEL i AXCES	65 °C dla kabla zawieszonoego na słupach jako samonośny	250 °C
	90 °C dla kabla bez naprężeń mechanicznych ułożonego na ziemi lub na konstrukcjach wsporczych	250 °C

Tablica 3. Dopuszczalna gęstość prądu zwarciovego 1-sekundowego [A/mm²] w żyłach kabli [5]

Temperatura żyły przed zwarciem (°C)	Rodzaj żył	
	miedziane	alumirowe
90	143	94
80	149	98
70	154	102
65	157	104
60	159	105
50	165	109
40	170	113
20	181	120

Tablica 4. Dopuszczalny 1-sekundowy prąd zwarcia dla kabli EXCEL i AXCES [6]

Temperatura przewodu przed zwarciem	EXCEL 3-10/10 12/20 kV	AXCES 3-70/25 12/20 kV
65 °C	1800	7100
90 °C	1600	6600

6. Zagrozenia przy działaniu zabezpieczenia zwłocznego

Na długość odcinka, który jest zagrożony cieplnym oddziaływaniem prądu zwarciovego przy działaniu tylko zabezpieczenia zwłocznego w liniach SN wpływają następujące czynniki:

- moc zwarciovą na szynach,
- przekrój, materiał i rodzaj przewodu,
- obciążenie mechaniczne przewodu lub jego brak,
- czas zwarcia, na który wpływają: czas zadziałania zabezpieczenia (można przyjąć równy czasowi nastawionemu), czas własny wyłącznika, rodzaj i właściwości SPZ.

Dla danego rodzaju przewodu i rodzaju linii ocena długości zagrożonej uszkodzeniem przez ciepłe oddziaływanie prądu zwarciovego została przeprowadzona w następujący sposób:

- przyjęto czas zwarcia,
- odczytano jeden z parametrów w zależności od dostępności: dopuszczalny 1-sekundowy prąd zwarcia I_{thn} lub największą dopuszczalną jednosekundową gęstość prądu j_{thn} ,
- obliczono największy dopuszczalny prąd zwarcia I_{thdop} ,
- obliczono prąd zwarcia trójfazowego I_k w danym miejscu linii,
- jeśli zachodzi $I_k > I_{\text{thdop}}$, to zagrożenie istnieje.

Wszystkie obliczenia wykonano przy założeniu, że linia na całej długości jest wykonana z jednolitego przewodu.

Wyniki obliczeń dla linii napowietrznych o napięciu nominalnym 15 kV podano w tablicy 5. Dla wszystkich linii reakcją jednostkową wzdłużną przyjęto $0,4 \Omega/\text{km}$, a moc zwarciovą na szynach zasilających 250 MVA. Nie podawano wyników powyżej 5 km, a ich dokładność wynosi 50 m. Jest to dokładność z punktu widzenia zabezpieczeń zupełnie wystarczająca.

Dla linii kablowych wyniki podano w tablicy 6, przy czym przyjęto moc zwarciovą również 250 MVA, a jednostkową reakcją wzdłużną jednakową dla wszystkich kabli – $0,1 \Omega/\text{km}$. Warto zauważyć, że dla najczęściej stosowanych typów przewodów gołych i kabli, dla tych drugich odcinki niezagrożone przeciętnie są o wiele dłuższe. Wartość 0 w tablicy oznacza, że dla danego typu przewodu i czasu zwarcia nie ma zagrożenia już od samych szyn zbiorczych.

Tablica 5. Długości [m] linii napowietrznych 15 kV zagrożonych przez ciepłe oddziaływanie prądu zwarciovego

Czas zwarcia (s)	Typ przewodu				
	AFL6-35	AFL6-50	AFL6-70	EXCEL 3-10 (dla temp. początkowej 90 °C)	AXCES 3-70
0,20	750	<50	0	800	0
0,25	950	300	0	900	0
0,50	1800	500	350	1350	100
0,75	2350	1700	850	1650	600
1,00	2850	2150	1300	1900	1000
1,25	3250	2500	1650	2150	1300
1,50	3650	2900	1950	2400	1600
1,75	3800	3200	2250	2600	1900
2,00	4300	3500	2500	2750	2100
2,50	4900	4050	3000	3100	2550
3,00	–	4550	3450	3400	2950
3,50	–	5000	3850	3700	3300
4,00	–	–	4200	3950	3650
4,50	–	–	4550	4200	3950
5,00	–	–	4850	4450	4250

Tablica 6. Długości linii [m] wykonanych z kabli polietylenowych 15 kV o żyłach aluminiowych zagrożonych przez ciepłe oddziaływanie prądu zwarciego

Czas zwarcia (s)	Przekrój żyły roboczej (mm ²)			
	70	120	150	240
0,20	0	0	0	0
0,25	0	0	0	0
0,50	0	0	0	0
0,75	1100	0	0	0
1,0	1800	0	0	0
1,25	2300	0	0	0
1,50	2700	<50	0	0
1,75	3100	700	0	0
2,00	3400	1200	0	0
2,50	4050	1950	350	0
3,00	4550	2600	1100	0
3,50	>5000	3150	1750	0
4,00	>5000	3650	2250	0
4,50	>5000	4050	2750	0
5,00	>5000	4450	3200	0

7. Określenie wartości nastawczej z punktu widzenia zjawisk cieplnych przy przepływie prądu zwarciego

Przeglądając tablice można określić, jaka długość linii licząc od początku powinna być objęta zabezpieczeniem naprądowym zwarciovym, ponieważ przy działaniu zabezpieczenia zwłocznego przekroczona będzie dopuszczalna wartość prądu z punktu widzenia krótkotrwałego nagrzewania prądem zwarciovym. Jednakże dla obliczenia nastawy zabezpieczenia zwarciovego z omawianego punktu widzenia nie ma potrzeby analizowania żadnych tych zasięgów zagrożenia czy też jego czułości. Nastawa po stronie wtórnej przekładników prądowych powinna spełniać warunek:

$$I_{\text{nast}} \leq \frac{I_{\text{thdop}}}{k_{\text{bth}} \cdot g_i}, \quad (11)$$

w którym:

I_{thdop} – dopuszczalna wartość prądu zwarciovego obliczona dla danego przewodu i czasu trwania zwarcia przy działaniu zabezpieczenia zwłocznego oraz określonych właściwościach automatyki SPZ, zwraca się przy tym uwagę, że kabel na początku linii nie wyklucza tej automatyki, bo linia może przechodzić w napowietrzną,

k_{bth} – współczynnik bezpieczeństwa dla nastawy, proponuje się zakres od 1,05 do 1,2.

Współczynnik bezpieczeństwa można przyjmować wg zaleceń w tablicy 7. Lepsze byłoby uzależnienie go od impedancji linii, ale dopasowanie go zawsze jest możliwe.

Zmniejszanie wartości k_{bth} przy krótkich liniach wynika z doświadczeń autora z użytkowaniem w takich sytuacjach selektywności zabezpieczeń (zwarciego z następnym zwłocznym).

Za długość linii rozumie się:

- jeśli linia nie jest nigdzie wyposażona w zabezpieczenia poza rozdzielnią zasilającą – jej głównego ciągu do miejsca podziału lub odbiorcy,
- jeśli linia jest wyposażona w zabezpieczenia np. w rozłącznikach (tzw. rekloze-rach) lub zasila RS, to do następnego zabezpieczenia zwłocznego lub szyn tuż przed nim.

Tablica 7. Proponowane wartości współczynnika bezpieczeństwa k_{bth}

Lp.	Długość linii	Zalecana wartość k_{bth}
1	do 2 km	1,05
2	powyżej 2 km do 4 km	1,1
3	powyżej 4 km do 10 km	1,15
4	powyżej 10 km	1,2

8. Blokada SPZ od zadziałania I>>

Większość zabezpieczeń spotykanych na rynku ma jedną z możliwości:

- wybór zabezpieczeń, od których jest uruchamiana automatyka SPZ,
- SPZ uruchamiany od wszystkich zabezpieczeń działających na wyłączenie linii, ale z możliwością blokowania przy zadziałaniu zabezpieczenia zwarciego.

Autor nigdy nie spotkał się w polskiej literaturze z wyjaśnieniem, kiedy SPZ uruchamiać, a kiedy blokować. Można sądzić, że zagadnienie to było rozpracowane przed rokiem 1960, a nawet przed 1939, a ponieważ jest zagadnieniem inżynierskim, naukowcy niechętnie się nim zajmowali, jako zbyt prozaicznym.

Jeśli przyjąć ogólną zasadę, że ważna jest ochrona przewodów linii przed ciepłymi skutkami zwarć, to uruchomienie SPZ od zabezpieczenia zwarciego będzie zależało od tego, czy zwarcie wyłączane przez to zabezpieczenie spowoduje przekroczenie dopuszczalnego prądu zwarciego. Należy zwrócić uwagę, że wiele linii napowietrznych z rozdzielni jest wyprowadzana kablem. Będzie występować sytuacja, że dla kabla SPZ jest dozwolony, a dla linii napowietrznej – nie.

Z punktu widzenia eksploatacji linii lepiej stosować mniejsze nastawy czasowe zabezpieczeń zwarciovych, ale nie blokować SPZ-tu. Jest to bardziej korzystne dla odbiorców, bo krótsza jest wówczas przerwa w zasilaniu – dla odbiorców bytowo-komunalnych nawet niezauważalna. Jeśli długość kabla jest mała i nie powoduje znaczącego zmniejszenia prądu zwarciego w miejscu przejścia w linie napowietrzną (np. tylko za granicę stacji), to można ocenę prowadzić dla prądu zwarciego na szynach rozdzielni SN.

Podczas SPZ uruchamianego od zabezpieczenia I>> czas zwarcia jest dwukrotnie większy niż przy jego braku.

Dopuszczalne wartości prądów zwarciovych (zwarcia trójfazowego) dla różnych typów przewodów i czasów zwarcia podano w tablicy 8. Nie umieszczono danych dla kabla 240 mm², ponieważ przy spotykanych w Polsce mocach zwarciovych może on być zawsze w analizowanym zakresie czasowym poddany SPZ-towi. Z tablicy należy korzystać w ten sposób, że należy dobierać z niej czas trwania zwarcia taki, aby był możliwy SPZ. Po dobraniu maksymalnego czasu zwarcia należy od niego odjąć czas własny wyłącznika i obliczyć maksymalną nastawę czasową zabezpieczenia. Wartości prądu zwarciovego należy analizować na początku linii, czyli praktycznie na szynach zbiorczych rozdzielni.

Tablica 8. Wartości prądu zwarciovego, powyżej których należy stosować blokadę SPZ od zabezpieczenia zwarciovego

Czas pojedynczego zwarcia (s)	Rodzaj przewodu					
	AFL			kabel w izolacji polietylenowej		AXCES
	35	50	70	70	120	3-70
0,10	6652	9503	13305	15339	26296	14758
0,15	5432	7759	10863	12525	21471	12050
0,20	4704	6720	9408	10847	18594	10436
0,25	4207	6010	8415	9702	16631	9334
0,30	3841	5487	7681	8856	15182	8521
0,35	3556	5080	7112	8199	14056	7889
0,40	3326	4752	6652	7670	13148	7379
0,45	3136	4480	6272	7231	12396	6957
0,50	2975	4250	5950	6860	11760	6600

9. Metodyka doboru nastawy

Nastawa zabezpieczenia nadprądowego zwarciovego powinna więc spełniać trzy zależności oznaczone (1), (2) i (10). Należy dobrać nastawę z punktu widzenia zjawisk cieplnych (10), potem selektywności (1) i sprawdzić zależność (2). Sprawdzanie wg zależności (2) jest uproszczoną formą kontroli, czy zabezpieczenie obejmuje 20% linii. Zawsze dla oceny działania zamiast obliczenia wg wzoru (2) korzystne jest wykonanie wykresu minimalnego i maksymalnego prądu zwarciovego wzdłuż linii i sprawdzenie, tak jak pokazano to wg rys. 1.

Rzadko kiedy linie są jednorodne, wykonane z tego samego rodzaju przewodu. Dla analizy wytrzymałości cieplej zwarcioviej należy przyjąć parametry odcinka o najmniejszej wartości dopuszczalnego cieplnego prądu zwarciovego sprawdzając, czy ostateczna wartość przyjętej nastawy powoduje, że ten odcinek jest objęty zasięgiem zabezpieczenia. Metodyka postępowania w takich przypadkach jest pokazana w przykładzie 7.

We wszystkich przykładach przyjęto, że jednostkowa reaktancja wzdłużna dla linii napowietrznych wynosi 0,4 Ω/km, a dla linii kablowych 0,1 Ω/km. Obliczanie minimalnego i maksymalnego prądu zwarciovego wykonano odpowiednio dla

zwarcia trój- i dwufazowego. Nie uwzględniono możliwych zmian mocy zwarciowej na szynach zasilających linię. Możliwość zmniejszenia prądu zwarciowego uwzględniono poprzez brak współczynnika 1,1 w liczniku wzoru na obliczanie prądu zwarcia dwufazowego.

Dla doboru nastaw zabezpieczenia zwarciowego nie ma znaczenia rozmieszczenie stacji SN/nN wzdłuż linii, jeśli są zasilane bezpośrednio z tego ciągu. Zagrożenie może wystąpić w odgałęzieniach od głównego ciągu linii. Współczesne linie są tak bardzo rozbudowane, że przy analizie należałoby rozpatrzyć bardzo wiele różnych układów, co jest bardzo pracochłonne i trudne, a uzyskany efekt będzie podobny do pochodzącego z analizy uproszczonej. Stąd autor uważa, że należy analizować tylko ciąg główny. Odgałęzienie należy analizować tylko wtedy, jeśli odchodzi od niego linia wyposażona w zabezpieczenie nadprądowe (nie bezpieczniki) na końcu lub reklozer. Również przy występowaniu w linii kilku reklozerów przeważnie wystarczy analizować współpracę tylko z najbliższym.

Autor uważa, że zrozumienie przedstawionych zasad zostanie ułatwione przez przytoczenie kilku przykładów, ponieważ układy sieci spotykane w eksploatacji są bardzo różne. Dopiero na układzie konkretnej linii widoczne są problemy z doбором nastaw.

Przykład 1

Linia 15 kV wykonana jest z przewodu AFL-6 o przekroju $s = 70 \text{ mm}^2$ i długości $l = 9,5 \text{ km}$. Wyposażona jest w zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne nastawione na 1 s, SPZ dwukrotny z czasem pierwszej przerwy 0,8 s, drugiej przerwy 15 s. Moc zwarciowa na szynach zbiorczych zasilających linię wynosi $S_k = 220 \text{ MVA}$. Czas własny wyłącznika wynosi 75 ms. Nie zastosowano przyspieszania wyłączenia podczas cyklu SPZ.

W rozwiązaniu przykładu 1 przytoczono ponownie wzory. W pozostałych przykładach podano tylko podstawienia wartości do tych wzorów. W analizie używać się będzie nastaw po stronie pierwotnej przekładników prądowych oznaczonych jako I_{nastp} . W tym celu prawe strony wzorów (1), (2) i (10) należy przemnożyć przez ϑ_i . Nastawy tzw. wtórne są bardziej praktyczne przy samym wprowadzaniu do zabezpieczeń, natomiast nastawy pierwotne łatwiej porównywać bezpośrednio z wartościami prądów w linii, np. zwarciowych.

a) Czas zwarcia przy działaniu zabezpieczenia zwłoczno:

$$t_k = t_{\text{nast1}} + t_{\text{nast2}} + 2t_{\text{ow}} = 1,0 + 1,0 + 2 \cdot 0,075 = 2,15 \text{ s}$$

b) Z wykresu na rys. 3 dla $\vartheta_B = 80^\circ \text{C}$ i $\vartheta_K = 200^\circ \text{C}$ odczytuje się $j_{\text{thn}} = 85 \text{ A/mm}^2$. Na tej podstawie:

$$I_{\text{thdop}} = \frac{s \cdot j_{\text{thn}}}{\sqrt{t_k}} = \frac{70 \cdot 85}{\sqrt{2,2}} = 4011 \text{ A.} \quad (\text{P1})$$

- c) Nastawa ze względu na dopuszczalny cieplny prąd zwarciovy powinna spełniać warunek:

$$I_{\text{nastp}} \leq \frac{I_{\text{thdop}}}{k_{\text{bth}}} = \frac{4011}{1,2} = 3343 \text{ A.} \quad (\text{P2}).$$

- d) Impedancję pętli zwarciovej dla składowej zgodnej obliczono wg wzoru:

$$\underline{Z}_k = j \frac{1,1 U_n^2}{S_k} + j l X'_L + \frac{l}{s \gamma} \quad (\text{P3})$$

gdzie:

X'_L – jednostkowa reaktancja wzdłużna linii w Ω/km ,

l – długość linii do miejsca zwarcia,

γ – przewodność aluminium (przyjęto $34 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$).

Stąd:

$$\underline{Z}_k = (3,99 + j4,925) \Omega, \quad Z_k = 6,34 \Omega.$$

Maksymalny prąd zwarcia na końcu linii wynosi:

$$I_{k \text{ max}} = \frac{1,1 U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (\text{P4})$$

$$I_{k \text{ max}} = \frac{1,1 \cdot 15000}{\sqrt{3} \cdot 6,34} = 1503 \text{ A.}$$

- e) Ze względu na to, że w dalszej części linii nie ma już żadnych zabezpieczeń, warunki:

$$I_{\text{nast}} \geq \frac{k_b I_{k \text{ max}}}{g_1}; \quad I_{\text{nast}} \geq k_b I_{k \text{ max}} \quad (\text{P5})$$

nie są wymagane. Dla orientacji nastawa pierwotna została jednak obliczona:

$$I_{\text{nastp}} \geq 1,4 \cdot 1503 = 2104 \text{ A.}$$

- f) Sprawdzony zostaje jeszcze warunek:

$$I_{\text{nastp}} < \frac{I_{k \text{ min}}^s}{k_c}. \quad (\text{P6})$$

Minimalny prąd zwarciovy I_{k-2f}^s (czyli podczas zwarcia dwufazowego) na szynach zbiorczych obliczony został na podstawie prądu zwarcia trójfazowego I_{k-3f}^s , przy czym założono, że liczy się go wg wzoru bez współczynnika 1,1 w liczniku:

$$I_{k-2f}^s = \frac{U_n}{2Z_k} \quad (\text{P7})$$

$$I_{k-3f}^s = \frac{S_k}{\sqrt{3}U_n} = \frac{220 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 15 \text{ kV}} = 8467 \text{ A} \quad (\text{P8})$$

$$I_{k-2f}^s = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot 1,1} I_{k-3f}^s = 6666 \text{ A.} \quad (\text{P9})$$

Czyli główny warunek z tego punktu jest następujący:

$$I_{\text{nastp}} < \frac{6666}{1,2} = 5555 \text{ A.}$$

- g) Podsumowanie i ostateczny dobór nastawy wynika z dwóch niesprzecznych nierówności:

$$I_{\text{nastp}} \leq 3343 \text{ A}$$

$$I_{\text{nastp}} < 5555 \text{ A,}$$

czyli

$$2104 \text{ A} \leq I_{\text{nastp}} \leq 3343 \text{ A,}$$

pamiętając, że lewa strona nierówności nie jest obowiązująca, jest tylko wskazówką.

Można przyjąć np. nastawy 2500 A, 3000 A.

Ostateczną wartość wtórną należy dobrać na podstawie możliwych do uzyskania wartości nastawczych na zastosowanym urządzeniu zabezpieczeniowym i przekładni przekładników prądowych.

- h) Na podstawie tablicy dla prądu zwarciovego $I_k = 8468 \text{ A}$ możliwy jest czas pojedynczego zwarcia w cyklu SPZ 0,2 s. Przy czasie własnym wyłącznika 0,075 s pozwala to na zastosowanie nastawy nie większej niż 0,125 s. Jeśli nastawa czasowa będzie większa, SPZ należy zablokować.

Na rys. 3 przedstawiono wykres prądów zwarciovych w zależności od miejsca zwarcia z zaznaczonymi pewnymi charakterystycznymi wielkościami. Wykonywanie takich wykresów zaleca się w przypadku sytuacji bardziej złożonych, ale jest to bardzo dobry sposób oceny nastaw zabezpieczenia.

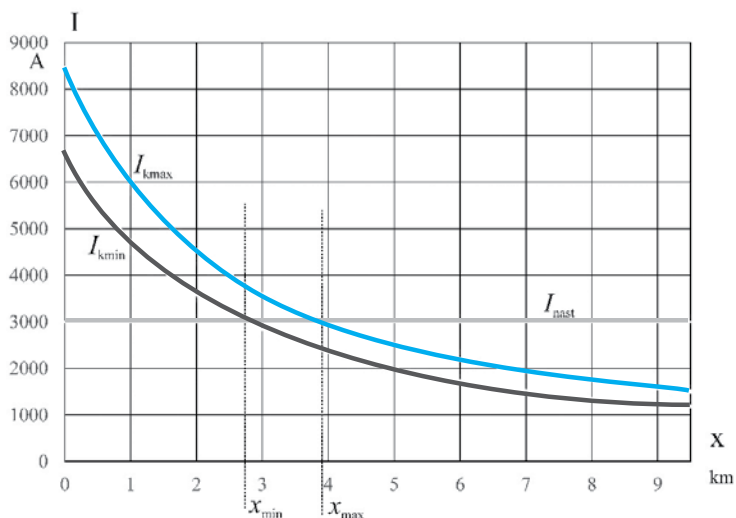
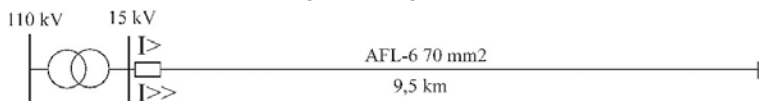
Na wszystkich rysunkach dotyczących przykładów:

- krzywe w kolorze niebieskim to maksymalny prąd zwarcia, a w kolorze ciemnoszarym – minimalny prąd zwarcia wg wzorów (3) i (4),
- jasnoszara prosta to przyjęta wartość nastawy I_{nastp} przy czym ciągła – ostateczna, przerywana – wersja,
- x – odległość miejsca zwarcia od szyn zbiorczych zasilających linię,
- x_{min} – minimalny zasięg zabezpieczenia,
- x_{max} – maksymalny zasięg zabezpieczenia.

Przykład 1 jest prosty, minimalny zasięg zabezpieczenia przy nastawie 3000 A wynosi około 2,8 km, co stanowi 29% długości linii. Można też podać, że właściwe by-

łyby inne nastawy orientacyjnie w zakresie od 1700 do 3300 A. Wynika to z dwóch przesłanek:

- przy nastawie 1700 A zabezpieczenie podczas zwarcć trójfazowych obejmie całą linię, ale bez zasilanych nią szyn zbiorczych lub samego końca, a ze względu na brak tam zabezpieczeń, odstrojenie od prądu zwarciego na końcu linii nie jest konieczne,
- przy nastawie 3300 A linia jest właściwie chroniona przed skutkami cieplnymi przepływu prądu zwarciego, a zasięg minimalny wynosi około 2400 m.



Rys. 4. Wykres prądów dla przykładu 1

Przykład 2:

Wszystkie dane jak w przykładzie 1, ale na końcu linii jest odbiorca, który posiada zainstalowane zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne z nastawą czasową 0,7 s.

- a) Wszystkie obliczenia wykonane w przykładzie 1 są aktualne. Warunek (P5) już jest wymagalny, ze względu na zabezpieczenie zwłoczne na końcu linii. Czyli musi zachodzić

$$2104 \text{ A} \leq I_{\text{nastp}} \leq 3343 \text{ A},$$

i dobrana poprzednio nastawa 3000 A jest prawidłowa.

Takie same są wymagania dla nastawy czasowej i automatyki SPZ.

- b) Rys. 4 również jest słuszny. Zmiana dotyczy możliwego zakresu nastaw – wartości poniżej 2104 A są niezalecane, ponieważ grozi nieselektywne zadziałanie zabezpieczeń w przypadku zwarcia za zabezpieczeniem zwłocznym na końcu linii. Współczynnik bezpieczeństwa we wzorze (P5) byłby poniżej 1,2. Można jeszcze obniżyć nastawę do około 1600 A, ale widać z wykresu, że wówczas podczas zwarcia trójfazowych zasięg zabezpieczenia zwarciego kończy się prawie na zasilanych szynach zbiorczych.

Przykład 3

Wszystkie dane jak poprzednio, ale w odległości 4,5 km od szyn zbiorczych w linii został zainstalowany reklozera R1 wyposażony w zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne. Punkty a, b i c jak w przykładzie 1.

- d) Impedancja pętli zwarciowej do reklozera R1:

$$Z_k = (1,89 + j2,93) \Omega, \quad Z_k = 3,48 \Omega.$$

Maksymalny prąd zwarcia w miejscu zainstalowania reklozera R1:

$$I_{k\max} = \frac{1,1 \cdot 15000}{\sqrt{3} \cdot 3,48} = 2737 \text{ A}.$$

- e) Ze względu na to, że w linii jest zabezpieczenie zwłoczne, obowiązuje warunek (P5):

$$I_{\text{nastp}} \geq 1,4 \cdot 2737 = 3831 \text{ A}.$$

- f) Warunek f pozostał bez zmiany w stosunku do przykładu 1, czyli:

$$I_{\text{nastp}} < 5555 \text{ A}.$$

- g) Ocena uzyskanych wyników:

- ze względu na selektywność: $I_{\text{nastp}} \geq 3831 \text{ A}$,
- ze względu na wytrzymałość cieplną przewodów: $I_{\text{nastp}} \leq 3343 \text{ A}$,
- kontrola czułości przy zwarcu na szynach zbiorczych: $I_{\text{nastp}} < 5555 \text{ A}$.

Dwa pierwsze warunki są sprzeczne. Jednak w zależności (1) przyjęto $k_b = 1,4$, a możliwy podany zakres to 1,2–1,6.

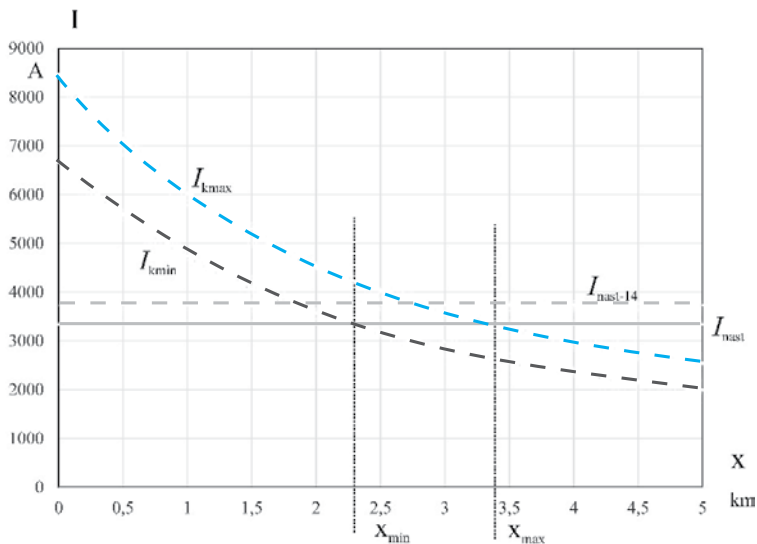
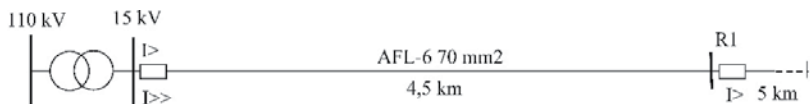
Ponownie wykonuje się obliczenie dla punktu e ze współczynnikiem $k_b = 1,2$ i otrzymuje się:

$$I_{\text{nastp}} \geq 1,2 \cdot 2737 = 3284 \text{ A}.$$

Przy takim warunku możliwe jest przyjęcie nastawy:

$$I_{\text{nastp}} = 3300 \text{ A}.$$

Ilustracja graficzna pokazana jest na rys. 5. Ostatecznie dobrana nastawa została opisana jako I_{nast} . Zwraca się uwagę, że gdyby pozostać przy doborze nastawy wg pierwszego warunku selektywności ze współczynnikiem bezpieczeństwa 1,4 opisanej na rysunku jako $I_{\text{nast-14}}$, część linii byłaby niewłaściwie chroniona przed skutkami cieplnymi zwarcia. Uwidacznia się tutaj zaleta zaproponowanego sposobu doboru.



Rys. 5. Wykres prądów dla przykładu 3

Przykład 4

Wszystkie dane jak w przykładzie 3 (również reklozer R1), ale dodatkowo zainstalowano reklozer R2 w odległości 1,4 km od szyn zbiorczych, również wyposażony w zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne.

Punkty a, b i c jak w przykładzie 1, co daje warunek:

$$I_{nastp} \leq 3343 \text{ A.}$$

d) Impedancja pętli zwarciowej do reklozera R2 wynosi:

$$Z_k = (0,50 + j1,69) \Omega, \quad Z_k = 1,78 \Omega.$$

a maksymalny prąd zwarcia w miejscu jego zainstalowania:

$$I_{kmax} = \frac{1,1 \cdot 15000}{\sqrt{3} \cdot 1,78} = 5887 \text{ A.}$$

e) Ze względu na to, że w linii jest zabezpieczenie zwłoczne, obowiązuje warunek (P5). Korzystając z wniosku w przykładzie 3, że współczynnik bezpieczeństwa k_b wynoszący 1,4 nie pozwolił na prawidłowe zabezpieczenie linii przez skutkami cieplnymi, użyto wartości 1,2 i uzyskano wynik:

$$I_{nastp} \geq 1,2 \cdot 5887 = 6704 \text{ A.}$$

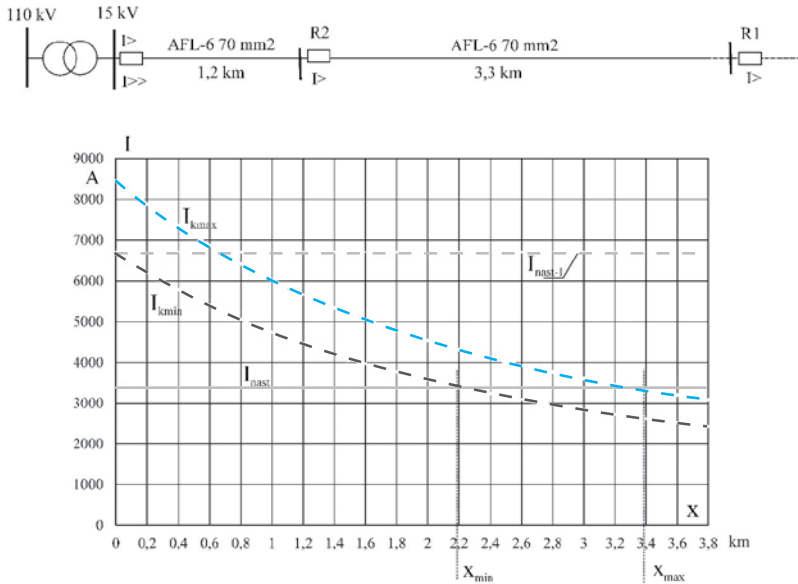
f) Warunek f pozostał bez zmiany w stosunku do przykładu 1, czyli:

$$I_{\text{nastp}} < 5555 \text{ A.}$$

g) Ocena uzyskanych wyników:

- ze względu na selektywność: $I_{\text{nastp}} \geq 6704 \text{ A,}$
- ze względu na wytrzymałość cieplną przewodów: $I_{\text{nastp}} \leq 3343 \text{ A,}$
- kontrola czułości przy zwarciu na szynach zbiorczych: $I_{\text{nastp}} < 5555 \text{ A.}$

Pierwszy warunek jest sprzeczny z pozostałymi i nie ma możliwości korekty współczynników.



Rys. 6. Wykres prądów dla przykładu 4

Ilustracja graficzna pokazana jest na rys. 6. Prosta jasnoszara przerywana oznaczona $I_{\text{nast-1}}$ to nastawa wynikająca z warunku selektywności. Widać, że przy takim doborze nie tylko nie jest chroniona linia z punktu widzenia wytrzymałości cieplnej zwarciowej, ale zabezpieczenie zwarciowe podczas zwarć dwufazowych nie zadziała nigdy, nawet podczas zwarcia tuż za szynami zbiorczymi. Ostatecznie dobrana nastawa została opisana jako I_{nast} . Zapewnia ona ochronę odpowiedniego odcinka linii. Jednakże wyraźnie widać, że zasięg zabezpieczenia zwarciowego znacznie wykracza poza miejsce zainstalowania reklozera, tak więc zwarcia dwufazowe od $x = 1,2 \text{ km}$ do $x = 2,2 \text{ km}$, a trójfazowe do $x = 3,4 \text{ km}$ będą wyłączane w polu liniowym w stacji, a nie przez reklozera. Powstaje pytanie: co ważniejsze – selektywność zabezpieczeń czy uchronienie linii przed uszkodzeniem. Skutki nieselektywnego wyłączenia można zlikwidować w ciągu kilku minut, ponieważ prawie każdy reklozera ma zdalne sterowanie, natomiast skutki awarii w postaci zerwania przewodów likwiduje się w ciągu kilku godzin i koszty są znacznie większe. Powstaje też problem

bezpieczeństwa, nawet jeśli przewody się nie zerwią. Zwisy liczy się dla temperatury otoczenia 40 °C, dopuszczalna temperatura przewodu przy obciążeniu trwałym to 80 °C, a podczas zwarcia 200 °C. Przekroczenie dopuszczalnej temperatury z powodu przepływu prądu zwarciovego może spowodować znaczne zwiększenie zwisu i zmniejszenie odległości przewodów od ziemi, a w konsekwencji osłabienia ochrony przeciwporażeniowej podstawowej.

- h) Wymagania dla nastawy czasowej i parametrów SPZ jak w przykładzie 1.

Przykład 5

Linia 15 kV wykonana kablem polietylenowym o żyłach aluminiowych i przekroju 240 mm², długości $l = 3$ km, ma zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne nastawione na 1 s, brak SPZ (zwraca się uwagę, że SPZ może być aktywny przy wyprowadzeniu linii kablowej, ponieważ może ona w dalszej części przechodzić w linię napowietrzną). Moc zwarciova na szynach zbiorczych zasilających linię wynosi $S_k = 220$ MVA. Czas własny wyłączników wynosi 80 ms.

Linia zasilą RS, z której odchodzą linie wykonane kablami tego samego rodzaju o przekroju 120 mm² i wyposażone w zabezpieczenia nadprądowe zwłoczne nastawione na 0,7 s. Długości tych linii nie są dokładnie znane, ale przekraczają 4 km. Ocenić konieczność i miejsce zainstalowania zabezpieczeń zwarciovych.

- a) Czas trwania zwarcia t_k w kablu 240 mm² wynosi 1,08 s.
b) Z tablicy 3 – dopuszczalna gęstość prądu w takim kablu wynosi 98 A/mm², stąd:

$$I_{\text{thdop}} = \frac{s \cdot j_{\text{thn}}}{\sqrt{t_k}} = \frac{240 \cdot 98}{\sqrt{1,08}} = 22632 \text{ A.}$$

- c) Nastawa ze względu na dopuszczalny ciepły prąd zwarciovowy powinna spełniać warunek:

$$I_{\text{nastp}} \leq \frac{I_{\text{thdop}}}{k_{\text{bth}}} = \frac{22632}{1,2} = 18860 \text{ A.}$$

a maksymalny prąd zwarcia na szynach zasilających linię tylko 8468 A. Z punktu widzenia cieplnego oddziaływania prądu zwarciovego zabezpieczenie zwarciove jest zbędne.

- d) Impedancja pętli zwarcioviej przy zwarciu na szynach RS wynosi:

$$Z_k = (0,367 + j1,425) \Omega, \quad Z_k = 1,47 \Omega.$$

Maksymalny prąd zwarciovowy na szynach RS-u:

$$I_{\text{kmax}}^{\text{RS}} = \frac{1,1 U_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1,1 \cdot 15000}{\sqrt{3} \cdot 1,47} = 6480 \text{ A,}$$

a minimalny:

$$I_{\text{kmin}}^{\text{RS}} = \frac{U_n}{2 Z_k} = \frac{15000}{2 \cdot 1,47} = 5102 \text{ A.}$$

- e) Zabezpieczenie zwarciove na początku linii jest zbędne, ale nie zabronione i może być zastosowane w celu ograniczenia czasu trwania zapadu napięcia na szynach. Musi być spełniona zależność (P5), czyli po podstawieniu:

$$I_{\text{nastp}} \geq 1,2 \cdot 6480 = 7776 \text{ A.}$$

- f) Jeszcze warunek czułości przy zwarciu tuż za szynami zbiorczymi (P6). Minimalny prąd zwarciovy I_{k-2f}^s (czyli podczas zwarcia dwufazowego) na szynach zbiorczych obliczony został na podstawie prądu zwarcia trójfazowego I_{k-3f}^s , przy czym założono, że liczy się go ze wzoru bez współczynnika 1,1 w liczniku:

$$I_{k-2f}^s = \frac{U_n}{2Z_k}$$

$$I_{k-3f}^s = \frac{S_k}{\sqrt{3}U_n} = \frac{220 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 15 \text{ kV}} = 8467 \text{ A.}$$

$$I_{k-2f}^s = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot 1,1} I_{k-3f}^s = 6666 \text{ A.}$$

Czyli warunek główny z tego punktu jest następujący:

$$I_{\text{nastp}} < \frac{6666}{1,2} = 5555 \text{ A.}$$

- g) Nie biorąc pod uwagę warunku z punktu c, ponieważ zabezpieczenie jest z punktu widzenia nagrzewania zbędne, pozostają dwa warunki:

$$I_{\text{nastp}} < 5555 \text{ A,}$$

$$I_{\text{nastp}} \geq 7776 \text{ A,}$$

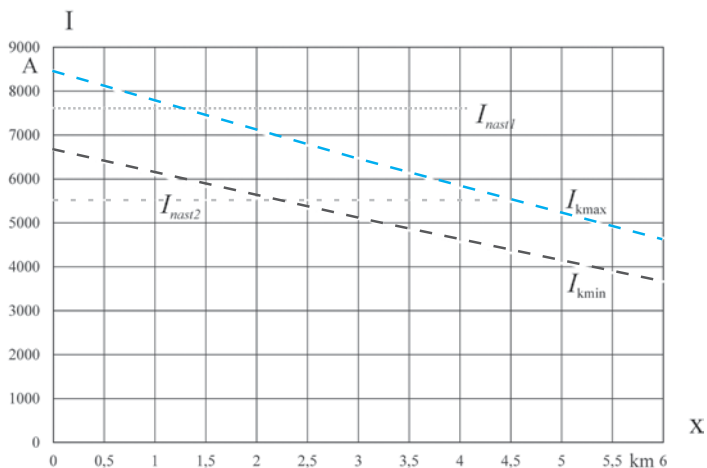
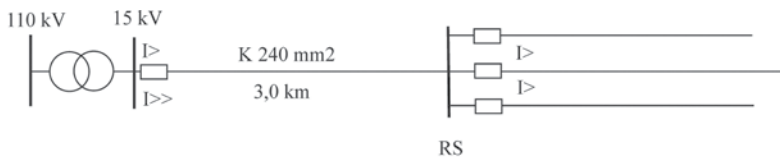
czyli przy zachowaniu selektywności nie udaje się objąć zabezpieczeniem żadnej części linii, co pokazano na rys. 7.

- h) Prąd zwarcia trójfazowego na szynach RS-u wynosi 6480 A. Przy zabezpieczeniu nastawionym na 0,7 s i czasie własnym wyłącznika 0,08 czas zwarcia wynosi 0,78 s. Stąd dopuszczalny prąd zwarciovy dla kabla aluminiowego 120 mm² wynosi.

$$I_{\text{thdop}} = \frac{120 \cdot 98}{\sqrt{0,78}} = 13315 \text{ A,}$$

czyli jest większy od prądu zwarciowego. W liniach odchodzących od RS-u nie ma także potrzeby instalowania zabezpieczeń zwarciowych.

Sytuacja dla tego przykładu pokazana jest na rys. 7. Prosta I_{nast1} to nastawa wynikająca z warunku selektywności – zabezpieczenie ma tylko niewielki zasięg rzędu 0,6 km przy zwarciu trójfazowym, czyli taki dobór jest zupełnie bezsensowny. Z kolei przy nastawie I_{nast2} zasięg wykracza poza szyny RS i nie będzie selektywności.



Rys. 7. Wykres prądów do przykładu 5

Przykład 6

Linia 15 kV wykonana kablem polietylenowym o żyłach aluminiowych przekroju 240 mm², tak jak w przykładzie 5, zasila RS, z którego odchodzą linie wykonane przewodami:

Linia 1: AFL-6 35 mm² o długości 5 km,

Linia 2: AFL-6 50 mm² o długości 8 km,

Linia 3: AFL-6 70 mm² o długości 9 km.

Wszystkie te linie posiadają automatykę jednokrotnego SPZ i zabezpieczenie zwłoczne z opóźnieniem czasowym 0,7 s oraz wyłączniki z czasem własnym 0,1 s. Za RS nie ma już żadnych zabezpieczeń. Przeanalizować potrzebę zastosowania i ewentualnie nastawy zabezpieczeń zwarciovych w tym układzie.

Wiadomo z przykładu 5, że w linii wykonanej kablem 240 mm² nie potrzeba zabezpieczenia zwarciovego. Poniżej przeanalizowano potrzebę wyposażenia pól w RS-ie w te zabezpieczenia.

- Czas zwarcia t_k we wszystkich kablach wynosi 1,6 s.
- Z wykresu na rys. 2 dla $\vartheta_B = 80^\circ\text{C}$ i $\vartheta_K = 200^\circ\text{C}$ odczytuje się $j_{\text{thn}} = 85 \text{ A/mm}^2$. Na tej podstawie dla:
 - linii 1:

$$I_{\text{thdop}}^{\text{L1}} = \frac{35 \cdot 85}{\sqrt{1,6}} = 2351 \text{ A,}$$

- linii 2:

$$I_{\text{thdop}}^{L2} = \frac{50 \cdot 85}{\sqrt{1,6}} = 3360 \text{ A},$$

- linii 3:

$$I_{\text{thdop}}^{L3} = \frac{70 \cdot 85}{\sqrt{1,6}} = 6652 \text{ A}.$$

c) Nastawa ze względu na dopuszczalny cieplny prąd zwarciový powinna spełniać warunek:

- linia 1:

$$I_{\text{nast}}^{L1} \leq \frac{2351}{1,15} = 2044 \text{ A},$$

- linia 2:

$$I_{\text{nast}}^{L2} \leq \frac{3360}{1,2} = 2800 \text{ A},$$

- linia 3: zabezpieczenie jest zbędne, ponieważ $I_{\text{thdop}}^{L3} = 6652 \text{ A}$ i jest większy od maksymalnego prądu zwarciového na początku tej linii, czyli $I_{\text{kmax}}^{\text{RS}} = 6480 \text{ A}$ (obliczenie $I_{\text{kmax}}^{\text{RS}}$ w przykładzie poprzednim).

d) Warunku selektywności nie trzeba sprawdzać, ponieważ w liniach nie ma innych zabezpieczeń. Jeśli będą dobrane nastawy zabezpieczenia zwłocznego, można sprawdzić warunek, czy proponowane nastawy zabezpieczenia zwarciového są większe od niego przynajmniej 2–4 razy. Zwykle nie ma problemu ze spełnieniem tego warunku.

Przykład 7

Linia 15 kV wykonana jest z kilku różnych przewodów kolejno od szyn zasilających (wg rys. 8):

AB – kabel polietylenowy 120 mm² Al o długości 1,2 km,

BC – przewód AFL-6 70 mm² o długości 1,8 km,

CD – przewód AFL-6 50 mm² o długości 3,2 km,

DE – przewód AFL-6 35 mm² o długości 2,8 km.

Moc zwarciová na szynach zbiorczych zasilających linię wynosi $S_k = 220 \text{ MVA}$. Czas własny wyłącznika na początku linii wynosi 100 ms, a zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne nastawione jest na 1,2 s, automatyka SPZ jednokrotnego. Na końcu linii jest zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne nastawione na czas 0,9 s.

a) Czas zwarcia t_k wynosi 2,6 s.

b) Dla odcinka kablowego z tablicy 3 odczytuje się $j_{\text{thn}} = 98 \text{ A/mm}^2$. Dla odcinków napowietrznych z wykresu na rys. 2 dla $\vartheta_B = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ i $\vartheta_K = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ odczytuje się

$j_{\text{thn}} = 85 \text{ A/mm}^2$. Na tej podstawie dla poszczególnych odcinków linii dopuszczalne prądy zwarciove wynoszą:

• AB:
$$I_{\text{thdop}}^{\text{AB}} = \frac{120 \cdot 98}{\sqrt{2,6}} = 7293 \text{ A},$$

• BC:
$$I_{\text{thdop}}^{\text{BC}} = \frac{70 \cdot 85}{\sqrt{2,6}} = 3690 \text{ A},$$

• CD:
$$I_{\text{thdop}}^{\text{CD}} = \frac{50 \cdot 85}{\sqrt{2,6}} = 2635 \text{ A},$$

• DE:
$$I_{\text{thdop}}^{\text{DE}} = \frac{35 \cdot 85}{\sqrt{2,6}} = 1845 \text{ A}.$$

- c) Maksymalne prądy zwarciove w poszczególnych punktach linii wynoszą: A – 8468 A, B – 7635 A, C – 4458 A, D – 2261 A, E – 1258 A.

W ocenie przydatna będzie tablica P1, w której podano w poszczególnych odcinkach linii prądy zwarciove na ich początku i końcu oraz dopuszczalną wartość prądu zwarciovego przy działaniu zabezpieczenia zwłocznego. Z porównania tych wielkości wynika, czy rozpatrywany odcinek musi być objęty zabezpieczeniem zwarciowym.

Tablica P1. Ocena parametrów zwarciowych w poszczególnych odcinkach linii

Odcinek	Dopuszczalna wartość prądu zwarciovego	Maksymalny prąd zwarciovy		Wniosek
		na początku odcinka	na końcu odcinka	
AB	7293 A	8468 A	7635A	cały
BC	3690 A	7635 A	4458 A	cały
CD	2635 A	4458 A	2261 A	część
DE	1845 A	2261 A	1258 A	część

Objaśnienia do tablicy P1:

cały – cały odcinek musi być objęty zabezpieczeniem zwarciowym,

część – część odcinka musi być objęta zabezpieczeniem zwarciowym.

Z tablicy P1 wynika, że nastawę zabezpieczenia należy dobrać do parametrów odcinka DE, czyli:

$$I_{\text{nast}} = \frac{I_{\text{thdop}}^{\text{DE}}}{k_{\text{bth}}} \leq \frac{1845}{1,15} = 1604 \text{ A}.$$

- d) Ze względu na to, że na końcu linii jest zabezpieczenie zwłoczne, obowiązuje warunek (P5). Maksymalny prąd zwarcia trójfazowego na szynach przed następnym zabezpieczeniem zwłocznym wynosi 1258 A. Stąd:

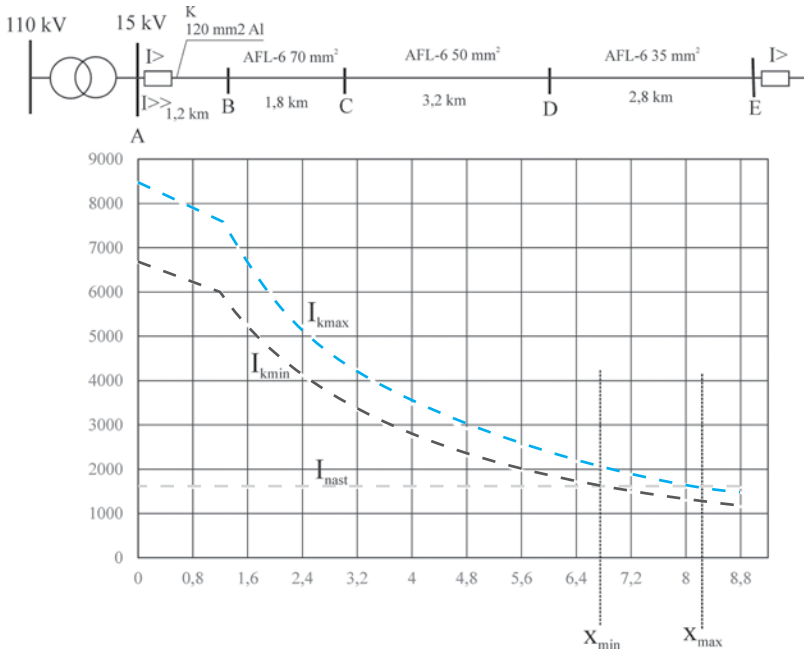
$$I_{\text{nastp}} \geq 1,6 \cdot 1258 = 2013 \text{ A}.$$

Jest on sprzeczny z warunkiem obliczonym w punkcie c, ale jest możliwość zmniejszenia współczynnika bezpieczeństwa do 1,2. (Poprzednio podawano, że

im większa impedancja linii, to współczynnik może być większy. Przy linii niejednorodnej ta teoria nie sprawdza się.) Stąd:

$$I_{\text{nastp}} \geq 1,2 \cdot 1258 = 1509 \text{ A.}$$

- e) Można przyjąć nastawę ostateczną w granicach 1503 A – 1604 A i już tylko uzależnić ją od przekładni przekładników prądowych i możliwości nastawczych zabezpieczenia. Na rys. 8 pokazano zasięgi zabezpieczenia dla 1600 A. Widać, że parametry przewodu AFL-6 35 mm² wymusiły zasięg zabezpieczenia prawie na całą linię.
- f) Z punktu widzenia eksploatacji (długie odcinki napowietrzne) wskazana jest automatyka SPZ przy działaniu zabezpieczenia zwarciovowego, a nie blokada tej automatyki. Trzeba tak dobrać nastawę czasową, aby to nie groziło przegrzaniem przewodów linii. Można skorzystać z tablicy 8, a wyniki zestawiono w tablicy P2. Najmniejszy dopuszczalny czas pojedynczego zwarcia jest dla odcinka linii BC wykonanego przewodem AFL-6 70 mm² wynosi 0,35 s. Stąd przy czasie własnym wyłącznika 0,1 s maksymalne opóźnienie czasowe możliwe do nastawienia wynosi 0,25 s.



Rys. 8. Wykres prądów do przykładu 5

Analizując rys. 8 dochodzi się do wniosku, że w tym przypadku dawne wymaganie, że zabezpieczenie ma obejmować przynajmniej 20%, brzmi przynajmniej dziwnie – tutaj trzeba było objąć około 80% długości linii. Przykład może być skrajny, bo w głównych ciągach nie stosuje się raczej przewodów o przekroju 35 mm², ale jednak możliwy.

Tablica P2. Określenie maksymalnego czasu zwarcia przy braku blokady SPZ od zabezpieczenia zwarciego

Odcinek	Rodzaj przewodu	Maksymalny prąd zwarcio- wy na początku odcinka	Maksymalny czas pojedynczego zwarcia
AB	K 120 mm ²	8468 A	>0,5 s
BC	AFL-6 70 mm ²	7635 A	0,35 s
CD	AFL-6 50 mm ²	4458 A	0,45 s
DE	AFL-6 35 mm ²	2261 A	0,5 s

10. Zakończenie i wnioski

Zabezpieczenie nadprądowe zwarcio-od skutków zwarć międzyfazowych powinno być stosowane w prawie wszystkich jednolitych pod względem zastosowanego przewodu polskich liniach SN. Wyjątkiem mogą być kable o przekrojach większych od 120 mm², ale wymaga to sprawdzenia w konkretnych warunkach.

W liniach napowietrznych wykonywanych z najczęściej spotykanych przekrojów przewodów stalowo-aluminiowych stosowanie tego zabezpieczenia jest konieczne.

Zadaniem zabezpieczenia zwarciego jest ochrona początkowego odcinka linii przed cieplnymi skutkami przepływu prądu zwarciego. Ten „początkowy odcinek linii” może nie być wyznaczany w prosty sposób na podstawie np. 20% długości linii, ale na podstawie porównania rzeczywistego prądu zwarciego i dopuszczalnego obliczonego dla czasu trwania zwarcia, parametrów cyklu SPZ i rodzaju przewodu. Obecnie stosowana metoda oparta na uzyskaniu selektywności zupełnie się nie sprawdza szczególnie w przypadku linii o małej odległości (ściślej byłoby stwierdzenie odnosić do impedancji) do następnego zabezpieczenia zwłocznego. Problem narasta przy wprowadzaniu do sieci tzw. reklozerów, czyli łączników w głębi sieci wyposażonych w zabezpieczenia.

Autor uważa, że ochrona przed cieplnymi skutkami przepływu prądu zwarciego jest ważniejsza niż zapewnienie selektywności zabezpieczeń, ponieważ niewłaściwa lokalizacja miejsca zwarcia może być przy obecnej technice bardzo szybko poprawiona przez dyspozycję, a naprawa uszkodzonej linii jest znacznie dłuższa.

Artykuł został napisany przy założeniu, że przy nagrzewaniu przewodów w cyklu SPZ bierze się pod uwagę dwa pierwsze czasy przepływu prądu zwarciego, a pomija trzeci, jeśli druga przerwa beznapięciowa trwa w więcej niż 10 s. Pomija się stygnięcie przewodu w pierwszej przerwie beznapięciowej, a uważa się, że wpływ drugiej przerwy pozwala na częściowe ostygnięcie przewodu tym bardziej, że nie ma wówczas nawet obciążenia roboczego.

Do kompletności artykułu koniecznie trzeba przeanalizować przykłady, ponieważ część teoretyczna wskazuje tylko kierunki analizy. Różnorodność układów sieci SN w Polsce jest ogromna, stąd trudności w doborze nastaw pojawiają się w szczególnych obliczeniach.

Dla doboru nastaw zabezpieczenia zwarciego nie ma znaczenia rozmieszczenie stacji SN/nN wzdłuż linii, jeśli są zasilane bezpośrednio z tego ciągu. Autor uważa

za, że należy analizować tylko ciąg główny. Odgałęzienie należy analizować tylko wtedy, jeśli odchodzi od niego linia wyposażona w zabezpieczenie nadprądowe (nie bezpieczniki) na końcu lub reklozer. Również przy występowaniu w linii kilku reklozerów przeważnie wystarczy analizować współpracę tylko z najbliższym. Wniosek ten nie wynika z uzasadnienia merytorycznego, ale z tego, że polskie linie SN są przeważnie silnie porożgążane i analiza każdego odcinka niesamowicie by zwiększyła liczbę obliczeń.

Z przeprowadzonych analiz wynika również, że zwykle nie ma potrzeby blokowania automatyki SPZ od zadziałania zabezpieczenia zwarciovego pod warunkiem odpowiedniego doboru jego nastawy czasowej na podstawie maksymalnego czasu zwarcia. Jest to wniosek nadzwyczaj korzystny, ponieważ w polskiej rzeczywistości zwykle zabezpieczenie obejmuje znacznie więcej niż 20% długości linii, nawet czasem całą, w związku z tym można uniknąć dłuższych przerw w dostawie energii (zwykle po definitywnym wyłączeniu podejmuje się jedną próbę załączenia linii – trwa to jednak kilka minut, a nie sekund – jak w przypadku skutecznego SPZ).

Wnioskiem uzyskanym jakby „przy okazji” jest zalecenie, aby reklozerów nie instalować zbyt blisko szyn zbiorczych zasilających linię, jeśli chce się uzyskać selektywność zabezpieczeń.

11. Literatura

- 1 Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, t. I–III, WNT, Warszawa, 1979, 1985, 1987.
- 2 Żydanowicz J., Namiołkiewicz M.: Automatyka zabezpieczeniowa w elektroenergetyce. WNT, Warszawa, 1983.
- 3 Obciążalność robocza i zwarciova przewodów szynowych. http://www.zue.pwr.wroc.pl/dydaktyka/materialy_dla_studentow, styczeń 2014 r.
- 4 PN-EN 60865-1 Obliczanie skutków prądów zwarciovych. Część 1, Definicje, metody obliczania, 2002.
- 5 Kable i przewody energetyczne. Katalog. Telefonika Kable Sp. z o.o. S.K.A., pobrane ze strony internetowej producenta w styczniu 2014 r.
- 6 http://www.ensto.com/download/22271_09. Katalog_do_projektowania_linii_sn_06.11.pdf, styczeń 2014 r.
- 7 Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Strona internetowa: <http://www.operator.enea.pl>, 22 stycznia 2014 r.
- 9 Hoppel W., Lorenc J.: Podstawy doboru nastaw zabezpieczeń w polach SN. Automatyka Elektroenergetyczna, 1/2003, ss. 45–50.
- 10 Hoppel W., Lorenc J.: Dobór nastaw zabezpieczeń w polach linii średniego napięcia. Automatyka Elektroenergetyczna, 2003, nr 2, s. 35–39.
- 11 Hoppel W., Lorenc J.: Jak dobrać nastawy zabezpieczeń w polach funkcyjnych rozdzielni średniego napięcia. Automatyka Elektroenergetyczna, 3/2003, ss. 35–39.
- 12 Przepisy budowy urządzeń elektroenergetycznych. Wydawnictwa Przemysłowe WEMA, Warszawa 1997 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 1 października 2014 r.