

Selektywność pełna i częściowa wyłączników różnicowoprądowych

Streszczenie. W pracy przedstawiono nowe i kompleksowe podejście do doboru wyłączników różnicowoprądowych w instalacjach elektrycznych dla uzyskania pełnej lub częściowej selektywności ich działania. Stwierdzono, że podana w pracy selektywność uzależniona jest zarówno od typu wyłączników (zwłoczny, bezzwłoczny), prądów działających oraz ich charakterystyk czasowo-prądowych. W analizie warunków współpracy selektywnej uwzględnione zostały wymagania normy PN-HD 61008-1 w zakresie maksymalnych czasów wyłączenia i minimalnych niezadziałania oraz niesinusoidalne prądy różnicowe.

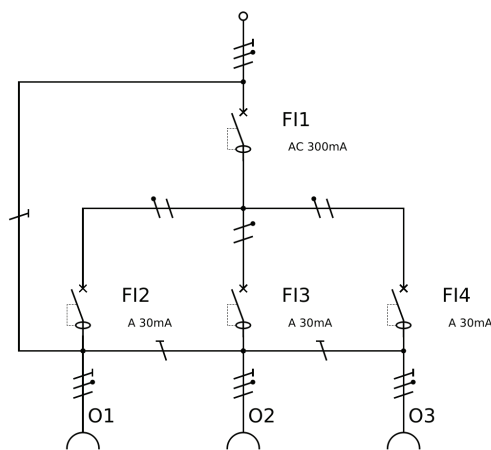
Abstract. The paper presents a new and comprehensive approach to the selection of residual current devices in electrical installations in order to obtain full or partial selectivity of their operation. It was found that the given selectivity depends both on the type of circuit breakers (delayed, instantaneous), operating currents and their time-current characteristics. In the analysis of the conditions of selective cooperation, the requirements of the PN-HD 61008-1 standard in the range of maximum switch-off and minimum no tripping times as well as non-sinusoidal differential currents were taken into account. (**Full and partial selectivity of residual current devices**)

Słowa kluczowe: selektywność pełna, selektywność częściowa, wyłącznik różnicowoprądowy, prąd upływnościowy, prąd rażeniowy, prąd uszkodzeniowy, prąd różnicowy

Keywords: full selectivity, partial selectivity, residual current circuit breaker, leakage current, shock current, fault current, differential current

Wprowadzenie

W zdecydowanej większości u odbiorców przemysłowych i komunalnych instalacje elektryczne niskiego napięcia (nN) pracują w układzie promieniowym, w których instaluje się wiele połączonych szeregowo wyłączników różnicowoprądowych o różnych prądach znamionowych, prądach znamionowych różnicowych, charakterystykach czasowo-prądowych oraz działających przy różnych kształtach prądów różnicowych (rys. 1). Przy takim połączeniu, występujące trwale w instalacji naturalne prądy upływnościowe lub powstałe wskutek uszkodzenia izolacji prądy rażeniowe, mogą przepływać przez więcej niż jeden wyłącznik różnicowoprądowy.



Rys. 1. Uproszczony schemat instalacji elektrycznej niskiego napięcia w układzie promieniowym: O1, O2, O3 - odbiorniki, FI1 – zabezpieczenie różnicowoprądowe typu AC o znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} = 300$ mA, FI2-FI4 – zabezpieczenie różnicowoprądowe typu A o znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} = 30$ mA

Spowodować może to niepożądane jednoczesne zadziałanie kilku szeregowo połączonych wyłączników różnicowoprądowych i wyłączenie zasilania urządzeń elektrycznych nie tylko w uszkodzonych obwodzie, ale także w sprawnych technicznie obwodach powodując nieuzasadnioną utratę ich dyspozycyjności. Dla uniknięcia takich sytuacji, wyłączniki różnicowoprądowe powinny działać selektywnie, tzn. w przypadku pojawienia się jakichkolwiek zakłóceń powodujących powstanie

prądów rażeniowych (prowadzących do powstania niebezpiecznych napięć dotykowych) lub dużych prądów upływnościowych, powinien zadziałać, tylko i wyłącznie, wyłącznik różnicowoprądowy zainstalowany najbliżej miejsca zakłócenia. Zadziałanie tego wyłącznika różnicowoprądowego powinno spowodować wyłączenie tylko uszkodzonego fragmentu obwodu przy zachowaniu ciągłości zasilania pozostałych obwodów i urządzeń odbiorczych.

Różnorodność stosowanych wyłączników różnicowoprądowych, różne wartości oraz kształty naturalnych prądów upływnościowych i rażeniowych sprawiają, że nie w każdym przypadku i nie w każdych warunkach możliwe jest uzyskanie selektywności pełnej - tj. takiej, w której bez względu na wartość i kształt płynącego prądu rażeniowego lub upływnościowego zadziała tylko i wyłącznie wyłącznik różnicowoprądowy zainstalowany najbliżej miejsca zakłócenia. Uzyskanie takiej selektywności wymagać może zmiany konfiguracji instalacji elektrycznej, zwiększenia liczby obwodów odbiorczych, zwiększenia liczby wyłączników różnicowoprądowych, a także zastosowania wyłączników różnicowoprądowych różnych typów.

W przypadku, kiedy wyłączniki różnicowoprądowe nie działają wybiórczo w całym zakresie spodziewanych prądów upływnościowych i rażeniowych, a tylko dla przeważającej ich części mówi się o selektywności częściowej. Ma to miejsce wówczas, gdy świadomie rezygnuje się z selektywności dla zakłóceń o małym prawdopodobieństwie. Selektywność taka może być stosowana w obwodach o mniejszych wymaganiach co do ciągłości zasilania, nie może jednak wpłynąć na obniżenie wymagań w zakresie ochrony przeciwporażeniowej.

Różne kształty oraz wartości różnicowych prądów rażeniowych i upływnościowych występujących lub powstałych w instalacji elektrycznej wskutek uszkodzenia bądź naturalnych procesów starzeniowych izolacji przewodów, lub zainstalowanych urządzeń elektrycznych, podczas załączania i wyłączania obwodów odbiorczych, zwarć doziemnych, wprowadziły podział wyłączników różnicowoprądowych na cztery podstawowe typy. Są to wyłączniki różnicowoprądowe typu [1]:

AC konstrukcyjnie przystosowane do działania przy prądzie uszkodzeniowym (tj. rażeniowym, upływnościowym) przemiennym doprowadzonym w sposób nagły lub wolnonarastający,

A przystosowane do działania przy prądzie uszkodzeniowym przemiennym i stałym pulsującym ze składową stałą do 6 mA doprowadzonym w sposób nagły lub wolnonarastający oraz w obwodach ze sterowanym sterownikiem kątem fazowym (np. tyrystorem),

F pośredni między typem A i B; konstrukcyjnie zbliżone do typu A, przy czym reagują również na prąd pulsujący ze składową stałą do 10 mA, a także na prąd przemienny zawierający wyższe harmoniczne,

B przeznaczone do stosowania w obwodach, w których spodziewany prąd uszkodzeniowy jest: sinusoidalnie zmiennym, pulsującym jednokierunkowym o dowolnej biegunowości lub sterowanym fazowo oraz z wygładzonym prądem stałym.

Jeżeli w obwodzie zabezpieczonym wyłącznikiem różnicowoprądowym znajduje się przemiennik częstotliwości, to mogą pojawić się prądy uszkodzeniowe o innej częstotliwości niż częstotliwość znamionowa wyłącznika. Dla takiego przypadku ochrona przeciwporażeniowa może nie być zapewniona, gdyż wyłącznik może nie zadziałać przy wymaganej wartości prądu uszkodzeniowego i nie wystąpi wyłączenie uszkodzonego obwodu [2, 3]. Prąd uszkodzeniowy o niesinusoidalnym kształcie wpływa na wartość prądu różnicowego wyłącznika, przy której nastąpi odłączenie uszkodzonego obwodu. Prawdopodobieństwo to odnosi się zarówno do wyłączników bezzwłocznych i zwłocznych oraz typu AC i A [4]. Zależność ta występuje również przy różnych kątach fazowych prądu i częstotliwościach innych niż 50 Hz [5]. Prądy upływnościowe o wysokich wartościach kąta fazowego mogą prowadzić również do wyzwania wyłącznika typu AC, chociaż wyłączniki tego typu nie są przeznaczone do wyłączania takich prądów różnicowych [4]. Przy prądzie uszkodzeniowym o częstotliwości mniejszej niż 50 Hz pojawiają się trudności z zadziałaniem wyłącznika różnicowoprądowego. W sposób znaczący wzrasta wartość prądu rażeniowego, konieczna do wyzwolenia wyłącznika i odnosi się zarówno do wyłączników typu AC oraz A. Przy czym prądy wyzwajające różnią się pomiędzy producentami wyłączników [6].

Właściwości oraz zakresy prądów zadziałania wymienionych typów wyłączników różnicowoprądowych dla jednofazowego zwarcia doziemnego w obwodzie odbiorczym zamieszczono w Tabelicy 1.

Prądy zadziałania wyłączników różnicowoprądowych (Tabelica 1) podzielić można na trzy przedziały:

- pierwszy, mniejszy od dolnej granicznej wartości prądu zadziałania, dotyczy prądów różnicowych (uszkodzeniowych), przy których nie powinien w żadnym przypadku zadziałać wyłącznik różnicowoprądowy,
- drugi, określony dolną i górną wartością prądu zadziałania, dotyczy przedziału prądów różnicowych, przy których może zadziałać wyłącznik różnicowoprądowy,
- trzeci, powyżej górnej wartości prądu zadziałania dotyczy prądów różnicowych, przy którym musi zadziałać wyłącznik różnicowoprądowy.

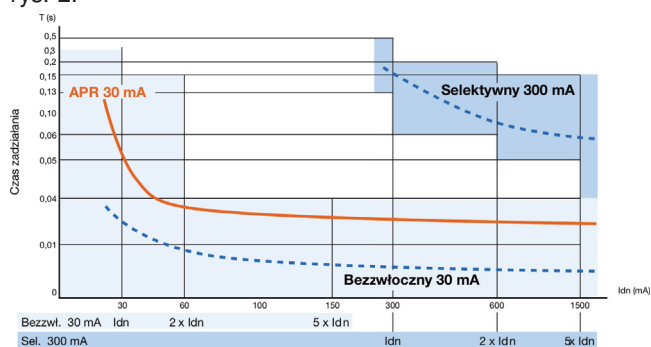
Z podanych przedziałów prądu zadziałania wynika, że w celu uzyskania selektywności pełnej dwóch szeregowo pracujących wyłączników różnicowoprądowych, dla wszystkich mogących wystąpić zakłóceń (począwszy od dużej upływności, poprzez przeciążenia do zwarc), wartość i kształt prądu zadziałania wyłącznika znajdującego się bliżej źródła zasilania źródła powinna odpowiadać pierwszemu

przedziałowi, natomiast wyłącznika znajdującego się w pobliżu miejsca zakłócenia - trzeciemu przedziałowi. W pozostałych dwóch przypadkach możliwe jest uzyskanie selektywności częściowej (tj. tylko do pewnej wartości prądu zadziałania) lub całkowitego jej braku.

Biorąc pod uwagę czas zadziałania wyłączników różnicowoprądowych, w przypadku pojawienia się prądów rażeniowych bądź upływnościowych, w stanach przejściowych, w stanach związanych z pojawieniem się prądów udarowych, wyróżnić można trzy typy wyłączników:

- bezzwłoczne, reagujące na pojawiające się prądy rażeniowe bądź upływnościowe z czasem własnym wyłącznika,
- krótkozwłoczne o zwiększonej odporności na prądy łączeniowe oraz prąd udarowy o kształcie $8/20 \mu s$ i wartości szczytowej do 3 kA; mają wbudowaną zwłokę czasową 10 ms lub 20 ms,
- zwłoczne, nazywane też wyłącznikami selektywnymi oznaczonymi literą S, działające ze zwłoką czasową około 40 ms; docelowo przeznaczone są do selektywnej współpracy z szeregowo połączonymi wyłącznikami różnicowoprądowymi bezzwłocznymi.

Każdy z trzech wymienionych typów wyłączników różnicowoprądowych posiada pasmowe charakterystyki czasowo-prądowe. Przykładowy poglądowy przebieg pasmowych charakterystyk czasowo-prądowych wyłączników różnicowoprądowych, w zależności od krotności prądu różnicowego I_{Δ} w stosunku do prądu znamionowego różnicowego $I_{\Delta n}$ wyłącznika pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Pasmowe charakterystyki czasowo-prądowe wyłączników różnicowoprądowych firmy ABB [7]

Norma [1] określa maksymalne czasy wyłączenia dla wszystkich typów wyłączników różnicowoprądowych oraz minimalne czasy niezadziałania dla wyłączników zwłocznych. Znormalizowane ww. czasy dla wyłączników różnicowoprądowych typu AC, A i B podano w Tabelicy 2.

Każdy z wyłączników różnicowoprądowych, niezależnie od typu, posiada określone przedziały prądów zadziałania (Tabelica 1) oraz charakterystyki czasowo-prądowe (Tabelica 2). Przy określaniu selektywnej współpracy dwóch szeregowo połączonych wyłączników różnicowoprądowych nie można posługiwać się tylko jednym kryterium, prądowym lub czasowo-prądowym, ale obydwojma jednocześnie.

Bazując na zamieszczonych w Tablicach 1 i 2 wymaganiach, można powiedzieć, że wyłączniki różnicowoprądowe działają w pełni selektywnie, gdy ich prądy zadziałania i pasmowe charakterystyki czasowo-prądowe nie przecinają się ani nie mają żadnych wspólnych obszarów działania dla wszystkich spodziewanych wartości i kształtów prądów rażeniowych oraz upływnościowych. Wystąpienie jakiegokolwiek wspólnego obszaru działania prowadzi do selektywności częściowej.

Tablica 1. Właściwości oraz zakresy prądów zadziałania wyłączników różnicowoprądowych dla różnych kształtów prądów jednofazowego zwarcia doziemnego i_{Δ}

Prąd zwarcia doziemnego i_{Δ}	Prąd zadziałania wyłącznika	Kształt prądu i_{Δ} przy którym zadziała (+) lub nie zadziała (-) wyłącznik typu:		
		AC	A	B
Przemienny sinusoidalny	$(0,5-1,0) I_{\Delta n}$	+	+	+
Przemienny sinusoidalny, pulsujący wyprostowany jednopółkowo	$(0,35-1,4) I_{\Delta n}$	-	+	+
Pulsujący wyprostowany jednopółkowo	$(0,35-1,4) I_{\Delta n}$	-	+	+
Pulsujący: kąt wysterowania 90° (i_A), kąt wysterowania 135° (i_B)	$i_A: (0,25-1,4) I_{\Delta n}$ $i_B: (0,11-1,4) I_{\Delta n}$	-	+	+
Wyprostowany jednopółkowo ze składową stałą do 6 mA	$(1,4 I_{\Delta n} + 6) \text{ mA}$	-	+	+
Prąd stały o niewielkiej zawartości składowej okresowej	$(0,5-2,0) I_{\Delta n}^{1)}$	-	-	+

$I_{\Delta n}$ - prąd znamionowy różnicowy wyłącznika różnicowego
¹⁾ Dotyczy wyłączników różnicowoprądowych przeznaczonych do przerywania prądów różnicowych stałych w instalacjach elektrycznych przemysłowych.

Tablica 2. Znormalizowane maksymalne czasy wyłączania (max.) i najkrótsze czasy niezadziałania (min.) wyłączników różnicowoprądowych typu AC, A i B przy wystąpieniu prądu różnicowego [1]

Typ wyłącznika	Prąd znamionowy I_n	Prąd znamionowy $I_{\Delta n}$	Maksymalny czas wyłączania (max.) i najkrótszy czas [s] niezadziałania (min.) dla prądu różnicowego I_{Δ} równego:			
			A	A	$I_{\Delta n}$	$2 \times I_{\Delta n}$
AC (bezzwłoczny, krótkozwłoczny)	dowolny	dowolny	0,3	0,15	0,04	Max.
AC (zwłoczny)	$\geq 25 \text{ A}$	$\geq 0,03$	0,5 0,13	0,2 0,06	0,15 0,05	Max. Min.
A i B (bezzwłoczny, krótkozwłoczny)	dowolny	$> 0,01 \text{ A}$	$1,4 \times I_{\Delta n}$ 0,3	$2 \times 1,4 \times I_{\Delta n}$ 0,15	$5 \times 1,4 \times I_{\Delta n}$ 0,04	Max.
A i B (bezzwłoczny, krótkozwłoczny)	dowolny	$\leq 0,01 \text{ A}$	$2 \times I_{\Delta n}$ 0,3	$2 \times 2 \times I_{\Delta n}$ 0,15	$2 \times 5 \times I_{\Delta n}$ 0,04	Max.
A i B (zwłoczny)	$\geq 25 \text{ A}$	$\geq 0,03$	$1,4 \times I_{\Delta n}$ 0,5 0,13	$2 \times 1,4 \times I_{\Delta n}$ 0,2 0,06	$5 \times 1,4 \times I_{\Delta n}$ 0,15 0,05	Max. Min.

Kryterium prądowe selektywnej współpracy

Na podstawie wymagań normatywnych zamieszczonych w Tablicy 1, w Tablicy 3 podano dolną i górną granicę możliwych prądów zadziałania wyłączników różnicowoprądowych różnego typu dla różnych kształtów prądu różnicowego. Kierując się podanymi wartościami progowymi prądów zadziałania wyłączników różnicowoprądowych, określono prądy znamionowe różnicowe szeregowo pracujących wyłączników różnicowoprądowych zapewniających selektywność pełną (Tablica 4) oraz częściową (Tablica 5) pomiędzy wyłącznikami typu AC, A i B zainstalowanymi bliżej odbiornika oraz typu A i B znajdującymi się bliżej źródła zasilania dla wszystkich możliwych kształtów spodziewanego prądu różnicowego.

Z analizy danych zestawionych w Tablicach 4 i 5 wynika, że jeżeli kryterium oceny selektywnej współpracy dwóch szeregowo połączonych wyłączników różnicowoprądowych będzie prąd ich zadziałania, to w przypadku wystąpienia prądu różnicowego przemiennego sinusoidalnego, niezależnie od typu zainstalowanych wyłączników różnicowoprądowych zachowana będzie zawsze selektywność pełna, gdy wartość prądu znamionowego różnicowego wyłącznika od strony zasilania będzie, co najmniej trzykrotnie większa od prądu znamionowego różnicowego wyłącznika zamontowanego od strony odbiornika. Natomiast dla prądów różnicowych o innym przebiegu czasowym, tj. wyprostowanych jednopółkowo, zawierających składową stałą, podany wyżej warunek w żadnym przypadku nie zapewnia selektywności pełnej. Może zagwarantować, co najwyżej selektywność częściową. W takim przypadku, w celu uzyskania selektywności pełnej, prąd znamionowy różnicowy

wyłącznika różnicowoprądowego zainstalowanego od strony zasilania powinien być przynajmniej:

- dziesięciokrotnie większy od prądu znamionowego wyłącznika różnicowoprądowego zamontowanego od strony odbiornika o prądzie $I_{\Delta n} = 10$ i 30 mA,
- pięciokrotnie większy od prądu znamionowego wyłącznika różnicowoprądowego od strony odbiornika o prądzie $I_{\Delta n} = 100$ mA.

Podane warunki nie zapewniają jednak selektywności pełnej dla prądu pulsującego wysterowanego przy kącie 135° . W takim przypadku prąd znamionowy różnicowy wyłącznika od strony zasilania powinien być co najmniej trzydziestokrotnie razy większy od prądu znamionowego różnicowego wyłącznika od strony odbiornika o $I_{\Delta n} = 10$ mA oraz siedemnaściekrotnie dla wyłącznika o $I_{\Delta n} = 30$ mA.

Kryterium czasowo-prądowe selektywnej współpracy

W normie [1] podano maksymalne czasy wyłączania i najkrótsze czasy niezadziałania wyłączników różnicowoprądowych (pierwszy czas dla bezzwłocznych, krótkozwłocznych i zwłocznych, drugi - zwłocznych) odniesione dla określonej krotności (1, 2, 5) górnej wartości prądów ich zadziałania ($AC-I_{\Delta n}$, A i B- $1,4 \times I_{\Delta n}$). Na tej podstawie można: sporządzić charakterystyki czasowo-prądowe różnych typów wyłączników różnicowoprądowych, określić wzajemne ich położenie oraz ocenić możliwość selektywnej współpracy dla różnej konfiguracji szeregowo zainstalowanych wyłączników. W przypadku, gdy charakterystyka czasowo-prądowa wyłącznika zainstalowanego od strony zasilania nie przecina się ani nie ma żadnego punktu wspólnego z charakterystyką czasowo-prądową wyłącznika zamontowanego bliżej odbiornika, pomiędzy wyłącznikami wystąpi selektywność pełna. Wystąpienie jakiegokolwiek wspólnego obszaru lub

Tablica 3. Zakresy prądów zadziałania wyłączników różnicowoprądowych typu AC, A i B

Rodzaj prądu I_{Δ} (typ wyłącznika)	Prąd znamionowy różnicowy wyłącznika różnicowoprądowego $I_{\Delta n}$ [mA]:					
	10	30	100	300	500	1000
Przemienne sinusoidalny (AC, A, B)	5 - 10	15 - 30	50 - 100	150 - 300	250 - 500	500 - 1000
Pulsujący wyprostowany jednopółkwo (A, B)	3,5 - 14	10,5 - 42	35 - 140	105 - 420	175 - 700	350 - 1400
Pulsujący wyprostowany jednopółkwo (A, B):						
- kąt wysterowania 90°	2,5 - 14	7,5 - 42	25 - 140	75 - 420	125 - 700	250 - 1400
- kąt wysterowania 135°	2,2 - 14	3,3 - 42	11 - 140	33 - 420	55 - 700	110 - 1400
Wyprostowany jednopółkwo ze składową stałą do 6 mA (A, B)	8,8	48	146	426	706	1406
Prąd stały o niewielkiej zawartości składowej okresowej ¹⁾ (B)	5 - 20	15 - 60	50 - 200	150 - 600	250 - 1000	500 - 2000
¹⁾ Dotyczy wyłączników różnicowoprądowych przeznaczonych do wyłączania prądów stałych w instalacjach przemysłowych.						

Tablica 4. Określone na podstawie kryterium prądowego prądy znamionowe różnicowe wyłączników różnicowoprądowych zapewniających selektywność pełną pomiędzy wyłącznikami typu AC, A i B zainstalowanymi bliżej odbiornika oraz typu A (AC) i B zamontowanymi bliżej źródła zasilania, w zależności od spodziewanego kształtu prądu różnicowego

Rodzaj prądu I_{Δ}	Typ wyłącznika bliżej odbiornika	Typ wyłącznika bliżej źródła zasilania: A (AC), B		
Przemienne sinusoidalny	AC, A, B	10 / 30	30 / 100	100 / 300
Przemienne sinusoidalny, pulsujący	A, B	10 / 100	30 / 300	100 / 500
wyprostowany jednopółkwo				
Pulsujący wyprostowany jednopółkwo	A, B	10 / 100	30 / 300	100 / 500
Pulsując wyprostowany jednopółkwo:				
- kąt wysterowania 90°	A, B	10 / 100	30 / 300	100 / 1000
- kąt wysterowania 135°	A, B	10 / 300	30 / 500	100 / X
Wyprostowany jednopółkwo ze składową stałą do 6 mA	A, B	10 / 30	30 / 100	100 / 300
Prąd stały o niewielkiej zawartości składowej okresowej	B	10 / 100	30 / 300	100 / 500
X - nie ma takiej możliwości.				
Uwaga: Pogrubione wartości prądów znamionowych różnicowych zapewniają selektywność pełną dla wszystkich kształtów prądu różnicowego.				

punktu prowadzi do selektywności częściowej.

Podane wcześniej kryterium prądowe selektywnej współpracy wyłączników różnicowoprądowych dla różnego kształtu prądu różnicowego oraz typu wyłączników wymaga weryfikacji czasowo-prądowej. Konieczne jest więc wyznaczenie maksymalnych czasów wyłączenia i najkrótszych czasów niezadziałania wyłączników różnicowoprądowych dla różnych, podanych w Tablicach 6 i 7, konfiguracji połączeń wyłączników oraz ich prądów znamionowych różnicowych warunkujących selektywność pełną bądź częściową określoną na podstawie kryterium prądowego. Z analizy podanych w Tablicy 2 czasów maksymalnych wyłączenia i minimalnych niezadziałania wyłączników różnicowoprądowych oraz uwarunkowań ich wystąpienia wynika, że:

1. Weryfikację selektywności pełnej i częściowej należy przeprowadzać dla maksymalnego czasu wyłączenia wyłącznika zainstalowanego bliżej odbiornika oraz najkrótszych czasów niezadziałania wyłącznika znajdującego się bliżej źródła zasilania z uwzględnieniem krotności („n”) ich prądu znamionowego różnicowego ($n \times I_{\Delta n}$).
2. Przy szeregowym połączeniu wyłącznika bezzwłocznego oraz zwłocznego typu AC (lub A), przy prądzie różnicowym $I_{\Delta n}$ oraz $2 \times I_{\Delta n}$ (lub $1,4 \times I_{\Delta n}$ oraz $1,4 \times 2 \times I_{\Delta n}$) minimalny czas niezadziałania wyłącznika zwłocznego jest krótszy od maksymalnego czasu wyłączenia wyłącznika bezzwłocznego. Dopiero przy prądzie różnicowym równym i większym od $5 \times I_{\Delta n}$ (lub $1,4 \times 5 \times I_{\Delta n}$) minimalny czas niezadziałania wyłącznika zwłocznego jest większy od maksymalnego czasu wyłączenia wyłącznika bezzwłocznego.
3. Dla uzyskania selektywności pełnej, charakterystyki czasowo-prądowe wyłącznika zainstalowanego bliżej odbiornika oraz źródła zasilania (niezależnie od typu wyłączników i kształtu prądu różnicowego) w

żadnym przypadku nie mogą przecinać się ze sobą i mieć jakiegokolwiek punktu wspólnego dla podanych w Tablicy 1 prądów różnicowych ich zadziałania, z uwzględnieniem maksymalnych czasów wyłączenia i minimalnych czasów niezadziałania. Oznacza to, że dolna wartość prądu zadziałania wyłącznika znajdującego się bliżej źródła zasilania nie może być mniejsza od co najmniej pięciokrotnej wartości prądu znamionowego różnicowego wyłącznika zainstalowanego bliżej odbiornika.

4. W przypadku selektywności częściowej, charakterystyki czasowo-prądowe wyłącznika zainstalowanego bliżej odbiornika oraz źródła zasilania będą przecinały się ze sobą, w co najmniej jednym punkcie. Punkt przecięcia się charakterystyk czasowo-prądowych wyznacza wartość prądu różnicowego zapewniającą selektywność częściową. Biorąc pod uwagę podane w Tablicy 1 możliwe prądy zadziałania wyłączników oraz minimalne czasy niezadziałania i maksymalne wyłączenia oznacza to, że dolna wartość prądu zadziałania wyłącznika znajdującego się bliżej źródła zasilania będzie mniejsza, lub równa, od dwukrotnej wartości prądu znamionowego różnicowego wyłącznika zainstalowanego bliżej odbiornika.

Bazując na podanych czasowo-prądowych warunkach selektywnej współpracy dwóch szeregowo połączonych wyłączników różnicowoprądowych, w Tablicach 6 i 7 podano prądy znamionowe różnicowe wyłączników różnicowoprądowych różnego typu zainstalowanych od strony odbiornika oraz bliżej zasilania warunkujące selektywność pełną i częściową dla różnych kształtów spodziewanego prądu różnicowego I_{Δ} .

Dla pełniejszego zrozumienia idei tworzenia Tablicy 6 przedstawiono sposób postępowania przy doborze dwóch wyłączników różnicowoprądowych do selektywności pełnej. Przykład dotyczy doboru wyłączników różnicowoprądowych

Tablica 5. Określone na podstawie kryterium prądowego prądy znamionowe różnicowe wyłączników różnicowoprądowych zapewniających selektywność częściową pomiędzy wyłącznikami typu AC, A i B zainstalowanymi bliżej odbiornika oraz typu A (AC) i B zamontowanymi bliżej źródła zasilania, w zależności od spodziewanego kształtu prądu różnicowego

Rodzaj prądu I_{Δ}	Typ wyłącznika bliżej odbiornika	Typ wyłącznika bliżej źródła zasilania: A (AC), B		
Przebiegi sinusoidalny	AC, A, B	1)	1)	1)
Przebiegi sinusoidalny, pulsujący wyprostowany jednopółkwo	A, B	10 / 30	30 / 100	100 / 300
Pulsujący wyprostowany jednopółkwo	A, B	10 / 30	30 / 100	100 / 300
Pulsujący wyprostowany jednopółkwo: - kąt wysterowania 90° - kąt wysterowania 135°	A, B A, B	10 / 30 10 / 30	30 / 100 30 / 100	100 / 300 100 / 300
Wyprostowany jednopółkwo ze składową stałą do 6 mA	A, B	1)	1)	1)
Prąd stały o niewielkiej zawartości składowej okresowej	B	10 / 30	30 / 100	100 / 300

1) - niezależnie od prądu różnicowego działają selektywnie.
Uwaga: Pogrubione wartości prądów znamionowych różnicowych zapewniają selektywność częściową dla wszystkich kształtów prądu różnicowego innego od sinusoidalnego.

Tablica 6. Prądy znamionowe różnicowe wyłączników różnicowoprądowych zapewniające selektywność pełną pomiędzy wyłącznikami typu AC, A i B zainstalowanymi od strony odbiornika oraz zasilania, określone z charakterystyk czasowo-prądowych wyłączników dla różnych kształtów spodziewanego prądu różnicowego I_{Δ}

Kształt prądu I_{Δ}	Typ wyłącznika od strony:		Prądy znamionowe różnicowe		
	odbiornika $I_{\Delta n1}$	zasilania $I_{\Delta n2}$	$I_{\Delta n1} / I_{\Delta n2}$	$I_{\Delta n1} / I_{\Delta n2}$	$I_{\Delta n1} / I_{\Delta n2}$
Przebiegi sinusoidalny	AC	AC	10 / 100	30 / 300	100 / 500
	AC	AC(S)	10 / 100	30 / 300	100 / 500
	A	AC ¹⁾	10 / 100	30 / 300	100 / 500
	A	AC(S) ¹⁾	10 / 100	30 / 300	100 / 500
	A	A	10 / 100	30 / 300	100 / 500
	A	A(S)	10 / 100	30 / 300	100 / 500
	AC(S)	A ²⁾	—	—	—
Przebiegi sinusoidalny, pulsujący wyprostowany jednopółkwo	A	AC(S) ¹⁾	10 / 500	30 / 1000	100 / 1000
	A	A	10 / 500	30 / 1000	100 / 1000
	A	A(S)	10 / 500	30 / 1000	100 / 1000
Pulsujący wyprostowany jednopółkwo: - kąt wysterowania 90° - kąt wysterowania 135°	A	A	10 / 500	30 / 1000	—
	A	A(S)	10 / 500	—	—
Wyprostowany jednopółkwo ze składową stałą do 6 mA	A	A	10 / 100	30 / 300	100 / 1000
	A	A(S)	10 / 100	30 / 300	100 / 1000
Prąd stały o niewielkiej zawartości składowej okresowej	—	—	—	—	—

1) - układ niewskazany
2) - brak możliwości selektywności pełnej

typu AC w obwodzie, w którym prąd różnicowy ma kształt przebiegi sinusoidalny. Przyjęto, że wyłącznik różnicowoprądowy znajdujący się bliżej odbiornika jest typu bezzwłocznego i ma prąd znamionowy różnicowy $I_{\Delta n1} = 30$ mA, natomiast wyłącznik zainstalowany bliżej zasilania jest zwłoczny o prądzie znamionowym różnicowym $I_{\Delta n2} = 100$ mA. Zgodnie z przedstawionym kryterium prądowym selektywności pełnej (Tablica 4), dla podanej konfiguracji wyłączników przy spodziewanym prądzie różnicowym do $0,5 \times I_{\Delta n2}$, tj. 50 mA, musi zadziałać tylko i wyłącznie wyłącznik od strony odbiornika, wyłączając wymieniony prąd w czasie nie dłuższym niż 0,3 s (Tablica 2) dla zachowania selektywności pełnej między wyłącznikami. Przy prądach różnicowych większych od 50 mA, przekraczających dolną wartość progową zadziałania wyłącznika drugiego, dobór się komplikuje. Przykładowo dla spodziewanego prądu różnicowego 60 mA (tj. $2 \times I_{\Delta n1}$), najdłuższy czas wyłączenia wyłącznika pierwszego wynosi 0,15 s, a najkrótszy czas niezadziałania wyłącznika drugiego 0,13 s. Oznacza to, że dla prądu różnicowego 60 mA charakterystyki czasowo-prądowe obydwu wyłączników przecinają się i może wystąpić zadziałanie drugiego wyłącznika. Przy wzroście prądu różnicowego powyżej 150 mA, tj. $5 \times I_{\Delta n1}$ pierwszego wyłącznika, wyłączniki będą działać selektywnie, ponieważ najdłuższy czas wyłączenia pierwszego wyłącznika wynosi 0,04 s, natomiast najkrótszy czas niezadziałania drugiego wyłącznika 0,05 s. Podsumowując należy stwierdzić, że wyłączniki różnicowoprądowe (pierwszy o prądzie $I_{\Delta n1} = 30$ mA, drugi $I_{\Delta n2} = 100$ mA) nie zachowują selektywności

pełnej. Stosując od strony zasilania wyłącznik zwłoczny o prądzie znamionowym $I_{\Delta n2} = 300$ mA, przy prądzie 60 mA w żadnym przypadku nie wystąpi jego zadziałanie, ponieważ: dolna progowa wartość prądu zadziałania wynosi 150 mA, najkrótszy czas niezadziałania 0,13 s, a najdłuższy czas zadziałania wyłącznika bezzwłocznego przy prądzie 150 mA - 0,05 s. Tym samym zachowana będzie pełna selektywność czasowo-prądowa dla prądu różnicowego mniejszego od 150 mA. Nie można wykluczyć, że dla analizowanego układu wyłączników różnicowoprądowych 30/100 selektywność pełna będzie zachowana tylko dla wyłączników różnicowoprądowych konkretnych producentów lub tylko pojedynczych egzemplarzy. Nie można również wykluczyć sytuacji, w której uzyskanie selektywności pełnej nie będzie możliwe w przypadku stosowania wyłączników różnicowoprądowych różnych producentów.

Analiza porównawcza kryterium prądowego i czasowo-prądowego

Porównując wyznaczone na podstawie kryterium prądowego oraz czasowo-prądowego prądy znamionowe różnicowe połączonych szeregowo, w różnych układach, wyłączników różnicowoprądowych warunkujących selektywność pełną lub częściową stwierdzić można, że kryterium prądowe, obejmujące graniczne prądy niezadziałania i zadziałania, jest wystarczające dla określania selektywności częściowej. Z analizy danych zawartych w Tablicy 7 wynika, że niezależnie od kształtu prądu różnicowego oraz typu wyłącznika, podana

Tablica 7. Prądy znamionowe różnicowe wyłączników różnicowoprądowych zapewniające selektywność częściową pomiędzy wyłącznikami typu AC, A i B zainstalowanymi od strony odbiornika oraz zasilania, określone z charakterystyk czasowo-prądowych wyłączników dla różnych kształtów spodziewanego prądu różnicowego I_{Δ}

Kształt prądu I_{Δ}	Typ wyłącznika od strony:		Prądy znamionowe różnicowe		
	odbiornika $I_{\Delta n1}$	zasilania $I_{\Delta n2}$	$I_{\Delta n1} / I_{\Delta n2}$	$I_{\Delta n1} / I_{\Delta n2}$	$I_{\Delta n1} / I_{\Delta n2}$
Przemienny sinusoidalny	AC	AC	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	AC	AC(S)	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	A	AC ¹⁾	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	A	AC(S) ¹⁾	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	A	A	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	A	A(S)	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	AC(S)	AC	10 / 30	30 / 100	100 / 300
Przemienny sinusoidalny, pulsujący wyprostowany jednopółkowo	A	AC(S) ¹⁾	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	A	A	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	A	A(S)	10 / 30	30 / 100	100 / 300
Pulsując wyprostowany jednopółkowo: - kąt wysterowania 90° - kąt wysterowania 135°	A	A	10 / 30	30 / 100	—
	A	A(S)	10 / 30	30 / 100	—
Wyprostowany jednopółkowo ze składową stałą do 6 mA	A	A	10 / 30	30 / 100	100 / 300
	A	A(S)	10 / 30	30 / 100	100 / 300
Prąd stały o niewielkiej zawartości składowej okresowej	—	—	—	—	—
1) - układ niewskazany 2) - brak możliwości selektywności pełnej					

selektywność jest zachowana dla prądu różnicowego odpowiadającego dwukrotnej wartości prądu znamionowego różnicowego wyłącznika zainstalowanego bliżej odbiornika (tj. $2 \times I_{\Delta n1}$). Natomiast kryterium czasowo-prądowe, wiążące prądy oraz czasy niezadziałania i wyłączenia wyłączników różnicowoprądowych, jest bazowym dla selektywności pełnej. W tym przypadku krotność prądów znamionowych szeregowo połączonych wyłączników różnicowoprądowych zależy od: typu, konfiguracji połączeń wyłączników, kształtu spodziewanego prądu różnicowego oraz prądu znamionowego różnicowego wyłącznika zainstalowanego bliżej odbiornika. Z tego też powodu, przy doborze wyłączników różnicowoprądowych od strony zasilania i odbiornika zaleca się korzystać z danych zamieszczonych w Tablicy 6.

Wpływ kształtu prądu różnicowego, typu wyłącznika, zakresu prądów niezadziałania i zadziałania na selektywność wyłączników różnicowoprądowych sprawia, że przy ich doborze nie można kierować się tylko celem ich stosowania (ochrona przeciwporażeniowa, ochrona przeciwpożarowa), ale także kształtem spodziewanego prądu różnicowego w miejscu zainstalowania oraz naturalnymi prądami upływnościowymi występującymi w zabezpieczanych obwodach w normalnych warunkach pracy. Przy wyborze konfiguracji wyłączników różnicowoprądowych, należy uwzględnić także negatywne skutki wynikające ze stosowania takiego, a nie innego, szeregowego ich połączenia. Dotyczy to przede wszystkim połączenia wyłącznika bezzwłocznego typu AC i zwłocznego typu A oraz bezzwłocznego typu A i zwłocznego typu AC.

W pierwszym układzie, w przypadku wystąpienia prądów różnicowych pulsujących, zadziała wyłącznik zwłoczny typu A, wyłączając wszystkie obwody zabezpieczone wyłącznikami bezzwłocznymi typu AC. W drugim przypadku, przy istnieniu wielu obwodów zasilanych przez wyłącznik typu AC może dojść do sytuacji, że sumaryczna wartość prądu odkształconego o kształcie innym niż przemienny sinusoidalny, będzie większa od jego prądu znamionowego. Nie spowoduje to jednak jego zadziałania, stwarzając tym samym zagrożenie porażeniowe oraz pożarowe w instalacji. Z podanego powodu, większość producentów wyłączników różnicowoprądowych nie zaleca stosowania takiego układu. W celu wyeliminowania takiej sytuacji, wymagane jest zainstalowanie przed niereagującym na prądy różnicowe pulsujące wyłącznikiem zwłocznym typu AC dodatkowego

wyłącznika typu A lub B. Rozwiązanie takie podnosi koszt ochrony przed prądami różnicowymi oraz koszt instalacji elektrycznej.

Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonej analizy warunków selektywnej, pełnej lub częściowej, współpracy wyłączników różnicowoprądowych wynika, że poprawny dobór typu i konfiguracji połączenia wyłączników nie jest prosty. Występuje szereg uwarunkowań związanych z: obecnością w instalacji elektrycznej odbiorników nieliniowych i wyższych harmonicznych, kształtem prądu różnicowego (przemienny sinusoidalny, pulsujący, odkształcony, z zawartością składową stałą), wyborem typu i konfiguracji szeregowego połączenia wyłączników różnicowoprądowych, wyborem rodzaju selektywności (pełna, częściowa) oraz niezawodnością zasilania odbiorników zabezpieczonych wyłącznikami różnicowoprądowymi. Uwarunkowania te powinny być już uwzględnione w fazie projektowania nowej lub przebudowywania eksploatowanej instalacji elektrycznej.

Podane uwarunkowania można w znacznym stopniu ograniczyć poprzez: zwiększenie liczby wyłączników różnicowoprądowych w instalacji elektrycznej; taki podział zasilanych obwodów, ażeby przez jeden wyłącznik różnicowoprądowy zasilana była mniejsza liczba odbiorników; szacowanie spodziewanych naturalnych prądów upływnościowych; ograniczenie przepływu prądów z wysokim udziałem wyższych harmonicznych wytwarzanych przez odbiorniki nieliniowe, które sumując się w przewodzie neutralnym, mogą spowodować przepływ przez wyłącznik różnicowoprądowy prądu przekraczającego jego prąd znamionowy.

Odształcenia prądu różnicowego od sinusoidy oraz obecność prądów wyższych harmonicznych sprawia, że w instalacjach elektrycznych zasilających różnego rodzaju odbiorniki dla ich ochrony przeciwporażeniowej należy stosować wyłączniki różnicowoprądowe reagujące na prąd przemienny i prąd jednokierunkowy pulsujący o składowej stałej nieprzekraczającej 6 mA (tj. typu A) lub 10 mA oraz zawierający wyższe harmoniczne (tj. typu F).

Niezawodność zasilania odbiorników sprawia, że najbardziej uniwersalnym i zalecanym układem szeregowego połączenia wyłączników różnicowoprądowych do selektywnej współpracy jest układ zawierający od strony odbiornika wyłącznik bezzwłoczny typu A oraz zwłoczny

typu A od strony zasilania.

Autorzy: dr hab. inż. Ryszard Batura, dr inż. Andrzej Książkiewicz, Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska, Pl. Marii Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, email: ryszard.batura@put.poznan.pl, andrzej.ksiazkiewicz@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Norma PN-EN 61008-1: Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) - Część 1: Postanowienia ogólne.
- [2] Czapp S.: The effect of PWM frequency on the effectiveness of protection against electric shock using residual current devices, , nr 1, 2011, ss. 24–27. Przegląd Elektrotechniczny
- [3] Czaja P., Jąderko A.: Skuteczność działania zabezpieczeń przeciwporażeniowych RCD w układach napędowych z falownikiem napięcia PWM, , nr 1, 2016, ss. 89–92. Przegląd Elektrotechniczny
- [4] Czapp S., Horiszny J.: The effect of current delay angle on tripping of residual current devices, , Zilina, 2017, ss. 90–94. International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)
- [5] Luo X., Du Y., Wang X. H., Chen M. L.: Tripping Characteristics of Residual Current Devices Under Nonsinusoidal Currents, in , vol. 47, no. 3, ss. 1515–1521, May-June 2011. IEEE Transactions on Industry Applications
- [6] Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Lubosny Z.: Low-frequency tripping characteristics of residual current devices, , Milan, 2017, ss. 1–4. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)
- [7] Rozwiązania z zakresu dystrybucji energii elektrycznej w budynkach - dane techniczne ABB, 2018.