

Zbiornicze zabezpieczenie ziemnozwarciowe dla sieci SN wykorzystujące dekompozycję falkową i kryterium Bayesa

Streszczenie. Do selektywnego wykrywania zwarć doziemnych w sieciach średnich napięć mogą być stosowane zabezpieczenia grupowe, które w przeciwieństwie do zabezpieczeń indywidualnych kontrolują prądy doziemne we wszystkich polach odplywowych. W pracy przedstawiono model zabezpieczenia wykorzystującego detale z dekompozycji falkowej prądów doziemnych i kryterium Bayesa. Określono istotne parametry modelu. Oceniono skuteczność działania zabezpieczenia w przypadku niestacjonarnych zwarć wysokorezystancyjnych w sieci z naturalną asymetrią i zniekształceniami harmonicznymi.

Abstract. For selective detection of earth faults in medium voltage networks, the general protection can be used, which unlike individual protections controls earth currents in all lines supplied from the substation. The paper presents a protection model using details of earth currents from wavelet decomposition and the Bayesian criterion. Significant parameters of the model were determined. The effectiveness of the protection in the case of non-stationary high-resistance short-circuits in the network with natural asymmetry and harmonic distortion was also assessed. (General earth fault protection for MV networks using wavelet decomposition and Bayesian criterion).

Słowa kluczowe: zbiornicze zabezpieczenie ziemnozwarciowe, dekompozycja falkowa, suma detali, kryterium Bayesa.

Keywords: general earth-fault protection, wavelet decomposition, sum of details, Bayesian criterion.

Wstęp

Zwarca doziemne w sieciach średnich napięć mogą być wykrywane za pomocą zabezpieczeń indywidualnych stosowanych na każdym odpływie lub zbiorniczych, kontrolujących prądy doziemne wszystkich odpływów w rozdzielni [1]. Kontrola wszystkich prądów doziemnych daje dodatkowe możliwości detekcji zwarć w porównaniu do zabezpieczeń indywidualnych. W praktyce najczęściej stosowane są zabezpieczenia zbiornicze, w których porównuje się podstawowe lub wyższe harmoniczne prądów wszystkich odpływów [2–4]. Porównanie wartości podstawowych harmonicznymi prądów jest realizowane w zabezpieczeniach dla sieci z izolowanym punktem neutralnym. Przy tym zabezpieczenie wykrywa zwarcie w odpływie, w którym prąd doziemny jest największy. W sieciach kompensowanych stosowanie takiego kryterium jest niemożliwe, gdyż na skutek kompensacji podstawowa harmoniczna prądu doziemnego jest niewielka i często mniejsza od prądów własnych linii zdrowych, zwłaszcza długich linii kablowych. W takich sieciach jest natomiast możliwa identyfikacja linii doziemionej na podstawie porównania wartości prądów wyższych harmonicznymi, które nie podlegają kompensacji. Nowoczesne zbiornicze mikroprocesorowe zabezpieczenia umożliwiają realizację równoległego (jednoczesnego) pomiaru oraz porównania prądów doziemnych, dzięki czemu mogą działać zarówno w stacjach ustalonych jak i przejściowych.

Zabezpieczenia porównawczo-prądowe mają szereg zalet. W odróżnieniu od indywidualnych zabezpieczeń nadprądowych są proste w obsłudze, gdyż nie wymagają odstrojenia od skokowych zmian prądów pojemnościowych własnych każdego odpływu. Są przez to znacznie czulsze i bardziej selektywne. Jednak, ze względu na ograniczoną dokładność pomiaru prądów doziemnych, ich czułość jest niewystarczająca. Porównanie prądów jest realizowane dopiero, gdy przekroczą one wartość maksymalnego prądu asymetrii i po spełnieniu kryterium napięciowego dla składowej zerowej, które dodatkowo ogranicza czułość zabezpieczenia. W praktyce zabezpieczenia wykorzystujące kryterium porównania prądów wykrywają zwarcia doziemne z rezystancją przejścia R_p do 2–4 kΩ.

W ostatnim czasie zaproponowano wiele rozwiązań zabezpieczeń zbiorniczych w celu poprawy wykrywania zwarć doziemnych wysokorezystancyjnych w kompensowanych sieciach średnich napięć. W jednym

z interesujących rozwiązań zaproponowano zastosowanie dekompozycji falkowej do wydzielenia składowych wysokoczęstotliwościowych (detali) prądów doziemnych linii, obliczanie znormalizowanych sum detali oraz kryterium Bayesa w odniesieniu do tych sum w celu detekcji zwarcia i selektywnego określenia uszkodzonej linii [5, 6]. Według autorów taki sposób umożliwi wykrywanie zwarć doziemnych o bardzo dużej rezystancji dochodzącej do 200 kΩ. Autorzy nie podają jednak, w jaki sposób zrealizować zabezpieczenie, jak dobrać jego parametry ani jak wpływają parametry techniczne sieci na czułość takiego zabezpieczenia. W celu określenia realnych możliwości takiego zabezpieczenia zbudowano jego model w Matlabie/Simulinku i poddano go badaniom symulacyjnym.

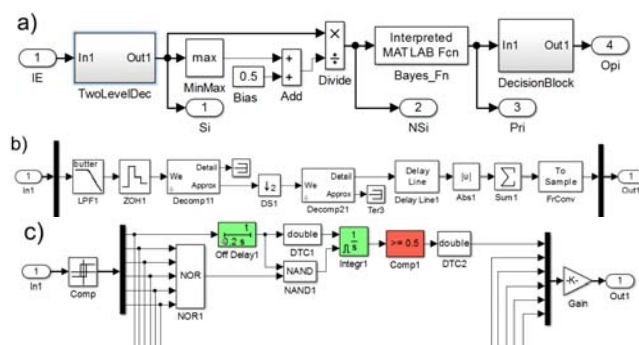
Model zabezpieczenia

Model zabezpieczenia zbiorniczego wykorzystujący kryterium Bayesa, opracowany na potrzeby badań symulacyjnych, przedstawiono na rysunku 1. Jest to model o strukturze hierarchicznej, składający się z zamaskowanych wielokanałowych bloków funkcyjnych. W przedstawionej wersji może on nadzorować sześć odpływów liniowych. Jego zasadniczymi blokami są *TwoLevelDec* realizujący dekompozycję falkową i sumowanie detali prądów, blok funkcyjny *Bayes_Fn* obliczający prawdopodobieństwo warunkowe oraz blok decyzyjny *DecisionBlock*.

Blok *TwoLevelDec* realizuje w każdym kanale (rys. 1b) wstępną analogową filtrację dolnoprzepustową (*LPF1*) sygnału prądu doziemnego I_E , jego dwustopniową dekompozycję falkową (elementy *Decomp11*, *Decomp12* i element *downsamplingu DS1*), gromadzi ostatnie próbki detali prądu w rejestrze szeregowo-równoległym *Delay Line1* i ostatecznie oblicza sumę bezwzględną próbek detali prądu w oknie pomiarowym za pomocą elementów *Abs1* i *Sum1*.

Podobnie jak w rozwiązaniach klasycznych podstawowymi wielkościami do detekcji zwarcia są wyższe harmoniczne prądów doziemnych I_E wszystkich odpływów sekcji rozdzielni SN. Jednak do wydzielenia tych harmonicznymi proponuje się dwustopniową dekompozycję falkową, która jest realizowana w bloku *TwoLevelDec*. Z badań własnych [7, 8] wynika, że w przypadku zwarć wysokorezystancyjnych w prądach doziemnych występują

składowe o stosunkowo niewielkich częstotliwościach rzędu 125÷250 Hz. Składowe o większych częstotliwościach są tłumione przez rezystancję zwarcia. W zabezpieczeniach najczęściej stosuje się częstotliwość próbkowania $f_p = 1000$ Hz. Przy tej częstotliwości f_p do wykrywania detali ze wskazanego wyżej zakresu częstotliwości trzeba zastosować dwustopniową dekompozycję falkową. Z uwagi na konieczność skutecznego tłumienia składowych o częstotliwości sieciowej $f_0 = 50$ Hz należy zastosować filtry falkowe o dużej liczbie współczynników. Dobre wyniki uzyskuje się po zastosowaniu do dekompozycji falkowej filtrów Daubechies typu db20 lub wyższych rzędów. Przy tym tłumienie sygnału o częstotliwości f_0 wynosi $A_{f_0} = 103,5$ dB.



Rys. 1. Modele: a) zbiorczego zabezpieczenia ziemnozwarciowego, b) jednego kanału dekompozycji falkowej i sumowania detali, c) jednego kanału funkcji logicznych i decyzyjnych

Dla wszystkich odplywów sporządza się sumy bezwzględne detali w oknie pomiarowym o długości jednego okresu podstawowej harmonicznej:

$$(1) \quad S_i = \sum_{k=0}^{N-1} |dI2_{k,i}|$$

gdzie: N – liczba próbek w oknie (długość okna), $i = 1, \dots, 6$ – numer linii (kanału przetwarzania informacji). Zastosowano okno o długości jednego okresu podstawowej harmonicznej, któremu po downsamplingu odpowiada liczba próbek $N = (f_p/2)/50 = 10$.

Następnie oblicza się sumy znormalizowane, odniesione do maksymalnej wartości sumy detali:

$$(2) \quad NS_i = S_i / (\max(S_i) + Bias)$$

gdzie $Bias$ oznacza wstępne przesunięcie w celu odstrojenia się od zakłóceń w sieci i prądów asymetrii.

Dla tak przygotowanych wstępnie sygnałów oblicza się (blok funkcyjny *Bayes_Fn*) prawdopodobieństwo warunkowe Bayesa zajścia zwarcia w każdym odplywie:

$$(3) \quad Pr(i | NS_i) = \frac{f_1(NS_i)}{f_0(NS_i) \sum_{i=1}^K f_1(NS_i) / f_0(NS_i)}$$

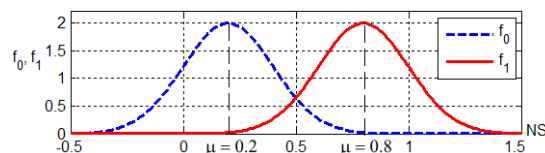
W równaniu (3) funkcje $f_1(NS_i)$ i $f_0(NS_i)$ oznaczają odpowiednio gęstość prawdopodobieństwa zajścia zwarcia oraz braku zwarcia w odplywie i . Oblicza się je z zależności:

$$(4) \quad f_1(NS_i) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(NS_i - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}$$

$$(5) \quad f_0(NS_i) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(NS_i - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}}$$

gdzie: σ_0, σ_1 – odchylenia standardowe, μ_0, μ_1 – wartości oczekiwane.

W wyniku badań własnych ustalono, że optymalne wartości odchylenia standardowego powinny wynosić $\sigma_0 = \sigma_1 = 0,2$, a wartości oczekiwane odpowiednio $\mu_0 = 0,2$ i $\mu_1 = 0,8$. Przebiegi tych funkcji z wymienionymi parametrami przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa

Sygnały prawdopodobieństwa zwarcia są następnie przetwarzane w bloku *DecisionBlok* (rys. 1c). W bloku tym dokonuje się przede wszystkim porównania (element *Comp*) sygnałów $Pr(i | NS_i)$ z wielkością progową Pr_{ref} :

$$(6) \quad Co_i = (Pr(i | NS_i) > Pr_{ref})$$

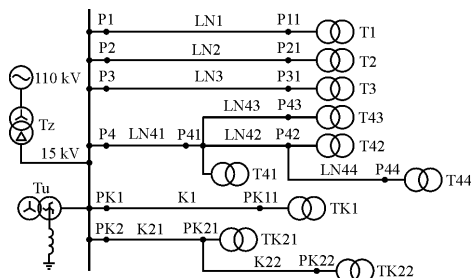
W przypadku wyżej zdefiniowanych parametrów funkcji prawdopodobieństwa należy przyjąć $Pr_{ref} \geq 0,5$.

Stan wysoki z wyjścia komparatora oznacza duże prawdopodobieństwo występowania zwarcia. Dla zapewnienia wykrywania zwarć przerywanych zastosowano inercję logiczną polegającą na czasowym wydłużeniu sygnałów z komparatorów o czas T_{OD} . Funkcję tę realizuje blok *Off Delay1* (rys. 1c). Żeby wykrywać zwarcia przerywane występujące sporadycznie należy przyjąć $T_{OD} \geq 0,2$ s. Dla wykluczenia błędnych działań zabezpieczenia pod wpływem zakłóceń łączeniowych zastosowano zwłokę czasową T_{del} (elementy *Integr1* i *Comp1* na rys. 1c). Zwłoka ta powinna być co najmniej 2,5 razy większa od T_{OD} . W praktyce oznacza to, że $T_{del} \geq 0,5$ s. Dla wykluczenia błędnych działań zabezpieczenia w przypadku zadziałania kilku komparatorów (zwarcia na liniach kablowych) zastosowano funkcje logiczne resetujące człony zwłoczne w każdym kanale, jeżeli występuje pobudzenie w dowolnym innym kanale. Logikę tą realizują bloki *NOR1* i *NAND1*.

Badania zabezpieczenia

Przedstawiony model zabezpieczenia poddano intensywnym badaniom w celu wyjaśnienia jego skuteczności działania. Do badań wykorzystano model kompensowanej sieci 15 kV zbudowanej z czterech linii napowietrznych i dwóch linii kablowych o łącznym prądzie pojemnościowym $I_{CS} = 46,8$ A W tabeli 1 zamieszczono długości poszczególnych linii l i udziały α w prądzie pojemnościowym tych linii. W modelu sieci uwzględniono naturalną asymetrię pojemności linii napowietrznych, która wynosi 2,5%. Uwzględniono także zniekształcenie napięć zasilania wyższymi harmonicznymi, głównie 3. harmoniczną, w celu wyjaśnienia jej wpływu na działanie zabezpieczenia. Przy tym założono maksymalną dopuszczalną zawartość 3. harmonicznej równą 5% [9]. Nieliniową rezystancję zwarcia R_F zamodelowano w postaci szeregowego obwodu złożonego z rezystancji łuku R_{arc} [10-13] i rezystancji przejścia R_p . Zastosowano model łuku [10, 11] o parametrach: napięcie zapłonu $U_z = 10$ kV, napięcie w kolumnie łukowej w stanie przewodzenia $U_k = 1000$ V,

rezystancja w stanie przewodzenia $R_1 = 0,1 \Omega$, stała czasowa $\tau = 0,1$ ms. Zabezpieczenie badano zarówno w przypadku zwarć niskorezystancyjnych, jak i wysokorezystancyjnych umiejscowionych w różnych punktach sieci, oznaczonych na rysunku 3. W tym celu zmieniano wartość rezystancji przejścia R_p .

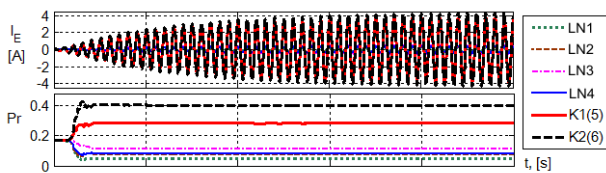


Rys. 3 Schemat ogólny zamodelowanej sieci SN

Tab. 1. Długości linii l i współczynniki udziału w pojemności sieci α

Linia	LN1	LN2	LN3	LN4	K1	K2
l , [km]	30	50	70	53	15	17
α	0,023	0,038	0,054	0,041	0,396	0,449

Wstępnie określono bardzo ważny parametr $Bias$. Jego wartość oszacowano z warunku niedziałania zabezpieczenia w najgorszych warunkach pracy sieci bez zwarcia: naturalna asymetria parametrów poprzecznych, maksymalna zawartość trzeciej harmonicznej $k_3 = 5\%$ w napięciach zasilających, dokładna kompensacja $s = 0$. Przyjęto wartość $Bias = 0,5$. To jest wielokrotnie więcej niż zaproponowano w [5]. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi prądów doziemnych asymetrii I_E i prawdopodobieństwa warunkowego Pr w zabezpieczeniu w opisywanym przypadku. Największą wartość przyjmuje sygnał Pr_6 dla linii kablowej K2(6) i jest on o 20% mniejszy od wartości progowej $Pr_{ref} = 0,5$.

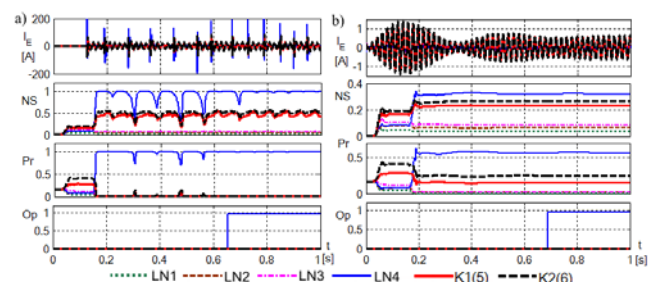


Rys. 4. Prądy doziemne asymetrii linii I_E i sygnały prawdopodobieństwa Pr w sieci z naturalną asymetrią w przypadku: $k_3 = 5\%$, $s = 0$, $Bias = 0,5$

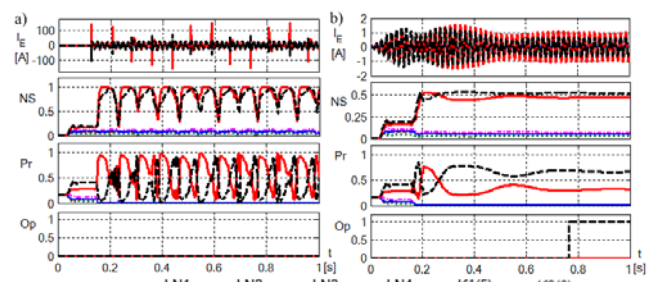
Szczegółowe badania symulacyjne wykazały, że zabezpieczenie wykrywa selektywnie zwarcia, zarówno niskorezystancyjne jak wysokorezystancyjne, w liniach napowietrznych LN1÷LN4, niezależnie od ich położenia na linii (odległości od stacji). Świadczy o tym przykład detekcji zwarcia nisko- i wysokorezystancyjnego zlokalizowanego w punkcie P41, przedstawiony na rysunku 5. W obu przypadkach tylko jeden sygnał $Pr_4 > Pr_{ref} = 0,5$ i zostaje wykryte zwarcie na linii LN4 (sygnał logiczny Op_4 przyjmuje wartość 1 w chwili $t = 0,69$ s). Przedstawione na rysunku 5 przykłady detekcji zwarcia uzyskano w sieci przekompensowanej $s = 0,1$ i z dużym udziałem trzeciej harmonicznej w napięciach zasilania $k_3 = 5\%$.

Prawidłowa detekcja zwarcia na liniach kablowych K1 i K2 jest możliwa tylko w sieciach niekompensowanych ($s = -1$). W sieci kompensowanej z dużą zawartością trzeciej harmonicznej ($k_3 = 5\%$) zabezpieczenie nie wykrywa zwarcia niskorezystancyjnego w liniach kablowych, a w przypadku zwarcia wysokorezystancyjnego wykrywa zwarcie błędnie. Takie przypadki przedstawiono na

rysunku 6. Podczas zwarcia niskorezystancyjnego w punkcie PK11 (rys. 6a) sygnały Pr_5 i Pr_6 odpowiadające liniom K1 i K2 przekraczają na przemian wartość progową Pr_{ref} i dochodzi do blokowania działania zabezpieczenia przez układ logiczny (rys. 1c). Podczas zwarcia wysokorezystancyjnego w punkcie PK11 (rys. 6b) suma unormowana detali linii K2 jest większa od sumy detali linii K1 ($NS_6 > NS_5$) i w związku z tym dochodzi do błędnej detekcji zwarcia w linii K2 zamiast w K1 ($Pr_6 > Pr_{ref}$ i $Op_6 = 1$). Zabezpieczenie nie wykrywa również zwarcia niskorezystancyjnych w liniach kablowych sieci kompensowanej w przypadku, gdy napięcia zasilania nie zawierają harmonicznych z zakresu 125÷250 Hz, tj. głównie trzeciej harmonicznej ($k_3 = 0$).



Rys. 5. Przebiegi sygnałów w zabezpieczeniu podczas zwarcia w punkcie P41 linii LN4: a) $R_p = 1 \Omega$, b) $R_p = 80 \text{ k}\Omega$



Rys. 6. Przebiegi sygnałów w zabezpieczeniu podczas zwarcia w punkcie PK11 linii K1: a) $R_p = 10 \Omega$, b) $R_p = 20 \text{ k}\Omega$

W tabeli 2 zamieszczono maksymalne wartości rezystancji przejścia R_p , przy których działa zabezpieczenie podczas zwarcia w poszczególnych punktach sieci. Określono je symulacyjnie dla sieci z izolowanym punktem neutralnym ($s = -1$), sieci niedokompensowanej ($s = -0,1$) oraz przekompensowanej ($s = 0,1$) z uwzględnieniem dużego udziału trzeciej harmonicznej $k_3 = 5\%$ w napięciach zasilania. Określono też maksymalne wartości R_p w sieci przekompensowanej nie zawierającej harmonicznych w napięciach zasilających ($k_3 = 0\%$). Przedstawione wyniki świadczą o bardzo wysokiej skuteczności wykrywania zwarcia wysokorezystancyjnych w liniach napowietrznych. Na skuteczność wykrywania zwarcia stosunkowo niewielki wpływ ma rozstrojenie kompensacji i istotny wpływ harmoniczne w napięciach zasilających. Zwarcia o największej rezystancji przejścia R_p są wykrywane w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Kompensacja powoduje nieznaczne zmniejszenie ilości detali z zakresu 125÷250 Hz i w efekcie są wykrywane zwarcia o mniejszej wartości R_p . Szczegółową zależność R_p od s dla punktu P41 przedstawiono w tabeli 3. W sieci kompensowanej bez udziału wyższych harmonicznych w napięciach zasilających maksymalna rezystancja przejścia jest na ogół ponad dwukrotnie większa niż w sieci z $k_3 = 5\%$. Detekcja zwarcia w liniach kablowych z dużym udziałem pojemności linii ($\alpha > 0,4$) jest niemożliwa. Dlatego działanie zabezpieczenia w liniach kablowych powinno być blokowane.

Opisane zabezpieczenie jest wrażliwe na operacje łączeniowe w sieci. Na rysunku 7 przedstawiono przykład reakcji zabezpieczenia na sekwencję wyłączeń-załączeń fragmentu linii LN43 razem z transformatorem T43. Po wyłączeniu działa komparator Co_4 w kanale 4 bo $Pr_4 > Pr_{ref}$, a po załączeniu – komparator Co_6 w kanale 6 bo $Pr_6 > Pr_{ref}$. Zabezpieczenie jednak nie działa, gdyż na taką okoliczność zastosowano blokadę logiczną i zwłokę czasową.

Tab. 2. Maksymalna rezystancja zwarcia działania zabezpieczenia

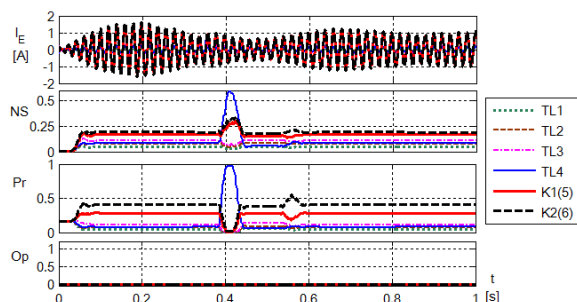
Point	3. harmon. k_3 , [%]	Rozstrojenie komp. s			
		-1,0	-0,1	0,1	0,1
	Odległość l , [km]	R_T , [k Ω]			
P1 (LN1)	0	97	89	87	227
P12 (LN1)	30	121	106	94	252
P2 (LN2)	0	113	102	88	219
P21 (LN2)	50	142	123	107	248
P3 (LN3)	0	131	114	92	213
P31 (LN3)	70	140	111	115	218
P4 (LN4)	0	115	103	88	218
P41 (LN4)	10	128	114	93	234
P42 (LN4)	25	133	118	97	239
P43 (LN4)	30	135	119	99	240
P44 (LN4)	33	135	119	99	240
Pk1 (K1)	0	72	*	*	82**
Pk12 (K1)	15	58	*	*	90**
Pk2 (K2)	0	74	*	*	80**
Pk21 (K2)	10	57	*	*	84**
Pk22 (K2)	17	49	*	*	84**

* – brak działania w przypadku $R_p < 1,7$ k Ω z powodu pobudzenia w liniach kablowych K1 i K2 oraz nieselektywne działanie przy dużych rezystancjach przejścia $R_p > 10$ k Ω .

** – brak działania w przypadku $R_p < 1,7$ k Ω z powodu pobudzenia w liniach kablowych K1 i K2 i blokowania.

Tab. 3. Zależność maksymalnej rezystancji przejścia od rozstrojenia kompensacji dla zwarcia w punkcie P41

s	-1	-0,7	-0,5	-0,3	-0,2	-0,15	-0,1
R_p , [k Ω]	128	121	117	114	113	114	114
s	-0,05	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
R_p , [k Ω]	119	92	88	93	94	95	92



Rys. 7. Odpowiedź zabezpieczenia na operacje wyłączenia ($t_w = 0,35$ s) oraz załączenia ($t_z = 0,5$ s) odcinka linii LN43

Wnioski

Zwarcia doziemne w sieciach średnich napięć mogą być wykrywane za pomocą zabezpieczeń zbiorczych, kontrolujących prądy doziemne wszystkich odplywów w rozdzielni. W celu poprawy skuteczności działania takich zabezpieczeń w kompensowanych sieciach SN zaproponowano kryterium Bayesa w odniesieniu do znormalizowanych sum detali (z dekompozycji falkowej) prądów doziemnych linii [5, 6]. Według autorów taki sposób umożliwia wykrywanie zwarć doziemnych o bardzo dużej rezystancji dochodzącej do 200 k Ω .

W celu określenia realnych możliwości takiego zabezpieczenia zbudowano jego model w Matlabie/Simulinku i poddano go badaniom symulacyjnym z wykorzystaniem modelu kompensowanej sieci 15 kV.

Szczegółowe badania wykazały, że zabezpieczenie wykrywa selektywnie zwarcia w sieci ze zniekształceniami harmonicznymi, zarówno niskorezystancyjne jak wysokorezystancyjne, wyłącznie w liniach napowietrznych. Wykrywane są zwarcia o rezystancji przejścia od 87 do 140 k Ω , zależnie od położenia zwarcia i rozstrojenia kompensacji. W sieci bez zniekształceń wykrywane są zwarcia o rezystancji około dwa razy większej (do 253 k Ω) niż w sieci ze zniekształceniami.

Detekcja zwarć w liniach kablowych z dużym udziałem pojemności linii ($\alpha > 0,4$) jest możliwa wyłącznie w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Zwarcia na liniach kablowych w sieci kompensowanej nie są wykrywane ($R_T < 1,7$ k Ω) lub są wykrywane błędnie ($R_T > 10$ k Ω). W związku z tym działanie zabezpieczenia w liniach kablowych o dużym udziale pojemności powinno być blokowane. Wykrywanie zwarć wysokorezystancyjnych na wszystkich liniach sieci kompensowanej jest możliwe tylko w przypadku względnie wyrównanych pojemności linii.

Do wykrywania zwarć łukowych przerywanych należy stosować w zabezpieczeniu inercję logiczną z czasem opóźnienia $T_{OD} \geq 0,2$ s. Zabezpieczenie powinno działać z opóźnieniem nie mniejszym niż $T_{del} \geq 2,5T_{OD} = 0,5$ s w celu zapobiegania błędnym zadziałaniom pod wpływem zakłóceń łączeniowych.

Autor: dr hab. inż. Lubomir Marciniak, prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: lubmar@el.pcz.czest.pl

LITERATURA

- [1] Hänninen S., Single phase earth faults in high impedance grounded networks. Characteristics, indication and location, *Technical Research Centre of Finland*, Espoo 2001
- [2] Rodoń F., Głowacz R., Talaga M., Mikroprocesorowe zabezpieczenia ziemnozwarciowe typu Zlo, *Prace Naukowe Inst. Energoelektryki Pol. Wroc.*, 86 (1997), 75-86
- [3] Bukhtoyarov V.F., Adaptive current protection from ground short-circuits in electric installations 6–10 kV and the experience of its application, *South Ural State University Bulletin*, 16 (2012), 70-75
- [4] MKZZP-6-35-K. Microcontroller device for protecting of the busbar section feeders from single-phase-to-earth short circuits in 6-35 kV compensated networks. User manual, Novosibirsk, (2009) (in Russian)
- [5] Elkalashy N.I., Lehtonen M., Advancing DWT-Bayesian technique for earth fault protection in MV networks, *OJEEE*, 1/2 (2009), 89-93
- [6] Elkalashy N.I., Elhaffar A.M., Kawady T.A., Tarhuni N.G., Lehtonen M., Bayesian selectivity techni-que for earth fault protection in medium voltage networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25/4 (2010), 2234-2245
- [7] Marciniak L., Impulsowoprądowe i falkowe kryteria identyfikacji zwarć doziemnych rezystancyjnych oraz łukowych w sieciach średnich napięć, *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, Monografie Nr 273, (2013)
- [8] Marciniak L., Wavelet criteria for identification of arc intermittent faults in medium voltage networks, *Proceedings of the International Symposium "Modern Electric Power Systems MEPS'10"*, paper 09.1, Wrocław, 20-22 September, (2010)
- [9] PN-EN 50160:2010P. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych
- [10] Marciniak L., Model of the arc earth-fault for medium voltage networks, *Central European Journal of Engineering*, 1/2 (2011), 168–173
- [11] Marciniak L., Implementacje modeli łuku ziemnozwarciowego w programach PSCAD i Matlab/Simulink, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88/9a (2012), 126-129
- [12] Sawicki A., Haltof M., Nieliniowe modele matematyczne łuku elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92/11 (2016), 257-261
- [13] Sawicki A., Racjonalizacja modeli hybrydowych łuku elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93/11 (2017), 198-203