

## Zbiornicze kierunkowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe wykorzystujące kryterium Bayesa dla mocy biernych trzecich harmonicznych

**Streszczenie.** W pracy zaproponowano zbiornicze zabezpieczenie ziemnozwarciowe do wykrywania zwarć wysokorezystancyjnych i łukowych w sieciach średnich napięć działające według kryterium prawdopodobieństwa warunkowego Bayesa dla mocy biernych trzecich harmonicznych składowych zerowych napięcia i prądów. Przedstawiono model zabezpieczenia, określono jego parametry nastawcze oraz oceniono skuteczność działania w warunkach nieliniowych zwarć wysokorezystancyjnych w sieci z naturalną asymetrią i zniekształceniami harmonicznymi.

**Abstract.** The paper proposes general earth fault protection for detecting high resistance and arcing faults in medium voltage networks using the Bayes' probability criterion for zero sequence reactive powers of the third harmonics voltage and currents. The model of protection has been presented, its setting parameters have been determined and its very high effectiveness in terms of nonlinear high resistance short circuits in the network with natural asymmetry and harmonic distortions has been demonstrated. (General directional earth fault protection using Bayesian criterion for reactive powers of the third harmonics).

**Słowa kluczowe:** sieci SN, kierunkowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe, trzecie harmoniczne, kryterium Bayesa.

**Keywords:** MV networks, directional earth fault protection, third harmonics, Bayesian criterion.

### Wstęp

Zwarcia doziemne w sieciach średnich napięć mogą być wykrywane za pomocą zabezpieczeń indywidualnych stosowanych na każdym odpływie lub zbiorczych, kontrolujących prądy lub moce dla składowych zerowych wszystkich odpływów w rozdzielni [1-4]. Kontrola wszystkich prądów doziemnych daje dodatkowe możliwości detekcji zwarć w porównaniu do zabezpieczeń indywidualnych. W praktyce najczęściej stosowane są zabezpieczenia zbiorcze, w których porównuje się podstawowe lub wyższe harmoniczne prądów wszystkich odpływów [5-6]. Porównanie wartości podstawowych harmonicznych 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 skutecznych wyższych harmonicznych, które nie podlegają kompensacji.

Nowoczesne zbiornicze mikroprocesorowe zabezpieczenia umożliwiają realizację równoległego (jednoczesnego) pomiaru wartości skutecznych oraz porównania prądów doziemnych, dzięki czemu mogą działać zarówno w stanach ustalonych jak i przejściowych. Jednak porównanie wyłącznie wartości prądów doziemnych często nie wystarcza do wykrywania zwarć wysokorezystancyjnych ze względu na ograniczoną dokładność pomiaru prądu. Porównanie prądów jest realizowane dopiero, gdy wzrosną one powyżej maksymalnego prądu asymetrii. Ponadto musi być spełnione kryterium napięciowe dla składowej zerowej, które dodatkowo ogranicza czułość zabezpieczenia. W praktyce zabezpieczenia wykorzystujące kryterium porównania prądów wykrywają zwarcia doziemne z rezystancją zwarć  $R_F$  nieprzekraczającą 2-4 k $\Omega$ , co uważane jest za wynik niewystarczający.

W ostatnim czasie pojawiło się kilka koncepcji zabezpieczeń zbiorczych, ukierunkowanych na poprawę skuteczności wykrywania zwarć doziemnych

wysokorezystancyjnych w kompensowanych sieciach średnich napięć. W jednym z ciekawszych pomysłów [7-9] zaproponowano zastosowanie dekompozycji falkowej do wydzielenia składowych wysokoczęstotliwościowych (detali) prądów doziemnych linii, obliczanie znormalizowanych sum detali oraz kryterium Bayesa [10] w odniesieniu do tych sum. Według autorów kryterium prawdopodobieństwa warunkowego pozwala znacznie zwiększyć czułość rozpoznawania zwarć, co umożliwia wykrywanie zwarć doziemnych o bardzo dużej rezystancji dochodzącej nawet do 200 k $\Omega$ . Badania własne tego typu zabezpieczenia przedstawione w [11] wykazały, że może ono działać nieprawidłowo w sieciach mieszanych, w których występuje duża różnica pojemności poszczególnych linii. W określonych warunkach zwarciovych suma detali prądu linii zdrowej może być większa od sumy detali linii doziemionej i w efekcie może dojść do błędnego działania zabezpieczenia.

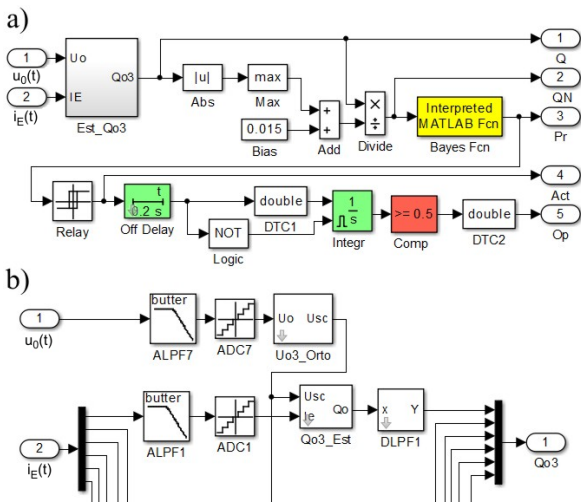
Zdecydowanie większą czułość wykrywania zwarć doziemnych można uzyskać stosując zbiornicze zabezpieczenie kierunkowe, które rozpoznaje zwarcie na podstawie prawdopodobieństwa warunkowego Bayesa dla mocy biernych wyższych harmonicznych składowych symetrycznych zerowych. Do oceny prawdopodobieństwa zwarć najlepiej nadają się znormalizowane moce bierne dla 3. harmonicznych składowych symetrycznych zerowych prądów i napięcia. Jak pokazano w [12-14] trzecie harmoniczne są generowane w znacznej ilości przez nieliniową rezystancję zwarć, w tym przez łuk zwarciovych, i występują zarówno w stanach ustalonych jak i przejściowych. W sieci symetrycznej moce bierne 3 harmonicznych są dodatnie na linii doziemionej i ujemne na liniach zdrowych, co stanowi wstępne kryterium rozpoznania zwarć. W ogólnym przypadku jednak należy uwzględnić moc asymetrii, która może być dodatnia a jej wartość wpływa bezpośrednio na nastawy i czułość tradycyjnych zabezpieczeń kierunkowych. Dla zapewnienia czułego nastawienia takich zabezpieczeń niezbędna jest znajomość szczegółowych parametrów sieci i duże doświadczenie personelu obsługującego. W zabezpieczeniu zbiorczym liczba nastaw jest zredukowana do jednej wielkości dla całej rozdzielni, co znacznie upraszcza obsługę zabezpieczenia. Przy tym zastosowanie kryterium prawdopodobieństwa warunkowego Bayesa

pozwała zwiększyć czułość zabezpieczenia w stosunku do zabezpieczeń indywidualnych.

W celu określenia realnych możliwości takiego zabezpieczenia zbudowano jego model w Matlabie/Simulinku [15] i poddano go badaniom symulacyjnym.

### Model zabezpieczenia

Model zabezpieczenia zbiorczego 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 odplywów liniowych. Jego zasadniczymi blokami są *Estim\_Qo3*, w którym realizowane jest wstępne cyfrowe przetwarzanie sygnałów i obliczane są moce biernie trzech harmonicznych, blok funkcyjny *Bayes Fcn* oraz zespół bloków realizujących funkcje decyzyjne: komparatory *Relay*, blok inercji logicznej *Off Delay*, układ opóźnienia czasowego (integrator *Integr*, comparator *Comp* i element logiczny *NOT*). Blok *Estim\_Qo3* (rys. 1b) realizuje w pierwszej kolejności wstępną analogową filtrację dolnoprzepustową (*ALPF<sub>i</sub>*,  $i = 1, \dots, 7$ ) składowej zerowej napięcia  $u_0(t)$  i sygnałów prądu doziemnego  $i_{Ei}(t)$ , a następnie ich digitalizację (próbkowanie i kwantowanie) w przetwornikach *ADC*. W bloku *Uo3\_Orto* obliczane są składowe ortogonalne trzeciej harmonicznej napięcia zerowego. W tym celu zastosowano algorytm Fouriera korelacji cyfrowej sygnału z funkcjami sinus i cosinus w oknie jednookresowym podstawowej harmonicznej. W blokach *Qo3\_Est* obliczane są składowe ortogonalne trzeciej harmonicznej prądów doziemnych  $I_{E3}$ , a z uwzględnieniem składowych ortogonalnych napięcia – moce biernie  $Q_{03}$ . Moce te są dodatkowo poddane filtracji dolnoprzepustowej w filtrach *DLPF<sub>i</sub>*.



Rys. 1. Model zbiorczego kierunkowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego (a) oraz bloku sześciokanałowego estymatora mocy bierniej (b)

W modelu zabezpieczenia przyjęto powszechnie stosowaną częstotliwość próbkowania  $f_p = 1000$  Hz. Do ograniczenia charakterystyki widmowej do częstotliwości Nyquista zastosowano filtry 4 rzędu Butterwortha o częstotliwości odcięcia 350 Hz.

Składowe ortogonalne 3. harmonicznej napięcia obliczano z zastosowaniem oszczędnych algorytmów rekursywnych [16]:

$$(1) \quad U_{03c}(n) = U_{03c}(n-1) + (\sqrt{2}/N) [u_0(n) \cos(6n\pi/N) - u_0(n-N) \cos(6\pi(n-N)/N)]$$

$$(2) \quad U_{03s}(n) = U_{03s}(n-1) + (\sqrt{2}/N) [u_0(n) \sin(6n\pi/N) - u_0(n-N) \sin(6\pi(n-N)/N)]$$

gdzie:  $U_{03c}$ ,  $U_{03s}$  – składowe ortogonalne trzeciej harmonicznej napięcia zerowego,  $u_0$  – sygnał wejściowy napięcia,  $N = f_p/f_1 = 20$  – liczba próbek w oknie jednookresowym podstawowej harmonicznej,  $n$  – numer bieżącej próbki.

Z podobnych zależności obliczane są składowe ortogonalne 3 harmonicznych prądów doziemnych. Moce biernie obliczane są na podstawie powszechnie znanego algorytmu:

$$(3) \quad Q_{03i} = U_{03c} I_{E3si} - U_{03s} I_{E3ci}$$

gdzie:  $I_{E3ci}$ ,  $I_{E3si}$  – składowe ortogonalne trzeciej harmonicznej prądów doziemnych,  $i = 1, \dots, 6$  – numer odplywu.

Moce biernie poddano filtracji dolnoprzepustowej w celu ograniczenia oscylacji przy zwarcich przerywanych. Zastosowano filtry dolnoprzepustowe z oknem Hanninga o liczbie współczynników  $N_{LP} = 2N = 40$ .

Kolejną ważną operacją matematyczną jest obliczenie znormalizowanych wielkości mocy biernych  $QN_i$  odniesionych do maksymalnej wartości bezwzględnej mocy bierniej odplywów:

$$(4) \quad QN_i = Q_{03i} / (|\max(Q_{03i})| + Bias)$$

gdzie *Bias* oznacza wstępne przesunięcie w celu odstrojenia się od zakłóceń w sieci i mocy asymetrii.

Normalizacja jest bardzo ważną operacją, gdyż pozwala sprowadzić sygnały mocy do wąskiego zakresu wartości  $\{-1; 1\}$ , niezależnie od rodzaju zwarcia i wartości rezystancji przejścia.

Istotnym parametrem, decydującym o odporności zabezpieczenia na zakłócenia oraz o jego czułości jest *Bias*. Z doświadczeń symulacyjnych wynika, że jego wartość powinna być nie mniejsza niż największa dodatnia moc asymetrii linii dla 3. harmonicznych składowych zerowych sygnałów w stanie normalnej pracy sieci. W przypadku trudności z oszacowaniem mocy asymetrii parametr *Bias* może być dobierany eksperymentalnie.

Dla tak przygotowanych wstępnie sygnałów oblicza się prawdopodobieństwo warunkowe Bayesa (w bloku funkcyjnym *Bayes Fcn*) zajścia zwarcia w każdym odplywie:

$$(5) \quad Pr(i | QN_i) = \frac{f_1(QN_i)}{f_0(QN_i) \sum_{i=1}^K f_1(QN_i) / f_0(QN_i)}$$

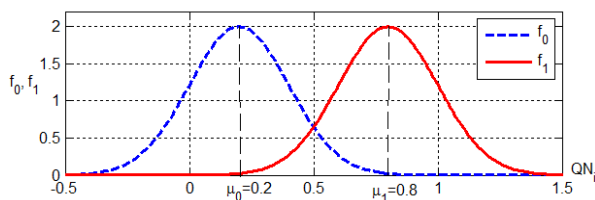
W równaniu (5) funkcje  $f_1(QN_i)$  i  $f_0(QN_i)$  oznaczają odpowiednio gęstość prawdopodobieństwa zajścia zwarcia oraz braku zwarcia w odplywie  $i$ . Oblicza się je z zależności:

$$(6) \quad f_1(QN_i) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(QN_i - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}$$

$$(7) \quad f_0(QN_i) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(QN_i - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}}$$

gdzie:  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  – odchylenia standardowe,  $\mu_0$ ,  $\mu_1$  – 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 takimi parametrami przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa

Sygnaly prawdopodobieństwa zwarcia są następnie przetwarzane w blokach decyzyjnych (rys. 1a). Przede wszystkim wykonuje się komparację (element *Relay*) sygnałów  $Pr(i|QN_i)$  z wielkością progową  $Pr_{ref}$ .

$$(8) \quad Co_i = (Pr_i(i|QN_i) > Pr_{ref})$$

W przypadku wyżej zdefiniowanych parametrów funkcji prawdopodobieństwa należy przyjąć  $Pr_{ref} \geq 0,5$ . Stan wysoki z wyjścia komparatora oznacza duże prawdopodobieństwo występowania zwarcia. Jednak te sygnały nie wystarczają do identyfikacji zwartej linii z kilku powodów. Po pierwsze dlatego, że mogą być one nieciągłe (w postaci krótkich impulsów) podczas zwarć łukowych przerywanych. Po drugie, stan wysoki może wystąpić na wyjściu komparatorów podczas operacji łączeniowych w głębi linii, co może doprowadzić do błędnego rozpoznania zwarcia.

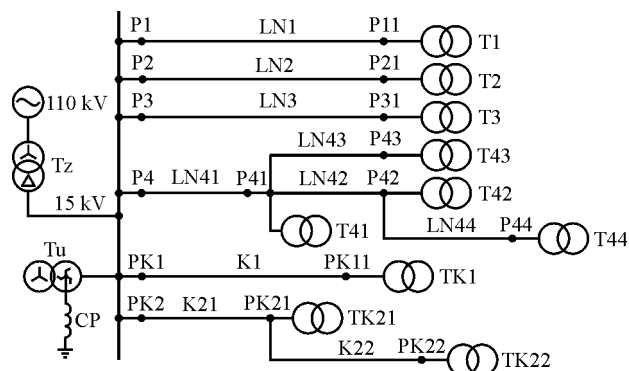
Dla zapewnienia wykrywania zwarć przerywanych zastosowano inercję logiczną polegającą na wydłużeniu czasu trwania sygnałów z komparatorów o  $T_{OD}$ . Funkcję tę zrealizowano za pomocą bloku *Off Delay* (rys. 1a). Sygnał na wyjściu tego bloku staje się ciągły, jeżeli odstęp czasowy między kolejnymi impulsami z komparatora *Relay* nie przekracza interwału  $T_{OD}$ . 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 *Integr* i *Comp* na rys. 1a). Zwłoka ta powinna być co najmniej 2,5 razy większa od  $T_{OD}$ . W praktyce oznacza to, że  $T_{del} \geq 0,5$  s. Podobne zależności logiczno-czasowe są realizowane w pozostałych kanałach zabezpieczenia.

### 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 (rys. 3). W tabeli 1 zamieszczono długości poszczególnych linii i wartości prądów pojemnościowych tych linii. W modelu sieci uwzględniono naturalną asymetrię pojemności linii napowietrznych, która wynosi 5,05%. Uwzględniono także zniekształcenie napięć fazowych źródła zasilania wyższymi harmonicznymi, głównie 3. harmoniczną, w celu wyjaśnienia jej wpływu na działanie zabezpieczenia. Przy tym założono maksymalną dopuszczalną zawartość 3. harmonicznej równą 5% [17]. Należy przy tym podkreślić, że mimo stosowania transformatorów odbiorczych o grupie połączeń  $\Delta/Y$  w napięciach fazowych sieci SN występuje niewielka zawartość 3. harmonicznej wywołana niesymetrią obciążenia nieliniowych odbiorników energii, gdyż do tej

sieci transformują się bez przeszkód składowe symetryczne zgodne i przeciwne trzeciej harmonicznej.

Nieliniową rezystancję zwarcia  $R_F$  zamodelowano w postaci szeregowego obwodu złożonego z rezystancji łuku  $R_{arc}$  [18-21] i rezystancji przejścia  $R_p$ . Zastosowano model łuku [19, 20] o następujących 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 w przypadkach zwarć pośrednich o rezystancji przejścia zmienianej w szerokim zakresie i umiejscowionych w różnych punktach sieci oznaczonych na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat ogólny zamodelowanej sieci

Tabela 1. Długości linii  $l$  i współczynniki udziału linii w pojemności sieci  $\alpha$

Linia	LN1	LN2	LN3	LN4	K1	K2
$l, [km]$	30	50	70	53	15	17
$\alpha$	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 sieci kompensowanej z naturalną asymetrią podczas normalnej pracy w przypadku maksymalnej zawartości trzeciej harmonicznej w napięciach zasilających, jaką dopuszcza polska norma,  $k_3 = 5\%$  i dokładnej kompensacji  $s = 0$ . Przyjęto wartość  $Bias = 15$  mVAr. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi mocy asymetrii  $Q_{03as}$ , unormowanych mocy biernych  $QN$  i prawdopodobieństwa warunkowego  $Pr$  w zabezpieczeniu w opisywanym przypadku. Największą wartość przyjmuje sygnał  $Pr_3$  dla linii napowietrznej LN3 i jest on o 30% mniejszy od wartości progowej  $Pr_{ref} = 0,5$ . Przy doborze parametru *Bias* kierowano się następującym rozumowaniem. Największa dodatnia moc asymetrii podczas normalnej pracy sieci występuje na linii LN3 i wynosi  $Q_{03as} = 15$  mVAr a największa bezwzględna wartość mocy asymetrii - na linii K2(6) i wynosi  $|Q_{036as}| = 26$  mVAr. Żeby nie doszło do zadziałania zabezpieczenia pod wpływem tej mocy musi być spełniona zależność

$$(9) \quad f_0(QN_3) < f_1(QN_3)$$

Nierówność (9) dla funkcji gęstości prawdopodobieństwa z parametrami dobranymi jak na rysunku 2 ( $\sigma_0 = \sigma_1 = 0,2$ ,  $\mu_0 = 0,2$  i  $\mu_1 = 0,8$ ) jest spełniona, gdy  $QN_3 < 0,5$ . Przyjmując zapas bezpieczeństwa  $k_b = 1,2 \div 1,4$  uzyskamy

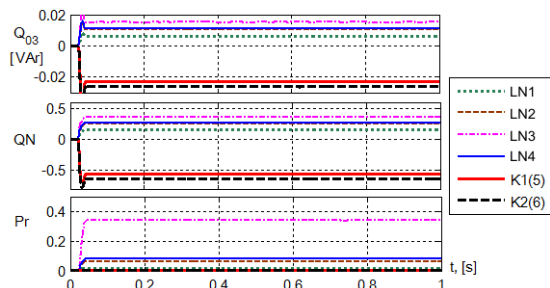
$$(10) \quad Q_{033as} / (|Q_{036as}| + Bias) \leq 0,5 / k_b$$

Stąd

$$(11) \quad Bias \geq 2k_b Q_{033as} - |Q_{036as}|$$

W zależności od  $k_b$  uzyskamy  $Bias = 10 \div 16$  mVAR.

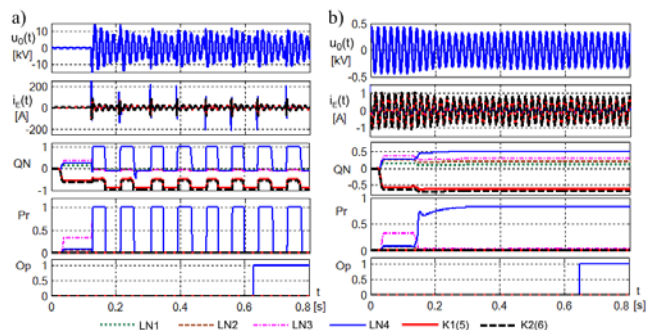
Jak wynika z rysunku 4 w przypadku  $Bias = 15$  mVAR sygnały funkcji prawdopodobieństwa warunkowego dla wszystkich linii są mniejsze od wartości progowej  $Pr_{ref} = 0,5$  i zabezpieczenie nie będzie działać podczas normalnej pracy sieci nawet w najtrudniejszych warunkach:  $s = 0$ ,  $k_3 = 5\%$ .



Rys. 4. Mocy bierne asymetrii  $Q_{03}$ , mocy bierne unormowane  $QN$  i sygnały prawdopodobieństwa  $Pr$  w sieci z naturalną asymetrią w przypadku:  $k_3 = 5\%$ ,  $s = 0$ ,  $Bias = 15$  mVAR

Szczegółowe badania symulacyjne wykazały, że zabezpieczenie wykrywa selektywnie zwarcia zarówno niskorezystancyjne jak wysokorezystancyjne niezależnie od ich położenia na linii (odległości od stacji). Na rysunku 5 przedstawiono przykład przebiegu detekcji zwarcia niskorezystancyjnego i wysokorezystancyjnego w punkcie P41 ( $l = 10$  km od stacji) linii napowietrznej LN4, a na rysunku 6 – w punkcie PK11 ( $l = 15$  km) linii kablowej K1. Przedstawione na rysunkach 5 i 6 przykłady detekcji zwarcia uzyskano w sieci przekompensowanej  $s = 0,1$  i z dużym udziałem trzeciej harmonicznej w napięciach zasilania  $k_3 = 5\%$ . W przypadku zwarcia w punkcie P41 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  $t = 0,65$  s). Z kolei w przypadku zwarcia w punkcie PK11 tylko sygnał  $Pr_{K1} > Pr_{ref}$  i zostaje wykryte zwarcie na linii kablowej K1.

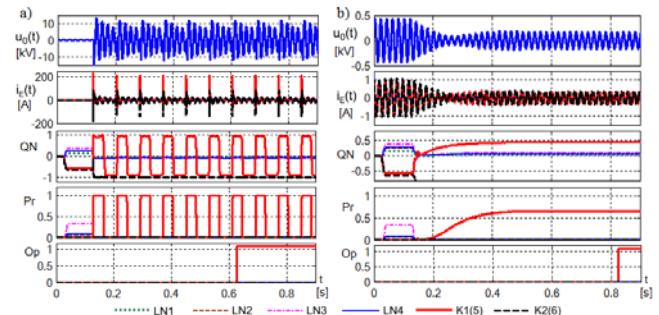
Z porównania rysunków 5 i 6 wynika jednak, że skuteczność działania zabezpieczenia na liniach napowietrznych i kablowych jest wysoka, lecz zasadniczo różna. Zabezpieczenie z dużym zapasem w odniesieniu do  $Pr_{ref}$  wykrywa zwarcie o rezystancji  $R_p = 150$  k $\Omega$  na linii napowietrznej, natomiast na linii kablowej z niewielkim zapasem wykrywane jest zwarcie o rezystancji  $R_p = 50$  k $\Omega$ .



Rys. 5. Przebiegi sygnałów w zabezpieczeniu podczas zwarcia w punkcie P41 linii LN4: a) zwarcie niskorezystancyjne –  $R_p = 1 \Omega$ , b) zwarcie wysokorezystancyjne –  $R_p = 150$  k $\Omega$

Znacznie szerszą informację o skuteczności działania zabezpieczenia zawiera tabela 2. Zamieszczono w niej maksymalne wartości rezystancji przejścia  $R_p$ , przy których

działa zabezpieczenie podczas zwarcia w poszczególnych punktach sieci. Wartości te określono 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 bez zniekształceń harmonicznych ( $k_3 = 0\%$ ).



Rys. 6. Przebiegi sygnałów w zabezpieczeniu podczas zwarcia w punkcie PK11 linii K1: a) zwarcie niskorezystancyjne –  $R_p = 1 \Omega$ , b) zwarcie wysokorezystancyjne –  $R_p = 50$  k $\Omega$

Tabela 2. Maksymalna rezystancja przejścia, przy której działa zabezpieczenie

Punkt	$k_3$ , [%]	$s$			
		-1,0	-0,1	0,1	0,1
		$R_p$ , [k $\Omega$ ]			
P1	0	160	166	141	200
P11	30	224	233	182	202
P2	0	212	225	172	198
P21	50	215	234	172	203
P3	0	414	394	473	196
P31	70	399	338	358	198
P4	0	226	242	180	197
P41	10	269	280	202	198
P42	25	295	318	216	199
P43	30	307	329	220	199
P44	33	302	325	218	199
Pk1	0	60	53	53	149
Pk11	15	60	52	52	150
Pk2	0	57	49	49	140
Pk21	10	56	47	48	141
Pk22	17	55	47	47	141

Przedstawione wyniki świadczą o bardzo wysokiej skuteczności wykrywania zwarcia wysokorezystancyjnych w liniach napowietrznych. Możliwe jest wykrywanie zwarcia o rezystancji przejścia  $R_p > 141$  k $\Omega$ . Na linii TL3 można wykrywać zwarcia pośrednie o rezystancji dochodzącej do 473 k $\Omega$ . W liniach kablowych z dużym udziałem pojemności linii ( $\alpha > 0,4$ ) jest możliwa detekcja zwarcia o znacznie mniejszej rezystancji  $R_p$ , jednak nie mniejszej niż 47 k $\Omega$  nawet w przypadku, gdy  $k_3 = 5\%$ . Wykrywanie zwarcia o tak dużych wartościach rezystancji przejścia jest możliwe pod warunkiem, że rezystancja  $R_f$  przed każdym zapłonem łuku (w stanie przedłukowym) jest wielokrotnie większa od  $R_p$ .

Na skuteczność wykrywania zwarcia stosunkowo niewielki wpływ ma rozstrojenie kompensacji i istotny wpływ mają harmoniczne w napięciach fazowych zasilających. O zależności  $R_p$  od stopnia rozstrojenia kompensacji  $s$  świadczą dane dla wybranych punktów P41 i K11 linii napowietrznej i kablowej zamieszczone w tabeli 3. W liniach napowietrznych zwarcia o najwyższej wartości  $R_p$  są wykrywane w przypadku niewielkiego niedokompensowania  $s \approx -\alpha$ , natomiast w liniach kablowych w przypadku  $s = -1$  (sieć z izolowanym punktem neutralnym). Kompensacja powoduje nieznaczne zmniejszenie harmonicznych o



częstotliwości 150 Hz i w efekcie są wykrywane zwarcia o mniejszej wartości  $R_p$ . Na liniach napowietrznych w sieci kompensowanej bez zniekształceń harmonicznymi maksymalna rezystancja przejścia jest na ogół mniejsza a na liniach kablowych znacznie większa, prawie 3-krotnie, niż w sieci z  $k_3 = 5\%$ . Jest to uwarunkowane wstępną polaryzacją mocą asymetrii. W liniach napowietrznych jest ona dodatnia, a w liniach kablowych ujemna. W związku z tym do zadziałania zabezpieczenia przy zwarcu na linii napowietrznej potrzebna jest mniejsza moc generowana przez łuk niż w przypadku zwarcia na linii kablowej. W przypadku, gdy napięcia fazowe źródła zasilania nie są zniekształcone 3 harmonicznymi, tj. gdy  $k_3 = 0$ , polaryzująca moc asymetrii nie występuje. Dlatego, skuteczność działania zabezpieczenia na liniach napowietrznych jest mniejsza a na liniach kablowych większa.

Tabela 3. Zależność maksymalnej rezystancji przejścia od rozstrojenia kompensacji dla zwarcia w punktach P41 i PK11

s	$R_p, \text{k}\Omega$										
	-1	-0,7	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,15	0,2	0,3
P41	269	266	265	269	276	280	211	202	211	216	221
PK11	60	58	56	54	53	52	52	52	52	51	50

Zabezpieczenie wykazuje wysoką skuteczność wykrywania zwarc również w przypadku zmiany konfiguracji sieci, na przykład po odstawieniu jednej z linii. W sieci z izolowanym punktem neutralnym może ono wykrywać zwarcia na dwóch dowolnych liniach. Dowodzą tego wyniki maksymalnej rezystancji przejścia w kilku punktach sieci złożonej tylko z linii LN4 i K2 (tab. 4). Zabezpieczenie może także działać skutecznie w sieci kompensowanej złożonej z dwóch linii, jednak pod warunkiem, że udział linii uszkodzonej w pojemności sieci nie przekracza pewnej maksymalnej wartości  $\alpha_{\max}$ , powyżej której prąd doziemny dla trzeciej harmonicznej będzie miał charakter indukcyjny. Udział ten można oszacować z zależności:

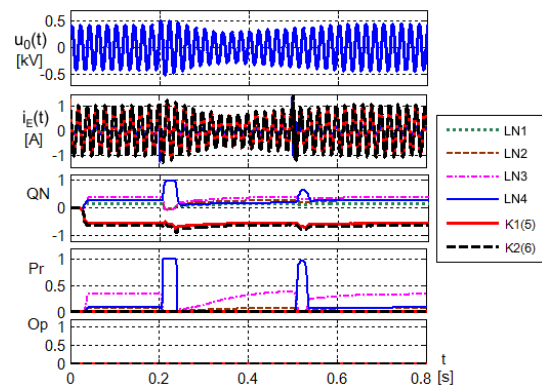
$$(12) \quad \alpha_{\max} = 1 - (1 + s) / 9$$

Przyjmując znaczne przekompensowanie  $s = 0,1$  uzyskuje się  $\alpha_{\max} = 0,88$ . Przykładowo, w sieci z czynnymi liniami LN4 i K2 współczynniki udziałów linii wyniosą odpowiednio  $\alpha_4 = 0,083$  i  $\alpha_{K2} = 0,917$ . W związku z tym na linii napowietrznej LN4 jest możliwe wykrywanie zwarc wysokorezystancyjnych, natomiast na linii K2 nie jest możliwe wykrywanie żadnych zwarc.

Tabela 4. Maksymalna rezystancja przejścia  $R_p$ , przy której działa zabezpieczenie w sieci z dwoma liniami LN4 i K2

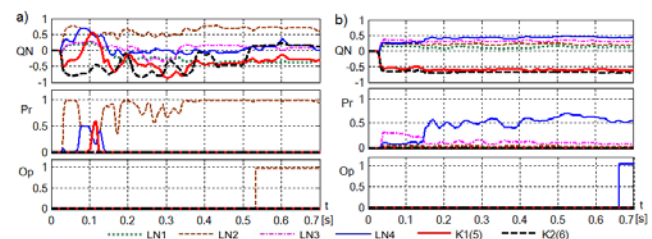
$R_p, \text{k}\Omega$	Punkt	P4	P41	P42	P43	P44	PK2	PK21	PK22
	$s = -1$		476	580	635	656	647	48	44
$s = 0,1$		438	525	578	600	590	brak działania		

Opisane zabezpieczenie jest wrażliwe na operacje łączeniowe w sieci. Wrażliwość dotyczy wyłącznie tej linii, na której dokonywane są operacje łączeniowe. Na rysunku 7 przedstawiono przykład reakcji zabezpieczenia na sekwencję wyłącz-załącz fragmentu linii LN43 razem z transformatorem T43. Po wyłączeniu w chwili  $t_w = 0,2$  s oraz po załączeniu w chwili  $t_z = 0,5$  s działa komparator  $Pr_4$  w kanale 4 ponieważ  $Pr_4 > Pr_{ref}$ . Zabezpieczenie jednak nie działa, gdyż zapobiega temu opóźnienie logiczne i zwłoka czasowa. Zabezpieczenie pobudzi się dwukrotnie z podtrzymaniem na czas  $T_{OD}$  jednak do zadziałania nie dojdzie, gdyż odstęp między impulsami jest większy od opóźnienia logicznego  $t_z - t_w > T_{OD}$ . Natomiast zwłoka czasowa przeciwdziała zadziałaniu zabezpieczenia pod wpływem pojedynczych impulsów zakłócających.



Rys. 7. Odpowiedź zabezpieczenia na operacje wyłączenia ( $t_w = 0,2$  s) oraz załączenia ( $t_z = 0,5$  s) odcinka linii LN43

Podczas zwarc wysokorezystancyjnych składowe zerowe prądów i napięć są bardzo małe. Jeszcze mniejsze są trzecie harmoniczne tych wielkości – napięcia poniżej 1V i prądy rzędu kilku miliamperów. Do ich pomiaru potrzebne są przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C) o wysokiej rozdzielczości. Badania symulacyjne wykazały, że należy stosować przetworniki co najmniej 16-bitowe. Stosowanie przetworników o mniejszej rozdzielczości, na przykład 12-bitowych, może powodować błędne działanie zabezpieczenia na skutek kumulacji błędów kwantyzacji. Taki przypadek przedstawiono na rysunku 8a. Błędy kwantyzacji doprowadziły do fluktuacji mocy  $QN$  oraz sygnałów  $Pr$  i w efekcie zabezpieczenie rozpoznało zwarcie na linii LN2 zamiast na linii LN4. Zastosowanie przetwornika 16-bitowego doprowadziło do prawidłowego rozpoznania zwarcia (rys. 8b), ale jak widać fluktuacje sygnałów  $QN$  i  $Pr$  są dość duże. Radykalne zmniejszenie fluktuacji sygnałów można osiągnąć po zastosowaniu przetworników 20-bitowych.



Rys. 8. Przebiegi sygnałów w zabezpieczeniu z różnymi przetwornikami A/C podczas zwarcia wysokorezystancyjnego ( $R_p = 190 \text{ k}\Omega$ ) w punkcie P41: a) 12-bitowy; b) 16-bitowy

## Wnioski

Zwarcia doziemne w sieciach średnich napięć mogą być wykrywane za pomocą zabezpieczeń zbiorczych, kontrolujących kierunki przepływu prądów doziemnych wszystkich odpyływów w rozdzielni. Dla zapewnienia detekcji zwarc wysokorezystancyjnych w kompensowanych sieciach SN zaproponowano zastosowanie znormalizowanych mocy biernych dla składowej symetrycznej zerowej dla 3. harmonicznymi napięcia i prądów linii oraz kryterium Bayesa w odniesieniu do tych mocy.

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 złożonej z czterech linii napowietrznych i dwóch linii kablowych. W modelu zabezpieczenia wykorzystano 3 harmoniczne składowe zerowych napięcia i prądów wydzielone za pomocą jednookresowego algorytmu Fouriera. W modelu sieci uwzględniono naturalną asymetrię pojemności linii napowietrznych oraz 3. harmoniczną

w napięciach źródłowych. Modelowano złożone zwarcia łukowe z udziałem rezystancji dynamicznej łuku i rezystancji przejścia.

Szczegółowe badania symulacyjne wykazały, że zabezpieczenie wykrywa selektywnie zwarcia w sieci ze zniekształceniami harmonicznymi i jest skuteczne zarówno podczas zwarć niskorezystancyjnych jak i wysokorezystancyjnych. Wykrywane są zwarcia o rezystancji przejścia od 47 do 473 k $\Omega$ , zależnie od położenia zwarcia i rozstrojenia kompensacji. Zdecydowanie większa skuteczność wykrywania zwarć występuje na liniach napowietrznych, co wynika ze wstępnej dodatniej polaryzacji zabezpieczenia mocami asymetrii. Na liniach napowietrznych w sieci bez zniekształceń źródła zasilania wykrywane są zwarcia o nieco mniejszej rezystancji a na liniach kablowych prawie trzykrotnie większej niż w sieci ze zniekształceniami.

Wysoka skuteczność wykrywania zwarć jest zachowana również w przypadku zmiany konfiguracji sieci, na przykład po odstawieniu jednej z linii. Zabezpieczenie może działać w sieci kompensowanej jak i w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Działa ono prawidłowo nawet w przypadku pracy dwóch linii, jednak w sieci kompensowanej wykrywanie zwarć w linii uszkodzonej ze znacznym udziałem w pojemności sieci jest możliwe pod warunkiem, że jest on znacznie mniejszy od  $\alpha_{max} = 0,88$ . Do wykrywania zwarć w sieci kompensowanej nie jest potrzebne wymuszanie składowej czynnej prądu i stosowanie układu AWSC.

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.

Ze względu na bardzo małe wielkości pomiarowe występujące podczas zwarć wysokorezystancyjnych niezbędne jest stosowanie przetworników A/C o wysokiej rozdzielczości. Wskazane jest stosowanie przetworników 20-bitowych. W przypadku przetworników 16-bitowych obserwuje się wyraźny spadek skuteczności działania zabezpieczenia.

**Autorzy:** dr hab. inż. Lubomir Marciniak prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, Aleja Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [lubmar@el.pcz.czest.pl](mailto: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] Sedighzadeh M., Rezazadeh A., Elkalashy N.I., Approaches in high impedance fault detection. A chronological review, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 10/3 (2010), 114-128
- [3] Łukowicz M., Metody wykrywania zwarć wysokooporowych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych, Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki PWR, 99/32, Oficyna Wyd. PWR, Wrocław 2013
- [4] Benner C.L., Russell B.D., Practical high-impedance fault detection on distribution feeders, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33/3 (1997), 635-640
- [5] Rodoń F., Głowocz R., Talaga M., Mikroprocesorowe zabezpieczenia ziemnozwarciowe typu Zlo, *Prace Naukowe Inst. Energoelektryki Pol. Wroc.*, 86 (1997), 75-86
- [6] 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
- [7] Elkalashy N.I., Lehtonen M., Tarhuni N.G., DWT and Bayesian technique for enhancing earth fault protection in MV network, 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 15-18 March 2009
- [8] Elkalashy N. I., Lehtonen M., Advancing DWT-Bayesian technique for earth fault protection in MV networks, *The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering (OJEEE)*, 1/2 (2009), 89-93
- [9] Elkalashy N.I., Elhaffar A.M., Kawady T.A., Tarhuni N.G., Lehtonen M., Bayesian selectivity technique for earth fault protection in medium voltage networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25/4 (2010), 2234-2245
- [10] Bayes' theorem. [https://en.wikipedia.org/wiki/Bayes%27\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Bayes%27_theorem)
- [11] Marciniak L., General earth fault protection for MV networks using wavelet decomposition and Bayesian criterion. *E3S Web of Conferences*, 84 (2019)
- [12] Kim C.J., Russell B.D., Harmonic behavior during arcing Faults on power distribution feeders, *Electric Power Systems Research*, 14 (1988), 219-225
- [13] Marciniak L., Piątek M., Identification of high-resistance earth faults in medium voltage networks using higher harmonics, *Acta Energetica*, 1 (2017), 50-57
- [14] Marciniak L., Impulsowoprądowe i falkowe kryteria identyfikacji zwarć doziemnych rezystancyjnych oraz łukowych w sieciach średnich napięć, Monografie nr 273, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013
- [15] Simulink user guide. The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, 2015
- [16] Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A., Digital signal processing in power system protection and control, Springer, London, 2011
- [17] PN-EN 50160:2010P. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych
- [18] Kizilcay M., Pniok T., Digital simulation of fault arc in power system, *ETEP*, 1 (1991), 55-60
- [19] Marciniak L., Model of the arc earth-fault for medium voltage networks, *Central European Journal of Engineering*, 1/2 (2011), 168–173
- [20] Marciniak L., Implementacje modeli łuku ziemnozwarciowego w programach PSCAD i Matlab/Simulink, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88/9a (2012), 126-129
- [21] Sawicki A., Haltof M., Nieliniowe modele matematyczne łuku elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92/11 (2016), 257-261