

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH W ZABEZPIECZENIACH ZIEMNOZWARCIOWYCH

Mateusz PIĄTEK¹, Lubomir MARCINIAK²

1. Miejsce pracy: Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki
tel.: 32 353 21 20, e-mail: mateusz.piatek2015@gmail.com
2. Miejsce pracy: Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki
tel.: 34 325 0879, e-mail: lubmar@el.pcz.czyst.pl

Streszczenie: W pracy przeprowadzono ocenę zawartości wyższych harmonicznych w kompensowanych sieciach średnich napięć, których źródłem jest nieliniowa, duża rezystancja przejścia. Przedstawiono model sieci wraz z opisem układu pomiarowego wykorzystanego w środowisku Matlab/Simulink. Wykonano badania symulacyjne zawartości wyższych harmonicznych składowej zerowej napięcia, prądu doziemnego oraz mocy biernej tych harmonicznych w zależności od parametrów rezystancji w miejscu zwarcia, napięcia progowego zapłonu łuku, prądu pojemnościowego i stopnia rozstrojenia kompensacji. Oceniono możliwość wykorzystania mocy biernej trzeciej harmonicznej jako kryterium wykrywania zwarcia.

Słowa kluczowe: zabezpieczenie ziemnozwarciowe, kryterium działania, wyższe harmoniczne, rezystancja zwarcia

1. WSTĘPNA ANALIZA ZAGADNIENIA

1.1. Zakłócenia sygnału pomiarowego

Badania wykazują, że w warunkach przejściowych, występujących przy zwarcu, mierzone sygnały prądowe i napięciowe mogą zawierać, oprócz harmonicznej podstawowej inne składowe, które podczas identyfikacji właściwego sygnału stanowią zakłócenie zabezpieczeniowego sygnału użytecznego. Zgodnie z [1] wyróżnia się następujące składowe sygnały:

- podstawowe harmoniczne zależne od źródła zasilania;
- składowe nieokresowe zanikające wykładniczo;
- składowe oscylacyjnie zanikające swobodnie;
- wyższe harmoniczne generowane przez nieliniowe odbiory lub nieliniową rezystancję w miejscu zwarcia.

Poszczególne składowe mogą wystąpić w różnej proporcji w sygnałach prądowych i napięciowych i mają charakter losowy, który zależy od miejsca zakłócenia, fazy początkowej napięcia, rodzaju zakłócenia, itp.

W automatyce zabezpieczeniowej powszechnie przyjmuje się odkształcenie sygnałów jako niewielkie, a identyfikację zakłócenia przeprowadza się w stanie zbliżonym do ustalonego, tj. w stanie quasi-ustalonym. Realizację tego zadania umożliwiają wstępna filtracja analogowa i cyfrowa, które ograniczają niepożądane składowe do dopuszczalnego poziomu i pozwalają na poprawną estymację wybranej wielkości kryterialnej, najczęściej podstawowej, harmonicznej. Taką estymację

realizuje się w trybie on-line z wykorzystaniem cyfrowego przetwarzania sygnałów w drodze kompromisu między szybkością działania a dokładnością pomiaru. Zwykle wykorzystuje się do tego przetwarzanie sygnałów w oknie jednookresowym podstawowej harmonicznej, przy tym błąd estymacji nie przekracza 3÷5%.

Do identyfikacji zwarcia jednofazowych w sieciach średnich napięć (SN) wykorzystuje się składowe symetryczne zerowe napięcia u_0 i prądu i_0 lub prądu doziemnego $i_E = 3i_0$. Składowe te są definiowane ogólnymi zależnościami dla wartości chwilowych w postaci [2]:

$$u_0 = (u_{L1} + u_{L2} + u_{L3})/3; \quad i_0 = i_E/3 = (i_{L1} + i_{L2} + i_{L3})/3; \quad (1)$$

w których: u_{Li} , i_{Li} ($i = 1, 2, 3$) – wartości chwilowe napięcia i prądu fazowego w miejscu pomiaru (w polu liniowym rozdzielni).

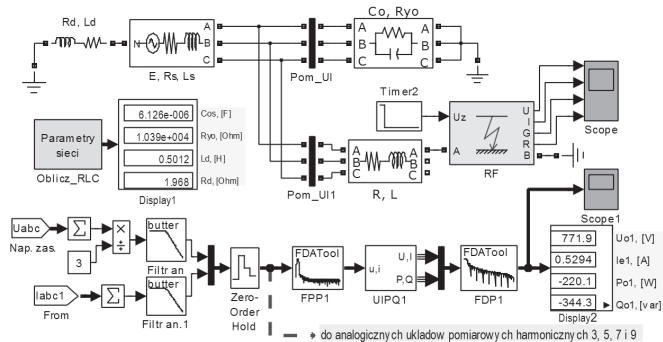
Wymienione wielkości uzyskuje się z filtrów składowych symetrycznych zerowych napięcia i prądu lub programowo, przetwarzając próbki prądu i napięcia według zależności (1).

Do niedawna wykorzystywano głównie podstawowe harmoniczne składowych symetrycznych zerowych napięcia i prądu [2]. Jednak zabezpieczenia oparte na tych składowych mają istotną wadę – nie wykrywają zwarcia z udziałem dużej, zazwyczaj nieliniowej, rezystancji w miejscu zwarcia. Poprawę skuteczności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w zakresie zwarcia wysokooporowych wiąże się dzisiaj, między innymi, z wykorzystaniem wyższych harmonicznych w sygnałach napięcia i prądu zerowego [3, 4], a zwłaszcza mocy biernej tych sygnałów. Warunkiem wstępnym wykorzystania wyższych harmonicznych jest ocena ich zawartości w sygnałach zwarciovych.

1.2. Model układu pomiarowego

W celu zbadania zawartości harmonicznych w napięciach i prądach składowej symetrycznej zerowej podczas zwarcia wysokorezystancyjnych w kompensowanych sieciach SN, zamodelowano w programie Matlab/Simulink uproszczoną (ze względu na łatwość parametryzacji) sieć

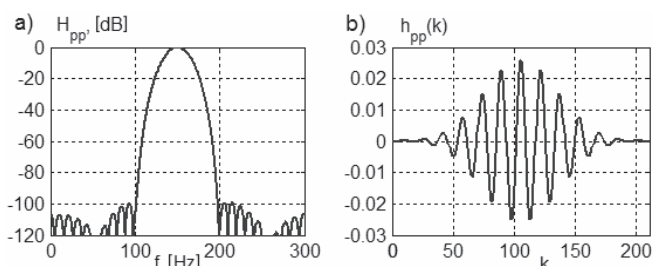
z układem pomiarowym (rys. 1). W modelu uwzględniono pojemności C_{0S} i upływności $G_{0S}(R_{y0})$ dla składowej zerowej sieci, indukcyjność L_s i rezystancję R_s systemu, indukcyjność L i rezystancję R linii zwartej oraz indukcyjność L_d i rezystancję R_d dławika kompensacyjnego.



Rys. 1. Model układu do badania harmonicznych

Badania prowadzono przy założeniu szeregu niezmiennych parametrów sieci. Przyjęto: napięcie znamionowe $U_N = 15$ kV, współczynnik tłumienia dla składowych symetrycznych zerowych $d_0 = 0,05$, dobroć cewki Petersena $q = 80$. Zwarcia symulowano na linii napowietrznej z przewodami AFL 6-70 w odległości 1 km od stacji ($L = 2,46$ mH, $R = 0,493$ Ω). Założono także stałe parametry indukcyjności i rezystancji systemu $L_s = 3,2$ mH i $R_s = 0,1$ Ω . Nieliniową rezystancję zwarcia R_F odzwierciedlono za pomocą uogólnionego modelu dynamicznego łuku i rezystancji przejścia [5], którą charakteryzują następujące parametry: rezystancja początkowa R_0 , rezystancja przewodzenia R_1 , napięcie progowe U_k , napięcie zapłonu łuku U_z , prąd zapłonu I_z , stała czasowa τ (przyjęto: $U_z = 10$ kV, $\tau = 0,1$ ms, $R_1/R_0 \geq 100$).

Do pomiaru harmonicznych zastosowano cyfrowe metody przetwarzania sygnałów [6, 7]. Sygnały próbkowano z częstotliwością $f_p = 2400$ Hz. Harmoniczne zostały wydzielone za pomocą cyfrowych filtrów pasmowoprzepustowych (FPP) Czebyszewa [3] o długości okna $N_{pp} = 212$ (o czasie odpowiedzi $T_{pp} = 88$ ms) i współczynniku tłumienia listków bocznych A_{lb} wynoszącym 100 dB. Szerokość pasma głównego Δf_g filtru nie przekracza 100 Hz ($f_h \pm 50$ Hz). Na rysunku 2 przedstawiono przykładową charakterystykę widma amplitudowego H_{pp} oraz odpowiedź impulsową (funkcję okna) h_{pp} takiego filtru dobranego na częstotliwość środkową $f_h = 150$ Hz.



Rys. 2. Widmo amplitudowe H_{pp} i odpowiedź impulsowa h_{pp} filtru pasmowoprzepustowego Czebyszewa dla trzeciej harmonicznej: k – numery współczynników filtru

Wartości skuteczne harmonicznych sygnałów określono na podstawie składowych ortogonalnych obliczanych w wyniku korelacji sygnałów wejściowych z funkcjami sinus i kosinus w oknie jednookresowym,

z liczbą współczynników $N_w = 48$. Wartości napięcia U_{0h} i prądu I_{Eh} oraz wartość mocy biernej zerowej Q_{0h} ($h = 3, 5, 7, 9$) obliczane są zgodnie z algorytmami [7]:

$$U_{0h} = \sqrt{U_{0hd}^2 + U_{0hq}^2}; \quad I_{Eh} = \sqrt{I_{Ehd}^2 + I_{Ehq}^2}; \quad (2)$$

$$Q_{0h} = I_{Ehd}U_{0hq} - I_{Ehq}U_{0hd}$$

gdzie: I_{Ehd} , I_{Ehq} , U_{0hd} , U_{0hq} – składowe ortogonalne w osi d i q harmonicznych prądu I_{Eh} i napięcia U_{0h} .

Następnie uzyskane przebiegi poddano dodatkowo wygładzaniu za pomocą filtrów dolnoprzepustowych (FDP) Hanninga o liczbie współczynników $N_{dp} = 96$. Przeanalizowano tylko nieparzyste harmoniczne o numerach 3, 5, 7 i 9, ponieważ występują przy każdym zwarcie z udziałem nieliniowej rezystancji osiągając przy tym duże wartości.

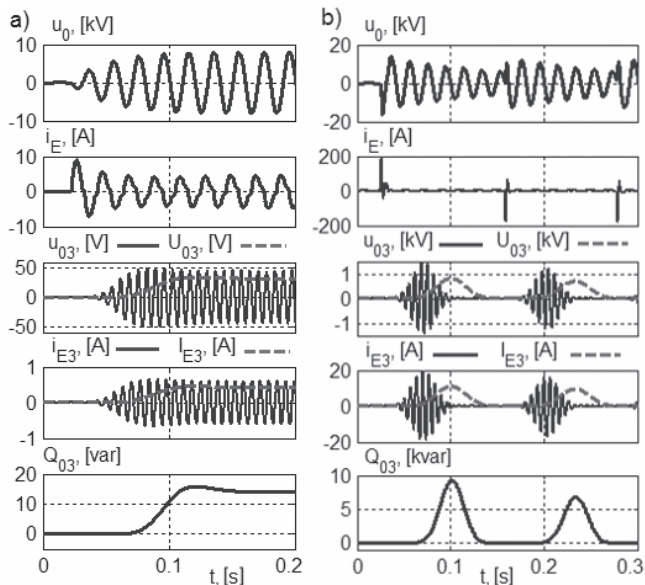
1.3. Stany przejściowe a problem wiarygodności estymacji harmonicznych

W przypadku zwarc doziemnych przez nieliniową rezystancję zwarcia mogą wystąpić zasadniczo dwa rodzaje stanów przejściowych:

- quasi-stacjonarne, dążące do stanu ustalonego, powtarzającego się cyklicznie z częstotliwością sieci;
- niestacjonarne, nieokresowe, występujące najczęściej w przypadku zwarc łukowych przerywanych.

W pierwszym przypadku możliwe jest dość dokładne określenie wartości harmonicznych w sygnałach w stanie ustalonym. W drugim przypadku analiza Fouriera zawodzi, gdyż widmo sygnałów niestacjonarnych jest w zasadzie ciągłe. Może być ono analizowane wyłącznie w ograniczonym oknie pomiarowym i w związku z tym będzie się ono zmieniać wraz ze zmianami sygnału w tym oknie. Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 1 pozwala oszacować wartości harmonicznych w stanach niestacjonarnych jedynie w sposób przybliżony, zależny od zastosowanego sposobu pomiaru. Na rysunku 3 przedstawiono przykład ilustrujący przebiegi napięcia zerowego u_0 i prądu doziemnego i_E , filtracji trzeciej harmonicznej tych wielkości u_{03} i i_{E3} , pomiaru wartości skutecznej trzeciej harmonicznej napięcia U_{03} i prądu I_{E3} oraz pomiaru mocy biernej tych harmonicznych Q_{03} podczas zwarcia quasi-stacjonarnego i niestacjonarnego. Przebiegi odpowiadają zwarciom na linii napowietrznej w odległości 10 km od stacji w sieci 15 kV, z prądem pojemnościowym $I_{CS} = 46,8$ A i rozstrojeniem kompensacji $s = 0,05$ [4]. W pierwszym przypadku wystąpiło zwarcie przez nieliniową rezystancję przejścia o parametrach: $U_k = 1,5$ kV, $R_1 = 1$ k Ω , $R_0/R_1 > 100$, $\tau = 0,1$ ms. W drugim przypadku – zwarcie łukowe o parametrach: $U_k = 1,5$ kV, $U_z = 10$ kV $R_1 = 1$ Ω , $R_0 = 10$ k Ω , $\tau = 0,1$ ms.

Sygnały wyjściowe filtrów wyższych harmonicznych podczas zwarc łukowych przerywanych, występujących sporadycznie (rys. 3b) są zbliżone do odpowiedzi impulsowej tych filtrów (rys. 2). Wielkości mierzone U_{03} , I_{E3} i Q_{03} przyjmują formę impulsów odpowiadających kolejnym zapłonom łuku. W zastosowaniu do identyfikacji zwarc istotne są wartości amplitudowe tych impulsów i właśnie one były mierzone. Błąd pomiaru wartości amplitudowych jest szacowany na około 5%. Taką dokładność uzyskano dzięki temu, że stosunek czasu odpowiedzi impulsowej filtrów FPP do czasu okna pomiarowego wynosi prawie 4,5 i amplituda harmonicznej w oknie pomiarowym w pobliżu szczytu jest prawie stała.



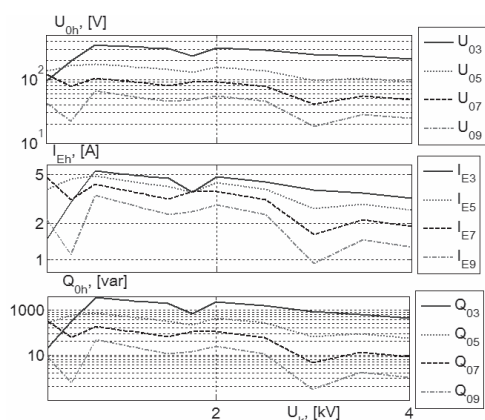
Rys. 3. Przebiegi wielkości ziemnozwarciowych linii zwartej: a) zwarcie quasi-stacjonarne, b) zwarcie niestacjonarne

2. ANALIZA SYMULACYJNA HARMONICZNYCH

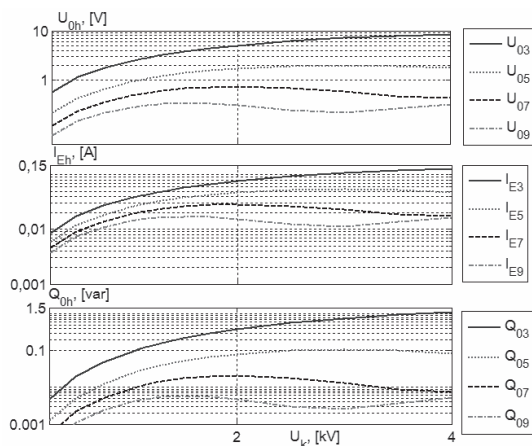
Wyniki badań harmonicznymi U_{0h} , I_{Eh} i Q_{0h} w funkcji napięcia progowego U_k , rezystancji R_1 , prądu pojemnościowego sieci I_{CS} i stopnia rozstrojenia kompensacji s przedstawione są na rysunkach od 4 do 9. Z rysunków wynika, że największe wartości we wszystkich rozpatrywanych przypadkach przyjmują trzecie harmoniczne napięcia, prądu i moc bierna tych harmonicznymi.

Wzrost napięcia progowego łuku U_k może wpłynąć na zmniejszenie zawartości harmonicznymi w przypadku zwarć niskorezystancyjnych (rys. 4), lub zwiększenie ich zawartości wraz ze wzrostem U_k (rys. 5).

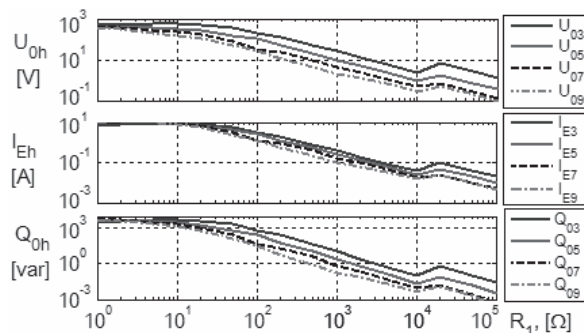
Z rysunków 6 oraz 7 wynika, że zawartość harmonicznymi napięcia i prądu oraz mocy biernej tych harmonicznymi silnie zależy od rezystancji w stanie przewodzenia łuku R_1 . W badanym przypadku wyniki różnią się o kilka rzędów wielkości. Największa różnica występuje w przypadku mocy biernej Q_{0h} . Znaczący procentowy udział harmonicznymi w stosunku do podstawowej harmonicznej występuje tylko podczas zwarć o stosunkowo niewielkiej rezystancji R_1 , do kilkuset omów. Ze wzrostem R_1 , udział harmonicznymi silnie spada. Najbardziej ulega zmniejszeniu wartość mocy biernej harmonicznymi napięcia i prądu.



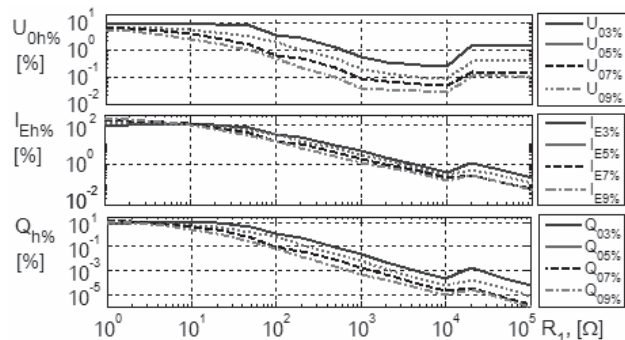
Rys. 4. Zależność wartości skutecznej harmonicznymi napięcia U_{0h} i prądu I_{Eh} oraz mocy biernej Q_{0h} w funkcji napięcia progowego U_k podczas zwarcia łukowego: $I_{CS} = 50$ A, $s = 0,1$, $R_1 = 1,0$ Ω



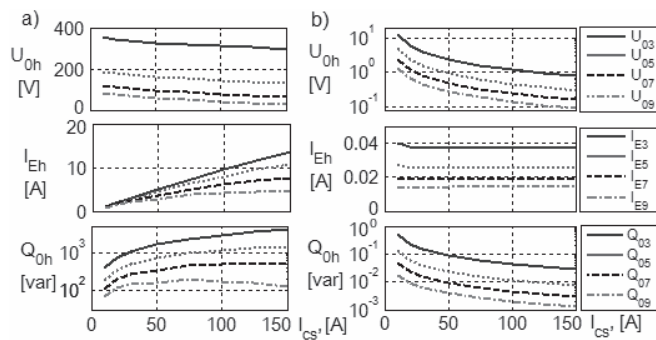
Rys. 5. Zależność wartości skutecznej harmonicznymi napięcia U_{0h} i prądu I_{Eh} oraz mocy biernej Q_{0h} w funkcji napięcia progowego U_k podczas zwarcia łukowego: $I_{CS} = 50$ A, $s = 0,1$, $R_1 = 10$ k Ω



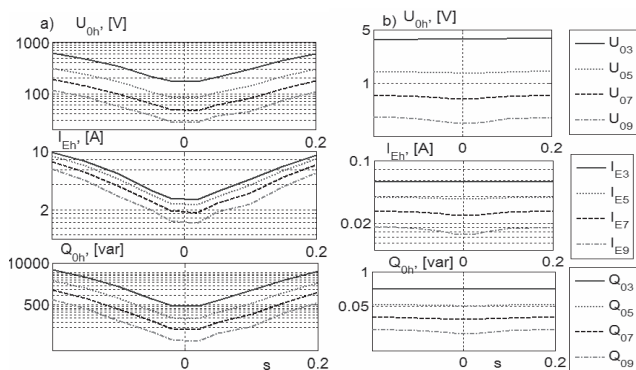
Rys. 6. Zależność wartości skutecznej harmonicznymi napięcia U_{0h} i prądu I_{Eh} oraz mocy biernej Q_{0h} w funkcji rezystancji R_1 podczas zwarcia łukowego: $I_{CS} = 50$ A, $s = 0,1$, $U_k = 1$ kV



Rys. 7. Procentowy udział harmonicznymi napięcia $U_{0h\%}$ i prądu $I_{Eh\%}$ oraz mocy biernej $Q_{0h\%}$ w funkcji rezystancji R_1 podczas zwarcia łukowego: $I_{CS} = 50$ A, $s = 0,1$, $U_k = 1$ kV



Rys. 8. Zależność wartości skutecznej harmonicznymi napięcia U_{0h} i prądu I_{Eh} oraz mocy biernej Q_{0h} w funkcji prądu pojemnościowego sieci I_{CS} podczas zwarcia łukowego: a) $R_1 = 1,0$ Ω , b) $R_1 = 10$ k Ω ; $s = 0,1$, $U_k = 1$ kV



Rys. 9. Zależność wartości skutecznej harmonicznego napięcia U_{0h} i prądu I_{Eh} oraz mocy biernej Q_{0h} w funkcji rozstrojenia kompensacji sieci s podczas zwarcia łukowego: a) $R_1 = 1,0 \Omega$; b) $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $I_{CS} = 50 \text{ A}$, $U_k = 1 \text{ kV}$

Wzrost prądu pojemnościowego sieci I_{CS} wpływa na zwiększenie wartości harmonicznych podczas zwarcia niskooporowych (rys. 8a) oraz ich zmniejszenie podczas zwarcia wyskooporowych (rys. 8b).

Stopień rozstrojenia kompensacji wpływa nieznacznie na zawartość harmonicznych, zwłaszcza w przypadku zwarcia wyskooporowych (rys. 9b). Najmniejsze wartości bezwzględne harmonicznych (w przeciwieństwie do zawartości procentowej) występują przy dokładnej kompensacji. Wzrost przekompensowania lub niedokompensowania powoduje wzrost wartości harmonicznych (rys. 9a).

W powyższych badaniach uwzględniono wyłącznie wpływ parametrów nieliniowej rezystancji w miejscu zwarcia na zawartość harmonicznych w prądach i napięciach kolejności zerowej. Nie badano wpływu nieliniowych odbiorników dużej mocy. Należy zaznaczyć, że duże przemysłowe odbiorniki energoelektroniczne mogą wpływać na sumaryczną zawartość harmonicznych podczas zwarcia [8], zwłaszcza nieparzystych o numerach 5, 7, 11, 13, 17 i 19.

3. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że podczas zwarcia największe wartości przyjmują trzecie harmoniczne napięcia zerowego, prądu doziemnego oraz ich moc bierna zerowa. Wartość harmonicznych silnie zależy od napięcia progowego łuku U_k ,

rezystancji przewodzenia R_1 oraz prądu pojemnościowego I_{CS} .

Z powyższej analizy wynika, że do wykrywania zwarcia wyskooporowych najlepiej nadają się trzecie harmoniczne napięcia zerowego U_{03} , prądu doziemnego I_{E3} i mocy biernej tych harmonicznych Q_{03} , ponieważ osiągają one największe wartości. Do wykrycia zwarcia wyskooporowych o rezystancji R_1 do $100 \text{ k}\Omega$ w oparciu o kryterium mocy biernej wyższych harmonicznych, należy stosować bardzo niskie nastawy mocy rozruchowej Q_r , rzędu $0,001 \text{ var}$.

Prace nad wykorzystaniem kryterium mocy biernej wyższych harmonicznych, zwłaszcza trzeciej, napięcia zerowego i prądu doziemnego w zabezpieczeniach ziemnozwarciowych będą kontynuowane. Niezbędna jest ocena wpływu asymetrii sieci, operacji łączeniowych oraz nieliniowych odbiorników energoelektronicznych na pracę zabezpieczenia, dobór jego nastaw oraz wybór optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych.

4. BIBLIOGRAFIA

- Musierowicz K.: Zniekształcenia sygnałów pomiarowych w elektroenergetycznej automatyce zabezpieczeniowej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 2009.
- Kim C. J., Russell B. D.: Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders, Electric Power Systems Research, 24 (1988), 219-225.
- Marciniak L.: Identyfikacja zwarcia doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć, Przegląd Elektrotechniczny, nr 8 (2015), s. 185-189.
- Marciniak L.: Implementacje modeli łuku ziemnozwarciowego w programach PSCAD i Matlab/Simulink, Przegląd Elektrotechniczny, 9a (2012), s. 126-129.
- Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań, WKiŁ, Warszawa 2009.
- Szafran J., Wiszniewski A.: Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej, WNT, Warszawa 2001.
- Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej. Część 4 - Wyższe harmoniczne napięć i prądów (c.d.) http://twelvee.com.pl/pdf/Hanzelka/cz_5_pelna.pdf.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF USING HIGHER HARMONICS IN EARTH FAULT PROTECTIONS

The paper contains the evaluation of the content of higher harmonics in compensated medium voltage networks whose source is nonlinear fault resistance containing transition and arc resistance. The general signal components occurring during short circuits and the zero-sequence components used for identification of earth faults are discussed. An electric grid model is presented with a description of the measurement system used in the Matlab/Simulink environment. The types of transition states that may occur in the event of a fault are described. The measurement accuracy of both types of faults was discussed and the measurement errors were estimated in both cases. Simulations were conducted to investigate the higher harmonics of zero-sequence voltage, earth current and reactive power these harmonics, depending on the short circuit resistance, arc threshold voltage, capacitive current and compensation detuning ratio. The results of the simulation are discussed in relation to the variable parameters. The possibility of using reactive power of third harmonic as a criterion for detecting short circuits was evaluated. A program of research into the use of this protection criterion in the future was presented.

Keywords: earth fault protection, action criterion, higher harmonics, short circuit resistance.