

Badania zakłóceniami algorytmu pomiarowego oraz decyzyjnego cyfrowych i analogowych zabezpieczeń odległościowych linii

Tomasz Bednarczyk

1. Wstęp

Powszechność dostępu i korzystanie z energii elektrycznej wymagają sprawnego działania rozbudowanego układu urządzeń do jej wytwarzania, przesyłania i rozdzału. W obszarze przesyłania energii elektrycznej linie przesyłowe są narażone na skutki przypadkowych i niepożądanych czynników, zwanych zakłóceniami. Zakłócenia te wpływają na ciągłość dostaw energii elektrycznej oraz na stabilność systemu elektroenergetycznego. W celu zachowania selektywnej ochrony przed skutkami zakłóceń ważna jest rola sprawnie działającej elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. W analizowanym przypadku będą to zabezpieczenia odległościowe linii, których działanie bazuje na kryterium podimpedancyjnym [1], w którym miejsce zwarcia tożsamy jest z wyznaczoną impedancją zgodną pętli zwarciowej Z_p na podstawie pomiaru sygnału nośnego, którym jest prąd I_p i napięcie U_p o częstotliwości podstawowej 50 Hz zgodnie z zależnością (1).

$$Z_p = \frac{U_p}{I_p} \quad (1)$$

gdzie:

U_p, I_p – fazy napięcia i prądu mierzone w miejscu przyłączenia zabezpieczenia.

W stanie pracy normalnej, bez zakłóceń, w sygnale analogowym (prąd, napięcie) powinna występować jedynie składowa podstawowa o częstotliwości 50 Hz. Jednakże w rzeczywistości sygnał pomiarowy oprócz składowej podstawowej zawiera również inne sygnały, nakładające się na siebie i tworzące wypadkowy sygnał wejściowy zabezpieczenia [4]:

$$\begin{aligned}
 u_a(t) &= x_1 \cdot \cos(\omega_1 t - \alpha_1) + && \text{podstawowa} \\
 & && \text{harmoniczna (50 Hz)} \\
 \sum_{n=2}^m x_n \cdot \cos(h\omega_1 t - \alpha_n) &+ && \text{sygnał zawierający} \\
 & && \text{wyższe harmoniczne} \\
 x_a \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} &+ && \text{składowa aperiodyczna} \\
 \sum_{k=1}^r x_{ak} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} \cdot \cos(\omega_k t - \beta_k) &+ && \text{składowa oscylacyjna} \\
 e(t) & && \text{sygnał błędu}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Streszczenie: Ciągły postęp ewolucyjny systemu elektroenergetycznego wymaga dopasowania środków ochrony przed skutkami zakłóceń do zmieniających się warunków stosowanych. W tym zakresie m.in. dokonywana jest wymiana analogowych przekaźników zabezpieczeniowych na ich cyfrowych następców. Zmiany często prowadzą do refleksji, czy taka zmiana technologii prowadzi do polepszenia, czy do pogorszenia ochrony systemu elektroenergetycznego. Biorąc pod uwagę zabezpieczenia odległościowe linii WN, przeprowadzono serię wybranych testów reprezentatywnych egzemplarzy zabezpieczeń analogowych i cyfrowych, mających na celu uzyskanie w określonym zakresie odpowiedzi na postawione pytanie.

Słowa kluczowe: automatyka zabezpieczeniowa sieci wysokich napięć, analiza parametrów sieci 110 kV, zabezpieczenia odległościowe linii WN

TRANSIENT STUDIES OF THE MEASUREMENT AND DECISION ALGORITHM OF DIGITAL AND ANALOG DISTANCE PROTECTION SYSTEMS

Abstract: In this paper, they were conducted laboratory tests in order to verify the accuracy of the measurement and decision-making of selected distance protection in the execution of digital and analogue. Were carried out based on actual measurements of the distribution network parameters 110 kV, analyzing the frequency deviation and content of higher harmonic currents and phase voltages.

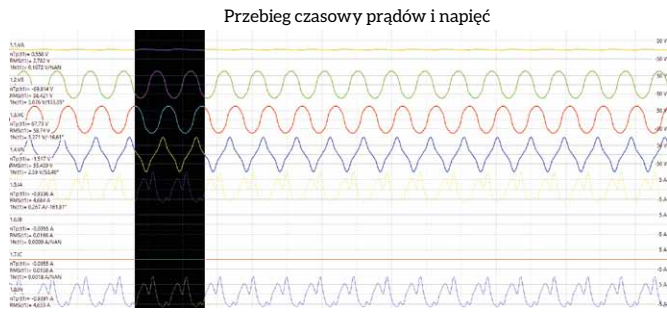
Keywords: System protection high-voltage network, analysis parameters power system 110 kV, line distance protection

gdzie:

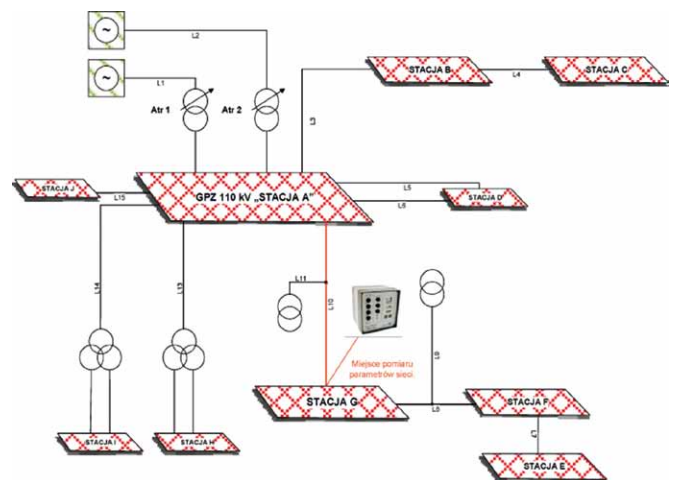
T_a – stała czasowa zanikania składowej aperiodycznej;

T_k – stała czasowa zanikania składowej oscylacyjnej.

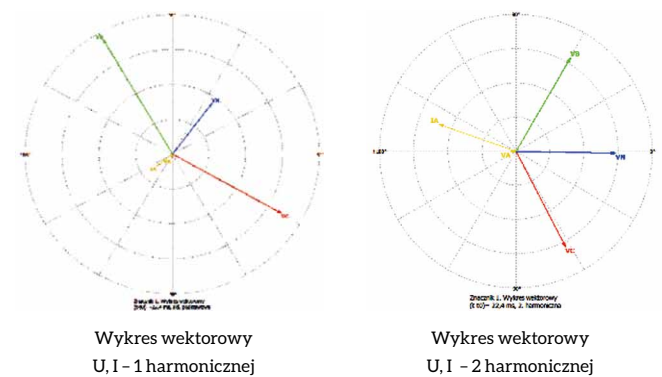
Zabezpieczenie, otrzymując sygnał zniekształcony (2), wyznacza impedancję pętli zwarciowej różną od rzeczywistej (rys. 1). Może to powodować błędne działanie automatyki zabezpieczeniowej (zbędne lub nieprawidłowe). W celu prawidłowego działania algorytmu pomiarowego istotne znaczenie ma filtracja sygnału pomiarowego, tak aby układ mierzący otrzymał



Rys. 1. Przykładowe przebiegi chwilowe prądów i napięć podczas zwarcia



Rys. 3. Fragment analizowanej sieci dystrybucyjnej 110 kV

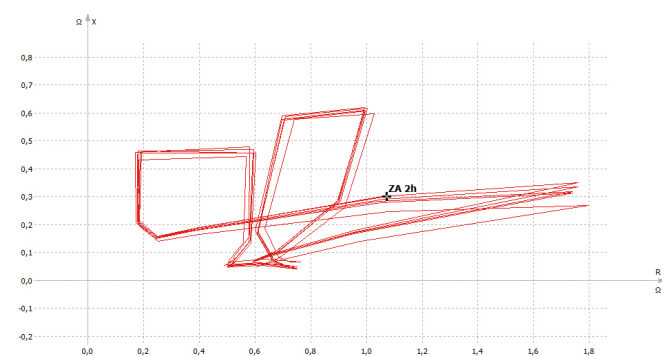


Wykres wektorowy U, I - 1 harmonicznej

Wykres wektorowy U, I - 2 harmonicznej



Trajektoria wektora impedancji ZA_1h 1 harmonicznej



Trajektoria wektora impedancji ZA_2h 2 harmonicznej

Rys. 2. Wykres wektorowy i trajektoria wektora impedancji (fazy A) dla 1 i 2 harmonicznej dla przebiegu z rys. 1

dane do obróbki, zawierające w idealnym przypadku jedynie składową podstawową. Ponieważ obszar działania zabezpieczeń odległościowych linii obejmuje przede wszystkim stany zakłóceniowe, tj. zwarcia wieloprądowe, to właśnie te sygnały powinny być analizowane pod kątem poprawności pomiarowej i decyzyjnej układów automatyki zabezpieczeniowej.

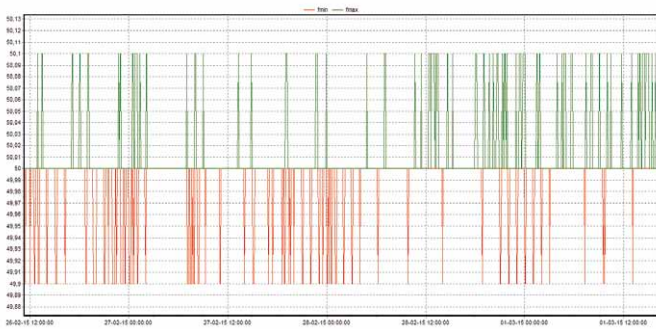
Podczas zakłóceń prądy i napięcia „jakościowo” odbiegają od sygnałów zawierających jedynie składową podstawową. Pojawiają się wtedy wyższe harmoniczne, składowe oscylacyjne, składowe nieokresowe. Z tego właśnie powodu warto przyrzeć się głównym torom przetwarzania w układach zabezpieczeniowych wykorzystujących technikę cyfrową i analogową. Pozwoli to określić, w jaki sposób zakłócone sygnały wejściowe wpływają na poprawność pomiarową i decyzyjną zabezpieczeń odległościowych. Stanowi to cel niniejszej publikacji, która podzielona jest na dwie części, tworzące integralną całość.

W części pierwszej zostaną przeanalizowane wybrane aspekty jakości prądu i napięcia sieci dystrybucyjnej 110 kV. Część druga obejmować będzie testy laboratoryjne wybranych zabezpieczeń odległościowych, których działanie opiera się o technikę analogową (elektroniczne) oraz cyfrową (mikroprocesorowe).

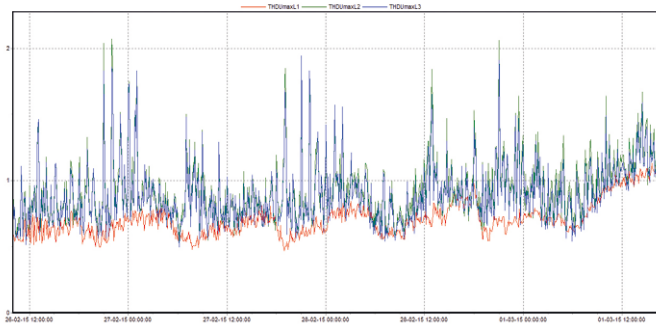
2. Analiza parametrów sieci 110 kV

Przeprowadzona analiza wybranych parametrów prądów i napięć sieci dystrybucyjnej 110 kV ma na celu pozyskanie informacji o jakości tych sygnałów w stanie normalnej (bezzałóceniowej) pracy systemu.

Opierając się na pozyskanych wynikach analizy, zostały one również wykorzystane w dalszej części pracy dotyczącej testów laboratoryjnych. Brane pod uwagę były między innymi odchylenia częstotliwości (rys. 3) oraz występujące wyższe harmoniczne napięcia (rys. 4, 5) i prądu (rys. 6, 7). Analiza parametrów sieci wykorzystywała przebiegi czasowe napięć i prądów w wybranym fragmencie sieci 110 kV, znajdującym się w aglomeracji Polski południowej w bliskim otoczeniu zakładów



Rys. 4. Maksymalne i minimalne odchylenia częstotliwości w czasie trwania rejestracji



Rys. 5. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w napięciach fazowych

przemysłowych (rys. 2). Rejestracja trwała 3 dni (dwa dni robocze: czwartek, piątek oraz dzień wolny od pracy: sobota). Rejestracja została przeprowadzona za pomocą analizatora jakości sieci typu REM – 370 firmy TIME – NET.

Analizując wartości częstotliwości sieci w stanie normalnej pracy (rys. 4), zauważyć można maksymalne odchylenia w granicach $50 \text{ Hz} \pm 0,1$.

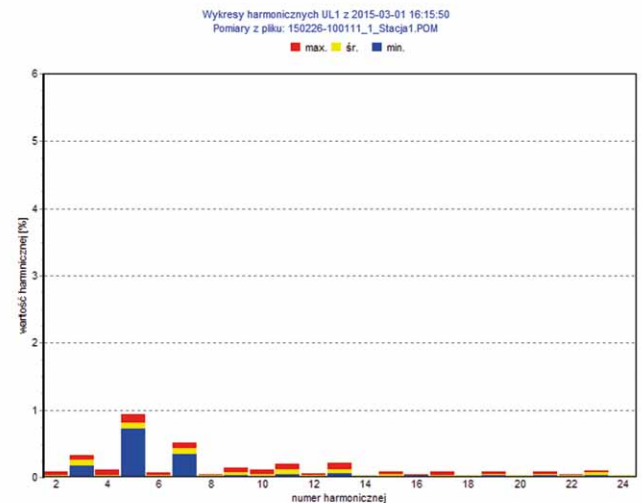
Rejestracja widma harmonicznych napięć fazowych (rys. 6) wskazuje największy udział wyższych harmonicznych w odniesieniu do składowej podstawowej – harmoniczne rzędu nieparzystego: 3, 5, 7.

Rejestracja widma harmonicznych prądów fazowych (rys. 8) wskazuje największy udział wyższych harmonicznych w odniesieniu do składowej podstawowej – harmoniczne rzędu nieparzystego: 2, 3, 4, 5, 11, 13.

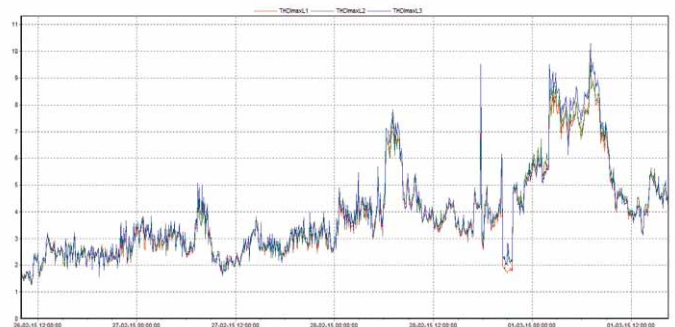
3. Charakterystyka wybranych zabezpieczeń odległościowych

3.1. Analogowe zabezpieczenie odległościowe

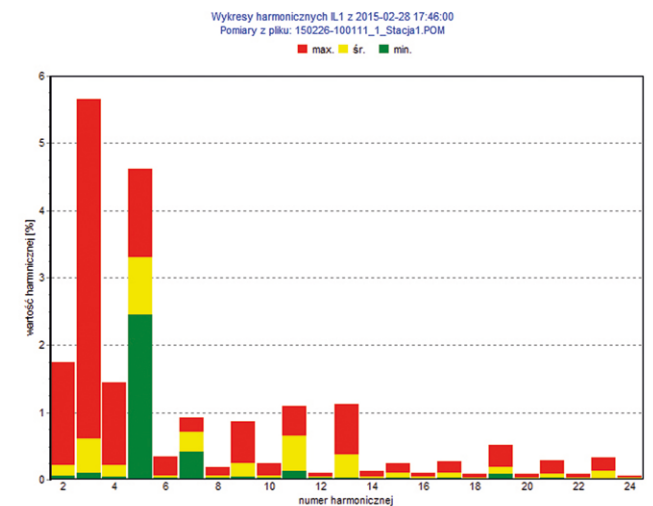
Wybrane zabezpieczenie analogowe jest zabezpieczeniem statycznym (tranzystorowym) przeznaczonym dla linii 110 kV. Zabezpieczenie posiada trójstrefową charakterystykę impedancyjno-czasową $t = f(Z)$ o różnych kształtach oraz strefę dodatkową dla automatyki SPZ (rys. 9).



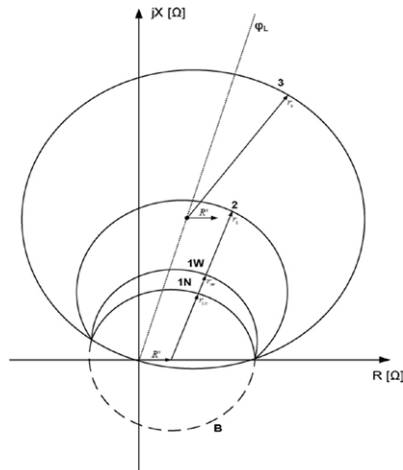
Rys. 6. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w napięciach fazowych



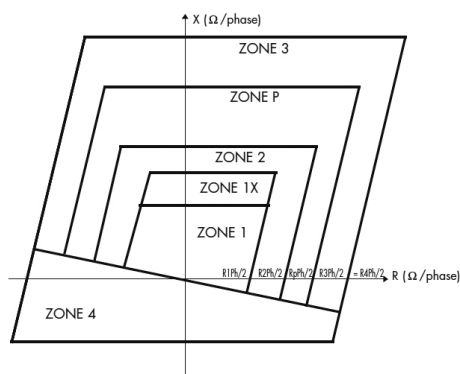
Rys. 7. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w prądach fazowych



Rys. 8. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w prądach fazowych



Rys. 9. Charakterystyki pomiarowe zabezpieczenia analogowego na płaszczyźnie zespolonej



Rys. 10. Charakterystyki pomiarowe zabezpieczenia cyfrowego na płaszczyźnie zespolonej

Zabezpieczenie posiada dla wszystkich stref wspólne układy przygotowujące wielkości zespolone, wspólne układy prostująco-filtrujące oraz wspólne statyczne wybiorniki wartości maksymalnych i minimalnych. Układ filtrujący jest realizowany za pomocą elektronicznego filtra dolnoprzepustowego RC o częstotliwości odcięcia 100 Hz.

3.2. Cyfrowe zabezpieczenie odległościowe

Działanie zabezpieczenia odległościowego w wykonaniu cyfrowym oparte jest na zastosowaniu dwóch typów algorytmów. „Delta” – nazywany też algorytmem szybkim, wykorzystujący wartości przyrostowe prądów i napięć charakterystycznych dla zwarcia. Obliczanie odległości do miejsca zwarcia dokonywane jest przez „algorytmy pomiaru impedancji” wykorzystujące metodę Gaussa-Seidela. „Klasyczny” wykorzystuje klasyczną metodę wyznaczania impedancji po wystąpieniu zwarcia. Zabezpieczenie posiada pięciostrefową charakterystykę impedancyjno-czasową poligonalną $t = f(Z)$ oraz strefę dodatkową dla automatyki SPZ (rys. 10).

Wykorzystanym układem filtrującym sygnał analogowy jest filtr cyfrowy o skończonej odpowiedzi impulsowej (SOI).

4. Laboratoryjne badanie poprawności pomiarowej i decyzyjnej wybranych zabezpieczeń odległościowych

Dla przyjętego układu sieciowego (rys. 3) skonfigurowano i sparametryzowano zabezpieczenia odległościowe (analogowe i cyfrowe) w zakresie stref pomiarowych i rozruchowych. Następnie tak sparametryzowane kryterium podimpedancyjne poddano laboratoryjnej weryfikacji w zakresie poprawności podejmowanych decyzji identyfikujących miejsce wystąpienia zakłócenia. Aparatura użyta do badań to cyfrowy tester ARTES 440 II firmy KoCoS. Badania przeprowadzone zostały zarówno dla monoharmonicznych, jak i zakłóconych sygnałów wejściowych. Szczególnie uwzględniono sytuacje w obszarach rozgraniczających strefy pomiarowe. Z uwagi na powtarzalność symulacji zdecydowano, że badania zostaną przeprowadzone tylko dla pierwszej strefy pomiarowej.

Dla przykładowego analogowego i cyfrowego rozwiązania zabezpieczeń odległościowych zbadano laboratoryjnie i przeanalizowano wpływ postaci wejściowych sygnałów pomiarowych (prądów) na poprawność estymacji pętli zwarciowej. Założono następujące formy wejściowych sygnałów pomiarowych: sygnały monoharmoniczne o znamionowej częstotliwości, o odchylonej częstotliwości ± 2 Hz, sygnały monoharmoniczne + składowa aperiodyczna o zmiennej stałej czasowej zanikania T , sygnały poliharmoniczne o zróżnicowanej zawartości wyższych harmonicznych.

Badanie granicy strefy pomiarowej oparte było na wyznaczeniu różnicy wyników dla kilku wybranych punktów pomiarowych. Do określania poprawności pomiarowej i decyzyjnej wyznaczono błąd impedancyjny δZ (3), za pomocą którego określony zostanie rozrzut zasięgu strefy, który może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne. Wyznaczono również błąd czasowy δt (4), ponieważ sygnały zakłócenia w głównym torze pomiarowym wpływają również na czas podejmowania decyzji zabezpieczenia.

$$\delta Z = \left(\frac{Z_{wz} - Z_{od}}{Z_{od}} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\delta t = \left(\frac{t_{zm} - t_{od}}{t_{od}} \right) \cdot 100\% \quad (4)$$

Przez pojęcie impedancja odniesienia (Z_{od}) należy rozumieć wyznaczoną granicę działania strefy pomiarowej dla warunków, w których to sygnał pomiarowy (prąd, napięcie) występuje bez zakłócenia, tj. dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz. Impedancja odniesienia (Z_{od}) jest to wartość średnia dla trzech następujących po sobie prób pomiarowych. Wartość wyznaczonej impedancji (Z_{wz}) również została przedstawiona jako wartość średnia dla trzech prób pomiarowych. Czas odniesienia (t_{od}), podobnie jak impedancja odniesienia (Z_{od}),

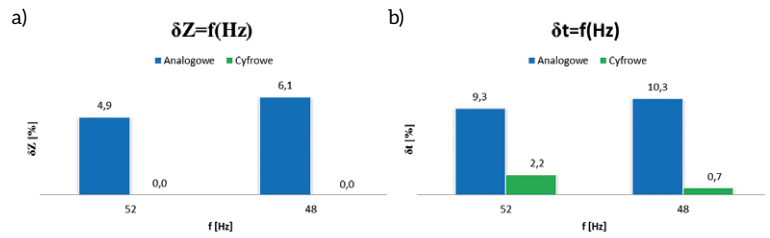
jest czasem działania zabezpieczenia dla sygnału pomiarowego bez zakłóceń, wyznaczonym jako wartość średnia z trzech pomiarów. Czas działania jest nieco dłuższy, niż by to wynikało z czasu nastawionego dla strefy pomiarowej z uwzględnieniem czasu własnego zabezpieczenia. Różnica ta wynika z naturalnego przejścia jednej strefy pomiarowej w drugą, co oznacza, że czas działania zabezpieczenia na granicy strefy wydłuża się o kilka do kilkunastu milisekund. Dlatego jako wartość odniesienia postanowiono przyjąć wartość średnią pomiarową, a nie teoretyczną, wynikającą z parametrów zabezpieczenia. Aby móc porównywać ze sobą dwie wielkości, czas zmierzony (t_{zm}) podawany został również jako wartość średnia z trzech następujących po sobie pomiarów. Testy odbywały się za pomocą stałej amplitudy prądu testu ($2I_n$) przy zmiennej amplitudzie napięcia fazowego oraz kąta fazowego. Pierwsze okno testowe w czasie od 0 do 500 ms odzwierciedlało stan pracy linii w warunkach normalnych, po czasie 500 ms następowała generacja zakłóconego sygnału (zwarcie) o zmiennej wartości częstotliwości, zawierającego wyższe harmoniczne oraz składową aperiodyczną.

4.2. Analiza porównawcza poprawności działania testowanych zabezpieczeń odległościowych

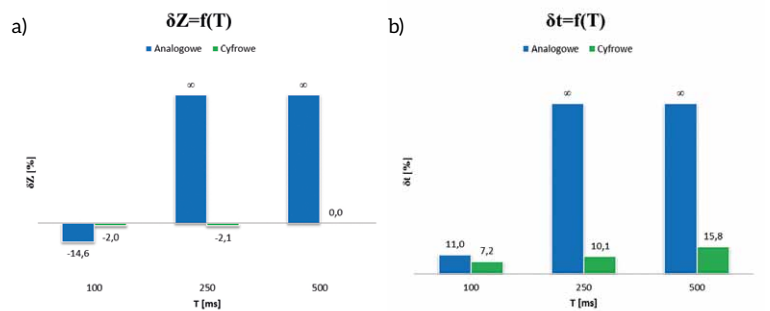
Analiza poprawności pomiarowej i decyzyjnej wybranych zabezpieczeń odległościowych ze względu na zadane sygnały testowe została przeprowadzona w formie porównawczej za pomocą wykresów słupkowych wyznaczonych błędów impedancyjnych i czasowych. Błąd impedancyjny na podstawie (3) – rys. 11 a, 12 a, 13 a oraz czasowy na podstawie (4) – rys. 11 b, 12 b, 13 b. Badaniom podlegała dokładność filtracyjna głównego toru pomiarowego oraz algorytmu decyzyjnego. Elementy filtracyjne zabezpieczeń zostały poddane badaniom weryfikacyjnym m.in. odporności na zmianę częstotliwości sygnału pomiarowego w zakresie 50 ± 2 Hz.

W pierwszej sekwencji testowej zabezpieczenie cyfrowe wykazało znacznie większą odporność na odkształcenie częstotliwości sygnału testowego. Zmiany częstotliwości w zadanym zakresie nie wpłynęły na zmianę zasięgu strefy pomiarowej zabezpieczenia cyfrowego, również czas działania został praktycznie niezmienny (rys. 11). Odwrotne działania wykazało zabezpieczenie analogowe, którego zasięg strefy pomiarowej wydłużył się maksymalnie o 6,1%, a czas zadziałania uległ wydłużeniu o 10,3% (rys. 11).

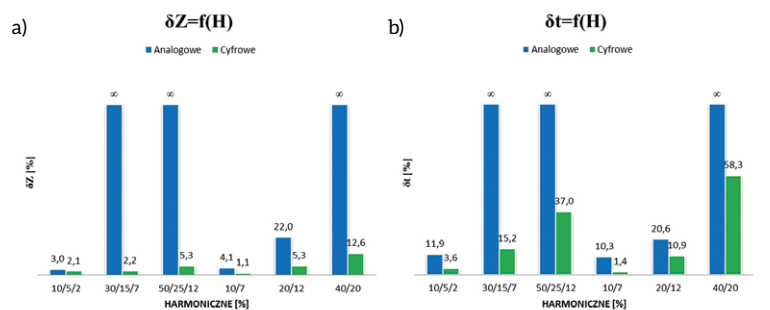
Kolejnym etapem badań laboratoryjnych było określenie wpływu obecności składowej aperiodycznej o różnym czasie zanikania na poprawność pomiarową. Również tym razem zabezpieczenie cyfrowe wykazało względnie lepsze właściwości filtracyjne. W tym przypadku zasięg strefy pomiarowej uległ skróceniu o -2,1%, a czas działania maksymalnie wydłużył się o 15,8% (rys. 12). Zabezpieczenie analogowe wykazało dużą



Rys. 11. Błąd a) impedancyjny i b) czasu zadziałania zależnie od zmiennej częstotliwości



Rys. 12. Błąd a) impedancyjny i b) czasu zadziałania zależnie od zmiennej stałej czasowej zanikania składowej aperiodycznej



Rys. 13. Błąd a) impedancyjny i b) czasu zadziałania zależnie od zawartości wyższych harmonicznych

wrażliwość na obecność składowej aperiodycznej w sygnale prądowym. W skrajnych przypadkach dla obranych punktów pomiarowych zabezpieczenie nie zadziało, co na wykresach słupkowych (rys. 12) oznaczono jako „ ∞ ”. Testy wykazały, że zabezpieczenie „próbowało” podjąć decyzję o zwarcie w strefie, jednak kończyło się to tylko szybkim „cykaniem” przekaźnika, który powinien podać trwały impuls wyłączający z czasem danej strefy.

W ostatniej sekwencji pomiarowej zbadany został wpływ wybranych wyższych harmonicznych parzystych i nieparzystych na właściwości filtracyjne. Ponownie zabezpieczenie cyfrowe wykazało lepsze właściwości filtracyjne. Nieparzyste harmoniczne (3, 5, 7) w sygnale pomiarowym spowodowały

Tabela 1. Analiza porównawcza poprawności pomiarowej i decyzyjnej zabezpieczenia odległościowego analogowego i cyfrowego pod względem spełnienia wymagań [3]

SYGNAŁ		CYFROWE		ANALOGOWE	
		δZ	δt	δZ	δt
Częstotliwość	52 Hz	Brak zmian	2,2%	4,9%	9,3%
	48 Hz	Brak zmian	0,7%	6,1%	10,3%
Wymaganie	(1)	SPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	
	(2)	SPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	
	(3)	SPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	
Wyższe harmoniczne	Nieparzyste h3, h5, h7	max 5,3%	max 37,0%	Brak zadziałania	Brak zadziałania
	Parzyste h2, h4	max 12,6%	max 58,3%	Brak zadziałania	Brak zadziałania
Wymaganie	(1)	NIESPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	
	(2)	Nie dotyczy		Nie dotyczy	
	(3)	NIESPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	
Składowa aperiodyczna	100 ms	-2,0%	7,2%	Brak zadziałania	Brak zadziałania
	500 ms	0,0%	15,8%	Brak zadziałania	Brak zadziałania
Wymaganie	(1)	SPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	
	(2)	SPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	
	(3)	SPEŁNIONE		NIESPEŁNIONE	

wydłużenie zasięgu strefy pomiarowej maksymalnie o 5,3% (rys. 13). Większy wpływ na wydłużenie strefy działania miały harmoniczne parzyste (2 i 4) – zasięg strefy wydłużył się o 12,6% (rys. 13), co wskazuje na brak precyzyjnych filtrów cyfrowych dedykowanych dla parzystych wyższych harmonicznych. Czas zadziałania zabezpieczenia znacząco się wydłużył, najbardziej dla harmonicznych parzystych – o 58,3% (rys. 13). Zabezpieczenie analogowe, które posiada filtr LC dolnoprzepustowy, dla sygnału o znacznej zawartości wyższych harmonicznych w skrajnych przypadkach wykazało brak zadziałania (rys. 13). Podobnie jak przy składowej aperiodycznej, próba podjęcia decyzji była, lecz bez trwałego efektu wysłania impulsu wyłączającego.

Oznaczenia na rys. 13: 10/5/2, 30/15/7, 50/25/12 oznaczają zawartość harmonicznych kolejno 3 h = 10/30/50%, 5 h = 5/15/25%, 7 h = 2/7/12%.

10/7, 20/12, 40/20 oznacza zawartość harmonicznych kolejno 2 h = 10/20/40%, 4 h = 7/12/20%.


W tabeli nr 1 została przeprowadzona analiza spełnienia wymagań operatora systemu przesyłowego względem odporności algorytmów pomiarowych i decyzyjnych zabezpieczeń odległościowych na zniekształcone sygnały. Dokonano sprawdzenia spełnienia wybranych wymagań, zgodnie z [3]. Wymaganie (1): Zabezpieczenie prawidłowo określa strefę pomiarową $\pm 5\%$. Wymaganie (2): Zabezpieczenie pracuje prawidłowo dla częstotliwości znamionowej 50 Hz, 52 Hz oraz 47 Hz. Wymaganie (3): Zabezpieczenie działa z czasem nastawionym $\pm 5\%$. Analiza porównawcza poprawności pomiarowej i decyzyjnej zabezpieczenia odległościowego analogowego i cyfrowego pod względem spełnienia wymagań, przeprowadzona w tabeli 1, wskazuje na znacznie gorsze właściwości filtracyjne zabezpieczenia odległościowego analogowego. W przeprowadzonym zakresie testów nie spełnia ono żadnych z przytoczonych warunków.

5. Wnioski

Zabezpieczenia analogowe są sukcesywnie wycofywane z eksploatacji i zastępowane zabezpieczeniami wykorzystującymi technikę cyfrową. Niemniej jednak wiele egzemplarzy pozostaje jeszcze w eksploatacji. Przeprowadzone badania wykazują niespełnienie wybranych warunków dla zabezpieczenia analogowego, jakie stawiane są zabezpieczeniom odległościowym linii operatora systemu przesyłowego. Niemniej należy podkreślić, że badania przeprowadzono dla wybranych egzemplarzy zabezpieczeń. Aby potwierdzić otrzymane wyniki z badań, należałoby przeprowadzić takie same próby dla większej liczby egzemplarzy, aby wykluczyć ewentualną niesprawność zabezpieczenia. Uzyskane wyniki badań skłaniają do podjęcia dalszych badań mających na celu weryfikację prawidłowej współpracy zabezpieczeń odległościowych opartych o technikę analogową i cyfrową w przypadku pracy współbieżnej.

Literatura

- [1] BEDNARCZYK T.: Wybrane zagadnienia zabezpieczeń odległościowych linii. Część 1 – Kryterium podimpedancyjne oraz parametryzacja zasięgów reaktancyjnych stref pomiarowych. „Elektro info” 11/2016.
- [2] Standardowe specyfikacje krajowe. NK:PSE SF.KSE1/2005 Krajowy system elektroenergetyczny. PSE Operator. Warszawa 2005.
- [3] Standardowe specyfikacje techniczne. Zabezpieczenie odległościowe linii 110 kV. PSE-ST.EAZ.A.110.0/2008v3. Warszawa, kwiecień 2012.
- [4] WISZNIEWSKI A., SZAFRAN J.: Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej. WNT. Warszawa 2004.

 Tomasz Bednarczyk - Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów