

WYNIKI TESTÓW DZIAŁANIA UKŁADU FAŁOWEJ LOKALIZACJI MIEJSCA ZWARCIA W WARUNKACH LABORATORYJNYCH – REFERAT KONFERENCYJNY

Krzysztof GLIK¹, Desire Dauphin RASOLOMAMPIONONA¹

1. Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Aparatów Elektrycznych i Automatyki Elektroenergetycznej
tel: 22347351 fax:222345617 e-mail: krzysztof.glik@ien.pw.edu.pl, desire.rasolomampionona@ien.pw.edu.pl

Streszczenie: W artykule opisano algorytm falowej lokalizacji miejsca zwarcia w linii wysokiego napięcia (WN) oparty na przekształceniu falkowym, który zaimplementowano w prototypie urządzenia, a następnie przetestowano w warunkach laboratoryjnych. Artykuł przedstawia opis części sprzętowej i programowej falowego lokalizatora miejsca (FLMZ), metodykę oraz wyniki testów.

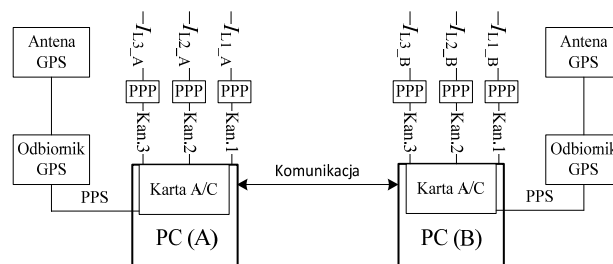
Słowa kluczowe: lokalizator, linia WN, przekształcenie falkowe.

1. WSTĘP

Falowa lokalizacja miejsca zwarcia charakteryzuje się lepszą dokładnością w porównaniu do powszechnie wykorzystywanych metod impedancyjnych. Dokładność ta jest szczególnie lepsza dla zwarć z dużą rezystancją przejścia, dla linii WN szeregowo kompensowanych czy dwutorowych, dlatego też tematyka ta spotyka się z dużym zainteresowaniem [1], [2]. Zagadnienia dotyczące doświadczeń eksploatacyjnych falowych lokalizatorów opisano w [3] – [7]. Testowanie laboratoryjne takich lokalizatorów jest rzadko poruszane [8], a jedynie dokładne przetestowanie urządzenia w warunkach laboratoryjnych pozwala na niezawodne działanie przy różnych rodzajach zwarć, które występują w linii WN. Głównym problemem przy przeprowadzeniu testów laboratoryjnych jest generacja sygnału wysokoczęstotliwościowego (1 – 1,5 MHz), o odpowiednim przebiegu i czasie narastania zbocza. Urządzenia, które wykorzystywane są do testowania konwencjonalnych lokalizatorów/zabezpieczeń elektroenergetycznych (przykładowo Omicron CMC, który znajduje zastosowanie przy testach zabezpieczeń [9]), mogą generować sygnał do paru kHz dlatego też, niezbędne było zestawienie nowego stanowiska testowego.

2. CZĘŚĆ SPRZĘTOWA LOKALIZATORA

Działanie układu falowej lokalizacji bazuje na pomiarze prądów w trzech fazach na dwóch krańcach linii WN przez dwa oddzielne urządzenia (rys. 1). Pośredniczący przekładnik prądowy jest dostosowany do prądu wtórnego głównego przekładnika prądowego oraz charakteryzuje się zwiększonym pasmem przenoszenia. Synchronizacja dwóch urządzeń (PC A i PC B razem z kartami analogowo-cyfrowymi A/C) jest zapewniona poprzez system GPS. Odbiornik GPS generuje sygnał synchronizujący PPS, który jest przesyłany na wejście wyzwalające próbkowanie karty analogowo-cyfrowej. Każdy z prądów jest przetwarzany z częstotliwością 1 MHz. Gdy dochodzi do zwarcia, czas nadejścia fal do dwóch przeciwnych stacji jest przesyłany między dwoma komputerami, w celu określenia dokładnego miejsca zwarcia.



Rys. 1. Schemat blokowy falowego lokalizatora miejsca zwarcia, PPP – pośredniczący przekładnik prądowy, PPS (*ang.* pulse per second) – sygnał synchronizacyjny

3. CZĘŚĆ PROGRAMOWA LOKALIZATORA

3.1. Algorytm lokalizacji miejsca zwarcia

W urządzeniu zaimplementowano algorytm lokalizacyjny, przedstawiony w artykule [10]. Lokalizacja opiera się na pomiarze prądów z trzech faz po obu stronach linii WN, następnie wykonywane jest przekształcenie 0, α , β . Otrzymu-

je się składowe diagonalne, które następnie poddawane są przekształceniu falkowemu. Algorytm opiera się na falce biortogonalnej 3.3., przy czym wykorzystywane są współczynniki drugiego poziomu dekompozycji falkowej (zakres częstotliwości 125 kHz – 250 kHz dla częstotliwości próbkowania 1 MHz). Przekształcenie falkowe jest realizowane za pomocą algorytmu Mallat'a [11].

W algorytmie przedstawionym w [10] do detekcji i klasyfikacji zwarcia wykorzystano przekształcenie falkowe, zaś w prototypie urządzenia detekcja i klasyfikacja jest oparta na składowej okresowej, zaś sama lokalizacja wykorzystuje przekształcenie falkowe. Wynika to głównie z założenia, że przy pierwszych próbach prototypu, najważniejszą kwestią jest poprawna detekcja zwarcia, co na tym etapie testów wydaje się bardziej osiągalne przy zastosowaniu konwencjonalnych metod.

3.2. Interfejs użytkownika

Interfejs graficzny zrealizowano przy pomocy środowiska Visual Studio 2008 i obiektowego języka programowania C#. Pierwsze okno programu pozwala na wybór karty pomiarowej, kanału próbkowania, zakresu pomiarowego oraz częstotliwości próbkowania. Następne okno pozwala na obserwację sygnału wejściowego na wszystkich dostępnych kanałach w czasie rzeczywistym.

Wszystkie zarejestrowane zwarcia są następnie zapisywane w bazie danych (rys. 2), z możliwością ich późniejszego analizowania i przeglądania przebiegów czasowych.

Lp.	Data zwarcia	Stacja A	Stacja B	Długość linii [km]	Typ zwarcia	Odł. do miejsca zwarcia (st. A)	Odł. do miejsca zwarcia (st. B)
65	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
64	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
63	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
62	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
61	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
60	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
59	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
58	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
57	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
56	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
55	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
54	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
53	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4
52	2013-01-30_07:4	Sochaczew	Mory	100km	L1-E	20.6	80.4

Rys. 2. Interfejs graficzny – FLMZ rejestr zdarzeń

4. PIERWSZY UKŁAD TESTOWY

Pierwszy układ testowy pozwala na wstępne sprawdzenie działania układu falowego lokalizatora. Co ważne, można za pomocą tego układu sprawdzić, czy zastosowany przekładnik prądowy przenosi w sposób prawidłowy wysokie częstotliwości oraz nie zniekształca przedniego czoła fali. Sygnał z symulowanego zwarcia za pomocą baterii 9 V jest wysyłany jednocześnie na wejście dwóch zsynchronizowanych ze sobą kart analogowo-cyfrowych. Taką metodę badania, wykorzystuje Qualitrol w przypadku lokalizatora TWS Mark VI [12].

Układ testowy jest bardzo podobny do tego przedstawionego na rysunku 1. Jediną różnicą jest bateria, która znajduje się po pierwotnej stronie pośredniczących przekładników prądowych przewidzianych dla urządzeń A i B. Impuls w urządzeniu B pojawia się z różnicą nie większą niż 1 μs w porównaniu do urządzenia A, co odpowiada standardowemu błędowi synchronizacji dla systemu GPS. Genero-

wano impuls wielokrotnie dla wszystkich faz, co potwierdza poprawność dobranych elementów składowych układu falowej lokalizacji miejsca zwarcia.

5. DRUGI UKŁAD TESTOWY

5.1. Schemat blokowy

Drugi układ testowy wykorzystuje próbki otrzymane po zwarcium symulowanym w programie PSCAD/EMTDC (program do symulacji elektromagnetycznych składowych przejściowych). Celem poniższej analizy jest zbadanie jak algorytm falowy działa przy zwarcium łukowym.

Modelowany jest łuk pierwotny, który pojawia się w miejscu zwarcia doziemnego.

Próbki otrzymane z programu PSCAD/EMTDC są zapisywane w pamięci komputera (PC RAM), a następnie są wykorzystywane w algorytmie dwóch zsynchronizowanych ze sobą urządzeń. Próbki są wczytywane po pojawieniu się sygnału wyzwalającego (PPS) na wejściu synchronizującym karty analogowo-cyfrowej.

5.2. Model systemu

W celu prawidłowego analizowania zjawisk falowych i sprawdzenia działania falowego algorytmu detekcji, klasyfikacji i lokalizacji miejsca zwarcia zamodelowano układ źródło zastępcze – linie WN – źródło zastępcze.

System przedstawiony na rysunku 5 składa się z trzech linii trójfazowych WN o napięciu 220 kV oraz długości $l_{G1-A} = 70$ km, $l_{A-B} = 100$ km, $l_{B-G2} = 150$ km. Linie WN są modelowane jako elementy o parametrach rozłożonych zależnych od częstotliwości. Zakłada się, że falowy lokalizator miejsca zwarcia jest zainstalowany w stacji A i B.

5.3. Model zwarcia łukowego

Łuk pierwotny zamodelowano jako zmienną rezystancję zależną od prądu, zgodnie z [13][14]. Zgodnie z [14]”:

$$\frac{dg_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (G - g_p) \quad (1)$$

gdzie:

g_p – zastępcza przewodność łuku pierwotnego,

G – przewodność statyczna łuku,

τ_p – stała czasowa procesu palenia się łuku.

Przyjęto:

$u_p = 15$ V/cm, charakterystyczne napięcie jednostkowe łuku,

$R_{\text{Łuk}} = 10\text{-}5$ Ω/cm, charakterystyczna jednostkowa rezystancja łuku,

$l_{\text{Łuk}} = 400$ cm, długość łuku elektrycznego

$$\tau_{\text{Łuk}} = \frac{\alpha I_p}{I_{\text{Łuk}}} \quad (2)$$

Przyjęto:

$\alpha = 2,5 \cdot 10^{-5}$, stały parametr,

$I_p = 15000$ A, zakładana szczytowa wartość prądu łuku.

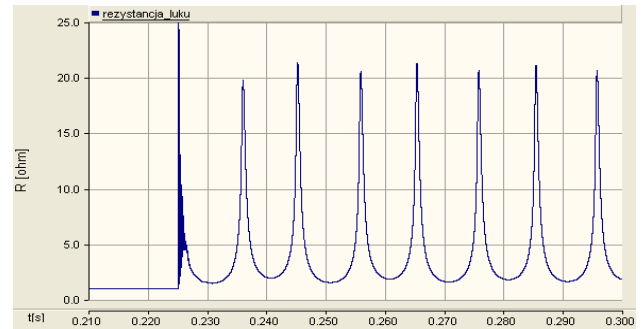
$$g(k) = G \cdot (1 - a_1) + g(k-1) \cdot a_1 \quad (3)$$

$$a_1 = e^{-T/\tau_p}, T - \text{ krok modelowania}$$

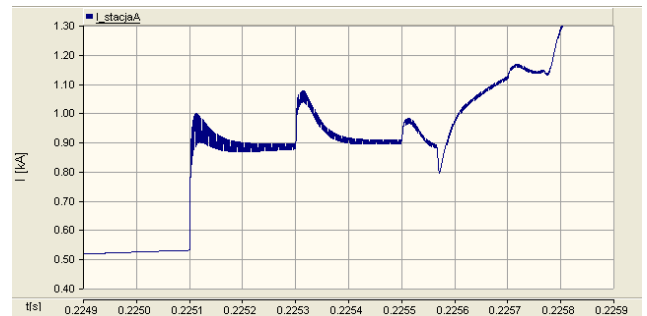
$$g(0) = 0,054 \cdot \frac{i}{u_p \cdot l} \quad (4)''$$

Na rysunku 3 przedstawiono zmienną w czasie rezystancję łuku elektrycznego występującego w miejscu zwarcia, którą otrzymano w wyniku symulacji układu z rysunku 5.

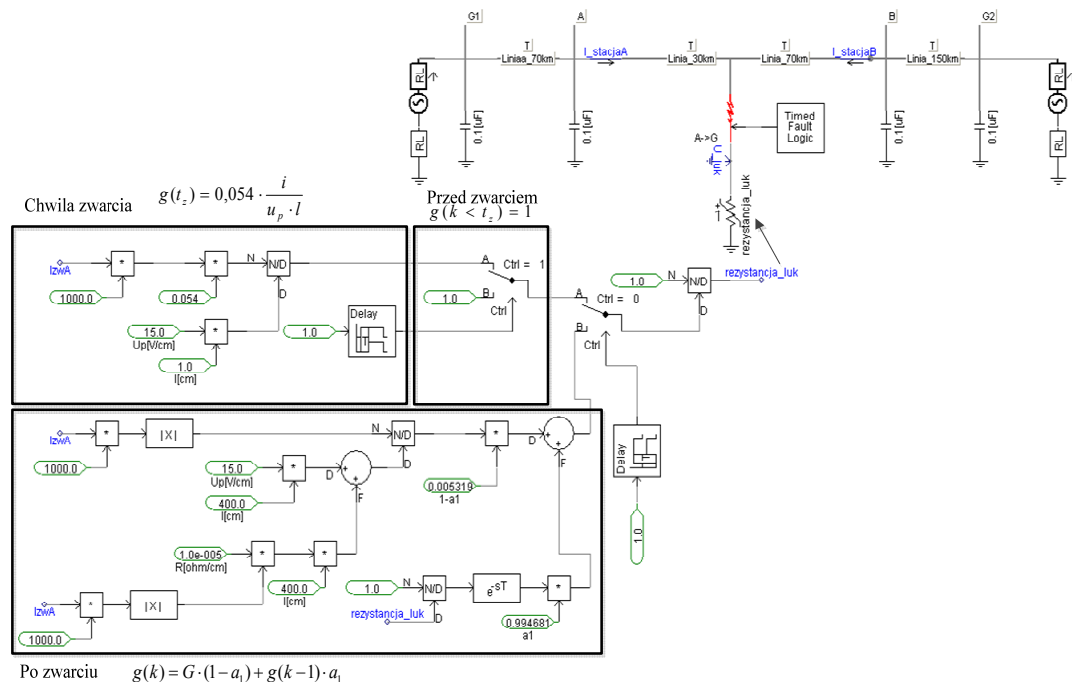
Prąd zwarciovowy w stacji A przedstawiono na rysunku 4. Zwarcie zachodzi w chwili $t_z = 0,225$ s. Można zaobserwować po tym czasie nakładanie się wysokoczęstotliwościowego sygnału na fale prądowe. Mimo dodatkowych składowych kształt fal nie zmienia się znacząco, dzięki czemu algorytm falowy działa poprawnie dla tego typu zwarc.



Rys. 3. Rezystancja łuku elektrycznego, PSCAD/EMTDC



Rys. 4. Prąd zwarciovowy w stacji A po wystąpieniu zwarcia łukowego, $t_z = 0,225$ s, PSCAD/EMTDC



Rys. 5. Model łuku pierwotnego, PSCAD/EMTDC

5.4. Wyniki działania algorytmu

Zrealizowano liczne testy, dla różnej odległości miejsca zwarcia i kąta dla zwarcia jednofazowego L1-E łukowego. Z przeprowadzonych prób wynika błędne działanie algorytmu dla małych kątów zwarcia, oraz poprawne wyniki dla praktycznie wszystkich pozostałych otrzymanych przypadków.

Oprócz zwarc łukowych przetestowano algorytm dla różnych typów zwarc (L2-E, L1-L2, L1-L2-L3 itd.) przy czym uzyskano wyniki zbliżone do wyników symulacyj-

nych, które przedstawiono w publikacji [10], gdzie uwzględniono jedynie wyniki symulacyjne algorytmu (bez uwzględnienia sprzętu).

Prawidłowe działanie algorytmu wynika z doboru odpowiedniej falki do danego zastosowania, która będzie najbardziej podobna do poszukiwanej składowej sygnału, która w tym przypadku odpowiada wzrostowi prądu związanemu z propagacją fali elektromagnetycznej. Co więcej, odpowiednio wysoki zakres rozpatrywanego zakresu częstotliwości pozwala na precyzyjne określenie danego impulsu w czasie.

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone testy potwierdzają, że udało się opracować algorytm lokalizacji miejsca zwarcia oparty na przekształceniu falkowym, który pozwala na dokładną lokalizację zwarć w liniach elektroenergetycznych WN z wykorzystaniem występujących w nich zjawisk falowych. Algorytm ten zapewnia lokalizację miejsca zwarcia ze średnim błędem 250 m, wyłączając przypadki, gdy zwarcie zachodzi przy przejściu napięcia przez zero (lub w pobliżu: $\pm 2,5^\circ$).

Kolejnym krokiem w sprawdzeniu działania układu falkowej lokalizacji będzie testowanie urządzenia w rzeczywistych warunkach tzn. na stacji elektroenergetycznej. Ze względu na stosunkowo rzadkie występowanie zwarć w liniach WN, badania te mogą trwać długo. Z większym prawdopodobieństwem, możliwe będzie sprawdzenie lokalizatora w wypadku wystąpienia operacji łączeniowych, załączania baterii kondensatorów czy przy występowaniu wylądowań atmosferycznych. Tego typu zdarzenia, są źródłem sygnałów o wysokiej częstotliwości, które mogą być wykryte przez odpowiednio nastawiony falkowy lokalizator.

7. BIBLIOGRAFIA

1. K. Glik, R. Kowalik, D. Rasolomampionona, S. Anwar, „Travelling wave fault location in power transmission systems: an overview,” *Journal of Electrical Systems*, Nr 7, s. 287-296, 2011, ISSN: 1112-5209
2. J. Qin, X. Chen, J. Zheng, “Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform” *Proceedings of IEEE Powercon Conference*, s. 533-537, 1998, ISBN 0-7803-4754-4
3. P.F. Gale, P.V. Taylor, P. Naidoo, C. Hitchin, D. Clowes, “Travelling wave fault locator experience on ESKOM’s transmission network”, *Proc. IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection*, s. 327-330, 2001, ISSN 0537-9989
4. P.F. Gale, J. Stokoe, P.A. Crossley, “Practical experience with travelling wave fault locators on Scottish power’s 275&400kV transmission system” *Proc. Sixth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection*, s. 192-196, 1997, ISSN 0537-9989
5. B. Xu, Z. Shu, P. Gale, “The application of travelling wave fault locators in China” *Proc. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, s. 535-539, 2008, ISSN 0537-9989
6. A. El Haffar, M. Lehtonen, “Evaluation of travelling wave fault location based on field measurements”, *Proc. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, s. 601 – 605, 2008, ISSN 0537-9989
7. S.L. Zimath, M.A.F. Ramos, J.E.S. Filho, “Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults” *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, s. 1 – 5, 2010, ISBN 978-1-4244-6546-0
8. W. Zhen, Y.H. Tang, M. Liu, W. Pu, Z. Huang, “Travelling wave fault location test technique and its applications using high speed travelling wave generator”, *Proc. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2012)*, s. 1 – 4, 2012, ISSN: 2157-4839
9. R. Kowalik, M. Januszewski, D. Rasolomampionona “Problems Found During Testing Synchronous Digital Hierarchical Devices Used on Power Protection Systems”, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Nr 28 (1), s. 11 – 20, 2013, ISSN : 0885-8977
10. K. Glik, D. Rasolomampionona and R. Kowalik, “Detection, classification and fault location in HV lines using travelling waves”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 1a, s. 269 – 275, 2012, ISSN 0033-2097
11. S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. New York: Academic, 2008, ISBN: 0123743702
12. TWS Mk VI User Manual, *Travelling Wave Fault Locator*, document ID: 40-08534-02
13. A.T. Johns, R.K. Aggarwal, Y.H. Song, “Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems” *IEE – Generation, Transmission and Distribution*, Nr 141, s. 148 – 154, 1994, ISSN 1350-2360
14. E. Rosołowski, *Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych*, Wrocław: OWPW, 2009, s. 361, ISBN 978-83-7493-487-9

LABORATORY TEST RESULTS FOR THE TRAVELLING WAVE FAULT LOCATION SCHEME LOGIC – CONFERENCE PAPER

Key-words: fault location, HV line, wavelet transform

The article describes the travelling wave fault location algorithm for high voltage lines based on wavelet transform. The algorithm is implemented in a prototype and tested in laboratory. The article presents a hardware and software part of travelling wave fault locator, methodology and test results.