

Dariusz ELJASZ¹, Paweł URBAŃSKI²

¹UNIWERSYTET ZIELONOGÓRSKI, INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ, ul. Szafrana 50, 65-246 Zielona Góra

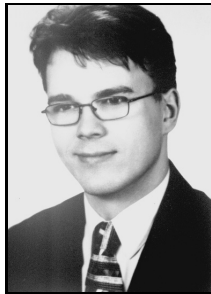
²RELPOŁ S.A. ZAKŁAD POLON, ul. Browarna 11, 65-849 Zielona Góra

Zastosowanie bezprzewodowych sieci sensorowych w lokalizacji zwarć doziemnych linii napowietrznych SN

Dr inż. Dariusz ELJASZ

Ukończył studia wyższe na kierunku Informatyka o specjalności Przemysłowe Systemy Informatyczne na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego w 2004r. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Instytucie Metrologii Elektrycznej na macierzystym wydziale. Stopień naukowy doktora otrzymał na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji w 2013r. Zainteresowania naukowe określone są w dziedzinie komunikacji bezprzewodowej.

e-mail: D.Eljasz@ime.uz.zgora.pl



Streszczenie

Zwarcia w liniach SN są bardzo częstymi zjawiskami. Skutki związane ze zvarciami to zagrożenie dla sprzętu i personelu. W artykule przedstawiono ideę wykrywania i lokalizacji zwarć doziemnych z wykorzystaniem sieci sensorowych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem sensorów opracowanych w firmie Relpol S.A. zakład Polon.

Słowa kluczowe: lokalizator zwarć doziemnych, sieci sensorowe.

The use of wireless sensor networks in ground fault location system for MV overhead power line

Abstract

Ground fault on MV overhead power line are very common phenomena. Effects associated with this kind of fault are overcurrent, overvoltage causing danger to equipment and personnel. Typical protection algorithms may not be effective for intermittent faults. In the article a prototype solution-based fault locator based on sensor networks arranged along a power line [2] (Fig 1, 2) are presented. The measurement data are transmitted via radio link to a central point (gateway), and then based on them, fault location is made. In chapter 3 a prototype node for ground fault detecting (Fig. 3) developed at RELPOL S.A. division Polon are presented. In this same chapter the results of tests wireless connectivity like transmission range (Tab. 1, Figure 4), communication delay contributed by node depending on the transmission speed and connection stability (Tab. 2, Fig. 6, 7) are describe. At the end of the article a brief summary of the developed system are made.

Keywords: ground fault location, wireless sensor networks.

1. Wstęp

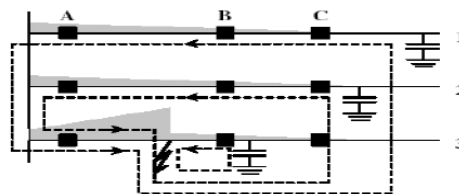
Zwarcia w liniach SN są bardzo częstymi zjawiskami. Skutki związane ze zvarciami to przetężenie, przepięcie czy zagrożenie dla sprzętu i personelu. Pomimo częstości występowania, w praktyce okazuje się, że zabezpieczenie linii od skutków tych zjawisk występujących podczas zwarć doziemnych jest niezwykle trudne. Wynika to z niewielkiej wartości prądu zwarcia doziemnego w przypadku linii z izolowanym punktem neutralnym czy uzemnionych cewką Petersena oraz z samego charakteru zwarcia, które często jest zvarciem przerywanym. Typowe algorytmy zabezpieczeniowe bazujące na kryterium admitancyjnym mogą okazać się nieskuteczne dla zwarć przerywanych. Wynika to stąd, że przejściowe zjawiska zvarciowe są zbyt krótkie, aby dać jednoznaczną odpowiedź czy i gdzie wystąpiło zvarcie. Wartość admitancji może okresowo przekraczać próg rozruchowy po czym spadać poniżej, co może spowodować, że algorytm będzie nieskuteczny.

Na przestrzeni ostatnich lat na całym świecie badano i opracowano wiele metod wykrywania i lokalizacji zwarć, jednakże praktyczna realizacja tych pomysłów była rzadkością. Do tej pory nie ma stuprocentowo pewnej metody wykrywania tego typu zwarć,

a metody wyznaczania miejsca zwarcia nadal są przedmiotem badań, co ma odzwierciedlenie w wielu publikacjach naukowych. Niniejszy artykuł opisuje prototypowe rozwiązanie lokalizatora zwarć opracowanego w firmie RELPOL S.A. i jest rozszerzoną wersją pracy zaprezentowanej na konferencji „Systemy Pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle” SP2014.

2. Wykrywanie zwarć w oparciu o sieci sensorów

Realizacja praktyczna większości znanych algorytmów wykrywających zvarcia [1] okazuje się dość skomplikowana. Dane pomiarowe potrzebne do skutecznego działania algorytmu zwykle pochodzą z punktów systemu rozproszonych na dość dużym obszarze, co wymusza zastosowanie rozwiązania z kanałem komunikacyjnym. Poza sposobem komunikacji problemem może być zasilanie urządzeń pomiarowych oraz sam pomiar. Zastosowanie typowych przekładników prądowych i napięciowych stanowi duży koszt. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie sieci sensorów rozmieszczonych na linii, które łączem radiowym będą przysyłać dane pomiarowe do jednego miejsca. W tego typu rozwiązaniach problemem jest implementacja algorytmów bazujących na zsynchronizowanych sygnałach pomiarowych, gdyż precyzyjny pomiar czasu zdarzenia za pomocą bezprzewodowej sieci sensorów jest zadaniem stosunkowo trudnym. Jednym z rozwiązań tego problemu są techniki bazujące na pomiarze fazorów za pomocą synchronizacji zmierzonych sygnałów względem bardzo precyzyjnego czasu np. dostępnego poprzez system lokalizacji GPS. Alternatywnie rozważane są również techniki bazujące na pomiarach niesynchronizowanych. Najczęściej opierają się one na pomiarach prądów fazowych lub na pomiarze prądu I_0 i późniejszej analizie zmierzonych wartości. Rozwiązanie takie zaproponowano w [2] (rys. 1).



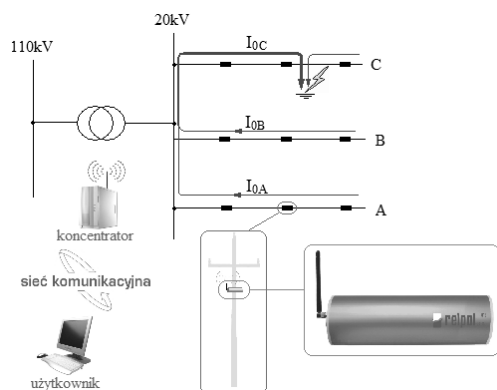
Rys. 1. Detekcja i lokalizacja zwarć za pomocą sensorów prądu, A,B,C kolejne zestawy 3 sensorów fazowych. Strzałki pokazują przepływ prądu zvarciowego, szary obszar amplitudę prądu [2]

Fig. 1. The detection and location of faults on power line using current sensors, A, B, C. The arrows show the flow of short-circuit current, gray area show the amplitude of the current

Zasada działania polega na oczekiwaniu przez sensory na zanik prądu, który powinien nastąpić po zadziałaniu automatyki zabezpieczeniowej. Gdy to nastąpi sensory przesyłają do centrum kontrolnego zarejestrowane przebiegi prądu sprzed i w trakcie wyłączenia. Pomiar prądu realizowany jest za pomocą sensora, który bada pole magnetyczne pod linią. Prawidłowe umiejscowienie sensora umożliwia wykonanie bardzo dokładnego pomiaru, z rozdzielczością poniżej 0,1 A. Sensory aktywują się w momencie wystąpienia zwarcia, rejestrują zdarzenie, a następnie komunikują się z punktem centralnym sieci którym jest koncentrator danych (np. komputer PC lub przemysłowy). Na podstawie nadesłanych raportów aplikacja komputerowa informuje o wystąpieniu zwarcia.

Na tej samej metodzie bazuje rozwiązanie opracowane w firmie RELPOL S.A. zakład Polon. Jako kryterium wykrywania zwarcia przyjęta została wartość prądu I_0 , która będzie narastać wraz z kierunkiem przepływu prądu pojemnościowego od linii zdro-

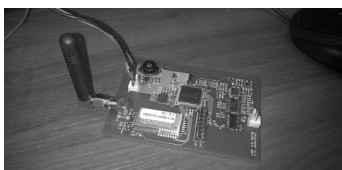
wych do miejsca uszkodzenia. Za miejscem uszkodzenia prąd będzie miał bardzo małą wartość. Na rysunku 2 przedstawiono ideę detekcji i lokalizacji zwarć za pomocą sensorów firmy RELPOL. Czarne prostokąty symbolicznie przedstawiają sensory prądu I_0 rozmieszczone wzdłuż linii. Zdrowe odpływy A i B zasilają prądem pojemnościowym zwarty do ziemi odpływ C. Za miejscem zwarcia prąd pojemnościowy ma znacząco mniejszą wartość. Sensory przesyłają dane pomiarowe do koncentratora, który przesyła informację o zwarciu do użytkownika.



Rys. 2. Idea detekcji i lokalizacji zwarcia doziemnego
Fig. 2. The idea of the ground fault detection and location

3. Badanie prototypowej sieci sensorowej

Węzły systemu są kolejną wersją modułów opracowanych w 2010 roku [1]. W porównaniu do poprzedniej wersji zmianie uległ układ radiowy na produkt firmy Radiocrafts [3], co umożliwiło przede wszystkim miniaturyzację węzła oraz polepszenie właściwości propagacyjnych sygnału radiowego. Prototypowy węzeł systemu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Prototypowy węzeł detekcji zwarcia doziemnego
Fig. 3. The prototype node for the ground fault detection

Dzięki oprogramowaniu TinyMesh [3] umieszczonym w układzie radiowym, sieć sensorów posiada funkcję samo konfiguracji, a węzły mogą pełnić funkcję ruterów. Oznacza to, że użytkownik nie musi znać topologii sieci, aby przesłać informację z/do dowolnego węzła. Dołożeniem kolejnego węzła w skład już istniejącej struktury także nie stanowi problemu. Można to zrobić w każdym miejscu sieci, co czyni nowe rozwiązanie zdecydowanie bardziej skalowalnym i wszechstronnym w porównaniu do poprzedniego rozwiązania. Docelowo moduły wykrywające zwarcie doziemne mają być rozlokowane wzdłuż linii SN co ok. 3 km (zależnie od ukształtowania terenu i roślinności), lecz rzeczywisty zasięg transmisji został dobrany tak, aby był co najmniej 2-krotnie większy. Dzięki temu występują połączenia redundantne, co podnosi niezawodność działania sieci.

Lokalizacja zwarcia odbywa się na podstawie informacji przesyłanych przez węzły, które to zwarcie wykryły do węzła głównego, a następnie na podstawie informacji o rozmieszczeniu węzłów wzdłuż linii SN, określane jest miejsce wystąpienia zwarcia. Redundancja połączeń ma o wiele więcej zalet. Gdy którykolwiek z węzłów pośredniczących w wymianie danych, nie podłączy się do sieci na skutek np. braku zasilania, wówczas węzły sąsiednie mogą „uszkodzony” węzeł pominąć w procesie wymiany danych. Fakt niezgłoszenia się węzła można wykryć i dokonać jego naprawy bądź wymiany na inny.

Opracowany system poddano testom związanym jedynie z procesem wymiany danych pomiędzy węzłami. Testów związanych z samym wykrywaniem zwarć doziemnych nie przeprowadzono, z uwagi na fakt, że były one już przeprowadzane we wcześniejszej wersji systemu i potwierdziły bardzo dobre właściwości wykrywania zwarć. Zdecydowano się na sprawdzenie zasięgu transmisji oraz czasu przesłania danych pomiędzy węzłami. Zgodnie z założeniami, zasięg transmisji powinien być co najmniej 3 km, a docelowo powyżej 6 km w przestrzeni otwartej.

Pasma 869,4 MHz należy do grona pasm ISM (ang. *Industrial, Scientific, Medical*) wolnych od opłat i koncesji związanych z nadawaniem. Regulację w tym zakresie przeprowadza ministerstwo infrastruktury. Zgodnie z najnowszym rozporządzeniem z dnia 19.08.2011 [4] dla pasma 869,4 MHz maksymalna dozwolona moc nadawania wynosi 500 mW ERP. Dokonując obliczeń teoretycznych na podstawie wzoru 1 wg. zaleceń ITU-R P.530 [5] otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 1.

$$P_o(d) = P_n + G_n + G_o + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) + 20 \log\left(\frac{1}{d}\right) - A_d - L_{fn} - L_{fo} - L_d \quad (1)$$

gdzie:

- P_o – moc doprowadzona do wejścia odbiornika,
- P_n – moc na wyjściu nadajnika (przyjęto 24 dB),
- G_n – zysk energetyczny anteny nadajnika (przyjęto 2,5 dB),
- G_o – zysk energetyczny anteny odbiornika (przyjęto 2,5 dB),
- d – odległość między antenami [km],
- λ – długość fali [m],
- A_d – tłumienie dyfrakcji (przyjęto 10 dB),
- L_d – tłumienie od fali odbitej (przyjęto 10 dB),
- L_{fn} – tłumienie traktu fiderowo-antenowego po stronie nadawczej (przyjęto 0,5 dB),
- L_{fo} – tłumienie traktu fiderowo-antenowego po stronie odbiorczej (przyjęto 0,5 dB),

Tab. 1. Poziom mocy sygnału radiowego dla częstotliwości 869 MHz w odbiorniku w zależności od odległości od nadajnika

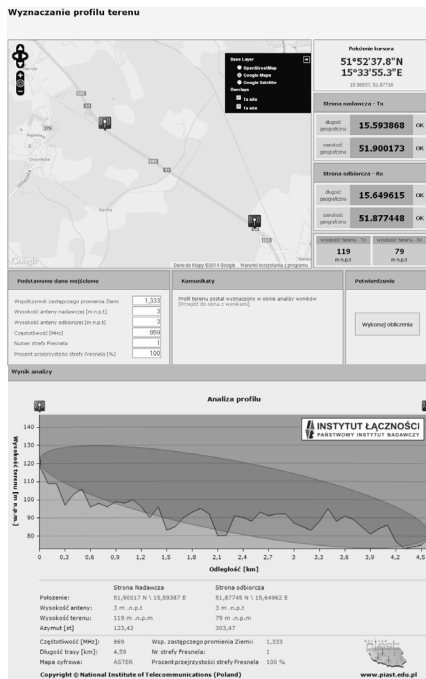
Tab. 1. The level of radio signal strength for the 869 MHz in the receiver depending on the distance from the transmitter

Odległość, m	Poziom mocy w odbiorniku (P_o), dB
1000	-83,2
2000	-89,2
3000	-92,7
4000	-95,2
5000	-97,2
6000	-98,7

Według danych producenta [3] układ radiowy cechuje się czułością na poziomie – 99 dB dla prędkości transmisji 76,8 kb/s do – 104 dB przy prędkości 1200 b/s. Oznacza to, że teoretycznie zasięg 6 km jest możliwy do osiągnięcia nawet przy najwyższej prędkości przesyłania danych. Opracowane moduły poddano więc testom zasięgu transmisji.

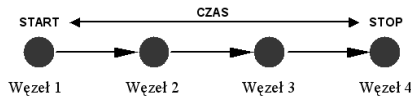
Poszukiwania odpowiednio długiego odcinka testowego rozpoczęto od przeglądu długości okolicznych lotnisk powojkowych, lecz okazały się zbyt krótkie lub niedostępne. Trasy wzdłuż okolicznych linii energetycznych także okazały się zbyt krótkie. Ostatecznie wybrano odcinek drogi o długości 4,6 km pomiędzy miejscowościami Racula – Niodoradz. Na rysunku 4 przedstawiono przekrój hipsometryczny uzyskany z platformy PIAST [6] przygotowanej przez Instytut Łączności - Państwowy Instytut Badawczy, oddział we Wrocławiu.

Dla testowego odcinka odebrano sygnał o mocy w okolicy – 80 dB. Testy były wykonane przy użyciu anteny TRANS-DATA A741006 o zysku energetycznym + 5 dBi. Całkowita moc odebrana przez układ radiowy po odjęciu zysku anten wynosiła ok. – 90 dB. Oznacza to, że wyniki teoretyczne z tabeli 1 potwierdziły się w praktyce.



Rys. 4. Mapa hipsometryczna na testowanym odcinku
Fig. 4. Hypsometric map on the test section

W celu określenia opóźnień wnoszonych przez tor transmisyjny przeprowadzono testy związane z czasem dostarczenia danych pomiędzy węzłami. W tym celu utworzono sieć o strukturze przedstawionej na rysunku 5.

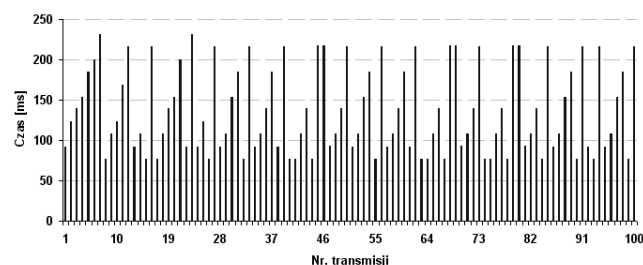


Rys. 5. Struktura testowanej sieci sensorowej
Fig. 5. The structure of the tested sensor network

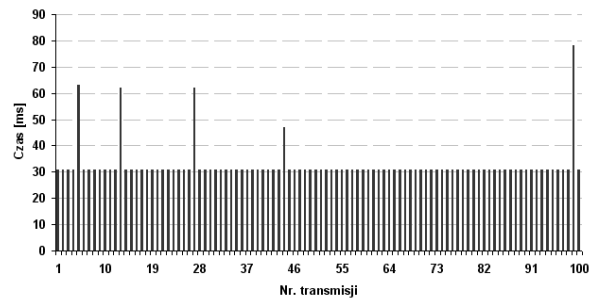
Dane przesyłano z węzła 1 do poszczególnych węzłów (2, 3 i 4) a następnie mierzono czas pomiędzy wysłaniem a odebraniem danych dla różnych prędkości transmisji (tabela 2). Jednocześnie badano stabilność uzyskiwanych czasów (rys. 6, 7).

Tab. 2. Opóźnienia w torze transmisyjnym
Tab. 2. Transmission delays

Prędkość / l. skoków	1,2 kb/s	4,8 kb/s	32,8 kb/s	76,8 kb/s
1	326 ± 119 ms	137 ± 53 ms	33 ± 7 ms	29 ± 6 ms
2	2204 ± 587 ms	636 ± 38 ms	274 ± 17 ms	242 ± 12 ms
3	4462 ± 1214 ms	1215 ± 159 ms	513 ± 35 ms	476 ± 66 ms



Rys. 6. Czasy transmisji przy przesyłaniu danych z węzła 1 do 2 z prędkością 4,8 kb/s
Fig. 6. Durations for the data sending from node 1 to 2 at a rate of 4,8 kb/s



Rys. 7. Czasy transmisji przy przesyłaniu danych z węzła 1 do 2 z prędkością 32,8 kb/s
Fig. 7. Durations for the data sending from node 1 to 2 at a rate of 32,8 kb/s

Tak przeprowadzone testy pozwoliły wybrać optymalną prędkość transmisji, którą powinno cechować możliwie małe opóźnienie podczas przesyłania danych oraz stabilność połączenia. Ostatecznie zdecydowano się na wybór prędkości roboczej 32,8 kb/s, dla której opóźnienie transmisji przyjęto 250 ms/skok + czas transmisji rzeczywistych danych przez medium radiowe. Poziom czułości układów radiowych dla wybranej prędkości powinny zagwarantować zasięg transmisji zgodny z wcześniej przyjętymi założeniami.

4. Podsumowanie

Niewielkie wartości prądu zwarciovego w porównaniu do prądów roboczych sieci oraz krótkotrwałość powodują, że detekcja zwarć jest zadaniem trudnym. Większość proponowanych w literaturze metod bazuje na zaawansowanych metodach cyfrowej obróbki sygnału takich jak transformata DWT lub Fouriera i dalszej analizie uzyskanych wyników. Realizacja algorytmów wymagających ciągłego pomiaru napięcia i prądu, ciągłej cyfrowej obróbki sygnału, niekiedy bazujących na wysokich częstotliwościach próbkowania powoduje, że taki algorytm nie ma zastosowania w rozwiązaniach bazujących na sieci sensorów zasilanych bateryjnie. Limitowane zasoby mocy obliczeniowej oraz energetycznej sensora wymuszają do detekcji zwarć stosowanie algorytmów tzw. „wyczekujących” na zdarzenie opartych na sieci sensorów. Do zalet takiego rozwiązania można zaliczyć elastyczność, łatwość montażu i serwisowania, niewielki koszt pojedynczego sensora oraz niski koszt eksploatacji. Odpowiednio gęsta sieć sensorów pomimo zastosowania mniej zaawansowanych algorytmów detekcji zwarć może dać równie dobre rezultaty skuteczności wykrywania i lokalizacji zwarć jak algorytmy bardzo złożone.

Po próbach na modelu, opracowanym w firmie RELPOL S.A. lokalizator zwarć przygotowany jest do badań na rzeczywistej linii średniego napięcia. W najbliższym czasie przewidywana jest instalacja i dalsze testy opracowanego systemu.

5. Literatura

- [1] Urbański P.: Nowoczesne metody lokalizacji zwarć w liniach napowietrznych SN. Współczesna problematyka sieci średnich napięć. Rydzyna, 2010.
- [2] Sandip Vijay, S.C. Sharma. A.: Wireless Sensor Network for Distributed Fault Management in Power Systems.
- [3] TinyMech – <http://www.radiocrafts.com>
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 19 sierpnia 2011 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego – www.uke.gov.pl
- [5] Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems – zalecenia ITU-R P.530.
- [6] PIAST – <http://www.piast.edu.pl/>