

Bartosz OLEJNIK\*

## **ALTERNATYWNE METODY POMIARU ŚREDNIEGO NAPIĘCIA W ELEKTROENERGETYCZNEJ SIECI ROZDZIELCZEJ**

W artykule przedstawiono wybrane, alternatywne metody pomiaru średniego napięcia w sieci elektroenergetycznej. Rozpatrywane są sposoby możliwe do stosowania tak w rozdzielni, jak i w głębi sieci. Skupiono się głównie na możliwości zastosowania sposobów alternatywnych oraz potencjalnego wykorzystania ich do współpracy z elektroenergetyczną automatyką zabezpieczeniową, gdzie nie zawsze wymagana jest duża dokładność pomiaru. Omawia się przede wszystkim izolatory z wkładkami reaktancyjnymi i rezystancyjnymi jako urządzenia wewnętrzne. Przedyskutowano także możliwość pomiaru napięcia i jego składowych symetrycznych na podstawie analizy pola elektromagnetycznego wokół przewodów linii napowietrznych. W pracy zaprezentowane zostały wyniki badań urządzeń, które mogą posłużyć jako źródło sygnału napięciowego w elektroenergetycznej automatyce zabezpieczeniowej. Przedyskutowano także, w końcowej jej części, wady i zalety konkretnych rozwiązań.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przekładnik napięciowy, sensor pomiarowy, izolator reaktancyjny, dzielnik pojemnościowy, dzielnik rezystancyjno-pojemnościowy, natężenie pola elektrycznego, efekt Pockels'a

### **1. WSTĘP**

Wysoka efektywność i duża niezawodność pracy sieci rozdzielczej to obecnie jedne z głównych zadań stawianych operatorom sieci dystrybucyjnych (OSD). Istnieje wiele dróg do osiągnięcia zadowalających rezultatów. Jedną z nich są, bez wątpienia, inwestycje w infrastrukturę sieciową, także w dziedzinie elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Ta ostatnia, do sprawnego funkcjonowania, wymaga, między innymi, dostarczania informacji o aktualnej wartości napięcia na chronionym elemencie systemu.

Współcześnie w Polsce do pomiaru średniego napięcia w sieci dystrybucyjnej stosuje się głównie magnetyczne przekładniki napięciowe. Są one przystosowane do transformowania sygnałów o częstotliwości równej 50 Hz. Ich zastosowanie w przypadku pomiarów wyższych harmonicznych jest ograniczone. Istnieją też znaczne trudnienia przy montażu tego typu urządzeń, których przeznaczeniem

---

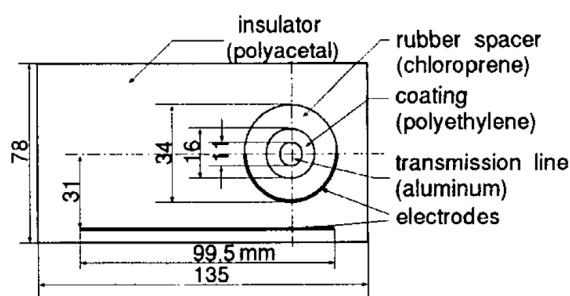
\* Politechnika Poznańska.

jest w zasadzie praca tylko w rozdzielniach wewnątrzowych. Cechują się też dość wysoką ceną, sporymi gabarytami i masą.

Alternatywą do aktualnie stosowanych przekładników napięciowych mogą być urządzenia oparte na pomiarze pola elektrycznego wokół przewodów [1, 2], sensory optyczne bazujące na efekcie Pockels'a [3, 4, 5] czy wreszcie dzielniki pojemnościowe lub pojemnościowo-rezystancyjne [6, 7], także zabudowane w izolatorach reaktancyjnych.

## 2. POMIAR NAPIĘCIA BAZUJĄCY NA ANALIZIE POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Jednym z typów alternatywnych czujników do pomiaru napięcia w sieci dystrybucyjnej są sensory analizujące pole elektromagnetyczne w najbliższym otoczeniu przewodu. Budowa tego typu urządzeń jest bardzo prosta – składają się z dwóch elektrod zatopionych w obudowie z tworzywa, która montowana jest wprost na przewodzie linii napowietrznej. Dodatkowo bardzo często czujnikowi pola elektrycznego towarzyszy sensor do pomiaru pola magnetycznego i wyznaczania wartości prądu w fazie. Budowę przykładowego czujnika do pomiaru napięcia przedstawia rysunek 1.



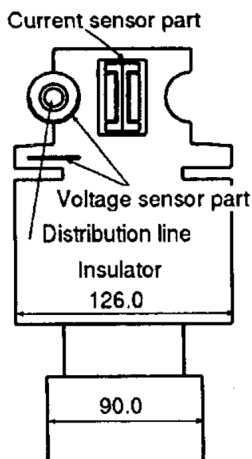
Rys. 1. Budowa czujnika pola elektrycznego do pomiaru napięcia w linii dystrybucyjnej [1]

Pomiary z wykorzystaniem tego typu czujników są stosunkowo proste. Istotne jest napięcie między dwiema elektrodami, które powstaje na skutek zjawiska indukcji elektrostatycznej. Pomiary bazujące na analizie pola elektromagnetycznego dają wyniki niezależne od temperatury. Wyższe harmoniczne nie są tutaj tłumione.

W tego typu czujnikach istnieje jednak dość duży problem, którym jest zjawisko przesuwania fazy, istotne zwłaszcza przy pomiarach energii oraz detekcji zwarć doziemnych. Istotne jest ułożenie elektrod, przy czym najkorzystniejsza jest sytuacja, jeśli znajdują się one osiowo w stosunku do przewodnika [1, 2].

Poza czujnikami nakładanymi na przewód, zarówno prądu jak i napięcia, istnieje też możliwość skonstruowania sensorów zintegrowanych z izolatorami

wsporczy [1]. Rozwiązania takie (rys. 2), pomimo utrudnionego procesu produkcyjnego (dokładne rozmieszczenie elektrod w żywicy), wydają się być dobrze przemyślanym. Można się spodziewać, że tak zbudowane urządzenia, po wejściu do seryjnej produkcji, byłyby drogie.



Rys. 2. Izolator wsporczy ze zintegrowanymi sensorami prądu i napięcia

### 3. POMIAR NAPIĘCIA Z WYKORZYSTANIEM SENSORÓW OPTYCZNYCH

W energetyce wysokich napięć współcześnie często wykorzystuje się zjawiska optyczne do pomiaru prądu i napięcia. Ich wykorzystanie jest możliwe także w sieci dystrybucyjnej.

Sensory do pomiaru napięć, pracujące w oparciu o efekt Pockels'a, odznaczają się bardzo dobrą dynamiką, wysoką precyzją oraz szerokim widmem pomiarowym [3]. Wszystkie te cechy są korzystne w przypadku, gdyby czujnik taki miał współpracować na przykład z detektorem zwarć doziemnych czy analizatorem jakości energii. Niestety, stosowana technologia nie pozwala na pomiar napięcia o częstotliwości niższej od ok. 1,5 Hz, także składowej stałej.

Działanie sensora optycznego do pomiaru napięcia opiera się na wysłaniu w światłowód spolaryzowanej wiązki światła. Na jej drodze staje kryształ wykonany z materiału, którego współczynnik załamania światła jest zależny od natężenia pola elektrycznego w jego otoczeniu. Skutkiem przejścia strumienia fotonów przez taki kryształ jest opóźnienie jego fazy. Zjawisko to nazywane jest efektem Pockels'a. Wyróżnia się jego dwa typy.

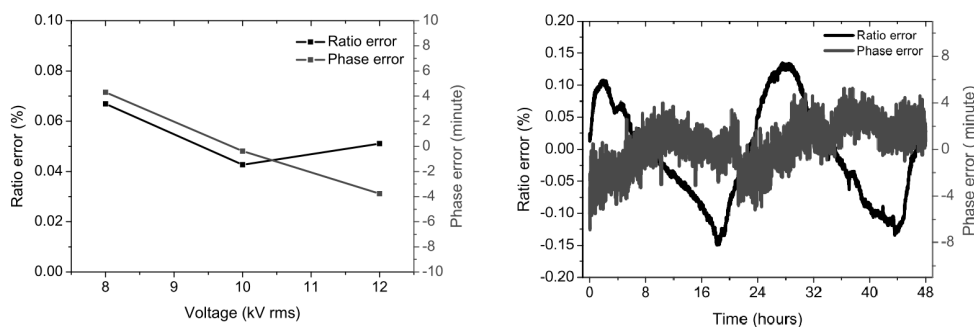
Jeśli linie pola elektrycznego są prostopadłe do kierunku propagacji wiązki świetlnej w kryształach to mówi się o poprzecznym efekcie Pockels'a, na którym bazuje większość stosowanych obecnie czujników. Rozwiązanie to cechuje się

tym, że sygnał bezpośrednio na wyjściu z układu pomiarowego ma zbyt dużą amplitudę do jego bezpośredniej obróbki – konieczne jest stosowanie dzielników napięcia, co znacznie pogarsza właściwości pomiarowe samego sensora [4].

Opóźnienie fazy w przypadku poprzecznego efektu Pockels'a jest dane zależnością (1).

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r l E \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda_0$  – długość fali promieniowania świetlnego,  $n_0$  – współczynnik załamania światła w kryształach bez działania pola elektrycznego,  $r$  – współczynnik elektrooptyczny,  $l$  – długość kryształu na drodze strumienia światła,  $E$  – natężenie pola elektrycznego [5].



Rys. 3. Niepewności pomiaru amplitudy i kąta dla różnych poziomów napięć oraz ich długoczasowa stabilność – podłużny efekt Pockels'a [3]

Podłużny efekt Pockels'a występuje wtedy, gdy kierunek propagacji światła i kierunek pola elektrycznego pokrywają się. Ponieważ stosując tę metodę aktywność kryształu jest mniejsza, na wyjściu czujnika otrzymuje się mniejszą wartość napięcia niż w przypadku stosowania efektu poprzecznego. Z tego względu nie ma konieczności używania dodatkowych dzielników pojemnościowych, a błędy amplitudy i fazy są niewielkie (rys. 4). Opóźnienie fazy dane jest w tym przypadku zależnością (2) i zależy, między innymi, od grubości kryształu  $d$  [5].

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r d E \quad (2)$$

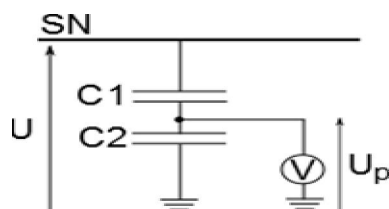
Badania pokazują [3], że zastosowanie podłużnego efektu Pockels'a w pomiarach średniego napięcia może dać bardzo dobre efekty. Błędy pomiarów, zarówno amplitudy jak i fazy, są bardzo małe i dodatkowo ich zmienność w czasie także jest niewielka, co pokazuje rysunek 3.

#### 4. POMIAR NAPIĘCIA Z WYKORZYSTANIEM IZOLATORÓW REAKTANCYJNYCH

Obecnie produkowane są izolatory wsporcze tzw. reaktancyjne, tak wewnętrzne jak i napowietrzne, z wbudowanymi dzielnikami napięcia różnego typu.

Struktura dzielników jest bardzo prosta, są tanie i mają szerokie widmo częstotliwościowe. Pomimo wysokiej dokładności ich cechą są fluktuacje sygnału na wyjściu w ujęciu długookresowym, co spowodowane jest wpływem warunków atmosferycznych – jest to ich główna wada.

Schematyczna i uproszczona budowa dzielnika pojemnościowego przedstawiona jest na rysunku 4.



Rys. 4. Uproszczony schemat budowy dzielnika pojemnościowego

Dzielnik pojemnościowy zbudowany jest z kondensatora wysokonapięciowego  $C1$  o pojemności, najczęściej, kilkudziesięciu pikofaradów oraz kondensatora  $C2$ , który ma pojemność zwykle kilkuset pikofaradów. Istotna dla pomiarów jest dokładność wykonania kondensatora  $C1$ . Napięcie wyjściowe z dzielnika  $U_p$  jest dane znaną zależnością (3). Oczywiście, ze względu na konstrukcję, dzielniki oparte tylko na pojemnościach nie przetwarzają napięcia stałego, w tym także składowej stałej. Mają zatem ograniczone zastosowanie.

$$U_p = \frac{C1}{C1 + C2} U \quad (3)$$

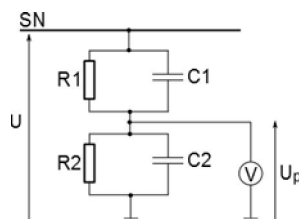
Rozwiązaniem tego problemu są dzielniki rezystancyjno-pojemnościowe, których schematyczna budowa przedstawiona jest na rysunku 5. Zachowując zależność (4), w przypadku takiego dzielnika, otrzymuje się niezależną od częstotliwości wartość przekładni oraz przesunięcia fazowego sygnału wyjściowego, przy czym to ostatnie jest bliskie zeru.

$$R1 \cdot C1 = R2 \cdot C2 \quad (4)$$

Napięcie wyjściowe [6] na zaciskach pomiarowych dzielnika jest opisywane zależnością (5).

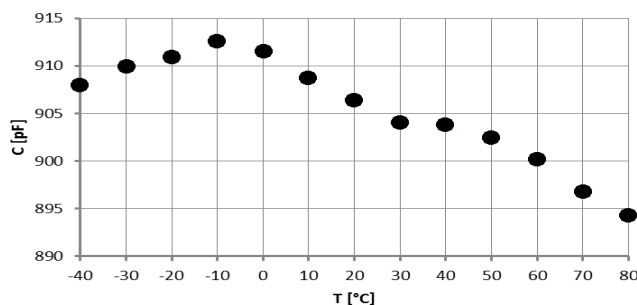
$$U_p = \frac{R_2}{R_2 + R_1 \frac{1 + R_2 j \omega C_2}{1 + R_1 j \omega C_1}} \quad (5)$$

Dzielnik RC jest urządzeniem uniwersalnym, nadaje się do pomiaru napięć stałych i może zostać zastosowany jako źródło sygnału pomiarowego w automatyce elektroenergetycznej.



Rys. 5. Uproszczony schemat budowy dzielnika RC

Jest możliwość wykorzystania izolatorów reaktancyjnych jako źródła sygnału w automatyce elektroenergetycznej, także do celów zabezpieczeniowych. Istnieją jednak dwie przeszkody, które stoją na drodze do realizacji tego zadania.



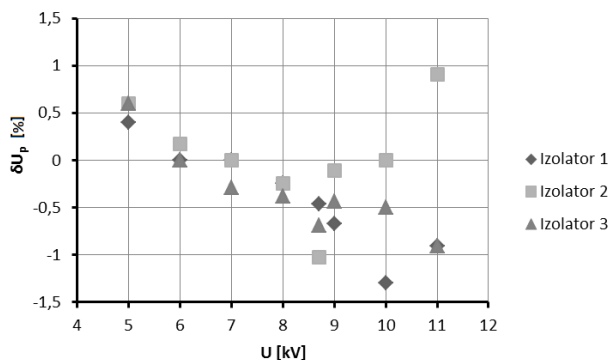
Rys. 6. Zmienność pojemności kondensatora w zależności od jego temperatury

Pierwszym z problemów jest zależność sygnału wyjściowego od temperatury. Zjawisko to jest następstwem zmian pojemności kondensatorów, z których zbudowany jest dzielnik. Badania [7] wskazują jednoznacznie, że zmiany tego parametru są znaczące (rys. 6). Wadę tę można kompensować programowo w miernikach współpracujących z konkretnym typem izolatorów.

Drugim problemem w budowie izolatorów reaktancyjnych jest sama dokładność ich wykonania. Ponieważ, w większości, produkcja tego typu urządzeń jest daleka od masowej, istnieją dość duże odchyłki w pomiarach, nawet w przypadku izolatorów tego samego typu i tego samego producenta. Należy mieć nadzieję, że urządzenia dużych koncernów (np. [8]), które przeznaczone są typowo do zastosowań pomiarowych, problemu tego są pozbawione.

Prowadzone przez autora badania pokazują, że izolatory reaktancyjne nawet o najprostszej konstrukcji mogą być źródłem sygnału pomiarowego do wybranych celów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Z użyciem odpowiednio skalibrowanego miernika prowadzone były pomiary amplitud na

zaciskach wyjściowych izolatorów reaktancyjnych różnych typów. Zadawane napięcie było identyczne co do amplitudy i fazy dla każdego izolatora. Otrzymane, przykładowe wartości błędów względnych amplitudy przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Błąd względny pomiaru napięcia z użyciem izolatorów reaktancyjnych

Istnieje także możliwość wykorzystania izolatorów reaktancyjnych do pomiaru składowej zerowej napięcia, której wartość w ogólnym przypadku dana jest zależnością (6).

$$3\overline{U}_0 = \overline{U}_{L1} + \overline{U}_{L2} + \overline{U}_{L3} \quad (6)$$

gdzie:  $\overline{U}_{L1}$ ,  $\overline{U}_{L2}$ ,  $\overline{U}_{L3}$  – napięcia fazowe fazy L1, L2, L3 w postaci zespolonej,  $\overline{U}_0$  – składowa zerowa napięcia w postaci zespolonej.

Napięcia na zaciskach pomiarowych izolatorów różnią się, co najwyżej, o ok. 1%, stąd wyznaczana składowa zerowa będzie miała bardzo małą wartość.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule skupiono się na przeglądzie alternatywnych metod pomiaru napięcia w sieci dystrybucyjnej.

Głównymi zaletami dzielników pojemnościowych i pojemnościowo-rezystancyjnych jest ich prosta struktura, niski koszt i stosunkowo duża dokładność, jednakże wyniki pomiarów w dużej mierze uzależnione są od warunków środowiskowych i jakości wykonania.

Czujniki optyczne do pomiaru średniego napięcia to urządzenia z założenia drogie, o wysokiej dokładności i skomplikowanej budowie. Ich zastosowanie do pomiarów średniego napięcia może być dyskusyjne, zwłaszcza, że większość urządzeń to jak na razie prototypy.

Do czasu udoskonalenia konstrukcji sensorów opartych na analizie pola elektromagnetycznego wydaje się, że najbardziej optymalnymi do stosowania w sieci średniego napięcia będą czujniki bazujące na dzielnikach pojemnościowo-rezystancyjnych, także te zabudowane w izolatorach wsporczych.

## LITERATURA

- [1] Furukawa T., Ashikawa M., Ueda Y., Ohchi M., Resin molded type of voltage-current sensor for real-time measurement of power factor in power distribution system, Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE (Volume 2).
- [2] Kubo T., Furukawa T., Fukumoto H., Ohchi M., Numerical estimation of characteristics of voltage-current sensor of resin molded type for 22 kV power distribution systems, ICROS-SICE International Joint Conference 2009 Materials, Fukuoka.
- [3] Parker D., Harlev Y., Presotto D., Optical MV current&voltage sensors as a new generation instrument transformer for distribution automation, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES, Washington DC.
- [4] Xiaoguo C., An C., Chuming Y., Senjin Y., Research on the characteristics of voltage sensor which based on contact less induction technology, China International Conference on Electricity Distribution 2008, Guangzhou.
- [5] Long F., Zhang J., Xie C., Yuan Z., Application of the Pockels effect to high voltage measurement, The Eight International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI 2007, Xi'an.
- [6] Schmid J., Kunde K., Application of non conventional voltage and currents sensors in high voltage transmission and distribution systems, Smart measurements for future grids (SMFG), 2011 IEEE International Conference, Bologna.
- [7] Nowakowski A., Wlazło P., Badanie wpływu temperatury na parametry przekładnika reaktancyjnego współpracującego z platformą pomiarową do pomiaru mocy w sieciach średnich napięć, Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania, nr 7/2009.
- [8] DistribuSense current and voltage sensors – VLS-110 15 kV voltage line post sensor – bulletin ABB, 2013.

## ALTERNATIVE METHODS OF MV MEASUREMENT IN DISTRIBUTION GRID

The article presents selected, alternative method of MV measurement in distribution grid. Considered methods are possible for use as a substation, as well as the depth of the network. The focus is mainly on the possibility of using alternative methods and potential use them to cooperate with the power system protection, which does not always require high accuracy. It discusses primarily reactance insulators resistive as indoor unit. Is also discussed the possibility of voltage and its symmetrical components measurement based on the analysis of the electromagnetic field around the conductors of overhead lines. The paper presents the results of equipment tests, which can serve as a source of voltage signal in power automation and protection devices. Discussed are also the advantages and disadvantages of specific solutions.