

Anna GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK

POLITECHNIKA GDAŃSKA,
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Przegląd sposobów pomiaru pętli zwarcia

Dr inż. Anna GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK

Ukończyła studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2001 roku. Tytuł doktora w kierunku Elektrotechnika uzyskała w 2007 roku broniąc rozprawy dotyczącej metod fazorowych pomiaru impedancji pętli. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Interesuje się pomiarami impedancji pętli, systemami pomiarowo-kontrolnymi oraz projektowaniem użytecznych interfejsów.



e-mail: a.golijanek@ely.pg.gda.pl

Streszczenie

W metrologii obserwuje się ciągle rozwój metod i przyrządów do pomiaru impedancji pętli zwarcia. Wynika to zarówno z faktu, iż pomiar impedancji pętli zwarcia bezpośrednio związany jest z bezpieczeństwem użytkowania urządzeń elektrycznych, jak również z rozwoju nowych technologii. W publikacji przedstawiono rozwój sposobów pomiaru impedancji pętli zwarcia, od rozwiązań najstarszych po współcześnie stosowane.

Słowa kluczowe: impedancja pętli, pomiar, sposób, metody.

The review of loop impedance measuring methods

Abstract

Loop impedance measuring methods in electro energetic low-voltage power supplies are still developing and evolving. The first device for examining the effectiveness of neutralization was described in 1936 by Pfler [2]. In Poland a MZU-1 device was the first device for measurements of the short circuit loop impedance produced in the fiftieth of the 20th century. Since then many methods for measuring the resistance and loop impedance of the short circuit have been developed. In Poland researches in measurements of the short-circuit loop impedance were and are led mainly at two centres for education: Gdańsk University of the Technology (Czapp, Golijanek-Jędrzejczyk, Iwicki, Musiał, Piasecki, Roskosz, Sawicki, Swędrowski, Ziółko) and Wrocław University of the Technology (Cegielski, Masny, Nawrocki, Stafiniak, Teresiak). This paper presents the development of loop impedance measuring methods, from historical perspective, from the oldest solutions to contemporary applications.

Keywords: loop impedance, measurement, method.

1. Wstęp

Rozwój sposobów pomiaru impedancji pętli historycznie wynikał z wprowadzenia zerowania – jako środka ochrony przeciwporażeniowej, a obecnie wynika z większych niż w poprzednim stuleciu możliwości technicznych realizacji przyrządów pomiarowych.

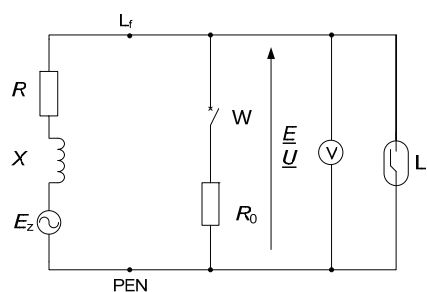
Na początku XX wieku - przed 1930 rokiem, zerowanie zostało wprowadzone w Niemczech i w Szwajcarii [1]. Pierwszy przyrząd do badania skuteczności zerowania został opisany już w roku 1936 przez Pflera [2]. Natomiast pierwszym przyrządem do pomiaru impedancji pętli zwarcia produkowanym w latach 50-dziesiątych w Polsce był przyrząd MZU-1. Od tego czasu aż do chwili obecnej opracowano kilkadziesiąt metod pomiaru rezystancji i impedancji pętli zwarcia.

W Polsce badania w zakresie pomiarów impedancji pętli zwarcia były i są prowadzone głównie w dwóch ośrodkach naukowych: Politechnice Gdańskiej (Czapp, Golijanek-Jędrzejczyk, Iwicki, Musiał, Piasecki, Roskosz, Sawicki, Swędrowski, Ziółko), oraz Politechnice Wrocławskiej (Cegielski, Masny, Nawrocki, Stafiniak, Teresiak).

W niniejszej publikacji zaprezentowano jedynie wybrane sposoby pomiaru impedancji pętli zwarcia celem przedstawienia nurtu rozwoju tego typu metod i przyrządów.

2. Metody pomiaru impedancji pętli zwarcia

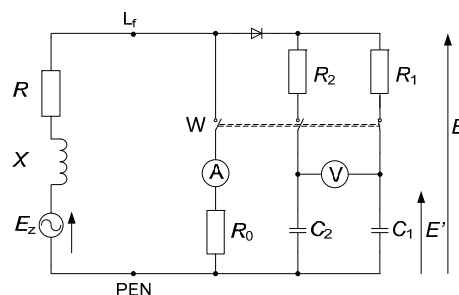
Najstarszym opracowanym w Polsce przyrządem do pomiaru impedancji pętli zwarcia jest MZU-1 opracowany przez Z. Teresiaka [3] (rys. 1). Charakterystyczną cechą tego miernika jest woltmierz o nieliniowej podziałce (rozszerzonej w końcowej części zakresu pomiarowego). Sztuczne zwarcia w tym przyrządzie dokonywało się poprzez załączenie rezystancyjnego obciążenia pomiarowego R_0 . Lampka neonowa L_n służyła jako wskaźnik napięcia sygnalizujący ciągłość przewodów ochronnych.



Rys. 1. Schemat miernika MZU-1 [3]
Fig. 1. MZU-1 meter scheme [3]

Po załączeniu R_0 wskazówka woltmierza (wyskalowanego w omach) odchyła się na skutek spadku napięcia wywołanego przepływem prądu pomiarowego, proporcjonalnie do wartości impedancji pętli zwarcia Z . Miernik MZU-1 wykazywał znaczne błędy systematyczne wynikające z rezystancyjnego charakteru obciążenia pomiarowego oraz wartości prądu pomiarowego.

W latach 60-dziesiątych pojawiają się pierwsze przyrządy różnicowe. Do najważniejszych należy zaliczyć: miernik MZ-3 (K. Bielańskiego [4] został przedstawiony na rysunku 2) oraz miernik różnicowy opracowany przez J. Sawickiego [5].



Rys. 2. Pomiar impedancji pętli metodą różnicową [4]
Fig. 2. The loop impedance measurement - differential method [4]

Pomiar odbywa się w dwóch cyklach pomiarowych. W pierwszym cyklu (rys. 2) napięciem E ładowany jest kondensator C_1 , natomiast w drugim cyklu pomiarowym kondensator C_2 ładowany jest napięciem sztucznego zwarcia U oraz mierzony jest prąd I . Napięcia E' i U' występujące na kondensatorach C_1 i C_2 są odpowiednio proporcjonalne do napięć E i U . Woltmierz wskazuje różnicę napięć $\Delta U = E - U$. Natomiast impedancja pętli obwodu zwarcia jest wyznaczana z następującej zależności:

$$Z = \frac{\Delta U}{I} = \frac{E-U}{I} \quad (1)$$

Dokładność pomiaru impedancji pętli miernikiem działającym zgodnie z metodą różnicową jest znacznie większa niż miernikiem realizującym metodę techniczną.

Metoda J. Sawickiego z 1961 zastosowana w mierniku różnicowym [5] polegała na zastosowaniu półkresowego prądu pomiarowego. Sposób pomiaru polegał na dodatkowym obciążeniu prądem pomiarowym układu badanego tylko co drugi półkres napięcia roboczego i mierzeniu wynikowego spadku napięcia. W 1962 miernik ten został ulepszony [6] o wskaźnik neonowy sygnalizujący wystąpienie groźnego napięcia dotykowego podczas pomiaru oraz znacznie zwiększono czułość przyrządu.

Innym opracowanym w tym czasie przyrządem służącym do pomiaru rezystancji pętli zwarcia był wielkopiętrowy miernik - MZW-1 [7]. Cechą charakterystyczną tego miernika było stosowanie dużego prądu pomiarowego rzędu 100A (czas trwania sztucznego zwarcia rzędu 0,04s). Zaletą tego przyrządu była duża czułość pomiarowa oraz przybliżenie warunków pomiarowych do warunków panujących podczas rzeczywistego zwarcia. Wadą jest wykorzystanie miernika MZW-1 jedynie do pomiaru impedancji obwodu zwarcia o spodziewanej małej wartości modułu (składowej reaktancyjnej impedancji rzędu kilku miliomów) – np. do pomiaru impedancji w pobliżu transformatora.

Lata 70-dziesiąte to pojawienie się mierników z impedancyjnym obciążeniem pomiarowym Z_0 . Przykładem takiego miernika jest przyrząd typu MR [1], opracowany przez R. Roskosza z Politechniki Gdańskiej. W mierniku typu MR obciążenie pomiarowe stanowi znana impedancja Z_0 o kilku wartościach argumentu $\varphi_0=10^0, 30^0$ i 45^0 . Napięcie nieobciążone E mierzone jest w ostatnim półkresie przed włączeniem obciążenia pomiarowego Z_0 natomiast napięcie U w ostatnim półkresie przepływu prądu pomiarowego. Wyskalowana w omach podziałka miernika pozwalała bezpośrednio odczytać zmierzoną wartość impedancji Z wyznaczaną z zależności:

$$Z = Z_0 \cdot \frac{|E| - |U|}{U} \quad (2)$$

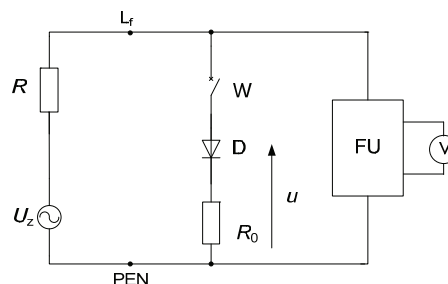
Zaletą tego miernika jest bezpośredni pomiar bardzo małej wartości impedancji pętli zwarcia oraz eliminacja błędów pomiaru wynikających z odchyłań, wahań napięcia sieci, stanów przejściowych oraz różnicy kąta fazowego napięcia badanego. Błąd pomiaru dla miernika MR-0 w warunkach znamionowych pracy nie przekraczał 10%.

Innym przykładem miernika z impedancyjnym obciążeniem pomiarowym Z_0 , ale o jednej wartości argumentu $\varphi_0=40^0$, był miernik MZK przeznaczony do badań eksploatacyjnych zerowania i uziemienia ochronnego, opracowany na Politechnice Wrocławskiej. Przyrządy MZK charakteryzowały się dużą dokładnością pomiaru impedancji pętli zwarcia oraz były niewrażliwe na odchylenia napięcia.

W latach 80-dziesiątych ubiegłego wieku nadal rozwijane były mierniki posiadające impedancyjne obciążenie pomiarowe z odpowiednio dobranym argumentem (m.in. miernik MZP-4), ale powstały również przyrządy z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym R_0 wykorzystujące: metodę stałoprądową (miernik MZS-10) oraz metodę wektorową.

Metoda stałoprądowa opiera się na założeniu, że reaktancja X pętli zwarcia jest mała w stosunku do rezystancji R (rys. 3) (pomiar stosowany przy ocenie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej jedynie odbiorników o najmniejszych mocach, położonych daleko od źródła). Do zacisków zasilania L_r -PEN układu pomiarowego przyłączono człon obciążenia pomiarowego, złożony z rezystancji R_0 i diody D . Po zamknięciu łącznika W , w obwodzie przepływa wyprostowany półfalowo prąd pomiarowy, wywołujący spadek napięcia na rezystancji pętli R w półkresach prze-

wodzenia diody D , w wyniku czego w napięciu na zaciskach układu pomiarowego pojawia się składowa stała napięcia U_{st} .



Rys. 3. Zasada pomiaru metodą stałoprądową [4]
Fig. 3. The loop impedance measurement- DC method [4]

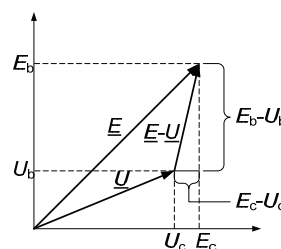
Podziałkę woltomierza V wycechowano zgodnie z zależnością:

$$R = R_0 \left(\frac{U_{zm}}{\pi U_{st}} - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

gdzie: U_{zm} – amplituda napięcia sieci. Cechą charakterystyczną miernika MZS-10 był człon kompensujący składową stałą, który ograniczał również błąd spowodowany odchyleniami i wahaniami napięcia oraz odkształceniami napięcia sieciowego.

Metoda wektorowa opracowana pod koniec lat 80-dziesiątych przez R. Roskosza była rewolucją w pomiarach impedancji pętli zwarcia. Po pierwsze dlatego, że umożliwiała pomiar fazorów napięć a nie ich modułów przy zastosowaniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego (uzyskiwano większe dokładności pomiarowe). Po drugie dlatego, że stała się przyczynkiem do powstania kolejnych odmian tej metody czyli: metody wektorowej z eliminacją wpływu wybranych harmonicznych na wynik pomiaru [8] (poprzez zastosowanie metody szczególnego próbkowania napięcia) oraz metody wektorowej eliminującej wpływ obciążeń roboczych na wynik pomiaru [9].

Metoda wektorowa polega na pomiarze fazorów dwóch napięć \underline{E} i \underline{U} , odpowiednio przed i po załączeniu rezystancyjnego obciążenia pomiarowego R_0 oraz wyznaczeniu składowych ortogonalnych tych dwóch napięć – rys. 4.



Rys. 4. Fazorowy wykres napięć - metoda wektorowa
Rys. 4. The orthogonal voltage diagram – vector method

Na podstawie znajomości wartości chwilowych napięć E_b i E_c , U_b i U_c (Rys. 5) pobranych w odpowiednich chwilach czasowych można wyznaczyć rezystancję R i reaktancję X pętli zwarcia oraz moduł impedancji pętli zwarcia Z jako:

$$Z = R_0 \sqrt{\frac{(E_c - U_c)^2 + (E_b - U_b)^2}{U_c^2 + U_b^2}} \quad (4)$$

Do zalet metody wektorowej należy zaliczyć: pomiar małych wartości impedancji pętli zwarcia (niezależnie od stosunku X/R w obwodzie) i dużą dokładność pomiaru. Jednocześnie małą masą

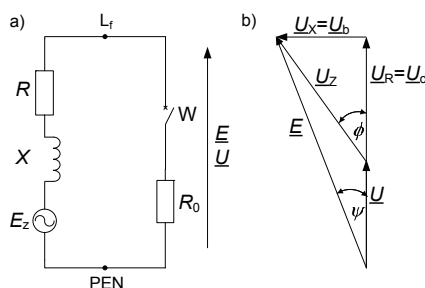
i gabarytami miernika (ze względu na rezystancyjne obciążenie pomiarowe), co przekłada się na niższy koszt wykonania przyrządu.

Lata 90-siąte ubiegłego stulecia oraz początek obecnego stulecia to rozwój mierników głównie z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym: opracowane zostają dwie odmiany metody różnicowej (metoda z przestawieniem i z podstawieniem) oraz metoda z przesunięciem ψ [10]. Metoda z przedstawieniem i metoda z podstawieniem to odmiany metody K. Bielańskiego. W metodzie z przestawieniem [11] można wyróżnić dwa etapy pomiarowe. Etap pierwszy przeprowadzany jest tak jak cykl pierwszy i drugi w metodzie różnicowej (rys. 2). Wynikiem etapu pierwszego jest zmierzone napięcie $\Delta U_1 = E - U$ oraz prąd sztucznego zwarcia I_1 . Natomiast w drugim etapie zostają przestawione miejsca obwodu do pomiaru napięć E i U i następuje przetwarzanie napięcia źródłowego E_z na napięcie E' oraz przetwarzanie napięcia sztucznego zwarcia U na napięcie U' i pomiar napięcia ΔU_2 i prądu I_2 . Przy założeniu, że impedancja obwodu zwarciego jest stała, można przyjąć, że $I_1 = I_2 = I$. Wówczas impedancję pętli wyznacza się jako wartość średnią z dwóch etapów pomiarowych jako:

$$Z = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U_1 + \Delta U_2}{I} \right) \quad (5)$$

Metoda różnicowa z podstawieniem [12] różni się od pozostałych metod różnicowych tym, że w układzie miernika występuje dodatkowe źródło napięcia zwane pomocniczym napięciem odniesienia U_p . W metodzie tej można wyróżnić również dwa cykle pomiarowe. W pierwszym cyklu porównuje się napięcie E z pomocniczym napięciem odniesienia U_p . Wynikiem tego porównania jest wyznaczenie różnicy tych napięć jako $\Delta U_1 = E - U_p$. Natomiast w cyklu drugim porównuje się napięcie sztucznego zwarcia U z pomocniczym napięciem U_p oraz mierzony jest prąd sztucznego zwarcia I .

Kolejną metodą z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym opracowaną w latach 90-tych jest metoda R. Roskosza – metoda z przesunięciem ψ - rys. 5.



Rys. 5. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej a) schemat zastępczy obwodu badanego, b) wykres fazorowy napięć w badanym obwodzie
Fig. 5. The loop impedance measuring principle a) equivalent diagram of the tested circuit, b) orthogonal voltage diagram

Impedancję Z tą metodą wyznacza się na podstawie pomiaru dwóch napięć: napięcia E panującego w miejscu badanym przy odłączonym obciążeniu oraz napięcia U – jakie występuje przy włączonym obciążeniu pomiarowym o znanej wartości rezystancji R_0 oraz pomiarze kąta przesunięcia fazowego ψ między fazorami napięć \underline{E} i \underline{U} , ze wzoru:

$$Z_\psi = R_0 \sqrt{\left(\frac{E}{U} - 1 \right)^2 + 4 \frac{E}{U} \sin^2 \frac{\psi}{2}} \quad (6)$$

Metodę z przesunięciem ψ charakteryzuje mały błąd pomiarowy – nieprzekraczający kilku % oraz możliwość pomiaru małych

wartości rezystancji. a co więcej jest znacznie mniej wrażliwa na silne odkształcenia krzywej napięcia w punkcie pomiarowym niż metoda wektorowa.

W obecnym stuleciu opracowano również kolejną nową metodę [13] z impedancyjnym obciążeniem pomiarowym z samoczynnie regulowanym argumentem. W metodzie tej Z wyznaczone jest ze skutecznych wartości napięć, dzięki czemu znacznie ograniczono główne źródła błędów, w tym również odkształcenia krzywej napięcia sieci w porównaniu z miernikiem typu MR, uzyskując dużo większą dokładność pomiaru impedancji pętli.

3. Wnioski

Na przestrzeni 60 –dziesięciu lat nastąpił ogromny postęp w sposobach i urządzeniach do pomiaru impedancji pętli. Pierwsze mierniki umożliwiały pomiar właściwie głównie rezystancji pętli zwarcia, odznaczały się dużymi gabarytami i masą oraz znacznymi błędami pomiarowymi (rzędu kilkudziesięciu %). W miarę rozwoju w dziedzinie elektroniki cyfrowej powstają metody pomiaru impedancji pętli wykorzystujące przetworniki analogowo-cyfrowe i mikroprocesory. Rozwiązania te umożliwiły znaczne zwiększenie dokładności pomiaru impedancji pętli – obecnie do kilku % oraz spowodowały zmniejszenie gabarytów przyrządów.

W przyszłości niewątpliwie czekają nas kolejne rewolucje w sposobach pomiaru impedancji pętli, albowiem ze względu na istotną wagę tej tematyki dla bezpieczeństwa człowieka, naukowcy nadal będą pracować nad ulepszaniem sposobów pomiaru oraz opracowywaniem nowych generacji mierników do pomiaru impedancji pętli.

4. Literatura

- [1] Roskosz R.: Przyrządy typu MR do pomiaru impedancji pętli zwarciowej. Przegląd Elektrotechniczny nr 6/1990.
- [2] Pflieger P.M.: Prüfgerat für Erdung Und Nullung. Electrotechnische Zeitschrift 57/1936.
- [3] Teresiak Z.: Metody pomiarów oporności pętli zwarciowej zerowania ochronnego. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 11/1963.
- [4] Masny J.: Pomiar impedancji pętli zwarciowych. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 10/1987.
- [5] Sawicki J.: Sposób pomiaru skuteczności zerowania i urządzenie do stosowania tego sposobu. Patent nr 45520 24.07.1961.
- [6] Sawicki J., Spichalski A., Referowski L.: Sposób pomiaru skuteczności zerowania i urządzenie do stosowania tego sposobu. Patent dodatkowy do planetu nr 45520, 15.05.1962.
- [7] Teresiak Z.: Wielkopiętrowy miernik skuteczności zerowania ochronnego. Gospodarka Paliwami i Energią, 1965.
- [8] Roskosz R.: Nowe rozwiązania pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy odkształceniu krzywej napięcia w miejscu badania. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka nr 79, Gdańsk 1995.
- [9] Roskosz R., Czapp S., Galla S., Golijanek-Jędrzejczyk A.: Sposób i układ do pomiaru składowych ortogonalnych oraz modułu wektora impedancji pętli zwarciowej. Nr zgł. P 355349 z dnia 2002.08.08.
- [10] Golijanek-Jędrzejczyk A.: Badanie metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej wykorzystującej składowe parametry fazora napięcia. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2007.
- [11] Nawrocki Z., Dobrzański A., Tyliński A.: Wykorzystanie inżynierii metod pomiarowych przy projektowaniu miernika do pomiaru impedancji obwodu zwarciowego. Przegląd Elektrotechniczny nr 9/1994.
- [12] Stafiniak A.: Metoda pomiaru małych wartości impedancji obwodu zwarciowego. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, 2002.
- [13] Ziółko M.: Nowa metoda pomiaru parametrów sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu impedancyjnego obciążenia pomiarowego z regulowanym argumentem. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2009.