

Krzysztof Ludwinek, Jan Staszak
Politechnika Świętokrzyska

WPLYW PARAMETRÓW TRANSFORMATORA NA WYZNACZANIE IMPEDANCJI PĘTLI ZWARCIOWEJ

INFLUENCE OF THE POWER TRANSFORMER PARAMETERS ON DETERMINATION OF LOOP IMPEDANCE

Streszczenie: W artykule przedstawiono wartości rezystancji i reaktancji impedancji pętli wyznaczonej podczas zwarcia jednofazowego przewodu liniowego do przewodu ochronnego. Obliczenie wartości impedancji pętli zwarciowej przeprowadzono w obwodzie z transformatorem trójfazowym z uwzględnieniem zmian współczynnika mocy impedancji obciążenia. Impedancję pętli zwarciowej wyznaczono przy pomocy wektorowego i algebraicznego pomiaru napięcia przy założeniu stałej wartości impedancji obciążenia dla różnych wartości kąta fazowego impedancji obciążenia. W niniejszym artykule pominięto wpływ udziału innych odbiorników na pomiar impedancji pętli obwodu zwarciowego.

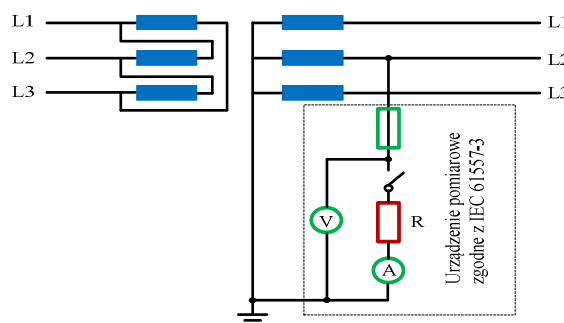
Abstract: The article presents the resistance and reactance values of loop impedance determined during short-phase line conductor to the PE conductor. Calculation of the values of loop impedance is carried out with taking into account changes in the power factor of the three-phase transformer load impedances. Fault loop impedance is calculated by the vector and algebraic voltage measurement assuming a constant load impedance values for different values of the phase angle load impedance. This article does not affect the participation of other receivers to measure the short-circuit loop impedance circuit.

Słowa kluczowe: impedancja pętli zwarciowej, transformator, impedancja obciążenia
Keywords: short circuit loop impedance, transformer, load impedance

1. Wstęp

Zagadnieniom dotyczącym pomiaru impedancji pętli zwarciowej (IPZ) poświęcono wiele prac szczególnie w ośrodkach gdańskim i wrocławskim [1-14]. Prace te głównie dotyczą: różnych metod pomiaru IPZ [1-14], analizie metrologicznej stosowanych metod pomiarowych [2, 4, 13], pomiarom IPZ w instalacjach o napięciu odkształconym [10, 14], pomiarów IPZ w zależności od typu zastosowanego urządzenia różnicowo-prądowego [3], badaniom eksperymentalnym zbudowanych mierników do pomiaru IPZ [1, 8, 12]. Obowiązująca metoda wyznaczania jedno-fazowego prądu zwarciowego jest zawarta w załączniku B Polskiej Normy [15], natomiast wymagana dokładność stawiana przyrządom do pomiaru IPZ jest niewielka i nie powinna maksymalnie różnić się o 30% od wartości rzeczywistej [1] z uwagi na dużą niepewność pomiaru (nagrzewanie się przewodów, pomiar impedancji z dołączonymi odbiorami, w przypadku małych wartości prądów zmienne wartości rezystancji styków), co prowadzi do złagodzenia wymogów stawianym miernikom do pomiaru IPZ. Jeżeli kąt impedancji pętli zwarciowej $\varphi_s \leq 18^\circ$ ($\cos\varphi_s \geq 0,95$),

to wg [16] dopuszcza się stosowanie mierników tylko z rezystancyjnym obciążeniem pomiarowym. Jeżeli warunek $\varphi_s \leq 18^\circ$ nie jest spełniony, do pomiaru IPZ stosuje się rezystancyjno-indukcyjne obciążenie pomiarowe dobrane tak, aby był spełniony warunek $|\varphi_s - \varphi_0| \leq 18^\circ$ przy czym φ_0 jest kątem obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego. Schemat układu do pomiaru IPZ metodą spadku napięcia przedstawia rys. 1 [15].



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru impedancji pętli zwarciowej metodą spadku napięcia [15]

Nie wdając się w szczegóły, metoda pomiaru impedancji pętli zwarciowej Z_k sprowadza się do pomiaru spadku napięcia w układzie jak na rys. 1 w oparciu o zależność [15].

$$Z_s = \frac{U_1 - U_2}{I_2} \quad (1)$$

gdzie: U_1 – wartość skuteczna napięcia zmierzonego przed włączeniem rezystancji obciążenia (rys. 1), U_2 – wartość skuteczna napięcia zmierzonego po włączeniu rezystancji obciążenia R (rys. 1), I_2 – wartość skuteczna prądu płynącego przez obciążenie R (rys. 1).

W uwagach normy [15] podano informację, że metoda pomiaru impedancji pętli zwarciowej Z_k określona spadkiem napięcia w oparciu o zależność (1) daje dobre rezultaty, jeśli reaktancja rozpatrywanego obwodu jest do pominięcia, co dokładniej precyzuje [16]. Ponadto w tej samej normie [15] oraz w literaturze książkowej i w wielu artykułach spotyka się zalecenie, aby różnica między U_1 i U_2 była znaczna oraz aby wartość prądu podczas pomiaru była duża nie wyjaśniając, dlaczego. W pracy [7] autor w sposób zrozumiały tłumaczy stosowanie metody małoprądowej oraz wieloprądowej i wynikający sens (po stronie odbiorczej niskiego napięcia) ewentualnego zwiększania, co powyżej jedynie o 20% wartości samej rezystancji (na skutek działania termicznego) a nie całej impedancji jak zaleca norma [15]. Według [12] stosowanie dużych wartości prądu zwiększa czułość pomiaru.

W niniejszym artykule przeanalizowano wpływ parametrów transformatora na dokładność pomiaru impedancji pętli zwarciowej. Znając wartość impedancji pętli zwarciowej Z_s , oblicza się prąd zwarciowy ustalony I_k wywołany zwarcie przewodu fazowego z przewodem ochronnym lub z częścią przewodzącą dostępną na podstawie zależności:

$$I_k = \frac{U_o}{Z_s} \quad (2)$$

Impedancja pętli zwarciowej jest sumą impedancji: systemu elektroenergetycznego, transformatora, linii zasilającej odbiornik, przewodu ochronnego PE.

2. Impedancja zwarciowa sieci elektroenergetycznej

Impedancję zwarcia systemu elektroenergetycznego wyznacza się z zależności

$$Z_Q = \frac{U_N^2}{S_Q} \quad (3)$$

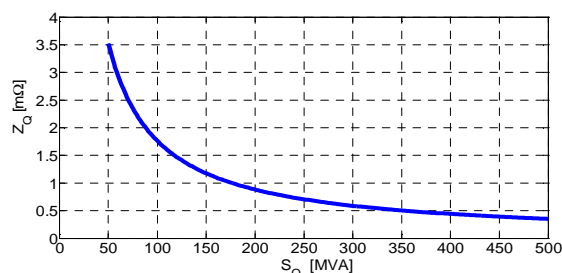
Gdzie: S_Q – moc zwarciowa, U_N – napięcie przewodowe po stronie NN.

Zakres mocy zwarciowej systemu elektroenergetycznego na napięciu przewodowym 400 V zależy od wielu czynników. Dolne wartości

mocy S_Q od 4 do 16 MVA dotyczą obszarów wiejskich (dane na podstawie województwa świętokrzyskiego), zakres powyżej 16 MVA do kilkuset MVA dotyczy obszaru miejskiego.

Dla sieci $U_N \leq 35$ kV przyjmuje się, że rezystancja zwarcia jest równa $R_Q \approx 0,1 X_Q$, natomiast reaktancja zwarcia wynosi $X_Q \approx 0,995 Z_Q$. Dla sieci $U_N > 35$ kV przyjmuje się: $R_Q \approx 0$ (czyli $X_Q \approx Z_Q$).

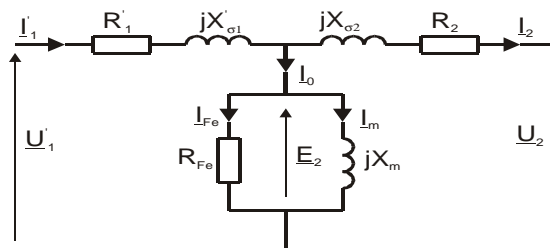
Na rysunku 2 przedstawiono zależność impedancji zwarciowej systemu elektroenergetycznego Z_Q w zależności od mocy zwarciowej systemu S_Q .



Rys. 2. Zależność impedancji zwarciowej systemu elektroenergetycznego Z_Q od mocy zwarciowej systemu S_Q (50 - 400 MVA)

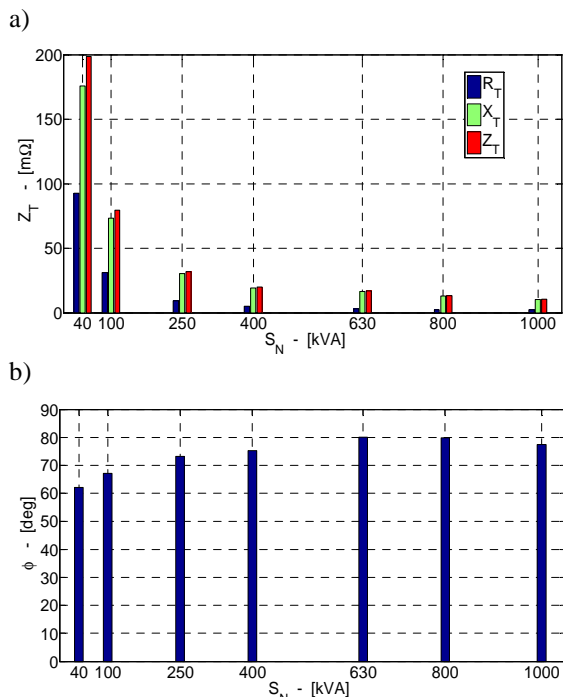
3. Parametry schematu zastępczego transformatora energetycznego

Parametry schematu zastępczego trójfazowych transformatorów energetycznych (rys. 3) określa się na podstawie znajomości danych znamionowych: S_N , U_{1N}/U_{2N} , I_0 , $U_z\%$, ΔP_{0N} , ΔP_{cuN} [17]. Większość producentów transformatorów nie podaje prądu biegu jałowego I_0 .



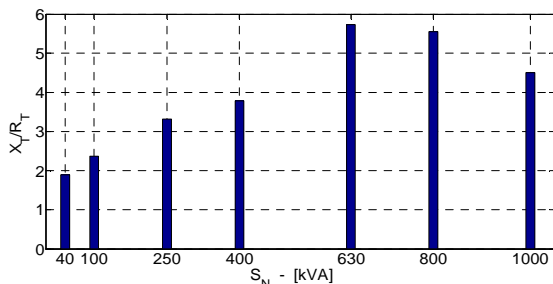
Rys. 3. Schemat zastępczy transformatora trójfazowego

W niniejszym artykule parametry schematu zastępczego wyznaczono dla trójfazowych transformatorów rozdzielczych o napięciu $U_{1N}/U_{2N} = 15,75/0,42$ kV [17]. Na rysunku 4 przedstawiono obliczone wartości gałęzi podłużnej transformatora: rezystancji zwarcia $R_T = R'_1 + R_2$, reaktancji zwarcia $X_T = X'_1 + X_2$, impedancji zwarcia $Z_T = R_T + jX_T$ oraz kąta fazowego impedancji zwarcia dla transformatorów trójfazowych o mocy S_N od 40 do 1000 kVA.



Rys. 4. Zależność parametrów podłużnych transformatora w funkcji mocy \$S_N\$: a) rezystancji \$R_T\$ i reaktancji \$X_T\$ oraz impedancji zwarcia \$Z_T\$, b) kąta fazowego zwarcia

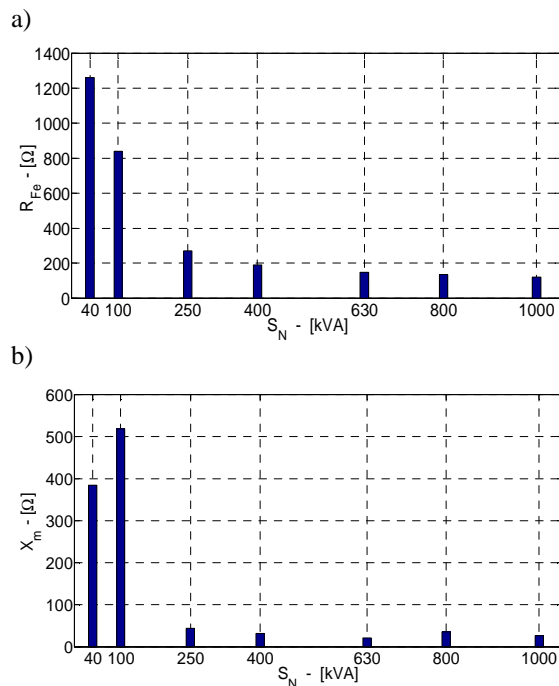
Na rysunku 5 przedstawiono stosunek reaktancji zwarcia do rezystancji zwarcia dla transformatorów trójfazowych [17] o mocy \$S_N\$ od 40 do 1000 kVA (dla wartości przedstawionych na rys. 3).



Rys. 5. Stosunek reaktancji do rezystancji zwarcia dla transformatorów trójfazowych o mocy \$S_N\$ od 40 do 1000 kVA

Z przedstawionych na rysunku 4 wartości widać, że o impedancji zwarcia transformatorów trójfazowych o mocy \$S_N\$ od 40 do 1000 kVA decydujące znaczenie ma reaktancja zwarcia \$X_T\$. Stosunek reaktancji do rezystancji zwarcia zawiera się w granicach od 2 - 6.

Na rysunku 6 przedstawiono zależność rezystancji reprezentującej straty w rdzeniu \$R_{Fe}\$ oraz reaktancji magnesowania \$X_m\$ dla transformatorów trójfazowych w zakresie od 40 do 1000 kVA.



Rys. 6. Zależność parametrów poprzecznych transformatora od mocy \$S_N\$ a) rezystancji strat w rdzeniu \$R_{Fe}\$, b) reaktancji magnesowania \$X_m\$

Porównując wartości rezystancji \$R_T\$ i reaktancji zwarcia \$X_T\$ transformatora (rys. 4) z rezystancjami strat w rdzeniu \$R_{Fe}\$ i reaktancjami magnesowania \$X_m\$ (rys. 6), można stwierdzić, że w obliczeniach IPZ można pominąć gałąź poprzeczną transformatora.

4. Parametry linii zasilania

Wartość rezystancji linii \$R_{L20}\$ (przewodu, kabla) w temperaturze 20°C określa się na podstawie zależności:

$$R_{L20} = \frac{l}{\gamma S} \quad (4)$$

Gdzie: \$l\$ – długość linii w [m], \$\gamma\$ – przewodność właściwa w temperaturze 20°C, która wynosi: dla miedzi \$\gamma_{Cu} = 55\$ [m/(Ωmm²)], dla aluminium \$\gamma_{Al} = 35\$ [m/(Ωmm²)].

Na skutek przyrostu temperatury, zmienia się wartość rezystancji linii. Początkowo w zakresie temperatur powyżej 20°C do 200°C wartość rezystancji linii \$R_L\$ określa się na podstawie liniowej zależności [18]:

$$R_L = R_{L20}(1 + \alpha_{20}\Delta T) \quad (5)$$

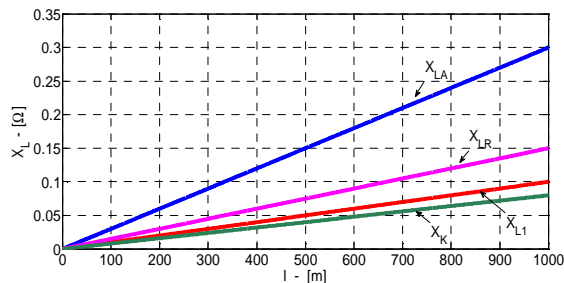
Gdzie: \$\alpha_{20}\$ – współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej dla metali np. Cu, Al wynosi \$\alpha_{20} = 0.004\$, \$\Delta T\$ – przyrost temperatury.

Natomiast w zakresie powyżej 200°C przyrost rezystancji jest już nieliniowy i wartość rezystancji linii R_L określa się na podstawie zależności [18]:

$$R_L = R_{L20}(1 + \alpha_{20}\Delta T + \beta_{20}\Delta T^2) \quad (6)$$

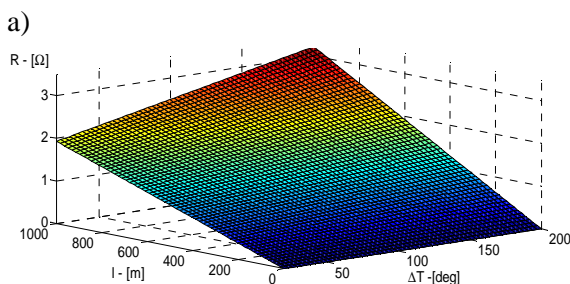
Gdzie: β_{20} – drugi współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej dla metali np. Cu, Al przyjmuje się $\beta_{20} = 1e^{-6} [1/\text{K}^2]$.

Na rysunku 7 przedstawiono wartości reaktancji w funkcji odległości dla: linii napowietrznej X_{LA} dla przewodu instalacji niskiego napięcia układanego w rurze instalacyjnej stalowej X_{LR} oraz układanego nie w rurze instalacyjnej stalowej X_{LI} , linii kablowej X_K . Wartości do obliczeń przyjęto z [13].

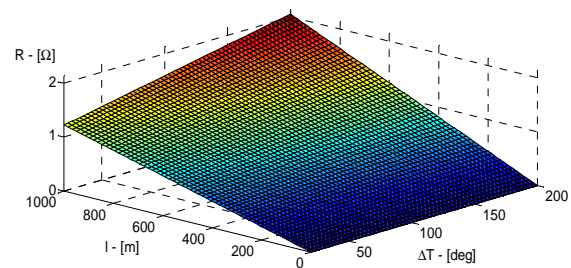


Rys. 7. Wartości reaktancji w funkcji odległości dla: linii napowietrznej X_{LA} , przewodu instalacji niskiego napięcia układanego w rurze instalacyjnej metalowej X_{LR} oraz nie w rurze instalacyjnej metalowej X_{LI} , linii kablowej X_K

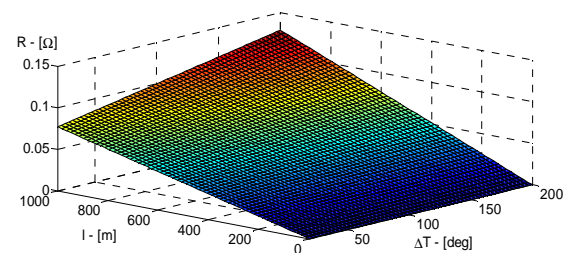
Na rysunku 8 przedstawiono obliczone wartości rezystancji linii w funkcji odległości i temperatury w oparciu o zależności (3) ÷ (5) dla: przewodu aluminiowego R_{LAl} o przekroju 16mm^2 i miedzianego R_{LCu} o przekroju 400mm^2 dla temperatury od 20°C do 200°C . Przedstawione na rysunku 8 wartości rezystancji przewodu miedzianego lub aluminiowego o przekrojach 16mm^2 oraz 400mm^2 podają maksymalne możliwe przedziały zmian rezystancji w zależności od przekroju, długości i spodziewanej maksymalnej temperatury nagrzewania się przewodu.



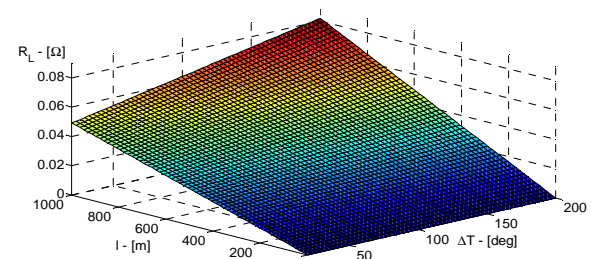
b)



c)



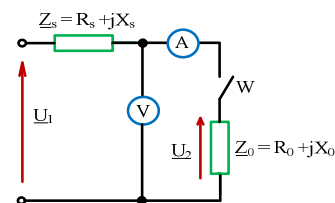
d)



Rys. 8. Obliczone wartości rezystancji linii w funkcji odległości i temperatury w oparciu o zależności (3) ÷ (5) i zmiennej temperatury od 20°C do 200°C dla a) Al 16mm^2 , b) Cu 16mm^2 , c) Al 400mm^2 , d) Cu 400mm^2

5. Wpływ parametrów transformatora na obliczanie IPZ

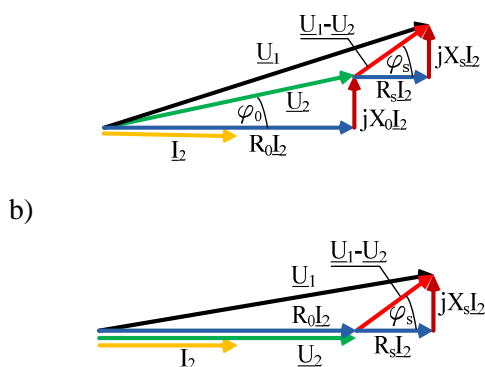
Schemat zastępczy pomiaru impedancji pętli zwarciowej przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Schemat zastępczy pomiaru impedancji pętli zwarciowej

Schematowi zastępczemu (rys. 9) odpowiadają wykresy wektorowe sztucznego zwarcia przedstawione na rysunku 10.

a)



Rys. 10. Wykres wektorowy sztucznego zwarcia a) poprzez Z_0 , b) poprzez R_0

Dokładna wartość modułu IPZ oblicza się z zależności

$$Z_s = \frac{|U_1 - U_2|}{|U_2|} |Z_0| \quad (7)$$

Z rysunku 10a wynika, że jeśli kąt impedancji pętli zwarcia φ_s jest bliski kątowi impedancji obciążenia pomiarowego φ_0 , to moduł IPZ można wyznaczyć ze wzoru

$$Z_s = \frac{U_1 - U_2}{U_2} Z_0 \quad (8)$$

Przy kątach $\varphi_s \leq 18^\circ$ zamiast obciążenia impedancyjnego Z_0 można stosować obciążenie R_0 (rys. 10b).

Skutkiem zastosowania wzoru (7) jest występowanie błędu pomiaru IPZ [2, 4].

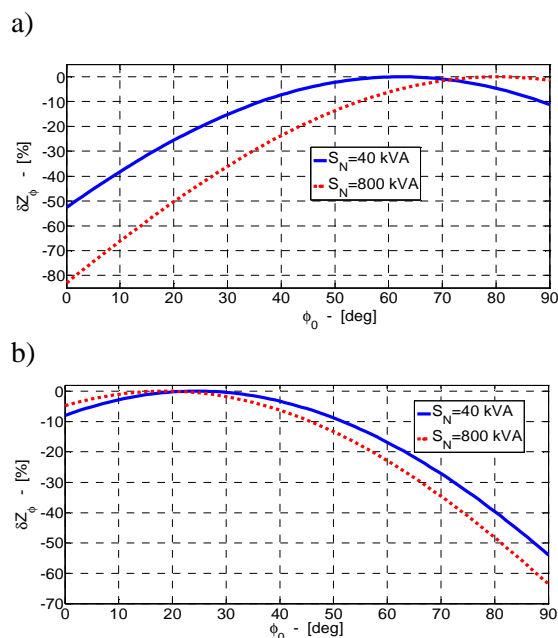
$$\delta Z_s = \frac{-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{Z_s}{Z_0}\right)^2 + 2 \frac{Z_s}{Z_0} \cos(\varphi_s - \varphi_0)}}{\frac{Z_s}{Z_0}} - 1 \quad (9)$$

Na rysunku 11 przedstawiono zależność błędu pomiaru IPZ dla transformatora energetycznego o mocy znamionowej 40 i 800 kVA i kącie fazowym impedancji zwarcia transformatora φ_T odpowiednio 62° i 80° . Obliczenia wykonano w pobliżu zacisków transformatorów oraz dla impedancji linii o długości 1000 m o rezystancji $R_L = 0.25 \Omega$ i reaktancji $X_L = 0.25 \Omega$ (założono, równość impedancji przewodu PE i linii zasilania). Do obliczeń przyjęto wartość modułu impedancji obciążenia $Z_0 = 10 \Omega$ o kącie fazowym φ_0 zmieniającym się od 0° do 90° .

7. Wnioski

W artykule przedstawiono wpływ impedancji zwarcia transformatora oraz linii zasilającej na

dokładność pomiaru IPZ w zależności od kąta fazowego impedancji obciążenia pomiarowego. Błąd pomiaru jest najmniejszy wtedy, kiedy kąt fazowy impedancji pętli zwarcia φ_s jest równy kątowi fazowemu impedancji obciążenia φ_0 . W przypadku pomiaru IPZ w bliskiej odległości od transformatora energetycznego o wartości impedancji decyduje impedancja transformatora, w której decydujący wpływ ma reaktancja. Zastosowanie w tym przypadku obciążenia rezystancyjnego ($\varphi_0 = 0$) powoduje duży błąd pomiaru δZ_s (rys. 11a), gdyż kąt φ_0 różni się znacznie od kąta φ_s . Dla transformatorów o mocach od 40 do 800 kVA błędy pomiaru IPZ (przy $Z_0 = R_0$) będą wynosić od 50% do 80%.



Rys. 11. Zależność błędu pomiaru IPZ od mocy znamionowej transformatora energetycznego a) pomiar w pobliżu transformatora, b) pomiar w odległości 1000 m od transformatora

W przypadku pomiaru IPZ w dalszej odległości od transformatora energetycznego o wartości impedancji decyduje impedancja linii zasilającej, w której decydujący wpływ ma rezystancja. Zastosowanie w tym przypadku obciążenia rezystancyjnego ($\varphi_0 = 0$) powoduje powstanie błędu pomiaru δZ_s nieprzekraczającego 30% (co jest wymagane przez normę). W tym przypadku kąt fazowy impedancji obciążenia pomiarowego φ_0 różni się niewiele od kąta impedancji pętli zwarcia φ_s (rys. 11b).

8. Literatura

- [1] S. Czapp „Badania eksperymentalne laboratoryjnego modelu miernika impedancji pętli zwarciowej”, *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej*, Tom IX, zeszyt 2, s. 27 – 32, 2003.
- [2] S. Czapp „Kontrola stanu instalacji elektrycznych niskiego napięcia – Przegląd aktualnych wymagań w zakresie prób i pomiarów. *Zeszyty Naukowe WEiA Politechniki Gdańskiej* Nr 27 XXXV Konferencja Naukowo - Techniczna Gdańskie Dni Elektryki' 2010.
- [3] S. Czapp „Pomiar impedancji pętli zwarciowej w instalacjach z urządzeniami różnicowoprądowymi, Ochrona przeciwporażeniowa”, *INPE* nr 146-147, s. 39 – 49, 2011.
- [4] A. Golijanek-Jędrzejczyk „Badanie metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej wykorzystującej składową fazora napięcia”, *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk 2012.
- [5] A. Golijanek-Jędrzejczyk, R. Roskosz „Układ do wzorcowania mierników impedancji pętli zwarciowej”, *Zastosowanie komputerów w nauce i technice, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 21, s. 111 - 118, 2005.
- [6] E. Musiał „Ochrona przeciwporażeniowa w rządzaniach niskiego napięcia. Konsekwencje ustanowienia normy PN-HD 60364-4-41:2009”, *Miesięcznik SEP Informacje o normach i przepisach elektrycznych*, Nr 129-130, s. 5-39, 2010.
- [7] E. Musiał „Pomiary odbiorcze i eksploatacyjne zapewniające bezpieczeństwo przy urządzeniach elektroenergetycznych. *Szkolenie dla członków Pomorsko-Kujawskiej Izby Inżynierów Budownictwa*. Bydgoszcz – Toruń – Włocławek, 26-27 listopad 2010 r.
- [8] R. Roskosz „Pomiar impedancji pętli zwarciowej w sieciach o odkształconej krzywej napięcia”, *Przegląd elektrotechniczny*, Nr 10, s. 995-998, 2004.
- [9] R. Roskosz „Przyrządy typu MR do pomiaru impedancji pętli zwarciowej. *Przegląd elektrotechniczny*, Nr 6, s. 125 – 127, 1990.
- [10] R. Roskosz, M. Ziółko „Pomiar impedancji elementów sieci elektroenergetycznych przy napięciu odkształconym”, *Zeszyty Naukowe Wydziału*

Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Nr 21, Gdańsk, s. 201 – 207, 2005.

- [11] R. Roskosz “A new method for measurement of earth fault loop impedance”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, pp. 541-546, 1991.
- [12] M. Ziółko, A. Golijanek-Jędrzejczyk „Stanowisko laboratoryjne do pomiaru impedancji pętli zwarciowej”, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 25, XVIII Seminarium, Zastosowanie Komputerów w Nauce i Technice, s. 159 – 162, 2008.
- [13] A. Stafiniak „Analiza metrologiczna metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy wykorzystaniu przetworników analogowych”, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* Nr 54 Studia i Materiały, Nr 23, 2003.
- [14] A. Novitskiy, H. Schau “Influence of the Ground Impedance on the Earth Fault Current Calculation in Lengthy Electrical Networks Containing Harmonic Sources”, *Power Quality and Supply Reliability Conference*, 27-29 Aug. pp. 157 – 162, 2008
- [15] PN-HD 60364-6: 2008: Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 6: Sprawdzenie.
- [16] PN-HD 61557-3:2007 Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemiennych do 1000 V i stałych do 1500 V - Urządzenia przeznaczone do sprawdzania, pomiarów lub monitorowania środków ochronnych - Część 3: Impedancja pętli zwarcia.
- [17] Transformatory olejowo – dystrybucyjne. *Dane techniczne*. Nowa-Plus.
- [18] Wiatr J., Orzechowski M: *Poradnik projektanta elektryka*. Medium DW. Warszawa 2008.

Autorzy

dr inż. Krzysztof Ludwinek, k.ludwinek@tu.kielce.pl
 dr hab. inż. Jan Staszak, j.staszak@tu.kielce.pl
 Politechnika Świętokrzyska,
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,
 Al. Tysiąclecia PP. 7, 25–314 Kielce