

XV Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE' 2005
Oddział Gdański PTETiS

POMIAR IMPEDANCJI ELEMENTÓW SIECI ELEKTROENERGETYCZNYCH PRZY NAPIĘCIU ODKSZTAŁCONYM

Ryszard ROSKOSZ, Michał ZIÓŁKO

Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
tel: (058)3472845 fax: (058)3471726 e-mail: rroskosz@ely.pg.gda.pl

W pracy przedstawiono zagadnienia pomiaru impedancji elementów sieci elektroenergetycznych. Przeprowadzono analizę wpływu odkształcenia napięcia sieci na błędy pomiaru przy stosowaniu metody technicznej. Badania i obliczenia błędów przeprowadzone zostały dla wybranych typów odkształceń krzywej napięcia i różnych parametrów obwodu badanego.

1. WIADOMOŚCI WSTĘPNE

Impedancję obwodu zwarciovego można wyznaczyć na podstawie znajomości impedancji takich elementów sieci jak transformatory, przewody szynowe, linie kablowe, linie napowietrzne, połączenia wyrównawcze, uziemienia robocze itd. Znając impedancję pętli można oszacować wartości prądów zwarciovych potrzebnych do zwymiarowania zabezpieczeń nadprądowych oraz określić wymaganą wytrzymałość zwarciovą wszystkich elementów obwodu. W praktycznych obliczeniach można pominąć składniki obwodu o niewielkiej impedancji (przekładniki prądowe, zestyki stałe i ruchome, krótkie odcinki przewodów) lub posłużyć się szacunkowymi danymi dostępnymi w literaturze. Dokładniejsze wartości należy wykorzystać przy rozpatrywaniu tzw. „zwarć bliskich” (w pobliżu transformatora), kiedy udział impedancji elementów dodatkowych w całkowitej impedancji obwodu zwarciovego jest znaczący. W praktyce impedancję pętli zwarciovej bądź impedancję elementów składowych pętli zwarciovej np. impedancję połączenia wyrównawczego wyznacza się na podstawie danych literaturowych lub pomiaru przy użyciu odpowiednich metod.

W obecnie eksploatowanych sieciach występują odbiorniki nieliniowe powodujące deformacje krzywej napięcia. Stopień odkształcenia napięcia w danym punkcie sieci zależy od parametrów elementów nieliniowych (źródeł) generujących wyższe harmoniczne jak również od parametrów sieci elektroenergetycznej [1]. Pomiar impedancji elementów sieci elektroenergetycznych może być obciążony dodatkowym błędem z tytułu odkształcenia krzywej napięcia.

W referacie przedstawiono problematykę pomiaru impedancji elementów obwodu zwarciovego, gdzie krzywa napięcia w miejscu badania może być odkształcona. Przeprowadzono analizę wpływu wyższych harmonicznycch zawartych w napięciu badanym na błędy pomiaru impedancji tych elementów przy stosowaniu klasycznych metod opartych na pomiarze skutecznych wartości napięcia i prądu. Badania i obliczenia błędów pomiaru przeprowadzone zostały dla wybranych typów odkształceń krzywej napięcia oraz dla różnych parametrów obwodu badanego. Przeprowadzona analiza pozwoli ocenić, które znane metody mogą być stosowane w sieciach o rosnącym stopniu odkształcenia i w razie potrzeby – poszukać nowych rozwiązań o lepszych właściwościach metrologicznych.

2. METODA TECHNICZNA POMIARU IMPEDANCJI ELEMENTÓW SIECI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Moduły impedancji elementów obwodu zwarciovego takich jak np. połączenia wyrównawcze czy przekładniki prądowe mają z reguły niewielkie wartości rzędu mΩ.

Tablica 1. Impedancje zgodne wybranych elementów obwodu zwarciovego [2], [3], [4]

Element obwodu zwarciovego	Rezystancja mΩ	Reaktancja mΩ	Wartość R_1 i X_1 zależne od:
	R_1	X_1	
Cewki prądowe wyłączników samoczynnych o różnych prądach I_n	1,5 ÷ 0,04	0,9 ÷ 0,05	Typu łącznika i prądu znamionowego I_n
Przekładniki prądowe o różnych przekładniach	3,0 ÷ 0,02	13,0 ÷ 0,02	Typu przekładnika i prądu znamionowego pierwotnego
Szynoprzewody (metr długości)	0,14	0,9	Przekroju, rezystywności i odległości pomiędzy przewodami
Linie napowietrzne trójfazowe jednotorowe o przewodach aluminiowych (metr długości)	1,805 ÷ 0,309	0,3	
Uziom rozległy	0,4 ÷ 0,35	0,25 ÷ 0,35	Wymiarów, rezystywności gruntu

Z tego względu w celu zwiększenia dokładności pomiaru oraz zapewnienia warunków możliwie bliskich rzeczywistemu zwarciu, prąd pomiarowy powinien mieć odpowiednio dużą wartość. Do jego wymuszenia wykorzystuje się najczęściej napięcie z sieci niskiego napięcia. Pomiar impedancji elementów obwodu zwarciovego przeprowadzany jest zwykle metodą techniczną, na podstawie skutecznych wartości napięcia i prądu przepływającego przez badany element.

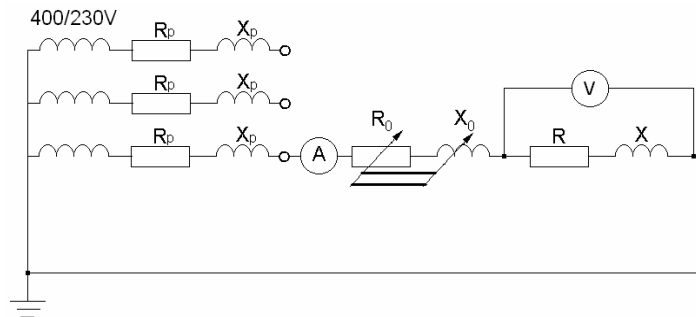
Wymuszany w układzie prąd można regulować poprzez zasilanie obwodu napięciem międzyprzewodowym lub fazowym oraz włączenie do obwodu dodatkowej impedancji obciążenia pomiarowego o regulowanej wartości modułu Z_0 . Najczęściej jako dodatkowe obciążenie pomiarowe stosuje się rezystory.

2.1. Zagadnienia wpływu odkształceń napięcia na dokładność pomiaru

Metoda techniczna pomiaru impedancji elementów sieci elektroenergetycznych daje poprawne wyniki przy zasilaniu układu pomiarowego napięciem sinusoidalnym oraz przy

pominięciu klasycznych źródeł błędu (błąd metody, błąd aparatury). Obecnie w sieciach elektroenergetycznych są rozpowszechnione układy energoelektroniczne pobierające prąd odkształcony i w miarę jak rośnie ich udział w obciążeniu sieci, rośnie odkształcenie krzywej napięcia. Odkształcenie napięcia pomiarowego przyczynia się do powstania błędów pomiarowych szczególnie w sytuacjach, gdy składowa reaktancyjna badanego elementu jest znacząca. Błędy wynikające z odkształcenia krzywej napięcia pomiarowego mogą w takiej sytuacji osiągać wartość nawet kilkudziesięciu procent w zależności od stopnia odkształcenia krzywej napięcia oraz zastosowanej impedancji ograniczającej prąd pomiarowy.

W pracy przedstawiono badania wpływu odkształcenia napięcia na wartości błędu pomiaru impedancji elementów obwodu zwarciovego dla warunków pomiaru i parametrów charakteryzujących miejsce badania, jakie mogą wystąpić w praktyce. W rozważaniach tych przyjęto, że na wynik pomiaru nie wpływają inne źródła błędów. Przyjęty do badań liniowy obwód zastępczy pokazany na rys.1 składa się z takich elementów jak: impedancja sieci zasilającej ($Z_p=R_p+jX_p$), impedancja elementu badanego ($Z=R+jX$), oraz impedancja obciążenia pomiarowego ($Z_0=R_0+jX_0$). Impedancja Z wyznaczana jest na podstawie pomiaru napięcia na badanym elemencie U oraz pomiaru prądu I przepływającego przez ten element. Przyjęto, że odkształcenie krzywej napięcia w obwodzie badanym wiąże się z występowaniem harmonicznych: trzeciej (E_3), piątej (E_5), siódmej (E_7), jedenastej (E_{11}) i trzynastej (E_{13}). Inne harmoniczne mają znacznie mniejszy udział i będą w tej analizie pominięte.



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru impedancji elementu obwodu zwarciovego metodą techniczną
A – amperomierz, V – woltomierz, R, X – rezystancja i reaktancja elementu, R_0 , X_0 – rezystancja i reaktancja obciążenia pomiarowego, R_p , X_p – rezystancja i reaktancja sieci zasilającej

Dla uproszczenia zapisów dalszych rozważań wprowadza się współczynniki względne a_n , charakteryzujące udziały amplitud poszczególnych harmonicznych E_n , w odniesieniu do amplitudy harmonicznej podstawowej E_1 :

$$a_n = \frac{E_n}{E_1} \quad (1)$$

gdzie: $n = 1, 3, 5, 7, 11, 13$

Wartość chwilową napięcia zasilania odkształconego można wyrazić wzorem:

$$e(t) = \sum_n \sqrt{2} E_1 a_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (2)$$

gdzie: α_n – fazy początkowe składowych harmonicznych

W przedstawionym na rys. 1 obwodzie popłynie prąd o wartości chwilowej:

$$i(t) = \sum_n \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n - \psi_n) \quad (3)$$

Kąty przesunięć fazowych impedancji obwodu badanego ($Z+Z_0+Z_p$) określone są wzorami:

$$\psi_n = a \tan \frac{n(X + X_0 + X_p)}{R + R_0 + R_p} \quad (4)$$

gdzie: R, R_0, R_p – rezystancja elementu, obciążenia oraz sieci zasilającej

X, X_0, X_p – reaktancja elementu, obciążenia oraz sieci zasilającej

Uwzględniając (1) wartości skuteczne prądów kolejnych harmonicznych są określone wzorami:

$$I_n = \frac{a_n E_n}{\sqrt{(R + R_0 + R_p)^2 + (nX + nX_0 + nX_p)^2}} \quad (5)$$

Natomiast wartość chwilowa napięcia na impedancji badanego elementu Z ma postać:

$$u(t) = \sum_n \sqrt{2} U_n \sin(n\omega t + \varphi_n + \alpha_n - \psi_n) \quad (6)$$

Kąty przesunięć fazowych impedancji Z określone są wzorami:

$$\varphi_n = a \tan \frac{nX}{R} \quad (7)$$

Wartości skuteczne napięć poszczególnych harmonicznych dane są wzorami:

$$U_n = \frac{a_n E_n \sqrt{R^2 + (nX)^2}}{\sqrt{(R + R_0 + R_p)^2 + (nX + nX_0 + nX_p)^2}} \quad (8)$$

Wartość skuteczną napięcia odkształconego na impedancji elementu obwodu zwarcioowego określa zależność:

$$U_{sk} = \sqrt{\sum_n U_n^2} \quad (9)$$

Natomiast wartość skuteczną prądu odkształconego dana jest związkiem:

$$I_{sk} = \sqrt{\sum_n I_n^2} \quad (10)$$

W przedstawionej w pracy metodzie zmierzona wartość impedancji badanego elementu wyznacza się ze wzoru:

$$Z_m = \frac{U_{sk}}{I_{sk}} \quad (11)$$

Znając rzeczywistą wartość impedancji elementu Z oraz jej wartość zmierzona Z_m procentowy błąd δZ_m wynikający z odkształcenia napięcia określa zależność:

$$\delta Z_m = \frac{Z_m - Z}{Z} \cdot 100\% \quad (12)$$

Przykładowe obliczenia błędów pomiaru impedancji elementów sieci elektroenergetycznych przeprowadzono za pomocą programu komputerowego MATHCAD. Wyniki obliczeń zestawione są w tabeli 2 oraz prezentowane są na rysunku 2. Założono, że w krzywej napięcia mogą występować jednocześnie:

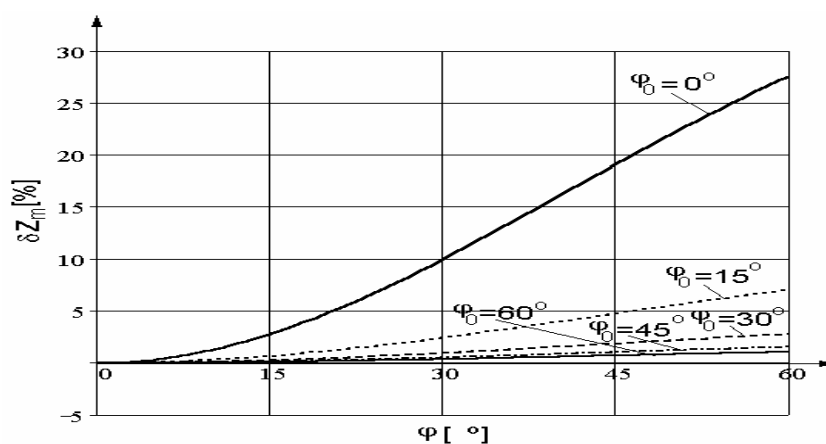
- a) - trzecia, piąta, siódma, jedenasta i trzynasta harmoniczna o średnich wartościach współczynników udziału: $a_3=0,1$; $a_5=0,08$; $a_7=0,06$; $a_{11}=0,05$; $a_{13}=0,03$ (wyniki – rys. 2).
- b) - piąta, siódma, jedenasta i trzynasta harmoniczna o dużych wartościach współczynników udziału: $a_5=0,15$; $a_7=0,1$; $a_{11}=0,07$; $a_{13}=0,05$ (wyniki w tabeli 2).

Dla łatwiejszego porównania wyników badań, obliczenia błędu pomiaru zostały przeprowadzone dla impedancji wybranego elementu obwodu zwarcioowego (np. przekładnika prądowego) o jednej wartości modułu $Z=0,01\Omega$. Dla przedstawienia wpływu wartości prądu pomiarowego na błąd pomiaru przyjęto trzy wartości prądu pomiarowego: - duży prąd pomiarowy ($Z_0 = 2\Omega$), - średni prąd pomiarowy ($Z_0 = 10\Omega$) oraz - mały prąd pomiarowy ($Z_0 = 100\Omega$). Założono, że pomiaru impedancji elementu dokonano w pobliżu transformatora i z dala od transformatora i przyjęto dwie wartości impedancji i argumentu sieci zasilającej odpowiednio: $Z_p=0,01\Omega$, $\varphi_p=45^\circ$ oraz $Z_p=0,4\Omega$, $\varphi_p=15^\circ$.

W celu przedstawienia wpływu kątów fazowych impedancji elementu obwodu φ oraz obciążenia pomiarowego φ_0 na dokładność pomiaru założono, że kąt obu impedancji zmienia się skokowo od 0° do 60° co 15° .

Tablica 2. Błędy pomiaru $\delta Z_m(\varphi)$ dla współczynników względnych: $a_5=0,15$; $a_7=0,1$; $a_{11}=0,07$; $a_{13}=0,05$ przy $Z_p=0.4\Omega$ i $\varphi_p=15^\circ$ i $Z=0.01\Omega$

Kąty fazowe impedancji		Prąd pomiarowy		
obciążenia pomiarowego	elementu	duży	średni	mały
		$Z_0 = 2\Omega$	$Z_0 = 10\Omega$	$Z_0 = 100\Omega$
$\varphi_0 [^\circ]$	$\varphi [^\circ]$	$\delta Z_m [\%]$	$\delta Z_m [\%]$	$\delta Z_m [\%]$
0	0	0	0	0
0	15	5.494	6.277	6.331
0	30	19.114	21.781	21.963
0	45	35.396	40.207	40.535
0	60	49.819	56.47	56.923
15	0	0	0	0
15	15	1.382	1.382	1.382
15	30	5.036	5.058	5.064
15	45	9.791	9.871	9.893
15	60	14.312	14.474	14.518
30	0	0	0	0
30	15	0.548	0.491	0.477
30	30	2.023	1.817	1.768
30	45	3.993	3.6	3.505
30	60	5.914	5.35	5.213
45	0	0	0	0
45	15	0.3	0.261	0.252
45	30	1.113	0.971	0.939
45	45	2.209	1.931	1.868
45	60	3.288	2.882	2.79
60	0	0	0	0
60	15	0.201	0.177	0.172
60	30	0.746	0.657	0.639
60	45	1.484	1.31	1.273
60	60	2.214	1.958	1.904



Rys. 2. Błąd pomiaru $\delta Z_m(\varphi)$ dla $Z_0=10\Omega$ dla różnych φ_0 oraz dla: $a_3=0,1$; $a_5=0,08$; $a_7=0,06$; $a_{11}=0,05$; $a_{13}=0,03$ przy $Z_p=0.03\Omega$ i $\varphi_p=45^\circ$ i $Z=0.01\Omega$

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych badań wpływu odkształcenia krzywej napięcia na dokładność pomiaru impedancji elementów sieci elektroenergetycznych przeprowadzonych metodą techniczną wynika kilka wniosków ważnych dla zastosowań praktycznych:

- w większości zbadanych przypadków występują znaczne błędy przekraczające wartości dopuszczalne, głównie dla przypadku stosowania rezystancyjnego obciążenia pomiarowego,
- wyznaczone błędy pomiaru zależą nie tylko od różnicy argumentów ($\varphi_0 - \varphi$) ale także od tego, jakie harmoniczne i z jakim udziałem występują w krzywej napięcia,
- błędy można zmniejszyć przez stosowanie impedancyjnego obciążenia pomiarowego Z_0 .

4. BIBLIOGRAFIA

1. Roskosz R.: Nowe rozwiązania pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy odkształceniu krzywej napięcia w miejscu badania, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1995.
2. Teresiak Z.: Obliczanie prądu zwarciowego dla sprawdzenia skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w sieciach TN, XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna, Wrocław 1999, (II), s. 37-50.
3. Piasecki J.: Uproszczone obliczanie prądów zwarciowych w niskonapięciowych instalacjach zakładów przemysłowych-część II, Gospodarka paliwami i energią, 9, 1968.
4. Kończykowski S., Bursztyński J.: Zwarcia w układach elektroenergetycznych, Warszawa WNT 1965.

MEASUREMENT OF POWER SYSTEM ELEMENTS IMPEDANCE IN PRESENCE OF DISTORTION VOLTAGE WAVEFORM

This paper presents the problem of measurement the impedance of power system elements in presence of distortion network voltage waveform. The analysis of the effects of voltage distortion on impedance measurement error were conducted for drop voltage method. Test and calculation of measurement errors were performed for given types of distorted waveform and different parameters of tested network.

