

POMIARY WYŻSZYCH HARMONICZNYCH NAPIĘCIA W SIECI 400 kV – REFERAT KONFERENCYJNY

Ryszard PAWELEK¹, Irena WASIAK¹, Marian JUREK²

1. Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej
tel: 42 631-25-95 fax: 42 631-26-06 e-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl; irena.wasiak@p.lodz.pl
2. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.
tel: 22 242-15-91 fax: 22 242-21-45 e-mail: marian.jurek@pse-operator.pl

Streszczenie: Przedstawiono analizę wyników pomiarów wyższych harmoniczných napięcia wykonanych w sieci przesyłowej 400 kV. Sygnały pomiarowe napięcie uzyskano z trzech przetworników pomiarowych: rezystancyjnego dzielnika napięcia, napięciowego przekładnika indukcyjnego oraz napięciowego przekładnika pojemnościowego. Wyniki pomiarów z dzielnika rezystancyjnego przyjęto jako referencyjne odnosząc do nich wyniki pomiarów uzyskane przy wykorzystaniu przekładników. Dokonano oszacowania błędów pomiarowych wyższych harmoniczných napięcia powodowanych przez przekładniki.

Słowa kluczowe: wyższe harmoniczne, jakość energii elektrycznej, pomiary jakości energii elektrycznej.

1. WPROWADZENIE

Najczęściej do pomiaru wyższych harmoniczných w sieciach najwyższych napięć wykorzystywane są transformatory pomiarowe (przekładniki napięciowe). Przekładniki napięciowe różnych typów stosowane w energetyce projektowane są do pracy przy częstotliwości 50 Hz, a ich charakterystyki przenoszenia dla wyższych częstotliwości nie są znane. Analizując schematy zastępcze przekładników należy zauważyć wpływ indukcyjności, pojemności i licznych nieliniowości na ich charakterystyki przenoszenia w dziedzinie częstotliwości.

Potrzeba monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych od dawna była sygnalizowana [1]. W celu umożliwienia wykonywania dokładnego pomiaru wyższych harmoniczných (wh) napięcia, częstotliwości oraz pojedynczych zakłóceń (np. stromości przepięć lub zapadów) operator sieci przesyłowej PSE Operator S.A. przy współpracy z firmą Transformex Sp. z o.o. zainstalował w jednej ze stacji 400 kV pomiarowy dzielnik rezystancyjny. Szczegółowy opis techniczny dzielnika został zamieszczony w [2, 3].

Zainstalowany dzielnik rezystancyjny z założenia powinien być elementem liniowym w dziedzinie częstotliwości i w związku z tym przenosić przebiegi chwilowe napięcia w stanach przejściowych i ustalonych pracy sieci bez żadnych zniekształceń. Dzielnik powinien być zatem pozbawiony

większości wad, które posiadają przekładniki napięciowe. Własności pomiarowe dzielnika w tym zakresie zostały potwierdzone badaniami laboratoryjnymi wykonanymi przez Instytut Elektrotechniki (Warszawa-Międzylesie) [2].

Dzielnik rezystancyjny wykorzystano do porównania i oceny wyników pomiarów harmoniczných napięcia pomierzonych przy wykorzystaniu wybranych typów przekładników napięciowych wysokiego napięcia. Na podstawie pomiarów porównawczych będzie można określić przydatność przekładników napięciowych do pomiarów wyższych harmoniczných, a w niektórych przypadkach określić współczynniki korekcyjne.

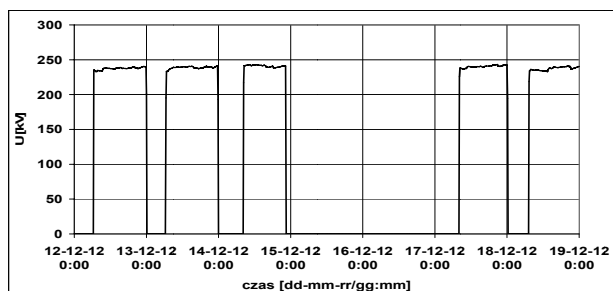
2. WYKONANIE POMIARÓW

Pomiary wyższych harmoniczných w sieci 400 kV wykonane zostały za pomocą analizatora typu UP-2210 produkcji szwedzkiej firmy Unipower. Na trzy niezależne wejścia napięciowe analizatora zostały wprowadzone jednocześnie sygnały pomiarowe tego samego napięcia fazowego pochodzące z: rezystancyjnego dzielnika napięcia, napięciowego przekładnika indukcyjnego oraz napięciowego przekładnika pojemnościowego. Pomiary były wykonywane przez okres jednego tygodnia, w dniach od 12.12.2012 r. (godz. 0:00) do 19.12.2012 r. (godz. 0:00). Poszczególne wielkości mierzone były w sposób ciągły (co pół okresu krzywej napięcia) i uśredniane w przedziałach 10-minutowych. Mierzone były wartości napięcia fazowego, wartości współczynników odkształcenia napięcia, wartości względne (procentowe) poszczególnych harmoniczných i ich kąty fazowe.

Wyniki pomiarów uzyskane z wykorzystaniem dzielnika rezystancyjnego, o charakterystyce przenoszenia niezależnej od częstotliwości, przyjęto jako referencyjne odnosząc do nich wyniki pomiarów uzyskane przy wykorzystaniu przekładników. Kąty fazowe poszczególnych harmoniczných wyznaczane były względem kąta fazowego podstawowej harmonicznej napięcia mierzonego przy wykorzystaniu dzielnika rezystancyjnego ($\varphi_{U1(d)} = 0^\circ$).

Pole 400 kV, w którym zainstalowany jest dzielnik rezystancyjny jest załączane okresowo, dlatego licznosc pró-

bek dla poszczególnych mierzonych wielkości wynosi 494 w okresie tygodniowym (zamiast 1008). Na rysunku 1 pokazano zmiany wartości skutecznej napięcia fazowego mierzonego w okresach załączenia dzielnika.



Rys. 1. Zmiany napięcia dzielnika w okresie pomiarowym

3. METODA OCENY WYNIKÓW POMIARÓW

Ocenę dokładności pomiaru wyższych harmonicznych i ich kątów fazowych przez przekładniki napięciowe przeprowadzono według następującej procedury:

- 1). Ze zbiorów względnych wartości wyższych harmonicznych i ich kątów fazowych zmierzonych przy wykorzystaniu poszczególnych przetworników (rezystancyjnego dzielnika napięcia, napięciowego przekładnika indukcyjnego oraz napięciowego przekładnika pojemnościowego) wyznaczono wartości średnie:

$$\bar{U}_{h\%} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{h\%,i}}{N}; \quad \bar{\varphi}_h = \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_{h,i}}{N} \quad (1)$$

gdzie: $U_{h\%,i}$ - wartość względna h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym, $\varphi_{h,i}$ - wartość kąta fazowego h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym, $N = 494$ - liczba pomiarów

oraz określono odchylenie standardowe:

$$\sigma_{U_{h\%}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_{h\%,i} - \bar{U}_{h\%})^2}{N}}; \quad \sigma_{\varphi_h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_{h,i} - \bar{\varphi}_h)^2}{N}} \quad (2)$$

- 2). Dla poszczególnych harmonicznych napięcia i ich kątów fazowych uzyskanych przy wykorzystaniu przekładników napięciowych (indukcyjnego bądź pojemnościowego) wyznaczono błędy przyjmując jako wartość referencyjną wynik pomiaru uzyskany za pomocą dzielnika rezystancyjnego:

$$\delta_{U_{h\%,i}} = \frac{U_{h\%,i(p)} - U_{h\%,i(d)}}{U_{h\%,i(d)}} 100\%; \quad (3)$$

$$\delta_{\varphi_{h,i}} = \varphi_{h,i(p)} - \varphi_{h,i(d)};$$

gdzie: $U_{h\%,i(p)}$ i $\varphi_{h,i(p)}$ - wartość względna h -tej harmonicznej i jej kąta fazowego w i -tym przedziale 10-minutowym zmierzone przy wykorzystaniu przekładnika napięciowego, $U_{h\%,i(d)}$ i $\varphi_{h,i(d)}$ - wartość względna h -tej harmonicznej i jej kąta fazowego w i -tym przedziale

10-minutowym zmierzona przy wykorzystaniu dzielnika rezystancyjnego

a następnie wyznaczono wartości średnie i odchylenia standardowe dla tych błędów:

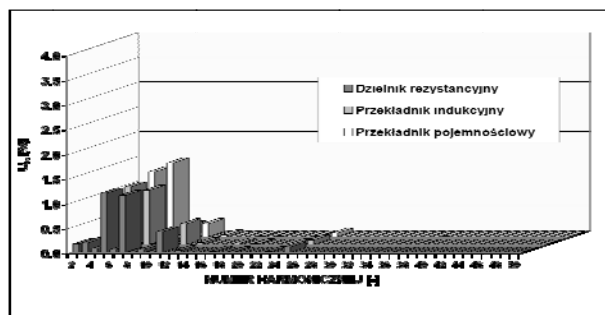
$$\bar{\delta}_{U_{h\%}} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{U_{h\%,i}}}{N}; \quad \bar{\delta}_{\varphi_h} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\varphi_{h,i}}}{N} \quad (4)$$

$$\sigma_{\delta_{U_{h\%}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{U_{h\%,i}} - \bar{\delta}_{U_{h\%}})^2}{N}}; \quad \sigma_{\delta_{\varphi_h}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{\varphi_{h,i}} - \bar{\delta}_{\varphi_h})^2}{N}} \quad (5)$$

4. WYNIKI POMIARÓW

4.1. Wyższe harmoniczne napięcia

Na rysunku 2 pokazano spektrum częstotliwościowe (widmo) i wartości średnie (udziały) wyższych harmonicznych zarejestrowanych w okresie pomiarowym.



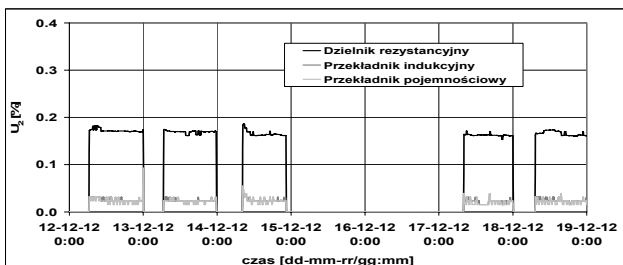
Rys. 2. Wartości średnie wyższych harmonicznych napięcia w okresie pomiarowym

Wartości średnie i odchylenia standardowe wybranych, wybranych, dominujących w widmie częstotliwościowym, harmonicznych napięcia zestawiono w tabelicy 1.

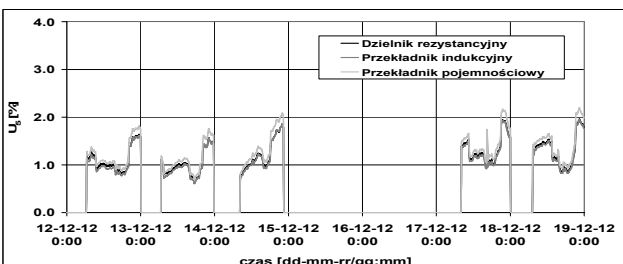
Tabela 1. Wartości średnie wyższych harmonicznych napięcia

Nr wh	Dzielnik rezystancyjny		Przekładnik indukcyjny		Przekładnik pojemnościowy	
	$\bar{U}_{h\%}$	$\sigma_{U_{h\%}}$	$\bar{U}_{h\%}$	$\sigma_{U_{h\%}}$	$\bar{U}_{h\%}$	$\sigma_{U_{h\%}}$
2	0,167	0,005	0,025	0,005	0,022	0,006
3	0,196	0,040	0,151	0,037	0,173	0,040
5	1,198	0,312	1,166	0,321	1,310	0,356
7	1,154	0,661	1,098	0,659	1,492	0,889
11	0,415	0,123	0,418	0,121	0,261	0,064
13	0,041	0,021	0,039	0,020	0,037	0,015

Na kolejnych rysunkach 3 i 4 przedstawiono zmiany wartości 2. (parzysta) i 5. (nieparzysta) wyższych harmonicznych zarejestrowane w okresie pomiarowym. Istotne różnice można zauważyć dla drugiej harmonicznej - wartości zmierzone przy zastosowaniu dzielnika są znacznie większe niż przy wykorzystaniu przekładników.



Rys. 2. Zmiany wartości drugiej harmonicznej napięcia



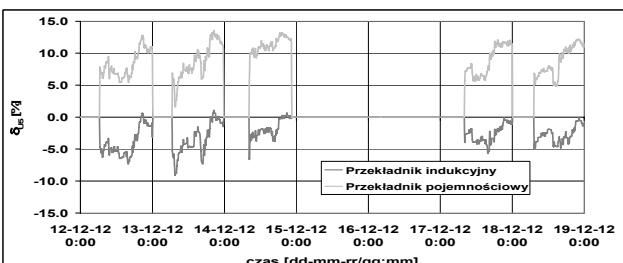
Rys. 3. Zmiany wartości piątej harmonicznej napięcia

W tabelicy 2 podano średnie wartości i odchylenia standardowe błędów pomiaru wybranych wyższych harmonicznych przez przekładniki napięciowe.

Tabela 2. Błędy pomiaru wyższych harmonicznych napięcia za pomocą przekładników

Nr wh	Przekładnik indukcyjny		Przekładnik pojemnościowy	
	$\bar{\delta}_{U_h\%}$	$\sigma_{\delta U_h\%}$	$\bar{\delta}_{U_h\%}$	$\sigma_{\delta U_h\%}$
2	-85,25	2,94	-86,61	3,44
3	-22,60	14,21	-11,43	8,47
5	-3,00	1,97	9,11	2,45
7	-6,30	3,34	27,82	5,60
11	0,93	1,58	-33,27	18,12
13	-4,77	11,80	6,42	51,89

Najmniejsze wartości błędów pomiaru wyższych harmonicznych za pomocą przekładników wystąpiły dla harmonicznych 5. i 7., czyli dla harmonicznych o największych wartościach. Dla ilustracji na rysunku 4 pokazano zmiany wartości błędów pomiaru wartości piątej harmonicznej.



Rys. 4. Zmiany wartości błędów pomiaru piątej harmonicznej napięcia

4.2. Kąty fazowe harmoniczne napięcia

Wartości średnie i odchylenia standardowe kątów wybranych harmonicznych napięcia zestawiono w tabelicy 3.

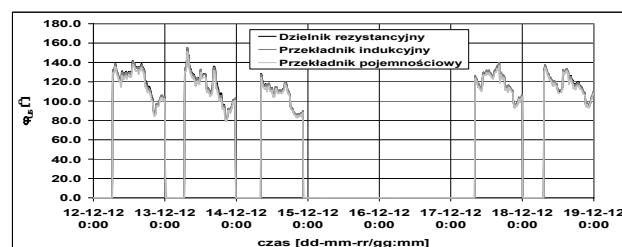
Tabela 3. Wartości średnie kątów fazowych wybranych harmonicznych napięcia

Nr wh	Dzielnik rezystancyjny		Przekładnik indukcyjny		Przekładnik pojemnościowy	
	$\bar{\varphi}_h$ [°]	$\sigma_{\varphi h}$ [°]	$\bar{\varphi}_h$ [°]	$\sigma_{\varphi h}$ [°]	$\bar{\varphi}_h$ [°]	$\sigma_{\varphi h}$ [°]
1	0,000	0,000	-0,102	0,157	-0,137	0,156
2	-87,414	0,792	-62,152	5,497	-98,495	5,195
3	-32,851	16,863	-41,984	24,105	-41,858	22,971
5	115,967	14,866	116,057	14,591	113,323	14,279
7	21,287	158,503	-2,843	158,863	7,131	158,547
11	14,167	22,034	22,403	21,404	-106,552	20,776
13	-11,621	57,641	-5,425	63,464	49,729	37,630

Na rysunku 5 pokazano zmiany kątów fazowych dla podstawowej harmonicznej napięcia (w przypadku pomiaru z wykorzystaniem dzielnika rezystancyjnego kąt fazowy jest stały i równy zero), a na rysunku 6 zmiany kątów fazowych dla piątej harmonicznej.



Rys. 5. Zmiany wartości kątów fazowych harmonicznej podstawowej napięcia w okresie pomiarowym



Rys. 6. Zmiany wartości kątów fazowych piątej harmonicznej napięcia w okresie pomiarowym

W tabelicy 5 podano średnie wartości i odchylenia standardowe błędów pomiaru kątów fazowych harmonicznych przez przekładniki napięciowe.

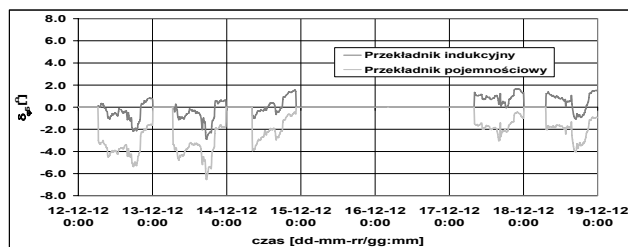
Tabela 5. Błędy pomiarów kątów fazowych wybranych harmonicznych napięcia

Nr wh	Przekładnik indukcyjny		Przekładnik pojemnościowy	
	$\bar{\delta}_{\varphi h}$ [°]	$\sigma_{\delta \varphi h}$ [°]	$\bar{\delta}_{\varphi h}$ [°]	$\sigma_{\delta \varphi h}$ [°]
1	-0,102	0,157	-0,137	0,156
2	25,262	5,210	-11,081	4,703
3	-9,133	9,877	-9,007	8,207
5	0,090	0,966	-2,644	1,281
7	-24,130	98,617	-14,156	77,402
11	8,236	0,758	-120,719	20,359
13	6,196	30,377	61,351	72,447

Najmniejsze błędy pomiarów kątów fazowych zaobserwowano dla harmonicznej podstawowej i dla harmonicznej

nej piątej. Natomiast stosunkowo duże błędy wystąpiły dla siódmej harmonicznej.

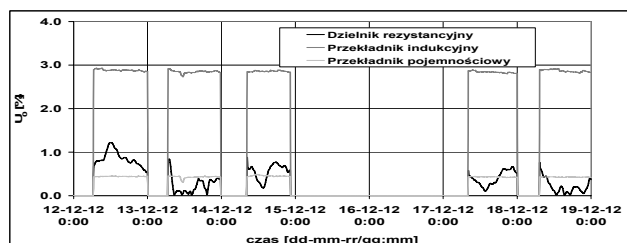
Na rysunku 7 pokazano zmiany wartości błędów pomiaru wartości kątów fazowych dla piątej harmonicznej.



Rys. 7. Zmiany wartości błędów pomiarowych kątów fazowych piątej harmonicznej napięcia w okresie pomiarowym

4.3. Składowa stała napięcia

Oddzielnego potraktowania wymaga problem przeniesienia przez przetworniki pomiarowe składowej stałej napięcia. Na rysunku 8 pokazano zmiany wartości składowej stałej zmierzone w okresie pomiarowym za pomocą poszczególnych przetworników pomiarowych.



Rys. 8. Zmiany wartości składowej stałej napięcia

Przy pomiarach z wykorzystaniem przekładników napięciowych zarejestrowano składową stałą o praktycznie stałych wartościach różniących się jednak znacznie dla przekładnika indukcyjnego i pojemnościowego. Natomiast dla pomiarów z użyciem dzielnika rezystancyjnego składowa stała ma wartości zmieniające się w czasie.

5. PODSUMOWANIE

Dzielnik napięcia został wykonany przez firmę TRANSFORMEX w wyniku realizacji pracy rozwojowej p.t. „Projekt i budowa rezystancyjnego dzielnika napięcia do pomiarów wyższych harmonicznych napięcia w sieci 400 kV” zleconej i sfinansowanej przez PSE S.A. w ramach umowy nr IF/RB/IF/10/TK/2008. Analiza wyników pomiarów wyższych harmonicznych napięcia została przeprowadzona przez Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej

w wyniku realizacji pracy badawczej p.t. „Pomiary wyższych harmonicznych napięcia w sieci 400 kV” zleconej przez PSE S.A. w ramach umowy DS/RB/DE/8/TK/2012. Wyniki badań stanowią własność PSE S.A.

Zainstalowanie dzielnika rezystancyjnego umożliwiło wykonanie pomiarów porównawczych wyższych harmonicznych napięcia w sieci 400 kV przy zastosowaniu przekładników napięciowych: indukcyjnego i pojemnościowego oraz dzielnika. Na podstawie pomiarów oszacowano błędy powstające przy pomiarach wartości i kątów fazowych harmonicznych napięcia wykonywanych przy wykorzystaniu przekładników.

Najlepszą dokładność pomiaru harmonicznych za pomocą przekładników uzyskano dla harmonicznej piątej i siódmej, dominujących w spektrum częstotliwościowym napięcia. Znacznie mniejszą dokładnością charakteryzuje się pomiar harmonicznych o udziałach poniżej 0,2 %. Wyniki pomiarów sugerują, że w sposób odrębny należy traktować harmoniczne nieparzyste i parzyste.

Przy pomiarach kątów fazowych wyższych harmonicznych zadawalającą dokładność pomiaru za pomocą przekładników uzyskano tylko dla harmonicznej podstawowej i harmonicznej piątej. Dla pozostałych harmonicznych błędy są stosunkowo duże, a poza tym cechuje je duża zmienność wartości.

Oddzielnym problemem jest całkowicie różny charakter przeniesienia składowej stałej napięcia przez przekładniki napięciowe i przez dzielnik rezystancyjny. Dla przekładników są to wartości praktycznie stałe w czasie, ale różne w zależności od rodzaju przekładnika, natomiast dla dzielnika wartość składowej stałej zmienia się w czasie.

Bardziej ogólne wnioski będzie można sformułować po wykonaniu pomiarów w dłuższym okresie czasu.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Mieński R., Pawełek R., Wasiak I.: On the Need to Control Power Quality in Polish Electrical Networks. *Electrical Power Quality and Utilisation*, 1999, vol. 5, No 2, s. 21-27, ISSN 1234-6799
2. Błajszczak G., Olak J.: Rezystancyjny dzielnik napięcia do pomiarów wyższych harmonicznych w sieciach 400 kV, Konferencja: Aktualne Problemy w Elektroenergetyce (APE'11), Jurata, 8-10 czerwca 2011, s. 97-104, ISBN 978-83-931317-0-9
3. Błajszczak G.: Resistive Voltage Divider for Higher Harmonics Measurement in 400 kV Network, IEEE 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU'2011), Lisbon (Portugal), 17-19 October 2011, s. 1-4, ISBN 978-1-4673-0378-1

MEASUREMENTS OF VOLTAGE HARMONICS IN 400 kV TRANSMISSION NETWORK – CONFERENCE PAPER

Key-words: voltage harmonics, power quality, power quality measurements.

The paper deals with the analysis of voltage harmonics measurements performed in the transmission network of 400 kV. The voltage was measured by means of three transducers: resistive voltage divider, inductive measuring transformer and capacitive voltage measuring transformer. Instrument errors were estimated for measuring transformers with reference to the harmonic values obtained from the voltage divider.